Mémoire pour l'obtention du titre de Master en Sciences géographiques, orientation Global Change, à finalité approfondie

Vidange de lacs glaciaires : Inventaire des lacs glaciaires en Valais (Suisse) et évaluation de leur susceptibilité de vidange

Nelle HANSENNE
Défense : Septembre 2026

Promotrice : **Dr. Saskia GINDRAUX**
Co-promoteur : **Dr. Christoph KITTEL**
Président du Jury : **Pr. Xavier FETTWEIS**
Jury de lecture : **Pr. Xavier FETTWEIS & Pr. Serge SCHMITZ**

Université de Liège
Faculté des Sciences
Département de Géographie
Année académique 2025 - 2026

Remerciements

Je tenais premièrement à remercier la Dr. Saskia Gindraux de m'avoir donné l'opportunité de réaliser mon stage au Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) durant l'été 2025 et de poursuivre mes recherches à travers la réalisation de ce mémoire. Je suis profondément reconnaissante pour son temps, son implication et son intérêt depuis le début de la réalisation de ce travail jusqu'à sa fin. Je voulais la remercier également de m'avoir fait découvrir le domaine de la glaciologie ainsi que la région du Valais.

Je souhaitais également remercier le Dr. Christoph Kittel d'avoir accepté d'être le co-promoteur de ce mémoire à l'Université de Liège et d'avoir rendu possible sa réalisation. Je voulais aussi remercier les Professeurs Xavier Fettweis et Serge Schmitz d'avoir accepté de faire partie du jury de lecture de ce mémoire, en espérant qu'ils en apprécieront le contenu.

Enfin, je tenais à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien durant mes années d'études, et en particulier pour ces derniers mois.

Résumé

Le retrait des glaciers figure parmi les conséquences les plus marquées du réchauffement climatique dans les milieux alpins, entraînant une modification profonde des paysages de haute montagne. Parmi ces changements, la formation de nouveaux lacs glaciaires constitue un enjeu majeur dans les régions peuplées comme les Alpes. En effet, ces lacs peuvent être à l'origine de vidanges soudaines susceptibles d'entraîner des conséquences socio-économiques pour les populations et les infrastructures en aval. En parallèle, la déstabilisation des versants, favorisée par la dégradation du permafrost, se traduit par une augmentation de la fréquence des chutes de pierres et des éboulements, eux-mêmes susceptibles d'initier des vidanges. De nombreuses études sont d'ailleurs consacrées aux vidanges de lacs glaciaires à l'échelle mondiale, notamment sur la gestion et l'évaluation des risques associés. En Suisse, le Valais est particulièrement exposé face à ce phénomène puisque ce canton abrite la majorité des masses glaciaires du pays et devrait accueillir le plus grand nombre de lacs glaciaires futurs selon les modélisations. C'est pourquoi le développement d'inventaires de lacs glaciaires et l'évaluation de leur susceptibilité de vidange constituent des étapes essentielles dans la gestion de ce risque croissant.

Ce travail propose une première évaluation de la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires actuels du Valais. Cette évaluation repose sur le développement d'un inventaire et d'un indice de susceptibilité de vidange construit suivant une approche experte, largement mobilisée dans ce domaine. L'inventaire a permis de recenser 659 lacs dans un tampon de 500 m autour des glaciers actuels et jusqu'à 1 km en aval, répartis sur l'ensemble des zones englacées du canton. Onze paramètres, ou quatorze pour les lacs endigués par une moraine, préalablement sélectionnés dans la littérature, ont ensuite été identifiés comme influençant la susceptibilité de vidange d'un lac, tels que les matériaux du barrage, la superficie ou encore les processus gravitaires. Ils ont ensuite été répertoriés au sein de l'inventaire. Ces paramètres, discrétisés en classes de susceptibilité et combinés dans un indice synthétique, ont permis d'identifier 580 lacs comme présentant une susceptibilité de vidange faible et 79 comme ayant une susceptibilité de vidange élevée.

Ce travail met en évidence la complexité des processus impliqués dans les vidanges de lacs glaciaires ainsi que la difficulté à les prédire, tout en soulignant les limites associées à l'estimation des risques de vidange. L'évaluation de l'indice de susceptibilité, réalisée au regard de la classification experte, révèle les limites de l'hypothèse d'équipondération retenue dans ce travail. Au total, ce travail constitue une première approche de l'évaluation de la susceptibilité de vidange de lacs glaciaires en Valais et ouvre des perspectives quant à l'amélioration de l'indice en vue d'orienter la mise en place de mesures de gestion adaptées.

Mots-clés : Lac glaciaire, Inventaire des lacs, Vidange de lac glaciaire, Susceptibilité de vidange, Évaluation du risque, Alpes suisses (Valais)

Abstract

Glacier retreat is among the most pronounced consequences of climate change in Alpine environments, leading to profound changes to high-mountain landscapes. A notable landscape modification is the formation of new glacial lakes, which constitutes a major challenge in populated regions such as the Alps. Indeed, these lakes can generate sudden glacial lake outburst floods (GLOFs), which can have downstream socio-economic consequences both for populations and infrastructure. At the same time, the destabilisation of mountain slopes, favoured by permafrost degradation, leads to an increase in the frequency of rockfalls and rockslides, which may in turn trigger GLOFs. Numerous studies worldwide have focused on GLOFs, in particular on hazard assessment. In Switzerland, the Canton of Valais is particularly exposed to GLOFs, as it contains most of the country's glacierised area and is expected to contain the majority of the modelled future glacial lakes. Therefore, developing a glacial lake inventory together with an assessment of their GLOF susceptibility is an essential step in the management of this growing natural hazard.

This study provides a first assessment of the susceptibility of existing glacial lakes to outburst in Valais. This assessment is based on the development of an inventory and on the construction of a susceptibility index following an expert-based approach, which is widely used in the field. The inventory identifies 659 lakes within a 500 m buffer around present-day glaciers and up to 1 km downstream, distributed across the glacierised areas of the canton. Next, eleven parameters, or fourteen in the case of moraine-dammed lakes, were identified from the literature as influencing GLOF susceptibility. These include dam material, lake area, and mass-movement processes, and were recorded in the database. The parameters were then discretised into susceptibility classes and combined in a composite susceptibility index. This index classified 580 lakes as having low GLOF susceptibility and 79 as exhibiting high susceptibility.

This study also highlights the complexity of the processes involved in GLOFs and the difficulty of predicting such events, while underlining the limitations associated with glacial lake hazard assessment. The evaluation of the susceptibility index through a comparison with the expert classification highlights the limitations of the equal-weighting assumption used in this study. Overall, this study represents a first approach to assessing GLOF susceptibility in Valais. It provides perspectives for improving the susceptibility index in order to guide the implementation of appropriate management measures.

Keywords: Glacial lake, Lake inventory, Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs), GLOF susceptibility, Hazard assessment, Swiss Alps (Valais)

Table des matières

1. INTRODUCTION 17

1.1. ZONE DE L'ÉTUDE : LE CANTON DU VALAIS (SUISSE) 18
1.2. LACS GLACIAIRES ET DYNAMIQUE DE VIDANGE 20
1.2.1. Lacs glaciaires 20
1.2.2. Vidanges de lacs glaciaires 24
1.2.3. Mécanismes de vidange 26
1.2.4. Paramètres hydro-géomorphologiques 30
1.3. HISTORIQUE DES VIDANGES DE LACS GLACIAIRES EN VALAIS 33
1.4. NOTION DE RISQUE 35
1.4.1. Risque 35
1.4.2. Aléa 35
1.4.3. Exposition et conséquences socio-économiques 36
1.4.4. Vulnérabilité et résilience 38
1.5. GESTION ET ATTÉNUATION DU RISQUE DE VIDANGE 38
1.5.1. Mesures organisationnelles 39
1.5.2. Mesures structurelles 41
1.6. ÉVOLUTION FUTURE DES LACS GLACIAIRES 52
1.7. QUESTION DE RECHERCHE 55

2. MÉTHODOLOGIE 57

2.1. INVENTAIRE DES LACS GLACIAIRES 57
2.1.1. Sélection des paramètres 57
2.1.2. Élaboration de la base de données 62
2.2. INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ DE VIDANGE 73
2.2.1. Prétraitement et nettoyage des données 74
2.2.2. Classification et attribution des scores 74
2.2.3. Description des paramètres 75

3. RÉSULTATS 79

3.1. INVENTAIRE DES LACS GLACIAIRES 79
3.1.1. Distribution spatiale 79
3.1.2. Caractéristiques générales 80
3.1.3. Caractéristiques internes 82
3.1.4. Caractéristiques externes 84
3.2. INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ DE VIDANGE 86
3.2.1. Première évaluation : Trois niveaux de susceptibilité de vidange 86
3.2.2. Deuxième évaluation : Deux niveaux de susceptibilité de vidange 91
3.2.3. Distribution spatiale et caractéristiques 92

4. DISCUSSION 95

4.1. INVENTAIRE DES LACS GLACIAIRES 95
4.1.1. Limites de la méthodologie 97
4.2. INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ DE VIDANGE 100
4.2.1. Limites de la méthodologie 101
4.3. VIDANGE DE LACS GLACIAIRES EN VALAIS 103
4.3.1. Évolution future 103
4.3.2. Mesures de mitigation 104
4.3.3. Échelle mondiale 104

5. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS 107

5.1. INDICE DE SUSCEPTIBILITÉ DE VIDANGE : MOYENNE PONDÉRÉE 107
5.2. MODÉLISATION DE LA PROPAGATION 107
5.3. IDENTIFICATION DES ENJEUX 108
6. CONCLUSION 109
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 111
ANNEXES 123

Liste des figures

Figure 1 : Le canton du Valais, Suisse 19

Figure 2 : a) Lac de Faverges, Glacier de la Plaine Morte, canton du Valais et de Berne, Suisse (GEOPRAEVENT AG, s.d.). b) Lac de Grand Croux, Massif du Grand Paradis, Val de Cogne, Italie (Troilo et al., 2025). c) Lac de Märjelen, Glacier d'Aletsch, 2007, Valais, Suisse (Holzhauser, 2020). d) Lac sur le Glacier de Rochemelon, Bessans, France (RTM, 2006). 22

Figure 3 : a) Lac sur le Glacier de Grindelwald, Berne, Suisse (Géomorphologie de la montagne froide, 2021). b) Lac bleu, Massif du Mont Blanc, Chamonix, France (Demolis et al., 2023). c) Lac situé dans les Alpes orientales, Felbertal, Autriche (Otto, 2018). d) Lac Oschapalca en 2013, Cordillère Blanche péruvienne (Emmer et al., 2022a). 23

Figure 4 : a) Glacier du Rhône et le lac qui s'est formé en aval, Valais, Suisse (Schaerer, s.d.). b) Glacier de Saint-Sorlin et les lacs qui se sont formés en aval, France (Cathala, 2024). c) Lac Churup en 2015, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a). d) Lac Arteson endigué par le bedrock avec une fine couche de dépôt morainique en 2017, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a)..... 24

Figure 5 : en haut) Vidange du lac de Grand Croux en août 2016, Val de Cogne, Italie (Demolis et al., 2023). En bas) Vidange du Lac des Faverges du 5 au 8 août 2014, Glacier de la Plaine Morte, Valais et Berne, Suisse (GEOPRAEVENT, 2014). 25

Figure 6 : a) Moraine non végétalisée menaçant de glisser, lac de Grindelwald, canton de Berne, Suisse (Sättele & Bründl, 2015). b) Présence de pics rocheux englacés évoluant dans des conditions de dégradation du permafrost pouvant initier des processus gravitaires dans le lac proche du glacier du Gorner, Valais, Suisse (Géomorphologie de la montagne froide, 2021). c) Lac de Märjelen en contact avec un glacier pouvant initier le processus de vêlage, Glacier d'Aletsch en 1976, Valais, Suisse (Holzhauser, 2020). d) Lac Obersulzbachtal dans un environnement en déglaciation, Alpes orientales, Autriche (Otto, 2018). 27

Figure 7 : a) Formation d'une brèche dans le barrage morainique à la suite de la vidange du lac de la Patinoire à Pralognan la Vanoise en 1964, France (Demolis et al., 2023). b) Rupture du barrage de moraine du lac Milluacocha en 2015 et cône de débris, vallée d'Ishinca, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a). c) Rupture du barrage de moraine du lac Jancarurish en 1950, vallée de Los Cedros, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2013). d) Rupture du verrou de glace retenant le lac de la Galise en août 2015, Val d'Isère, France (Demolis et al., 2023). 29

Figure 8 : Répartition des vidanges de lacs glaciaires en Valais selon la typologie des lacs et le nombre d'événements (1800-2022)..... 34

Figure 9 : a) Lac du glacier de Bonne Pierre, le 13 juin 2024, France. b) Lac du glacier de Bonne Pierre après sa vidange, le 28 juin 2024 (RTM, 2025). 36

Figure 10 : Hameau de la Bérarde. a) Orthophoto de 2021 avant la crue. b) Orthophoto de 2024 après la crue (RTM, 2025). 36

Figure 11 : Dommages associés à la crue du torrent des Étançon. a) Le hameau de la Bérarde le 22 juin 2024. b) Maison ensevelie sous les matériaux mobilisés par la crue. c) Destruction partielle et totale des bâtis du hameau (RTM, 2025). 37

Figure 12 : a) Station de surveillance constituée d'une webcam, sonde de pression, enregistrement et transmission de données sur le Lac des Faverges, Glacier de la Plaine Morte, Suisse. b) Radar de niveau sur le Trüebbach pour la détection précoce d'inondations, Glacier de la Plaine Morte, Suisse (GEOPRAEVENT AG, s.d.). 41

Figure 13 : Mesures structurelles passives. a) Succession de plages de dépôts d'une capacité de 100 000 m^3, Chatelard, forêt domaniale RTM du Nant des Granges, France (Geay & Martin, 2025). b) Structure de rétention des sédiments à Täsch, en aval du lac de Weingarten, Suisse (Niggli et al., 2024). 42

Figure 14 : Consolidation du barrage. a) Barrage artificiel augmentant la hauteur de franc-bord sur le lac Palcacocha en 2012, Cordillère Blanche, Pérou. b) Barrage artificiel et chenal consolidé sur le lac Llaca en 2012, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a)..... 43

Figure 15 : Système de pompage sur le lac de Grand Croux, Italie. a) Vue d'ensemble du système (Troilo et al., 2025). b) Vue sur une des pompes utilisées (Fondazione Montagna Sicura, 2019)..... 43

Figure 16 : a) Système de siphonage pour vidanger le lac de Rochemelon, France. b) Les tuyaux provisoires en Janolène (rouge) et les tuyaux en PEHD. c) Le lac de Rochemelon avec son niveau abaissé de 5 m (RTM, 2006). 45

Figure 17 : a) & b) Bâches géotextiles mises en place sur le glacier du Rhône pour limiter sa fonte localement (Huss et al., 2021 ; Lässig, 2021). 47

Figure 18 : a) Terrassement et creusement d'un chenal dans la glace pour vidanger totalement le lac des Bossons, France, à l'aide d'une pelle araignée. b) Terrassement à l'amont du chenal et mise en eau du chenal. c) Incision du chenal par l'écoulement de l'eau. d) Vue de l'ensemble (Demolis & Duperthuy, 2024). 48

Figure 19 : Creusement d'une galerie sous-glaciaire, Glacier de la Plaine Morte, Suisse. a) Vue d'ensemble du site. b) Les machines utilisées pour le forage. c) Sur le plafond de la galerie, la trace du forage peut être observée (Geay & Martin, 2025). 50

Figure 20 : Tunnel creusé dans la roche, Grindelwald, Suisse. a) Réalisation des travaux (Geay & Martin, 2025). b) Vue de l'extérieur (Kull, 2019). 51

Figure 21 : Futurs lacs glaciaires au niveau du Grand Glacier d'Aletsch et du glacier du Fiescher, Valais, Suisse. 53

Figure 22 : a) Évolution temporelle du volume potentiel total des lacs glaciaires futurs suivant les cinq scénarios SSP, sans prendre en compte la sédimentation. Le volume total possible suite à la disparition de tous les glaciers est représenté par la ligne noire pointillée. b) Évolution temporelle de l'apport sédimentaire dans les nouveaux lacs glaciaires pour les différents scénarios SSP. c) Évolution du nombre effectif des nouveaux lacs glaciaires en prenant en compte la sédimentation pour les différents scénarios (Steffen et al., 2022a)..... 54

Figure 23 : Lac endigué par a) de la glace b) le bedrock c) une moraine de fond dont la succession végétale est pionnière. d) Lac endigué par une moraine dont la succession végétale est intermédiaire. e) Lac endigué par une moraine caractérisée par une succession végétale avancée. f) Présence de permafrost dans la moraine endiguant le lac..... 65

Figure 24 : a) Lac glaciaire endigué par le bedrock avec une superficie de 56,24 m^2 et un volume de 31,78 m^3. Il s'agit du plus petit lac de la base de données. b) Lac en aval du glacier du Rhône endigué par le bedrock qui a une superficie de 163 342,12 m^2 et un volume associé de 2 628 044,79 m^3. Il s'agit du lac avec la plus grande superficie de la base de données..... 67

Figure 25 : a) Lac avec un déversoir situé en haut à droite de l'image. b) Lac sans déversoir. 68

Figure 26 : Un des profils topographiques réalisés sur les lacs sans déversoir de l'inventaire. En haut) Le profil topographique montre une hauteur de franc-bord inférieure à 3 m. En bas) Le profil topographique indique une hauteur de franc-bord supérieure à 3 m. 69

Figure 27 : a) Lac glaciaire formé proche de parois rocheuses pouvant être à l'origine d'une surverse. b) Présence de permafrost dans les parois rocheuses proches du lac induisant une augmentation de l'instabilité et une susceptibilité de chute accrue. 71

Figure 28 : Lacs en contact direct avec un glacier pouvant engendrer le processus de vêlage et mener à une surverse. a) Les blocs de glace sont directement visibles à la surface du lac. b) Il s'agit ici d'un glacier recouvert de débris. 71

Figure 29a et b : Présence de moraines non végétalisées aux abords de lacs glaciaires pouvant entraîner des glissements de terrain et mouvements de masse directement dans le lac et provoquer une surverse. 72

Figure 30 : Classification experte de la susceptibilité de vidange des lacs de l'inventaire. a) Lac à susceptibilité de vidange faible. b) Lac à susceptibilité de vidange élevée..... 73

Figure 31 : Lacs glaciaires répertoriés en Valais selon la typologie et la superficie des lacs. 79

Figure 32 : a) Distribution de la superficie des lacs. b) Pourcentage cumulatif de la superficie des lacs de la base de données. c) Répartition des lacs selon l'altitude et les matériaux du barrage. d) Relation entre l'altitude et la superficie selon les matériaux du barrage..... 80

Figure 33 : a) Répartition des lacs selon les matériaux du barrage. Sous-paramètres relatifs aux barrages de moraine. b) Présence de permafrost. c) Succession végétale. d) Pente aval moyenne de la moraine. 82

Figure 34 : a) Lacs avec et sans déversoir. b) Paramètre du franc-bord évalué pour les lacs sans déversoir. c) Répartition du nombre de lac selon la période de formation. d) Distribution de la période de formation selon l'altitude. 83

Figure 35 : a) Distribution de la taille du bassin versant selon la superficie du lac (distribution logarithmique). b) Répartition des processus gravitaires (éboulement parois, permafrost dans les parois, chutes de pierre, contact glacier-lac et moraines non végétalisées). c) Distribution des processus gravitaires selon l'altitude. 85

Figure 36 : Distribution des valeurs obtenues pour l'indice de susceptibilité. a) Avant normalisation. b) Après normalisation. 86

Figure 37 : Matrice de confusion pour les trois niveaux de susceptibilité. a) Échantillon test. b) Ensemble de la base de données. 89

Figure 38 : Matrice de confusion pour les deux niveaux de susceptibilité. a) Échantillon test. b) Ensemble de la base de données. 91

Figure 39 : Susceptibilité de vidange des lacs glaciaires en Valais, Suisse. 93

Liste des tableaux

Tableau 1 : Formules de détermination du débit de pointe en fonction du type de barrage en reliant le débit de pointe ($Q_{p)}$ au volume de vidange (V) et à la profondeur du lac ou à la hauteur du barrage (D) avec ρ_W = densité de l'eau (kg/m³) et g = accélération de la gravité (m/s²). Traduit d'après Huggel et al. (2004) & Mergili & Schneider (2011)..... 31

Tableau 2 : Relations empiriques pour estimer la distance de parcours de vidange de lac glaciaire avec L, la distance de parcours ; V_d, le volume de la lave torrentielle ; ΔZ, la variation d'altitude ; ω_r, la pente moyenne du parcours et Q_p, le débit de pointe. Traduit d'après Mergili & Schneider (2011) et Gruber & Mergili (2013). 32

Tableau 3 : Paramètres de base repris dans la littérature. 58

Tableau 4 : Paramètres relatifs à la stabilité du barrage repris dans la littérature. 59

Tableau 5 : Paramètres repris dans la littérature caractérisant l'environnement autour du lac ainsi que les processus externes susceptibles d'entraîner une vidange. 60

Tableau 6 : Caractéristiques générales attribuées à chaque lac. 63

Tableau 7 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité interne de vidange d'un lac glaciaire. .. 64

Tableau 8 : Facteurs considérés dans l'évaluation de la susceptibilité externe de vidange d'un lac glaciaire..... 70

Tableau 9 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité interne de vidange ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés. 75

Tableau 10 : Sous-paramètres considérés dans le score final pour les barrages endigués par une moraine ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés. 76

Tableau 11 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité externe de vidange ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés. 78

Tableau 12 : Statistiques du paramètre altitude selon les matériaux. 81

Tableau 13 : Statistiques du paramètre superficie selon les matériaux. 81

Tableau 14 : Croisement du paramètre permafrost avec les éboulements et chutes de pierres. 85

Tableau 15 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité de vidange (classification experte) au sein de l'échantillon d'entraînement (70 %). 87

Tableau 16 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité de vidange (classification experte) au sein de l'échantillon de test (30 %). 87

Tableau 17 : Métriques de performance pour l'échantillon test. 89

Tableau 18 : F1-score pour les différentes classes de susceptibilité de l'échantillon test. 89

Tableau 19 : Statistiques descriptives pour l'indice de susceptibilité normalisé selon les trois classes (faible, moyen et élevé) pour la classification experte. 90

Tableau 20 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité (classification experte) au sein de l'échantillon d'entraînement (70 %). 91

Tableau 21 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité (classification experte) au sein de l'échantillon de test (30 %). 91

Tableau 22 : Métriques de performance pour l'échantillon test. 92

Tableau 23 : F1-score pour les différentes classes de susceptibilité pour l'échantillon test. 92

Tableau 24 : Comparaison entre la répartition des paramètres de susceptibilité interne des lacs de la base de données et les lacs à susceptibilité de vidange élevée. 94

Tableau 25 : Comparaison entre les sous-paramètres des barrages de moraine des lacs de la base de données et des lacs à susceptibilité élevée. 94

Tableau 26 : Comparaison entre la répartition des paramètres de susceptibilité externe des lacs de la base de données et les lacs à susceptibilité de vidange élevée. 95

1. Introduction

Les vidanges de lacs glaciaires correspondent à un relâchement soudain de l'eau retenue par un lac glaciaire (Emmer et al., 2022a, 2022b). Les processus déclencheurs de ces événements sont complexes et peuvent être causés par des mouvements de masse, des épisodes de fonte nivale et glaciaire ou encore par la dégradation du barrage qui retient le lac (Taylor et al., 2023). Des événements de vidanges de lacs glaciaires ont été observés dans la plupart des grandes régions englacées du monde telles que l'Himalaya, l'Asie centrale, l'Amérique du Nord, les Andes, la Nouvelle-Zélande ou encore les Alpes (Mergili & Schneider, 2011 ; Taylor et al., 2023). Par ailleurs, dans les Alpes européennes, ces événements sont enregistrés depuis plusieurs siècles, avec des observations datant des années 1500 (Carrivick & Tweed, 2016).

Si les vidanges de lacs glaciaires constituent un risque naturel associé aux processus glaciaires, le contexte actuel du réchauffement climatique accentue ce phénomène (Emmer & Vilímek, 2014 ; Taylor et al., 2023). En effet, le retrait des glaciers, figurant parmi les effets les plus visibles du changement climatique dans les environnements alpins (Nussbaumer et al., 2014), favorise la formation de nouveaux lacs glaciaires (Ayala et al., 2020 ; Haeberli et al., 2016, 2017 ; Mölg et al., 2021b ; Steffen et al., 2022a). En Suisse, cette dynamique est particulièrement marquée puisqu'elle abrite environ 60 % du volume total de glace des Alpes européennes (Ayala et al., 2020). La superficie des glaciers suisses est par ailleurs passée de 1 311 km^2 en 1973 à 961 km^2 en 2016, soit une diminution de 26,7 % ou de 0,6 % par an (Linsbauer et al., 2021). Le Valais concentre environ 80 % du volume de glace suisse (Ayala et al., 2020), ce qui en fait un territoire particulièrement concerné par cette évolution ainsi que par la formation actuelle et future des lacs glaciaires. En parallèle, le réchauffement climatique entraîne également la dégradation du permafrost, une augmentation de la fréquence des chutes de pierres et l'instabilité des versants suite au retrait glaciaire (Haeberli et al., 2016 ; Mourey et al., 2022 ; Nussbaumer et al., 2014), renforçant ainsi le risque associé aux vidanges de lacs glaciaires (Mölg et al., 2021b).

Cette évolution soulève plusieurs enjeux. En effet, les vidanges de lacs glaciaires peuvent perturber les systèmes fluviaux sur plusieurs dizaines voire centaines de kilomètres en aval de leur source, avec des conséquences pour l'environnement ainsi que pour les communautés vivant en aval (Emmer & Vilímek, 2014 ; Lützow et al., 2023 ; Mölg et al., 2021b). La croissance démographique, en parallèle avec le développement socio-économique, a entraîné une augmentation des personnes et des infrastructures exposées aux processus et risques naturels dans les environnements montagneux (Lützow et al., 2023). À l'échelle mondiale, environ 15 millions de personnes seraient potentiellement exposées au risque de vidange de lacs glaciaires (Taylor et al., 2023). Ces nouveaux lacs représentent toutefois des opportunités en termes de production hydroélectrique, de ressource en eau et d'attraction touristique (Lützow et al., 2023 ; Mölg et al., 2021b).

Dans le contexte climatique actuel, l'intérêt scientifique relatif aux processus de vidange de lacs glaciaires est croissant (Emmer et al., 2022b ; Schupbach, 2024). À l'échelle de la Suisse, plusieurs études se sont concentrées sur des cas d'études spécifiques, tels que la formation d'un

lac glaciaire sur la langue du glacier inférieur de Grindelwald (Werder et al., 2010), la vidange du lac de Weingarten (Huggel et al., 2003), celles associées au glacier du Gruben (Huggel et al., 2003 ; Haeberli et al., 2001) ou du Gornersee (Huss et al., 2007), ou encore celles du lac des Faverges (Huss et al., 2013 ; Lindner et al., 2020 ; Ogier et al., 2021), tandis qu'un seul inventaire des lacs glaciaires a été réalisé (Mölg et al., 2021b). En Valais, Schupbach (2024) a réalisé une base de données des vidanges survenues entre 1818 et 2022 afin d'analyser l'évolution du risque. Ces travaux constituent des bases solides mais soulignent également le manque d'une évaluation systématique de la susceptibilité des lacs glaciaires à produire une vidange et l'absence d'une stratégie de gestion des risques associés aux vidanges de ces lacs (Mölg et al., 2021b).

De manière générale, la première étape des études relatives aux vidanges de lacs glaciaires et à l'évaluation des risques associés vise à comprendre le processus, à identifier les mécanismes déclencheurs ainsi que la susceptibilité d'un lac à produire une vidange (Emmer et al., 2022a ; Schupbach, 2024). Les étapes qui suivent portent sur la simulation de la propagation de la vidange en aval tout en tenant compte de l'occupation du sol afin de déterminer les enjeux exposés et d'orienter les éventuelles mesures de mitigation (Emmer et al., 2022a ; Nussbaumer et al., 2014 ; Schupbach, 2024). Ainsi, l'objectif de ce travail est de réaliser une base de données regroupant les lacs glaciaires en Valais et d'identifier, sur la base de la littérature, les paramètres et mécanismes déclencheurs associés à chaque lac afin d'évaluer leur susceptibilité de vidange. Le présent travail constitue donc la première étape dans une évaluation plus large du risque de vidange de lacs glaciaires en Valais.

Ce travail est divisé en quatre parties. La première partie vise à présenter la zone d'étude, définir les lacs glaciaires, les mécanismes de vidange ainsi que les paramètres hydro-géomorphologiques associés. La notion de risque et les composantes associées seront également abordées dans le contexte des vidanges de lacs glaciaires, ainsi que la gestion et l'atténuation de ce risque en présentant des études de cas. Enfin, l'évolution future des lacs glaciaires en Suisse et en Valais sera discutée. La seconde partie présente la méthodologie relative à la sélection des paramètres qui seront utilisés dans ce travail, à la réalisation de l'inventaire et de l'indice de susceptibilité de vidange, tandis que la troisième partie décrit les résultats associés. La quatrième partie a pour but de discuter les résultats et la méthodologie employée. Les perspectives qu'offre ce travail seront également abordées. Le travail se terminera par une conclusion.

1.1. Zone de l'étude : le canton du Valais (Suisse)

Les Alpes couvrent environ deux tiers de la superficie de la Suisse et occupent ainsi une place importante (Linsbauer et al., 2021). Les conditions climatiques et topographiques ont conduit à une glaciation asymétrique entre l'ouest et l'est des Alpes suisses, avec la majorité des glaciers se situant dans les Alpes pennines, également appelées Alpes valaisannes, ainsi que dans les Alpes bernoises et centrales (Fischer et al., 2014a ; Linsbauer et al., 2021). La distribution de la taille des glaciers est hétérogène et varie spatialement au sein du pays, avec les petits et très petits glaciers, bien que plus nombreux, qui représentent une surface glaciaire totale nettement inférieure à celle des glaciers de grande taille, moins nombreux, mais dominants en termes de

surface glaciaire (Linsbauer et al., 2021). Le volume de glace des glaciers suisses représente environ 60 % du volume total de glace des Alpes européennes, et la superficie totale des glaciers suisses s'élevait à 961 (± 22) km^2 en 2016[1], soit une diminution de 26,7 % par rapport à 1973 (Ayala et al., 2020 ; Linsbauer et al., 2021).

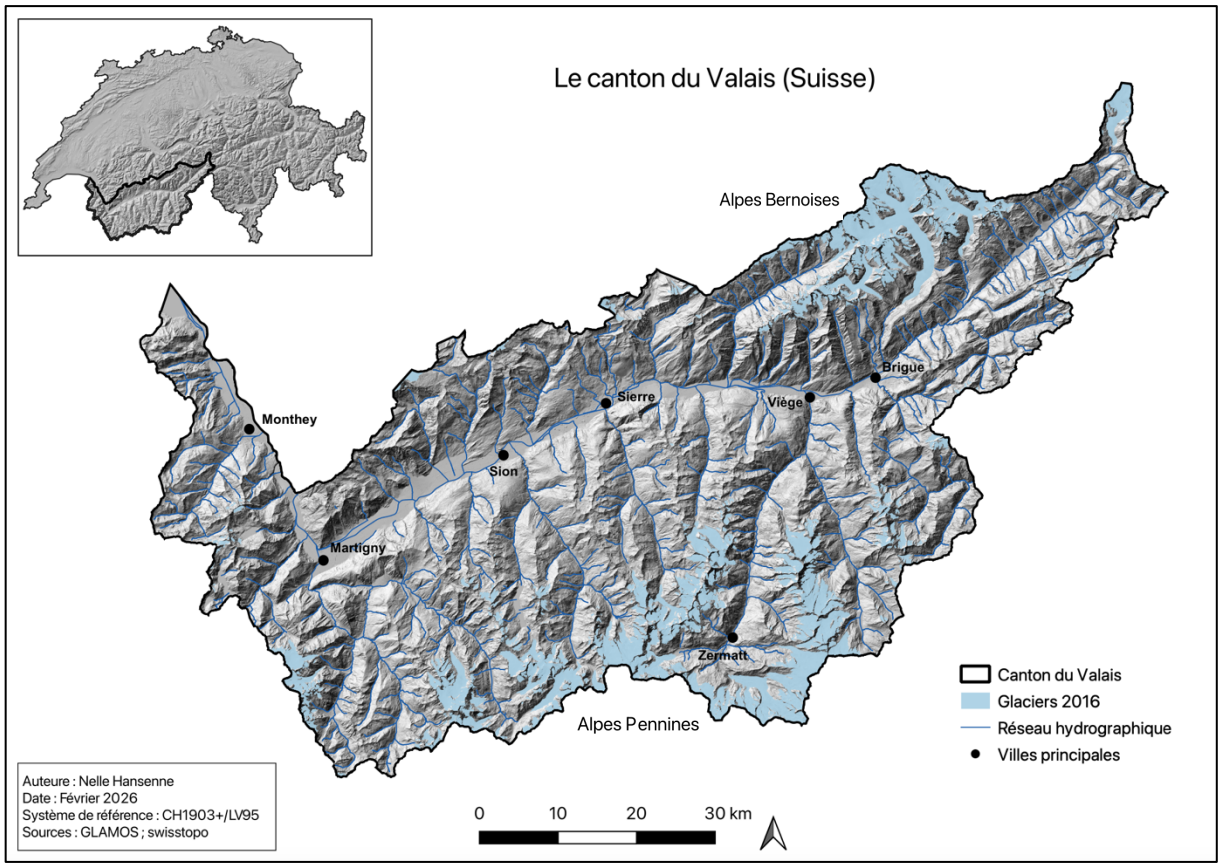


Figure 1 : Le canton du Valais, Suisse

Le canton du Valais, situé au sud de la Suisse (fig. 1), est un des 26 cantons du pays dont la superficie est de 5 224 km^2 pour une population de 357 282 habitants (Valais, 2025). Le Valais est caractérisé par un paysage montagneux puisque celui-ci est délimité au nord par les Alpes bernoises et au sud par les Alpes pennines (Wytiahlowsky et al., 2025). Les points culminants du Valais sont le Cervin (4 478 m), le Weisshorn (4 506 m), le Dom (4 545 m) et la pointe de Dufour (4 634 m) qui est le point culminant de la Suisse (Reynard et al., 2020 ; Valais, 2025).

Les deux massifs principaux du Valais sont séparés par la vallée du Rhône (Wytiahlowsky et al., 2025). Le fleuve prend sa source au glacier du Rhône, au niveau du col de la Furka, à 2 300 m d'altitude dans le nord-est du canton, et traverse le Valais sur 164 km avant de se jeter dans le lac Léman (Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves, s.d.). Son bassin versant présente un taux de glaciation élevé, contribuant ainsi significativement à son alimentation et à son débit (Linsbauer et al., 2021). Les principaux affluents du Rhône en Valais sont la Viège, la Navisence, la Borgne, la Dranse et la Lonza (Schupbach, 2024 ; Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves, s.d.). Les principales villes du canton, à savoir Monthey, Martigny, Sion,

[1] Dernier inventaire en date

Sierre, Viège et Brigue se situent près du Rhône (Schupbach, 2024 ; Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves, s.d.). Le Valais est ainsi composé de massifs montagneux avec des vallées densément peuplées (Schaub, 2015).

Le Valais se caractérise par un climat complexe largement influencé par sa topographie (Fallot, 2020). Selon la classification de Köppen-Geiger, le canton regroupe des climats allant du tempéré océanique (Cfb) à subpolaire océanique (Cfc), de subarctique (Dfc) à subarctique extrêmement froid (Dfd), mais aussi de toundra (ET) à climat de calottes glaciaires (EF) (Climate Change Knowledge Portal, 2026). Les températures moyennes (période 1991-2020) les plus élevées sont enregistrées en juillet (11,92 °C) et les plus basses en janvier (- 4,14 °C) (Climate Change Knowledge Portal, 2026). Le Valais constitue une vallée intra-alpine où les Alpes agissent comme une barrière entre le nord et le sud, protégeant le canton des masses d'air humide (MétéoSuisse, s.d.). Il s'agit du canton qui reçoit le moins de précipitations annuelles en Suisse, celles-ci variant entre 600 et 800 mm dans la vallée du Rhône et les vallées tributaires, et qui possède la durée relative d'ensoleillement la plus élevée, faisant du Valais une région particulièrement sèche (Fallot, 2020).

Environ 80 % du volume de glace des glaciers suisses se situe en Valais, canton qui compte 303 glaciers supérieur à 0,1 km^2, ce qui en fait le canton le plus englacé de Suisse, avec 10 % de son territoire recouvert de glace (Ayala et al., 2020 ; Schupbach, 2024 ; Wytiahlowsky et al., 2025). Cela s'explique par la présence de vastes zones d'accumulation de neige et de glace le long des crêtes alpines nord et principale (Fischer et al., 2014). L'élévation moyenne des glaciers valaisans est de 3 091 m s.n.m. (mètre au-dessus du niveau de la mer), avec des valeurs comprises entre 2 267 m s.n.m. et 4 025 m s.n.m (Wytiahlowsky et al., 2025). Par ailleurs, le Valais abrite le plus grand glacier des Alpes - le Grand Glacier d'Aletsch - avec une longueur totale de 24 km et une épaisseur de glace allant jusqu'à 800 m (Holzhauser, 2020 ; Jouvet & Huss, 2019 ; Linsbauer et al., 2021). Le glacier d'Aletsch contient à lui seul plus de 20 % du volume total de glace dans les Alpes suisses (Jouvet & Huss, 2019). Les glaciers jouent donc un rôle central dans le régime hydrologique du canton mais contribuent également à faire du Valais le canton suisse le plus exposé aux risques glaciaires (Schupbach, 2024).

1.2. Lacs glaciaires et dynamique de vidange

1.2.1. Lacs glaciaires

Les glaciers perdent de la masse depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, tendance qui s'accélère avec le réchauffement climatique, entraînant la formation de lacs glaciaires (Mölg et al., 2021b). L'eau qui provient de la fonte glaciaire peut être retenue naturellement derrière des débris glaciaires tels que les moraines, derrière de la glace, en marges des glaciers, mais peut être également stockée dans des dépressions et surcreusements exposés suite au retrait des glaciers (Emmer et al., 2022a ; Lützow et al., 2023 ; Mölg et al., 2021b ; Otto, 2018 ; Zhang et al., 2024). Mölg et al. (2021b) ont répertorié 1 192 lacs glaciaires formés depuis la fin du Petit Âge Glaciaire en Suisse (~1850), dont 987 qui existaient toujours en 2016.

Les lacs glaciaires sont des éléments caractéristiques des paysages glaciaires qui se situent à proximité des glaciers actuels mais également des couvertures glaciaires passées puisque leur

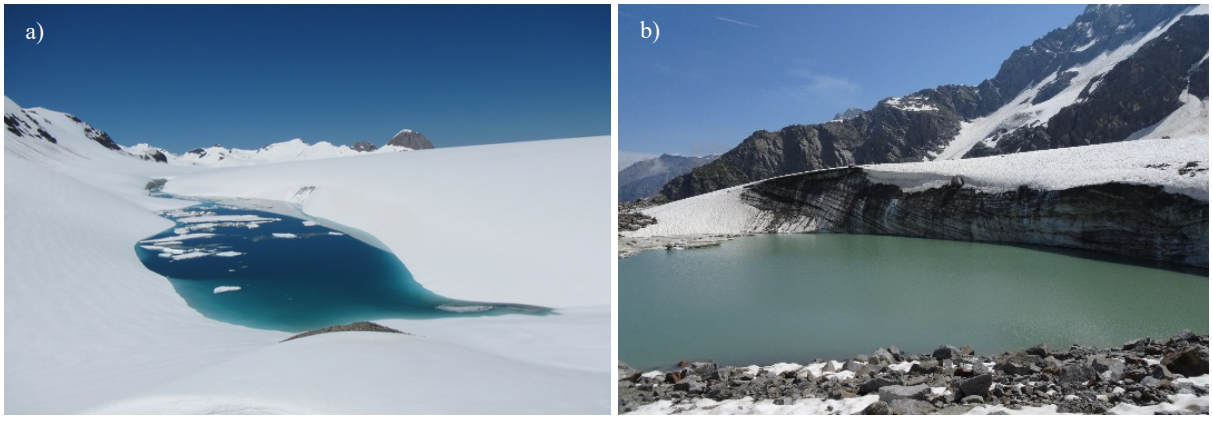
formation est étroitement liée à la dynamique glaciaire et aux conditions environnementales (Otto, 2018). En effet, les lacs glaciaires sont par définition des surfaces d'eau qui résultent de l'activité des glaciers, soit en occupant les dépressions laissées par les glaciers, soit en fournissant les matériaux et composantes géomorphologiques permettant de retenir l'eau, ou en alimentant le lac avec de l'eau de fonte (Otto, 2018). Par exemple, les dépressions topographiques résultant des processus d'érosion glaciaire (abrasion, arrachement) peuvent se remplir de sédiments transportés par les glaciers et chenaux glaciaires, ou se remplir d'eau et former un lac (Steffen et al., 2022a).

Les lacs glaciaires peuvent être distingués selon le type de barrage les retenant qui peut être de glace, de moraine ou de bedrock (Allen et al., 2019 ; Zhang et al., 2024). Ces lacs glaciaires peuvent se former à la surface des glaciers (lacs supraglaciaires), aux bords (lacs paraglaciaires) et au front des glaciers (lacs proglaciaires) (Schupbach, 2024). Ils peuvent également se former à l'intérieur des glaciers et en-dessous (lacs intra glaciaires et lacs sous-glaciaires) (Zhang et al., 2024). Ces deux derniers types de lacs ne sont pas considérés dans le présent travail car ils sont difficilement identifiables (Zhang et al., 2024).

1.2.1.1. Lacs glaciaires endigués par de la glace

Les lacs endigués par de la glace correspondent aux lacs retenus par un glacier, par exemple lorsqu'un glacier avance dans une vallée tributaire dépourvue de glace, ou lorsque deux glaciers confluents reculent à des vitesses différentes où l'eau de fonte du glacier se retirant plus vite se trouve bloquée par le glacier adjacent (Emmer et al., 2022a ; Lützow et al., 2023 ; Otto, 2018). Ils peuvent également se former derrière des calottes glaciaires résiduelles ou dans des surcreusements en bordure d'un glacier (Demolis et al., 2023 ; Otto, 2018). Dans le présent travail, les lacs endigués par de la glace regroupent les lacs supraglaciaires (Lützow et al., 2023).

Ces lacs sont particulièrement dépendant des facteurs environnementaux et des conditions climatiques, et sont généralement évolutifs et instables, notamment en raison de la perte de masse lors de la saison estivale (Carrivick & Tweed, 2016 ; Demolis et al., 2023). De manière générale, la dynamique des lacs glaciaires endigués par de la glace est contrôlée par l'activité et les fractures de la glace retenant le lac, et est en conséquence sensible au retrait des glaciers et à l'amincissement de ceux-ci (Zhang et al., 2024).



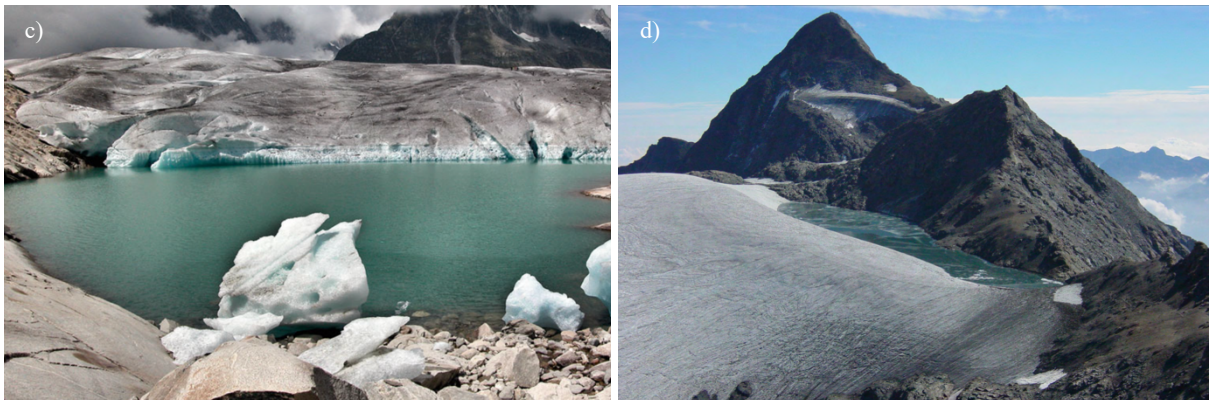


Figure 2 : a) Lac de Faverges, Glacier de la Plaine Morte, canton du Valais et de Berne, Suisse (GEOPRAEVENT AG, s.d.). b) Lac de Grand Croux, Massif du Grand Paradis, Val de Cogne, Italie (Troilo et al., 2025). c) Lac de Märjelen, Glacier d'Aletsch, 2007, Valais, Suisse (Holzhauser, 2020). d) Lac sur le Glacier de Rochemelon, Bessans, France (RTM, 2006).

La figure 2 reprend différents lacs endigués par de la glace. Il convient de souligner que les lacs glaciaires en contact direct avec le glacier modifient la dynamique de celui-ci ainsi que son régime thermique formant des boucles de rétroaction positives (Otto, 2018 ; Taylor et al., 2023). En effet, la température de l'eau du lac est relativement élevée par rapport à celle du glacier, ce qui renforce la fonte basale de ce dernier, pouvant alors mener à une réduction de l'épaisseur de la glace ainsi qu'à la formation de crevasses favorisant le processus de vêlage (Otto, 2018 ; Taylor et al., 2023). Ces processus influencent le bilan de masse, entraînant ainsi davantage de fonte et de retrait, ce qui favorise l'expansion du lac (Otto, 2018 ; Taylor et al., 2023). C'est pourquoi les glaciers en contact direct avec un lac montrent une perte de masse plus importante par rapport à ceux sans lac (Otto, 2018 ; Mölg et al., 2021b).

