

UFR Science Espace Société,  
Département de Géographie, Aménagement et Environnement

Mémoire de stage en vue de l'obtention du M1 GAED,  
Parcours Gestion et Evaluation des environnements Montagnards (GEMO)

# Cartographie géomorphologique du bassin-versant du glacier du Khumbu (Himalaya)

Présenté par :

Damien GAUDILLERE

22001306



*Everest (à gauche ; 8848 m) et Nuptse (à droite ; 7861 m)  
vus depuis l'Ouest (ph. : X.Cailhol, 2022).*

Sous l'encadrement de :

**P. DELINE** et **L. RAVANEL**, Laboratoire EDYTEM (USMB-CNRS, Le-Bourget-du-Lac)

**E. CHAPRON**, Enseignant-chercheur référent (UT2J, Toulouse)



## Résumé :

Le bassin versant du Khumbu, dans le Parc National de Sagarmatha (Népal), est un site majeur pour le tourisme sportif avec l'ascension de certains des plus hauts sommets du monde dont l'Everest (8848 m) et des treks de haute-altitude. Victime de son succès, il porte les stigmates d'un tourisme de masse apportant son lot de conséquences pour les populations locales : contamination de l'eau par les déchets (humains et matériels), dégradation des sentiers en raison d'une surfréquentation, et des conditions de travail de plus en plus dangereuses imposées par les clients.

L'équipe *Morphodynamiques* du laboratoire EDYTEM s'est positionnée pour étudier cette région sous l'angle de la pollution générée par les expéditions et celui des impacts du changement climatique sur la stabilité des parois glaciaires et rocheuses.

C'est dans ce contexte que m'a été confiée la réalisation d'une carte géomorphologique à l'échelle du bassin de l'actuel glacier du Khumbu. Il est composé de six bassins se rejoignant en un seul glacier de vallée au niveau de Gorak Shep. Le glacier est long de 32km, d'une largeur variant de 600m à plus de 1 km. Le bassin a une superficie de 80 km<sup>2</sup>. L'objectif de ce travail est de rassembler des données déjà disponibles et d'effectuer de nouvelles interprétations concernant les glaciers et les formes et formations géomorphologiques de cette région emblématique des paysages de très hautes montagnes.

Les données ont été intégrées dans le Système d'Information Géographique QGIS. Il s'agit d'images satellites récentes ainsi que d'une acquisition LiDAR d'une partie de la zone d'étude (2019).

La carte géomorphologique présente l'état quasi actuel du bassin du Khumbu, permettant une comparaison diachronique avec de plus anciennes images satellites ou photographies terrestres. On y voit un recul progressif des glaciers non-couverts aux profits des glaciers couverts, l'ancienne On observe la libération des moraines datant probablement du Petit Âge Glaciaire associée au retrait glaciaire, un développement de la couverture détritique des glaciers, ou encore la transition de la partie basse du bassin vers un modèle fluvio-glaciaire avec ces mêmes moraines percées de brèches

**Mots clés :** carte géomorphologique, glaciers blancs, glaciers couverts, glaciers rocheux, bassin du Khumbu, Everest, Himalaya

## Abstract :

The Khumbu basin is located in the Sagarmatha National Park (Nepal). It is known as the highway to the Everest (8848 m a.s.l.). It is seen as a victim of its own success, as it carries wounds related to a mass tourism effect. This draws consequences to local populations : water contamination caused by human and material wastes, trail degradations by the trampling of tourists, working conditions made worse each year because of the demands of clients.

The *Morphodynamics* team of the EDYTEM laboratory is about to study the pollution linked to this tourism, but also the effects of global warming on glaciers and rock walls.

My main objective of this work was to build a geomorphological map scaled to the drainage basin of the Khumbu glacier. It is composed of six majors areas which meet at Gorak Shep. The glacier is 32km long, from 600m to 1 km wide. The basin has an area of nearly 80 km<sup>2</sup>. The aim of the work is to gather already produced data with new interpretations on glaciers, forms and landforms of this region and its emblematic high mountains landscapes.

Data has been collected by linking recent satellite images with a LiDAR acquisition (2019) imported in QGIS.

The geomorphological map shows the current state of the Khumbu basin, allowing to analyse it diachronically using former satellite views or photos taken on site. As a result, we see that clean glaciers are slowly yielding ground to debris-covered glaciers ; we can also spot the former extension of the glaciers thanks to the moraines probably built during the Little Ice Age ; we could even formulate the hypothesis that the lower part of the basin is slowly migrating towards a fluvio-glacial model, with those moraines being perforated by breaches.

