



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**FACULTÉ DES SCIENCES
DE LA SOCIÉTÉ**



Barrage de la Grande Dixence (source : <https://www.valais.ch/fr/activites/excursions/visites-de-barrages/grande-dixence>)

Certificat complémentaire de géomatique

Travail de Mémoire

*Analyse SIG des bassins versants et leur volume de glace, focalisé sur
les prises d'eaux Alpiq dans les Alpes*

★ ★ ★ ★ ★

Par Jordan Paudex

Sous la direction de Pr. Gregory Guilianì et Dr. Marjorie Perroud



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES
DE LA SOCIÉTÉ

Notice Analytique

Auteur:	Paudex, Jordan
Titre:	Analyse SIG des bassins versants et leur volume de glace, focalisé sur les prises d'eaux Alpiq dans les Alpes
Sous-titre:	-
Résumé:	La fonte des glaciers révèle des enjeux au niveau de la gestion des eaux de montagne pour les compagnies d'hydro-électricité. Avec l'avancement de la technologie LIDAR, les outils SIG sont devenus des outils potentiellement utiles pour mesurer le volume des glaciers. Ce travail consiste à tester l'efficacité des outils SIG en faisant une comparaison du volume des glaciers en 1995 et 2016 à l'aide de modèles altimétriques où se situent des prises d'eaux sous mandat de gestion d' Alpiq en aval.
Summary:	The melting of glaciers raises issues of mountain water management for hydropower companies. With the advancement of LIDAR technology, GIS tools have become potentially useful tools for measuring glacier volume. This work consists of testing the effectiveness of GIS tools by comparing the volume of glaciers in 1995 and 2016 using altimetric models where water intakes under Alpiq's management are located downstream.
Directeur:	Pr. Gregory Giuliani
Jury:	Pr Gregory Giuliani, Dr. Marjorie Perroud.
Date de l'examen:	2024-02-01
Diffusion autorisée:	oui
Note de l'examen:	4.25/6
Volée:	2023
Collation:	25 pages 11 figures 3 tableaux
Sujet:	Géomatique, fonte des glaciers, modèles altimétriques, Volume de glace
Url application en ligne	

Table des matières

1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE.....	4
2. MÉTHODE	6
2.1 DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DES GLACIERS EN 1995 ET 2016	6
2.1.1 Importation des couches.....	6
2.1.2 Mesure de l'épaisseur de glace en 2016 et 1995	6
2.2 DÉTERMINATION DE L'INFLUENCE GLACIAIRE SUR LES PRISES D'EAUX ALPIQ	8
2.3 MODÈLE INVEST DU WATER YIELD.....	9
2.3.1 Importations des couches	10
2.3.2 Traitement des couches	11
2.4 CRÉATION D'UN GÉOPACKAGE COMPRENANT LES DONNÉES RELATIVES AUX PRISES D'EAU AINSI QUE LES RÉSULTATS DU WATER YIELD	12
3. RÉSULTATS	12
3.1 DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DES GLACIERS ENTRE 1995 ET 2016.....	12
3.2 GÉOPACKAGE COMPLET	17
3.3 WATER YIELD MODEL	18
4. DISCUSSION ET LIMITES	19
5. CONCLUSION.....	21
6. RÉFÉRENCES	22
7. ANNEXE.....	23

Table des illustrations

Figure 1a et b. : Modélisation des bassins versants avec glaciers (en blanc) et prises d'eaux Alpiq (en jaune)	9
Figure 2: modèle conceptuel du bilan hydrique utilisé par InVEST. Les facteurs en couleurs sont inclus dans le modèle tandis que les facteurs en gris sont exclus. (Natural Capital Project 2023).....	10
Figure 3: Epaisseur du glacier du bassin de versant de Moiry en 2016 (en m)	13
Figure 4: Epaisseur du glacier du bassin versant de Moiry en 1995 (en m)	14
Figure 5: Epaisseur du glacier du bassin versant de Turtmann en 2016 (en m).....	14
Figure 6: Epaisseur du glacier du bassin versant de Navisence en 2016 (en m)	15
Figure 7: Perte de volume glacier entre 1995 et 2016 pour les glaciers en amont des prises d'eaux Alpiq.....	16
Figure 8: Perte de volume glacier entre 1995 et 2016 pour les glaciers en amont des prises d'eaux ALPIQ	17
Figure 9: Modélisation des glaciers et bassins versants où se situent une prise d'eau ALPIQ	17
Figure 10: Table attributive des prises d'eaux avec la superficie du bassin versant, le nom des glaciers en amont, le volume de glace en 1995 et en 2016	18
Figure 11: modèle InVEST du rendement de l'eau annuel pour les bassins versants de Navisence et de la Gougra.....	19

Tableaux

Tableau 1: Ensemble des couches utilisées lors de ce rapport	6
Tableau 2: Pourcentage de surface glaciaire pour les trois glaciers tests en 2016	13
Tableau 3: Superficie totale des glaciers et bassins versants liés à des prises d’eaux Alpiq en 2016.....	18

1. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Le changement climatique implique des impacts considérables sur la couverture glaciaire des glaciers à travers le monde. Ces effets ont été quantifiés à travers de nombreuses études (Vincent,2010, Farinotti and al, 2009). Il est estimé que les glaciers suisses ont perdu 50% de leur volume depuis 1850, avec une accélération du rythme de fonte sur les dernières années (Zemp and al., 2015). Cela engendre et engendrera de nombreuses conséquences au niveau environnementale, parmi lesquels la modification des débits des cours d’eaux dans les bassins versants où se trouvent ces glaciers, ainsi que la fonte du pergélisol, augmentant le risque de dangers naturels en montagne (OFEV, 2021). Ces modifications seront une sérieuse source de perturbation pour les différents secteurs d’activités montagnardes, notamment les producteurs d’hydro-électricité, pour qui la modification des débits hydrologiques pose des sérieux challenges en ce qui concerne la gestion de leurs aménagements. Les apports hydrauliques naturels provenant de la fonte des glaciers contribuent grandement à l’approvisionnement des bassins d’accumulations. L’énergie hydraulique contribue à hauteur de 65% de la production totale d’énergie sur le territoire suisse (BEF,2022), ce qui rends de ce fait indispensable l’optimisation du fonctionnement des installations. Pour cela, les compagnies d’hydro-électricité doivent être en mesure d’anticiper ces variabilités d’apports en effectuant des études de prévision. Leader suisse en matière d’électricité hydraulique, la société Alpiq soutient de nombreux projets visant à déterminer les apports en eaux à courts et long termes, tels que Radar4Infra utilisant les données radars et la start-up Wegaw, utilisant les données satellites ¹. En outre, les systèmes d’informations géographiques (SIG) peuvent également être des très bons outils de complément pour soutenir les différentes organisations dans les projets de prévisions de fonte des glaciers. La plateforme Glacier monitoring in

¹ <https://www.alpiq.com/fr/groupe-alpiq/medias/news-articles/news-stories-detail/chaque-goutte-compte>

Switzerland (GLAMOS), affiliée à l'ETHZ, fournit une multitude d'informations géographiques sur les glaciers à différentes périodes temporelles tels que la surface, le bilan de masse et la bathymétrie sous-glacière, des données obtenues grâce à la technologie LIDAR lors de la dernière décennie (Grab and al., 2021). Ces informations ont permis notamment au laboratoire d'hydraulique, hydrologie et glaciologie (VAW, ETHZ) de modéliser l'évolution de l'épaisseur de glace de l'ensemble des bassins versants où se situent des aménagements pour lesquels Alpiq a le mandat de gestion (VAW,2022).