Ces lacs sont généralement temporaires puisque le barrage de glace retenant le lac est mobile et moins stable (Emmer et al., 2022a ; Otto, 2018). Certains lacs endigués par de la glace se remplissent et se vidangent de manière répétée (Emmer et al., 2022b ; Harrison et al., 2018 ; Lützow et al., 2023 ; Zhang et al., 2024). Par exemple, le lac de Faverges (fig. 2a) se remplit lors de la saison des fontes et se vidange annuellement durant l'été depuis 2011 (Ogier et al., 2021).

1.2.1.2. Lacs glaciaires endigués par une moraine

Ce type de lacs se forme suite à l'accumulation de l'eau de fonte derrière des moraines latérales ou terminales, qui sont définies comme les débris transportés par les glaciers et ensuite laissés lors de leur retrait (Harrison et al., 2018 ; IPCC, 2022b ; Lützow et al., 2023 ; Otto, 2018). Par exemple, à la fin du Petit Âge Glaciaire, de nombreux glaciers avaient atteint leur extension maximale laissant derrière eux des moraines terminales (Mölg et al., 2021b). Ces lacs peuvent également se former dans des moraines de fond bien que cela soit généralement lié à un surcreusement dans le bedrock enfouis sous des dépôts morainiques (Otto, 2018).

Les moraines agissent comme des barrages en raison de leur composition puisqu'elles sont caractérisées par un mélange de matériaux grossiers intégré dans une matrice de matériaux fins (Otto, 2018). Ces moraines peuvent être plus ou moins compactes et peuvent contenir de la glace morte, des lentilles de glace ou du permafrost, ce dernier correspondant à des sols dont la

température est égale ou inférieure à 0°C pendant au moins deux années consécutives (IPCC, 2022a ; Otto, 2018). Leur composition fait que ces barrages sont généralement considérés comme potentiellement instables (Demolis et al., 2023).



Figure 3 : a) Lac sur le Glacier de Grindelwald, Berne, Suisse (Géomorphologie de la montagne froide, 2021). b) Lac bleu, Massif du Mont Blanc, Chamonix, France (Demolis et al., 2023). c) Lac situé dans les Alpes orientales, Felbertal, Autriche (Otto, 2018). d) Lac Oschapalca en 2013, Cordillère Blanche péruvienne (Emmer et al., 2022a).

La figure 3 reprend différents lacs endigués par une moraine. Dans la terminologie des lacs glaciaires, les lacs endigués par un glissement de terrain sont généralement identifiés (Otto, 2018). Dans le présent travail, ceux-ci sont associés à ceux endigués par une moraine en raison des propriétés similaires des matériaux, à savoir un mélange hétérogène de particules de tailles variées (Schaub, 2015). La figure 3a illustre ce cas de lac glaciaire. En effet, un lac en aval du glacier de Grindelwald (Suisse) s'est formé en 2008 derrière un éboulement de 2 millions de m^3 (Laïly & Demolis, 2019). Le volume du lac a atteint 1 million de m^3 dont 70 % s'est vidangé la même année entraînant une crue à Grindelwald (Laïly & Demolis, 2019). En 2009, un nouveau lac s'est formé avec un volume d'environ 3 millions de m^3 dans des conditions à risque en raison d'une moraine de 300 m de hauteur en rive droite du lac menaçant de s'effondrer dans celui-ci suite à la fonte de la glace morte présente dans la moraine (Laïly & Demolis, 2019).

1.2.1.3. Lacs glaciaires endigués par le bedrock

Les lacs glaciaires endigués par le bedrock se forment dans des dépressions topographiques ou dans des surcreusements formés par l'érosion glaciaire lors du retrait des glaciers (Lützow et al., 2023). Ces lacs sont considérés comme stables (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022a, 2022b ; Zhang et al., 2024).



Figure 4 : a) Glacier du Rhône et le lac qui s'est formé en aval, Valais, Suisse (Schaerer, s.d.). b) Glacier de Saint-Sorlin et les lacs qui se sont formés en aval, France (Cathala, 2024). c) Lac Churup en 2015, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a). d) Lac Arteson endigué par le bedrock avec une fine couche de dépôt morainique en 2017, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a).

La figure 4 illustre différents types de lacs endigués par le bedrock, dont le lac qui s'est formé en aval du glacier du Rhône dans le canton du Valais (Fig. 4a). Par ailleurs, le bedrock peut, dans certains cas, être couvert de dépôts glaciaires (Fig. 4d) (Otto, 2018).

1.2.2. Vidanges de lacs glaciaires

Les lacs glaciaires sont par nature des composantes évolutives susceptibles de changer sous l'effet de différents processus, tels que des déséquilibres entre les flux entrants et sortants, un remplissage progressif par des sédiments, un remplissage soudain par des matériaux issus de mouvements de masse, la fusion de plusieurs lacs glaciaires ou encore une vidange du lac (Mölg et al., 2021b ; Zhang et al., 2024). Cette évolution constante associe les lacs glaciaires à certaines opportunités : ils favorisent la biodiversité de haute montagne, ils constituent des réservoirs d'eau, ils représentent un potentiel important pour la production hydroélectrique et ils peuvent renforcer l'attractivité touristique (Mölg et al., 2021b ; Steffen et al., 2022a). Cependant, bien que certains lacs glaciaires soient stables, ils représentent un risque pour les populations et les infrastructures situées en aval en cas de vidange soudaine (Lützow et al., 2023 ; Steffen et al., 2022a). C'est pourquoi de nombreuses études cherchent à déterminer si la fréquence des vidanges des lacs glaciaires évolue, mais également à identifier les paramètres permettant de définir si un lac est susceptible de se vidanger ainsi que de répertorier les événements de vidange à l'échelle mondiale (Carrivick & Tweed, 2016 ; Lützow et al., 2023 ; Steffen et al., 2022a ; Zhang et al., 2024).

Une vidange de lac glaciaire correspond à un relâchement soudain de l'eau retenue dans un lac (Allen et al., 2019 ; Emmer et al., 2022a, 2022b), dont la durée peut varier de quelques heures à plusieurs jours (Carrivick & Tweed, 2016 ; Lützow et al., 2023 ; Zhang et al., 2024). Il s'agit d'événements rares, caractérisés par une énergie élevée, un relâchement de volume d'eau important et des débits de pointe élevés (Emmer & Vilímek, 2014 ; Emmer et al., 2022a ; Mergili & Schneider, 2011 ; Zhang et al., 2024). Ces caractéristiques induisent une forte capacité d'érosion, notamment par la mobilisation de débris, pouvant former des laves torrentielles puissantes (Mergili & Schneider, 2011). Cela est particulièrement le cas pour les lacs endigués par une moraine dont le barrage contient d'importantes quantités de sédiments (Otto, 2018).



Figure 5 : en haut) Vidange du lac de Grand Croux en août 2016, Val de Cogne, Italie (Demolis et al., 2023). En bas) Vidange du Lac des Faverges du 5 au 8 août 2014, Glacier de la Plaine Morte, Valais et Berne, Suisse (GEOPRAEVENT, 2014).

En raison de leur localisation en haute altitude et leur potentiel énergétique élevé, les vidanges de lacs glaciaires sont caractérisées par une capacité de transport importante, de grandes distances de parcours, et une quantité importante de dépôts (Otto, 2018). Ces événements peuvent donc affecter la géomorphologie en aval et perturber des systèmes fluviaux sur des dizaines voire plusieurs centaines de kilomètres en aval de leur source, entraînant des enjeux pour l'environnement et pour les communautés vivant en aval (Lützow et al., 2023 ; Mölg et al., 2021b). Des vidanges de lacs glaciaires ont été observés dans de nombreuses régions du monde, notamment l'Himalaya, dans les massifs montagneux d'Asie centrale, en Amérique du Nord, dans les Andes en Amérique du Sud, en Nouvelle-Zélande et dans les Alpes (Mergili & Schneider, 2011). Par ailleurs, les lacs glaciaires endigués par de la glace sont à l'origine de 64,8 % des vidanges à l'échelle mondiale (Zhang et al., 2024).

Vidange du lac de Grand Croux, Massif du Grand Paradis, Cogne, Italie

Le lac de Grand Croux se situe dans le Massif du Grand Paradis dans la vallée de Cogne en Italie (Laïly & Demolis, 2019). Il s'agit d'un lac proglaciaire endigué par de la glace qui suscite une attention particulière en raison des enjeux de sécurité qu'il représente, notamment en raison d'une fréquentation touristique importante de la vallée (Laïly & Demolis, 2019). Entre 2005 et 2018 la superficie du lac a augmenté d'environ 700 m^2/an vers l'intérieur du glacier tandis que, entre 2012 et 2016, son barrage de glace s'est abaissé de 1 m (Laïly & Demolis, 2019).

La vidange totale du lac de Grand Croux sur une période d'une heure en août 2016 est illustrée dans la figure 5 (haut), dont le volume était d'environ 30 000 m^3 (Laïly & Demolis, 2019). L'événement a été observé par un randonneur étant donné qu'aucune mesure de surveillance n'était à cette période mise en place (Laïly & Demolis, 2019). Par ailleurs, 50 randonneurs ont dû être évacués par hélicoptère car les infrastructures, tels que les ponts et passages de torrents, étaient impraticables à la suite de la vidange (Laïly & Demolis, 2019). Le lac s'est ensuite rempli à nouveau en 2018, atteignant un volume de 50 000 m^3, conduisant à la mise en place de mesure de mitigation directement sur le lac (Laïly & Demolis, 2019).

Vidange du lac des Faverges, Glacier de la Plaine Morte, Lenk, Suisse

La figure 5 (bas) montre la vidange du lac des Faverges situé sur le glacier de la Plaine Morte - le plus grand glacier plat d'Europe - à la frontière entre le canton du Valais et de Berne dans les Alpes bernoises (Laïly & Demolis, 2019). Il s'agit d'un lac endigué par de la glace qui s'est formé dans les années 1970 à la suite du retrait glaciaire, et particulièrement développé depuis 2004, qui se vidange annuellement en été depuis 2011 (Laïly & Demolis, 2019 ; Ogier et al., 2021).

Le lac se déversait initialement à la fois vers le canton du Valais et de Berne mais, depuis 2011, celui-ci ne se déverse plus que vers le canton de Berne en direction du village de la Lenk (Laïly & Demolis, 2019). Parallèlement, le volume du lac et le débit de pointe des vidanges ont augmenté d'année en année à la suite de l'élargissement du lac consécutif à la fonte rapide du glacier (Laïly & Demolis, 2019). En 2018, le lac atteignait un volume d'environ $2 \cdot 10^6$ m^3, contre $1 \cdot 10^6$ m^3 en 2011, et sa vidange a généré un débit de pointe de 80 m^3/s entraînant des inondations et dommages dans le village de la Lenk (Ogier et al., 2021). Suite à cet événement, un chenal artificiel a été creusé en 2019 afin de vidanger le lac de manière artificielle et de limiter son volume maximal (Ogier et al., 2021).

1.2.3. Mécanismes de vidange

Les vidanges de lacs glaciaires résultent généralement de l'instabilité du barrage retenant le lac ou font suite à des événements externes (Rinzin et al., 2021). Il existe deux mécanismes principaux, à savoir le mécanisme de surverse et celui de rupture (Demolis et al., 2023). Les vidanges peuvent également être déclenchées par des tremblements de terre, bien que ce phénomène reste très peu observé à l'échelle mondiale (Emmer et al., 2022a). Il convient de souligner que les vidanges de lacs glaciaires sont généralement causées par des éléments en cascade plutôt qu'à un simple élément déclencheur (Rinzin et al., 2021).

1.2.3.1. Mécanisme de surverse

Le mécanisme de surverse correspond à une vidange d'un lac glaciaire par débordement qui peut se produire : (i.) suite à la formation d'une vague de déplacement sur le lac, (ii.) suite à une augmentation rapide du niveau de l'eau (Demolis et al., 2023). La surverse n'entraîne généralement pas de réduction permanente du niveau du lac et n'implique pas de destruction complète du barrage, sauf si le débordement provoque la rupture de celui-ci (Emmer et al., 2022a ; Schupbach, 2024).

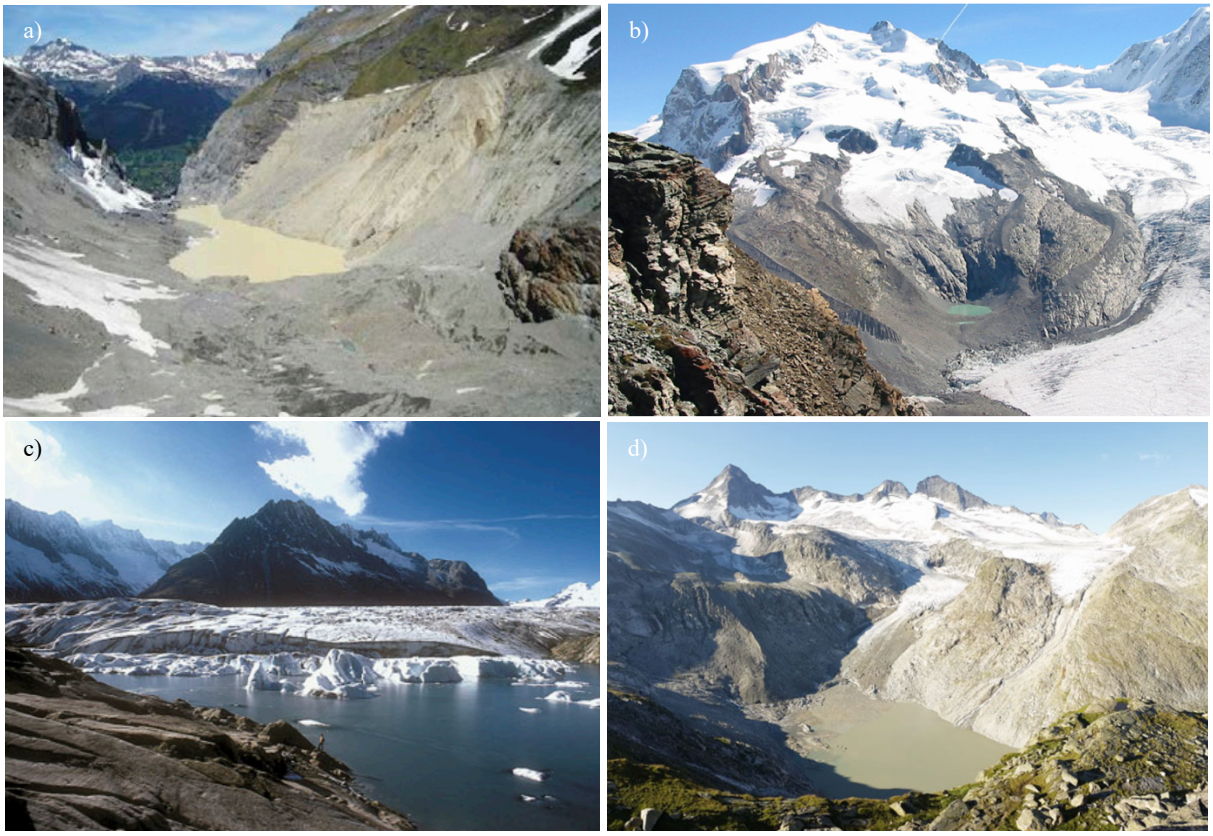


Figure 6 : a) Moraine non végétalisée menaçant de glisser, lac de Grindelwald, canton de Berne, Suisse (Sättele & Bründl, 2015). b) Présence de pics rocheux englacés évoluant dans des conditions de dégradation du permafrost pouvant initier des processus gravitaires dans le lac proche du glacier du Gorner, Valais, Suisse (Géomorphologie de la montagne froide, 2021). c) Lac de Märjelen en contact avec un glacier pouvant initier le processus de vêlage, Glacier d'Aletsch en 1976, Valais, Suisse (Holzhauser, 2020). d) Lac Obersulzbachtal dans un environnement en déglaciation, Alpes orientales, Autriche (Otto, 2018).

Les vagues de débordement sont généralement déclenchées par des phénomènes gravitaires atteignant le lac, tels que des avalanches, des glissements de terrain, des éboulements, des mouvements de masse, des glissements de moraines ou encore une vidange d'un lac situé en amont (Fig. 6a, b, d) (Demolis et al., 2023 ; Harrison et al., 2018 ; Huggel et al., 2004 ; Rinzin et al., 2021). Lorsque le lac est en contact avec le glacier, le processus de vêlage peut également être à l'origine des vagues entraînant une surverse (Fig. 6c) (Demolis et al., 2023). L'augmentation rapide du niveau de l'eau est, quant à elle, liée à des événements météorologique tels que des pluies intenses, la fonte nivale ou la fonte accrue des glaciers pouvant favoriser le débordement (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022a ; Lützow et al., 2023). Parmi ces facteurs, les mouvements de masse rapides restent toutefois les mécanismes déclencheurs les plus documentés dans la littérature (Emmer et al., 2022a).

De manière générale, la surverse devient probable lorsque la hauteur de franc-bord, soit la différence entre le niveau de l'eau du lac et la hauteur du barrage, est inférieure à celle de la vague d'impact (Huggel et al., 2004). Le mécanisme de vidange par surverse peut se produire sur tous les types de lacs glaciaires, mais concerne principalement les lacs endigués par une moraine ou par le bedrock (Demolis et al., 2023 ; Lützow et al., 2023). Le contexte climatique actuel favorise ce type de mécanisme puisque le recul des glaciers, la dégradation du permafrost et l'évolution des versants augmentent l'instabilité des pentes et la probabilité de chute de pierres ou de glace dans les lacs (Haeberli et al., 2016 ; Harrison et al., 2018 ; Nussbaumer et al., 2014). Par exemple, dans les Alpes européennes, la fréquence des chutes de pierres augmente en raison de la dégradation du permafrost (Haeberli et al., 2017).

a) Lacs endigués par de la glace

Concernant les lacs endigués par de la glace, le débordement consécutif à un mouvement gravitaire ou l'augmentation du niveau de l'eau peut entraîner la formation d'une brèche dans le barrage pouvant ensuite s'élargir par érosion mécanique de l'eau sur la glace (Clague & O'Connor, 2021). Ce processus d'érosion peut notamment générer des débits de vidange plus élevés (Clague & O'Connor, 2021).

b) Lacs endigués par une moraine

Pour les lacs endigués par une moraine, un processus similaire s'applique puisque la surverse peut entraîner une incision progressive du barrage avant de décliner à mesure que le niveau de l'eau diminue (Clague & O'Connor, 2021). L'érosion peut toutefois être limitée par le colmatage de la brèche avec des matériaux grossiers ou par une diminution de la pression hydrostatique (Clague & O'Connor, 2021). La probabilité de formation d'une brèche augmente avec la taille du lac et peut conduire à une destruction partielle ou totale du barrage (Clague & O'Connor, 2021 ; Lützow et al., 2023).

c) Lacs endigués par le bedrock

Les lacs endigués par le bedrock ne peuvent se vidanger que par surverse. Cela peut s'expliquer par la capacité du bedrock non fracturé à résister à une augmentation de la pression hydrostatique sans rompre (Zhang et al., 2024). Toutefois, peu d'événements de vidanges ont été rapportés par rapport au nombre important de lacs endigués par le bedrock recensés à l'échelle mondiale (Zhang et al., 2024).

1.2.3.2. Mécanisme de rupture

Le mécanisme de vidange par rupture concerne uniquement les lacs endigués par une moraine ou par de la glace, ces types de barrages étant considérés comme moins stables et donc davantage susceptibles de rompre (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022a). Contrairement à la surverse, la rupture entraîne généralement une réduction permanente du niveau de l'eau du lac liée à la destruction partielle ou totale du barrage, et peut être progressive ou soudaine (Emmer et al., 2022a ; Rinzin et al., 2021). Le mécanisme de rupture peut également être initié lorsque les chenaux d'écoulement sont obstrués par des sédiments, des dépôts gravitaires ou de la glace car cela peut entraîner une augmentation du niveau de l'eau et donc de la pression hydrostatique exercée sur le barrage (Emmer et al., 2022a).

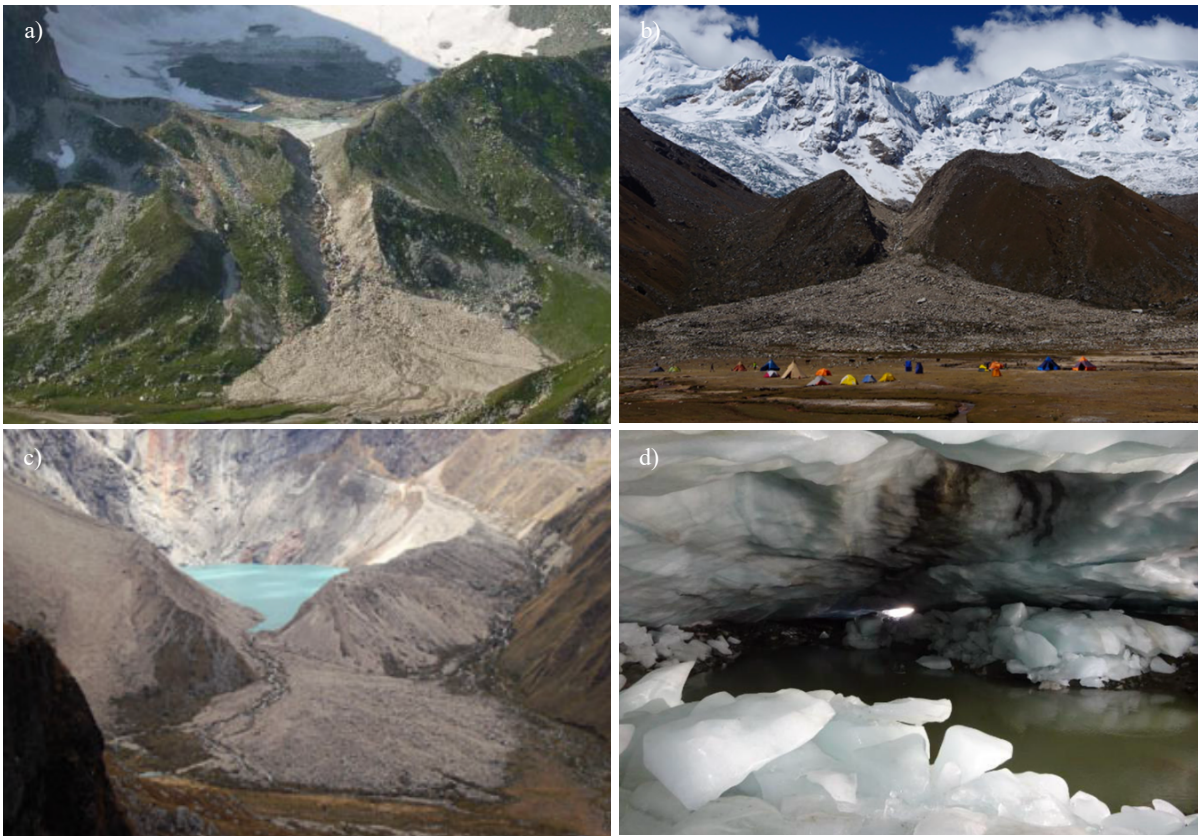


Figure 7 : a) Formation d'une brèche dans le barrage morainique à la suite de la vidange du lac de la Patinoire à Pralognan la Vanoise en 1964, France (Demolis et al., 2023). b) Rupture du barrage de moraine du lac Milluacocha en 2015 et cône de débris, vallée d'Ishinca, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a). c) Rupture du barrage de moraine du lac Jancarurish en 1950, vallée de Los Cedros, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2013). d) Rupture du verrou de glace retenant le lac de la Galise en août 2015, Val d'Isère, France (Demolis et al., 2023).

a) Lacs endigués par de la glace

Le mécanisme de rupture pour les lacs endigués par de la glace est généralement lié à une augmentation de la pression hydrostatique (Zhang et al., 2024). En effet, lorsque celle-ci dépasse la pression exercée par le poids de la glace, cela peut, par exemple, initier le processus de flottaison du barrage de glace et provoquer une rupture (Mergili & Schneider, 2011 ; Ogier et al., 2021 ; Zhang et al., 2024).

Dans le présent travail, la vidange des lacs endigués par de la glace due à la formation de chenaux sous-glaciaires ou intra-glaciaires est également considérée comme une rupture du barrage (Demolis et al., 2023 ; Lützow et al., 2023). Les chenaux sous-glaciaires se forment à l'interface de la glace et du bedrock, tandis que les chenaux intra-glaciaires résultent d'une diminution de la pression de la glace sous son propre poids (Demolis et al., 2023 ; Lützow et al., 2023 ; Ogier et al., 2021 ; Schaub, 2015). Ces chenaux peuvent s'élargir sous l'effet de l'érosion thermique et mécanique liée à l'action de l'eau pouvant conduire à une augmentation rapide, voire exponentielle, du débit de vidange (Ogier et al., 2021 ; Zhang et al., 2024). Par ailleurs, ces chenaux peuvent également se boucher pendant ou après la vidange avec des blocs de glace (Clague & O'Connor, 2021). À titre d'exemple, la figure 7d montre une rupture du verrou de glace qui se situait à l'extrémité du chenal sous-glaciaire du lac de la Galise, lac qui s'est vidangé le 28 août 2015 avec un volume d'environ 7 000 m^3, mobilisant 20 000 m^3 de matériaux à l'aval du lac (Demolis et al., 2023).

b) Lacs endigués par une moraine

Concernant les barrages de moraine, la rupture peut résulter de l'infiltration de l'eau dans les matériaux non-consolidés qui les composent fragilisant ainsi la structure du barrage, de la formation de renards hydrauliques suite à la dégradation de la glace morte présente dans la moraine induisant alors une déstabilisation et une subsidence du barrage, ou encore lorsque la pression hydrostatique dépasse la pression lithostatique du barrage (Fig. 7a, b, c) (Clague & O'Connor, 2021 ; Lützow et al., 2023 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Schupbach, 2024 ; Zhang et al., 2024). De manière similaire au processus de surverse, la vidange pour le processus de rupture peut entraîner une incision progressive du barrage (Clague & O'Connor, 2021). Lorsque la moraine cède de manière définitive, l'eau de fonte n'est plus retenue et le lac ne se forme plus (Zhang et al., 2024).

1.2.4. Paramètres hydro-géomorphologiques

1.2.4.1. Détermination du volume

La superficie et le volume du lac sont des paramètres importants car ceux-ci définissent la quantité d'eau potentiellement disponible pour une vidange (Allen et al., 2019 ; Emmer & Vilímek, 2014 ; Huggel et al., 2002 ; Rinzin et al., 2021). Le volume peut être évalué soit à partir de mesures bathymétriques, soit grâce à des formules empiriques qui reposent sur la superficie du lac (Schaub, 2015 ; Zhang et al., 2024). Ces relations empiriques sont davantage utilisées puisque les mesures bathymétriques sur le terrain peuvent s'avérer potentiellement difficiles à mettre en œuvre dans des environnements de haute montagne (Cook & Quincey, 2015 ; Zhang et al., 2024).

Puisque la superficie du lac est intrinsèquement liée à son volume, l'utilisation directe de celle-ci pour estimer le volume peut entraîner une autocorrélation pouvant conduire à une surestimation de la qualité de l'information (Mergili & Schneider, 2011). C'est pourquoi, Huggel et al. (2002) ont d'abord évalué la profondeur moyenne du lac dérivée de la surface selon la relation empirique suivante (Eq. 1) :

$$D = 0{,}104 \cdot A^{0{,}42} \quad \text{(Eq.1)}$$

où D correspond à la profondeur et A à la surface du lac qui peut être estimée à l'aide d'outils et de données de télédétection (Huggel et al., 2002 ; Schaub, 2015). Le volume est ensuite dérivé de la surface et de la profondeur du lac selon l'équation suivante (Eq.2) (Mergili & Schneider, 2011) :

$$V = D \cdot A = 0{,}104 \cdot A^{1{,}42} \quad \text{(Eq.2).}$$

La formule proposée par Huggel et al. (2002) (eq. 2) est largement utilisée dans de nombreuses études pour estimer le volume théorique de lacs glaciaires (Huggel et al., 2004 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mondal et al., 2025 ; Schaub, 2015). Néanmoins, les mesures bathymétriques devraient être privilégiées pour une meilleure précision, puisque les relations empiriques ne reposent pas sur des mesures directes du volume sur le terrain et ne tiennent pas compte de la variabilité de la morphologie propre à chaque lac, ce qui peut entraîner des incertitudes dans l'estimation du volume (Cook & Quincey, 2015 ; Schaub, 2015).

1.2.4.2. Détermination du débit de pointe

L'évaluation du débit de pointe permet de déterminer la magnitude d'une éventuelle crue glaciaire et dépend du volume du lac, de la géométrie du barrage, des matériaux qui le composent, de la topographie en aval et de la disponibilité de matériaux mobilisables (Clague & O'Connor, 2021 ; Huggel et al., 2002). Par exemple, pour un même volume, un lac endigué par de la glace qui se vidange par chenaux sous-glaciaires aura tendance à produire des vidanges moins brutales que ceux qui se vidangent par rupture du barrage (Huggel et al., 2004). Les différentes relations empiriques pour estimer le débit de pointe sont reprises dans le tableau 1.

Tableau 1 : Formules de détermination du débit de pointe en fonction du type de barrage en reliant le débit de pointe (Q_p) au volume de vidange (V) et à la profondeur du lac ou à la hauteur du barrage (D) avec ρ_W = densité de l'eau (kg/m³) et g = accélération de la gravité (m/s²). Traduit d'après Huggel et al. (2004) & Mergili & Schneider (2011).

Relations Q_p (m^3/s)	Remarques	Références
$672(10^{-6}V)^{0,56}$		Costa (1985)
$6{,}3D^{1,59}$		Costa (1985)
$181(10^{-6}V \cdot D)^{0,43}$		Costa (1985)
$1{,}58 \cdot 10^{-2}(\rho_W \cdot g \cdot V \cdot D)^{0,41}$		Costa & Schuster (1988)
$1{,}6V^{0,46}$		Walder & O'Connor (1997)
$6{,}7D^{1,73}$		Walder & O'Connor (1997)
$9{,}9 \cdot 10^{-1}(V \cdot D)^{0,40}$		Walder & O'Connor (1997)
$2V/t$	Pour les lacs endigués par une moraine avec t = 1000 s (pour les Alpes suisses)	Huggel et al. (2004)
V/t	Pour les lacs endigués par de la glace se vidangeant par rupture du barrage avec t = 1000 s (pour les Alpes suisses)	Haeberli (1983) ; Huggel et al. (2004)
$46(V/10^6)^{0,66}$	Pour les lacs endigués par de la glace se vidangeant par chenaux sous-glaciaires	Huggel et al. (2004)

Les relations proposées par Huggel et al. (2004) et Haeberli (1983) soulignent l'importance de considérer des relations différentes en fonction du type de barrage et en fonction du mécanisme de drainage (Mergili & Schneider, 2011). De manière générale, le débit de pointe est généralement plus élevé que pour les crues ordinaires (Mergili & Schneider, 2011). Lützow et al. (2023) soulignent par ailleurs que le débit de pointe peut être estimé avec des stations de jaugeage mesurant les débits. Cependant, l'utilisation de ces stations dépend de l'accessibilité du site et des caractéristiques locales du cours d'eau (Lützow et al., 2023).

1.2.4.3. Détermination de la distance de parcours

Les écoulements issus des vidanges de lacs glaciaires sont caractérisés par de grands volumes d'eau dont l'évolution est fortement contrôlée par la topographie. En effet, les variations de pente entraînent des transitions entre différents types de flux, modifient leur composition et propriétés rhéologiques (Meyrat et al., 2024). C'est pourquoi le volume d'eau initialement libéré ne représente qu'une fraction du volume total mobilisé (Meyrat et al., 2024). Les fortes pentes favorisent l'érosion et la formation de laves torrentielles suite à la mise en mouvements de matériaux solides, tandis que les faibles pentes favorisent les dépôts d'éléments grossiers résultant en un écoulement plus fluide dominé par des sédiments fins en suspension (Meyrat et

al., 2024). Cette évolution influence directement la distance de parcours de l'écoulement ainsi que l'étendue des zones potentiellement exposées aux inondations en aval (Meyrat et al., 2024).

La distance de parcours dépend également de la quantité de débris mobilisables disponibles qui définit le comportement de l'écoulement (Huggel et al., 2002). En effet, les écoulements avec une concentration importante de débris solides ont tendance à s'arrêter brutalement, tandis que les écoulements plus liquides s'atténuent progressivement (Huggel et al., 2002). La distance de parcours est généralement caractérisée par la pente moyenne du trajet, définie comme l'angle horizontal de la ligne reliant le point de départ au point de dépôt final (Huggel et al., 2004).

Les vidanges de lacs glaciaires peuvent parcourir des distances de l'ordre de dizaines de kilomètres et peuvent entraîner des dommages importants en aval, ce qui implique que l'estimation de la distance de propagation est un paramètre essentiel (Mergili & Schneider, 2011 ; Meyrat et al., 2024). Plusieurs relations empiriques existent afin d'estimer la distance de parcours ou la pente moyenne (ω) à partir du volume mobilisé (V) ou du débit de pointe (Q_p) (Mergili & Schneider, 2011). Mergili & Schneider (2011) ont repris les formules empiriques qui estiment la distance de parcours pour les vidanges de lacs glaciaires (Tableau 2).

Tableau 2 : Relations empiriques pour estimer la distance de parcours de vidange de lac glaciaire avec L, la distance de parcours ; V_d, le volume de la lave torrentielle ; ΔZ, la variation d'altitude ; ω_r, la pente moyenne du parcours et Q_p, le débit de pointe. Traduit d'après Mergili & Schneider (2011) et Gruber & Mergili (2013).

Formule	Remarques	Références
$L = 1{,}9V_{\mathrm{d}}^{0,16}\Delta Z^{0,83}$	Relation empirique générale pour les laves torrentielles	Rickenmann (1999)
$\omega_{\mathrm{r}} = 11°$	Pente pour les laves torrentielles des vidanges de lacs glaciaires	Haeberli (1983) ; Huggel et al. (2003, 2004)
$\omega_{\mathrm{r}} = 18Q_{\mathrm{p}}^{-0,07}$	Scénario le plus élevé pour les laves torrentielles des vidanges de lacs glaciaires	Huggel (2004)
$\omega_{\mathrm{r}} \geq 2°$	Pour les crues des vidanges de lacs glaciaires	Haeberli (1983) ; Huggel et al. (2004)

La relation proposée par Rickenmann (1999), qui relie la distance horizontale de parcours au volume total de l'écoulement et à la distance verticale, constitue une formule générale pour les laves torrentielles bien que celle-ci tend à sous-estimer la distance de parcours dans le contexte des vidanges de lacs glaciaires, comme démontré par Mergili & Schneider (2011). Haeberli (1983) propose une pente moyenne caractéristique de 11°, valeur qui est notamment reprise par Huggel et al. (2003, 2004) pour les Alpes suisses. Par ailleurs, Huggel (2004) a proposé une relation basée sur le débit de pointe afin d'estimer cette pente moyenne. À l'inverse, les écoulements de type liquide peuvent se propager sur des pentes moyennes de parcours beaucoup plus faibles. Huggel et al. (2004) proposent une valeur seuil de $\omega \geq 2°$, qui correspond généralement à des pentes moyennes comprises entre 2° et 3° pour les Alpes suisses (Huggel et al., 2004).

Ces relations restent toutefois des estimations puisqu'elles ne prennent pas en compte des processus pouvant se produire au cours de la propagation (Huggel et al., 2004). La formation d'embâcles, l'érosion, les dépôts et la concentration en sédiments modifient la rhéologie du flux et donc, la magnitude et les impacts (Carrivick & Tweed, 2016 ; Huggel et al., 2004). Ainsi, deux vidanges de lacs glaciaires identiques en termes de volume et de débit de pointe peuvent produire des événements très différents (Carrivick & Tweed, 2016).

1.2.4.4. Sédimentation des lacs glaciaires

La sédimentation d'un lac glaciaire dépend de certains facteurs tels que sa typologie et sa géométrie mais également des conditions thermiques, de la densité relative entre l'eau du lac et l'eau de fonte, le nombre de sources potentielles, la présence de glace ou d'un piège à sédiment en amont, de l'érodabilité et de la lithologie du bassin versant, ou encore s'il s'agit d'une zone proglaciaire récemment exposée (Mölg et al., 2021b ; Otto, 2018 ; Steffen et al., 2022a). Durant la période hivernale, des facteurs additionnels comme les vents, la couverture de glace et la réduction des apports influencent également la sédimentation (Otto, 2018).

Les sédiments peuvent être apportés aux lacs glaciaires par des processus glaciaires, glacio-fluviaux, fluviaux, gravitaires ou par érosion à proximité du lac (Otto, 2018). Pour les lacs en contact avec un glacier, l'apport peut se faire via des chenaux sous et supraglaciaires, via des blocs de glace flottants mais également par l'apport direct des dépôts présents à la surface du glacier (Otto, 2018). Le processus de sédimentation peut entraîner une réduction du volume et de la taille des lacs qui peuvent alors jouer le rôle de bassin de rétention et interrompre le transport sédimentaire en aval (Mölg et al., 2021b). Par ailleurs, l'érosion et le transport sédimentaire sont particulièrement élevés dans les environnements glaciaires, notamment juste après la déglaciation en raison du réajustement de l'environnement (Mölg et al., 2021b ; Steffen et al., 2022a).

1.3. Historique des vidanges de lacs glaciaires en Valais

À la fin du Petit Âge Glaciaire (~1850), la plupart des glaciers suisses avaient atteint leur extension maximale (Mölg et al., 2021b). Leur étendue était alors de 1 783 km^2, soit ~ 4,3 % de la superficie de la Suisse (Mölg et al., 2021b), pour atteindre 961 km^2 (Linsbauer et al., 2021), soit ~ 2,3 % de la superficie du pays, en 2016.

Depuis 1850, deux phases climatiques favorables à l'avancement des glaciers ont été enregistrées en Suisse, une dans les années 1910-1920 et une autre dans les années 1970-1980, se traduisant par des bilans de masse positifs suite à une baisse des températures et une augmentation des précipitations hivernales (Mölg et al., 2021b ; Schupbach, 2024). À l'inverse, trois phases de retrait important, caractérisées par un bilan de masse négatif, ont été enregistrées en 1850-1880, 1940-1950 et 1990-2020 (Schupbach, 2024). Le retrait des glaciers observé depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, couplé à l'augmentation des températures, a favorisé l'apparition de nombreux nouveaux lacs glaciaires, augmentant ainsi le risque de vidanges brutales (Mölg et al., 2021b ; Schupbach, 2024).

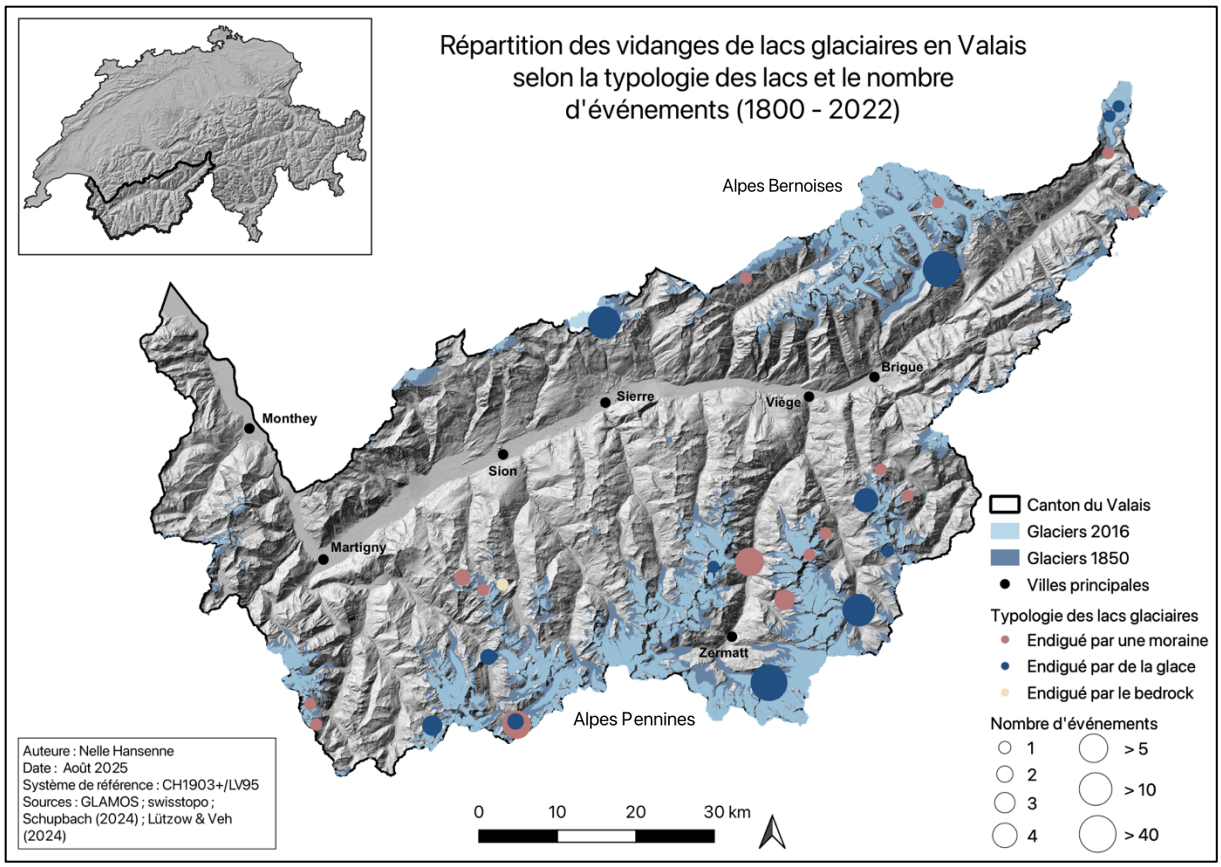


Figure 8 : Répartition des vidanges de lacs glaciaires en Valais selon la typologie des lacs et le nombre d'événements (1800-2022).

La figure 8 illustre la répartition des vidanges de lacs glaciaires en Valais selon la typologie des lacs et le nombre d'évènements sur la période 1800-2022. Cette répartition révèle une certaine concentration des événements dans le sud du canton, plus spécifiquement dans le sud-est. Sur cette période, 179 événements de vidanges brutales répartis sur 24 glaciers ont été recensés, suggérant que ces événements se concentrent sur quelques sites (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024). Certains lacs sont d'ailleurs à l'origine de plusieurs événements de vidange, par exemple, le Gornersee, situé sur le glacier du Gorner au sud-est de Zermatt, est à l'origine de 67 vidanges et le Märjelensee, situé sur le Grand Glacier d'Aletsch, au nord-est de Brigue, est responsable de 44 événements (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024).

La majorité des événements concerne des lacs endigués par de la glace avec 149 événements sur les 179 vidanges enregistrées (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024). Pour les lacs endigués par une moraine, 29 évènements ont été recensés, tandis qu'un seul événement a été attribué à un lac endigué par le bedrock sur l'ensemble de la période (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024). Ce dernier chiffre traduit le fait que ce type de lac est relativement stable et que les vidanges brutales, principalement liées à des débordements, sont rares. Ce constat est également observé dans les Alpes françaises (Demolis et al., 2023). De manière générale, l'historique des vidanges de lacs glaciaires en Valais suggère que le nombre d'événements est relativement faible comparé au nombre de glaciers et de lacs sur le territoire, bien qu'un biais de recensement ait pu entraîner une sous-estimation du nombre réel de vidanges historiques,

certains événements, en particulier les vidanges de faible intensité ou les plus anciennes, n'ont probablement pas été observés ou documentés (Carrivick & Tweed, 2016 ; Schupbach, 2024).

1.4. Notion de risque

1.4.1. Risque

La notion de risque, ainsi que sa gestion, sont des concepts pour lesquels plusieurs définitions existent dans la littérature (Schaub, 2015). Dans le présent travail, le risque est défini selon l'approche du GIEC, notamment reprise par Schaub (2015) et Niggli et al. (2024).

Le GIEC définit le risque comme le potentiel de conséquences néfastes pour les systèmes humains et écologiques en prenant compte la diversité des valeurs et objectifs associés à ces systèmes (IPCC, 2020, 2022a). Ces conséquences néfastes renvoient aux impacts sur les vies humaines, les communautés, la santé et le bien-être, mais aussi sur les dimensions économiques, sociales et culturelles ainsi que sur les infrastructures, les services, y compris les services écosystémiques, les écosystèmes et les espèces (IPCC, 2020, 2022a). L'usage du terme « potentiel » souligne par ailleurs l'incertitude et/ou le manque de connaissances qui sont des concepts associés à la notion de risque (IPCC, 2020).

Dans le contexte des risques naturels, le risque résulte d'interactions entre l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité des systèmes affectés, illustrant le caractère composite de cette notion (IPCC, 2020, 2022a ; Ozer, 2012). Ozer (2012) illustre ces interactions à l'aide de courbes isorisques, mettant en évidence la limite entre le risque acceptable et le risque inacceptable qui est définie par les politiques, les décideurs, les scientifiques ou encore par les sociétés exposées (Ozer, 2012). Dans cette perspective, Schaub (2015) souligne que l'acceptabilité du risque par une société dépend de ses valeurs, de ses perspectives, de son histoire et de son idéologie, bien que cela puisse également varier au sein d'une même société.