**Key words :** geomorphological map, clean glaciers, debris-covered glaciers, rock glaciers, Khumbu basin, Everest, Himalaya

## Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mes deux tuteurs, Ludovic et Philip, pour la façon qu'ils ont eu de m'initier à la recherche en montagne. À défaut de me rendre à Katmandou, j'ai quand même pu me déplacer jusqu'à Chambéry pour partager un moment d'escalade, de partage autour des sciences de la montagne avec de réels passionnés. Je voudrais aussi noter leur patience et leur façon de transmettre leurs connaissances : j'ai en effet plus souvent été confronté à des cônes de déjection qu'à des glaciers rocheux, je tâcherai cependant de ne plus les confondre !

Merci à Etienne Berthier de m'avoir donné accès aux indispensables images satellite Pléiades © CNES 2017, Distribution AIRBUS DS en plus d'articles sur le Khumbu

Merci à Emmanuel, mon tuteur à Toulouse, pour m'avoir mis sur leur chemin : tu m'as transmis la fibre savoyarde, j'ai hâte de m'y exiler un temps (sans jamais renier mon Pyrénéisme).

Merci à Lorène, compagnon de galère, sans qui les données LiDAR auraient eu ma peau : ce serrage de coude tout le long de ce stage a très certainement joué un rôle dans sa bonne réalisation.

Enfin, merci à ma fratrie : merci à Yón et Isia, mes deux petits frères et sœurs au grand cœur pour ces « après-midi décompression ». Et puis Louise, qui de quatre ans mon aîné était pourtant elle aussi en plein rush de mémoire.

# Sommaire

Introduction.....	6
I) Contexte du stage.....	8
1.1. Présentation du laboratoire.....	8
1.2. Présentation des objectifs de stage.....	9
1.3. Contexte géographique du Khumbu.....	10
II) Cadre théorique.....	13
2.1. La cryosphère de haute-altitude.....	13
2.2. Quelques évolutions récentes du bassin du Khumbu.....	16
III) Cadre méthodologique.....	21
3.1. Données disponibles et produites.....	21
3.2. Méthode de la cartographie géomorphologique.....	24
3.3. Traitements statistiques.....	27
IV) Résultats.....	28
4.1. Présentation des résultats.....	28
4.2. Analyse par secteur.....	30
4.2. Analyses statistiques.....	33
V) Discussion.....	34
5.1. Critiques et perspectives.....	34
5.2. Retour d'expérience.....	34
5.3. Lien avec le Master.....	36
Conclusions.....	37
Bibliographie.....	38
Annexes.....	44

# Introduction

La haute montagne et sa pratique sont victimes de l'emballement d'un modèle de fréquentation de la montagne apparu au siècle dernier : dès les années 1980, le pratiquant est « considéré comme un client, un consommateur » pour qui les activités deviennent « des produits où il s'agit de proposer des services sous forme de prestations dans la perspective de développer le marché des loisirs sportifs de nature » (Corneloup, 2004). Ce constat fait consensus que ce soit à travers l'étude des refuges pyrénéens (Hoibian, 2020), la dégradation de sentiers montagnards (Tomczyk, 2023), ou l'impact général des pratiques sportives sur l'environnement (Mounet, 1994). Cette problématique s'inscrit dans un contexte où la science rend compte d'un réchauffement accru de la planète depuis quelques décennies. Or, la montagne fait partie des milieux naturels les plus sensibles et les plus touchés du globe (cycle de l'eau, permafrost, glaciers, ...).

La géomorphologie renvoie à une discipline spécialisée dans l'étude des modelés visibles à la surface terrestre, issus de différents processus d'érosion. Elle mélange ainsi « *géologie, hydrologie, pédologie, agronomie et géographie des paysages* » (définition de *Géoconfluences*, ENS Lyon). Dans le cadre de ce rapport de stage, le terme de géomorphologie est associé à la cartographie puisque l'objectif a été de réaliser une cartographie du bassin de l'actuel glacier du Khumbu situé au pied du mont Everest (8848 m, Himalaya népalais). Cet exercice, inédit à notre connaissance pour ce secteur, sert plusieurs intérêts. La carte sera un outil de base pour l'étude morphodynamique de la région en amont d'une expédition programmée en 2025. Elle constituera également une 'photographie' actuelle de l'englacement et des processus géomorphologiques.

Le contexte de changement climatique évoqué plus tôt a amené de nombreux chercheurs à s'intéresser aux vallées entourant l'Everest : il existe des dizaines d'articles sur leurs glaciers, leur taille et évolution dans le temps. Ma tâche a été de rassembler l'ensemble de ces données, de les compiler et les analyser afin de créer une carte géomorphologique les synthétisant en plus de très nombreuses observations à partir d'imageries satellites et d'un MNT récent. Cette requête s'inscrit dans la démarche du projet *NeverRest*, porté par le géologue et guide de haute montagne grec Michael Styllas. Ce projet a pour but de documenter les niveaux de pollution sur et autour du glacier du Khumbu, de créer des camps auto-suffisants du point de vue énergétique (dont le camp de base de l'Everest) et moins polluants que ceux actuels, et les moins exposés possibles aux risques glaciaires et périglaciaires que la crise climatique tend à accroître.