Ce travail s'inscrit et consiste à appliquer ces techniques SIG afin de modéliser l'épaisseur de tous les glaciers se situant dans les bassins versants où Alpiq possède des installations hydro-électriques, à savoir des prises d'eaux. L'épaisseur des glaciers permettra de calculer le volume de glace existant pouvant faire fluctuer les apports en eaux. Le volume des glaciers sera calculé sur deux années : 1995 et 2016, ce qui correspond aux années des modèles altimétriques, indispensables pour mesurer l'altitude de la glace. Cela permettra de comparer le changement de volume à travers le temps. En outre, les bassins versants comprenant les prises d'eaux seront aussi modélisés, avec leur surface en km², des informations supplémentaires qui permettent de faire des prévisions plus précises sur les futurs apports en eaux de fonte. Ce travail propose finalement un modèle de rendement de l'eau annuel pour le bassin versant de Turtmann et Navisence selon la méthodologie InVEST de the Natural Capital Project, un modèle spécialement conçu pour déterminer la production d'énergie hydraulique². Les données seront rassemblées dans un géopackage, comprenant la modélisation des prises d'eaux des bassins versants, des glaciers ainsi que des résultats du modèle de rendement de l'eau. Ce travail s'inscrit dans le domaine de recherche de l'impact du changement climatique sur les glaciers, et l'utilisation de cette nouvelle technique SIG peut potentiellement être d'une grande utilité pour la précision des futurs modèles de prévision lié à la fonte des glaciers. En outre, cette étude pourra être amenée à être reproduite dans le cadre de futures études.

² <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

2. MÉTHODE

2.1 Détermination de l'épaisseur des glaciers en 1995 et 2016

2.1.1 Importation des couches

Afin de déterminer l'épaisseur des glaciers, il a fallu importer tout d'abord une série de couches toute disponible en open source. Il y a tout d'abord une série de couche de type shapefiles (SHP) disponible sur map.geo.admin.ch, qui sont indispensables à la cartographie des régions de montagne, à savoir les bassins versants partiels de 2km², le réseau hydrographique ainsi que les lacs. Ensuite, deux modèles d'altimétrie numérique 3D datant de 2016 et 1995 ont été importés afin de déterminer l'altitude des glaciers à ces deux périodes distinctes. Ces deux modèles sont disponibles sur swisstopo.admin.ch sous l'appellation [swissalti3D](http://swisstopo.admin.ch) pour le dernier en date et le MNT25 pour le plus ancien. Finalement, une série de données liées aux glaciers ont été importées depuis le site <https://doi.glamos.ch/#glrep>, affilié à l'ETHZ et le VAW suite à leurs études sur l'état des glaciers suisses entre 2015 et 2020. Depuis ce site, la couche shapefile de la surface des glaciers en 2016 et 1973 a été utilisée ainsi que la couche en format raster de l'altitude de la roche mère sur la surface des glaciers en 2016, indispensable pour mesurer l'épaisseur de glace.

Fichiers shapefile (SHP)	Fichiers rasters (tif)
<ul style="list-style-type: none">• Bassins versants (2km2)	<ul style="list-style-type: none">• Modèle d'altitude MNT25
<ul style="list-style-type: none">• Hydrographie swiss TLM3D	<ul style="list-style-type: none">• Modèle d'altitude swissalti 3D
<ul style="list-style-type: none">• Lacs	<ul style="list-style-type: none">• Modèle d'altitude de la roche mère
<ul style="list-style-type: none">• Surface des glaciers en 1973 et 2016	

Tableau 1: Ensemble des couches utilisées lors de ce rapport

2.1.2 Mesure de l'épaisseur de glace en 2016 et 1995

Dans un premier temps, toutes les couches nécessaires ont été importées au sein du logiciel SIG Qgis. Pour déterminer l'épaisseur de glace en 2015, 2016 ou 2017 selon la région, les modèles d'altitude de la roche mère et du swissalti 3D ont été utilisés, en appliquant la procédure suivante dans le logiciel :

Raster -> Calculatrice Raster -> « modèle d'altitude swissalti 3D » - « modèle d'altitude de la roche mère »

La calculatrice raster est une fonction permettant les calculs sur la base des valeurs des pixels dans les couches. Effectuer une soustraction entre l'altitude du terrain et la roche mère détermine donc la différence d'altitude entre les deux couches, ce qui équivaut à l'épaisseur de glace. Pour calculer l'épaisseur de glace en 1995, la procédure précédente a été répliquée, mais avec le modèle d'altitude de 1995 :

Raster -> Calculatrice Raster -> « modèle d'altitude MNT25 » - « modèle d'altitude de la roche mère »

Cependant, la couche raster de la roche mère n'englobe que la surface des glaciers en 2016. Il reste donc la différence de superficie qu'il y avait en 1995 à prendre en compte, dont on ne connaît pas l'altitude de la roche mère, ni la superficie totale, les données les plus proches datant de 1973. Afin de prendre en compte cette différence de superficie entre 1995 et 2016, la couche shapefile de la superficie des glaciers en 1973 a donc été utilisée. Après coup, la procédure suivante a été effectuée :

Raster -> Calculatrice Raster -> « modèle d'altitude MNT25 » - « modèle d'altitude swissalti 3D »

Cela calcule une couche raster avec la différence d'altitude entre 1995 et 2016. Les valeurs des pixels se situant en dehors de la superficie du glacier en 2016 sont forcément représentatives de l'épaisseur de glace. Dans un second temps, il fallait pouvoir calquer cette couche raster sur une couche vecteur comprenant la superficie restante des glaciers en 1995. Une couche vecteur représentant la différence de superficie entre 1973 et 2016 a donc été créée de la manière suivante (Annexe 2) :

Vecteur -> géotraitement -> différence

Après coup, la couche raster des différences d'altitude a été calquée sur la nouvelle couche shapefile de la différence de superficie entre 1973 et 2016 :

Raster -> Extraction -> découper selon une couche de masque

Les pixels ayant une valeur de zéro signifie qu'il n'y a pas de différence d'altitude entre 1995 et 2016, par conséquent qu'il n'y avait plus de glaciers déjà en 1995. Finalement, une dernière opération consistait à fixer une valeur de 0 pour tous les pixels inférieur à 5. En effet, dû aux imprécisions du modèle d'altitude MNT, qui se situent entre 0 et 6m selon (Annexe 1) notamment à cause de la maille plus élevée (25m contre 10 pour le swissalti 3D), ainsi que la présence de moraines frontales dans la zone d'ablation³, considérer tous les pixels inférieurs à 5 comme égales à 0 permettrait potentiellement de réduire l'incertitude des résultats. L'opération a été effectuée comme suit (Annexe 1) :

Raster -> Calculatrice Raster -> (« Différence d'altitude 1995-2016 » >5) * (« Différence d'altitude 1995-2016 » + (« Différence d'altitude 1995-2016 » <=5) * NULL

2.2 Détermination de l'influence glaciaire sur les prises d'eaux Alpiq

Alpiq dispose d'environ une centaine prises d'eau à travers le canton du Valais. Cependant, ces prises d'eaux ne sont pas toutes alimentées en apport provenant de la fonte des glaciers. Il fallait donc procéder à une sélection des prises d'eaux qui sont alimentées annuellement par la fonte des glaciers. La couche contenant les prises d'eaux a été obtenue à partir d'une géodatabase fournie par le bureau d'ingénieurs et de géomètres brevetés GEOSAT SA. Une fois la couche téléchargée, les prises d'eau avec influence glaciaire ont été déterminée en modélisant les bassins versants ainsi que les glaciers, ainsi qu'en déterminant le sens du ruissellement des cours d'eau à travers les bassins versants. L'influence glaciaire des prises d'eaux situées en amont est très distinguable (Figure 1a). Cependant, certaines prises d'eaux situées en aval étaient plus compliquées à déterminer (Figure 1b). En outre, tous les bassins versants alimentant les prises d'eaux ont été sélectionnés.