1.4.2. Aléa

La première étape dans l'analyse de risque consiste à définir l'aléa, qui correspond à la probabilité d'occurrence d'un phénomène et qui dépend de son intensité et de sa fréquence (Ozer, 2012 ; Schaub, 2015). Dans le cas des vidanges de lacs glaciaires, l'aléa renvoie donc au processus de vidange lui-même, caractérisé par une certaine probabilité d'occurrence, une fréquence et une intensité (Schaub, 2015). L'évaluation de cet aléa représente cependant un enjeu car ces événements sont caractérisés par une faible fréquence et une forte intensité ce qui rend l'estimation de leur probabilité d'occurrence difficile (Emmer & Vilímek, 2014 ; Emmer et al., 2022b ; Nussbaumer et al., 2014 ; Schaub, 2015). Cette difficulté est notamment renforcée par les changements climatiques qui modifient la fréquence, la magnitude et les interactions entre les différents processus (Haeberli et al., 2017).

Le terme de susceptibilité, défini comme la probabilité d'occurrence de l'aléa en fonction des caractéristiques intrinsèques du territoire et de ses éléments ou encore comme la tendance d'un lac à produire une vidange, est parfois utilisé comme alternative à cette notion de probabilité (Mergili & Schneider, 2011 ; Schaub, 2015). La compréhension de ces caractéristiques et des

mécanismes de déclenchement est la première étape dans la gestion des risques associés aux vidanges de lacs glaciaires (Zhang et al., 2024).

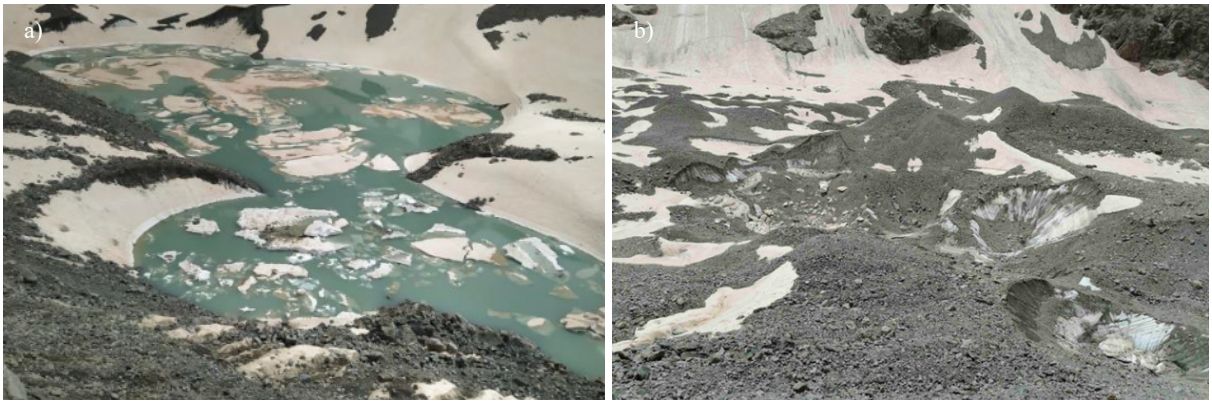


Figure 9 : a) Lac du glacier de Bonne Pierre, le 13 juin 2024, France. b) Lac du glacier de Bonne Pierre après sa vidange, le 28 juin 2024 (RTM, 2025).

À titre d'exemple, la figure 9a montre le lac de Bonne Pierre, un lac glaciaire visible depuis 2016 qui se vidange chaque début d'été sans qu'aucune crue ne soit enregistrée en aval. Dans ce cas-ci, l'aléa correspond donc à la vidange récurrente de ce lac depuis 2016, mais de faible intensité. En juin 2024, le lac s'est vidangé alors qu'il présentait un volume d'environ 100 000 m^3 (Fig. 9b) (RTM, 2025).

1.4.3. Exposition et conséquences socio-économiques

L'exposition désigne les éléments susceptibles d'être affectés par un phénomène, notamment les infrastructures, les populations ou les biens économiques, et peuvent être partiellement ou totalement endommagés (Ozer, 2012). Cette composante du risque est généralement associée à une analyse des conséquences évaluant le potentiel de dommage et les pertes, et dépend de la manière dont une société hiérarchise les enjeux et définit les pertes (Schaub, 2015).

Dans le contexte actuel des changements climatiques, les nouveaux lacs glaciaires représentent un risque croissant pour les vallées en aval, tandis que le développement et l'expansion des activités humaines en montagne impliquent une augmentation du nombre d'éléments exposés et donc de dommages potentiels (Carrivick & Tweed, 2016 ; Emmer et al., 2022b ; Haeberli et al., 2016, 2017). Les Alpes européennes sont, par ailleurs, particulièrement concernées puisqu'il s'agit d'une région densément peuplée (Haeberli et al., 2017).



Figure 10 : Hameau de la Bérarde. a) Orthophoto de 2021 avant la crue. b) Orthophoto de 2024 après la crue (RTM, 2025).

L'exemple du lac de Bonne Pierre, présenté précédemment, permet d'illustrer cette composante du risque. La figure 10a montre le hameau de la Bérarde en 2021, situé en aval du glacier de Bonne Pierre, l'exposant ainsi au risque de vidange (RTM, 2025). La figure 10b montre une orthophoto du 26 juin 2024, soit cinq jours après la crue du torrent des Étançons survenue dans la nuit du 20 au 21 juin 2024 (RTM, 2025). Cette crue, exceptionnelle par son intensité, a entrainé un transport sédimentaire considérable conduisant à l'ensevelissement du hameau de la Bérarde avec environ 300 000 m^3 de matériaux qui ont été mobilisés, dont 200 000 m^3 ont été déposés au niveau du cône de déjection (RTM, 2025).

L'analyse du RTM (2025) a mis en évidence une combinaison de facteurs expliquant cet événement. Les données météorologiques ont montré des précipitations intenses entre le 19 et le 21 juin 2024, avec une limite pluie-neige entre 3 500 - 4 000 m d'altitude, jouant un rôle déclencheur (RTM, 2025). Les données nivologiques ont indiqué un enneigement très important au-dessus de 2 600 m d'altitude et une fonte marquée dès le 18 juin figurant parmi les plus fortes enregistrées depuis 1958 (RTM, 2025). Toutefois, ces éléments n'ont pas suffi à expliquer l'ampleur de la crue, conduisant à l'étude de la contribution du lac glaciaire, malgré les incertitudes liées à sa dynamique de remplissage et de vidange (RTM, 2025). C'est la combinaison de la disponibilité des matériaux, des conditions météorologiques et de la vidange du lac de Bonne Pierre qui a permis d'expliquer l'intensité de la crue (RTM, 2025). Par ailleurs, le lac s'est reformé le 26 mai 2025 et s'est vidangé le 20 juin 2025, avec un fonctionnement proche de celui des années précédant la vidange de 2024 (RTM, 2025).



Figure 11 : Dommages associés à la crue du torrent des Étançon. a) Le hameau de la Bérarde le 22 juin 2024. b) Maison ensevelie sous les matériaux mobilisés par la crue. c) Destruction partielle et totale des bâtis du hameau (RTM, 2025).

Les dommages associés aux vidanges de lacs glaciaires peuvent être de différentes natures. Les coûts directs renvoient aux impacts physiques immédiats sur les éléments exposés, tandis que les dommages indirects incluent les perturbations des activités économiques (Ozer, 2012 ; Schaub, 2015). Il existe également des coûts intangibles liés aux impacts sur l'environnement, la santé ou encore les impacts culturels et sont généralement difficilement quantifiables en termes monétaires (Schaub, 2015). Les événements de vidange de lacs glaciaires peuvent entraîner des conséquences socio-économiques importantes, comme la destruction d'infrastructures privées (habitations, exploitations et biens) et publics (infrastructures touristiques, routes, ponts, réseaux ferroviaires, électricité, eau et communication) mais aussi la relocalisation des populations affectées (Lützow et al., 2023). La figure 11 montre les dommages observés à la Bérarde après la crue de 2024 : 66 bâtiments ont été touchés, dont 11 partiellement détruits et 16 totalement détruits ou ensevelis (RTM, 2025). Cet événement n'a fait aucune victime mais a entrainé l'évacuation de 114 personnes (RTM, 2025).

1.4.4. Vulnérabilité et résilience

La vulnérabilité est définie par le GIEC comme étant la tendance ou la prédisposition d'être affecté négativement, et intègre notamment la sensibilité ou susceptibilité au préjudice, ainsi que le manque de capacité à faire face à une situation et à s'y adapter (IPCC, 2022b). Ozer (2012) définit la vulnérabilité dans le contexte des risques naturels comme une notion qui détermine le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène sur les éléments à risque.

Cette notion dépend généralement des caractéristiques socio-économiques des populations affectées par l'aléa, ce qui permet d'expliquer les différences de conséquences observées pour un même aléa selon les systèmes exposés (Carrivick & Tweed, 2016 ; Ozer, 2012). La vulnérabilité peut être exprimée en fonction de caractéristiques comme le statut socio-économique, l'âge ou le genre (Schaub, 2015). La vulnérabilité physique peut également être utilisée, cette dernière renvoyant au degré de dommage qu'un objet est susceptible de subir lorsqu'il est affecté par un aléa et dépend généralement du type et de la magnitude de l'aléa (Schaub, 2015).

Le terme de vulnérabilité est souvent associé à celui de résilience, qui désigne, dans ce contexte, la capacité d'un système à surmonter et faire face aux crises provoquées par un aléa (Ozer, 2012). Les deux notions sont directement liées puisque plus un système est résilient, moins celui-ci est vulnérable (Ozer, 2012). Enfin, les conséquences d'un même aléa varient au sein d'une population, notamment selon la perception de l'aléa, qui, elle-même, dépend des environnements sociaux, politiques et économiques (Ozer, 2012 ; Schaub, 2015).

1.5. Gestion et atténuation du risque de vidange

Face au risque croissant de vidanges de lacs glaciaires, des techniques de gestion et d'atténuation ont été développées dans plusieurs régions peuplées comme les Alpes, les Andes et l'Himalaya (Emmer et al., 2022a). Ces mesures peuvent être regroupées en deux grandes catégories : les mesures organisationnelles et les mesures structurelles (Geay & Martin, 2025). Ces deux approches peuvent également être combinées (Haeberli et al., 2017). Généralement,

le risque ne peut pas être réduit entièrement mais peut être amené à un niveau acceptable renvoyant à la notion d'acceptabilité du risque mentionné au point 1.4.1 (Haeberli et al., 2017).

1.5.1. Mesures organisationnelles

Cette catégorie vise à protéger les enjeux fixes et humains en réduisant la vulnérabilité et l'exposition, notamment à l'aide de systèmes de surveillance, de pré-alerte et d'alerte mais également au travers de l'aménagement du territoire et de la sensibilisation des populations (Emmer et al., 2022a ; Geay & Martin, 2025 ; Haeberli et al., 2017).

1.5.1.1. Système de surveillance

La surveillance des lacs glaciaires repose sur des outils comme la télédétection, les observations satellitaires ou l'utilisation de drones qui permettent d'observer leur formation, leur évolution et leur morphologie mais également l'acquisition de données topographiques nécessaires pour l'évaluation de certains paramètres comme le volume (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Giordan et al., 2020). Par ailleurs, depuis les années 1970, la télédétection a particulièrement amélioré la détection des vidanges de lacs glaciaires (Lützow et al., 2023). Sur le terrain, des mesures bathymétriques et piézométriques régulières permettent de suivre respectivement l'évolution du volume et des variations saisonnières du niveau de l'eau, tandis que l'installation de caméras assure un suivi en temps réel (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Haeberli et al., 2017).

Les données récoltées peuvent ensuite être utilisées pour des modélisations simulant différents scénarios de vidange, permettant d'identifier les zones potentiellement affectées, d'évaluer la vulnérabilité du territoire et ainsi d'envisager des mesures de gestion adaptées (Giordan et al., 2024 ; Haeberli et al., 2017). Cette approche par scénarios permet de faire varier différents paramètres incertains, comme la dynamique de vidange ou l'écoulement, tout en intégrant les trois composantes du risque (aléa, exposition et vulnérabilité) (Haeberli et al., 2017). Néanmoins, chaque cas doit être traité individuellement en raison des interactions complexes entre les différentes composantes (Haeberli et al., 2017). Par principe de précaution, le scénario le plus défavorable est généralement retenu (Demolis & Duperthuy, 2024).

1.5.1.2. Système de pré-alerte et d'alerte

Les systèmes de pré-alerte et d'alerte sont des systèmes intégrés qui combinent surveillance, prévision, évaluation des risques, communication et préparation (Sättele & Bründl, 2015). Ces systèmes permettent aux individus, collectivités et autorités de réagir à temps et de prendre des mesures adaptées, comme l'évacuation ou la mise en sécurité de zones exposées (Niggli et al., 2024 ; Sättele & Bründl, 2015). Ils reposent sur quatre composantes : la connaissance du risque et la compréhension du processus, les systèmes de surveillance et d'alerte, la diffusion de l'information et la capacité de réponse (Niggli et al., 2024 ; Sättele & Bründl, 2015). Deux types principaux de dispositifs sont retrouvés et peuvent également être combinés :

- Les systèmes d'alarme qui déclenchent des mesures d'intervention automatisées dès qu'un certain seuil définit préalablement est franchi. Ces systèmes sont adaptés aux évènements soudains qui nécessitent une réaction immédiate (Sättele & Bründl, 2015).

- Les systèmes d'alerte qui transmettent l'information à des experts qui l'analysent et décident des mesures d'intervention. Le temps d'intervention est généralement plus long que pour les systèmes d'alarme et sont donc davantage utilisés pour les processus lents et continus (Sättele & Bründl, 2015).

La définition d'une valeur seuil constitue une étape essentielle dans la mise en place de ces systèmes et repose sur la fréquence des observations, l'analyse et l'instrumentation du site, sur des études de cas et des modélisations (Laïly & Demolis, 2019 ; Sättele & Bründl, 2015). Lorsque des systèmes de pré-alerte sont installés, certains facteurs environnementaux doivent être pris en compte, tels que la température, le vent, la foudre, les mouvements de terrains, les avalanches et les laves torrentielles afin d'assurer la fiabilité du système (Laïly & Demolis, 2019). Ces systèmes nécessitent une maintenance et une surveillance constante (Haeberli et al., 2017).

La communication entre les différents acteurs impliqués (scientifiques, ingénieurs, autorités et population) et le partage de connaissances sont également des composantes clés des systèmes de pré-alerte (Haeberli et al., 2017 ; Laïly & Demolis, 2019). En effet, la communication externe doit être transparente et objective, avec des objectifs et stratégies communes clairement définis et communiqués à la population (Haeberli et al., 2017 ; Laïly & Demolis, 2019). Il existe plusieurs moyens pour informer la population comme les médias (radio, télévision), les supports imprimés (prospectus, posters informatifs, panneaux), des évènements informatifs (workshop) ou via des méthodes participatives (discussions ou focus group) (Haeberli et al., 2017 ; Niggli et al., 2024). La sensibilisation de la population dans les environnements alpins reste toutefois un enjeu majeur dans le contexte des vidanges de lacs glaciaires (Haeberli et al., 2017).

Station de surveillance et système de pré-alerte : Lac des Faverges, Suisse

Le Glacier de la Plaine Morte, situé dans les Alpes bernoises, suscite une attention particulière suite à la présence du lac des Faverges, un lac supraglaciaire qui se vidange de façon récurrente entre juillet et août (GEOPRAEVENT AG, s.d. ; Laïly & Demolis, 2019). Ce lac se forme chaque année suite à la fonte des neiges au printemps et en été avant de se drainer via un système sous-glaciaire (GEOPRAEVENT AG, s.d.). En 2011, le lac s'est vidangé soudainement, ce qui a déclenché une augmentation du niveau de l'eau du Trüebbach et de la Simme (GEOPRAEVENT AG, s.d.).

En 2012, trois stations lacustres équipées d'une mesure du niveau de l'eau, d'une caméra de surveillance et d'une sonde de pression ont été installées sur le lac des Faverges (fig. 12a), ainsi qu'une station de mesure du débit et d'un radar mesurant le niveau de l'eau sur le Trüebbach (Fig. 12b) (GEOPRAEVENT AG, s.d.). Ce système est installé au début de l'été et il transmet en continu des photos et données relatives au niveau de l'eau via le portail en ligne de Geopraevent (GEOPRAEVENT AG, s.d.). En cas de dépassement du seuil, soit une baisse critique du niveau de l'eau ou un débit critique, les autorités cantonales et communales sont alertées par SMS et procèdent aux évacuations nécessaires (GEOPRAEVENT AG, s.d. ; Laïly & Demolis, 2019). Suite à la vidange de 2018 ayant provoqué des inondations dans la vallée de

la Simme, le dispositif a été complété par quatre stations de caméras autonomes et par une sonde de pression (GEOPRAEVENT AG, s.d.). Le coût total du système s'élève à 100 000 francs suisses (CHF) (106 649,6 euros) par an (Laïly & Demolis, 2019).

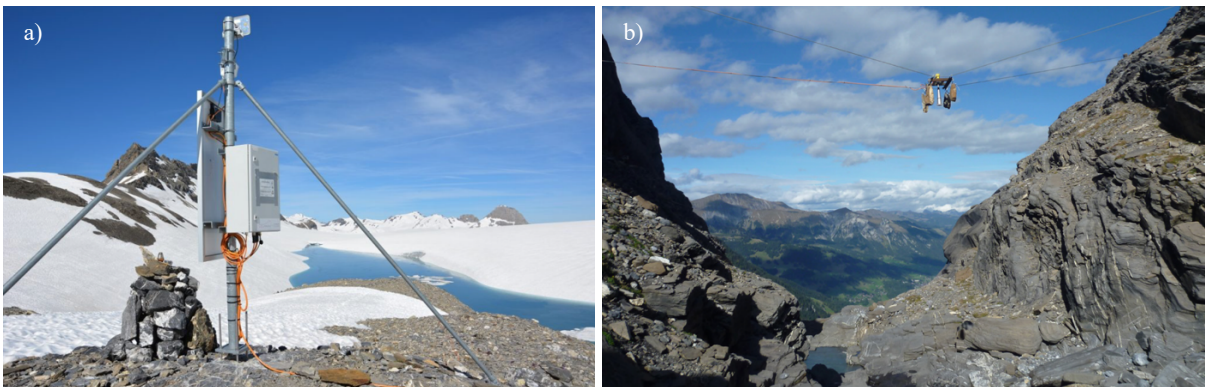


Figure 12 : a) Station de surveillance constituée d'une webcam, sonde de pression, enregistrement et transmission de données sur le Lac des Faverges, Glacier de la Plaine Morte, Suisse. b) Radar de niveau sur le Trüebbach pour la détection précoce d'inondations, Glacier de la Plaine Morte, Suisse (GEOPRAEVENT AG, s.d.).

Le premier signal est donné par une stagnation de la montée du niveau de l'eau (Laïly & Demolis, 2019). Le niveau de pré-alerte est déclenché par une diminution du niveau du lac de 20 cm par rapport à la moyenne sur 24h, et celui de l'alerte est initié par une diminution de 50 cm par rapport à la moyenne sur 24h (Laïly & Demolis, 2019). Ces seuils varient selon les conditions environnementales et sont propres à chaque lac (Laïly & Demolis, 2019). Les données sont filtrées par des services de sécurité 24h sur 24h afin d'écarter les fausses alertes, notamment celles causées par des glissements de terrain affectant les capteurs (Laïly & Demolis, 2019). Le délai entre l'alerte et l'arrivée de la crue est variable, par exemple, celui-ci était de quatre jours avant 2018 contre 6h lors de la vidange de 2018, où le temps de décision entre la pré-alerte et l'alerte n'était que de 10 minutes (Laïly & Demolis, 2019).

1.5.2. Mesures structurelles

Les mesures structurelles renvoient à la réduction du risque de vidange après la réalisation de travaux (Emmer et al., 2022a ; Geay & Martin, 2025 ; Haeberli et al., 2017). Celles-ci peuvent être passives ou actives (Geay & Martin, 2025). Les mesures passives tolèrent l'événement de vidange et tendent à réduire son intensité et ses impacts, tandis que les actives visent à réduire l'aléa de départ et agissent donc au niveau du lac ou du glacier (Emmer et al., 2022a ; Geay & Martin, 2025).

1.5.2.1. Mesures structurelles passives

Ces mesures sont mises en place à l'aval des lacs glaciaires sous la forme d'ouvrages, tels que des bassins de rétention ou des barrages de déviation de l'écoulement (fig. 13a), dont l'objectif est de réduire la magnitude d'une vidange ainsi que l'exposition (Niggli et al., 2024).



Figure 13 : Mesures structurelles passives. a) Succession de plages de dépôts d'une capacité de 100 000 m³, Chatelard, forêt domaniale RTM du Nant des Granges, France (Geay & Martin, 2025). b) Structure de rétention des sédiments à Täsch, en aval du lac de Weingarten, Suisse (Niggli et al., 2024).

Les barrages de déviation permettent de rediriger les écoulements tandis que les barrages de rétention permettent de séparer les sédiments grossiers des sédiments fins réduisant la quantité de matériaux mobilisés (Niggli et al., 2024). Les protections des rives, les murs de protection contre les inondations et la stabilisation des versants figurent également parmi ces mesures (Niggli et al., 2024). Par ailleurs, ces mesures peuvent être détruites suite à des laves torrentielles, des avalanches ou des glissements de terrain (Niggli et al., 2024). Par exemple, la vidange du lac de Weingarten en 2001 a été trop importante par rapport à la structure de rétention de sédiment qui avait été construite pour protéger Täsch des laves torrentielles (fig. 13b), ce qui a finalement mené au renforcement du barrage naturel du lac (Niggli et al., 2024).

1.5.2.2. Mesures structurelles actives

Les mesures actives visent à réduire le niveau de l'eau des lacs glaciaires et donc le volume (Niggli et al., 2024). Les différentes mesures présentées par la suite dépendent des contraintes physiques et du contexte glaciaire propre à chaque site et doivent être adaptées à chaque cas (Emmer et al., 2022a ; Laïly & Demolis, 2019). Des études de faisabilités des différentes méthodes en fonction du site, en prenant compte des paramètres comme l'altitude, l'accessibilité et la période d'intervention, sont nécessaires (Demolis & Duperthuy, 2024). De manière générale, la sécurité des personnes sur le site et les conditions météorologiques méritent une attention particulière afin d'anticiper les risques potentiels (Laïly & Demolis, 2019). Même après réduction du niveau de l'eau du lac, les risques d'une vidange brutale ne peuvent pas être écartés (Niggli et al., 2024).

a) Stabilisation et endiguement du barrage

Cette mesure permet de renforcer les barrages instables, notamment au niveau des exutoires, et d'augmenter la hauteur de franc-bord à l'aide de béton ou de pavage (Fig. 14) (Emmer et al., 2022a). La stabilisation du barrage permet également de réduire le risque de vidange par surverse ainsi que l'érosion de celui-ci (Niggli et al., 2024). Cette méthode est particulièrement utilisée pour les exutoires des lacs endigués par une moraine afin d'éviter une incision et une érosion régressive pouvant mener à la rupture du barrage (Emmer et al., 2022a). Cette mesure est souvent combinée avec la présence de chenaux sous le barrage (Fig. 14b) (Niggli et al., 2024).

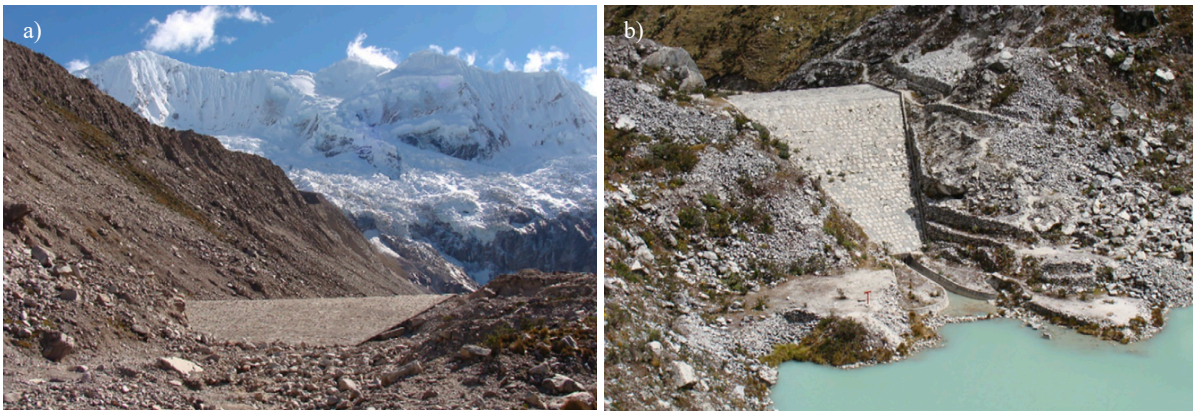


Figure 14 : Consolidation du barrage. a) Barrage artificiel augmentant la hauteur de franc-bord sur le lac Palcacocha en 2012, Cordillère Blanche, Pérou. b) Barrage artificiel et chenal consolidé sur le lac Llaca en 2012, Cordillère Blanche, Pérou (Emmer et al., 2022a).

Cette méthode a notamment été mise en œuvre au Pérou et en Suisse, avec les premiers barrages datant de 1950 (Niggli et al., 2024). Concernant la Suisse, des barrages artificiels ou le renforcement des barrages ont été installés sur le lac Mauvoisin situé sur le glacier du Giétro (1950), sur le lac glaciaire du Gruben (1990) et sur le lac de Weingarten (2001) (Niggli et al., 2024). Cette mesure est d'ailleurs envisagée pour le lac en aval du glacier du Trift (Suisse) en combinaison avec un projet de barrage hydroélectrique (Haeberli et al., 2016 ; Niggli et al., 2024).

b) Pompage du lac

Le pompage du lac repose sur la mise en place d'un système de pompes afin de drainer artificiellement l'eau du lac, réduisant ainsi son volume et le risque de vidange (Dupire, 2025 ; Niggli et al., 2024). Pour assurer l'efficacité de cette mesure, le débit de pompage doit être supérieur au débit entrant dans le lac (Geay & Martin, 2025). Il s'agit d'une solution temporaire car le niveau de l'eau peut remonter rapidement dès l'arrêt du système et il dépend fortement de la capacité ainsi que du nombre de pompes (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019 ; Niggli et al., 2024).



Figure 15 : Système de pompage sur le lac de Grand Croux, Italie. a) Vue d'ensemble du système (Troilo et al., 2025). b) Vue sur une des pompes utilisées (Fondazione Montagna Sicura, 2019).

Les pompes peuvent être alimentées par des générateurs fonctionnant au diesel ou à l'électricité (Kull, 2019 ; Niggli et al., 2024). Le principal avantage du pompage est sa rapidité de mise en

œuvre, ce qui en fait une mesure d'urgence, et peut également être combinée à d'autres mesures (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019 ; Niggli et al., 2024). Cette mesure nécessite cependant de connaître certains paramètres comme le volume du lac et celui à évacuer (Demolis & Duperthuy, 2024). Sa mise en œuvre peut également s'avérer compliquée en fonction des caractéristiques environnementales du site, par exemple, pour les pompes électriques, la hauteur de levage peut être trop importante et l'installation des câbles électriques peut s'avérer difficile selon la topographie (Kull, 2019). L'utilisation de l'électricité présente toutefois l'avantage d'utiliser les infrastructures électriques présentes sur certains sites comme des postes de transformation (Kull, 2019). En revanche, pour les pompes au diesel, l'approvisionnement quotidien du carburant constitue un enjeu (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019). Le gel représente par ailleurs une contrainte pour l'utilisation de cette méthode (Geay & Martin, 2025).

Concernant les coûts, ceux-ci sont généralement modérés, bien qu'en fonction du volume du lac, cette mesure peut s'avérer trop coûteuse (Kull, 2019 ; Laïly & Demolis, 2019). À titre d'exemple, la mise en place de la mesure pendant quatre jours sur le lac de Grand Croux en Italie a été estimée à 500 000 euros hors taxes (Dupire, 2025). Enfin, cette mesure entraine des nuisances sonores et une pollution due aux émissions de CO_2 dans le cas des pompes alimentées au diesel (Kull, 2019).

Lac de Grand Croux, Massif du Grand Paradis, Cogne, Italie

Un système de pompage a été mis en place en 2018 sur le lac de Grand Croux, en préalable à une opération d'abaissement de l'exutoire (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). Cinq pompes de 80 kg ont été utilisées pendant 4 jours, sans permettre un abaissement suffisant du niveau de l'eau en raison d'une remontée nocturne trop importante lors de l'arrêt des pompes (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). La capacité réelle des pompes était de 40 m^3/h contre 100 m^3/h annoncée par les fournisseurs en raison de la diminution du rendement liée à l'altitude et aux pertes de charges dues à la longueur des tuyaux (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). Dix pompes ont ensuite été utilisées pour atteindre un pompage efficace atteignant 5 000 m^3/jour sur des durées de 13h (Fig. 15) (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025).

c) Siphonage du lac

Cette mesure repose sur le drainage artificiel du lac à l'aide de siphons, dans le but de réduire son volume et le risque de vidange (Dupire, 2025). L'eau vidangée est alors évacuée par des tuyaux vers un niveau inférieur à celui du lac, le système reposant sur les principes de gravité et de pression hydrostatique (Niggli et al., 2024). Il s'agit également d'une mesure temporaire puisque l'abaissement du niveau de l'eau se fait pendant l'opération, ce qui n'empêche pas que le niveau de l'eau puisse remonter rapidement après la fin de celle-ci (Demolis & Duperthuy, 2024). Elle reste néanmoins largement utilisée (Niggli et al., 2024).



Figure 16 : a) Système de siphonage pour vidanger le lac de Rochemelon, France. b) Les tuyaux provisoires en Janolène (rouge) et les tuyaux en PEHD. c) Le lac de Rochemelon avec son niveau abaissé de 5 m (RTM, 2006).

La principale limite physique de cette méthode est la différence de hauteur entre le niveau du lac et la limite supérieure du barrage, car si le point le plus élevé du tuyau dépasse une certaine hauteur, l'utilisation de siphons est impossible (Niggli et al., 2024). La hauteur maximale franchissable est définie par la hauteur de la colonne d'eau supportée par la pression atmosphérique reprise par l'équation suivante (Dupire, 2025) :

$$h = \frac{P}{\rho . g} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

avec h, la hauteur de la colonne d'eau (m) ; P, la pression atmosphérique pour une altitude (Pa) ; ρ, la densité de l'eau (1 000 kg/m^3) et g, la gravité (9,81 m/s^2) (Dupire, 2025). La faisabilité de cette mesure dépend donc fortement de l'altitude du lac, puisque plus l'altitude est élevée et plus la pression atmosphérique est réduite ce qui limite la hauteur maximale franchissable par le système (Dupire, 2025). Au-delà de cette limite, la pression au sommet de la colonne d'eau descend sous le seuil de pression de vapeur, provoquant l'apparition de bulles de vapeur interrompant la continuité de la colonne d'eau (Dupire, 2025). Ce principe physique implique qu'une vidange complète du lac ne peut pas être réalisée par siphonnage (Geay & Martin, 2025).

Hormis la limite physique, la mise en place de cette mesure est relativement simple et peut être combinée à d'autres mesures (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Niggli et al., 2024). Elle nécessite toutefois un suivi continu en raison du risque de désamorçage des siphons, bien que leur

automatisation est aujourd'hui étudiée (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Geay & Martin, 2025). Son efficacité dépend de la capacité des tuyaux utilisés et peut nécessiter un grand nombre de tuyaux, et tout de même rester insuffisante face à l'apport de l'eau dans le lac (Niggli et al., 2024). De plus, les tuyaux doivent constamment être submergés dans l'eau pour fonctionner (Niggli et al., 2024). Le gel des siphons figure également parmi les limites de cette mesure empêchant d'assurer un fonctionnement permanent (Geay & Martin, 2025). Il existe par ailleurs des inconnues concernant les écoulements rejetés en aval et il est nécessaire de s'assurer que cela ne génère pas un sur-aléa (Dupire, 2025). Enfin, les mouvements des glaciers et des pentes environnantes peuvent endommager les siphons (Niggli et al., 2024).

Lac de Rochemelon, Haute Maurienne, Savoie, Bessans, France

Cette mesure a été employée en urgence en 2004 pour vidanger le lac glaciaire de Rochemelon (Dupire, 2025). Ce lac s'est formé vers 1960 sur le glacier du même nom à la frontière entre la France et l'Italie, et s'est progressivement agrandi suite à la fonte du glacier, atteignant en octobre 2004 une superficie de 4,7 ha pour environ 600 m de long, 30 m de profondeur et un volume de 650 000 m^3 (Laïly & Demolis, 2019 ; RTM, 2006). Le lac menaçait de se vidanger en août 2004 par soulèvement du verrou glaciaire ou par débordement, et le siphonage a été utilisé afin d'abaisser son niveau d'au moins 5 m et pour assurer un équilibre hydrostatique entre le poids du verrou glaciaire et la poussée de l'eau (Laïly & Demolis, 2019).

Le système de siphonage était composé de quatre tubes Janolène provisoires de 110 mm, permettant d'interrompre la montée du niveau de l'eau alors que le déversement n'était plus qu'à 9 cm et de deux tubes PEHD de 220 mm (Fig. 16a, b) (Dupire, 2025 ; Laïly & Demolis, 2019). Au final, le niveau du lac a été abaissé de 5,7 m, soit environ 250 000 m^3, entre le 6 octobre et 8 novembre 2004, jusqu'à ce que les siphons se désamorcent naturellement (Fig. 16c) (Dupire, 2025). Le lac a ensuite été vidangé complètement durant l'été de 2005 d'abord par siphonage puis par surverse grâce à un chenal creusé dans la glace, et il ne s'est plus reformé depuis (Laïly & Demolis, 2019).

d) Couvrir les glaciers

Cette mesure repose sur la mise en place d'une bâche géotextile blanche en polyester et polypropylène posée sur la neige printanière d'une partie du glacier pour limiter l'apport d'eau de fonte et l'extension du lac lors de la période de fonte (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Huss et al., 2021). Il s'agit d'une mesure provisoire efficace localement (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Lässig, 2021). Généralement, les bâches sont fabriquées selon des rouleaux de 50 m de longueur sur 4 - 5 m de largeur et pèsent 0,5 kg/m^2 pour une épaisseur de 3 - 4 mm (Huss et al., 2021). Ces bâches sont généralement retirées en automne pour assurer une accumulation de neige sur le glacier (Huss et al., 2021).

Cette méthode repose sur le principe du bilan énergétique puisque l'objectif est de protéger des parties du glacier du rayonnement solaire afin de réduire la fonte (Huss et al., 2021 ; Lässig, 2021). En effet, les bâches utilisées ont un albedo plus élevé que la neige fondante ou les surfaces de glace renvoyant davantage les radiations et entrainant une réduction de l'énergie disponible pour la fonte (Huss et al., 2021). De plus, les bâches géotextiles ont des propriétés

thermiques favorables et réduisent la fonte en raison de plus petits flux de chaleur turbulent (Huss et al., 2021).

La mise en place de bâches géotextiles sur les glaciers dépend des caractéristiques du site et peut, soit être rapide, soit présenter certaines difficultés techniques en fonction de l'accessibilité du site (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019). Lors de son retrait, il est possible que la bâche reste collée à la glace laissant ainsi des particules géotextiles sur le glacier posant des enjeux en termes de pollution (Demolis & Duperthuy, 2024). De la même façon, cela peut avoir des impacts sur la qualité de l'eau en aval en raison de la dégradation des bâches et la libération de substances chimiques et de microplastiques (Huss et al., 2021). De plus, cela génère un impact paysager considérable (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019).



Figure 17 : a) & b) Bâches géotextiles mises en place sur le glacier du Rhône pour limiter sa fonte localement (Huss et al., 2021 ; Lässig, 2021).

Les coûts de cette mesure sont élevés et varient entre 0,6 et 7,9 CHF (0,64 et 8,43 euros) par m^3 par an pour préserver 1 m^3 de glace en fonction du type d'installation et de sa localisation sur le glacier (Huss et al., 2021). La durée de vie des bâches géotextiles varie entre 3 à 8 ans car leur efficacité diminue avec le temps suite à une réduction de l'albédo de la bâche et en raison d'abrasion mécanique suite au mouvement du glacier ou à la formation de crevasses (Huss et al., 2021). Cette mesure reste donc une mesure applicable à l'échelle locale notamment en raison des coûts trop élevés (Lässig, 2021).

Dans leur étude, Huss et al. (2021) indiquent que cette mesure de couverture des glaciers par des géotextiles est actuellement utilisée sur neuf sites depuis 15 ans en Suisse. En 2019, environ 0,18 km^2 - ou 0,02 % - de la superficie totale des glaciers en Suisse étaient couverte par des géotextiles, soit le double de la superficie en 2012 (Huss et al., 2021). Selon Huss et al. (2021) 350 000 m^3 de fonte de glace par an ont pu être évité grâce à cette technique en Suisse. Par exemple, sur le glacier du Rhône en Suisse, une superficie de 0,05 km^2 en 2019 était couverte par des géotextiles au niveau du front du glacier (Fig. 17a, b) (Huss et al., 2021).

e) Combler le lac par des matériaux morainiques

Il s'agit ici de remplir le lac avec des matériaux solides comme de la roche, de la glace et d'autres débris provenant des moraines, des glaciers ou des matériaux excavés afin de réduire le volume du lac en remplaçant l'espace disponible pour l'eau par des matériaux solides

(Dupire, 2025 ; Niggli et al., 2024). Cette mesure est considérée comme pérenne et dont la mise en œuvre est relativement simple bien qu'une pelle araignée est généralement indispensable, et que des moyens mécaniques lourds peuvent être nécessaires en fonction du volume à combler (Demolis & Duperthuy, 2024).

f) Chenal de surverse/drainage

Cette mesure consiste à creuser un chenal de drainage en surface du barrage, et elle a été mise en œuvre sur des barrages de moraine, de roche et de glace (Niggli et al., 2024).

- Chenal de vidange dans la glace

Le chenal de drainage ouvert peut être creusé soit directement sur le glacier, soit sur le barrage de glace retenant le lac dans le but de provoquer une vidange progressive et totale du lac (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025 ; Kull, 2019). Une fois créé, le chenal s'élargit et s'incise progressivement sous l'effet de l'érosion thermique et mécanique de l'eau sur la glace (Dupire, 2025). Plus le chenal sera étroit et plus il sera susceptible de s'inciser (Dupire, 2025). Il s'agit d'une mesure durable qui permet une vidange complète du lac et, dans les conditions idéales, qui empêche la reformation du lac (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Kull, 2019).



Figure 18 : a) Terrassement et creusement d'un chenal dans la glace pour vidanger totalement le lac des Bossons, France, à l'aide d'une pelle araignée. b) Terrassement à l'amont du chenal et mise en eau du chenal. c) Incision du chenal par l'écoulement de l'eau. d) Vue de l'ensemble (Demolis & Duperthuy, 2024).

Des blocs de roche, de glace ou de la neige peuvent néanmoins obstruer le chenal, et il est susceptible de se reboucher (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025). Puisque cette mesure vise une vidange totale, cela peut entraîner un emballement et une augmentation importante des débits en aval, d'autant plus que ces deux processus sont associés à des incertitudes (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). C'est pourquoi certains paramètres tels que les températures de la glace et de l'eau, les débits, le niveau de l'eau et le volume, la pente du chenal et sa largeur sont à considérer (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). Enfin,

les travaux relatifs au creusement du chenal peuvent être complexes et mener à une vidange partielle et non complète (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Geay & Martin, 2025).

Lac des Bossons, Massif du Mont-Blanc, Chamonix, France

Identifié en 2020, le lac des Bossons s'est formé au front du glacier des Bossons suite à son retrait (Demolis & Duperthuy, 2024). Son volume était estimé, en 2021, à 3 700 m^3 avec des projections pour 2022 allant jusqu'à 21 000 m^3, représentant ainsi un risque pour la vallée de Chamonix-Mont-Blanc (Demolis & Duperthuy, 2024). Afin d'anticiper sa vidange, un chenal de 100 m a été creusé dans la glace en 2023, légèrement en-dessous du niveau du lac, afin de provoquer sa mise en eau et son incision progressive jusqu'à atteindre le fond du lac (Fig. 18) (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025). Pour éviter tout emballement de la vidange, des études de cinétique d'incision du chenal et des modélisations de la surverse ont été réalisées (Demolis & Duperthuy, 2024).

Les travaux ont duré deux semaines fin juillet et ont été réalisés à l'aide de deux pelles araignées de 15 tonnes et par minage de certains blocs, ce qui a conduit au terrassement de 3 000 m^3 (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025). Un bouchon de glace de 15 m (fig. 18b) a été maintenu en amont du chenal et a été terrassé lors de la mise en eau le 31 juillet 2023 (Demolis & Duperthuy, 2024). Le chenal s'est ensuite incisé progressivement (fig. 18c) jusqu'à 6 m de profondeur pour une largeur variant entre 1 m et 1,5 m, entraînant la vidange complète du lac en cinq jours (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025).

- Chenal de surverse dans une moraine

Le drainage à travers les barrages de moraine permet de réduire le volume du lac et est généralement combiné à un barrage artificiel (Emmer et al., 2022a). De plus, les chenaux sont généralement renforcés avec du béton ou du pavement afin d'éviter l'incision du barrage ou sa rupture (Emmer et al., 2022a). Cette mesure a notamment été appliquée dans la Cordillère Blanche, au Pérou, sur le lac 69, en 2016, et le lac Ishinca, en 2013 (Emmer et al., 2022a).

- Chenal de surverse dans la roche

Le principe de cette mesure est similaire à celle pour les barrages de glace et moraine mais varie en termes de mise en œuvre, puisque ici il s'agit de creuser un chenal de surverse dans de la roche (Laïly & Demolis, 2019).

Lac de Rosolin, Glacier de la Grande-Motte, Champagny-en-Vanoise, France

Le lac de Rosolin, formé en 2018, se situe en aval du glacier de la Grande-Motte dans le parc national de la Vanoise en France (Geay et al., 2024). Le lac s'est rapidement étendu sous l'effet du retrait glaciaire, estimé à 20 m par an, atteignant 33 000 m^2 à la fin de l'été 2022 pour un volume estimé à 150 000 m^3 en 2023 (Geay et al., 2024). L'exutoire du lac repose sur un substrat rocheux, mais est cependant endigué à l'est par un barrage de glace d'environ 600 m de long et 20 à 30 m de haut (Geay et al., 2024). La vidange du lac via des chenaux sous-glaciaires a été évaluée comme possible et susceptible d'inonder la station de ski de Tignes et du village de Val Claret, situé à 2,5 km du glacier (Geay et al., 2024).

La mesure finalement retenue a été de creuser de 6 m l'exutoire du lac afin de réduire son volume (Geay et al., 2024). Une première phase a été réalisée à l'aide d'un excavateur de 19 tonnes en juillet 2023. La seconde phase a été entreprise entre le 9 aout et 14 septembre avec un excavateur et un bulldozer ; un total de 5 000 m^3 a été excavé et ensuite répartis sur le site (Geay et al., 2024). En 2024, le lac contenait toujours 20 000 à 40 000 m^3 d'eau et risque d'augmenter durant les prochaines années, ce qui risque d'amener probablement de nouveaux travaux (Geay et al., 2024).

g) Galerie et tunnel

Cette mesure consiste à creuser des galeries ou des tunnels afin de vidanger le lac. Cette méthode a été mise en œuvre dans la glace et dans la roche.

- Galerie sous-glaciaire

Cette mesure consiste à creuser une galerie sous-glaciaire pour vidanger le lac, soit par forages horizontaux à l'eau chaude, soit manuellement suivant le même principe que les grottes touristiques creusées dans la glace (Dupire, 2025). Comme pour les chenaux de surverse, l'action de l'eau sur la glace permet d'élargir les galeries sous-glaciaires (Dupire, 2025).



Figure 19 : Creusement d'une galerie sous-glaciaire, Glacier de la Plaine Morte, Suisse. a) Vue d'ensemble du site. b) Les machines utilisées pour le forage. c) Sur le plafond de la galerie, la trace du forage peut être observée (Geay & Martin, 2025).

Il s'agit d'une mesure pérenne, bien que la galerie soit susceptible de se refermer durant l'hiver ou de s'obstruer avec de la neige ou de la glace (Dupire, 2025 ; Niggli et al., 2024). Concernant

le forage à l'eau chaude, cela nécessite une puissance électrique conséquente pour alimenter les pompes et les chaudières (Dupire, 2025). Cette mesure implique un risque important en termes de sécurité car le toit de la galerie peut s'effondrer ou la présence d'une poche d'eau peut amener à une vidange soudaine (Dupire, 2025). Par exemple, en 1818, un lac s'était formé suite à une avalanche sur le glacier de Giétro dans le canton du Valais et menaçait de se vidanger (Geay & Martin, 2025). Il a alors été décidé de creuser une galerie sous-glaciaire d'environ 200 m de long par une trentaine d'ouvriers sur un mois (Geay & Martin, 2025). Cependant, le barrage de glace a cédé en raison d'une érosion thermique et environ 20 millions de m^3 d'eau se sont vidangés en 30 minutes causant 36 pertes humaines et la destruction de nombreuses infrastructures jusqu'à 30 km en aval (Geay & Martin, 2025 ; Niggli et al., 2024 ; Schupbach, 2024).

Lac des Faverges, Glacier de la Plaine Morte, Lenk, Suisse

Cette mesure a été mise en œuvre sur le glacier de la Plaine Morte, en 2019, dans l'optique de vidanger le lac des Faverges par forage horizontal (Fig. 19) (Geay & Martin, 2025). Sur les 800 m initialement prévus, seuls 150 m ont été forés en raison de problèmes rencontrés notamment en termes de guidage (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). D'autres problèmes sont apparus, comme le fait que lors du deuxième forage la tête du forage est ressortie avant la fin et, lors du troisième, une tête de forage a été perdue (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). Par la suite, il a été décidé de creuser un chenal de surverse d'une longueur de 1,4 km sur la glace à l'aide de quatre pelles araignées et d'abandonner les forages (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025). Par ailleurs, le micro-tunnel foré a tout de même été emprunté par l'eau de vidange et s'est élargi par l'action de l'eau (Fig. 19c) (Dupire, 2025 ; Geay & Martin, 2025).

h) Galerie dans la roche

La réalisation d'une galerie dans la roche peut se faire avec des forages dirigés, avec un micro-tunnelier ou par un creusement à l'explosif (Geay & Martin, 2025). Puisque cette méthode consiste à creuser directement dans de la roche, des études géotechniques poussées sont nécessaires au préalable (Geay & Martin, 2025). Il s'agit ici d'une mesure permanente bien que la connexion entre le lac et le tunnel peut se modifier en fonction de l'évolution du glacier et de la position du lac (Geay & Martin, 2025).