Ce stage a été réalisé sous la supervision de deux chercheurs du laboratoire EDYTEM<sup>1</sup>, une Unité Mixte de Recherche créée en 2003 par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Université Savoie Mont-Blanc (USMB). Les équipes de ce laboratoire situé au Bourget-du-Lac (73) se partagent des thématiques liées aux problématiques sociales et environnementales des milieux montagnards.

Nous allons donc par ce dossier chercher à répondre à la problématique suivante :

---

1 Environnement, **D**Ynamiques et **T**erritoires de **M**ontagne (CNRS-Université Savoie Mont Blanc)

***De quelles formes et formations géomorphologiques et glaciaires est composé le bassin du Khumbu, et comment ces formations peuvent servir de marqueurs du changement climatique dans l'une des grandes vallées glaciaires de l'Himalaya ?***

Ce mémoire comprend parties. Dans un premier temps, nous poserons plus en détail le contexte du stage à travers une description de la structure, des objectifs du stage, et de son importance pour l'équipe *Morphodynamiques* du laboratoire EDYTEM. Une présentation du secteur d'étude sera aussi proposée.

En deuxième lieu, nous dresserons le cadre théorique de ce travail à travers un panorama des milieux de très haute montagne englacée face au réchauffement climatique. Un état de l'art sur l'espace d'étude sera également proposé. Il traitera notamment de la surfréquentation de la vallée du Khumbu et des processus géomorphologiques qui la caractérisent.

La troisième partie sera consacrée au cadre méthodologique de la cartographie géomorphologique. Elle sera agrémentée d'un calendrier des tâches réalisées tout le long du stage.

La pénultième partie présentera les résultats obtenus ainsi que leur analyse, en mettant en avant l'état actuel du bassin et son évolution sur les dernières années.

Enfin, la dernière partie servira de retour d'expérience et mettra en lumière les apports et limites du stage. Nous ferons un parallèle entre le stage et la formation du Master GEMO, à travers les compétences qu'elle m'a permises d'utiliser. Nous proposerons enfin une ouverture sur les perspectives pour la zone d'étude.

# I) Contexte du stage

## 1.1. Présentation du laboratoire

Le laboratoire EDYTEM a vu le jour en 2003, avec deux tutelles, celle du Centre Nationale de la Recherche Scientifique (CNRS) et celle de l'Université-Savoie-Mont-Blanc (USMB), dans le but développer des travaux en géosciences et sciences humaines et sociales sur la montagne.



### Laboratoire Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne

Il se situe sur le campus de Savoie Technolac au Bourget-du-Lac (Delannoy, 2014), où il regroupe un ensemble d'acteurs de la recherche, qu'ils soient doctorants, contractuels, chercheurs, enseignants-chercheurs et autres personnels d'appui à la recherche.

Le laboratoire regroupe environ 70 permanents regroupés en quatre équipes de recherche (Figure 1) :

- **Matières**
- **Sociétés**
- **Zone critique**
- **Morphodynamiques**

Cette dernière est dirigée par Ludovic Ravel et Yann Rolland. Elle est spécialisée dans les « *processus et dynamiques de la géomorphologie* », ce qui se traduit par plusieurs axes de recherche dont :

- Évolution des reliefs à différentes échelles de temps
- Réponses aux changements climatiques passés et actuels
- Impacts sur les sociétés
- Caractérisation et cartographie de la géomorphodiversité
- Modèle géomorphologique lié aux actions anthropiques et gestes culturels

L'équipe se partage principalement les domaines d'étude de la haute montagne et des milieux karstiques dont les évolutions actuelles sont contrôlées par des processus thermiques, physico-chimiques, hydro-dynamiques, et mécaniques des structures géologiques. Les objets d'étude se situent à l'interface entre couverture neigeuse, glaciaire et permafrost pour la montagne, et réseaux karstiques, milieu géologique et environnement extérieur pour les systèmes souterrains. La nature lithologique, l'anisotropie, l'état de fracturation et les conditions bio-climatiques contrôlent l'évolution des modelés géomorphologiques.