³ https://www.unige.ch/forel/files/3315/8737/4026/Menzingen_Moraines_Fr.pdf

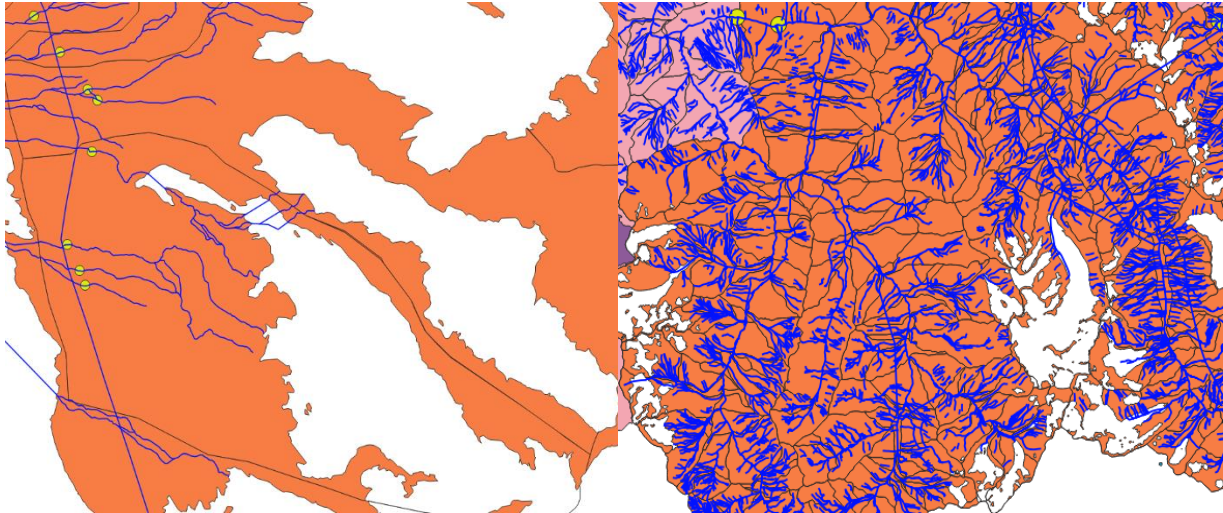


Figure 1a et b. : Modélisation des bassins versants avec glaciers (en blanc) et prises d'eaux Alpiq (en jaune)

Une sélection à partir de la couche de base des prises d'eaux a été effectuée et une sous-couche des prises d'eaux avec influence glaciaire a été créée :

Couche -> Enregistrer les entités sélectionnées sous...

Dans un second temps, en lien avec la méthode précédente, le volume de glacier en 2016 et 1995 a été calculé pour chaque glacier en amont des prises d'eaux. Le volume a été calculé de la sorte :

$$\text{Air glacier (km}^2\text{)} * \text{Valeur moyenne du pixel de l'épaisseur de glace (km)}$$

La surface des bassins versants a quant à elle été calculée selon la méthode suivante :

Couche des bassins versants -> Table d'attributs -> Calculatrice de champs -> geometry -> \$area

Les données indiquant la superficie et le volume en 2016, le volume en 1995, ainsi que la surface des bassins versants ont été intégrées à la table d'attributs des prises d'eaux Alpiq

2.3 Modèle InVEST du Water yield

Le modèle InVEST, créé par l'Université de Stanford, permet de cartographier et évaluer une série de services écosystémiques selon différents facteurs environnementaux et économiques. Le modèle offre différents services écosystémiques, dont le Reservoir hydropower production, à savoir le « rendement de l'eau » selon la traduction littérale de l'anglais, ce qui signifie les apports hydrauliques annuel dans un bassin versant. Ce modèle a été conçu spécifiquement pour l'énergie hydraulique (Natural Capital Project, 2023).

2.3.1 Importations des couches

Afin de déterminer le rendement annuel de l'eau sur un bassin versant, une série de facteurs environnementaux doivent être pris en compte et représentés sous forme cartographique afin d'exécuter le modèle. Le modèle conceptuel démontre le bilan hydrique utilisée par InVEST qui comprends les facteurs de précipitations, sous forme d'eau ou de neige, l'évapotranspiration, la profondeur racinaire, la disponibilité en eau, ainsi que la recharge des eaux souterraines (Figure 2).

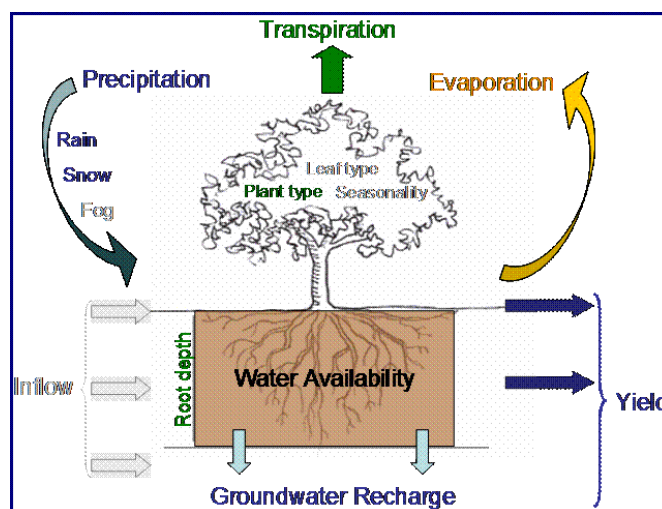


Figure 2: modèle conceptuel du bilan hydrique utilisé par InVEST. Les facteurs en couleurs sont inclus dans le modèle tandis que les facteurs en gris sont exclus. (Natural Capital Project 2023)

Une série de couches SIG doivent être de ce fait téléchargées à partir de différentes open sources, listées comme suit :

- Les précipitations annuelles mondiale en mm d'une résolution de 1km en format raster, disponible sur le site du Worldclim. La période de référence est de 1970 à 2000. (lien dans la bibliographie).
- L'évapotranspiration annuelle moyenne en format raster, d'une résolution de 1km, disponible sur le site CGIAR-CSI (lien dans la bibliographie). La période de référence est également 1970 à 2000.
- Profondeur de la couche de restriction racinaire (Roots depth) en format raster, disponible sur le site du IIASA (lien dans la bibliographie).
- La teneur en eau disponible de la plante (Plant available water content) en format raster, disponible sur le site de l'ISRIC (lien dans la bibliographie).
- La couverture du sol, où chaque type de revêtement de sols possède un code de classe, a été fournie par le doctorant Nathan Kuelling de l'UNIGE dans le cadre d'une étude sur la couverture des sols suisses (Guiliani et al, 2022)
- La surface des bassins versants en format vecteur, disponibles sur le site hydroshed (lien dans la bibliographie).

2.3.2 Traitement des couches

Les couches téléchargées fournissent des informations à des échelles très larges, l'étendue la plus petite étant le territoire suisse. De ce fait, la première étape est de créer une zone d'intérêt plus spécifique, dans notre cas les bassins versants de la Gougra et Navisence. Les bassins versants mentionnés doivent être sélectionnés à partir de la couche des bassins versants hydroshed, et ensuite enregistrés afin de créer une nouvelle couche. Toutes les autres couches de types raster doivent être calquées sur cette nouvelle couche de la façon suivante (Annexe 4) :

Raster -> Extraction -> découper selon une couche de masque

Les couches étant téléchargées sur des plateformes internationales, le système de projection est le WSG : 1984. Dans le but de pouvoir exécuter le modèle, les couches doivent être reprojctées en format CH 1903+LV95, afin que les distances de la couche soient en mètres. Avec la couche de couverture du sol, une table biophysique sous format CSV doit être intégrée au modèle. Les colonnes suivantes doivent y figurer :

- Code de la couverture du sol figurant dans la couche raster.
- Code binaire indiquant si le sol est végétalisé ou non (pas nécessaire dans notre cas)
- La profondeur racinaire, en reprenant les données de la couche raster
- Un coefficient de culture K_c , représentant le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle, est utilisé pour déterminer le besoin en eau selon le type de sols. Il est principalement utilisé dans l'agriculture. Un lien vers un calculateur de K_c est fourni sur le site de InVEST⁴.

Finalement un facteur de saisonnalité Z , compris entre 1 et 30 représente la distribution saisonnière des précipitations. Pour ce modèle, le facteur Z a été réglé sur 10, ce qui est le facteur par défaut qui s'applique bien aux distributions saisonnières relativement stables.

2.4 Création d'un géopackage comprenant les données relatives aux prises d'eau ainsi que les résultats du Water Yield

Un géopackage (gpkg) a été créé regroupant la sous-couche des prises d'eaux Alpiq, une couche comprenant tous les glaciers influençant les prises d'eaux, ainsi qu'une autre couche comprenant tous les bassins versants alimentant les prises d'eaux.