Figure 20 : Tunnel creusé dans la roche, Grindelwald, Suisse. a) Réalisation des travaux (Geay & Martin, 2025). b) Vue de l'extérieur (Kull, 2019).

Lac sur le glacier de Grindelwald, Alpes bernoises, Grindelwald, Suisse

Cette méthode a été utilisée pour vidanger le lac du glacier de Grindelwald car les enjeux en aval étaient importants (Laïly & Demolis, 2019). Ainsi, en 2009, un tunnel a été creusé dans la roche pour permettre une vidange du lac avant qu'une rupture du barrage n'apparaisse, soit lorsque son volume atteignait 500 000 m^3 (Laïly & Demolis, 2019). Le volume excavé pour cette opération s'est élevé à 50 000 m^3 pour un tunnel de 2 200 m de long, 3,2 m de large et 4 m de haut (Geay & Martin, 2025 ; Laïly & Demolis, 2019). Le tunnel a été utilisé deux fois et le coût de l'opération s'est élevé à 15 millions d'euros (Fig. 20) (Geay & Martin, 2025). Ce tunnel n'est aujourd'hui plus utilisé en raison du retrait important du glacier (Niggli et al., 2024)

i) Abaissement de l'exutoire

L'objectif d'abaisser l'exutoire est de retarder le déversement naturel du lac en limitant le niveau maximum d'eau que le lac peut atteindre (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Dupire, 2025). Il s'agit d'une mesure provisoire qui permet de réduire le niveau de l'eau et donc son volume (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Geay & Martin, 2025). Les techniques utilisées pour terrasser peuvent varier en fonction du type de matériau comme des roches plus ou moins dures (Geay & Martin, 2025). C'est pourquoi, la connaissance de la nature du sous-sol peut s'avérer utile pour la mise en œuvre de cette méthode, notamment avec une étude géophysique ou des sondages (Geay & Martin, 2025).

Lac des Bossons, Massif du Mont-Blanc, Chamonix, France

Cette mesure a été entreprise sur le lac des Bossons afin de diminuer le volume du lac de manière provisoire avant d'entreprendre les travaux de creusement d'un chenal (Demolis & Duperthuy, 2024). La mise en œuvre s'est faite à l'aide d'une petite pelle araignée qui a été héliportée sur le site et qui a permis d'abaisser l'exutoire du lac de 1,25 m sur les 2 m prévus, soit un volume de 4 000 m^3 (Demolis & Duperthuy, 2024). Ici, il s'agissait principalement de retirer des blocs au niveau de l'exutoire qui formait un seuil naturel (Demolis & Duperthuy, 2024).

1.6. Évolution future des lacs glaciaires

Le retrait des glaciers favorise la formation de nouveaux lacs glaciaires, ce qui implique que de nombreux lacs devraient apparaître dans les futurs environnements déglacés (Haeberli et al., 2016, 2017). À terme, les environnements alpins pourraient ainsi évoluer vers des paysages rocheux recouverts de débris caractérisés par une végétation discontinue et composés de lacs de taille variée (Haeberli et al., 2017). Étant donné que les lacs glaciaires sont des composantes dynamiques du paysage, il est essentiel de déterminer leur localisation future et leur période de formation (Steffen et al., 2022a).

Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'identifier les dépressions susceptibles d'accueillir de futurs lacs glaciaires, notamment à partir de la topographie sous-glaciaire qui peut être obtenue en soustrayant l'épaisseur de glace au modèle numérique de terrain (Otto, 2018 ; Steffen et al., 2022a ; Zhang et al., 2024). Un modèle hydrologique permet ensuite de remplir ces dépressions, et la différence entre la topographie sous-glaciaire remplie et celle d'origine

donne une grille bathymétrique qui fournit une estimation de l'étendue et du volume des futurs lacs (Zhang et al., 2024). Il est également possible d'estimer leur période de formation grâce à des modèles d'évolution glaciaire (Zhang et al., 2024).

Cependant, ces projections ne prennent généralement pas en compte le processus de sédimentation susceptible de remplir certaines dépressions, pouvant ainsi entraîner une surestimation du nombre de lacs futurs (Steffen et al., 2022a ; Zhang et al., 2024). Par exemple, dans leur étude sur l'inventaire et l'évolution des lacs glaciaires en Suisse depuis le Petit Âge Glaciaire, Mölg et al. (2021b) avaient identifié que, pour la période 1973–2016, 40 % des surcreusements modélisés ont effectivement été occupés par un lac. Ces méthodes reposent sur l'hypothèse que chaque dépression formera un lac après le retrait glaciaire et ne concernent généralement que les lacs endigués par le bedrock, et non par une moraine ou de la glace (Steffen et al., 2022a). Enfin, un décalage temporel peut exister entre le retrait des glaciers suite au réchauffement climatique et la formation des lacs (Mölg et al., 2021b).

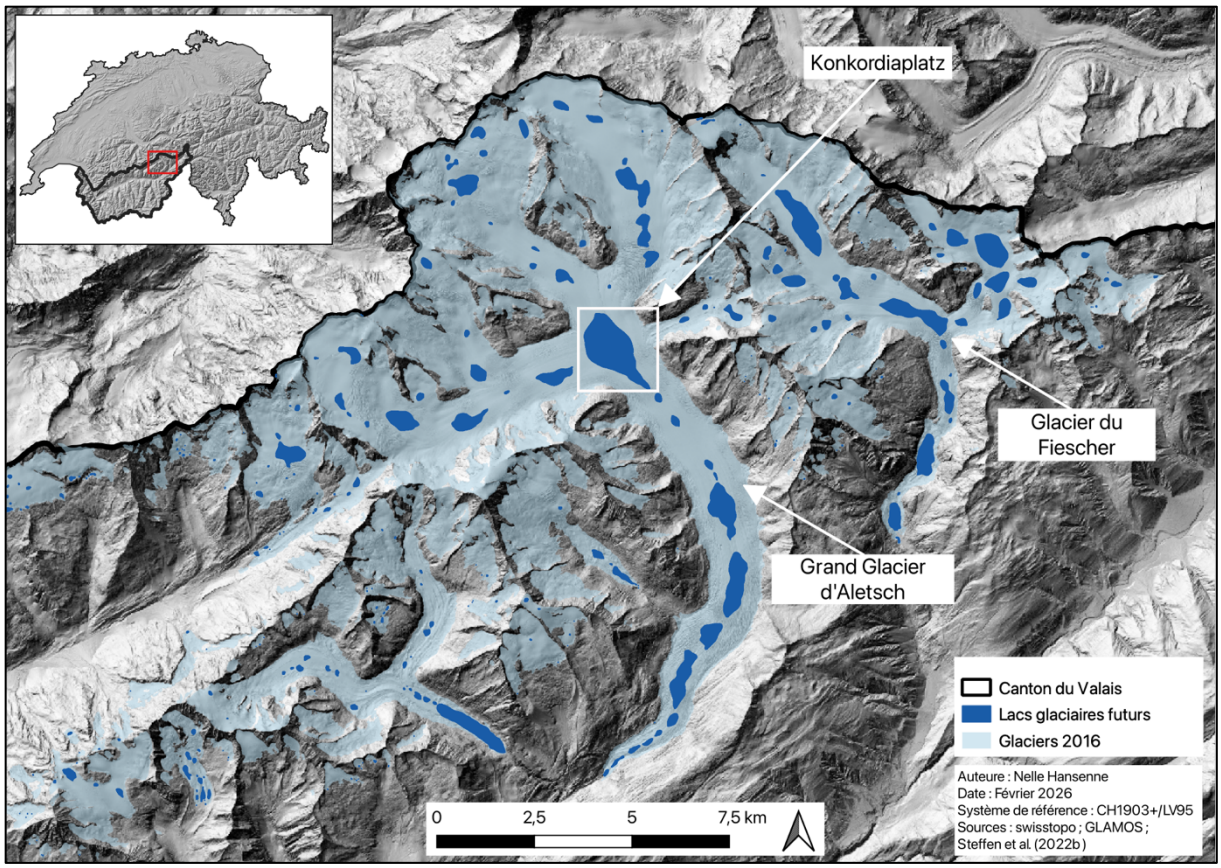


Figure 21 : Futurs lacs glaciaires au niveau du Grand Glacier d'Aletsch et du glacier du Fiescher, Valais, Suisse.

Pour les Alpes suisses, Steffen et al. (2022a) ont identifié 3 600 lacs glaciaires futurs potentiels suite à la disparition totale des glaciers, dont 683 présentent une superficie supérieure à 5 000 m^2 et une profondeur d'au moins à 5 m, soit un volume potentiel de 1,16 [1,05, 1,32] km^3 et une superficie totale de 45,2 (± 9,3) km^2, soit 4,7 % de la superficie glaciaire actuelle (Steffen et al., 2022a). L'altitude moyenne des futurs lacs est de 2 776 m s.n.m., bien que certains aient été identifiés à des altitudes allant jusqu'à 4 300 m s.n.m., notamment à proximité du glacier du Gorner (Steffen et al., 2022a). De manière générale, la taille des futurs lacs glaciaires est

directement liée à celle du glacier puisque les grands glaciers sont caractérisés par un pouvoir érosif plus important, ce qui induit ainsi de plus grandes dépressions (Steffen et al., 2022a).

Le Valais regroupe 1 871 de ces futurs lacs potentiels, soit 51,97 % du total identifié pour la Suisse, confirmant qu'il s'agit du canton le plus susceptible d'être exposé au risque de vidange dans le futur (Steffen et al., 2022b). Par ailleurs, les cinq plus grands lacs identifiés par Steffen et al. (2022a) se situent en Valais, dont deux à proximité du Grand Glacier d'Aletsch et les trois autres au niveau du glacier du Rhône, du glacier du Gorner et du glacier du Fiescher, respectivement (Steffen et al., 2022a). Le plus grand d'entre eux se situe au niveau du Konkordiaplatz, à la confluence des différentes branches du Grand Glacier d'Aletsch, avec une profondeur maximale d'environ 330 m et un volume potentiel de 183 [131, 263] $\cdot 10^6$ m^3 (Fig. 21) (Steffen et al., 2022a).

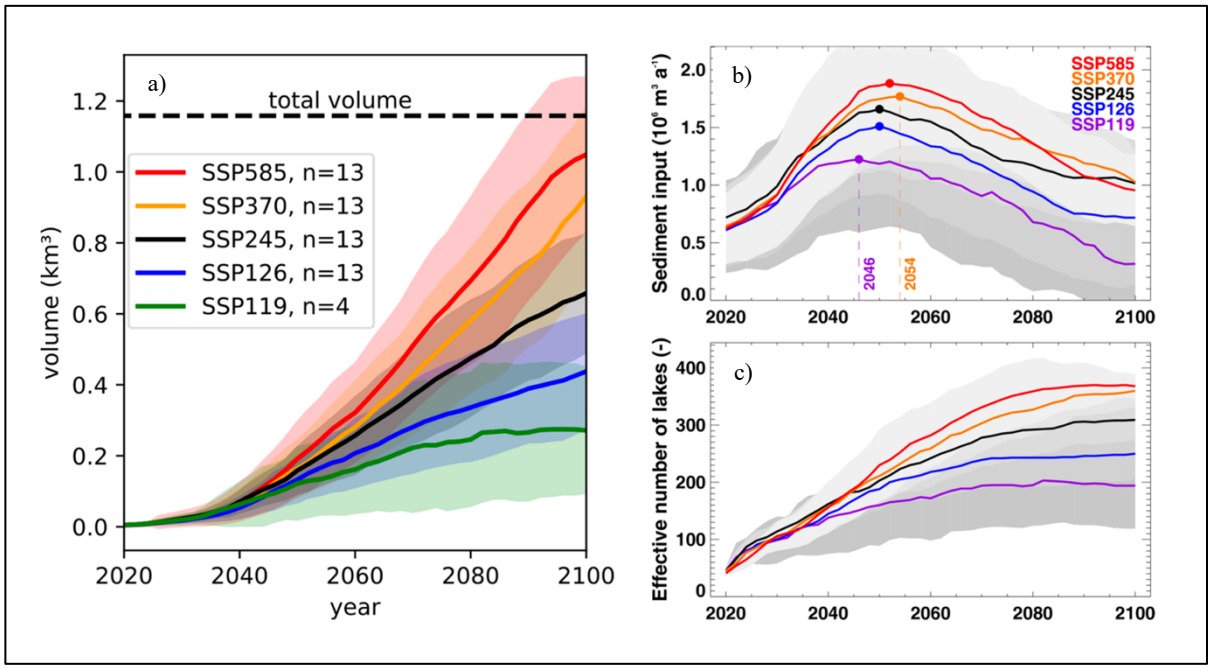


Figure 22 : a) Évolution temporelle du volume potentiel total des lacs glaciaires futurs suivant les cinq scénarios SSP, sans prendre en compte la sédimentation. Le volume total possible suite à la disparition de tous les glaciers est représenté par la ligne noire pointillée. b) Évolution temporelle de l'apport sédimentaire dans les nouveaux lacs glaciaires pour les différents scénarios SSP. c) Évolution du nombre effectif des nouveaux lacs glaciaires en prenant en compte la sédimentation pour les différents scénarios (Steffen et al., 2022a).

L'évolution du volume total potentiel des lacs sans prendre en compte la sédimentation varie fortement selon les scénarios climatiques à l'échelle de la Suisse (Fig. 22a). En effet, dans le cas du scénario SSP1-2.6, certains glaciers pourraient réavancer d'ici 2100 et ainsi recouvrir certains lacs de glace (Steffen et al., 2022a). Le scénario intermédiaire (SSP2-4.5), quant à lui, indique une augmentation presque linéaire du volume potentiel des nouveaux lacs tandis que pour le scénario SSP5-8.5, la formation de nouveaux lacs s'accélère fortement après 2050, avant de ralentir vers 2100 lorsque la plupart des glaciers auront disparu (Steffen et al., 2022a). Par ailleurs, l'évolution du volume potentiel des futurs lacs glaciaires reste indépendante du scénario climatique jusqu'en 2050, ce qui rend compte du temps de réponse des glaciers face aux changements climatiques, soit le temps nécessaire pour que les glaciers s'adaptent à des nouvelles conditions climatiques (Steffen et al., 2022a). Ce temps de réponse est également mis

en évidence par Zekollari et al. (2025) qui affirment que même si le climat actuel venait à se stabiliser, les glaciers continueront à perdre de la masse en raison de l'ajustement lent des glaciers aux conditions climatiques. Ce décalage entre les forçages climatiques et la réponse des glaciers est fortement influencé par les processus de rétroactions notamment entre l'altitude et le bilan de masse ou encore entre l'albédo et le bilan de masse (Zekollari et al., 2025). Ainsi, le temps de réponse des glaciers face aux perturbations climatiques peut varier entre des décennies et des siècles (Zekollari et al., 2025). Pour les Alpes européennes, Zekollari et al. (2020) ont estimé le temps de réponse moyen des glaciers de plus de 1 km de long à 50 (± 28) ans. C'est pourquoi, indépendamment du scénario climatique, environ 200 nouveaux lacs glaciaires sont attendus d'ici 2050 (Steffen et al., 2022a).

En termes de nombre de lacs, 473 (± 79) nouveaux lacs sont attendus d'ici 2100 suite au retrait glaciaire pour le scénario SSP1-2.6, contre 570 (± 61) pour le scénario SSP2-4.5 et 655 (± 40) pour le scénario SSP5-8.5, tandis que 222 (± 37) de ces lacs disparaitront complètement d'ici 2100 pour le scénario SSP1-2.6, 260 (± 28) pour le SSP2-4.5 et 287 (± 24) lacs pour le scénario SSP5-8.5 suite à leur sédimentation (Steffen et al., 2022a). Ainsi, en tenant compte des processus de sédimentation, le volume total potentiel des lacs pour 2100 pour le scénario à faible émission SSP1-2.6, atteindrait 0,35 [0,12, 0,49] km^3 contre 0,56 [0,26, 0,67] km^3 pour le scénario intermédiaire SSP2-4.5, et 0,94 [0,51, 1,04] km^3 pour le scénario le plus pessimiste (SSP5-8.5) (Steffen et al., 2022a).

Par ailleurs, dans leur étude, Steffen et al. (2022a) ont souligné que l'apport sédimentaire des nouveaux lacs glaciaires suit une dynamique spatio-temporelle complexe : celui-ci devrait augmenter jusqu'en 2050 avant de diminuer dans le cas des Alpes suisses (Fig. 22b). Cette évolution est attribuée d'une part au fait que le retrait glaciaire va générer une exposition rapide des zones proglaciaires composées de matériaux non-consolidés et érodables avant de se stabiliser avec le temps et, d'autre part, au fait que l'amincissement des glaciers va progressivement réduire leur pouvoir d'abrasion et donc l'apport sédimentaire d'origine glaciaire (Steffen et al., 2022a). Ainsi, en intégrant la sédimentation, le nombre effectif de lacs continue d'augmenter jusqu'en 2100 pour tous les scénarios, mais ne représente plus que 40 à 50 % des lacs initialement identifiés (Fig. 22c). Par ailleurs, une stabilisation est observée pour les scénarios extrêmes (SSP1-1.9 et SSP5-8.5). Celle-ci est attribuée, dans le premier cas, à la stabilisation des glaciers vers 2080 cessant ainsi d'exposer de nouveaux lacs, et dans le second cas, au fait que la plupart des nouveaux lacs seront déjà exposés mais que les plus petits auront sédimenté d'ici 2100 (Steffen et al., 2022a).

1.7. Question de recherche

Les lacs glaciaires sont des composantes naturelles des paysages alpins qui sont directement liés à la dynamique glaciaire, à savoir l'avancée et le retrait des glaciers (Otto, 2018). Dans le contexte climatique actuel, le retrait des glaciers favorise la formation de nombreux nouveaux lacs glaciaires (Haeberli et al., 2016, 2017). Cette dynamique est particulièrement marquée en Suisse où la superficie des glaciers a diminué de 26,7 % entre 1973 et 2016 (Linsbauer et al., 2021), et où la disparition totale des glaciers pourrait conduire à la formation de 3 600 lacs

glaciaires (Steffen et al., 2022a). Le Valais est le canton le plus englacé de Suisse, avec 10 % de son territoire recouvert de glace, et est donc particulièrement concerné par le retrait des glaciers (Ayala et al., 2020 ; Schupbach, 2024 ; Wytiahlowsky et al., 2025). À terme, 1 871 nouveaux lacs glaciaires pourraient se former au sein du canton (Steffen et al., 2022b). Ces caractéristiques font du Valais un territoire fortement vulnérable et exposé face aux risques associés puisque les lacs glaciaires sont susceptibles de se vidanger de manière soudaine et imprévisible, pouvant entraîner d'importantes conséquences socio-économiques (Lützow et al., 2023 ; Mölg et al., 2021b ; Steffen et al., 2022a). L'historique des vidanges dans le canton en témoigne d'ailleurs, avec 179 événements recensés depuis 1800 (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024).

Le processus de vidange, tout comme les mécanismes de vidange, sont complexes et impliquent l'intégration de nombreux paramètres hydro-géomorphologiques dont l'estimation peut s'avérer difficile dans certains cas (Emmer & Vilímek, 2014). En parallèle, le réchauffement climatique entraîne une déstabilisation des versants et des parois rocheuses suite à la dégradation du permafrost, impliquant une augmentation des processus gravitaires susceptibles d'initier des vidanges (Haeberli et al., 2016 ; Harrison et al., 2018 ; Nussbaumer et al., 2014). Face à ce risque, plusieurs méthodes de gestion et d'atténuation du risque ont été mises en place sur certains lacs, notamment au Pérou, en Italie, en France ou encore en Suisse (Emmer et al., 2022a ; Niggli et al., 2024). Les différents cas d'étude montrent que cela implique généralement des moyens techniques, financiers et humains conséquents (Niggli et al., 2024), ce qui souligne l'importance d'identifier au préalable les lacs effectivement susceptibles d'être à l'origine d'une vidange. Toutefois, malgré le fait que plusieurs études se sont concentrées sur des cas spécifiques de vidange (Haeberli et al., 2001 ; Huggel et al., 2003 ; Huss et al., 2007, 2013 ; Lindner et al., 2020 ; Ogier et al., 2021 ; Werder et al., 2010), qu'un inventaire recense les lacs glaciaires à l'échelle nationale (Mölg et al., 2021b) et qu'une étude analyse l'évolution des vidanges en Valais entre 1818 et 2022 (Schupbach, 2024), il n'existe aucune évaluation systématique de la susceptibilité de vidange à l'échelle du canton, ce qui traduit l'absence d'une stratégie cantonale de gestion de risque de vidange.

De manière générale, la gestion des risques de vidange de lacs glaciaires renvoie à quatre étapes : (i.) évaluer la susceptibilité du lac à produire une vidange et/ou identifier les mécanismes déclencheurs, (ii.) analyser le mécanisme de vidange, (iii.) simuler la propagation en aval de la vidange et, (iv.) combiner les résultats obtenus avec l'occupation du sol et d'autres facteurs socio-économiques (Emmer et al., 2022a). Le présent travail vise à répondre à la première étape de gestion des risques de vidange, absente à l'échelle du Valais, en répondant à la question suivante : Quels paramètres hydro-géomorphologiques et quels mécanismes déclencheurs permettent d'identifier les lacs glaciaires du Valais présentant une susceptibilité de vidange élevée ?

Pour répondre à cette question de recherche, il convient de développer un inventaire complet des lacs glaciaires en Valais qui reprend différents paramètres hydro-géomorphologiques susceptibles d'influencer leur vidange. Ainsi, en l'absence d'un consensus quant aux paramètres hydro-géomorphologiques dans la littérature (Allen et al., 2019), la première étape

vise à répondre à la question suivante : Quels paramètres retrouvés dans la littérature sont les plus pertinents afin d'évaluer la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires ? Sur la base de ces paramètres, ce travail répondra également à la question suivante : Quelles sont les caractéristiques des lacs glaciaires du Valais ? La seconde étape vise, quant à elle, à développer un indice de susceptibilité de vidange en intégrant les paramètres retenus, permettant ainsi de classer les différents lacs répertoriés suivant des classes de susceptibilité faible, moyenne ou élevée, en vue de répondre aux questions suivantes : a) Quels lacs sont susceptibles de produire une vidange et quelle en est la distribution spatiale ? et b) Quelles sont les caractéristiques de ces lacs ?

En somme, ce travail vise à répondre à la première étape dans la gestion des risques de vidange de lacs glaciaires en Valais. Il ne prend pas en compte les étapes suivantes qui sont basées sur des modélisations de la vidange et de sa propagation en aval, et ne vise donc pas à identifier les éléments exposés susceptibles d'être impactés par une vidange, ni d'orienter la mise en œuvre de mesures de mitigation. En effet, ces dernières constituent précisément les perspectives qu'offre ce travail.

2. Méthodologie

Les progrès technologiques et l'amélioration des connaissances physiques du processus de vidange de lacs glaciaires ont entraîné une augmentation du nombre d'études concernant leur analyse de risque (Emmer et al., 2022a). Pour rappel, l'analyse du risque associé aux vidanges de lacs glaciaire se fait selon quatre étapes : (i.) évaluer la susceptibilité du lac à produire une vidange et/ou identifier les mécanismes déclencheurs, (ii.) analyser le mécanisme de vidange, (iii.) simuler la propagation en aval de la vidange et, (iv.) combiner les résultats obtenus avec l'occupation du sol et d'autres facteurs socio-économiques (Emmer et al., 2022a).

La première étape repose généralement sur la télédétection et sur l'évaluation de paramètres sélectionnés influençant la probabilité de vidange d'un lac (Emmer, 2017). Les étapes suivantes s'appuient sur des approches de modélisation afin de déterminer les zones potentiellement affectées et d'identifier les enjeux (Emmer, 2017). Une fois que les lacs à risque et les enjeux associés sont identifiés, des mesures de mitigation peuvent être mises en place (Emmer, 2017 ; Schupbach, 2024). Ce travail a pour objectif d'identifier les paramètres hydro-géomorphologiques et les mécanismes déclencheurs de vidanges ainsi que de déterminer les lacs glaciaires susceptibles de produire une vidange en Valais.

2.1. Inventaire des lacs glaciaires

Cette section vise à présenter, d'une part, la méthodologie utilisée pour sélectionner les paramètres influençant la susceptibilité de vidange et, d'autre part, pour les paramètres retenus, la méthodologie employée pour établir l'inventaire des lacs glaciaires en Valais.

2.1.1. Sélection des paramètres

Plusieurs études ont cherché à évaluer et à analyser les risques associés aux processus de vidange de lacs glaciaires (Demolis et al., 2023 ; Emmer & Vilímek, 2014 ; Gruber & Mergili,

2013 ; Huggel et al., 2002, 2003, 2004 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Rinzin et al., 2021 ; Wang et al., 2011). Dans ce contexte, plusieurs paramètres ont été identifiés comme jouant un rôle dans ce processus (Emmer et al., 2022a). Cette section vise à identifier ces paramètres de susceptibilité recensés dans la littérature et à sélectionner ceux qui seront utilisés pour l'analyse de susceptibilité de vidange (section 2.2.). Les paramètres sont classés selon qu'ils décrivent les caractéristiques internes ou externes du lac, puis sont retenus ou rejetés en fonction de leur pertinence et de la disponibilité des données. Les paramètres rejetés sont discutés dans cette section, tandis que les paramètres retenus sont décrits plus en détail dans la section 2.1.2.

Ces paramètres sont généralement catégorisés selon les caractéristiques propres du lac, du barrage et des mécanismes de vidange, bien que cette catégorisation varie selon les auteurs (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Rinzin et al., 2021). Par exemple, Huggel et al. (2002) distinguent les paramètres de prédisposition relatifs aux caractéristiques du lac et du barrage des mécanismes déclencheurs. Une approche similaire a été présentée par Rinzin et al. (2021) dans leur étude sur le risque de vidange de lacs glaciaires dans l'Himalaya au Bhoutan qui est structurée suivant la stabilité du barrage et des éléments déclencheurs. À l'inverse, Demolis et al. (2023) ont adopté une approche centrée sur les mécanismes de vidange et ont évalué, pour chaque lac, la sensibilité aux mécanismes de surverse et de rupture afin de déterminer la susceptibilité des lacs glaciaires à engendrer des crues torrentielles. Ce travail a initialement suivi la méthodologie présentée par Demolis et al. (2023), cependant, il a été décidé de catégoriser les paramètres suivant les caractéristiques internes et externes du lac en raison d'une certaine redondance observée entre les paramètres relatifs à la surverse et la rupture.

Les sections suivantes présentent les paramètres recensés dans la littérature pour chacune des trois catégories considérées, soit les paramètres de base, les paramètres internes et externes. Les tableaux indiquent si chaque paramètre est retenu ou rejeté pour l'analyse, ainsi que les principales références dans lesquelles il est utilisé.

2.1.1.1. Paramètres de base

Les paramètres de base du lac font généralement référence aux caractéristiques générales de celui-ci comme repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Paramètres de base repris dans la littérature.

Paramètres	Retenu/rejeté	Références
Identifiant	Retenu	Gruber & Mergili (2013)
Altitude [m]	Retenu	Gruber & Mergili (2013) ; Mergili & Schneider (2011) ; Mölg et al. (2021b) ; Rinzin et al. (2021)
Coordonnées	Retenu	Mölg et al. (2021b)
Superficie [m^2]	Retenu	Allen et al. (2019) ; Emmer (2017) ; Emmer & Vilímek (2014) ; Gruber & Mergili (2013) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011) ; Rinzin et al. (2021)
Volume [m^3]	Retenu	Emmer (2017) ; Mergili & Schneider (2011)
Profondeur [m]	Rejeté (redondance)	Mergili & Schneider (2011)

- Profondeur du lac

Le paramètre de profondeur a été présenté dans l'étude de Mergili & Schneider (2011) et est calculé sur la base de la formule proposée par Huggel et al. (2002) (Eq. 1). Puisque la formule empirique relative au volume (eq. 2) considère le paramètre de profondeur, seul le volume est considéré dans le présent travail.

2.1.1.2. Paramètres internes

Les paramètres repris dans cette partie font directement référence à la stabilité du barrage et aux paramètres internes au lac (Tableau 4). Ceux-ci sont considérés car ils renvoient à une possibilité de rupture du barrage pouvant entraîner une vidange du lac glaciaire (Zhang et al., 2024).

Tableau 4 : Paramètres relatifs à la stabilité du barrage repris dans la littérature.

Paramètres	Retenu/rejeté	Références
Type de matériaux du barrage	Retenu	Allen et al. (2019) ; Demolis et al. (2023) ; Emmer (2017) ; Emmer & Vilímek (2014) ; Gruber & Mergili (2013) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011) ; Mölg et al. (2021b)
Drainage/déversoir	Retenu	Demolis et al. (2023) ; Gruber & Mergili (2013) ; Mergili & Schneider (2011) ; Mölg et al. (2021b)
Évolution de la superficie	Rejeté	Demolis et al. (2023) ; Gruber & Mergili (2013) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011) ; Mölg et al. (2021b)
Pente du barrage	Retenu	Gruber & Mergili (2013) ; Mergili & Schneider (2011) ; Wang et al. (2011)
Franc-bord	Retenu	Demolis et al. (2023) ; Emmer (2017) ; Emmer & Vilímek (2014) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011) ; Mölg et al. (2021b)
Ratio largeur-hauteur	Rejeté	Huggel et al. (2002)
Végétation (stabilité)	Retenu	Demolis et al. (2023) ; Huggel et al. (2002)
Glace morte/Permafrost	Retenu	Demolis et al. (2023) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011)
Brèche	Rejeté	Huggel et al. (2002)
Ancienneté du lac	Retenu	Demolis et al. (2023)

- Évolution de la superficie du lac

L'évolution de la superficie du lac vise à prendre en compte le développement potentiel du risque. Différentes approches existent pour la quantifier. Par exemple, Rinzin et al. (2021) ont considéré un lac comme évolutif lorsque son expansion sur une période définie dépassait les incertitudes liées à la délimitation du lac. Dans l'Himalaya népalais, une étude a retenu un seuil de 20 % d'expansion sur une période de 20 ans (Rinzin et al., 2021). Mergili & Schneider (2011) expriment, quant à eux, cette dynamique comme le ratio entre différentes périodes considérées. Enfin, Mölg et al. (2021b) ont proposé une classification en trois états (augmentation, stabilité ou diminution) de la superficie entre différentes périodes de référence.

Ce paramètre n'a pas été intégré dans le présent travail en raison de limitations dans la disponibilité des données. En effet, sa prise en compte aurait nécessité une reconstitution de séries temporelles à partir d'images satellites anciennes, avec plusieurs acquisitions par période

pour limiter les biais liés à la variabilité saisonnière. Une correspondance entre chaque lac de la base de données actuelle et son équivalent dans les bases de données antérieures aurait été essentielle, malgré l'absence d'un identifiant commun. Ce paramètre avait initialement été évalué à partir de l'étude de Mölg et al. (2021b), mais a finalement été retiré car ce paramètre n'était pas identifiable pour 68,6 % des lacs de la base de données initiale.

- Ratio largeur-hauteur du barrage

Le ratio entre la largeur et la hauteur du barrage fournit des informations sur la géométrie du barrage qui influence directement sa stabilité. Dans leur étude, Huggel et al. (2002) avaient présenté ce paramètre comme étant un facteur important dans l'évaluation du risque de vidange de lacs glaciaires. Cependant, ce paramètre n'a pas été retenu car la géométrie du barrage est évaluée par d'autres paramètres tels que la hauteur de franc-bord, la pente du barrage ou encore la présence de végétation pour les barrages de moraine. Ces facteurs ont été jugés comme suffisants pour prendre en compte le paramètre de stabilité du barrage.

- Présence d'une brèche

Ce paramètre, introduit par Huggel et al. (2002), renvoie à la présence visible d'une brèche dans le barrage et est généralement associé à la stabilité des barrages de moraine. Cependant, comme la stabilité des moraines est évaluée à travers d'autres paramètres (section 2.1.2.2.), ceux-ci ont été jugés suffisants, et la présence d'une brèche a donc été écartée.

2.1.1.3. Processus externes

Les paramètres repris dans les processus externes font généralement référence aux processus pouvant être à l'origine de la vidange de lacs glaciaires, et font donc plutôt référence à l'environnement autour du lac qu'au lac lui-même (Tableau 5) (Zhang et al., 2024). Il s'agit principalement de paramètres qui sont associés aux processus gravitaires pouvant entraîner une vidange par mécanisme de surverse (Zhang et al., 2024).

Tableau 5 : Paramètres repris dans la littérature caractérisant l'environnement autour du lac ainsi que les processus externes susceptibles d'entraîner une vidange.

Paramètres	Retenu/rejeté	Références
Processus de vêlage	Rejeté (redondance)	Demolis et al. (2023) ; Gruber & Mergili (2013) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011) ; Rinzin et al. (2021)
Contact glacier	Retenu	Huggel et al. (2002) ; Mölg et al. (2021b) ; Rinzin et al. (2021)
Topographie environnante	Rejeté (redondance)	Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011)
Sismicité	Rejeté	Gruber & Mergili (2013) ; Mergili & Schneider (2011) ; Rinzin et al. (2021)
Avalanche de glace/neige	Rejeté	Huggel et al. (2002) ; Rinzin et al. (2021)
Glissement de terrain/chutes de pierres	Retenu	Allen et al. (2019) ; Huggel et al. (2002) ; Rinzin et al. (2021)
Lac glaciaire en amont/interconnectivité des lacs	Rejeté	Huggel et al. (2002) ; Rinzin et al. (2021)

Connectivité	Rejeté (redondance)	Rinzin et al. (2021)
Bassin versant	Retenu	Allen et al. (2019) ; Huggel et al. (2002) ; Mergili & Schneider (2011)
Présence de permafrost	Retenu	Demolis et al. (2023) ; Emmer (2017) ; Gruber & Mergili (2013) ; Haeberli et al. (2017)
Probabilité d'atteinte du lac	Retenu	Allen et al. (2019) ; Demolis et al. (2023)
Moraine non végétalisée	Retenu	Demolis et al. (2023)

- Processus de vêlage

Ce paramètre fait référence aux lacs en contact direct avec un glacier puisque cela peut induire des changements dans le régime thermique de celui-ci, pouvant alors initier le processus de vêlage ou la chute de séracs dans le lac et provoquer une surverse (Demolis et al., 2023 ; Otto, 2018 ; Zhang et al., 2024). Ce paramètre a été rejeté comme paramètre unique puisque le paramètre de contact du lac avec le glacier intègre le processus de vêlage.

- Topographie environnante

Mergili & Schneider (2011) ont introduit un index de susceptibilité de la topographie environnante pour chaque pixel du bassin versant du lac basé sur la pente locale et la pente moyenne du parcours le plus pentu vers le lac, afin de considérer la susceptibilité du lac à être affecté par un mouvement de masse. Ce paramètre est rejeté car il est repris par celui de probabilité d'atteinte du lac par des chutes de pierres et d'éboulements considéré dans ce travail.

- Sismicité

Ce paramètre est pris en compte par Rinzin et al. (2021) dans leur étude sur l'évaluation des risques de vidange de lacs glaciaires dans l'Himalaya au Bhoutan. Dans leur étude au Tadjikistan, Mergili & Schneider (2011) et Gruber & Mergili (2013) ont également proposé le paramètre relatif aux tremblements de terre et aux risques sismiques. Ce paramètre ne sera pas considéré dans le présent travail puisque celui-ci n'est pas pertinent dans le contexte de cette étude dans les Alpes suisses. De plus, dans leur étude, Emmer et al. (2022b) ont souligné que très peu de vidanges de lacs glaciaires ont été déclenchées par des tremblements de terre à l'échelle mondiale.

- Avalanche de neige

Les avalanches sont des processus pouvant initier une vidange par mécanisme de surverse et sont notamment repris par Huggel et al. (2002). Cependant, Demolis et al. (2023) ont souligné le fait que les avalanches de neige n'ont généralement pas la capacité de générer d'importante surverse. Ce paramètre n'a donc pas été pris en compte.

- Interconnectivité des lacs

Le paramètre d'interconnexion des lacs a été proposé par Huggel et al. (2002) suivant l'hypothèse qu'une vidange d'un lac peut entraîner un processus en cascade en provoquant une autre vidange de lac glaciaire qui se situe en aval. Pour prendre en compte ce paramètre, Rinzin et al. (2021) ont considéré que le degré d'interconnexion était élevé lorsque plus de trois lacs d'une superficie supérieure ou égale à 0,01 km² étaient présents en amont, moyen lorsque leur

nombre était un ou deux et faible lorsqu'aucun lac n'était détecté. Cependant, comme le processus de vidange est difficilement prévisible ce paramètre n'a pas été pris en compte. Pour les lacs identifiés comme à susceptibilité moyenne et élevée de vidange, il serait judicieux de regarder si des lacs se situent en aval.

- Connectivité glacier

La connectivité a été considérée comme paramètre par Rinzin et al. (2021) pour exprimer l'interaction entre le lac et le glacier. Ce paramètre de connectivité a d'abord été évalué dans le présent travail par la présence de chenaux et lorsque le lac était alimenté par le glacier. Il a été décidé de le retirer par la suite en raison de la redondance avec le paramètre du bassin versant puisqu'il considère l'interaction entre les deux.

2.1.2. Élaboration de la base de données

Afin d'évaluer le risque associé aux vidanges de lacs glaciaires, il a été nécessaire de réaliser une base de données reprenant les facteurs et paramètres définis au préalable. Celle-ci repose principalement sur les données de l'inventaire des surfaces d'eau développé par l'Office fédéral de topographie suisse (swisstopo) faisant partie du jeu de données swissTLM3D (swisstopo, 2024e). Il s'agit d'un modèle topographique du paysage à grande échelle de la Suisse sous forme vectorielle (swisstopo, 2024e). Seules les données relatives au réseau hydrographique, plus précisément les données relatives aux lacs, ont été retenues. À l'échelle de la Suisse, 17 775 lacs ont été répertoriés dans cet inventaire. Les données pour le canton du Valais ont alors été extraites de cette base de données réduisant le nombre de lacs à 2 545 lacs.

Étant donné que ce travail porte sur les lacs glaciaires, seuls les lacs correspondant à la définition donnée ultérieurement ont été considérés. De plus, pour limiter le nombre de lacs glaciaires, un tampon de 500 m autour des glaciers actuels du Valais a été dessiné, identifiant ainsi un nombre de 608 lacs. Tous les lacs dans la zone tampon de 500 m ont été intégrés dans la base de données, car même si ces lacs ne sont plus alimentés ou en contact avec des glaciers, ils sont susceptibles d'être influencés par la dynamique glaciaire actuelle. Cependant, sur ces 608 lacs, cinq ont été enlevés en raison de leur barrage d'origine anthropique. De la même façon, dix lacs ont été retirés de la base de données initiale car ces lacs étaient associés à des paysages karstiques. Il s'agit des lacs en aval du glacier de Tsanfleuron dans le Massif des Diablerets. En effet, cette zone est une zone glacio-karstique caractérisée par la présence de dolines et dépressions karstiques qui sont parfois remplies d'eau pouvant alors former des lacs (Schoeneich & Reynard, 2020). Trois lacs supplémentaires ont été retirés car ils ne rentraient pas dans la définition des lacs glaciaires considérée dans ce travail. Ainsi, la base de données initiale pour les lacs compris dans la zone tampon de 500 m autour des glaciers comptait 590 lacs.

Pour compléter la base de données, les lacs situés à 1 km en aval des glaciers ont été ajoutés selon deux critères de sélection : (i.) si l'eau du glacier ou des lacs en amont peuvent atteindre les lacs considérés, alors ils sont ajoutés et (ii.) si les lacs considérés ne se situent pas dans le bassin versant du glacier, mais dans un bassin versant adjacent, ils ne sont pas intégrés. Ce choix réside dans le fait que les lacs qui se situent dans un tampon de 1 km des glaciers actuels

datent principalement du Petit Âge Glaciaire et sont donc davantage stables. Cependant, les lacs qui se situent à 1 km en aval des glaciers peuvent être influencés par la dynamique actuelle des glaciers, ce qui peut renforcer la possibilité d'une vidange de lac glaciaire. Cette partie de la base de données a été réalisée manuellement à partir des lacs présents dans le tampon de 1 km autour des glaciers. Ainsi, 89 lacs ont été ajoutés à la base de données.

Sur les 679 lacs initialement repris, 20 lacs ont finalement été supprimés car ceux-ci ont été évalués comme ayant sédimenté. Le nombre total des lacs considérés dans cette étude s'élève donc à 659 lacs. Cette base de données a été réalisée selon l'hypothèse que chaque lac répertorié peut être à l'origine d'une vidange de lac glaciaire comme avancé par Demolis et al. (2023) dans leur rapport relatif à la réalisation d'un inventaire des lacs glaciaires susceptibles d'engendrer des crues torrentielles liées aux vidanges de lacs glaciaires.

Toutes les manipulations présentées ci-dessus et celles présentées dans les paragraphes suivants ont été réalisées avec l'outil QGIS dans le système de projection CH1903+/LV95, EPSG2056. Les données de base à savoir un MNT, les orthophotos, la carte topographique, les limites du canton du Valais et de la Suisse proviennent de swisstopo et les données relatives aux glaciers proviennent du réseau des relevés glaciologiques suisse (GLAMOS) (Fischer et al., 2014b ; Linsbauer et al., 2021b ; Maisch et al., 2000b ; Mannerfelt et al., 2022b ; Müller et al., 1976b ; Paul, 2004b ; swisstopo, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2025).

2.1.2.1. Caractéristiques générales

Pour chaque lac, des caractéristiques générales ont été attribuées et sont reprises dans le tableau 6. Il s'agit ici de caractéristiques qui décrivent les attributs du lac et n'interviennent pas directement dans l'évaluation de susceptibilité de vidange. Certaines caractéristiques (superficie, typologie des lacs) seront également mobilisées par la suite en tant que paramètres de susceptibilité, mais sont introduites ici à titre descriptif uniquement.

Tableau 6 : Caractéristiques générales attribuées à chaque lac.

Caractéristiques		Description
Numéro d'identification		Numéro d'identification associé à chaque lac
Coordonnées		Coordonnées x et y calculées à l'aide de la calculatrice de champ
Altitude moyenne [m]		L'altitude moyenne a été calculée grâce à l'outil *statistiques de zone* sur la base du MNT 2 m
Superficie [m^2]		La superficie de chaque lac a été obtenue grâce à l'outil *$area* dans la calculatrice de champ
Volume [m^3]		Le volume a été calculé sur la base de la formule empirique proposée par Huggel et al. (2002)
Type de barrage	Moraine Glace Bedrock	Typologie des lacs glaciaires

- Altitude moyenne

L'altitude est reprise dans plusieurs études (Gruber & Mergili, 2013 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Rinzin et al., 2021). Dans leur étude, Mölg et al. (2021b) avaient évalué celle-ci comme l'altitude minimum du polygone du lac à l'aide du MNT. Mergili & Schneider (2011), quant à eux, avaient évalué l'altitude du lac sur la base du centroïde du polygone. Cependant, puisque les polygones des lacs glaciaires peuvent être de forme non-régulière, le centroïde peut se retrouver en dehors de celui-ci. Dans le présent travail, il a été décidé de reprendre l'altitude moyenne du polygone qui a été estimée grâce à l'outil *statistiques de zone* dans QGIS sur la base de la couche MNT 2 m (swisstopo, 2024b).

2.1.2.2. Paramètres de susceptibilité

De manière générale, une distinction est faite entre les facteurs qui déterminent la stabilité du barrage et les facteurs externes pouvant déclencher des vidanges (Zhang et al., 2024). Ainsi, comme suggéré par Mergili & Schneider (2011), l'analyse de risque de vidange de lac glaciaire s'est faite sur la base de la susceptibilité d'une vidange à la suite de processus internes ou externes. Dans ce cas-ci, la notion de susceptibilité est définie comme la tendance d'un lac à produire une vidange (Mergili & Schneider, 2011). Les sections suivantes visent à présenter les différents paramètres de susceptibilité internes et externes retenus dans cette étude ainsi que la méthodologie employée pour leur détermination.

a) Susceptibilité interne de vidange

Les paramètres relatifs à la susceptibilité interne du lac retenus sont : les types de matériaux, la superficie, la période de formation du lac et sa géométrie (déversoir et franc-bord) comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité interne de vidange d'un lac glaciaire.

Facteurs			Description
Type de matériaux	Glace		Typologie des lacs selon les matériaux (glace, moraine, roche)
	Bedrock		
	Moraine	Succession végétale	Succession végétale (pionnière, intermédiaire, avancée) sur les barrages de moraine
		Permafrost	Présence ou non de permafrost dans la moraine
		Pente	Pente aval moyenne de la moraine
Superficie [m^2]			
Période de formation			
Géométrie	Déversoir		Présence d'un déversoir ou non
	Franc-bord		Hauteur de franc-bord

- Types de matériaux

Le type de barrage figure parmi les premiers paramètres présentés dans les études (Allen et al., 2019 ; Demolis et al., 2023 ; Gruber & Mergili, 2013 ; Huggel et al., 2002 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Zhang et al., 2024). Les matériaux du barrage déterminent la stabilité du lac, la résistance du barrage, les processus déclencheurs et la magnitude potentielle de la vidange, mais aussi les mécanismes de vidange (Mölg et al., 2021b ; Zhang et al., 2024). Chaque lac a donc été catégorisé selon les matériaux du barrage. Si la typologie peut varier d'une étude à une autre (Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b),

les matériaux considérés dans cette étude sont les barrages de glace, de moraine et de bedrock comme présentés ultérieurement (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002).