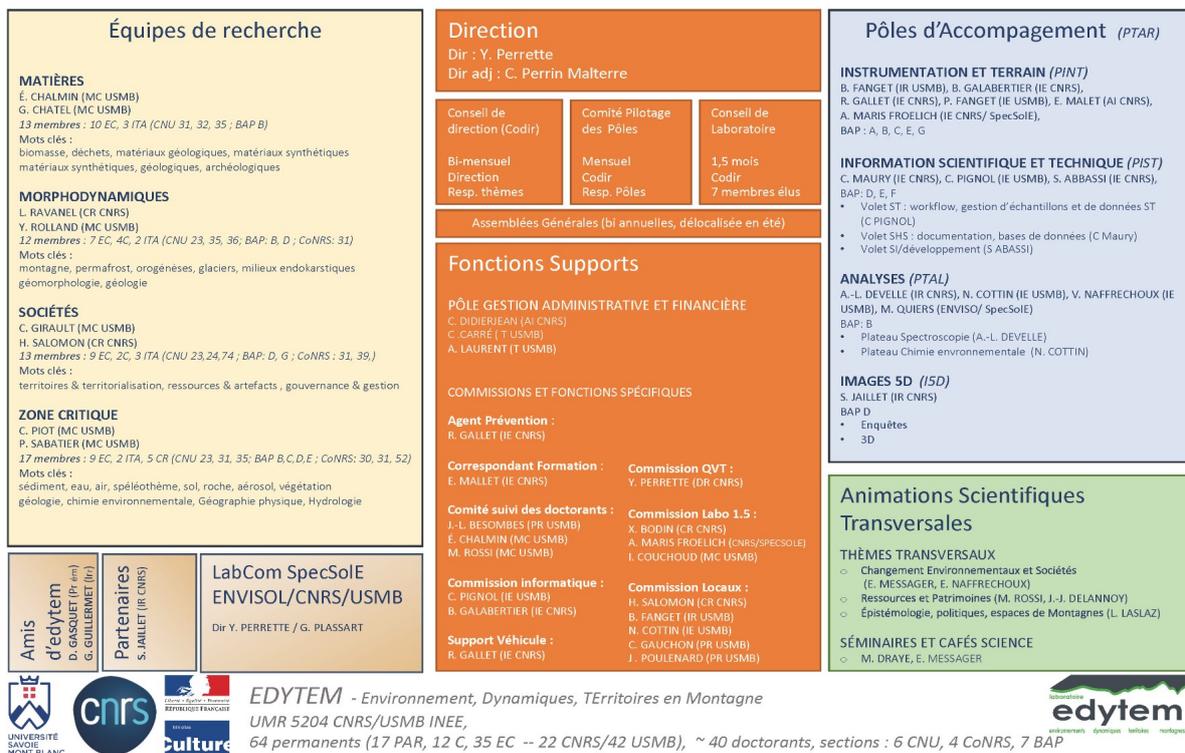


Figure 1 : Organigramme du laboratoire EDYTEM (<https://edytem.osug.fr>).

## 1.2. Présentation des objectifs de stage

### 1.2.1. Le Khumbu : espace de sciences

Mon stage s'intègre dans le projet *NeverRest*<sup>2</sup>. Le laboratoire s'est manifesté pour rejoindre celui-ci afin d'étudier les risques sanitaires, connus notamment dès 2021 avec la parution d'un article sur la détection de PFAS dans les eaux de fusion de l'Everest (Miner *et al.*, 2021), à travers la reconstitution d'une chronique des pollutions produites par les expéditions (étude de carottes lacustres et glaciaires) ainsi que les risques liés aux instabilités glaciaires et rocheuses. *NeverRest* s'inscrit dans la continuité d'une expédition financée par *National Geographic* et *Rolex : Perpetual Planet* (2019) Ce projet s'est partiellement soldé par un échec : la première station météorologique installée à 8400 m d'altitude a cessé d'émettre des données à peine sept mois après son installation. Une autre station a été mise en place à 50 m du sommet au printemps 2022<sup>3</sup>.



Figure 2 : Station météorologique à Bishop Rock 8810 m, Everest, Mai 2022 (source : National Geographic).

<sup>2</sup> <https://theneverrestproject.org/>

<sup>3</sup> <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/perpetual-planet-une-station-meteo-vient-detre-installee-a-50-metres-du-sommet-de-leverest>

### 1.2.2. Les missions d'EDYTEM

Le projet *NeverRest* a proposé à EDYTEM de participer à une mission de carottages lacustres et glaciaires dans le bassin du Khumbu. Le premier objectif est relatif aux risques sanitaires au regard de l'essor de l'activité touristique de la zone depuis les années 1970. Les camps de base génèrent beaucoup de déchets, abandonnés sur place ou brûlés. Faisant écho aux spécialités du laboratoire, ces carottages seraient effectués pour reconstituer des chroniques de pollution, dans le glacier du Khumbu pour les pollutions directes, dans les sédiments lacustres pour les retombées atmosphériques (brûlage des déchets)..