Création bases de données -> géopackage

3. RÉSULTATS

3.1 Détermination de l'épaisseur des glaciers entre 1995 et 2016

La modélisation sous forme de test des glaciers de Moiry, Turtmann et Navisence en 2016 et 1995 permet de se rendre compte de la différence spatiale tant en terme de superficie qu'en terme d'épaisseur de glace. À l'état de 2016, les glaciers de Moiry, Turtmann et Navisence ont respectivement des superficies de 5,004, 12,12 et 23,05 km² (Table 1). Les superficies de bassins versants sont quant à elles 28,89 km² pour Moiry, 28,04 pour Turtmann et 91,67 pour

⁴ https://naturalcapitalproject.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj9321/f/kc_calculator.xlsx

Navisence. A l'aide de ces chiffres, l'on obtient le pourcentage de surface glaciaire pour ces trois bassins versants.

Bassins versants	Superficie glaciers (km ²)	Superficie bassins versants (km ²)	Pourcentage de surface glaciaire (%)
Moiry	5,004	28,89	17,32
Turtmann	12,12	28,04	43,22
Navisence	23,05	91,67	25,14

Tableau 2: Pourcentage de surface glaciaire pour les trois glaciers tests en 2016

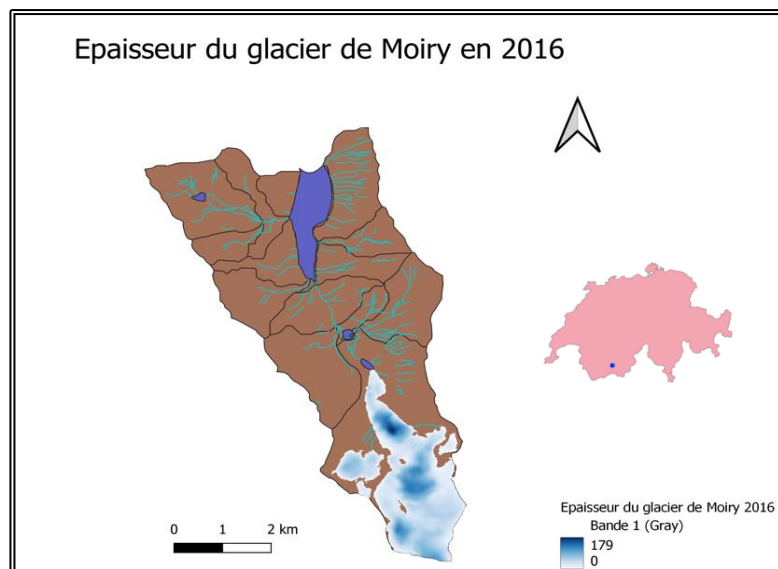


Figure 3: Epaisseur du glacier du bassin de versant de Moiry en 2016 (en m)

Le modèle d'altitude ayant une résolution de 10m ainsi que différentes méthodes de récoltes de données, l'épaisseur moyenne peut avoir une variation de ± 3 m comme il s'agit de données d'haute altitude (swisstopo, 2022). La modélisation des glaciers en 1995 illustre que l'épaisseur de glace et la superficie étaient supérieurs. Le modèle d'altitude de 1995 a quant à lui une résolution de 25m, avec des modèles de matrices moins élaborés. La précision peut de ce fait être de ± 6 m dans les régions de hautes altitudes, même si la précision reste haute dans la majorité des zones (Annexe 2). Cependant, en déterminant que les pixels inférieurs à 5m d'épaisseur sont égaux à 0, on augmente volontairement la marge d'erreur à plus ou moins 11m. Cependant, on réduit les incertitudes liées à la présence de moraines, ce qui est dans l'ensemble bénéfique selon moi.

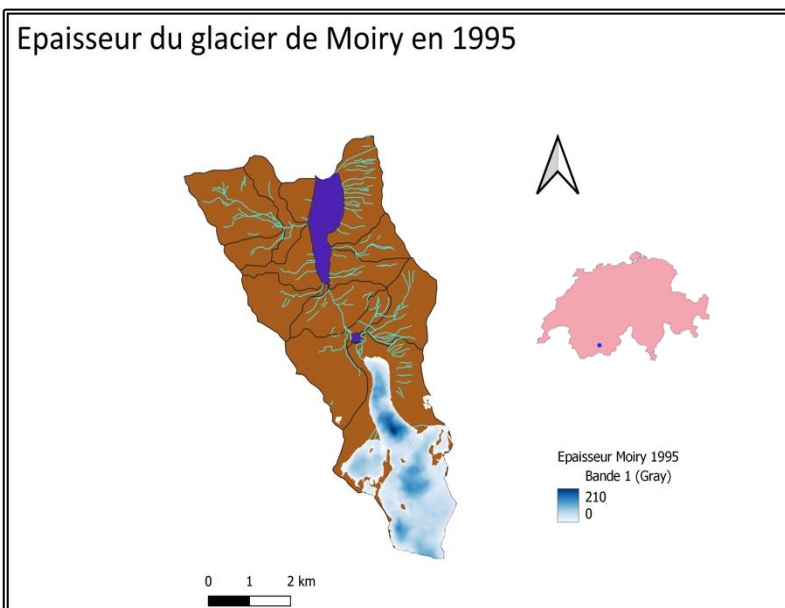


Figure 4: Epaisseur du glacier du bassin versant de Moiry en 1995 (en m)

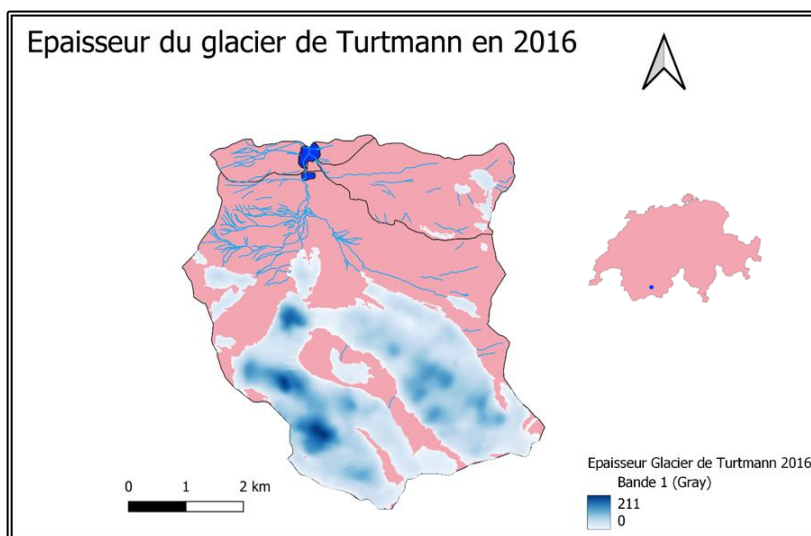


Figure 5: Epaisseur du glacier du bassin versant de Turtmann en 2016 (en m)

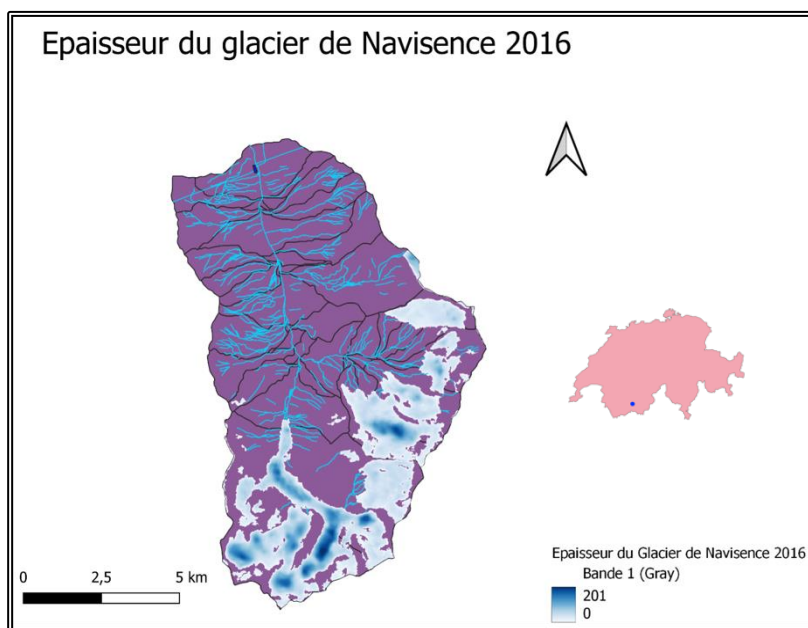


Figure 6: Epaisseur du glacier du bassin versant de Navisence en 2016 (en m)

La modélisation de l'ensemble des glaciers (Figure 7) permet d'obtenir le volume totale de glace entre 2016 et 1995 (Table 2). Le volume total de 1995 est de 40,42 km³ pour 30,97 km³ en 2016. En prenant en compte l'incertitude liée à la précision de l'altitude, inhérente aux deux modèles altimétriques, la marge d'erreur du volume pour l'an 1995 est de +- 7% , alors qu'elle est de +- 3% pour l'an 2016. Une autre incertitude est liée à la bathymétrie sous la glace, mesurée avec la technologie LIDAR, mais aucunes précisions ne sont fournies avec la couche.