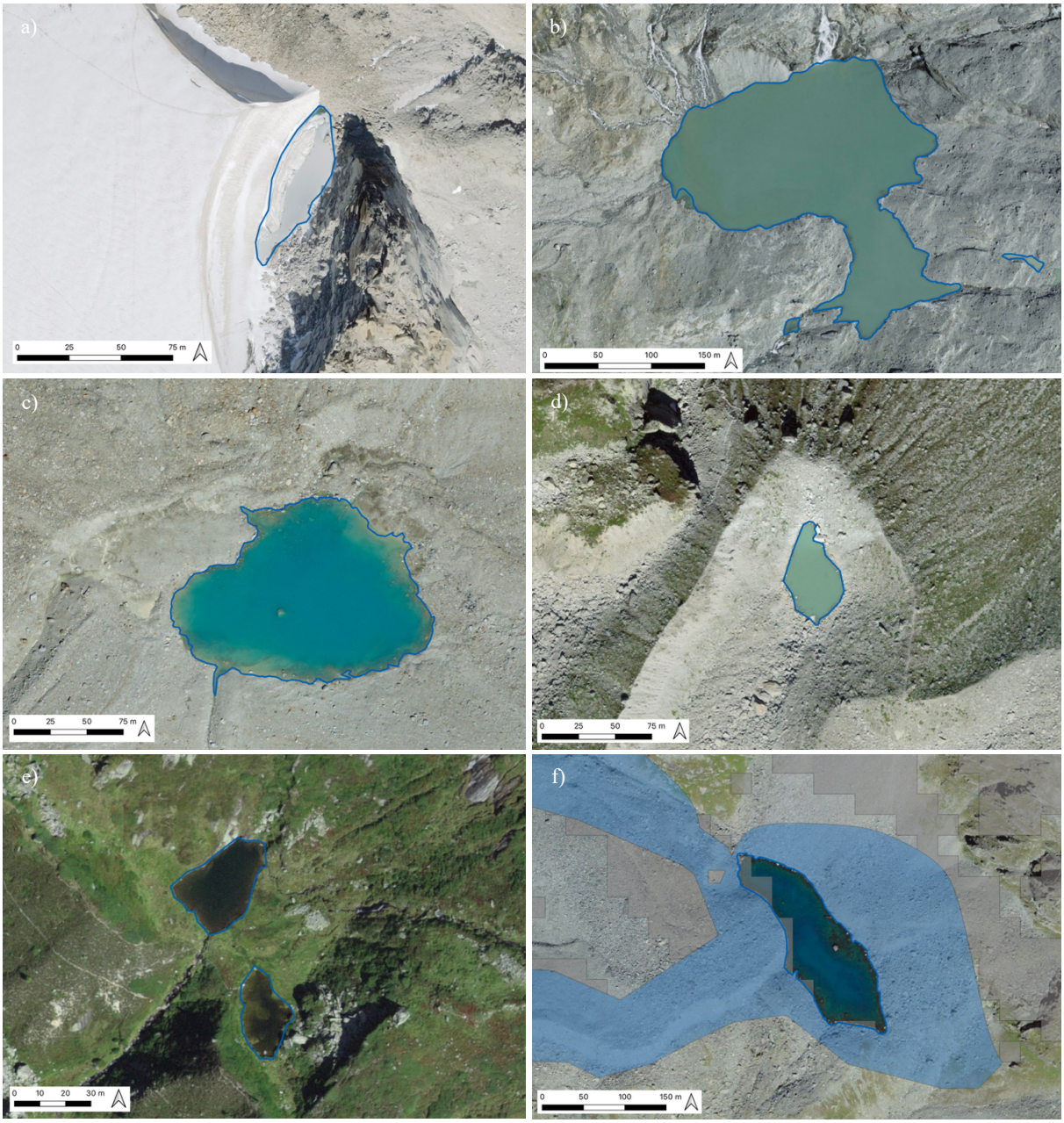


Figure 23 : Lac endigué par a) de la glace b) le bedrock c) une moraine de fond dont la succession végétale est pionnière. d) Lac endigué par une moraine dont la succession végétale est intermédiaire. e) Lac endigué par une moraine caractérisée par une succession végétale avancée. f) Présence de permafrost dans la moraine endiguant le lac.

Le type de barrage a été déterminé manuellement comme suggéré par Huggel et al. (2002) et Mölg et al. (2021b) sur la base des orthophotos SWISSIMAGE avec une résolution de 25 cm. Ces orthophotos sont mises à jour tous les 3 ans. Les images utilisées proviennent du vol pour l'année 2023[2] (swisstopo, 2024c). La figure 23 montre des exemples des trois types de matériaux (Fig. 23a, b et c). Pour les lacs endigués par une moraine, trois sous-paramètres ont également été identifiés, soit la succession végétale, le permafrost et la pente aval de la moraine.

[2] Dernier vol disponible lors de la réalisation du travail.

- Sous-paramètres relatifs aux barrages de moraine

La couverture végétale a été utilisée comme indicateur de stabilité car les moraines végétalisées sont considérées comme plus stables que celles non végétalisées (Huggel et al., 2002 ; Wang et al., 2011). En effet, la végétation colonise les surfaces lorsqu'une certaine stabilité est atteinte et contribue à renforcer la cohésion et la matrice du sol, limitant ainsi les mouvements de matériaux (Eichel, 2018). De manière générale, la couverture végétale s'exprime en fonction des stades de succession observés sur les terrains déglacés : la succession pionnière, caractérisée par une couverture végétale faible dominée par des lichens, de la mousse ou des algues est associée à des surfaces récemment exposées (moins de 15 ans) ; la succession intermédiaire, caractérisée par l'apparition de plantes à racines (herbacées ou petits arbustes) renvoyant à des âges compris entre 15 et 80 ans ; et la succession avancée concordant à une couverture végétale dense et continue composée d'arbres, et observée sur des moraines anciennes (plus de 80 ans) (Eichel, 2018).

La succession végétale a été préférée à l'âge de la moraine comme indicateur, car ces deux variables ne sont pas toujours corrélées. En effet, les processus comme le remaniement ou les processus gravitaires, notamment sur les moraines de fond ou latérales, peuvent perturber les dépôts et limiter la recolonisation végétale impliquant que des successions pionnières peuvent être retrouvées sur des moraines anciennes. Ce paramètre a été évalué visuellement grâce aux orthophotos (Fig. 23c, d et e).

Le paramètre de présence de permafrost dans le barrage de moraine a été considéré comme un facteur pouvant renforcer son instabilité, et il est d'ailleurs mobilisé dans plusieurs études (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002 ; Rinzin et al., 2021). En effet, cela implique que s'il y a une fonte ou une dégradation du permafrost, la moraine est déstabilisée, ce qui peut mener à une rupture. Cela peut générer également le phénomène de percolation (Harrison et al., 2018 ; Otto, 2018 ; Zhang et al., 2024). Dans le présent travail, la présence de permafrost a été évaluée sur la base de la couche « Permafrost and Ground Ice Map of Switzerland » développée par Kener (2018) (Fig. 23f).

La pente du barrage correspond à sa pente aval moyenne (Mergili & Schneider, 2011). Dans le cadre de ce travail, la pente du barrage a seulement été estimée pour les lacs endigués par une moraine car celle-ci influence leur stabilité (Wang et al., 2011). En effet, les moraines caractérisées par des pentes élevées sont généralement plus sensibles aux processus d'érosion mais aussi aux glissements superficiels, ce qui favorise l'incision du barrage en cas de surverse (Emmer & Vilímek, 2014 ; Huggel et al., 2004 ; Zhang et al., 2024). Ce paramètre a été calculé grâce à l'outil *profile tool* sur QGIS et les limites du barrage ont été déterminées par interprétation des orthophotos. Les moraines de fond se sont vu attribuer la valeur de 0°.

- Superficie

La superficie est couramment utilisée comme paramètre dans les évaluations de susceptibilité de vidange de lacs glaciaires car celle-ci influence directement la magnitude potentielle d'une vidange puisqu'elle reflète la quantité d'eau disponible (Allen et al., 2019 ; Rinzin et al., 2021).

Dans leur étude, Mergili & Schneider (2011) ont appliqué un seuil de superficie pour exclure les lacs glaciaires inférieurs à 2 500 m^2. Toutefois, bien que les grands lacs glaciaires soient généralement associés à des événements de forte magnitude, des vidanges de petits lacs glaciaires ont montré une certaine capacité à mobiliser d'importants volumes de sédiments et d'engendrer des dommages significatifs (Zhang et al., 2024). Pour cette raison, aucun filtre de superficie n'a été appliqué dans la base de données de ce travail comme recommandé par Demolis et al. (2023).

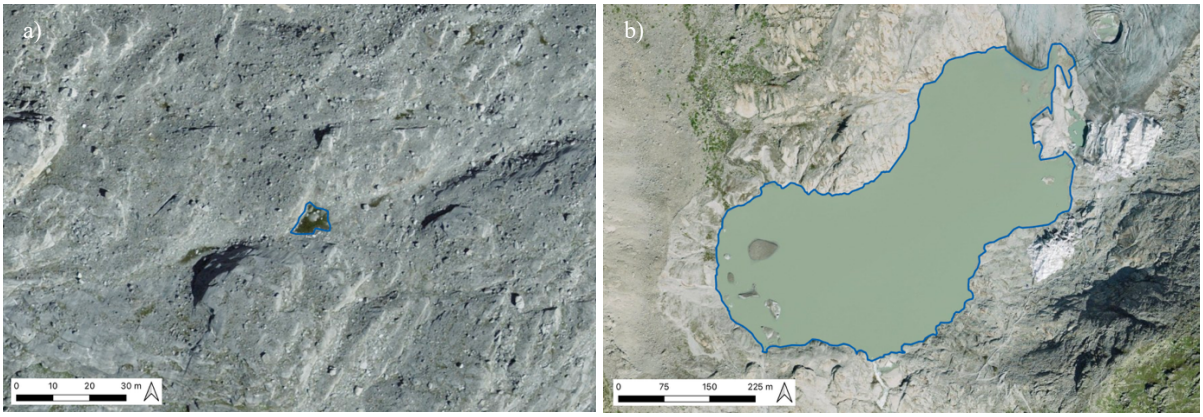


Figure 24 : a) Lac glaciaire endigué par le bedrock avec une superficie de 56,24 m^2 et un volume de 31,78 m^3. Il s'agit du plus petit lac de la base de données. b) Lac en aval du glacier du Rhône endigué par le bedrock qui a une superficie de 163 342,12 m^2 et un volume associé de 2 628 044,79 m^3. Il s'agit du lac avec la plus grande superficie de la base de données.

La superficie a été déterminée sur la base des polygones délimitant les lacs avec l'outil *$area* dans la calculatrice de champ dans QGIS. La superficie a été choisie comme paramètre et non le volume car sa détermination repose sur des formules empiriques et est donc théorique. La figure 24a montre le lac avec la plus petite superficie de la base de données et la figure 24b montre le lac avec la plus grande superficie.

- Période de formation du lac

Ce paramètre a été retenu car il renvoie à la stabilité du lac (Demolis et al., 2023). En effet, les lacs récents sont généralement associés à des conditions et des environnements instables, tandis que les lacs plus anciens reflètent des conditions plus stables (Demolis et al., 2023).

Dans leur étude, Demolis et al. (2023) se sont appuyés sur des inventaires historiques pour déterminer ce paramètre. L'inventaire réalisé par swisstopo ne fournissant pas la période de formation du lac, celle-ci a été évaluée grâce à la base de données développée par Mölg et al. (2021b) dans leur étude qui recense les lacs glaciaires formés depuis le Petit Âge Glaciaire en Suisse. Ainsi, chaque lac a été associé à une période de formation, soit 1850-1900, 1900-1946, 1931-1973, 1946-1973, 1973-1982, 1973-2006, 1973-2010, 1982-2006, 2006-2016, 2016-2023, et en cours de formation (Mölg et al., 2021a). La classe 2016-2023 a été ajoutée, soit la période entre l'étude de Mölg et al. (2021b) et la date de l'orthophoto utilisée dans la présente étude. Si l'information pour un lac n'était pas disponible, la période de formation était estimée grâce aux données relatives à l'étendue glaciaire passée (Fischer et al., 2014b ; Linsbauer et al., 2021b ; Maisch et al., 2000b ; Mannerfelt et al., 2022b ; Müller et al., 1976b ; Paul, 2004b).

- Présence d'un déversoir

Le déversoir figure parmi les facteurs d'évaluation de la géométrie du barrage (Demolis et al., 2023 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b). En effet, la présence d'un déversoir permet de réduire le risque de surverse mais aussi de rupture, car les barrages des lacs sans déversoir peuvent être soumis à des modifications de contraintes suite à une évolution du niveau de l'eau pouvant modifier la pression hydrostatique (Demolis et al., 2023).

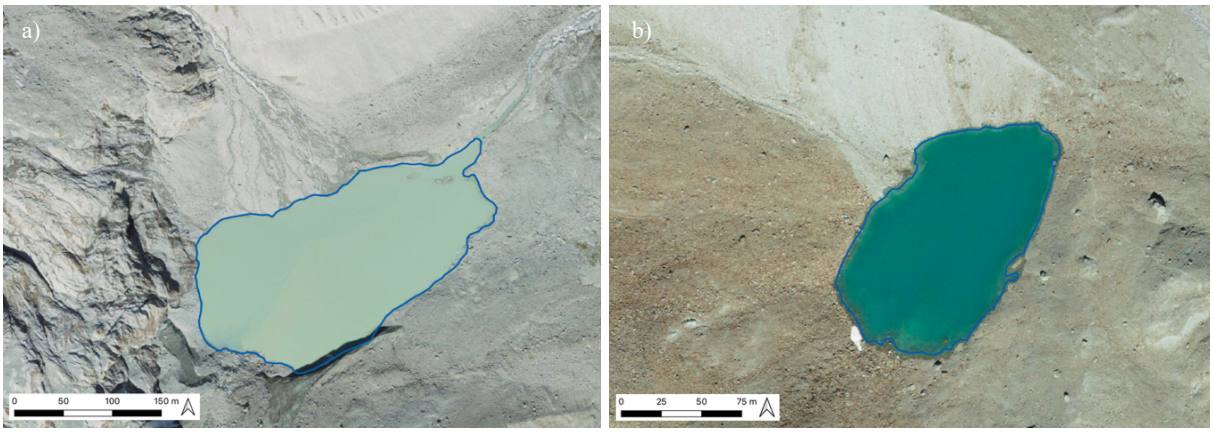


Figure 25 : a) Lac avec un déversoir situé en haut à droite de l'image. b) Lac sans déversoir.

La présence d'un déversoir a été évaluée manuellement grâce aux orthophotos sur la base de la présence de chenaux d'écoulement comme suggéré par Mergili & Schneider (2011) et Mölg et al. (2021b). La carte topographique (swisstopo, 2024d) a également été consultée pour observer le sens de l'écoulement et s'assurer qu'il s'agissait bien d'un déversoir et non d'un chenal d'apport. Par exemple, le lac de la figure 25a est caractérisé par un déversoir mais également des chenaux qui alimentent le lac tandis que la figure 25b montre un lac glaciaire sans déversoir.

- Hauteur de franc-bord

Le paramètre de la hauteur de franc-bord est fréquemment cité dans les études d'évaluation des risques de vidanges de lacs glaciaires car celui-ci définit la probabilité d'un débordement (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002, 2004 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Rinzin et al., 2021). Ce paramètre est défini par Mölg et al. (2021b) comme la différence d'altitude entre la surface du lac et le point le plus bas le long de la crête du barrage.

La hauteur de franc-bord est généralement associée à une valeur seuil au-delà de laquelle la susceptibilité de vidange est considérée comme faible (Demolis et al., 2023). Mergili & Schneider (2011) avaient identifié une valeur seuil de 25 m pour leur étude au Tadjikistan alors que Demolis et al. (2023) ont considéré le fait qu'une hauteur de franc-bord supérieure à 3 m était suffisante.

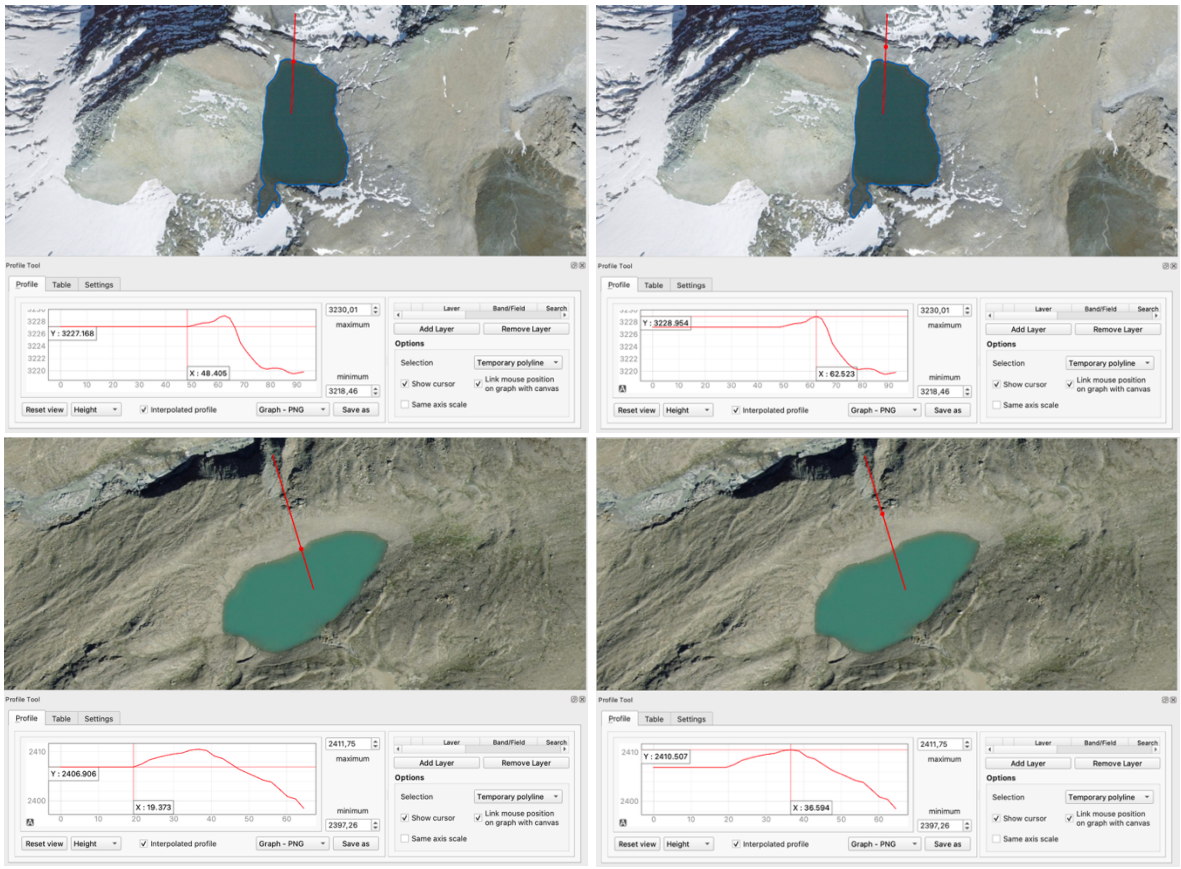


Figure 26 : Un des profils topographiques réalisés sur les lacs sans déversoir de l'inventaire. En haut) Le profil topographique montre une hauteur de franc-bord inférieure à 3 m. En bas) Le profil topographique indique une hauteur de franc-bord supérieure à 3 m.

La hauteur de franc-bord a été évaluée manuellement uniquement pour les lacs ne présentant pas de déversoir grâce à l'outil *profile tool* sur QGIS, notamment utilisé par Demolis et al. (2023). En effet, comme mentionné précédemment, la présence d'un déversoir permet de réduire le risque de surverse et de rupture, donc la hauteur de franc-bord a été estimée pour les lacs sans déversoir comme suggéré par Mölg et al. (2021b). Pour chaque lac concerné, plusieurs profils topographiques ont été réalisés dans le sens de la topographie évaluée grâce à la carte topographique (swisstopo, 2024d). Les profils topographiques ont été réalisés sur la base du MNT 2 m (swisstopo, 2024b). La figure 26 illustre la méthodologie utilisée pour évaluer la hauteur de franc-bord.

Il convient de souligner que la hauteur de franc-bord n'a pas été considérée pour les lacs endigués par de la glace. En effet, les barrages de glace sont trop dynamiques et possèdent généralement des chenaux sous-glaciaires qui ne peuvent pas être déterminés à l'aide d'orthophotos (Mölg et al., 2021b). Les lacs endigués par de la glace sans déversoir se dénombrent à 12.

b) Susceptibilité externe de vidange

Concernant la susceptibilité de vidange de lacs glaciaires suite aux facteurs externes, les facteurs considérés sont repris dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 : Facteurs considérés dans l'évaluation de la susceptibilité externe de vidange d'un lac glaciaire.

Facteurs		Description
Processus gravitaires	Éboulement	Éboulement de parois rocheuses et atteinte du lac
	Chute de pierres	Zone susceptible d'être atteinte par des chutes de pierres
	Permafrost	Présence de permafrost dans les parois rocheuses à proximité du lac
	Contact glacier-lac	Contact direct entre le lac et le glacier
	Moraine non végétalisée	Présence de moraine non végétalisée aux abords du lac
Superficie du bassin versant [m^2]		Superficie du bassin versant du lac

Les processus gravitaires externes peuvent être à l'origine de vidanges de lacs glaciaires par mécanisme de surverse (Demolis et al., 2023). Ainsi, pour considérer ces processus, les facteurs d'éboulement, de chute de pierres, de permafrost, du contact avec le glacier et la présence de moraines non végétalisées aux abords du lac ont été considérés.

- Éboulements

Le paramètre relatif aux éboulements a été évalué sur la base d'une couche réalisée par le Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) dans le cadre d'un projet d'inventaire de parois rocheuses instables (Gindraux & Champion, 2026). Cet inventaire reprend les parois rocheuses avec une pente supérieure à 40° (calculée sur des cellules de 2 500 m^2) pour prendre en compte les parois rocheuses raides susceptibles d'être à l'origine d'événements significatifs de type chutes de pierres, éboulements ou écroulements (parois > 20 000 m^2 ou parois > 150 m de hauteur) (Gindraux & Champion, 2026). La couche de zone d'impact potentielle développée pour ce projet a ensuite été croisée avec la couche de lacs glaciaires du présent inventaire afin de déterminer si un lac est susceptible d'être touché par un éboulement.

- Chute de pierres

Les chutes de pierres correspondent à des mouvements brusques pouvant être associés à des rebonds et des roulements dont les blocs peuvent mesurer plusieurs m^3 et atteindre des vitesses de 30 m/s (Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2026). Généralement, les pierres et les blocs deviennent immobiles lorsque la pente est inférieure à 30° (OFEV, 2026). Pour estimer ce paramètre, la couche SilvaProtect-CH disponible sur le site de la Confédération suisse (geoadmin) a été utilisée. Il s'agit d'une couche qui indique les surfaces potentiellement touchées par les pierres sur la base de la modélisation du processus de chute de pierres. Ces zones ont ensuite été croisées avec la couche des lacs glaciaires de la base de données.

- Permafrost

La présence de permafrost dans les parois rocheuses aux abords des lacs a été prise en compte car il s'agit d'un facteur d'instabilité qui peut entraîner une augmentation de la fréquence des chutes de pierres (Haeberli et al., 2017 ; Mourey et al., 2022). Ce paramètre est d'autant plus pertinent dans un contexte de retrait des glaciers et de dégradation du permafrost car cela peut

entraîner une augmentation de la susceptibilité de vidange par surverse induite par des mouvements gravitaires (Haeberli et al., 2016, 2017).

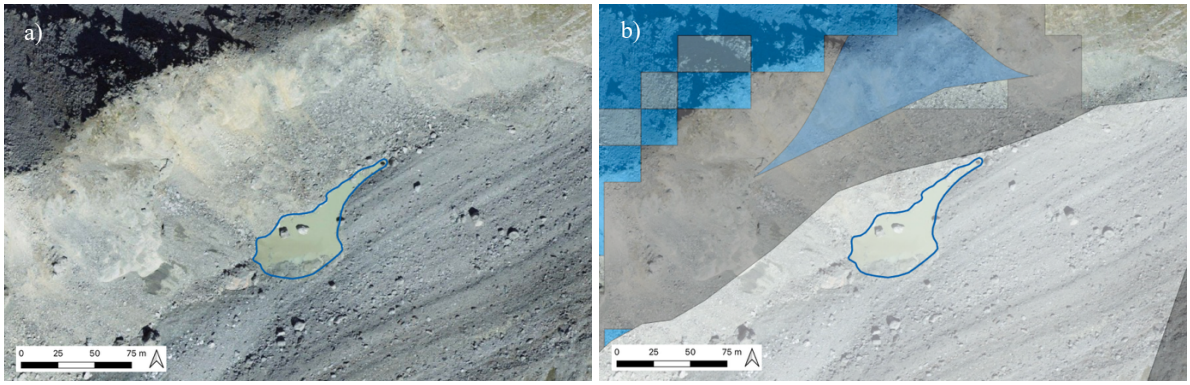


Figure 27 : a) Lac glaciaire formé proche de parois rocheuses pouvant être à l'origine d'une surverse. b) Présence de permafrost dans les parois rocheuses proches du lac induisant une augmentation de l'instabilité et une susceptibilité de chute accrue.

La présence de permafrost a été évaluée manuellement sur la base du jeu de données « Permafrost and Ground Ice Map of Switzerland » développé par Kenner (2018) (Fig. 27).

- Contact glacier

Le contact direct du lac avec le glacier est un facteur qui est largement repris dans la littérature (Demolis et al., 2023 ; Gruber & Mergili, 2013 ; Huggel et al., 2002 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Rinzin et al., 2021). En effet, la présence d'un lac en contact avec un glacier induit des changements dans le régime thermique du glacier ce qui peut renforcer le processus de vêlage et provoquer des chutes de séracs dans le lac menant à une surverse (Demolis et al., 2023 ; Otto, 2018 ; Zhang et al., 2024). Mölg et al. (2021b) ont également souligné que ce paramètre peut induire une augmentation de la superficie du lac.

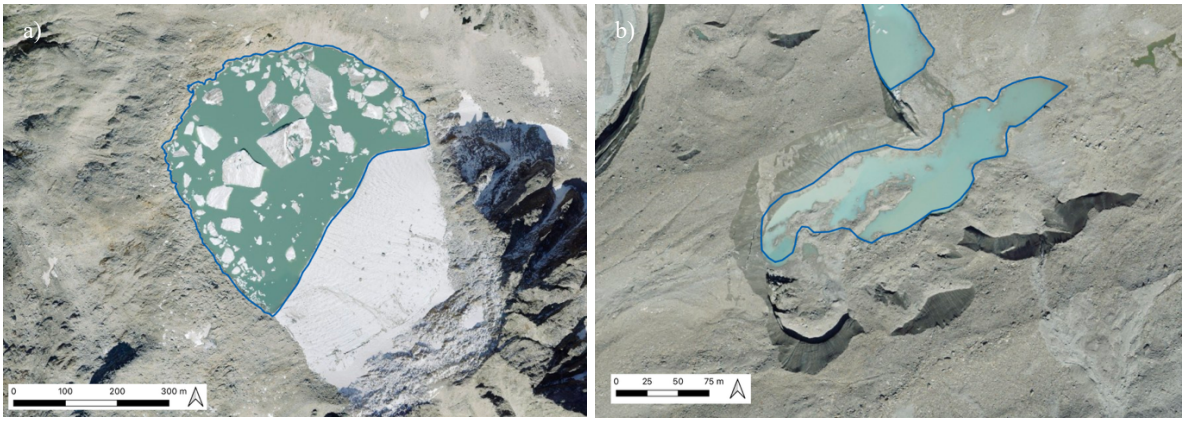


Figure 28 : Lacs en contact direct avec un glacier pouvant engendrer le processus de vêlage et mener à une surverse. a) Les blocs de glace sont directement visibles à la surface du lac. b) Il s'agit ici d'un glacier recouvert de débris.

Ce paramètre a été évalué visuellement sur la base des orthophotos. La figure 28a montre un lac en contact avec un glacier et des blocs de glace visibles à sa surface. La figure 28b illustre également le paramètre de contact direct avec un glacier, qui dans ce cas, est un glacier recouvert de débris.

- Moraines non végétalisées

Enfin, la présence de moraines non végétalisées aux abords du lac est un facteur à considérer dans les mouvements gravitaires car leurs versants instables peuvent provoquer des glissements de terrain directement dans le lac (Haeberli et al., 2017 ; Harrison et al., 2018 ; Zhang et al., 2024).

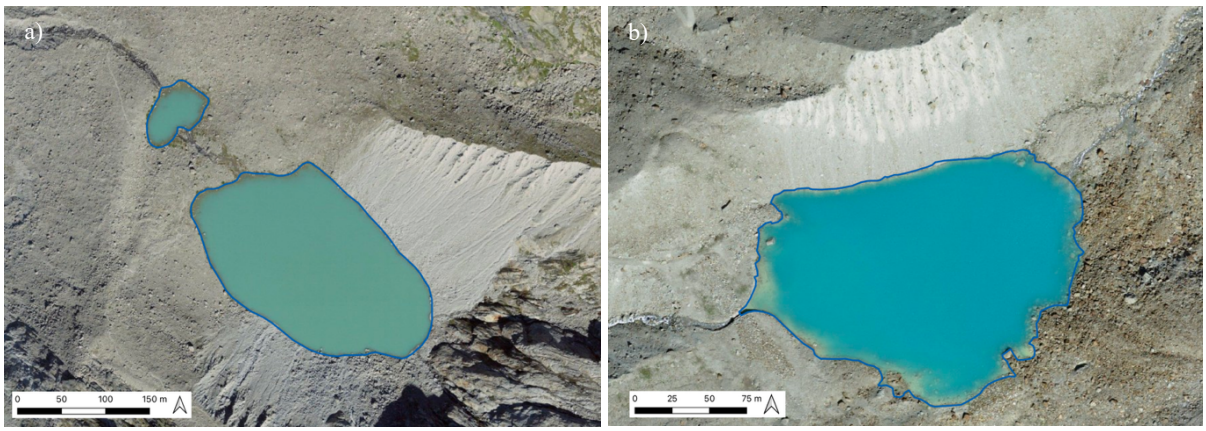


Figure 29a et b : Présence de moraines non végétalisées aux abords de lacs glaciaires pouvant entraîner des glissements de terrain et mouvements de masse directement dans le lac et provoquer une surverse.

Dans ce cas-ci, seules les moraines non végétalisées ont été considérées comme instables pour les mêmes raisons expliquées au point relatif à la succession végétale. Ce paramètre a été évalué visuellement (Fig. 29).

- Superficie du bassin versant

Le bassin versant permet d'évaluer les apports d'eau du lac pouvant mener à une élévation rapide du niveau de l'eau et, par conséquent, entraîner une surverse ou une augmentation des contraintes hydrostatiques sur le barrage (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002). Ce paramètre considère deux composantes, à savoir les précipitations du bassin versant et l'eau de fonte nivale et glaciaire (Allen et al., 2019 ; Zhang et al., 2024). Dans le cadre de ce travail, ce paramètre est évalué sur la base de la superficie du bassin versant.

2.1.2.3. Classification experte

Parallèlement à l'encodage des paramètres retenus, une classe de susceptibilité de vidange (faible, moyenne, élevée) a été attribuée à chaque lac sur la base des paramètres renseignés ainsi que sur la base de l'analyse plus large du lac et du contexte environnemental, telle que sa morphologie ou sa position topographique, mobilisant ainsi un jugement concernant la susceptibilité d'un lac à produire une vidange. Cette classification, nommée par la suite classification experte, a pour objectif de constituer une référence qui sera mobilisée par la suite dans la section 2.2. relative à l'évaluation de la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires.

L'attribution des classes a été réalisée dans un premier temps par l'auteure de ce travail, puis validée par l'experte en glaciologie, Saskia Gindraux. Les lacs dont la classification était incertaine faisaient l'objet d'une discussion. Ainsi, une classe de susceptibilité a été attribuée à chaque lac de l'inventaire.

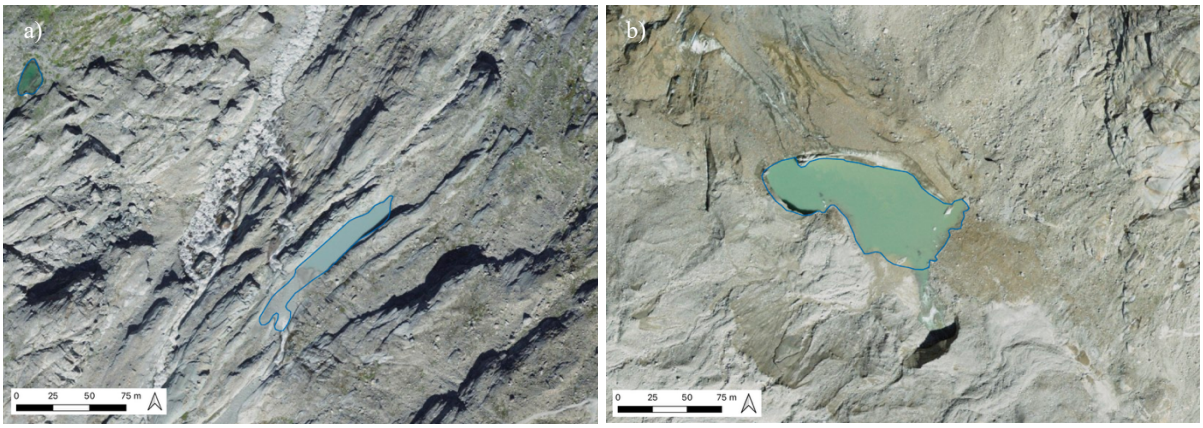


Figure 30 : Classification experte de la susceptibilité de vidange des lacs de l'inventaire. a) Lac à susceptibilité de vidange faible. b) Lac à susceptibilité de vidange élevée.

La figure 30a illustre un lac classé comme à susceptibilité faible de produire une vidange. En effet, ce lac est endigué par le bedrock et s'est formé suite au retrait du glacier entre 1973 et 2010 suivant les couches des couvertures glaciaires passées. Il possède une superficie de 1 562,80 m^2 et son bassin versant possède une superficie de 84 520,71 m^2. De plus, ce lac est caractérisé par la présence d'un déversoir. Concernant les processus gravitaires, bien que celui-ci se situe dans le périmètre d'atteinte par des éboulements, ce n'est pas le cas pour les chutes de pierres, et il n'y a pas de présence de permafrost dans les parois rocheuses. Enfin, ce lac n'est ni en contact avec un glacier ni entouré d'une moraine non végétalisée susceptible de glisser dans le lac. La combinaison de tous ces facteurs a poussé ce lac dans la catégorie faible.

À l'inverse, la figure 30b illustre un lac classé comme à susceptibilité élevée. Cette attribution s'explique par le fait qu'il s'agit d'un lac endigué par de la glace recouverte de débris et qui est en cours de formation. Sa superficie est de 6 510,51 m^2 tandis que la superficie de son bassin versant est de 12 339 369,53 m^2. La figure montre toutefois un déversoir. Ce lac se situe, d'une part, à proximité de parois rocheuses contenant du permafrost et, d'autre part, dans le périmètre d'atteinte par des éboulements. En revanche, celui-ci ne se situe pas dans le périmètre d'atteinte par des chutes de pierres et aucune moraine non végétalisée n'est visible à proximité du lac. Enfin, ce lac est en contact direct avec le glacier, ce qui implique la possibilité de chutes de séracs directement dans le lac. Il s'agit en réalité d'un lac qui s'est formé à proximité du glacier Mittelaletsch dans la région du Grand Glacier d'Aletsch.

2.2. Indice de susceptibilité de vidange

L'objectif de cette section est de développer un indice synthétique permettant d'évaluer la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires répertoriés dans le cadre de cette étude. En effet, une fois que les mécanismes et paramètres jouant un rôle sur la susceptibilité de vidange ont été définis et identifiés dans l'inventaire, l'étape suivante réside dans l'évaluation de la susceptibilité du lac à produire une vidange (Emmer, 2017). Les indices constituent une approche largement utilisée pour évaluer le potentiel de vidange des lacs glaciaires (Gruber & Mergili, 2013 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Rinzin et al., 2021). De manière générale, pour estimer la susceptibilité d'un lac à produire une vidange et pour évaluer le risque associé, une combinaison de scores et d'algorithmes sont utilisés sur la base de paramètres définis au préalable (Emmer et al., 2022a).

L'indice développé dans le présent travail repose sur l'intégration des paramètres identifiés dans l'inventaire préalablement sélectionnés dans la littérature. Chaque paramètre a été discrétisé en classes représentant les différents niveaux de susceptibilité qui ont été associés à des scores renvoyant à leur contribution relative dans la susceptibilité de vidange. Les scores ont ensuite été combinés afin d'obtenir un indice global par lac. Enfin, les valeurs obtenues pour l'indice global ont été converties en classes de susceptibilité sur la base d'une calibration des seuils de classification. Il convient de souligner que l'indice développé dans le cadre de cette étude vise uniquement à estimer la susceptibilité d'un lac glaciaire à produire une vidange. Il s'agit d'une première étape dans l'évaluation du risque puisque celui-ci ne prend pas en compte les composantes liées à l'exposition et les conséquences socio-économiques ou encore la vulnérabilité des enjeux situés en aval.

Cette section vise à présenter les différentes étapes relatives au développement de l'indice de susceptibilité de vidange. Dans un premier temps, les données issues de l'inventaire ont été prétraitées et nettoyées (section 2.2.1.). La section suivante (section 2.2.2.) décrit la classification des paramètres selon les différents niveaux de susceptibilité considérés ainsi que l'attribution des scores associés. Enfin, la section 2.2.3. présente et justifie les classes et les scores définis pour chaque paramètre de susceptibilité.

2.2.1. Prétraitement et nettoyage des données

Étant donné que les paramètres utilisés pour le calcul de l'indice de susceptibilité sont issus de l'inventaire réalisé dans QGIS, un prétraitement des données a été effectué pour assurer une cohérence et pour homogénéiser leur format. Par exemple, les variables binaires ont été codées dans un format unique (0 ou 1) afin de retirer les dérivés (yes, no, true, false). De la même manière, les variables textes ont été uniformisées afin de corriger les incohérences de format.

De plus, une vérification de la base de données a également été réalisée pour l'ensemble des paramètres afin de mettre en évidence les éventuelles données manquantes. Dans le cas où des données étaient manquantes, celles-ci ont directement été modifiées dans QGIS lorsque cela était possible. Cette étape a permis d'obtenir une base de données homogène et exploitable pour le calcul de l'indice.

2.2.2. Classification et attribution des scores

Puisque les données pour chaque paramètre étaient stockées sous différents formats (variables quantitatives continues, qualitatives et binaires), celles-ci ont été discrétisées afin de permettre leur combinaison dans l'indice final. Chaque variable a ainsi été associée à une classe représentant différents niveaux de contribution dans la susceptibilité de vidange.

Les paramètres qualitatifs (matériaux du barrage, succession végétale et période de formation) ont été répartis selon trois niveaux de susceptibilité (faible, moyen et élevé). Les variables binaires (déversoir, permafrost dans la moraine et processus gravitaires) ont quant à elles été classées selon la présence ou l'absence du phénomène considéré. Enfin, les variables quantitatives continues (superficie, superficie du bassin versant, pente aval moyenne du barrage de moraine et hauteur de franc-bord) ont été discrétisées en trois classes et ont ensuite été

associées aux trois niveaux de susceptibilité ou bien ont été classées en deux classes suivant une valeur seuil. Chaque classe s'est ensuite vu attribuer un score de susceptibilité de 0,25 (faible), de 0,5 (moyenne) ou de 1 (élevée) sur la base des valeurs proposées par Rinzin et al. (2021).

2.2.3. Description des paramètres

La section suivante vise à présenter et justifier les classes de susceptibilité internes et externes ainsi que les scores attribués à chacun des paramètres considérés dans le calcul de l'indice de susceptibilité de vidange.

2.2.3.1. Susceptibilité interne de vidange

Le tableau 9 reprend les paramètres liés à la susceptibilité interne de vidange ainsi que les classes et scores associés.

Tableau 9 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité interne de vidange ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés.

Paramètres	Type de variable	Classes de susceptibilité	Score associé
Matériaux du barrage	Qualitative	Faible : bedrock	0,25
		Moyenne : moraine*	Variable (0,35-0,9)
		Élevée : glace	1
Superficie [m^2]	Quantitative continue	Faible : a1	0,25
		Moyenne : a2	0,5
		Élevée : a3	1
Période de formation	Qualitative	Faible : pf1	0,25
		Moyenne : pf2	0,5
		Élevée : pf3	1
Présence d'un déversoir	Binaire	Faible : présent	0,25
		Élevée : absent	1
Hauteur de franc-bord [m]	Quantitative continue	Faible : fb1	0,25
		Élevée : fb2	1

(*) Le score associé aux barrages de moraine est calculé sur la base de trois sous-paramètres : la succession végétale, la présence de permafrost et, la pente de la moraine.

- Matériaux du barrage

Le type de barrage constitue un paramètre important dans l'évaluation de la susceptibilité de vidange (Demolis et al., 2023 ; Gruber & Mergili, 2013 ; Huggel et al., 2002 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Zhang et al., 2024). Les trois types de barrage identifiés dans la base de données ont été classés suivant leur stabilité relative : les barrages de bedrock ont été attribués à une susceptibilité faible puisque ceux-ci sont considérés comme stables et que leur vidange est rare (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022a, 2022b ; Huggel et al., 2004 ; Zhang et al., 2024), les barrages de moraine à une susceptibilité intermédiaire (Huggel et al., 2004), et les barrages de glace à une susceptibilité élevée puisque ceux-ci sont à l'origine de 64,8 % des vidanges de lacs glaciaires à l'échelle mondiale et sont donc considérés comme davantage instables (Huggel et al., 2004 ; Zhang et al., 2024).

Tableau 10 : Sous-paramètres considérés dans le score final pour les barrages endigués par une moraine ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés.

Paramètres	Type de variable	Classes de susceptibilité	Score associé
Succession végétale	Qualitative	Faible : dense	0,35
		Moyenne : discontinue	0,5
		Élevée : aucune	0,9
Permafrost	Binaire	Faible : absent	0,35
		Élevée : présent	0,9
Pente	Quantitative	Faible : m_sl1	0,35
		Élevée : m_sl2	0,9

Le score initialement attribué aux barrages de moraine pour le niveau de susceptibilité intermédiaire (0,5) a été réévalué afin de prendre en compte les trois sous-paramètres propres aux barrages de moraine qui influencent la stabilité des moraines, soit la succession végétale, la présence de permafrost et la pente aval moyenne de la moraine (Tableau 10) (Demolis et al., 2023 ; Huggel et al., 2002 ; Rinzin et al., 2021 ; Wang et al., 2011).

- Sous-paramètres relatifs aux barrages de moraine

Pour la succession végétale, les différents stades définis lors de la réalisation de l'inventaire ont été classés suivant le fait que les moraines végétalisées sont considérées comme plus stables que celles non végétalisées (Eichel, 2018 ; Huggel et al., 2002 ; Wang et al., 2011). Ainsi, la succession avancée (dense) a été attribuée à la classe faible, celle intermédiaire (discontinue) à la classe moyenne et la pionnière (aucune) à celle élevée.

Le paramètre permafrost a été classé selon la présence (élevée) ou non (faible) dans le barrage de moraine car cela peut induire une instabilité du barrage (Demolis et al., 2023 ; Harrison et al., 2018 ; Huggel et al., 2002 ; Otto, 2018 ; Rinzin et al., 2021 ; Zhang et al., 2024).

La pente aval moyenne de la moraine a été classée suivant un seuil de 20° avec la classe faible (pente ≤ 20°) et élevée (pente > 20°) (Wang et al., 2011), puisque les pentes importantes sont généralement plus sensibles aux processus d'érosion, glissements superficiels et incision du barrage en cas de surverse (Huggel et al., 2004 ; Emmer & Vilímek, 2014 ; Zhang et al., 2024).

Ces trois sous-paramètres ont été associés à des scores légèrement différents pour s'assurer que le score final pour les barrages de moraine ne soit pas inférieur au score des lacs endigués par le bedrock (0,25) et considérés comme plus stables, et ne soit pas supérieur au score des barrages de glace (1) et ainsi considérés comme plus instables. Pour ce faire, les scores attribués aux sous-paramètres ont été bornés entre 0,35 et 0,9 pour assurer que leur moyenne reste toujours comprise entre ces deux valeurs. Pour chaque lac endigué par une moraine, le score final correspond à la moyenne des scores des trois sous-paramètres (Eq. 5) :

$$Score\ Moraine\ (s_m) = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} m_i \qquad \text{(Eq. 5)}$$

avec m_1 = la succession végétale, m_2 = le permafrost et m_3 = la pente du barrage.

- Superficie

Les trois classes pour le paramètre superficie ont été déterminées suivant une distribution statistique des valeurs générées dans la base de données. Puisque la distribution linéaire de la superficie des lacs est fortement asymétrique (Annexe 1a), une distribution logarithmique a été préférée (Annexe 1b).

Les classes générées sont respectivement a1 (56,2 - 802,4 m^2), a2 (802,4 - 11 448,6 m^2) et a3 (11 448,6 - 163 342,1 m^2). La classe a1 a été attribuée à la catégorie faible, la classe a2 à la moyenne et la classe a3 à la classe élevée, selon l'hypothèse que les lacs avec une plus grande superficie génèrent des vidanges de lacs glaciaires plus conséquentes puisqu'il y a théoriquement un plus gros volume disponible (Allen et al., 2019 ; Rinzin et al., 2021).