La seconde partie de la mission serait orientée sur les risques pour les expéditions liés à l'évolution du permafrost et des glaciers dans le bassin du Khumbu (avalanches de séracs, déstabilisation des glaciers suspendus, écroulements rocheux). Pour pouvoir mieux comprendre ces phénomènes, plusieurs suivis seront mis en œuvre : stations météorologiques, capteurs de température dans les glaciers suspendus et les parois rocheuses, appareils photo automatiques, etc. Le laboratoire a déjà pu traiter des sujets connexes à l'occasion par exemple du projet ANR *WISPER* (2020-2024) visant à «appréhender le rôle de l'eau dans le permafrost des parois à permafrost [...] et dans le déclenchement des écroulements rocheux en haute montagne»<sup>4</sup>.

## 1.3. Contexte géographique du Khumbu

La zone d'étude dans laquelle s'inscrit ce stage est située au Népal (Figure 3), à proximité de la frontière chinoise, dans la chaîne de l'Himalaya. Elle est située dans le Parc National de Sagarmatha (Figure 4).

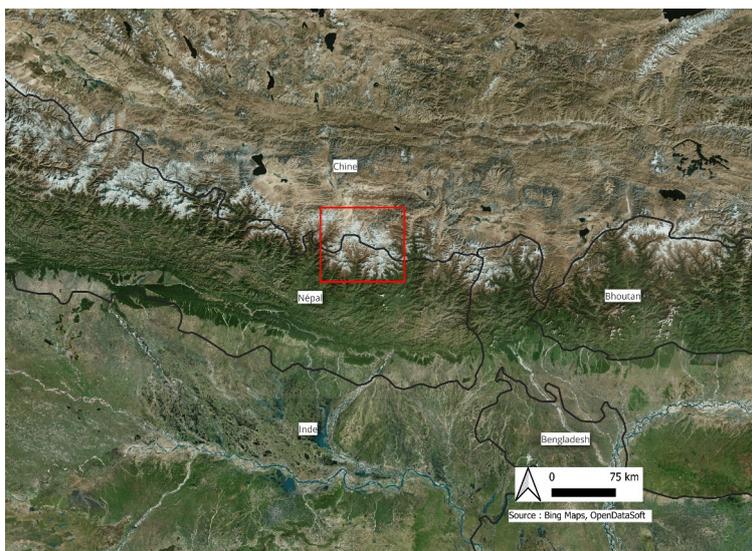


Figure 3 : Zone d'étude à l'échelle nationale.

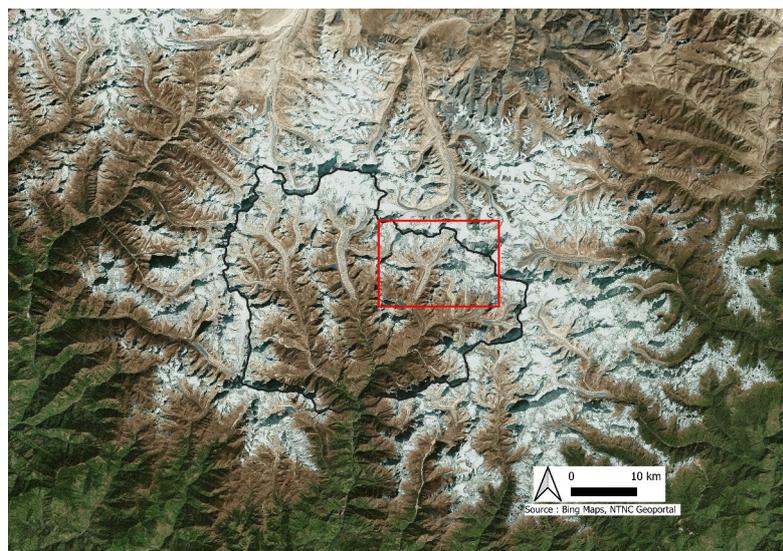


Figure 4 : Zone d'étude à l'échelle du Parc National de Sagarmatha, Népal.