Volume 1995 (km ³)	Volume 2016 (km ³)	Perte de volume (km ³)	Perte de volume (en %)
40,42	30,97	9,45	23%

Table 2 : Différence de volume glacier entre 1995 et 2016.

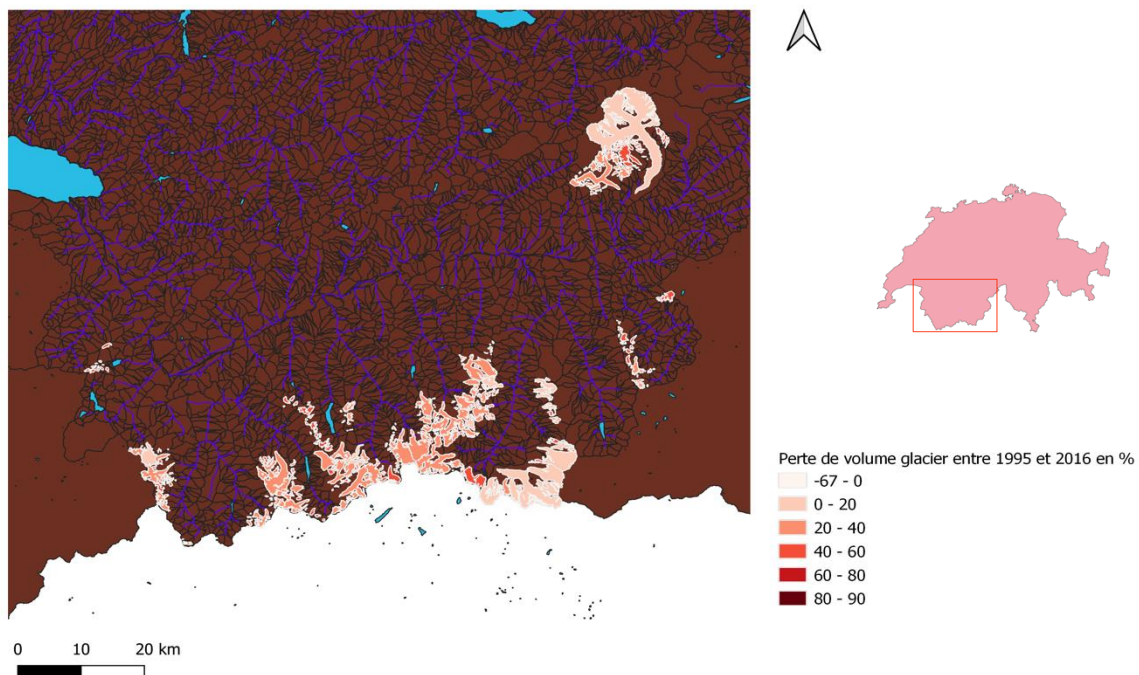


Figure 7: Perte de volume glacier entre 1995 et 2016 pour les glaciers en amont des prises d'eaux Alpiq

Les résultats démontrent une forte hétérogénéité entre les glaciers. Certains ont pris du volume jusqu'à 67 %, bien que ce soit que certaines entités de la couche shapefile représentant des glaciers qui sont des petits polygones se situant au sommet d'un autre glacier, ce qui rends ce résultat anecdotique. Ceci est dû au découpage des polygones par les auteurs de la couche SIG. D'autres, à contrario, ont vu leur volume se réduire de 89%. Une carte avec une échelle réduite permet de voir les différences de pertes entre les glaciers de manière plus détaillée (Figure 8).

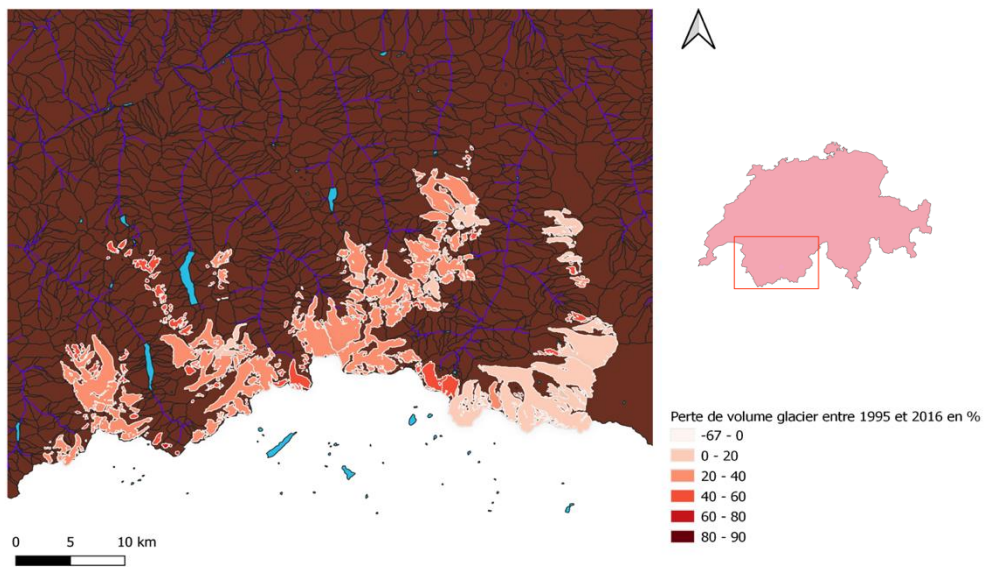


Figure 8: Perte de volume glacier entre 1995 et 2016 pour les glaciers en amont des prises d’eaux ALPIQ

3.2 Géopackage complet

La modélisation complète enregistrée sous forme de géopackage (gpkg) (Figure 9) démontrent l’ensemble des bassins versants en violet, les glaciers en roses et les prises d’eaux Alpiq en jaune.

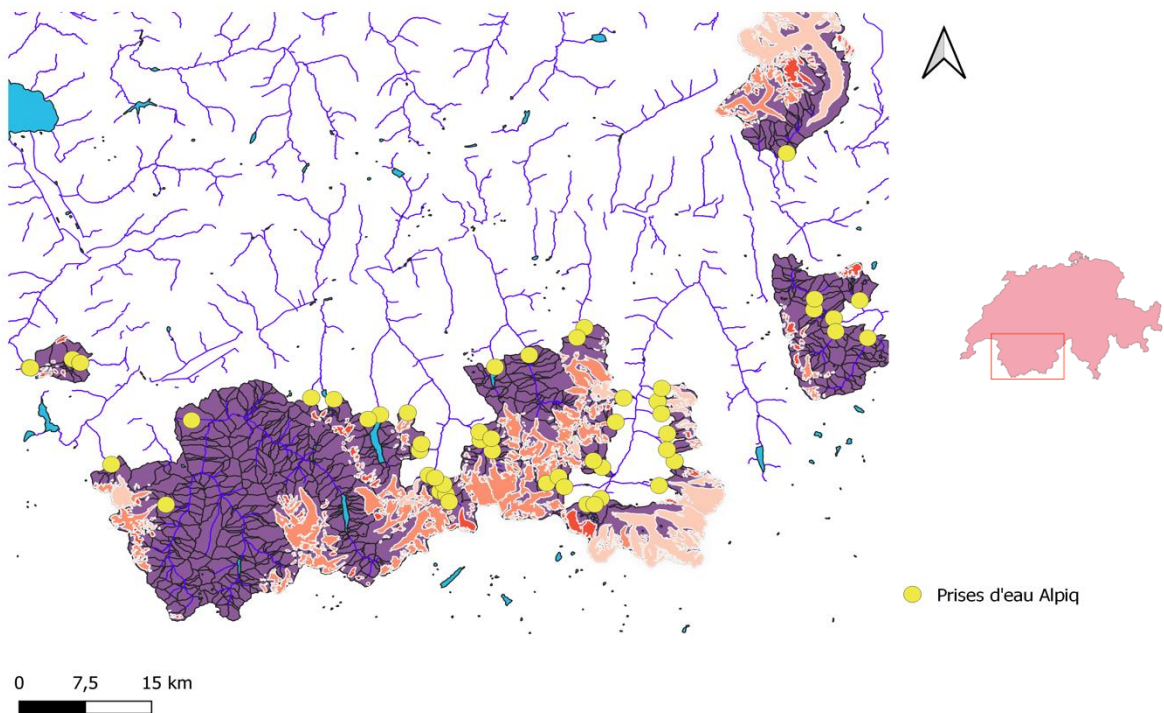


Figure 9: Modélisation des glaciers et bassins versants où se situe une prise d’eau ALPIQ