- Période de formation

La période de formation a été classée suivant les classes présentées dans le point relatif à la période de formation dans l'inventaire. Cependant, pour obtenir une répartition en trois classes, les différentes catégories ont été regroupées afin d'obtenir trois périodes : 1850-1973 (pf1), 1973-2023 (pf2) et en cours de formation (pf3). Puisque les lacs récents sont généralement associés à des conditions et des environnements instables, ceux en cours de formation ont été associés à la classe élevée tandis que les lacs plus anciens reflètent des conditions plus stables et ont été associés à la classe faible (Demolis et al., 2023).

- Déversoir

Le paramètre relatif à la présence d'un déversoir a été classé en deux catégories ; soit la présence (faible) ou non (élevée). La classe faible a été attribuée à la présence d'un déversoir car celui-ci permet d'une part de réduire le risque de surverse et, d'autre part, de réduire le risque de rupture comme expliqué dans le point consacré à ce paramètre (Demolis et al., 2023).

- Hauteur de franc-bord

Concernant la hauteur de franc-bord, la valeur seuil proposée par Demolis et al. (2023) au-delà de laquelle la susceptibilité de vidange est considérée comme faible, à savoir 3 m, a été retenue en raison de la similarité entre le contexte français et suisse. Chaque valeur pour la hauteur de franc-bord a donc été classée selon cette valeur seuil, soit dans la classe faible fb1 (> 3 m), soit dans la classe fb2 (≤ 3 m) associée à un score plus élevé. Pour rappel, ce paramètre a été évalué uniquement pour les lacs endigués par le bedrock ou une moraine sans déversoir.

2.2.3.2. Susceptibilité externe de vidange

Les paramètres considérés concernant la susceptibilité externe de vidange ainsi que les classes et les scores sont repris par le tableau 11 :

Tableau 11 : Paramètres considérés dans l'évaluation de la susceptibilité externe de vidange ainsi que les classes de susceptibilité et scores associés.

Paramètres	Type de variable	Classes de susceptibilité	Score associé
Éboulement	Binaire	Faible : absence	0,25
		Élevée : présence	1
Chute de pierres	Binaire	Faible : absence	0,25
		Élevée : présence	1
Permafrost parois	Binaire	Faible : absence	0,25
		Élevée : présence	1
Contact glacier-lac	Binaire	Faible : absence	0,25
		Élevée : présence	1
Moraine non végétalisée	Binaire	Faible : absence	0,25
		Élevée : présence	1
Ratio superficie du bassin versant / superficie lac	Quantitative continue	Faible : cr1	0,25
		Moyenne : cr2	0,5
		Élevée : cr3	1

- Processus gravitaires

Concernant les processus gravitaires (éboulement, chute de pierres, permafrost parois, contact glacier-lac, et moraine non végétalisée), chaque paramètre a été converti selon la présence ou l'absence du processus et/ou la possibilité d'atteinte du lac ou non. La variable 0, correspondant à l'absence du processus, a été attribuée à la classe faible tandis que la valeur 1, associée à la présence du processus, s'est vu attribuer un score plus élevé.

- Ratio entre la taille du bassin versant et la superficie du lac

Pour le paramètre bassin versant, le ratio entre la superficie du bassin versant et celle du lac a été calculé. Ce choix réside dans le fait que les valeurs de superficie du bassin versant sont généralement beaucoup plus grandes que les valeurs de la superficie des lacs. De la même manière que pour la superficie des lacs, le ratio entre la superficie du bassin versant et celle du lac présente une distribution fortement asymétrique (Annexe 1c). C'est pourquoi la distribution logarithmique a été retenue (Annexe 1d).

Les classes définies sont cr1 (2,18 - 130,51), cr2 (130,51 - 7 817,45) et cr3 (7 817,45 - 468 261,84). Les valeurs élevées pour le ratio ont été associées à la classe élevée puisqu'un grand bassin versant implique davantage d'apport d'eau provenant des précipitations ou de l'eau de fonte nivale et glaciaire, et les valeurs faibles de ratio ont été attribuées à la classe faible (Allen et al., 2019 ; Zhang et al., 2024).

3. Résultats

Cette section a pour but de présenter, d'une part, les résultats obtenus pour la distribution spatiale des lacs glaciaires recensés ainsi que les différents paramètres considérés dans l'inventaire et, d'autre part, les résultats quant à l'évaluation de susceptibilité de vidange des lacs glaciaires en Valais, incluant la calibration des seuils de classification suivant des évaluations à trois et à deux classes de susceptibilité, ainsi que leur distribution spatiale.

3.1. Inventaire des lacs glaciaires

3.1.1. Distribution spatiale

Les lacs glaciaires répertoriés dans la base de données réalisée dans le cadre de ce travail sont repris sur la figure 31.

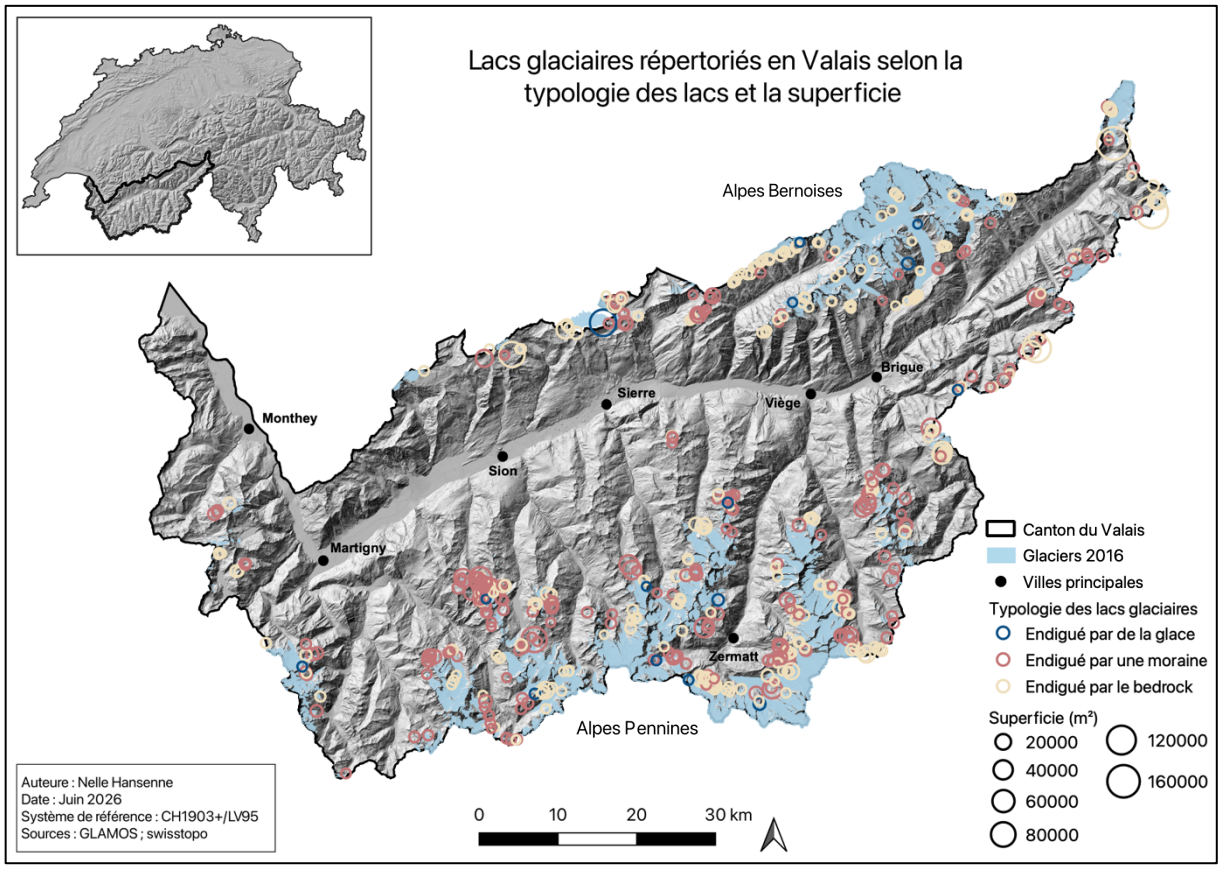


Figure 31 : Lacs glaciaires répertoriés en Valais selon la typologie et la superficie des lacs.

La distribution spatiale des lacs glaciaires répertoriés montre une répartition dans l'ensemble des zones englacées du Valais, avec une concentration plus marquée dans le sud du canton, dans les Alpes pennines, ainsi qu'au nord-est du canton, à proximité du Grand Glacier d'Aletsch. De manière générale, ces résultats indiquent que le canton du Valais est caractérisé par un nombre important de lacs glaciaires. Toutefois, l'ouest du canton (sud, sud-ouest de Martigny) présente une densité de lacs plus faible, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'étendue glaciaire y est moins marquée.

La répartition spatiale des matériaux du barrage met également en avant quelques tendances. En effet, une certaine concentration des lacs endigués par une moraine peut être observée au sud de Sion, alors que les lacs endigués par le bedrock sont davantage représentés dans le nord-est du canton, notamment au nord de Viège, mais également au sud-est, au sud de Zermatt. Les lacs endigués par la glace, pour leur part, présentent une répartition plus hétérogène à l'échelle du Valais, bien que plusieurs de ces lacs soient observés à proximité du Grand Glacier d'Aletsch.

Enfin, la distribution spatiale met en évidence une répartition hétérogène des superficies des lacs glaciaires répertoriés au sein du canton, avec une majorité de lacs présentant une petite superficie. Néanmoins, quelques lacs se distinguent par leur grande superficie, notamment le lac situé à l'aval du glacier du Rhône, à l'extrême nord-est du canton, mais également le lac des Faverges situé sur le glacier de la Plaine Morte, au nord de Sierre.

3.1.2. Caractéristiques générales

Les résultats pour les caractéristiques générales des lacs de la base de données sont repris par la figure 32.

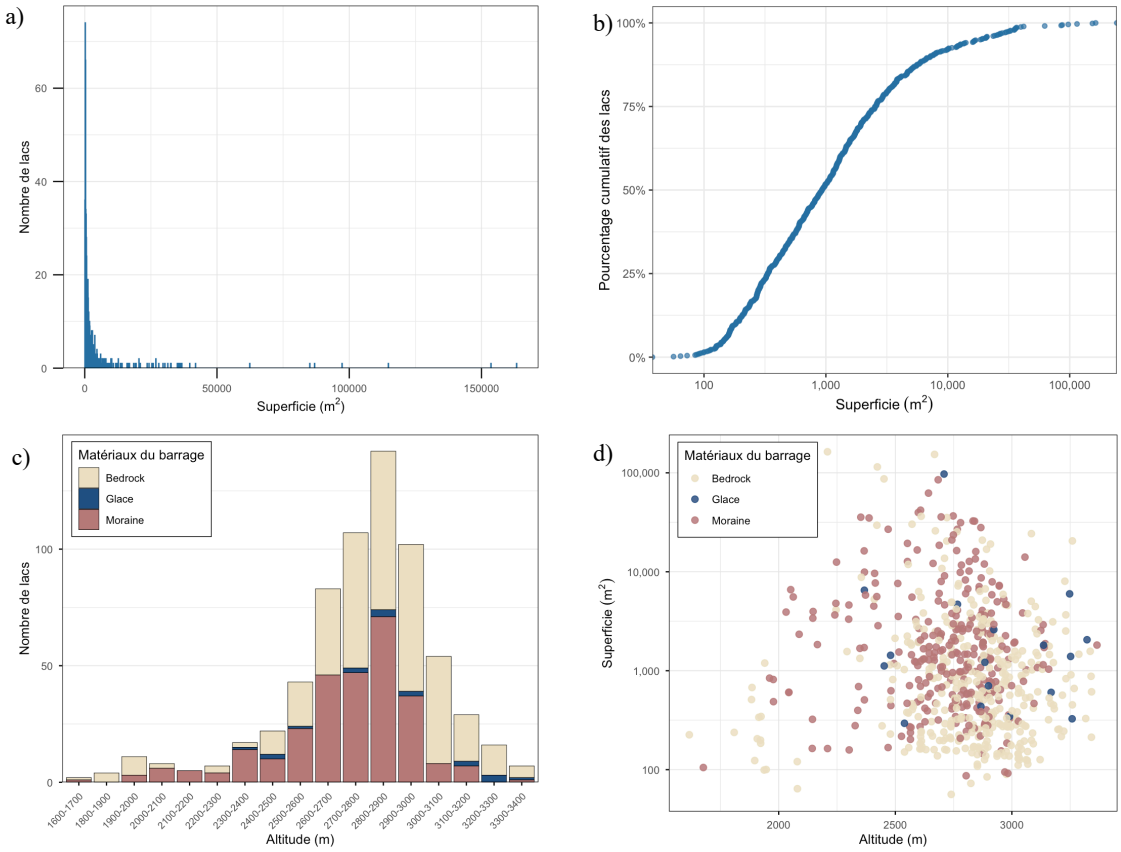


Figure 32 : a) Distribution de la superficie des lacs. b) Pourcentage cumulatif de la superficie des lacs de la base de données. c) Répartition des lacs selon l'altitude et les matériaux du barrage. d) Relation entre l'altitude et la superficie selon les matériaux du barrage.

Concernant la superficie des lacs, la distribution est fortement asymétrique comme illustré par la figure 32a. En effet, une concentration de petits lacs peut être observée avec 51,7 % des lacs présentant une superficie inférieure à 1 000 m^2 alors que seulement 1,1 % des lacs présentent

une superficie supérieure à 50 000 m^2. Par ailleurs, le plus petit lac de la base de données possède une superficie de 56,24 m^2 et le plus grand une superficie de 163 342,12 m^2, et la superficie moyenne est de 4 089,22 m^2. Ces observations sont confirmées et complétées par la figure 32b puisque la médiane pour la superficie s'élève à 931,50 m^2 et est nettement inférieure à la moyenne, illustrant ainsi cette asymétrie. De plus, 90 % des lacs de la base de données possèdent une superficie inférieure à 7 216 m^2 indiquant que la base de données est majoritairement constituée de petits lacs glaciaires avec quelques grands lacs.

La figure 32c illustre la répartition des lacs glaciaires de la base de données selon l'altitude et les matériaux du barrage. Les valeurs pour l'altitude varient entre 1 616 m et 3 365 m (moyenne 2 777 m), avec 50 % des lacs qui se situent entre 2 659 et 2 937 m d'altitude, et 16,1 % des lacs qui se localisent au-dessus de 3 000 m. La tranche 2 800 - 2 900 m est la plus représentée avec 21,5 % des lacs de la base de données.

Enfin, la figure 32d indique que les paramètres d'altitude et de superficie sont indépendants puisque le coefficient de corrélation obtenu est de -0,08, soit proche de 0. De la même manière, il n'existe aucune corrélation entre ces deux paramètres indépendamment du paramètre des matériaux endiguant les lacs. En effet, cette absence de corrélation est également observée lorsque les lacs sont considérés séparément selon les matériaux endiguant les lacs, avec un coefficient de -0,03 pour les lacs endigués par une moraine, -0,17 pour ceux endigués par de la glace, et -0,02 pour le bedrock.

Tableau 12 : Statistiques du paramètre altitude selon les matériaux.

	Bedrock	Moraine	Glace
Moyenne (m)	2 821	2 716	2 898
Q1 (m)	2 710	2 608	2 709
Médiane (m)	2 863	2 767	2 900
Q3 (m)	2 989	2 876	3 168
Min (m)	1 616	1 677	2 367
Max (m)	3 342	3 365	3 322

Tableau 13 : Statistiques du paramètre superficie selon les matériaux.

	Bedrock	Moraine	Glace
Moyenne (m^2)	3 495,41	4 633,05	7 575,80
Q1 (m^2)	240,99	603,36	604,23
Médiane (m^2)	565,85	1 470,45	1 394,58
Q3 (m^2)	1 571,83	3 663,29	2 601,77
Min (m^2)	56,24	86,83	294,25
Max (m^2)	163 342,12	85 105,81	97 260,16

Le tableau 12 présente les statistiques d'altitude selon les matériaux du barrage. La moyenne est de 2 716 m pour les lacs endigués par une moraine, de 2 821 m pour ceux endigués par le bedrock et de 2 898 m pour ceux endigués par la glace, ces derniers étant répartis dans la tranche d'altitude la plus petite (2 367 - 3 322 m). Les lacs endigués par de la glace se situent donc à des altitudes plus hautes que ceux endigués par une moraine ou le bedrock, ce qui est cohérent puisqu'ils sont en contact direct avec le glacier.

Concernant la superficie des lacs selon les matériaux, le tableau 13 montre que les lacs glaciaires endigués par le bedrock présentent une distribution asymétrique ainsi que des superficies globalement plus petites que ceux endigués par une moraine ou de la glace. En effet, cette catégorie de lac possède la médiane la plus basse (565,85 m^2), mais regroupe également le plus grand lac de la base de données (163 342,12 m^2). Pour les lacs endigués par une moraine, la médiane est de 1 470,45 m^2 pour des superficies allant de 86,83 m^2 à 85 105,81 m^2. Enfin, pour les lacs endigués par la glace, la médiane est de 1 394,58 m^2 pour des superficies comprises entre 294,25 m^2 et 97 260,16 m^2.

3.1.3. Caractéristiques internes

Les résultats pour les caractéristiques internes des lacs de la base de données sont repris dans la figure 33.

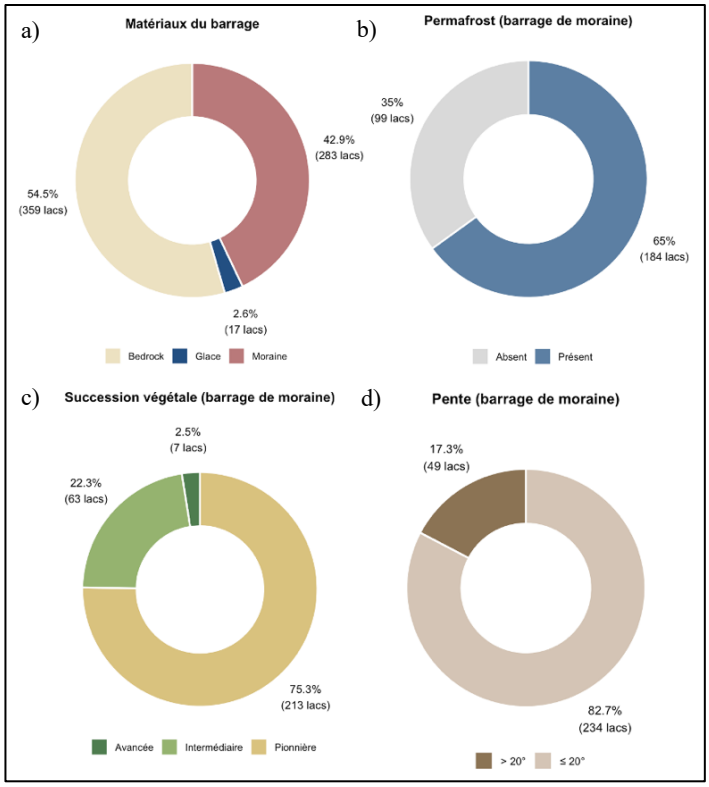


Figure 33 : a) Répartition des lacs selon les matériaux du barrage. Sous-paramètres relatifs aux barrages de moraine. b) Présence de permafrost. c) Succession végétale. d) Pente aval moyenne de la moraine.

L'inventaire comprend 54,5 % de lacs endigués par le bedrock, 42,9 % par une moraine et 2,6 % par de la glace (Fig. 33a). Les lacs endigués par le bedrock sont donc davantage représentés que ceux endigués par une moraine et par de la glace qui sont, eux, peu représentés.

- Sous-paramètres relatifs aux barrages de moraine

Concernant les paramètres de stabilité des barrages de moraine, la figure 33b montre que 65,0 % des lacs endigués par une moraine présentent du permafrost dans leur barrage, contre 35,0 % qui n'en ont pas. Les lacs endigués par une moraine contenant du permafrost se situent globalement à des altitudes plus élevées que ceux sans permafrost, avec des médianes respectives de 2 809 m et 2 599 m (Annexe 2a).

Pour le paramètre de succession végétale, seuls 2,5 % des lacs endigués par une moraine montrent une végétation dense, suggérant une stabilité plus importante du barrage, contre 22,3 % pour la succession intermédiaire, et 75,3 % pour la succession pionnière, qui est largement dominante (Fig. 33c). Cela illustre le contexte périglaciaire/paraglaciaire de l'inventaire, ce qui induit une instabilité de l'environnement pouvant limiter ou perturber la recolonisation végétale. Par ailleurs, les barrages de moraine avec une végétation dense se situent à des altitudes plus basses que ceux avec une succession intermédiaire ou pionnière (Annexe 2b), avec respectivement des médianes de 2 302 m, 2 625 m et 2 809 m d'altitude. Cela suggère que les moraines localisées à plus basse altitude sont moins exposées aux processus gravitaires et au remaniement des matériaux, favorisant ainsi la colonisation par la végétation.

Enfin, pour la pente aval moyenne du barrage, 82,7 % des lacs endigués par une moraine possèdent une pente inférieure ou égale à 20° - et sont donc considérés comme plus stables -, et le reste, soit 17,3 %, ont une pente supérieure à 20° (Fig. 33d).

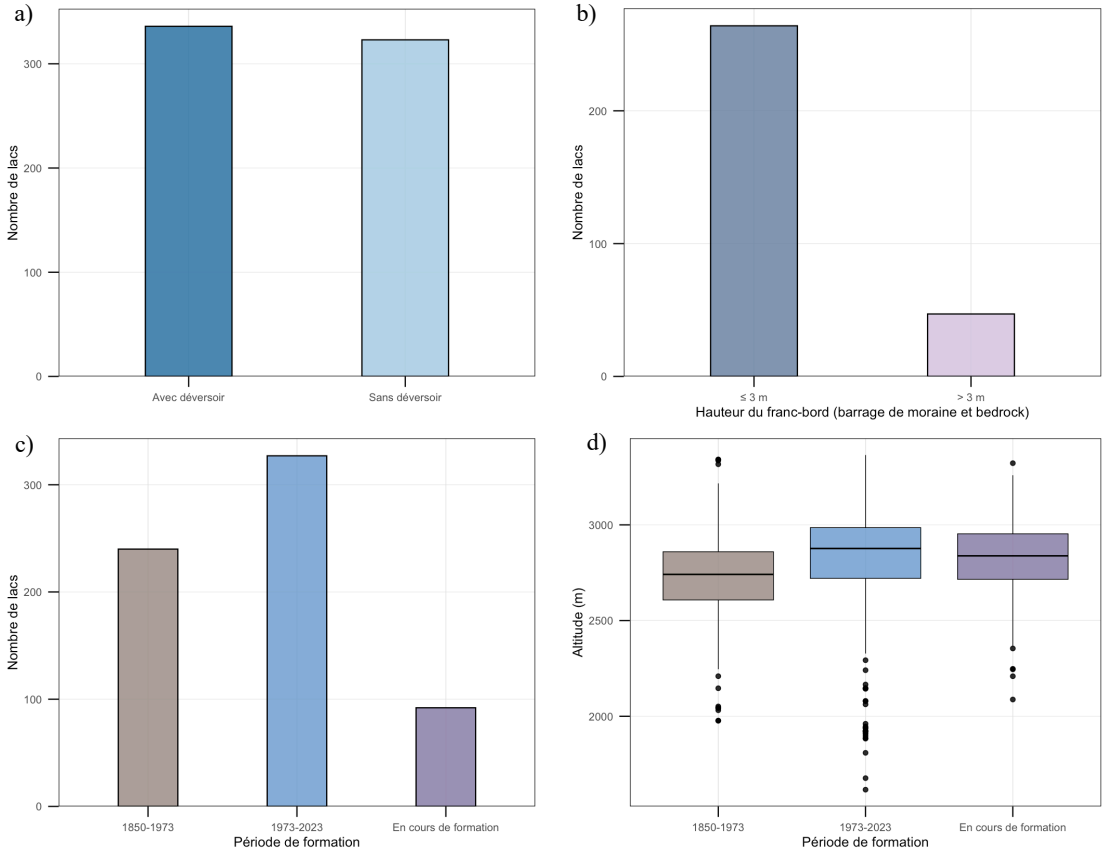


Figure 34 : a) Lacs avec et sans déversoir. b) Paramètre du franc-bord évalué pour les lacs sans déversoir. c) Répartition du nombre de lac selon la période de formation. d) Distribution de la période de formation selon l'altitude.

Toujours pour les paramètres internes des lacs de la base de données, 336 lacs (51,0 %) possèdent un déversoir et 323 lacs (49,0 %) n'en possèdent pas (Fig. 34a). En considérant les matériaux du barrage, aucune tendance marquée ne peut être observée pour les lacs endigués par le bedrock ou par une moraine, puisque la présence et l'absence s'observent de façon équivalente. En effet, 51,8 % des lacs endigués par le bedrock possèdent un déversoir contre

48,2 % sans, et 51,2 % des lacs endigués par une moraine présentent un déversoir tandis que 48,8 % n'en ont pas. En revanche, pour les lacs endigués par de la glace, 29,4 % ont un déversoir tandis que 70,6 % n'en ont pas. Pour ces mêmes lacs, il faut souligner que les chenaux sous-glaciaires ne sont généralement pas visibles sur les orthophotos, ce qui implique que ce paramètre a pu être sous-estimé.

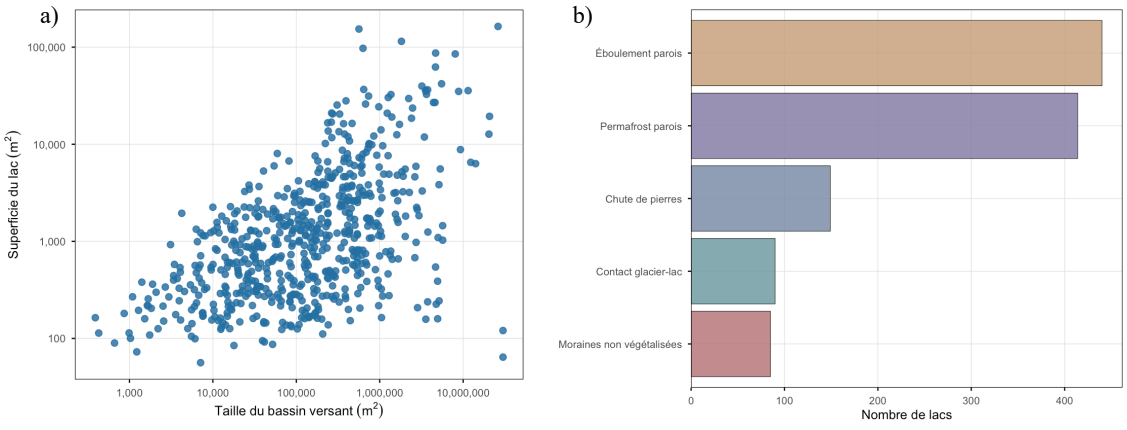
Comme expliqué précédemment (section 2.1.2.2.), la hauteur de franc-bord a été évaluée pour les lacs sans déversoir et uniquement pour les barrages de moraine et de bedrock, soit pour 311 lacs de la base de données. Les résultats indiquent que pour les lacs endigués par le bedrock et par une moraine qui ne présentent pas de déversoir, 264 lacs (84,9 %) possèdent un franc-bord inférieur ou égal à 3 m et 47 lacs (15,1 %) ont une hauteur de franc-bord supérieure à 3 m, avec une hauteur maximale atteignant 50 m (Fig. 34b).

Concernant la période de formation, 36,4 % des lacs se sont formés entre 1850 et 1973, 49,6 % entre 1973 et 2023, et 14,0 % des lacs sont en cours de formation (Fig. 34c). Ces résultats dévoilent une accélération de la formation des lacs glaciaires puisque le taux de formation passe de 1,95 lac par an sur la période 1850-1973 (123 ans) à 6,54 lacs par an sur la période 1973-2023 (50 ans), bien que ces taux moyens tendent à lisser les variations climatiques internes à chaque période. Cependant, les incertitudes associées à la période 1850-1973 concernant l'extension glaciaire ainsi que le tampon réalisé autour des glaciers pour cette étude - mais aussi la sédimentation de lacs - peuvent impliquer une sous-estimation du nombre de lacs glaciaires pour cette période.

La figure 34d montre que les lacs de la période 1850-1973 se sont formés à des altitudes légèrement plus basses que ceux des deux autres périodes, avec une médiane de 2 741 m contre 2 877 m et 2 838 m, respectivement. Par ailleurs, la période 1973-2023 présente une distribution davantage asymétrique.

3.1.4. Caractéristiques externes

Les résultats pour les paramètres externes aux lacs obtenus pour la base de données sont repris dans la figure 35.



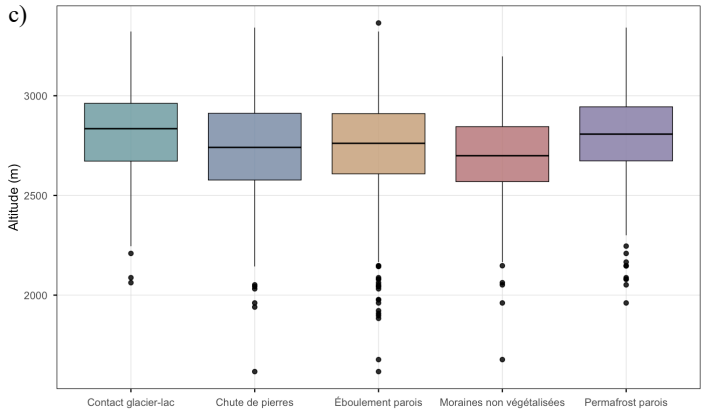


Figure 35 : a) Distribution de la taille du bassin versant selon la superficie du lac (distribution logarithmique). b) Répartition des processus gravitaires (éboulement parois, permafrost dans les parois, chutes de pierre, contact glacier-lac et moraines non végétalisées). c) Distribution des processus gravitaires selon l'altitude.

Les résultats montrent qu'il existe une relation entre la taille du bassin versant et la superficie du lac : le coefficient de corrélation obtenu pour la distribution logarithmique est de 0,54, indiquant une corrélation positive modérée, ce qui suggère que les lacs avec un grand bassin versant ont tendance à avoir une superficie plus grande (Fig. 35a). Cependant, cette relation met également en évidence une forte variabilité autour de cette tendance, puisque certains lacs avec un grand bassin versant présentent une superficie petite à moyenne, ce qui signifie que la taille du bassin versant n'est pas la seule variable explicative de la superficie des lacs.

Concernant les processus gravitaires, 66,8 % des lacs de la base de données sont susceptibles d'être atteints par des éboulements de parois rocheuses et 22,6 % par des chutes de pierres. De plus, 62,8 % des lacs se situent à proximité de parois rocheuses contenant du permafrost. Enfin, 13,7 % des lacs de la base de données sont en contact direct avec un glacier et 12,9 % possèdent des moraines non végétalisées à leurs abords (Fig. 35b).

Tableau 14 : Croisement du paramètre permafrost avec les éboulements et chutes de pierres.

	Éboulements (n = 440)	Chute de pierres (n = 149)
Pas de permafrost (n = 245)	58,4 %	10,2 %
Permafrost (n = 414)	71,7 %	30,0 %

Les paramètres de contact glacier (médiane de 2 835 m d'altitude) et de présence de permafrost dans les parois rocheuses (médiane de 2 808 m d'altitude) caractérisent les lacs situés à des altitudes légèrement plus élevées que pour les autres paramètres, ce qui est cohérent puisque les glaciers et le permafrost se situent en haute altitude (Fig. 35c). Les paramètres de chute de pierres et d'éboulements présentent une distribution relativement similaire et asymétrique, avec des médianes proches (respectivement de 2 741 m et 2 761 m). Par ailleurs, les lacs situés à proximité des parois rocheuses contenant du permafrost sont davantage atteints par des éboulements (71,7 % contre 58,4 % des lacs) et des chutes de pierres (30,0 % contre 10,2 % des lacs) (Tableau 14). Enfin, le paramètre de présence de moraines non végétalisées à proximité des lacs possède une médiane légèrement inférieure aux autres paramètres (2 699 m d'altitude) pour des valeurs comprises entre 1 677 m et 3 198 m d'altitude, ce qui est cohérent puisque les moraines sont liées à l'avancée et au retrait des glaciers.

3.2. Indice de susceptibilité de vidange

Cette version de l'indice de susceptibilité de vidange repose sur l'hypothèse que chaque paramètre possède une contribution identique à la susceptibilité de vidange. L'indice de susceptibilité correspond ainsi à la moyenne arithmétique des scores attribués à chaque classe des différents paramètres (Eq. 6).

$$Indice\ de\ Susceptibilité\ (SI) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_i \qquad \text{(Eq. 6)}$$

avec n = nombre de paramètres considérés et s_i = le score de la classe du paramètre i. Le nombre de paramètres intégrés dans le calcul varie entre 10 et 11. En effet, le paramètre franc-bord n'ayant pas été évalué pour les lacs avec un déversoir et ceux endigués par de la glace n'est donc pas pris en compte dans le calcul de leur indice final de susceptibilité.

Les valeurs obtenues pour l'indice de susceptibilité ont ensuite été normalisées entre 0 et 1 afin de faciliter leur interprétation et leur exploitation selon la formule suivante (Eq. 7) :

$$Indice\ de\ Susceptibilité_{norm}\ (SI_{norm}) = \frac{SI - SI_{min}}{SI_{max} - SI_{min}} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

avec SI = l'indice de susceptibilité de vidange. La figure 36 reprend les distributions pour l'indice de susceptibilité avant et après normalisation.

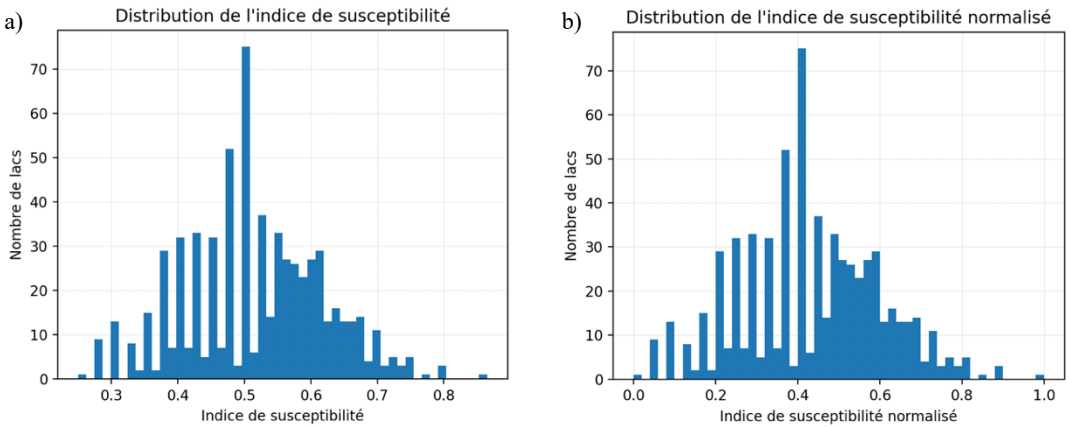


Figure 36 : Distribution des valeurs obtenues pour l'indice de susceptibilité. a) Avant normalisation. b) Après normalisation.

3.2.1. Première évaluation : Trois niveaux de susceptibilité de vidange

Cette section présente la classification des lacs selon trois niveaux de susceptibilité de vidange. Les seuils séparant les classes faible, moyenne et élevée ont été calibrés à partir des classes expertes, c'est-à-dire les niveaux de susceptibilité attribués à chaque lac sur la base du jugement de l'expert lors de la réalisation de l'inventaire. Les performances de cette classification sont ensuite évaluées en comparant les classes obtenues à ces classes de référence.

3.2.1.1. Calibration des seuils

Cette étape consiste à convertir les valeurs continues de l'indice de susceptibilité normalisé en trois classes qualitatives (faible, moyen, élevé) afin de classer les lacs selon leur niveau de susceptibilité de vidange. Cette classification repose sur la détermination de deux valeurs seuils, t_1 et t_2, qui délimitent les trois niveaux de susceptibilité :

$$Classes = \begin{cases} Faible & si\ SI_{norm} < t_1 \\ Moyen & si\ \ t_1 \leq SI_{norm} < t_2 \\ Elevé & si\ SI_{norm} \geq t_2 \end{cases}$$

avec SI_{norm} l'indice de susceptibilité normalisé.

Les valeurs t_1 et t_2 ont été déterminées à l'aide d'une approche experte couramment employée dans les études de risques glaciaires (Demolis et al., 2023 ; Emmer & Vilímek, 2014). Lors de la réalisation de la base de données dans QGIS, des classes de susceptibilité (faible, moyen, élevé) ont été attribuées à chaque lac sur la base du jugement expert (section 2.1.2.3.) et ont ensuite été utilisées comme classification de référence pour calibrer les seuils de l'indice. La répartition des lacs de la base de données selon les classes expertes est la suivante : 573 (86,9 %) lacs ont été classés en susceptibilité faible, 79 (12,0 %) lacs en susceptibilité moyenne et 7 (1,1 %) lacs en susceptibilité élevée. L'objectif de cette calibration est donc d'identifier les valeurs t_1 et t_2 qui reproduisent au mieux la classification déterminée par les experts pour chaque lac à partir de l'indice de susceptibilité normalisé.

Tableau 15 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité de vidange (classification experte) au sein de l'échantillon d'entraînement (70 %).

Échantillon d'entraînement (70 %)	
Faible	401
Moyen	55
Élevé	5

Tableau 16 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité de vidange (classification experte) au sein de l'échantillon de test (30 %).

Échantillon de test (30 %)	
Faible	172
Moyen	24
Élevé	2

Pour ce faire, les données ont été réparties aléatoirement en deux échantillons : un échantillon d'entraînement comprenant 70 % des observations et un échantillon test avec les 30 % restants. Cette répartition a été privilégiée afin de disposer d'un échantillon d'entraînement suffisamment large pour la calibration des seuils, tout en ayant un échantillon de test représentatif pour l'évaluation des performances. Cette répartition s'est faite de manière à respecter les proportions initiales des trois classes dans chaque échantillon (tableaux 15 et 16) au vu du déséquilibre important au sein des classes. L'échantillon d'entraînement a servi à

optimiser les seuils tandis que l'échantillon test a été utilisé pour évaluer les performances des seuils obtenus.

Les seuils de classification ont été optimisés suivant toutes les combinaisons possibles de t_1 et t_2 comprises entre 0 et 1 avec un pas de 0,01. Cela correspond à 101 valeurs possibles pour t_1 et 101 valeurs possibles pour t_2. Ce choix réside dans un compromis entre la précision de l'optimisation et le nombre de combinaisons à tester. De plus, les combinaisons testées ont été évaluées sous la contrainte suivante :

$$t_2 > t_1.$$

Pour chaque combinaison (t_1, t_2), les indices de susceptibilité normalisés de l'échantillon d'entraînement ont été convertis selon les trois niveaux de susceptibilité et ont ensuite été comparés aux classes de susceptibilité attribuées par les experts. La qualité de chaque combinaison des seuils a été évaluée avec l'indicateur Macro F1-score calculé à partir des F1-scores de chacune des trois classes, ce qui permet d'évaluer la correspondance entre la classification du modèle et celle experte.

Le F1-score est une métrique de performance qui correspond à la moyenne harmonique entre la précision (*precision*) et le rappel (*recall*) avec des valeurs comprises entre 0 et 1 (Eq. 8) (Expert Python, s.d. ; Dethinne, 2024 ; Scikit-learn, s.d.) :

$$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad \text{(Eq. 8).}$$

Le F1-score a été préféré car il prend en compte à la fois la précision, qui mesure la proportion de prédictions positives qui sont effectivement positives, et le rappel, qui correspond à la proportion des observations réellement positives qui sont correctement identifiées, contrairement à l'*accuracy* qui mesure la proportion totale d'observations correctement classées (Dethinne, 2024). L'*accuracy* est donc influencée par la classe majoritaire et peut masquer les performances sur les classes minoritaires (Dethinne, 2024).

Le Macro F1-score correspond, quant à lui, à la moyenne des F1-scores qui sont calculés indépendamment pour les trois classes (Scikit-learn, s.d.). Cette métrique attribue donc la même importance à chaque classe sans prendre en compte leur fréquence dans les données. Ce choix est particulièrement adapté dans cette étude puisque les lacs à susceptibilité moyenne et élevée, bien que rares, représentent l'enjeu principal en matière de vidange de lac glaciaire.

Les seuils finalement retenus dans le cadre de cette étude correspondent à la combinaison (t_1, t_2) qui maximise la valeur du Macro F1-score sur l'échantillon d'entraînement, c'est-à-dire la combinaison qui permet de classer les lacs le mieux possible suivant l'évaluation experte. Dans ce cas-ci, les valeurs optimales obtenues sont $t_1 = 0{,}570$ et $t_2 = 0{,}770$ pour un Macro F1-score de 0,486.

3.2.1.2. Validation

Cette section consiste à évaluer le modèle en appliquant les valeurs seuils $t_1 = 0{,}570$ et $t_2 = 0{,}770$ sur l'échantillon test. Les classes obtenues pour l'échantillon test ont été comparées à celles déterminées par la classification experte afin d'évaluer les performances du modèle.

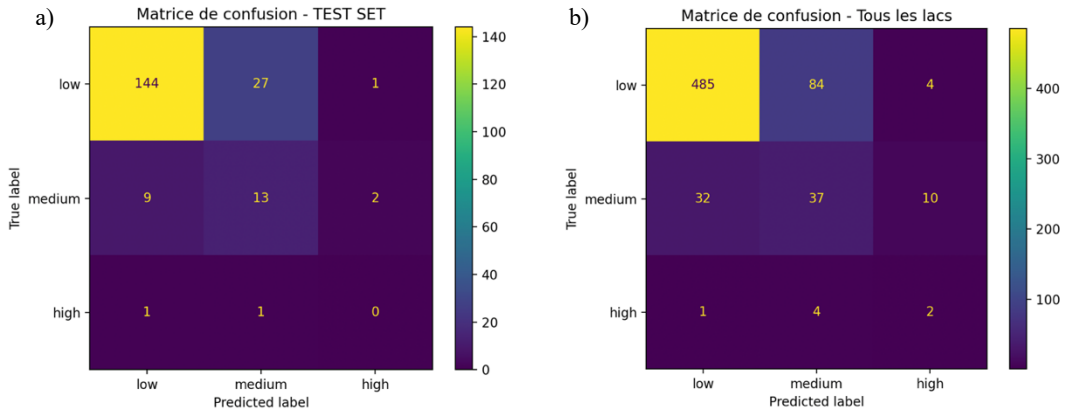


Figure 37 : Matrice de confusion pour les trois niveaux de susceptibilité. a) Échantillon test. b) Ensemble de la base de données.

La matrice de confusion pour l'échantillon test (fig. 37a) indique que les classes prédites par le modèle représentent partiellement la répartition des classes expertes. En effet, même si 144 lacs classés comme ayant une susceptibilité de vidange faible par les experts sont correctement identifiés, sur les 24 lacs reconnus comme ayant une susceptibilité moyenne par les experts, 13 ont effectivement été classés comme tels alors que neuf ont été classés comme ayant une susceptibilité faible. Concernant la susceptibilité élevée, aucun des deux lacs n'est correctement identifié. Ces résultats montrent que le modèle identifie davantage les lacs à susceptibilité faible mais ne parvient que peu ou pas à reconnaître les lacs à susceptibilité moyenne et élevée.

Cette tendance peut également être observée pour l'ensemble de la base de données, soit l'échantillon d'entraînement et test regroupé (Fig. 37b). Parmi les 573 lacs identifiés comme ayant une susceptibilité faible, 485 sont correctement identifiés. À l'inverse, seuls 37 lacs sur les 79 considérés comme à susceptibilité moyenne sont correctement identifiés tandis que 32 sont considérés comme faible. Les lacs de la classe de susceptibilité moyenne ont donc tendance à être sous-estimés. De la même façon, seuls deux lacs sur les sept à susceptibilité élevée sont correctement classés impliquant que cette classe est rarement détectée par le modèle.

Tableau 17 : Métriques de performance pour l'échantillon test.

Métrique globale (échantillon test)	
Accuracy	0,793
Macro F1-score	0,428

Tableau 18 : F1-score pour les différentes classes de susceptibilité de l'échantillon test.

	F1-score (échantillon test)	Représentation
Faible	0,883	172
Moyen	0,400	24
Élevé	0,000	2

Les métriques de performance pour l'échantillon test confirment ces observations (Tableau 17). L'*accuracy* atteint une valeur de 0,793, ce qui signifie que 79,3 % des lacs sont correctement classés, confirmant que cette métrique est fortement influencée par la classe majoritaire, puisque, dans ce cas-ci, 157 lacs sur les 198 pour l'échantillon test sont correctement classés avec 144 lacs appartenant à la classe majoritaire (susceptibilité faible) et ne reflète donc pas les classes minoritaires. À l'inverse, la valeur pour la métrique Macro F1-score est nettement inférieure (0,428) puisque cette métrique accorde la même importance à chaque classe et met donc en évidence les limites du modèle concernant les classes minoritaires.

Cela est également mis en avant par les valeurs des F1-scores calculés pour chaque classe de susceptibilité (Tableau 18). En effet, la classe de susceptibilité faible présente une valeur élevée (0,883) traduisant la capacité du modèle à reconnaître cette classe. En revanche, le F1-score diminue pour les classes moyenne (0,400) et élevée (0,000) indiquant que le modèle ne parvient que peu ou pas à reconnaître ces catégories. Par ailleurs, le Macro F1-score passe de 0,486 pour l'échantillon d'entraînement à 0,428 pour l'échantillon test. Bien que cette diminution soit attendue puisque cela correspond à l'évaluation du modèle sur un jeu de données indépendant, cela confirme les limites du modèle à évaluer les classes moins représentées.

Tableau 19 : Statistiques descriptives pour l'indice de susceptibilité normalisé selon les trois classes (faible, moyen et élevé) pour la classification experte.