<sup>4</sup> <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE01-0018>

Le glacier du Khumbu s'étend sur une superficie de 19 km<sup>2</sup>, à une altitude comprise entre 7800 et 4900 m (Bartlett *et al.*, 2020), depuis le cirque situé au Sud de l'Everest jusqu'au bastion morainique frontal. L'Everest est le plus haut sommet du monde, avec une altitude de 8848 m d'altitude. Le cirque est par ailleurs formé par les pentes ouest du Lhotse (8516 m) et le versant est du Nuptse (7861 m). Le bassin est le théâtre de très nombreuses expéditions vers ces sommets : leur itinéraire le plus commun ainsi que les camps de base ont été représentés sur la Figure 5. Le glacier est composé de deux sections majeures : une allant du cirque de l'Everest à l'aval de la *Icefall*, et une autre depuis ce secteur jusqu'au front glaciaire. Elles se distinguent par le fait que la partie amont correspond à de la glace propre en surface (glacier non-couvert), tandis que la partie aval est recouverte de débris rocheux (glacier couvert). Ces derniers jouent un rôle majeur dans la préservation du glacier, en agissant comme une couche isolante (Mattson *et al.*, 1993).

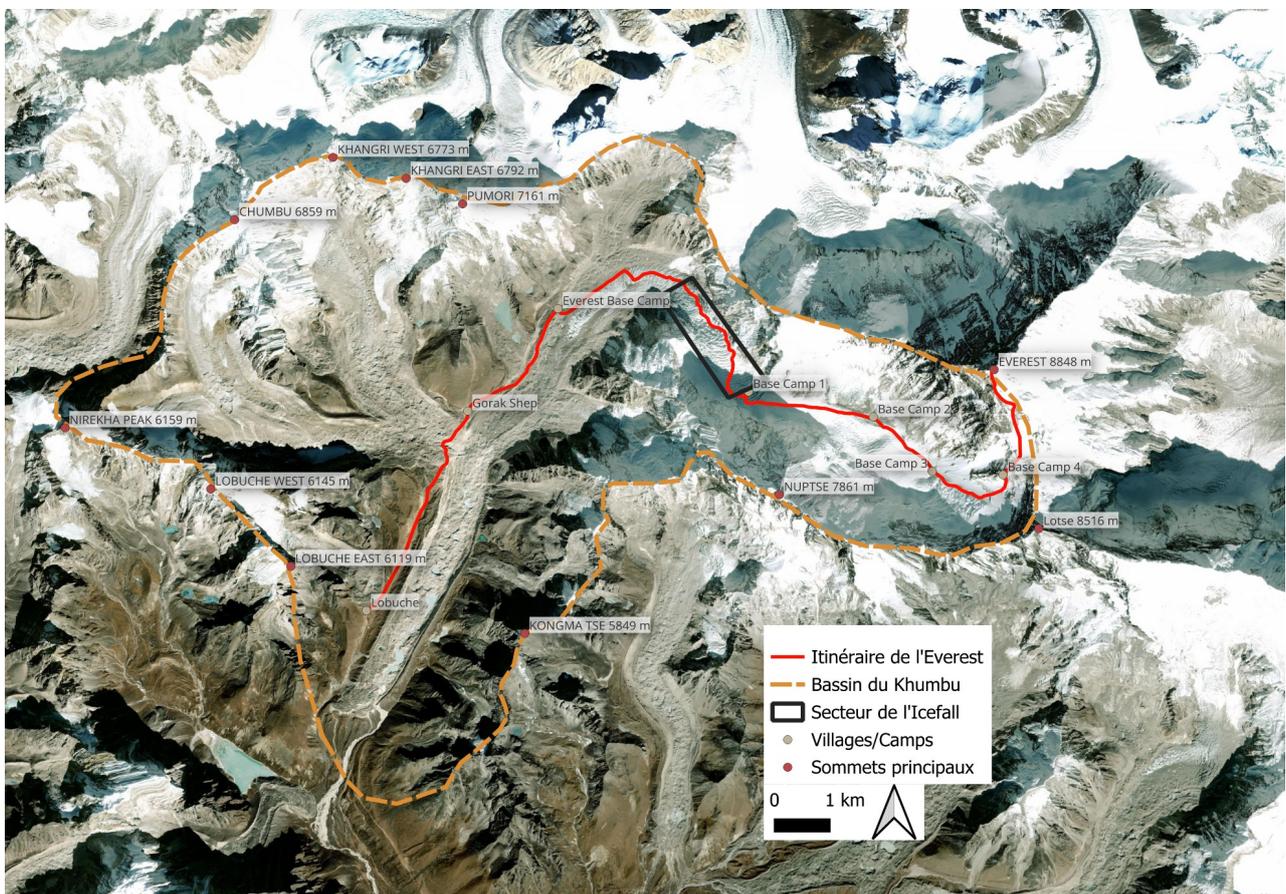


Figure 5 : Contexte local : Le bassin versant du Khumbu.

Le glacier du Khumbu est connu en particulier pour les dangers que représente la *Icefall* : à l'entrée du cirque de l'Everest, la pente augmente brusquement, menant à l'apparition d'une cascade de séracs. Elle est visible en Figure 6 qui indique des vitesses élevées d'écoulement du glacier dans ce secteur. Or, la *Icefall* est un passage obligatoire sur l'itinéraire népalais d'accès au sommet de l'Everest (Figure 5).