ID	QUANTITE	ALTIITUDE	LEVEE_USER	LEVEE_DATE	RSQ_EDITED_USER	RSQ_EDITED_DATE	TYPE	COMPLÉTEUR	DATE	BASSIN	VESE	GLACIER	ET	ANNÉE	REPERE	TEMPORAL	RE	DE	GLACE	1995	RE	DE	GLACE	2016	LEGEND	HYDROLOGIE
1	339,23	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				28,08	Glacier des Bou...		1995-2016		0,41		0,31	a-glaciaire							
2	94033	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				3,09	Glacier de Bertol		1995-2016		0,0115		0,0053	NULL							
3	994,97	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				6,36	Schmalgletsche...		1995-2015		0,053		0,0431	NULL							
4	99365	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				3,35	Glacier de Brico...		1995-2016		0,098		0,0738	NULL							
5	95249	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				1,48	Glacier des Dou...		1995-2016		0,0066		0,00314	NULL							
6	00663	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				43,62	Glacier du Mon...		1995-2016		1,52		1,15	a-glaciaire							
7	181,11	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				2,97	Hohgwächte, F...		1995-2015		0,63		0,0755	a-glaciaire							
8	992,94	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				22,52	Längflueglets...		1995-2015		1,35		1,108	a-glaciaire							
9	1863,2	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				10,27	Furggrat, Furg...		1995-2016		0,2265		0,106	a-glaciaire							
10	142,06	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				80,45	Kleiner Pollux, ...		1995-2016		5,3985		4,406	a-glaciaire							
11	93145	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				22,15	Pointe Barnes, ...		1995-2016		0,3149		0,17455	a-glaciaire							
12	163,94	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				5,07	Hobärggletscher		1995-2015		0,199		0,193	a-glaciaire							
13	14,046	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				5,35	Hohwänggletsch...		1995-2016		0,133		0,106	NULL							
14	99417	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				5,26	Glacier Supérie...		1995-2016		0,019		0,0098	b-glacio-nival							
15	1375,43	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				4,03	Kinggletscher N		1995-2015		0,069		0,064	b-glaciaire							
16	138,61	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				3,55	Längflueglets...		1995-2015		0,0514		0,0275	a-glaciaire							
17	01680	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				2,49	NULL		1995-2016		0,0028		0,0007	a-glaciaire							
18	138,09	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				4,69	Oberer Theodul...		1995-2016		0,135		0,076	a-glaciaire							
19	138,77	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				6,35	Weingartenglet...		1995-2015		0,083		0,064	b-glaciaire							
20	1,988	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				16,85	Schaligletscher ...		1995-2015		0,381		0,263	a-glaciaire							
21	16595	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	06.11.2016 18:0...	digitalisé				11,52	NULL		1993-2017		0,0983		0,055	b-glacio-nival							
22	00211	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:4...	digitalisé				5,45	Glacier Supérie...		1995-2016		0,05098		0,0323	NULL							
23	120,62	0	hydro	06.11.2016 16:3...	hydro	14.02.2018 13:3...	digitalisé				2,96	Arbengletscher ...		1995-2016		0,062		0,047	NULL							

Figure 10: Table attributive des prises d'eaux avec la superficie du bassin versant, le nom des glaciers en amont, le volume de glace en 1995 et en 2016

Au sein de la couche des prises d’eaux, les données de la superficie des bassins versants par prises d’eaux, l’intervalle de référence et les volumes de glace pour 1995 et 2016 ont été intégré à la table attributive (Figure 10)

Au total, la superficie des glaciers est de 431,006 km² pour 1560,04 km² de bassins versants, ce qui donne un pourcentage de glaciation de 27,62%.

Superficie glaciers (km ²)	Superficie bassins versants (km ²)	Pourcentage de glaciation (%)
431,006	1560,04	27,62

Tableau 3: Superficie totale des glaciers et bassins versants liés à des prises d’eaux Alpiq en 2016

3.3 Water yield model

Les résultats du modèle de production d’eau doivent être interprété en mm par pixel (Figure 10). Ils démontrent que la production d’eau annuel par pixel varie entre 2'500 et 522mm dans les bassins versants de la Gougra et de Navisence, avec une meilleure production d’eau dans les régions de montagne, où les précipitations sont plus élevées et l’évapotranspiration plus faible. Les zones à faible rendement sont à contrario les zones en plus basse altitude vers l’exutoire du bassin versant ainsi que le lac d’accumulation, où les précipitations sont plus faibles mais surtout où l’évapotranspiration est plus élevée. D’autres données fournies par le

modèle indiquent la valeur moyenne de rendement de l'eau par pixel, qui s'élève à 1764mm, ainsi que le rendement annuel total d'eau sous forme de volume dans le bassin versant, qui atteint 354'266'000 m³.

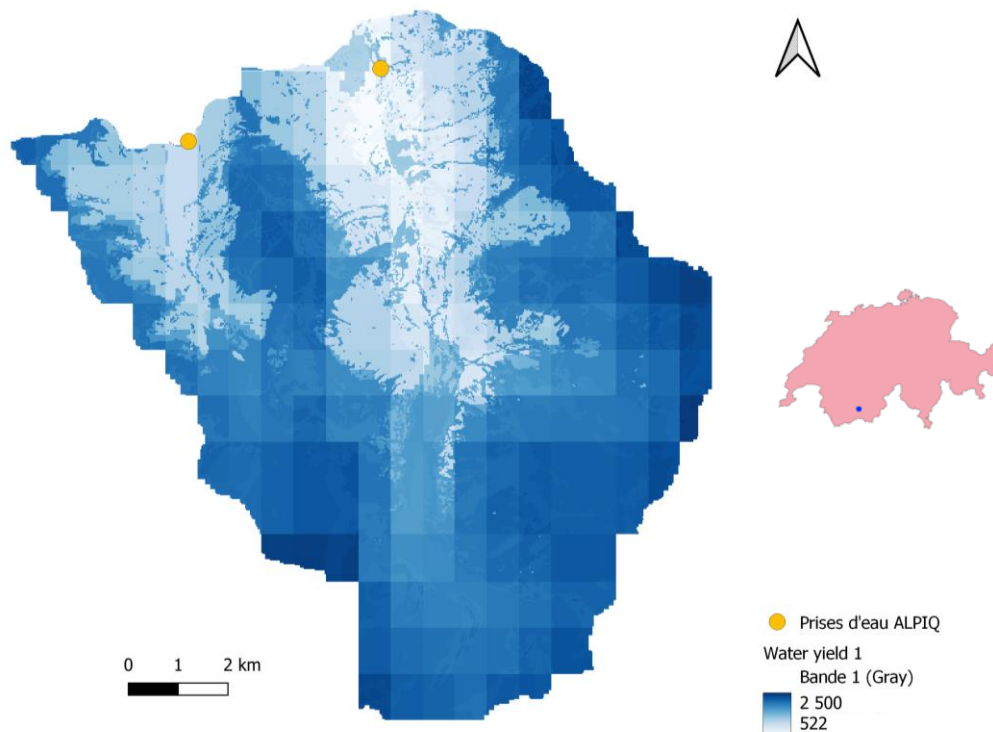


Figure 11: modèle InVEST du rendement de l'eau annuel pour les bassins versants de Navisence et de la Gougra