	Faible (n = 573)	Moyen (n = 79)	Élevé (n = 7)
Moyenne	0,407	0,597	0,686
Q1	0,296	0,523	0,618
Médiane	0,406	0,591	0,691
Q3	0,517	0,691	0,752
Min	0,00	0,146	0,564
Max	0,892	1,00	0,807

De manière générale, ces résultats s'expliquent par le fait que les classes expertes de l'inventaire sont fortement déséquilibrées. En effet, les classes moyenne (12,0 %) et élevée (1,1 %) ne représentent qu'une faible proportion des observations impliquant que le modèle est fortement influencé par la classe de susceptibilité faible, qui est largement majoritaire dans les données.

Les statistiques descriptives pour la distribution de l'indice de susceptibilité normalisé de la classification experte permettent d'illustrer ce déséquilibre (Tableau 19). En effet, bien que les moyennes, les médianes et les quartiles augmentent progressivement entre les classes de susceptibilité faible, moyenne et élevée, les valeurs minimales et maximales montrent un chevauchement des distributions. Cela traduit le fait que certains lacs classés comme à faible susceptibilité de vidange présentent des indices supérieurs à ceux des lacs appartenant aux classes moyenne ou élevée expliquant les difficultés de classification.

Les seuils optimisés obtenus ($t_1 = 0,570$ et $t_2 = 0,770$) illustrent également ce déséquilibre. En effet, la valeur de t_1 indique qu'une part importante des lacs considérés comme à susceptibilité faible possèdent des indices normalisés relativement élevés. Cela suggère que l'attribution d'un poids identique à chaque paramètre, comme retenu dans cette première version de l'indice, ne

permet pas de distinguer efficacement les trois niveaux de susceptibilité. En effet, les paramètres considérés dans cette étude ne possèdent probablement pas la même influence sur la susceptibilité de vidange d'un lac glaciaire.

3.2.2. Deuxième évaluation : Deux niveaux de susceptibilité de vidange

Afin d'évaluer l'influence du déséquilibre des classes sur les performances du modèle, une seconde approche a été considérée. Elle consiste à regrouper les classes de susceptibilité moyenne et élevée en une seule catégorie. Cette approche vise à augmenter le nombre d'observations dans les classes moins représentées mais simplifie également la classification. Ce choix de regroupement réside dans le fait que, du point de vue de la gestion du risque de vidange de lac glaciaire, les lacs à susceptibilité moyenne et élevée impliquent une réponse similaire puisque la susceptibilité de vidange est reconnue dans les deux cas contrairement aux lacs de susceptibilité faible.

Tableau 20 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité (classification experte) au sein de l'échantillon d'entraînement (70 %).

Échantillon d'entraînement (70 %)	
Faible	401
Élevé	60

Tableau 21 : Effectifs de lacs par classe de susceptibilité (classification experte) au sein de l'échantillon de test (30 %).

Échantillon de test (30 %)	
Faible	172
Élevé	26

Comme pour la première approche, les données ont été réparties aléatoirement selon un échantillon d'entraînement (70 %) et un échantillon test (30 %) en conservant les proportions des classes et en regroupant les classes de susceptibilité moyenne et élevée (Tableaux 20 et 21). Le seuil de classification (t_1) a ensuite été optimisé selon la même démarche en maximisant le Macro F1-score sur l'échantillon d'entraînement afin de reproduire au mieux la classification déterminée par les experts. Le seuil optimal obtenu pour la seconde évaluation est $t_1 = 0{,}630$ pour un Macro F1-score de 0,680.

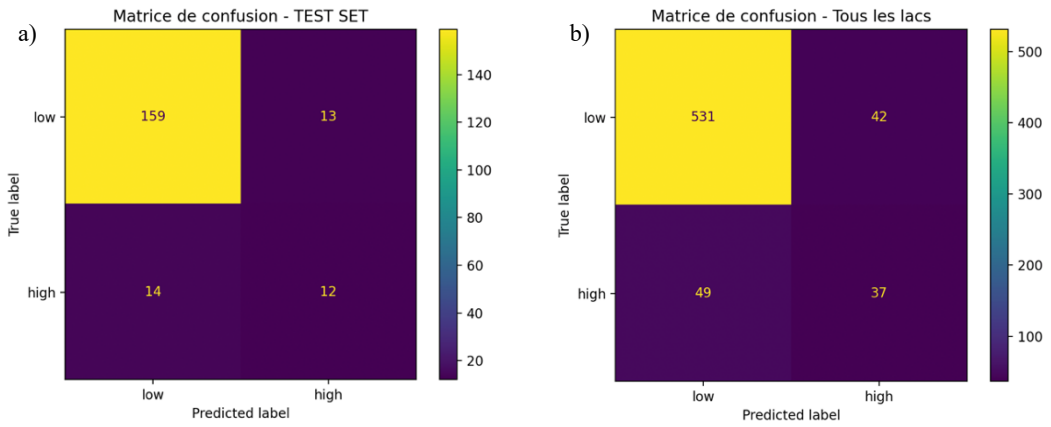


Figure 38 : Matrice de confusion pour les deux niveaux de susceptibilité. a) Échantillon test. b) Ensemble de la base de données.

La matrice de confusion (fig. 38a) indique que pour l'échantillon test, 159 lacs sur les 172 lacs de susceptibilité faible de vidange sont correctement identifiés. Parmi les 26 lacs appartenant à la catégorie de susceptibilité élevée (regroupant les classes moyenne et élevée), 12 lacs sont correctement classés tandis que 14 sont attribués à la classe de susceptibilité faible. Pour l'ensemble de la base de données, 531 lacs sur les 573 à susceptibilité faible sont correctement identifiés et 37 sur les 86 de la classe élevée sont correctement identifiés (Fig. 38b).

Tableau 22 : Métriques de performance pour l'échantillon test.

Métrique globale (échantillon test)	
Accuracy	0,864
Macro F1-score	0,696

Tableau 23 : F1-score pour les différentes classes de susceptibilité pour l'échantillon test.

	F1-score (échantillon test)	Représentation
Faible	0,922	172
Élevé	0,471	26

Les métriques de performance confirment l'amélioration du modèle puisque, pour l'échantillon test, le Macro F1-score atteint 0,696 et est nettement supérieur à celui obtenu précédemment dans la classification en trois niveaux de susceptibilité (0,428) (Tableau 22). Cette amélioration est également observée pour les F1-scores des deux classes. En effet, la classe faible présente une valeur de 0,922 et la classe élevée une valeur de 0,471 (Tableau 23). Bien que les performances soient toujours plus élevées pour la classe faible, cette approche identifie mieux la classe élevée par rapport aux classes moyenne et élevée considérées séparément dans la première approche. Par ailleurs, contrairement à la première approche basée sur trois niveaux de susceptibilité, le Macro F1-score obtenu pour l'échantillon test (0,696) est supérieur à celui obtenu sur l'échantillon d'entraînement (0,680). Cela peut s'expliquer par le fait que la répartition des données des deux échantillons s'est faite aléatoirement.

Ces résultats indiquent que le regroupement des classes améliore les performances de la classification au détriment d'une perte de granularité dans la classification (trois classes contre deux). Cela peut s'expliquer d'une part par l'augmentation du nombre d'observations dans la classe moins représentée, et, d'autre part, en raison de la simplification du problème de classification puisque seules deux catégories sont déterminées à la place de trois. C'est pourquoi les résultats de cette seconde approche seront retenus dans la suite de ce travail.

3.2.3. Distribution spatiale et caractéristiques

Le modèle retenu a identifié 580 lacs (88,01 %) comme ayant une susceptibilité de vidange faible et 79 lacs (11,99 %) comme ayant une susceptibilité de vidange élevée.

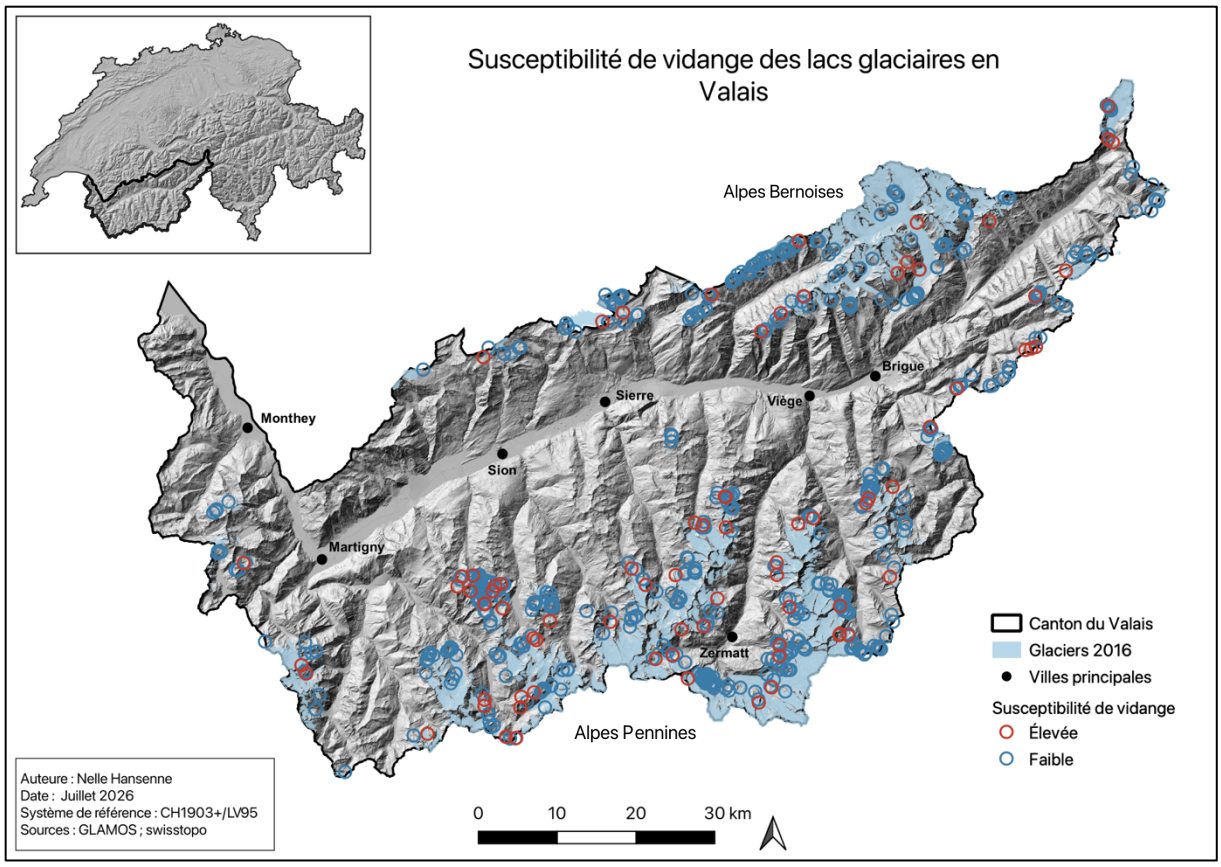


Figure 39 : Susceptibilité de vidange des lacs glaciaires en Valais, Suisse.

Concernant la répartition spatiale de la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires en Valais (fig. 39), celle-ci n'est pas uniforme sur le territoire. En effet, une concentration de ces lacs peut être observée dans le sud du canton, notamment au sud de Sion, près de La Rosablanche, du Grand Mont Calme (Glacier de Prafleuri, Glacier du Grand Désert), et du Mont Fort (Glacier du Mont Fort, Glacier de Tortin). Par ailleurs, cette même zone présentait une concentration importante des lacs glaciaires endigués par une moraine (Fig. 31). Quelques lacs ont également été identifiés plus au sud de Sion, dans le val de Bagnes proche du Grand Combin et de la frontière italienne.

De la même façon, une certaine concentration des lacs à susceptibilité élevée peut être observée au sud, sud-ouest de Viège, autour de la vallée de Matter Vispa près de la Dent Blanche (Glacier du Mont Miné, Glacier de Ferpècle) et du Grand Cornier (Glacier de Moiry), du Zinalrothorn, du Weisshorn et à l'est, sud-est de Zermatt (Glacier du Gorner et du Findel). Enfin, au sud-est de Viège, quelques lacs glaciaires à susceptibilité élevée ont été identifiés.

Dans une moindre mesure, quelques lacs à susceptibilité élevée de vidange se situent près du Grand Glacier d'Aletsch et du Glacier du Fiescher au nord de Brigue, ainsi que sur le Glacier du Rhône dans la partie la plus au nord-est du canton. Cette même tendance peut être mise en évidence près du glacier de la Plaine Morte au nord de Sierre. De manière générale, les zones de forte densité de lacs semblent présenter une proportion plus importante de lacs glaciaires à susceptibilité élevée de vidange. À l'inverse, les zones où les lacs sont plus isolés et moins

nombreux, notamment dans la partie ouest et nord-ouest du canton, regroupent majoritairement des lacs à susceptibilité faible de vidange.

Tableau 24 : Comparaison entre la répartition des paramètres de susceptibilité interne des lacs de la base de données et les lacs à susceptibilité de vidange élevée.

Paramètres	Classes	Base de données (%) (n = 659)	Lacs à susceptibilité élevée (%) (n = 79)
Matériaux du barrage	Glace	2,6	15,2
	Bedrock	54,5	19,0
	Moraine	42,9	65,8
Superficie	a1	46,1	21,5
	a2	46,4	50,6
	a3	7,4	27,8
Période de formation	Pf1	36,4	24,1
	Pf2	49,6	36,7
	Pf3	14,0	39,2
Déversoir	Absence	49,0	73,4
	Présence	51,0	26,6
Franc-bord	≤ 3 m	84,9	83,3
	> 3 m	15,1	16,7

Tableau 25 : Comparaison entre les sous-paramètres des barrages de moraine des lacs de la base de données et des lacs à susceptibilité élevée.

Paramètres	Classes	Base de données (%) (n = 659)	Lacs à susceptibilité élevée (%) (n = 79)
Succession végétale	Avancée	2,5	0,0
	Intermédiaire	22,3	15,4
	Pionnière	75,3	84,6
Pente du barrage	≤ 20°	82,7	80,8
	> 20°	17,3	19,2
Permafrost barrage	Absence	35,0	26,9
	Présence	65,0	73,1

Le tableau 24 indique que le paramètre matériau du barrage présente les écarts les plus marqués avec la base de données. En effet, les lacs endigués par une moraine ou de la glace sont davantage représentés dans les lacs à susceptibilité élevée tandis que les lacs endigués par le bedrock sont moins représentés. Une tendance similaire est observée pour le paramètre de superficie, où les lacs appartenant à la classe a3 (11 448,6 - 163 342,1 m^2) sont plus nombreux par rapport à l'inventaire, tout comme pour la période de formation où les lacs en cours de formation (classe pf3) sont davantage répartis dans les lacs à susceptibilité élevée. L'absence de déversoir est également plus représentée tandis que la hauteur de franc-bord ne présente pas de différence significative entre les deux groupes.

Le tableau 25 qui reprend la comparaison entre les sous-paramètres propres aux barrages de moraine entre la base de données et les lacs à susceptibilité élevée ne montre aucune différence notable. Une légère différence entre les deux groupes s'observe toutefois pour la succession végétale et la présence de permafrost.

Tableau 26 : Comparaison entre la répartition des paramètres de susceptibilité externe des lacs de la base de données et les lacs à susceptibilité de vidange élevée.

Paramètres	Classes	Base de données (%) (n = 659)	Lacs à susceptibilité élevée (%) (n = 79)
Éboulement	Absence	33,2	6,3
	Présence	66,8	93,7
Permafrost	Absence	37,2	8,9
	Présence	62,8	91,1
Chute de pierres	Absence	77,4	48,1
	Présence	22,6	51,9
Moraine non végétalisée	Absence	87,1	54,4
	Présence	12,9	45,6
Contact glacier-lac	Absence	86,3	58,2
	Présence	13,7	41,8
Ratio superficie du bassin versant / superficie du lac	cr1	56,9	60,8
	cr2	41,6	38,0
	cr3	1,5	1,3

Enfin, concernant les processus gravitaires, ceux-ci sont davantage présents parmi les lacs identifiés comme à susceptibilité élevée de vidange, comme illustré par le Tableau 26. Le ratio entre la superficie du bassin versant et celle du lac, quant à lui, ne montre aucune différence substantielle entre les deux groupes.

4. Discussion

4.1. Inventaire des lacs glaciaires

L'inventaire réalisé dans le cadre de ce travail indique que la région étudiée est constituée principalement de petits lacs glaciaires endigués par le bedrock ou par une moraine, répartis dans l'ensemble des zones englacées. Cette répartition peut être attribuée au fait que la formation de ces lacs a été favorisée dans les zones où l'extension glaciaire durant le Petit Âge Glaciaire était davantage marquée (Mölg et al., 2021b). Les lacs endigués par de la glace, considérés comme les plus à risque à l'échelle mondiale (Zhang et al., 2024), ne représentent en effet qu'une faible proportion de la base de données (2,6 %), tandis que les lacs endigués par le bedrock, généralement considérés comme stables (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022a, 2022b), dominent avec 54,5 %. Cette faible proportion des lacs endigués par de la glace est comparable à celle obtenue par Mölg et al. (2021b) dans leur échantillon (12 sur 225 lacs) à l'échelle de la Suisse. Bien que peu représentés dans l'inventaire, les lacs endigués par de la glace ne doivent pas être négligés puisque ceux-ci sont à l'origine de 64,8 % des vidanges à l'échelle mondiale (Zhang et al., 2024), et de 83,2 % des vidanges historiques en Valais (1800-2022) (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024). À l'inverse, les lacs endigués par le bedrock sont à l'origine de 0,56 % de vidanges - soit un événement sur la même période - confirmant que ceux-ci sont davantage stables et produisent moins de vidanges que les lacs endigués par une moraine ou de la glace (Lützow & Veh, 2024 ; Schupbach, 2024 ; Zhang et al., 2024).

Par ailleurs, l'écart entre la proportion des lacs endigués par une moraine obtenue dans cette étude (42,9 %) et celle généralement observée dans les Alpes (entre 11 et 23 %) (Mölg et al.,

2021b) peut s'expliquer par la différence dans la classification des types de lacs. En effet, la catégorie « moraine » retenue dans ce travail correspond à un regroupement des lacs endigués par des débris glaciaires, soit derrière des moraines, mais également ceux qui se situent dans des zones plates, ou moraine de fond, tandis que Mölg et al. (2021b) distinguaient en deux sous-catégories leur classe de lacs endigués par des débris (34 derrière une moraine sur les 108 lacs endigués par des débris glaciaires de leur sous-échantillon).

Concernant la distribution asymétrique de la superficie des lacs, celle-ci est similaire à celle obtenue par Mölg et al. (2021b) dans leur inventaire de lacs glaciaires en Suisse depuis le Petit Âge Glaciaire, où 90 % des lacs présentaient une superficie inférieure à 10 000 m^2, contre 7 216 m^2 dans la présente étude. Cette tendance vers des lacs plus petits peut s'expliquer par le fait que ce travail se concentre uniquement sur le canton du Valais, et que les lacs considérés se situent dans un tampon de 500 m autour des glaciers actuels, ce qui restreint l'échantillon.

En revanche, les résultats de l'analyse de la superficie selon le type de barrage diffèrent de ceux obtenus par Mölg et al. (2021b) qui avaient observé que les lacs endigués par le bedrock présentaient en moyenne une superficie plus grande que ceux endigués par des débris et par des moraines. Cet écart peut s'expliquer par une différence d'échantillonnage puisque leur échantillon est composé de 225 lacs qui, soit présentent une superficie supérieure à 5 000 m^2, ou soit qui sont en contact avec un glacier présentant donc une possibilité de croissance (Mölg et al., 2021b), tandis que l'ensemble des lacs de la base de données a été considéré dans la présente étude. De plus, bien que les lacs endigués par le bedrock incluent des lacs qui figurent parmi les plus grands lacs du présent inventaire, la forte proportion de petits lacs dans la base de données a tendance à abaisser leur superficie moyenne vers le bas, ce qui pourrait également expliquer la différence obtenue.

Les lacs glaciaires recensés se situent entre 1 616 et 3 365 m d'altitude - pour une moyenne de 2 777 m - ce qui diffère légèrement de la distribution obtenue par Mölg et al. (2021b) à l'échelle nationale. En effet, dans leur étude, l'altitude moyenne était de 2 600 m avec des valeurs variant de 1 215 m à 3 427 m d'altitude. Cette différence est cohérente avec le tampon de 500 m autour des glaciers appliqué qui restreint l'échantillon à des altitudes plus élevées, soit proches des zones englacées.

Les observations relatives à la période de formation sont cohérentes avec celles de Mölg et al. (2021b) qui ont mis en lien l'évolution de la température moyenne de cinq stations météorologiques avec celle de la superficie des lacs et du bilan de masse des glaciers en Suisse. Ainsi, ils ont observé que l'augmentation des températures dans les années 1940 avait entraîné un bilan de masse négatif impliquant une augmentation de la formation de lacs entre 1946 et 1973, tandis que le refroidissement et l'augmentation des précipitations estivales après 1960 ont conduit à un bilan de masse stable et un ralentissement de la formation du nombre de lacs (Mölg et al., 2021b). Enfin, l'augmentation des températures dans les années 1990 et 2010 a fortement accéléré la formation de lacs glaciaires (Mölg et al., 2021b). Les résultats de Mölg et al. (2021b) indiquent par ailleurs l'existence d'un décalage temporel dans la réponse des lacs glaciaires face à l'augmentation des températures et des bilans de masses négatifs des glaciers.

Les distributions de l'altitude en fonction de la période de formation obtenues dans la présente étude indiquent que, pour la période 1973-2023, celle-ci est fortement asymétrique. En effet, les valeurs varient de 1 616 m à 3 365 m d'altitude, ce qui peut être attribué aux phases climatiques d'avancée (1970-1980) puis de recul des glaciers (1990-2020) observées en Suisse (Mölg et al., 2021b ; Schupbach, 2024). Mölg et al. (2021b) avaient d'ailleurs identifié dans leur étude la période 1973-1982 comme celle présentant les altitudes des lacs les plus basses. Les lacs en cours de formation se situent quant à eux à des altitudes légèrement plus élevées, entre 2 087 m et 3 322 m d'altitude, ce qui est cohérent avec le retrait glaciaire récent.

La corrélation obtenue entre la superficie du bassin versant et celle du lac indique que les lacs avec un grand bassin versant ont tendance à avoir une superficie plus grande. Ce résultat est cohérent avec le fait qu'un grand bassin versant implique davantage d'apports d'eau provenant des précipitations ou de la fonte nivale et glaciaire susceptible d'augmenter la superficie des lacs (Allen et al., 2019 ; Zhang et al., 2024).

Enfin, les résultats obtenus pour les processus gravitaires, plus précisément les éboulements et les chutes de pierres, indiquent que les lacs glaciaires ont tendance à se former dans des environnements instables, ce qui est cohérent avec le fait que ceux-ci se forment dans des conditions de retrait des glaciers (Haeberli et al., 2016 ; Harrison et al., 2018). De plus, la majorité des lacs glaciaires recensés se situent à proximité de parois rocheuses contenant du permafrost ce qui soulève des enjeux quant à sa dégradation et les conséquences associées telles que l'augmentation des chutes de pierres et des éboulements pouvant ainsi renforcer la susceptibilité de vidange des lacs concernés (Haeberli et al., 2017 ; Mourey et al., 2022). Par ailleurs, le fait que les lacs situés à proximité des parois rocheuses contenant du permafrost sont davantage atteints par des éboulements et des chutes de pierres confirme le rôle du permafrost comme facteur d'instabilité des versants (Haeberli et al., 2016, 2017 ; Mourey et al., 2022).

4.1.1. Limites de la méthodologie

4.1.1.1. Sélection des paramètres

La revue de la littérature sur la détermination des paramètres pertinents pour l'évaluation du risque de vidange des lacs glaciaires a mis en évidence l'existence de nombreux paramètres, mais l'absence d'un consensus quant à leur sélection (Allen et al., 2019 ; Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2022b ; Gruber & Mergili, 2013 ; Huggel et al., 2002 ; Mergili & Schneider, 2011 ; Mölg et al., 2021b ; Rinzin et al., 2021). C'est pourquoi seulement une partie de ces paramètres a été retenue pour la réalisation de cet inventaire. En effet, certains paramètres ont été jugés comme non pertinents dans le contexte de cette étude, comme la sismicité, tandis que d'autres, bien que pertinents, ont été exclus en raison du manque de données disponibles, notamment l'évolution de la superficie des lacs. Cela souligne à la fois une limite méthodologique quant au choix des paramètres, mais également la nécessité de disposer de données de qualité pour la réalisation d'un inventaire de ce type.

Il convient toutefois de souligner que le paramètre d'interconnectivité des lacs, qui prend en compte la présence de lacs situés en amont ou en aval d'un autre lac, n'a pas été retenu en raison de la complexité à prédire une vidange. Néanmoins, ce paramètre devrait être évalué pour les

lacs de susceptibilité moyenne ou élevée de vidange afin de prendre en compte la possibilité d'un processus en cascade puisque la vidange d'un lac glaciaire peut déclencher la vidange d'un lac situé en aval (Emmer et al., 2022a).

De la même manière, le paramètre de la superficie du bassin versant est généralement utilisé pour exprimer les apports des précipitations et de la fonte nivale et glaciaire directement dans le lac, les grands bassins versants étant alors associés à des apports plus importants (Allen et al., 2019). Cependant, cela simplifie la contribution individuelle des deux composantes et ne considère pas le fait qu'une des deux composantes puisse dominer. Une piste pour déterminer la composante principale des apports aurait été d'étudier la corrélation entre le volume des glaciers et la superficie des lacs, et de comparer celle-ci avec la corrélation entre la superficie du bassin versant et celle du lac. De plus, la diminution des masses glaciaires, voire la disparition complète des glaciers, n'est pas prise en compte et souligne le fait qu'il est nécessaire de faire des actualisations de l'inventaire afin de tenir compte des évolutions possibles.

Enfin, certains choix méthodologiques, comme le tampon de 500 m appliqué autour des glaciers, constituent également des limites pouvant introduire un biais dans l'inventaire et conduire à une sous-estimation du nombre de lacs qui devraient être pris en compte. Dans le but d'élargir le périmètre de recherche, l'application de méthodes automatiques précises et robustes est toutefois nécessaire comme avancé par Mölg et al. (2021b).

4.1.1.2. Disponibilité des données

Certains paramètres mobilisés dans ce travail se rapportent à des processus dynamiques et évolutifs qui nécessitent une mise à jour fréquente, en particulier dans le contexte actuel du réchauffement climatique. Par exemple, la couverture de permafrost et l'extension des glaciers évoluent de manière significative (Haeberli et al., 2016 ; Linsbauer et al., 2021), tandis que les données disponibles les plus récentes pour ces deux paramètres datent respectivement de 2018 et 2016. Cela implique donc une source de biais potentielle pour le présent travail.

Il convient néanmoins de souligner que la Suisse dispose d'un accès large aux données, notamment celles relatives aux risques naturels, ce qui a facilité la réalisation de cet inventaire. En effet, les données mises à disposition par swisstopo concernant les orthophotos (swisstopo, 2024c), les MNT (swisstopo, 2024a, 2024b), la carte topographique (swisstopo, 2024d) ou encore la délimitation des surfaces d'eau (swisstopo, 2024e) et GLAMOS pour les couches relatives à l'extension des glaciers depuis 1850 (Fischer et al., 2014b ; Linsbauer et al., 2021b ; Maisch et al., 2000b ; Mannerfelt et al., 2022b ; Müller et al., 1976b ; Paul, 2004b), constituent une base essentielle pour ce travail. La réalisation de cet inventaire souligne ainsi l'importance d'avoir des données de haute résolution pour les régions concernées, comme les Alpes (Mölg et al., 2021b).

4.1.1.3. Erreurs lors de l'élaboration de l'inventaire

L'inventaire a été réalisé principalement de manière manuelle à l'aide du logiciel QGIS, ce qui implique un risque d'erreurs. Pour les paramètres générés automatiquement comme la

superficie ou l'altitude du lac, les erreurs sont principalement liées à la précision de la délimitation des polygones associés à chaque lac. Pour les paramètres évalués visuellement comme les matériaux du barrage, la succession végétale, la présence de moraine non végétalisée ou encore la présence d'un déversoir, les erreurs sont liées à la subjectivité du jugement. Le paramètre des matériaux du barrage illustre bien cette difficulté car, si dans certains cas, la typologie est évidente, elle l'est beaucoup moins dans d'autres cas, pouvant conduire à des erreurs de classification. Pour limiter ces erreurs, chaque paramètre évalué visuellement a été estimé à deux reprises par deux personnes différentes et, dans certains cas, discuté afin d'obtenir un accord. D'autres paramètres ont été évalués sur la base de couches existantes (permafrost, extension des glaciers et période de formation, éboulements, chutes de pierres, superficie du bassin versant), qui sont elles-mêmes associées à des erreurs et incertitudes (Fischer et al., 2014a ; Gindraux & Champion, 2026 ; Kenner et al., 2019 ; Linsbauer et al., 2021a ; Maisch et al., 2000a ; Mannerfelt et al., 2022a ; Mölg et al., 2021b ; Müller et al., 1976a ; OFEV, 2026 ; Paul, 2004a). Enfin, pour les paramètres calculés, comme la pente du barrage de moraine et la hauteur de franc-bord, les erreurs sont directement liées à la précision du calcul. Les paramètres évalués dans ce travail constituent néanmoins une base solide pour des évaluations futures.

Zhang et al. (2024) soulignent par ailleurs que l'un des principaux enjeux actuels dans l'étude des vidanges de lacs glaciaires réside dans la disponibilité de données homogènes et standardisées. En effet, les inventaires de lacs glaciaires reposent encore largement sur une digitalisation manuelle, notamment employée dans cette étude, alors qu'il s'agit d'une approche coûteuse en temps et fortement dépendante du jugement (Zhang et al., 2024). Ils soulignent notamment que les méthodes d'apprentissage automatique (Machine Learning) ainsi que l'intelligence artificielle constituent des outils pour permettre de dépasser ces limites, bien que des inventaires de bonne qualité soient nécessaires pour entraîner les modèles (Zhang et al., 2024).

4.1.1.4. Limites de la télédétection et actualisation

La réalisation d'un inventaire de ce type souligne également les limites des approches basées sur la télédétection. En effet, bien que la télédétection permette d'analyser des phénomènes à grande échelle, celle-ci doit être considérée comme une première approximation car elle ne permet pas de prendre en compte certaines dynamiques des environnements et des propriétés propres à chaque lac (Zhang et al., 2024). Il est donc essentiel de coupler ce type d'étude avec des données de terrain, notamment dans le contexte des vidanges de lacs glaciaires, afin de permettre une meilleure précision et évaluation de certains paramètres comme la bathymétrie ou encore la température du lac (Zhang et al., 2024). Dans le contexte où la base de données comprend un nombre important de lacs glaciaires, soit 659 lacs, une piste envisageable serait de concentrer les mesures de terrain sur les lacs identifiés comme présentant une susceptibilité de vidange moyenne ou élevée, plutôt que pour l'ensemble de l'inventaire.

Enfin, tout comme pour les inventaires des extensions glaciaires qui font l'objet de mises à jour régulières afin de suivre les changements rapides observés (Linsbauer et al., 2021), l'inventaire réalisé dans le cadre de ce travail devrait également faire l'objet d'actualisations périodiques. En effet, il s'agit ici d'un inventaire réalisé à un instant donné qui ne prend pas en compte les

évolutions futures possibles relatives aux lacs glaciaires et leur environnement. La mise à jour régulière de l'inventaire permettrait également de prendre en compte l'évolution rapide liée à la dynamique glaciaire mais également à la formation de nouveaux lacs glaciaires. Au vu du temps nécessaire pour la réalisation du présent inventaire, l'automatisation de l'évaluation de certains paramètres constituerait une piste pertinente pour faciliter ce type d'actualisation.

4.2. Indice de susceptibilité de vidange

Le modèle retenu a classé 580 lacs en susceptibilité faible et 79 lacs en susceptibilité élevée de vidange, suggérant que la majorité des lacs ne sont pas concernés par ce processus. La distribution spatiale, quant à elle, indique que celle-ci n'est pas uniforme sur le territoire valaisan, et que de manière générale, les zones de forte densité de lacs présentent une proportion plus élevée de lacs à susceptibilité élevée, tandis que les lacs plus isolés sont majoritairement classés en susceptibilité faible.

La comparaison entre la répartition des paramètres au sein de la base de données complète (n = 659) et le sous-groupe des lacs identifiés comme à susceptibilité élevée (n = 79) permet de mettre en évidence des écarts marqués entre les deux groupes pour certains paramètres. Par exemple, les lacs endigués par une moraine ou de la glace sont nettement surreprésentés parmi les lacs à susceptibilité élevée (respectivement 65,8 % et 15,2 % contre 42,9 % et 2,6 %) tandis que la proportion de lacs endigués par le bedrock est nettement plus faible (19,0 % contre 54,5 %). Cela est cohérent avec le fait que les barrages de moraine et de glace sont considérés comme plus instables par rapport aux lacs endigués par le bedrock (Demolis et al., 2023 ; Emmer et al., 2021 ; Zhang et al., 2024). De la même manière, les lacs présentant de grandes superficies sont davantage représentés, ce qui implique un volume potentiellement mobilisable plus important (Emmer & Vilímek, 2014 ; Huggel et al., 2002 ; Rinzin et al., 2021). Une tendance similaire est observée pour la période de formation avec une surreprésentation des lacs en cours de formation renvoyant au fait que les lacs récemment formés sont considérés comme moins stables (Demolis et al., 2023). Ainsi, les écarts observés entre les deux groupes sont cohérents avec les relations établies dans la littérature et ensuite mobilisées pour la construction de l'indice de susceptibilité de vidange. Enfin, les paramètres relatifs aux processus gravitaires (éboulements, chutes de pierres, présence de permafrost, moraine non végétalisée et contact glacier-lac) présentent également des écarts marqués puisque les lacs à susceptibilité élevée sont davantage associés à leur présence. Cela est également cohérent avec la littérature qui souligne que les lacs glaciaires se forment dans des environnements instables et proches des parois et pics rocheux (Haeberli et al., 2016 ; Harrison et al., 2018).

À l'inverse, certains paramètres ne montrent que peu ou pas de différence entre les deux groupes, à savoir la hauteur de franc-bord, le ratio entre la superficie du bassin versant et celle du lac, ainsi que les trois sous-paramètres associés aux barrages de moraine (succession végétale, pente aval, permafrost). Il convient tout de même de souligner que, dans ce cas-ci, la surreprésentation ou sous-représentation d'un paramètre dans le groupe des lacs à susceptibilité élevée de vidange ne constitue pas une preuve de l'influence d'un paramètre sur le risque de vidange mais reflète principalement l'indice lui-même et les scores attribués sur la base de la littérature dans le cadre de ce travail.

4.2.1. Limites de la méthodologie

4.2.1.1. Performances du modèle

L'indice de susceptibilité de vidange, construit sur l'hypothèse que chaque paramètre contribue de manière égale à la susceptibilité de vidange, montre des performances limitées pour distinguer les classes de susceptibilité moyenne et élevée. En effet, comme mentionné précédemment, pour la première évaluation (trois classes de susceptibilité) sur l'échantillon test, le Macro F1-score atteint 0,428 avec les classes moyenne et élevée qui possèdent des F1-scores faibles et nuls, tandis que la classe faible est relativement bien identifiée. Bien que la seconde évaluation basée sur le regroupement des classes moyenne et élevée permette d'améliorer les performances du modèle, notamment en permettant que la classe faible soit davantage identifiée, le Macro F1-score (0,696) souligne tout de même que le modèle reste limité. De plus, la seconde évaluation implique une diminution de la granularité de classification.

Ces difficultés peuvent être attribuées d'une part au déséquilibre de la répartition des lacs au sein des classes expertes, et d'autre part en raison du chevauchement des valeurs obtenues de l'indice de susceptibilité normalisé entre les trois classes expertes. Cela implique que certains lacs classés en susceptibilité faible par les experts présentent un indice normalisé supérieur à certains lacs des catégories moyenne et élevée. Cela suggère que l'hypothèse selon laquelle l'ensemble des paramètres possède une influence égale sur le processus de vidange de lacs glaciaires ne permet pas de reproduire les classes de susceptibilité identifiées par les experts.

En effet, cette hypothèse constitue une simplification qui limite la capacité de l'indice à déterminer les différents niveaux de susceptibilité en particulier pour les classes minoritaires qui représentent pourtant l'enjeu principal. Cette limite est cohérente avec plusieurs études sur l'évaluation du risque de vidange de lacs glaciaires qui attribuent des poids différents aux paramètres considérés puisque ceux-ci n'exercent pas la même influence sur la susceptibilité de vidange (Mondal et al., 2025 ; Rinzin et al., 2021 ; Wang et al., 2011). Ainsi, considérer une moyenne arithmétique et non une moyenne pondérée induit que certains paramètres jugés comme davantage déterminants lors de l'évaluation experte se retrouvent dilués par l'effet de moyenne avec des paramètres moins significatifs. L'amélioration de l'indice de susceptibilité de vidange repose donc sur l'intégration de ces poids afin d'appliquer une moyenne pondérée.

4.2.1.2. Prise en compte des paramètres individuellement

L'indice de susceptibilité traite chaque paramètre de manière indépendante sans prendre en compte les interactions possibles entre ceux-ci ; cependant, dans les systèmes environnementaux, les différentes composantes interagissent. C'est pourquoi il aurait été pertinent de considérer certains paramètres comme aggravants ou non d'autres paramètres. Par exemple, la présence de permafrost dans les parois rocheuses aux abords du lac influence davantage la fréquence des chutes de pierres et les éboulements puisque la dégradation du permafrost implique une augmentation de l'instabilité des parois (Haeberli et al., 2017 ; Mourey et al., 2022), et aurait donc pu être considéré comme un facteur aggravant aux processus d'éboulement et de chutes de pierres. Cela s'applique également aux trois sous-paramètres pour les barrages de moraine qui auraient pu être davantage considérés comme des paramètres

aggravants. Ainsi, une piste d'amélioration de l'indice de susceptibilité de vidange serait d'une part d'évaluer la corrélation entre certains paramètres afin de prendre en compte les interactions possibles et, d'autre part, de prendre en compte certains facteurs comme aggravants et non à part entière.

Par ailleurs, il convient de souligner que le paramètre de hauteur du franc-bord a été évalué seulement pour les lacs sans déversoir en raison d'une contradiction avec la méthodologie. En effet, si pour les lacs endigués par de la glace ce paramètre n'a effectivement pas été évalué par Mölg et al. (2021b), la hauteur du franc-bord pour les lacs avec déversoir est généralement amenée à 0 m (Emmer & Vilímek, 2014 ; Mölg et al., 2021b). Cependant, cela aurait induit une contradiction puisque les lacs avec un déversoir sont associés à un score plus faible puisque cela permet de réduire le risque de surverse et de rupture (Demolis et al., 2023), tandis que les valeurs du franc-bord inférieures ou égales à 3 m sont associées à un score élevé. Ainsi, appliquer la hauteur de franc-bord de 0 m par défaut créerait une contradiction avec le score associé aux lacs avec un déversoir. C'est pourquoi la hauteur de franc-bord n'a été évaluée que pour les lacs sans déversoir. Ce type d'incohérence devrait être davantage étudié afin de considérer le même nombre de paramètres pour tous les lacs.

4.2.1.3. Évaluation experte et subjectivité

La détermination des seuils t_1 et t_2 repose entièrement sur une classification experte établie lors de la réalisation de la base de données, ce qui introduit un biais lié à la subjectivité. Si l'approche experte est largement mobilisée dans les études sur le risque de vidange de lacs glaciaires (Demolis et al., 2023 ; Emmer & Vilímek, 2014 ; Emmer et al., 2022b ; Rinzin et al., 2021), cela souligne toutefois l'absence de méthodologie de référence clairement établie et standardisée dans ce domaine. Emmer & Vilímek (2014) et Emmer et al. (2022b) soulignent par ailleurs que la détermination objective des seuils et poids constitue un enjeu scientifique et qu'il serait préférable d'écarter la composante subjective, notamment pour assurer la reproductibilité des méthodes.

4.2.1.4. Interprétation des résultats et actualisation

De manière générale, les résultats obtenus pour l'indice de susceptibilité de vidange sont à considérer avec prudence. En effet, les performances limitées du modèle, en particulier pour identifier les classes de susceptibilité moyenne et élevée, ainsi que les incertitudes associées d'une part à la construction des paramètres et, d'autre part, à la calibration des seuils, soulignent que l'indice développé dans ce travail constitue une première approche exploratoire plutôt qu'un outil de classification robuste et opérationnel.

Enfin, tout comme pour l'inventaire, l'évaluation de la susceptibilité de vidange devrait faire l'objet d'une mise à jour périodique puisque l'évolution des lacs glaciaires est un processus dynamique où des lacs classés en susceptibilité faible peuvent devenir potentiellement à susceptibilité moyenne ou élevée, notamment en raison de l'expansion de leur superficie et de la fonte accrue des glaciers (Wang et al., 2011).

4.3. Vidange de lacs glaciaires en Valais

Au-delà des limites identifiées pour la base de données et l'indice développé dans ce travail, il convient de souligner que la susceptibilité de vidange d'un lac glaciaire est un phénomène complexe à évaluer, notamment en raison de la faible occurrence de ces événements ainsi que des mécanismes déclencheurs qui sont eux-mêmes compliqués à déterminer (Emmer & Vilímek, 2014). La définition même d'une vidange souligne par ailleurs son caractère imprévisible (Carrivick & Tweed, 2016 ; Lützow et al., 2023 ; Zhang et al., 2024). C'est pourquoi le risque de vidange ne peut jamais être totalement écarté, y compris pour les lacs considérés comme stables. Emmer & Vilímek (2014) soulignent par ailleurs que ce caractère imprévisible constitue une limite intrinsèque à toutes les méthodes qui visent à évaluer la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires. L'évaluation de la susceptibilité reste toutefois une étape clé dans l'analyse et la gestion du risque associé à ce processus (Emmer & Vilímek, 2014).

4.3.1. Évolution future

Les enjeux relatifs aux vidanges de lacs glaciaires sont amenés à s'intensifier puisque le nombre de lacs glaciaires en Valais est amené à augmenter dans les décennies à venir (Nussbaumer et al., 2014 ; Steffen et al., 2022a). En effet, les modélisations des futurs lacs glaciaires estiment l'apparition de 3 600 lacs glaciaires potentiels en Suisse suite au retrait des glaciers avec 51,97 % uniquement en Valais, ce qui en fait le canton le plus exposé aux futurs risques de vidange (Steffen et al., 2022a). Il convient de souligner que ces modélisations ne concernent que les lacs endigués par le bedrock et sous-estiment donc le nombre réel de lacs glaciaires attendus (Steffen et al., 2022a).

En parallèle, le retrait des glaciers et la dégradation du permafrost en raison du réchauffement climatique impliquent une augmentation de l'instabilité des versants et font que davantage de mouvements de masse peuvent atteindre les lacs glaciaires et être à l'origine d'une surverse (Haeberli et al., 2016 ; Harrison et al., 2018 ; Nussbaumer et al., 2014). Cette évolution attendue, couplée aux impacts du réchauffement climatique tels que les modifications de la magnitude, fréquence et saisonnalité des vidanges (Harrison et al., 2018) renforce la nécessité de développer des outils et des stratégies efficaces pour la gestion des vidanges de lacs glaciaires afin de prioriser les lacs qui requièrent une surveillance accrue (Nussbaumer et al., 2014).

Par ailleurs, il convient de souligner que l'apparition de nouveaux lacs glaciaires est susceptible d'entraîner certains conflits d'intérêts. En effet, Steffen et al. (2022a) soulignent que si ces nouveaux lacs glaciaires vont naturellement s'intégrer au paysage, les plus grands lacs glaciaires futurs pourraient devenir l'objet de conflits d'intérêts, notamment en termes de gestion avec des approches orientées vers la préservation des lacs et des services écosystémiques associés ou bien des approches davantage anthropocentrées axées sur l'exploitation commerciale.

4.3.2. Mesures de mitigation

Face à ce risque croissant, certaines mesures de gestion ont déjà été mises en place en Suisse à l'échelle de lacs individuels, par exemple sur le lac des Faverges (Ogier et al., 2021 ; Laïly & Demolis, 2019). Il s'agit généralement de la finalité d'une démarche en plusieurs étapes, comme la compréhension du mécanisme de vidange, l'identification des mécanismes déclencheurs, l'estimation de sa magnitude, l'identification des enjeux et la délimitation des zones exposées puis la mise en œuvre de mesures qui visent à réduire l'aléa ou la vulnérabilité des éléments exposés (Emmer, 2017, 2021 ; Schupbach, 2024). Cependant, une stratégie de gestion des risques de vidange de lacs glaciaires reste toutefois absente à l'échelle de la Suisse (Mölg et al., 2021b). Néanmoins, les lacs glaciaires et leur évolution future ne représentent pas seulement un risque mais constituent également des opportunités en matière de gestion de l'eau, de production hydroélectrique ou de développement touristique (Haeberli et al., 2016).

Il convient tout de même de souligner que les mesures d'ingénierie ne garantissent pas une réduction complète du risque et peuvent dans certains cas avoir des effets contraires ou bien s'avérer insuffisantes (Haeberli et al., 2017 ; Niggli et al., 2024 ; Schupbach, 2024). Par exemple, malgré un tunnel de drainage construit en 1994 sur le lac 513 au Pérou, celui-ci a tout de même été à l'origine d'une vidange en 2010 (Niggli et al., 2024). De la même manière dans des pays comme la Suisse, la Norvège ou le Kazakhstan, des vidanges se sont produites durant la mise en œuvre de mesures préventives (Niggli et al., 2024). Cela illustre le fait qu'une intervention humaine qui vise à réduire le risque peut produire l'effet inverse en raison de la modification de la dynamique d'un lac ainsi que de son environnement (Schupbach, 2024). De plus, ces mesures d'ingénierie impliquent des contraintes logistiques, financières et humaines importantes surtout dans des terrains difficiles d'accès que représentent les lacs glaciaires (Niggli et al., 2024).