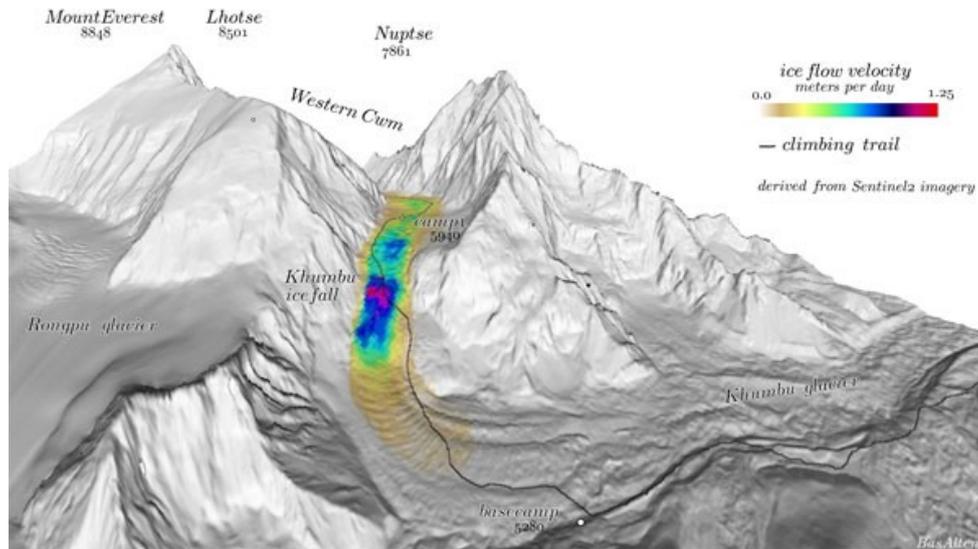


Figure 6 : Vitesses d'écoulement du glacier du Khumbu au niveau de la Icefall (Altena et al., 2020).

## II) Cadre théorique

### 2.1. La cryosphère de haute-altitude

#### 2.1.1. Typologie des appareils glaciaires

Les glaciers sont de grandes masses de glace qui se forment lorsque l'accumulation de neige est supérieure à l'ablation (fontes, déstabilisations mécaniques). Sous son propre poids, la neige expulse l'air qu'elle contient et devient de la glace, qui s'écoule par gravité. Les glaciers peuvent être différenciés selon plusieurs critères (Kaushik *et al.*, 2022) :

Les **glaciers de vallée** s'étendent de manière linéaire sur plusieurs kilomètres en pente douce ( $<15^\circ$ ) ; ils sont à l'origine des vallées en auge (ex. : glacier d'Aletsch, Figure 7a).

Les **glaciers de cirque** sont situés dans des dépressions semi-circulaires ouvertes vers l'aval. Ils suivent une pente généralement douce. Leur développement est contraint par des versants raides ( $>40^\circ$ ) (ex. : glacier des Oulettes, Figure 7b).

Les **glaciers de versant** se développent sur des pentes dépassant  $15^\circ$ , et se divisent en deux sous-groupes : certains ont leur front en amont d'une rupture abrupte, on parle alors de glaciers suspendus (ex. : glacier du Mont-Perdu, Figure 7c). Le front d'autres entre en contact avec un autre glacier l'aval, ce sont des **glaciers de versant connectés à d'autres systèmes glaciaires** (CGS<sup>5</sup>, Kaushik *et al.*, 2022) comme le glacier du Mont-Blanc (Figure 8).



Figure 7 : (a.) Glacier de vallée d'Aletsch, 1600 m, Suisse (ph.: D. Beyer, 2005); (b.) Glacier de cirque des Oulettes, 2400 m, Hautes-Pyrénées (ph.: M. De Gracia, 2004) ; (c.) Glacier suspendu du Mont-Perdu, 2800 m, Province de Huesca (ph.: D. Gaudillère, 2023).



Figure 8 : Glaciers suspendus (CGS), face est du Mont-Blanc, 4806 m, Haute-Savoie (ph.: G. Yetchmeniza, 2018).

5 Connected to other Glacier Systems

Les **glaciers couverts** sont des glaciers de vallée dont la surface est couverte d'une épaisseur de till pouvant varier de quelques centimètres à plusieurs mètres, recouvrant au moins 50 % de la zone d'ablation du glacier (Kirkbride, 2022) (Figure 9a).

Les **glaciers morts** sont des volumes de glace devenus immobiles, détachés d'un système glaciaire mobile. Leur bilan de masse est donc déficitaire d'une année sur l'autre et ils finissent par disparaître (Figure 9b).