4. DISCUSSION ET LIMITES

En comparant l'épaisseur de glace en mètres avec les résultats du rapport rédigé du VAW (2022), on constate que les valeurs sont similaires pour les glaciers de Moiry et Turtmann, tandis que le glacier de Navisence présente une différence de 7m entre l'épaisseur maximum de leur modélisation, qui est de 208 mètres et la nôtre, qui est de 201 mètres. Il se peut que les auteurs de l'étude aient pris une partie du glacier qui chevauche un autre bassin versant, ce qui expliquerait la différence de l'épaisseur maximum. Hormis cela, la méthode utilisée dans ce rapport et la leur arrive à des résultats similaires en ce qui concerne l'épaisseur de glace. La méthode utilisée pour calculer le volume de l'ensemble des glaciers où se situent les prises d'eaux Alpiq est de ce fait pertinente. Malgré les incertitudes des modèles d'altitudes et de la bathymétrie sous la glace, c'est une méthode qui est efficace pour calculer le volume glacier de manière rapide et à large échelle, ce qui apportent des données utiles qui

permettront ensuite des modélisations plus développées de fonte de glacier individuelle en terme de bilan de masse, qui prennent en compte les phénomènes de dynamique de glace tels que l'ablation (Mölg, T., 2004) ou la sublimation, qui s'avère être un processus majeur de fonte des glaces (Bliss et al, 2017). Les résultats obtenus sur la perte de volume glaciaire s'élèvent donc à 23%, ce qui semble cohérent avec les dernières études effectuées sur la fonte des glaciers suisses. A titre de comparaison, Farinotti and al. (2009) ont calculé une perte de volume à hauteur de 12% entre 1999 et 2008, tandis que les données fournies par Glamos indiquent une fonte d'environ 30 % entre 1995 et 2016 sur l'ensemble des glaciers suisses (OFS, 2022, annexe 2). Les résultats de ce rapport démontrent que la perte de volume varie grandement entre les glaciers. Le glacier le plus volumineux de cette étude, à savoir le glacier d'Aletsch, a perdu seulement 13% de son volume entre les deux périodes alors que d'autres glaciers au volume moins élevés ont subi des pertes allant jusqu'à 89%. De ce fait, il se trouve que la fonte impacte davantage les petits glaciers. Cela correspond aux conclusions d'études scientifiques faites sur le sujet, qui considèrent que les phénomènes d'ablation augmentent plus vite que la diminution d'épaisseur totale, de ce fait les glaciers avec une épaisseur plus grande tendent à avoir une réponse de fonte plus lente (Bahr et al., 1998). Une autre explication potentielle de la différence entre les 30% de fonte obtenus et les résultats de cette étude est que la plupart de nos glaciers sont exposés sur la face nord, dans les Alpes Pennines. En outre, d'autres parties des alpes suisses ont des expositions côté sud, notamment les Alpes bernoises, ce qui peut potentiellement influencer la vitesse de fonte de part la radiation solaire (Nussbaumer et al., 2011). Cependant, afin de pouvoir parfaitement valider le modèle, il faudrait comparer la perte de volume d'un glacier sur la même période avec des données officielles. Les couches créées permettront néanmoins à Alpiq de connaître les différents rythmes de fontes selon les prises d'eaux concernées, ainsi que le pourcentage de glaciation par bassin versant.

Le modèle Water Yield permet une spatialisation des zones qui fournissent le plus d'eau à l'échelle d'un bassin versant. Le modèle appliqué aux bassins versants de la Gougra et Navisence démontre que les zones où le rendement de l'eau est le plus fort sont les arêtes des versants ainsi que la zone glaciaire, où l'évapotranspiration est la plus faible. L'avantage de ce modèle est qu'il ne prend pas en compte les apports liés à la fonte annuel des glaciers. Pour la société Alpiq, il est de ce fait intéressant de comparer leurs données collectées aux niveaux des prises d'eau à l'échelle de l'année et de comparer avec les résultats des modèles.

La différence obtenue peut être un dû à la fonte des glaciers. Cependant, comme tous modèles hydrologiques, le modèle InVEST n'est pas parfait et essaie de simplifier au maximum les influences et composantes du modèle. En premier lieu, les données sont basées sur des moyennes annuelles, de ce fait les extrêmes ne sont pas pris en compte et les différences saisonnières non plus. De plus, les données de précipitations sont basées sur la période 1970 à 2000. Étant donné que le régime hydrologique et les précipitations ont tendance à augmenter dans les régions de haute altitude (Dahri et al., 2021), les résultats du modèle peuvent s'éloigner des données empiriques actuelles. Il en va de même avec le facteur d'évapotranspiration, dont les données se basent sur la période 1970-2000. En outre, les couches Roots depth, plant available water content et la couche de couverture des sols ne prennent pas en compte les caractéristiques du sol de manière détaillée, comme la formation géologique précise par exemple. Il serait intéressant néanmoins de comparer le modèle avec des données empiriques pour se faire une idée de sa précision, bien que des études aient démontré que le modèle concordait avec des données de terrain (Hamel & Goswa, 2014).

5. CONCLUSION

Ce rapport a mis en évidence une technique de modélisation de l'épaisseur des glaciers à partir de données SIG, à savoir des modèles d'altitude, l'altitude de la roche mère et la surface des glaciers. Cette technique permet des résultats à large échelle de manière relativement précise et rapide. Les résultats obtenus, qui démontrent une perte de volume glacier de 23% entre 1995 et 2016, reflètent une différence avec les données du Glamos (Annexe 4) sur l'ensemble des glaciers suisses à la même période, mais qui sont quand même en concordance sachant que cette étude se focalise sur certains glaciers en Valais uniquement. Cela signifie que l'utilisation du SIG s'avère être une bonne technique amenée à être de plus en plus utilisée au fur et à mesure que les modèles altimétriques deviennent précis. Il est cependant moins précis pour être utilisé rétroactivement, dû à la précision des modèles d'altitude. L'utilisation du modèle InVEST a permis de déterminer le rendement annuel de l'eau à l'échelle des bassins versants de la Gougra et Navisence. Ces modèles, qui n'incluent pas les apports provenant de la fonte des glaciers, pourront être mis en comparaison avec les données récoltées sur les prises d'eaux d'Alpiq. La différence entre les données peut servir d'indicateur de la contribution glaciaire aux apports hydriques sur les bassins versants modélisés. Ces deux méthodes sont vouées à être reproductibles pour tous les glaciers à l'échelle du monde.

6. RÉFÉRENCES

Articles scientifiques :

Bahr,D., Pfeffer,W., Sassolas,C., Meier,M., (1998). Response time of glaciers as a function of size and mass balance : 1. Theory, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* Volume 103, Issue B5, p. 9777-9782

Bliss,A., Cuffey K., Kavanaugh, J., (2017). Sublimation and surface energy budget of Taylor Glacier, Antarctica., *Journal of glaciology, Volume 57, Issue 204*, pp. 684-696.

Christian Vincent, (2010). L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins. *Sciences de la Terre. Université de Grenoble*, Français.

Dahri Hussain Z. et al. (2021). Climate change and hydrological regime of the high-altitude Indus basin under extreme climate scenarios, *Science of the Total Environment* 768.

Giuliani, G.; Rodila, D.; Külling, N.; Maggini, R.; Lehmann, A. (2022). Downscaling Switzerland Land Use/Land Cover Data Using Nearest Neighbors and an Expert System. *Land*,11

Grab, M., et al. (2021). Ice thickness distribution of all Swiss glaciers based on extended ground penetrating radar data and glaciological modeling. *Journal of Glaciology*.

Farinotti,D. et al., (2009) An estimate of the glacier ice volume in the swiss alps, *Global and Planetary change* 68, p.225-231.

Hamel,P. & Guswa,A.,(2014), Uncertainty analysis of a spatially-explicit annual water-balance model : case study of the Cape Fear catchment,NC Hydrol Earth Syst., Sci, Discuss, 11, 11001-11036.