4.3.3. Échelle mondiale

Si le risque de vidange est amené à s'intensifier en Valais, il convient également de replacer cet enjeu sur une échelle plus large. En effet, au niveau mondial, Carrivick & Tweed (2016) ont mis en évidence d'importantes disparités dans la gestion des vidanges de lacs glaciaires, notamment car certains pays ne disposent pas des moyens économiques ni de capacités infrastructurelles nécessaires à la mise en place de mesures de mitigation et de surveillance. De la même manière, les conséquences des événements de vidange de lacs glaciaires varient fortement selon les régions. Par exemple, au Pérou, au Népal ou en Inde, les événements sont relativement peu fréquents, mais les dommages associés sont considérables (Carrivick & Tweed, 2016). Un même type de dommage peut par ailleurs engendrer des conséquences sociétales différentes selon le contexte social, économique ou culturel (Carrivick & Tweed, 2016).

Ces disparités se reflètent également dans le bilan humain global des vidanges. En effet, plusieurs milliers de personnes ont été tuées par des vidanges de lacs glaciaires dans la Cordillère Blanche péruvienne au cours des 70 dernières années, pour un nombre réduit d'événements, tandis que 393 décès suite à des vidanges de lacs glaciaires sont rapportés dans toutes les Alpes européennes sur les 1 000 dernières années (Taylor et al., 2023). Par ailleurs,

plusieurs études mettent en évidence une disparité géographique entre les régions où se produisent les vidanges de lacs glaciaires et celles où se concentrent la recherche scientifique (Emmer et al., 2022b ; Taylor et al., 2023). Aujourd'hui, l'Himalaya et les Alpes européennes constituent une part importante de la littérature scientifique sur le sujet, tandis que la région qui enregistre le plus d'événements à l'échelle mondiale, l'Alaska, est peu étudiée dans la littérature (Emmer et al., 2022b). Les Andes, quant à elles, présentent un nombre d'études relativement faible malgré un niveau élevé de danger face aux vidanges de lacs glaciaires, ce qui peut entraîner une sous-estimation du risque réel dans cette région (Taylor et al., 2023). Emmer et al. (2022b) soulignent que les recherches sont principalement guidées par les potentiels impacts sociétaux ainsi que par l'importance des régions montagneuses concernées plutôt que par la fréquence réelle des événements.

Ces disparités concernent également la disponibilité des données car certains pays ne disposent pas de procédures standardisées de recensement des vidanges, ce qui rend leur suivi difficile (Lützow et al., 2023). Les Alpes européennes constituent une région relativement documentée qui est notamment identifiée par Lützow et al. (2023) comme la deuxième région du monde la mieux documentée, après celle des Hautes Montagnes d'Asie. Cela peut notamment être attribué à l'existence de bases de données régionales relatives aux risques glaciaires (GLACIORISK) (Lützow et al., 2023 ; Schupbach, 2024). Cela souligne ainsi l'importance des études et recherches sur les vidanges de lacs glaciaires, d'autant plus qu'il y a de plus en plus de personnes exposées aux risques associés à mesure que les activités humaines se développent dans les régions montagneuses (Lützow et al., 2023).

Enfin, il convient de souligner qu'une gestion efficace du risque de vidange de lacs glaciaires nécessite une coordination entre les acteurs concernés, à savoir les scientifiques, les ingénieurs et les autorités politiques (Zhang et al., 2024), ainsi qu'une sensibilisation des populations (Emmer et al., 2022a ; Haeberli et al., 2017 ; Laïly & Demolis, 2019) y compris à l'échelle internationale (Zhang et al., 2024). Zhang et al. (2024) soulignent d'ailleurs le fait que cette coordination devrait s'élargir à un réseau plus large d'experts locaux afin de prendre en compte les vulnérabilités et les perceptions locales, qui, si elles ne sont pas considérées, peuvent limiter l'efficacité des mesures de mitigation. C'est pourquoi une gestion de risque intégrée est nécessaire notamment concernant les synergies et conflits possibles entre les acteurs (Haeberli et al., 2016). Il convient ainsi de considérer à la fois l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité dans l'évaluation du risque de vidange (Taylor et al., 2023).

5. Perspectives et recommandations

Comme mentionné au préalable, les études et simulations de vidanges de lacs glaciaires impliquent généralement quatre étapes : (i.) identifier la susceptibilité du lac à produire une vidange et/ou les mécanismes déclencheurs, (ii.) analyser le mécanisme de vidange, (iii.) simuler la propagation en aval de la vidange, et (iv.) combiner les résultats obtenus avec l'occupation du sol et d'autres facteurs socio-économiques (Emmer et al., 2022a). Le présent travail ne couvrant pas toutes ces étapes, il convient de discuter des perspectives qui portent sur l'affinement de l'indice développé ainsi que sur les étapes relatives à la modélisation et à l'occupation du sol.

5.1. Indice de susceptibilité de vidange : Moyenne pondérée

Comme évoqué précédemment, la prochaine étape pour l'indice de susceptibilité de vidange consisterait à considérer que chaque paramètre possède un poids différent reflétant son influence spécifique sur le processus de vidange (Wang et al., 2011). Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour définir ces poids, notamment les matrices de comparaison par paires (AHP) où les paramètres sont hiérarchisés selon leur importance relative jugée par des experts (Emmer et al., 2022b ; Mondal et al., 2025 ; Rinzin et al., 2021 ; Wang et al., 2011). Dans le contexte des vidanges de lacs glaciaires, une autre piste serait également d'utiliser des algorithmes de classification basés sur du Machine Learning (Zhang et al., 2024). Par exemple, dans leur étude portant sur la détermination de la susceptibilité des lacs glaciaires à produire une vidange dans l'Himalaya oriental, Mondal et al. (2025) ont appliqué un algorithme fondé sur les réseaux de neurones (Artificial Neural Networks), soit un algorithme de Machine Learning utilisé dans le domaine de l'optimisation et de la classification. Il serait donc pertinent de considérer ces différentes pistes présentes dans la littérature.

Dans le cadre de ce travail, la piste discutée s'oriente vers une optimisation des poids des paramètres selon une logique similaire à celle utilisée pour la calibration des seuils t_1 et t_2, par exemple via des recherches automatisées visant à maximiser le Macro F1-score, bien que cela implique un nombre de combinaisons considérables. Suivant un scénario idéal, une fois les poids déterminés, ceux-ci permettraient de calculer directement l'indice de susceptibilité pour les nouveaux lacs identifiés afin de les attribuer à une classe de susceptibilité sans devoir repasser par une évaluation experte.

5.2. Modélisation de la propagation

Une fois les lacs à susceptibilité moyenne et élevée identifiés de manière fiable, l'étape suivante consisterait à modéliser la propagation en aval d'une éventuelle vidange et de déterminer les potentielles zones impactées pour ces lacs (Demolis & Duperthuy, 2024 ; Emmer & Vilímek, 2014 ; Emmer et al., 2022a ; Schaub, 2015). Pour ce faire, il existe deux grandes approches (Emmer et al., 2022a).

La première, basée sur des données empiriques, est davantage utilisée aux échelles régionales et nationales, notamment pour produire des cartes de risque (Emmer et al., 2022a). Elle repose sur des relations empiriques qui permettent d'estimer l'atteinte des écoulements par leur

intégration dans des logiciels de simulation basés sur des algorithmes de type random walk ou direction d'écoulement multiple (Emmer et al., 2022a). Le logiciel *r.randomwalk* est souvent utilisé dans le domaine des vidanges de lacs glaciaires (Emmer et al., 2022a, 2022b ; cf. Mergili et al., 2015) tandis que *FlowR* (cf. Horton et al., 2013), un modèle d'écoulement 2D, a notamment été mobilisé par Demolis et al. (2023).

La seconde approche repose sur la physique des écoulements et tend ainsi à reproduire les mécanismes physiques derrière le processus de vidange de lac glaciaire (Emmer et al., 2022a). Elle est davantage utilisée pour les échelles du bassin versant et permet généralement d'obtenir des données concernant les vitesses d'écoulement, la pression, l'énergie, le temps de parcours et les zones impactées pour un événement précis (Emmer et al., 2022a). Dans ce cas-ci, la simulation est généralement plus fine et précise et permet de simuler le mécanisme déclencheur ainsi que la propagation de la vidange en distinguant les phases solides et fluides de l'écoulement (Emmer et al., 2022a ; Rinzin et al., 2025). Cette approche est nettement plus exigeante en ressources de calcul et données de base (Emmer et al., 2022a). Le logiciel open source *r.avaflow* est généralement utilisé (Rinzin et al., 2025 ; cf. Mergili et al., 2025) et a par exemple été utilisé pour reconstruire la vidange de certains lacs comme celui du lac Palcacocha dans la Cordillère Blanche au Pérou (Emmer et al., 2022a ; cf. Mergili et al., 2017, 2020). Ce type de modélisation demeure toutefois associé à d'importantes incertitudes, notamment liées aux interactions complexes entre rhéologie du flux, mobilisation des sédiments et topographie associée aux vidanges de lacs (Meyrat et al., 2024).

Toutefois, Zhang et al. (2024) soulignent le fait que la modélisation de la propagation des vidanges peut être limitée, en particulier dans les environnements proglaciaires difficiles d'accès, car cela nécessite généralement des données de terrain telles que la bathymétrie, la température ou le débit de pointe, afin de calibrer et valider les modèles (Zhang et al., 2024).

5.3. Identification des enjeux

Les résultats de la propagation des vidanges pour les lacs à susceptibilité élevée devraient ensuite être combinés avec l'occupation du sol afin d'identifier les enjeux exposés ainsi que les communautés les plus vulnérables (Emmer et al., 2022a). En Suisse, le potentiel de dommage est généralement évalué suivant les dommages directs, soit le nombre et la valeur des objets exposés au risque ainsi que le nombre de personnes y étant exposées (Schaub, 2015). Pour les approches basées sur les données empiriques, cette étape permet d'identifier les hotspots qui nécessiteront des études complémentaires (Emmer et al., 2022a). Les approches basées sur les modélisations physiques, quant à elles, n'estiment pas uniquement les zones impactées mais permettent également d'obtenir des données et des paramètres de sorties (vitesse de l'écoulement ou encore temps de parcours) pouvant être utilisés pour la mise en place de mesures de pré-alerte et pour des mesures d'évacuation (Emmer et al., 2022a). Les résultats alors obtenus devraient être présentés aux acteurs, tels que la population et les autorités (Emmer et al., 2022a).

Enfin, la pondération de l'indice, la modélisation de la propagation des vidanges des lacs à susceptibilité moyenne et élevée et le croisement avec l'occupation du sol permettraient de

déterminer si des mesures de gestion doivent être envisagées pour un lac donné. Le présent travail constitue ainsi une première étape dans cette démarche plus large afin d'aboutir à un outil opérationnel de gestion du risque de vidange en Valais.

6. Conclusion

Le canton du Valais est particulièrement exposé au risque de vidange de lacs glaciaires, risque qui est amené à croitre dans le contexte du réchauffement climatique. Bien que les vidanges de lacs glaciaires constituent un phénomène connu dans les Alpes européennes, il s'agit d'un processus imprévisible et complexe. La réalisation d'un inventaire des lacs glaciaires et l'évaluation de leur susceptibilité de vidange constituent ainsi des étapes clés dans la démarche plus large de gestion des risques. Ce travail constitue ainsi une première étape dans l'évaluation du risque de vidange des lacs glaciaires en Valais.

La réalisation d'un inventaire recensant les lacs glaciaires actuels du canton constituait le premier objectif de ce travail, et a mis en évidence que le Valais abrite de nombreux lacs glaciaires, avec 659 lacs recensés dans un tampon de 500 m autour des glaciers actuels et jusqu'à 1 km en aval. La sélection des paramètres a mis en évidence l'existence de nombreuses variables reconnues comme pouvant influencer la susceptibilité de vidange d'un lac, mais également l'absence d'un consensus établi dans la littérature quant à leur sujet. La sélection retenue dans ce travail a identifié onze paramètres, ou quatorze pour les lacs endigués par une moraine, comme étant les plus pertinents pour évaluer la susceptibilité de vidange des lacs glaciaires. L'établissement de la base de données a permis de mettre en évidence que les lacs glaciaires en Valais sont principalement de petits lacs endigués par le bedrock ou par une moraine et que ceux-ci sont répartis sur l'ensemble des zones englacées du canton entre 1 616 m et 3 365 m d'altitude. Le Valais est donc fortement exposé à ce risque qui est amené à s'accentuer dans le futur en raison du retrait des glaciers et de l'exposition de nombreuses dépressions susceptibles d'accueillir de futurs lacs glaciaires, tandis que la dégradation du permafrost et la déstabilisation des versants renforcent la vulnérabilité du canton face aux risques glaciaires. La réalisation de la base de données souligne également la nécessité de disposer de données de qualité à l'échelle régionale. Bien que certaines limites et incertitudes aient été identifiées, l'inventaire des lacs glaciaires comprenant les différents paramètres retenus constitue toutefois une base solide.

Le second objectif du travail consistait à développer un indice de susceptibilité. Celui-ci a été construit sur l'hypothèse que chaque paramètre contribue de manière égale à la susceptibilité de vidange et a permis d'identifier 79 lacs présentant une susceptibilité élevée de vidange ainsi qu'une certaine concentration de ceux-ci au sud du canton. Par rapport à la base de données, certains types de lacs sont davantage représentés au sein des lacs à susceptibilité élevée, comme les lacs endigués par de la glace ou par une moraine ou encore les lacs de grande superficie et en cours de formation. La comparaison avec la classification experte montre toutefois que cet indice ne reproduit que partiellement la distribution établie par les experts, ce qui ouvre à des pistes d'amélioration comme une pondération des paramètres plutôt qu'une moyenne arithmétique. Plus largement, ce travail met en évidence les limites propres à l'évaluation du

risque de vidange des lacs glaciaires et l'utilisation de méthodologies basées sur des approches expertes. Cela souligne ainsi l'importance de développer des méthodologies standardisées, reproductibles et transposables aux différentes régions concernées par ce risque, notamment via l'utilisation de méthodes automatisées. L'indice développé dans ce travail vise davantage à ouvrir des perspectives qu'à constituer un outil opérationnel au sens strict.

Ainsi, ce travail répond aux premières étapes de gestion des risques, tout en soulignant les incertitudes et les limites propres à l'étude du risque de vidange de lacs glaciaires. Cette étude ouvre la possibilité d'améliorations de l'indice de susceptibilité de vidange en vue des étapes suivantes de gestion, à savoir la modélisation des vidanges des lacs identifiés et l'identification des enjeux exposés. Cela dans l'optique de mettre en place des mesures de mitigation adéquates en Valais, dans un contexte où les environnements alpins connaissent des changements majeurs en raison du réchauffement climatique.

Références bibliographiques

Allen, S.K., Zhang, G., Wang, W., Yao, T. & Bolch, T. (2019). Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. *Science Bulletin*, 64(7), 435–445. https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.03.011

Ayala, A., Farinotti, D., Stoffel, M. & Huss, M. (2020). *Glaciers: Hydro-CH2018 synthesis report chapters: "future changes in hydrology"*. Zürich : ETH Zürich, WSL, Université de Fribourg & Université de Genève, Hydro-CH2018 Project, 44 p. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000398099

Carrivick, J.L. & Tweed, F.S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001

Cathala, M. (2024). *Cartographier et modéliser les aléas liés à la dégradation de la cryosphère dans les Alpes Françaises : Une approche multiscalaire combinant permafrost, lacs glaciaires et écroulements rocheux pour contribuer à l'identification de secteurs à risque*. Thèse de doctorat, Chambéry, Université Savoie Mont Blanc, inédit, 358 p. https://theses.hal.science/tel-04718775. Consulté le 06 août 2026.

Clague, J.J. & O'Connor, J.E. (2021). Glacier-related outburst floods. *In* Haeberli, W. & Whiteman, C. (eds), *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*, 2e éd. Amsterdam : Elsevier, 467–499. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00019-6

Climate Change Knowledge Portal. (2026). *Country overview: Switzerland*. World Bank Group. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/switzerland. Consulté le 30 juin 2026.

Cook, S.J. & Quincey, D.J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3(4), 559–575. https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015

Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver : U.S. Geological Survey, Open-File Report 85–560, 54 p. https://scispace.com/pdf/floods-from-dam-failures-2g8xboybj8.pdf. Consulté le 01 août 2026.

Costa, J. E. & Schuster, R.L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7), 1054–1068. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100%3C1054:TFAFON%3E2.3.CO;2

Dethinne, T. (2024). *TP2 : Composition & classification : GEOG0665 – Introduction to RS* [Diapositives PowerPoint]. Liège : Université de Liège, 51 p.

Demolis, B. & Duperthuy, J. (2024). *Retour d'expérience sur la gestion du lac périglaciaire des Bossons (Chamonix-Mont-Blanc) 2021-2023 : Plan d'actions pour la prévention des*

risques d'origines glaciaire et périglaciaire. Grenoble : Office National des Forêts, Direction des Forêts et des Risques Naturels, Restauration des Terrains en Montagne (RTM), 53 p.

Demolis, B., Roudnitska, S. & Geay, T. (2023). *Inventaire des lacs glaciaires – analyse de la sensibilité des lacs à engendrer des crues torrentielles liées à des débâcles : Plan d'actions et prévention des risques d'origine glaciaire et péri-glaciaire*. Grenoble : Office National des Forêts, Direction des Forêts et des Risques Naturels, Restauration des Terrains en Montagne (RTM), 22 p.

Dupire, P. (2025). *Lac glaciaire de Bonne Pierre : Analyse de solutions de travaux*. Grenoble : Office National des Forêts, Agence Restauration des Terrains en Montagne (RTM) Alpes du Nord, Service RTM de l'Isère, 23 p.

Eichel, J. (2018). Vegetation succession and biogeomorphic interactions in glacier forelands. *In* Heckmann, T. & Morche, D. (eds), *Geomorphology of proglacial systems: Landform and sediment dynamics in recently deglaciated Alpine landscapes*. Cham : Springer, Geography of the Physical Environment, 327–349. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_19

Emmer, A. (2017). Glacier retreat and glacial lake outburst floods (GLOFs). *In* Benouar, D. (ed.), *Oxford research encyclopedia of natural hazard science.* New York : Oxford University Press, 38 p. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.275

Emmer, A. & Vilímek, V. (2014). New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3461–3479. https://doi.org/10.5194/hess-18-3461-2014

Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. & Cochachin, A. (2013). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordilera Blanca, Peru. *In* Shan, W., Guo, Y., Wang, F., Marui, H. & Strom, A. (eds), *Landslides in cold regions in the context of climate change*. Cham : Springer, 231–252. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_17

Emmer, A., Mergili, M. & Veh, G. (2022a). Glacial lake outburst floods: Geomorphological agents and hazardous phenomena. *In* Shroder, J.F. (ed.), *Treatise on geomorphology*, 2e éd. Oxford : Academic Press, 313–329. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00057-2

Emmer, A., Allen, S.K., Carey, M., Fray, H., Huggel, C., Korup, O., Mergili, M., Sattar, A., Veh, G., Chen, T.Y., Cook, S.J., Correas-Gonzalez, M., Das, S., Diaz Moreno, A., Drenkhan, F., Fischer, M., Immerzeel; W.W., Izagirre, E., Chandra Joshi, R., Kougkoulos, I., Kuyakanon Knapp, R., Li, D., Majeed, U., Matti, S., Moulton, H., Nick, F., Piroton, V., Rashid, I., Reza, M., Ribeiro de Figueiredo, A., Riveros, C., Shrestha, F., Shrestha, M., Steiner, J., Walker-Crawford, N., Wood, J.L. & Yde, J.C. (2022b). Progress and challenges in glacial lake outburst flood research (2017-2021): a research community perspective. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(9), 3041–3061. https://doi.org/10.5194/nhess-22-3041-2022

Expert Python. (s.d.). *F1-Score*. Expert Python. https://www.expertpython.fr/f1-score. Consulté le 02 juillet 2026.

Fallot, J.-M. (2020). Climate setting in Switzerland. *In* Reynard, E. (ed.), *Landscapes and landforms of Switzerland*. Cham : Springer, World Geomorphological Landscapes, 31–45. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_3

Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. & Hoelzle, M. (2014a). The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4), 933–945. https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.933

Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. & Hoelzle, M. (2014b). *The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers* [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 16 décembre 2025.

Fondazione Montagna Sicura – Montagne Sûre. (2019). *Bilancio sociale e di missione : Fondazione Montagna Sicura – Montagne Sûre : 2018*. Courmayeur : Fondazione Montagna Sicura – Montagne Sûre, 79 p. https://www.fondazionemontagnasicura.org/asset/bdm2018x.pdf. Consulté le 08 août 2026.

Geay, T. & Martin, R. (2025). *Lac de Rosolin – Tignes : Analyse de solutions pour la gestion du risque associé au lac glaciaire de Rosolin*. Annecy : Office National des Forêts, Agence Restauration des Terrains en Montagne (RTM) Alpes du Nord, Service RTM de la Haute-Savoie, 59 p.

Geay, T., Demolis, B. & Etcheverry, D. (2024). Feedback from two proglacial lake risk situations in French Alps. *In* Schneider, J. et al. (eds), *Conference proceedings*, 15th INTERPRAEVENT Conference, June 10-13, 2024, Vienna. Klagenfurt: International Research Society INTERPRAEVENT, 815–820. https://www.interpraevent.at/en/proceeding/proceedings-ip-2024. Consulté le 26 juillet 2026.

Géomorphologie de la montagne froide. (2021). *Vidange de poches d'eau en relation avec les glaciers*. Géomorphologie de la montagne froide. https://geomorphologie-montagne.ch/vidange-de-poches-deau-en-relation-avec-les-glaciers/. Consulté le 14 janvier 2026.

GEOPRAEVENT. (2014, 11 août). *Plaine Morte, Faverges-See, 5.-8. August 2014*. [Vidéo en ligne]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=UgldNMKzMNY. Consulté le 21 janvier 2026.

GEOPRAEVENT AG. (s.d.). *Station de surveillance des lacs du glacier de la Plaine Morte*. GEOPRAEVENT AG. https://www.geopraevent.ch/project/surveillance-des-lacs-du-glacier-de-la-plaine-morte/?lang=fr. Consulté le 09 mai 2026.

Gindraux, S. & Champion, A. (2026). *Inventaire des parois rocheuses instables dans l'Espace Mont-Blanc (CH) : Rapport Phase 1*. Sion : Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP), 18 p.

Giordan, D., Adams, M.S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, D., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B. & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 3437–3481. https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2

Gruber, F.E. & Mergili, M. (2013). Regional-scale analysis of high-mountain multi-hazard and risk indicators in the Pamir (Tajikistan) with GRASS GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2779–2796. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2779-2013

Haeberli, W. (1983). Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, 85–90. https://doi.org/10.3189/S0260305500005280

Haeberli, W., Kääb, A., Mühll, D. V. & Teysseire, P. (2001). Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Grubengletscher, Valais, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 47(156), 111–122. https://doi.org/10.3189/172756501781832575

Haeberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Lehmann Friedli, T., Schaub, Y. & Schleiss, A.J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, 139, 201–214. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5

Haeberli, W., Schaub, Y. & Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009

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(4), 1195–1209. https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018

Holzhauser, H. (2020). The Aletsch region with the majestic Grosser Aletschgletscher. *In* Reynard, E. (ed.), *Landscapes and landforms of Switzerland*. Cham : Springer, World Geomorphological Landscapes, 201–216. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_14

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. & Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale.

Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(4), 869–885. https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013

Huggel, C. (2004). *Assessment of glacial hazards based on remote sensing and GIS modelling*. Thèse de doctorat, Zürich, Université de Zürich, inédit, 88 p. https://doi.org/10.5167/uzh-163184

Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., Teysseire, P. & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. https://doi.org/10.1139/t01-099

Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W. & Krummenacher, B. (2003). Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6), 647–662. https://doi.org/10.5194/nhess-3-647-2003

Huggel, C., Haeberli, W., Kääb, A., Bieri, D. & Richardson, S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1068–1083. https://doi.org/10.1139/t04-053

Huss, M., Bauder, A., Werder, M., Funk, M. & Hock, R. (2007). Glacier-dammed lake outburst events of Gornersee, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 53(181), 189–200. https://doi.org/10.3189/172756507782202784

Huss, M., Voinesco, A. & Hoelzle, M. (2013). Implications of climate change on Glacier de la Plaine Morte, Switzerland. *Geographica Helvetica*, 68, 227–237. https://doi.org/10.5194/gh-68-227-2013

Huss, M., Schwyn, U., Bauder, A. & Farinotti, D. (2021). Quantifying the overall effect of artificial glacier melt reduction in Switzerland, 2005-2019. *Cold Regions Science and Technology*, 184, 103237. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103237

Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves. (s.d.). *Fiches synoptiques : Fleuves du monde : Le Rhône suisse*. Lyon : Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves, 13 p. https://www.initiativesfleuves.org/wp-content/uploads/2021/08/Fiches-synoptiques-RHONE_.pdf. Consulté le 10 mars 2026.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-working group discussions: Guidance for IPCC authors*. Genève : Intergovernmental Panel on Climate Change, 15 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/02/Risk-guidance-FINAL_15Feb2021.pdf. Consulté le 16 mars 2026.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022a). Annex I: Glossary. *In* 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. (eds), *The Ocean and cryosphere in a changing climate: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 677–702. https://doi.org/10.1017/9781009157964.015

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022b). High mountain areas. *In* 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. (eds), *The Ocean and cryosphere in a changing climate: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 131–202. https://doi.org/10.1017/9781009157964.004

Jouvet, G. & Huss, M. (2019). Future retreat of great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology*, 65(253), 869–872. https://doi.org/10.1017/jog.2019.52

Kenner, R. (2018). *Permafrost and Ground Ice Map of Switzerland (Version 2)* [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.1470165

Kenner, R., Noetzli, J., Hoelzle, M., Raetzo, H. & Phillips, M. (2019). Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(7), 1925–1941. https://doi.org/10.5194/tc-13-1925-2019

Kull, I. (2019). *Lenk, Plaine Morte : évaluation des mesures du lac glaciaire*. Zollikofen : GEOTEST AG, 12 p.

Laïly, B. & Demolis, B. (2019). *Glaciers blancs à risques : Retour d'expériences sur certaines crises*. Annecy : Office National des Forêts, Service Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de Haute-Savoie, 67 p.

Lässig, R. (2021). *Couverture des glaciers : efficace mais coûteuse*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. https://www.wsl.ch/fr/news/couverture-des-glaciers-efficace-mais-couteuse/. Consulté le 09 mai 2026.

Lindner, F., Walter, F., Laske, G. & Gimbert, F. (2020). Glaciohydraulic seismic tremors on an Alpine glacier. *The Cryosphere*, 14(1), 287–308. https://doi.org/10.5194/tc-14-287-2020

Linsbauer, A., Huss, M., Hodel, E., Bauder, A., Fischer, M., Weidmann, Y., Bärtschi, H. & Schmassmann, E. (2021a). The new Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a topographical to a glaciological dataset. *Frontiers in Earth Science*, 9, 704189. https://doi.org/10.3389/feart.2021.704189

Linsbauer, A., Huss, M., Hodel, E., Bauder, A., Fischer, M., Weidmann, Y., Bärtschi, H. & Schmassmann, E. (2021b). *The new Swiss Glacier Inventory SGI2016: From a topographical*

to a glaciological dataset [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 16 décembre 2025.

Lützow, N. & Veh, G. (2024). *Glacier lake outburst flood database V4.2*. University of Potsdam. http://glofs.geoecology.uni-potsdam.de. Consulté le 16 juillet 2025.

Lützow, N., Veh, G. & Korup, O. (2023). A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth System Science Data*, 15(7), 2983–3000. https://doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023

Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. & Benz, C. (2000a). *Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien*. 2e éd. Zürich : vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Schlussbericht NFP 31, 373 p.

Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. & Benz, C. (2000b). *Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien* [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 17 décembre 2025.

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

Mannerfelt, E. S., Dehecq, A., Hugonnet, R., Hodel, E., Huss, M., Bauder, A. & Farinotti, D. (2022b). *Halving of Swiss glacier volume since 1931 observed from terrestrial image photogrammetry* [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 16 décembre 2025.

Mergili, M. & Schneider, J.F. (2011). Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1447–1462. https://doi.org/10.5194/nhess-11-1447-2011

Mergili, M., Krenn, J. & Chu, H.-J. (2015). r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. *Geoscientific Model Development*, 8(12), 4027–4043. https://doi.org/10.5194/gmd-8-4027-2015

Mergili, M., Emmer, A., Juřicová, A., Cochachin, A., Fisher, J.-T., Huggel, C. & Pudasaini, S.P. (2017). How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1371–1389. https://doi.org/10.1002/esp.4318

Mergili, M., Pudasaini, S.P., Emmer, A., Fisher, J.-T., Cochachin, A. & Frey, H. (2020). Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 93–114. https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020

Mergili, M., Pfeffer, H., Kellerer-Pirklbauer, A., Zangerl, C. & Pudasaini, S.P. (2025). r.avaflow v4, a multi-purpose landslide simulation framework. *Geoscientific Model Development*, 18(23), 9879–9896. https://doi.org/10.5194/gmd-18-9879-2025

MétéoSuisse. (s.d.). *Climat de la Suisse*. Office fédéral de météorologie et de climatologie. https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/climat-de-la-suisse.html. Consulté le 19 janvier 2026.

Meyrat, G., Munch, J., Cicoira, A., McArdell, B., Müller, C.R., Frey, H. & Bartelt, P. (2024). Simulating glacier lake outburst floods (GLOFs) with a two-phase/layer debris flow model considering fluid-solid flow transitions. *Landslides*, 21, 479–497. https://doi.org/10.1007/s10346-023-02157-w

Mölg, N., Allen, S. & Odermatt, D. (2021a). *Inventory and evolution of glacial lakes in Switzerland since the Little Ice Age* [Dataset]. PANGAEA. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.934190

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

Mondal, S.K., Narayan, J., Sharma, C., Bharti, R., Dwivedy, S.K., Chowdhury, P.R. & Singh, R.P. (2025). Glacial lake outburst susceptibility and risk in the Eastern Himalayas using analytical hierarchy process and backpropagation neural network models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1), 2449134. https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2449134

Mourey, J., Ravanel, L. & Lambiel, C. (2022). Climate change related processes affecting mountaineering itineraries, mapping and application to the Valais Alps (Switzerland). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 104(2), 109–126. https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2064651

Müller, F., Caflisch, T. & Müller, G. (1976a). *Firn und Eis der Schweizer Alpen : Gletscherinventar*. Zürich : ETH Zürich, Geographisches Institut.

Müller, F., Caflisch, T. & Müller, G. (1976b). *Firn und Eis der Schweizer Alpen : Gletscherinventar* [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 16 décembre 2025.

Niggli, L., Allen, S., Frey, H., Huggel, C., Petrakov, D., Raimbekova, Z., Reynolds, J. & Wang, W. (2024). GLOF risk management experiences and options: A global overview. *In* Benouar, D. (ed.). *Oxford research encyclopedia of natural hazard science*. New York : Oxford University Press, 62 p. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.540

Nussbaumer, S., Schaub, Y., Huggel, C. & Walz, A. (2014). Risk estimation for future glacier lake outburst floods based on local land-use changes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1611–1624. https://doi.org/10.5194/nhess-14-1611-2014

Office fédéral de l'environnement (OFEV). (2026). *SilvaProtect-CH-Sturz* [Dataset]. Géoadmin. https://data.geo.admin.ch/browser/index.html#/collections/ch.bafu.silvaprotect-sturz/items/silvaprotect-sturz. Consulté le 26 juin 2026.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2024a). *MNT25* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/fr/modele-altimetrique-mnt25#-MNT25---Download. Consulté le 20 octobre 2025.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2024b). *swissALTI3D* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/fr/modele-altimetrique-swissalti3d#swissALTI3D---Download. Consulté le 17 décembre 2025.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2024c). *SWISSIMAGE* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/fr/orthophotos-swissimage-10-cm#Informations-complémentaires. Consulté le 20 octobre 2025.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2024d). *Swiss Map Raster 25* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/fr/carte-nationale-swiss-map-raster-25. Consulté le 20 octobre 2025.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2024e). *swissTLM3D* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/en/landscape-model-swisstlm3d. Consulté le 03 novembre 2025.

Office fédéral de topographie (swisstopo). (2025). *swissBOUNDARIES3D* [Dataset]. Swisstopo. https://www.swisstopo.admin.ch/fr/modele-du-territoire-swissboundaries3d. Consulté le 16 décembre 2025.

Ogier, C., Werder, M.A., Huss, M., Kull, I., Hodel, D. & Farinotti, D. (2021). Drainage of an ice-dammed lake through a supraglacial stream: hydraulics and thermodynamics. *The Cryosphere*, 15(11), 5133–5150. https://doi.org/10.5194/tc-15-5133-2021

Otto, J.-C. (2018). Proglacial lakes in high mountain environments. *In* Heckmann, T. & Morche, D. (eds), *Geomorphology of proglacial systems: Landform and sediment dynamics in*

recently deglaciated Alpine landscapes. Cham : Springer, Geography of the Physical Environment, 231–247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_14

Ozer, P. (2012). Les risques naturels. *In* Fallon, C., Brunet, S., Ozer, P., Schiffino, N. & Thiry, A. (eds), *Articuler risques, planification d'urgence et gestion de crise*. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, Crisis, 77–99. https://doi.org/10.3917/dbu.brune.2012.01.0077

Paul, F. (2004a). *The new Swiss glacier inventory 2000 – application of remote sensing and GIS*. Thèse de doctorat, Zürich, Université de Zürich, Schriftenreihe Physische Geographie 52, 210 p.

Paul, F. (2004b). *The new Swiss glacier inventory 2000 – application of remote sensing and GIS* [Dataset]. GLAMOS. https://www.glamos.ch/fr/downloads#inventories/B45-04. Consulté le 12 janvier 2026.

Restauration des Terrains en Montagne (RTM). (2006). *Le lac épiglaciaire de Rochemelon, Savoie – Commune de Bessans : De la crise 2004 à la vidange contrôlée 2005 : Note de synthèse*. Chambéry : Office National des Forêts, Service Départemental RTM Savoie, 80 p.

Restauration des Terrains en Montagne (RTM). (2025). *Crue du torrent des Étançons à la Bérarde du 21 juin 2024 et connaissances sur le glacier de Bonne Pierre* [Présentation PowerPoint]. Communication présentée aux échanges autour des ROGP, 16 septembre 2025, Sion, Suisse.

Reynard, E., Häuselmann, P., Jeannin, P.-Y & Scapozza, C. (2020). Geomorphological landscapes in Switzerland. *In* Reynard, E. (ed.), *Landscapes and landforms of Switzerland*. Cham : Springer, World Geomorphological Landscapes, 71–80. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_5

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19, 47–77. https://doi.org/10.1023/A:1008064220727

Rinzin, S., Zhang, G. & Wangchuk, S. (2021). Glacial lake area change and potential outburst flood hazard assessment in the Bhutan Himalaya. *Frontiers in Earth Science*, 9, 775195. https://doi.org/10.3389/feart.2021.775195

Rinzin, S., Dunning, S., Carr, R.J., Sattar, A. & Mergili, M. (2025). Exploring implications of input parameter uncertainties in glacial lake outburst flood (GLOF) modelling results using the modelling code r.avaflow. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(6), 1841–1864. https://doi.org/10.5194/nhess-25-1841-2025

Sättele, M. & Bründl, M. (2015). *Guide pratique pour l'utilisation de systèmes de préalerte dans le domaine des dangers naturels gravitationnels*. Berne : WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Office fédéral de la protection de la population OFPP, 61 p.

Schaerer, N. (s.d.). *Glacier du Rhône*. Suisse Tourisme. https://www.myswitzerland.com/fr-fr/destinations/glacier-du-rhone/. Consulté le 13 janvier 2026.

Schaub, Y. (2015). *Outburst floods from high-mountain lakes: risk analysis of cascading processes under present and future conditions*. Thèse de doctorat, Zürich, Université de Zürich, inédit, 204 p. https://doi.org/10.5167/uzh-120918

Schoeneich, P. & Reynard, E. (2020). Structural landscapes and relative landforms of the Diablerets Massif. *In* Reynard, E. (ed.), *Landscapes and landforms of Switzerland*. Cham : Springer, World Geomorphological Landscapes, 123–141. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43203-4_9

Schupbach, M. (2024). *Le risque de débâcle glaciaire en Valais (1818-2022) : évolution des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques, des conséquences socio-économiques et des mesures préventives*. Mémoire de master en géographie, Berne, Université de Berne, inédit, 85 p. https://www.geography.unibe.ch/unibe/portal/fak_naturwis/e_geowiss/c_igeogr/content/e39592/e1608235/e1608239/pane1608241/e1611580/Schupbach.Maxime_2024_ger.pdf. Consulté le 18 décembre 2024.

Scikit-learn. (s.d.). *F1_score*. Scikit-learn. https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.f1_score.html. Consulté le 16 juillet 2026.

Steffen, T., Huss, M., Estermann, R., Hodel, E. & Farinotti, D. (2022a). Volume, evolution, and sedimentation of future glacier lakes in Switzerland over the 21st century. *Earth Surface Dynamics*, 10(4), 723–741. https://doi.org/10.5194/esurf-10-723-2022

Steffen, T., Huss, M., Estermann, R., Hodel, E. & Farinotti, D. (2022b). *Volume, evolution, and sedimentation of future glacier lakes in Switzerland over the 21st century* [Dataset]. ETH Zürich. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000554650

Taylor, C., Robinson, T.R., Dunning, S., Rachel Carr, J. & Westoby, M. (2023). Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, 14, 487. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x

Troilo, F., Segor, V., Mondardini, L., Perret, P. & Gottardelli, S. (2025). *The Grand Croux lake outburst flood: monitoring and protection measures from the 2016 event to future scenarios* [Présentation PowerPoint]. Communication présentée à l'échange sur les lacs glaciaires à risque, 9-10 septembre 2025, Cogne, Italie.

Valais. (2025). *Faits et chiffres*. Valais. https://www.valais.ch/fr/informations/faits-et-chiffres. Consulté le 18 décembre 2025.

Walder, J.S. & O'Connor, J.E. (1997). Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*, 33(10), 2337–2348. https://doi.org/10.1029/97WR01616

Wang, W., Yao, T., Gao, Y., Yang, X. & Kattel, D.B. (2011). A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the Southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 31(2), 122–130. https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00059.1

Werder, M.A., Bauder, A., Funk, M. & Keusen, H.-R. (2010). Hazard assessment investigations in connection with the formation of a lake on the tongue of Unterer Grindelwaldgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), 227–237. https://doi.org/10.5194/nhess-10-227-2010

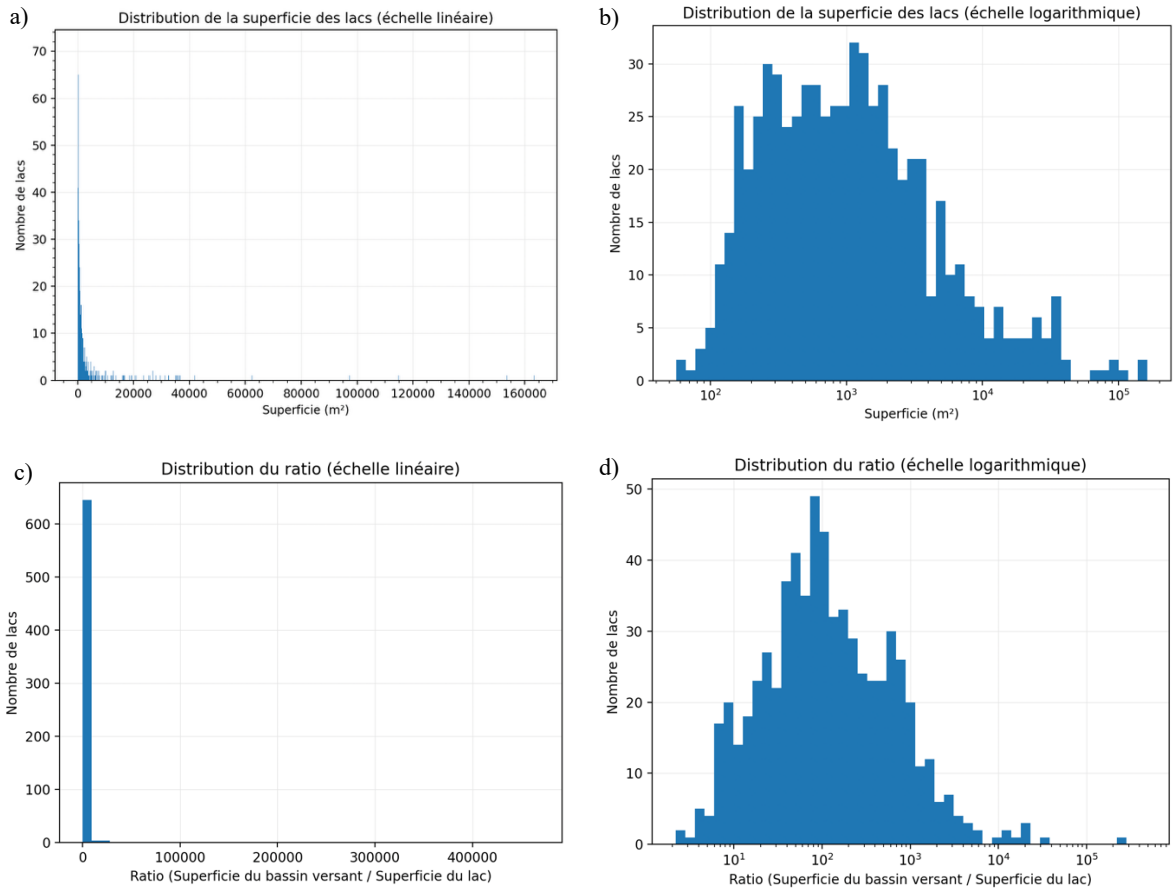
Wytiahlowsky, H., Stokes, C.R., Hodge, R.A., Clason. C.C. & Jamieson, S.S.R. (2025). Distribution and characteristics of supraglacial channels on mountain glaciers in Valais, Switzerland. *The Cryosphere*, 19(12), 6461–6482. https://doi.org/10.5194/tc-19-6461-2025

Zekollari, H., Huss, M. & Farinotti, D. (2020). On the imbalance and response time of glaciers in the European Alps. *Geophysical Research Letters*, 47(2), e2019GL085578. https://doi.org/10.1029/2019GL085578

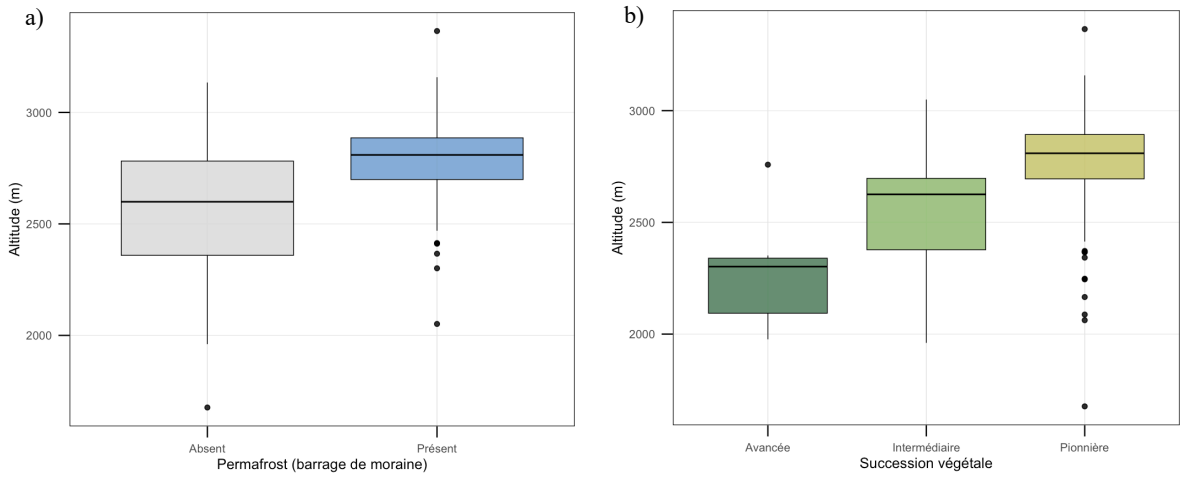
Zekollari, H., Schuster, L., Maussion, F., Hock, R., Marzeion, B., Rounce, D.R., Compagno, L., Fujita, K., Huss, M., James, M., Kraaijenbrink, P.D.A., Lipscomb, W.H., Minallah, S., Oberrauch, M., Van Tricht, L., Champollion, N., Edwards, T., Farinotti, D., Immerzeel, W., Leguy, G. & Sakai, A. (2025). Glacier preservation doubled by limiting warming to 1.5°C versus 2.7°C. *Science*, 388(6750), 979–983. https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu4675

Zhang, G., Carrivick, J.L., Emmer, A., Shugar, D.H., Veh, G., Wang, X., Labedz, C., Mergili, M., Mölg, N., Huss, M., Allen, S., Sugiyama, S. & Lützow, N. (2024). Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 447–462. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w

Annexes



Annexe 1 : a) Distribution linéaire de la superficie des lacs glaciaires. b) Distribution logarithmique de la superficie des lacs glaciaires. c) Distribution linéaire du ratio entre la superficie du bassin versant et la superficie du lac. d) Distribution logarithmique du ratio entre la superficie du bassin versant et la superficie du lac.



Annexe 2 : a) Répartition du facteur permafrost dans les barrages de moraine selon l'altitude. b) Répartition des stades de succession végétale (pionnière, intermédiaire, avancée) pour les barrages de moraine selon l'altitude.