Nussbaumer, S. et al. (2011)S.Alpine climate during the holocène: a comparison between records of glacier, lake sédiments and solar activity, *The journal of quaternary sciences*, 10-456

Mölg,T., Hardy,D., (2004)., Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on kilimandjaro, *Journal of geophysical research, Atmospheres* Volume 109.

OFEV (éd.) 2021 : Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux. *Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 2101 : 134 p.*

VAW (2022), 21 st century glacier and run off glacier and run off évolution on yearly , daily , and ourle time scale in the catchments of Glacier de Moiry, Turtmannletscher, Glacier de Zinal, 8005-Vaw,2022,03

Zemp, M. et al., (2015) Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology* 61(228), 745–762.

Sites Internets :

ALPIQ, 2022, Chaque goutte compte, <https://www.alpiq.com/fr/groupe-alpiq/medias/news-articles/news-stories-detail/chaque-goutte-compte> (consulté le 30 septembre 2023)

CGIARCSI, <http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database> (consulté le 24 septembre 2023)

Confédération Suisse, <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/fr/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html> (consulté le 4 octobre 2023)

Erlebnis Geologie, Geo-wanderung im Drumlinzirkus von Schwand (Menzingen), <https://erlebnis-geologie.ch/geoevent/geo-wanderung-im-drumlinzirkus-von-schwand-menzingen/> (consulté le 30 septembre 2023)

Hydroshed, <http://hydrosheds.org/page/hydrobasins> (consulté le 24 septembre 2023).

IIASA, <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/> (consulté le 24 septembre 2023)

ISRIC, <http://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/82f3d6b0-a045-4fe2-b960-6d05bc1f37c0> (consulté le 24 septembre 2023)

Natural Capital Project. InVEST 3.14.0. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences, <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest> (consulté le 30 septembre 2023)

OFS, <https://www.bfs.admin.ch/asset/fr/23747305> (consulté le 30 septembre 2023)

WorldClim, <http://worldclim.org/version2> (consulté le 24 septembre 2023)

Sources des données :

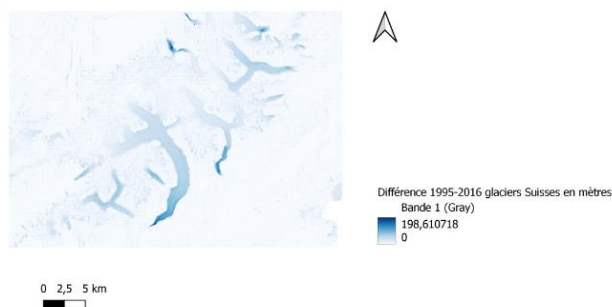
Bassins versants, Hydrographie swissalti 3D et lacs : map.geo.admin.ch

Modèles d'altitudes Swisstopo 3D et MNT25 : swisstopo.admin.ch

Superficie des glaciers en 1973 et 2016 et modèle d'altitude de la roche mère : <https://doi.glamos.ch/#glrep>.

7. ANNEXE

1) Différence d'altitude 1995 à 2016 pour les glaciers suisses en mètres

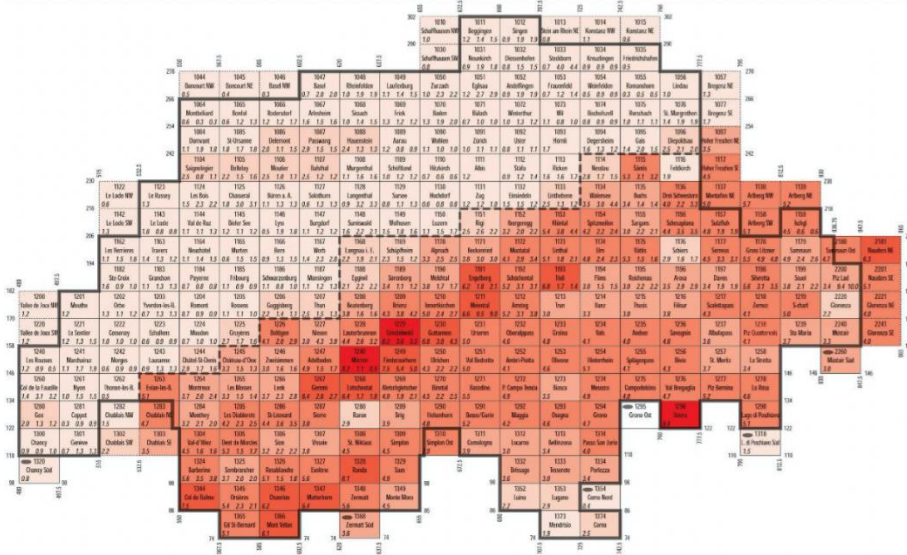


2) Différence de superficie entre les Glaciers Alpiq 2016 et 1973



■ Glacier Alpiq 2016
■ Glaciers Alpiq 1973

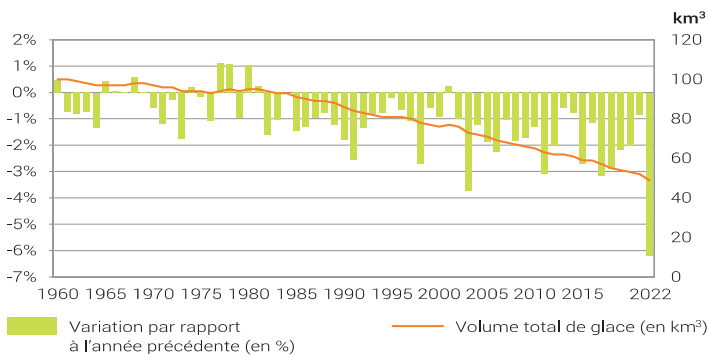
3) Estimations sur la précision du MNT25



4) Perte de volume des glaciers suisses entre 1960 et 2022

Volume des glaciers suisses

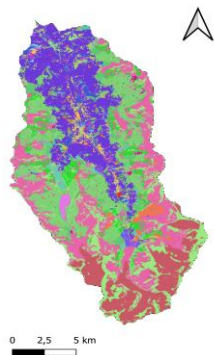
selon l'année hydrologique (du 1^{er} octobre au 30 septembre)



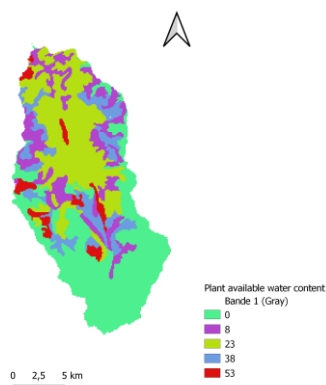
Source: GLAMOS

© OFS 2022

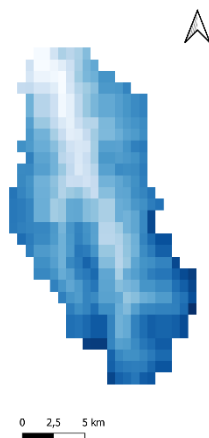
5) Couches du modèle Water Yield extraites sur la superficie du bassin versant de la Gougra



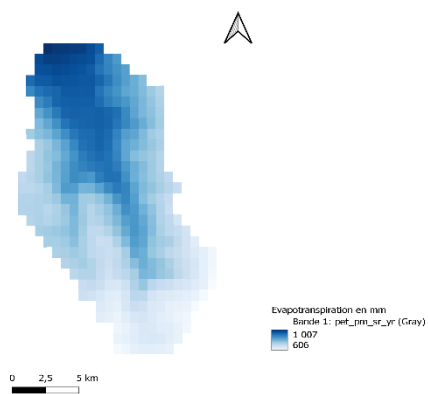
Land cover



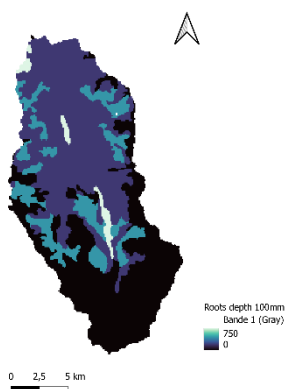
Plant available water content



Precipitation



Evapotranspiration



Roots depth