La **couverture glacio-nivale** ne présente pas de mouvement. Elle est de forme irrégulière et persiste d'une année à l'autre. Elle se différencie des tabliers de glace par le degré de la pente sur laquelle on l'observe (<35°) (Figure 9c).

Les **tabliers de glace** sont de petites parois immobiles (<0,1 km<sup>2</sup>) sur des pentes >40°. Ils ne sont pas toujours visibles à cause de la couverture de neige saisonnière (Figure 10). Ils ne sont pas directement connectés au système glaciaire à l'aval, étant séparés par la rimaye ou situés bien en amont.



Figure 9 : (a.) Glacier Noir, 2200 m, Hautes-Alpes (ph. : G. Seggebäing, 2010); (b.) Glacier mort du Boum, 2700 m, Luchonnais (ph.: P. René, 2023); (c.) Couverture glacio-nivale sur la face nord du Mönch, 4110 m, Suisse (ph.: S. Räsänen, 2012).

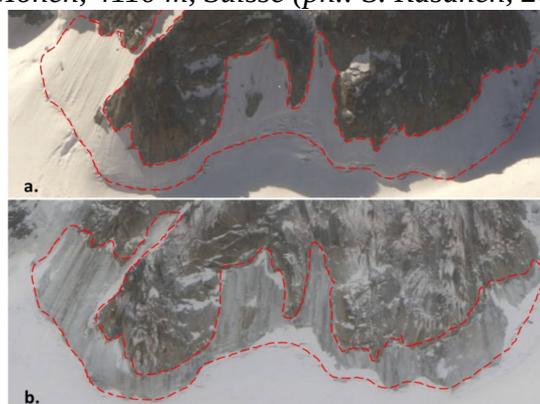


Figure 10 : a. Tablier de glace couvert de neige en août 2020 dans le Triangle du Tacul (massif du Mont-Blanc); b. tablier de glace découvert en janvier 2021 (ph.: Compagnie du Mont-Blanc).

Autour des glaciers ou dans leur continuité (Anderson *et al.*, 2018), les terrains peuvent être gelés en permanence, c'est le **permafrost**. Il s'agit d'une couche de matériaux lithosphériques dont la température reste inférieure ou égale à 0 °C durant au moins deux années consécutives. Il couvre près de 20×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> sur Terre, dont un quart en secteur de montagne (Duvillard *et al.*, 2021). Le permafrost peut affecter les parois rocheuses (Magnin *et al.*, 2015) comme les formations superficielles ou il est notamment présent au niveau des glaciers rocheux, des mélanges de glace et de débris rocheux qui fluent le long de versants (Haeberli *et al.*, 2006).

## 2.1.2. Les enjeux autour de la cryosphère de haute altitude

### La fonte des glaciers de montagne

Des études ont mis en évidence le fait que les terrains de haute montagne font partie des plus grandes victimes du réchauffement climatique. Pepin *et al.*(2015) ont montré la corrélation qui existe entre l'altitude et l'accentuation du phénomène de réchauffement observé (EDW<sup>6</sup>). Cela est dû en partie à l'albédo. En effet, la réflectance de la neige à haute-altitude limite le forçage radiatif en provenance du soleil, réduisant ainsi l'absorption de chaleur par les sols. Or, avec le réchauffement climatique, un cercle vicieux se met en place : la neige fond, réduisant la réflectance des rayons solaires qui en entrant en contact avec le sol créent une augmentation des températures. Pogliotti *et al.* (2023) vont dans le même sens.

Pour pallier ce problème, un fort albédo a été créé artificiellement sur certains glaciers alpins avec la mise en place de bâches blanches qui réduisent la fonte de 60 % (Huss *et al.*, 2021).



Figure 11 : Bâches réfléchissantes sur un glacier suisse, (ph.: M. Huss, 2021).

### Des services écosystémiques indispensables

L'étude de Cook *et al.* (2021) a répertorié l'ensemble des services écosystémiques rendus par les glaciers. Ils sont au nombre de 15, parmi lesquels :

- L'eau de consommation, d'hygiène et d'irrigation ; l'Himalaya fournit en eau plus de 2 milliards d'humains (Bandyopadhyay, 2013).
- Purification de l'eau ; lors de la transition de la neige vers la glace (diagenèse), les impuretés sont filtrées.
- L'hydro-électricité ; près de 55 % de la Suisse est alimentée en électricité venant de centrales hydrauliques situées en aval de glaciers.
- Régulation thermique ; l'albédo limite le réchauffement de la surface en renvoyant les rayonnements solaires.

---

6 *Elevation-Dependent Warming*

## 2.2. Quelques évolutions récentes du bassin du Khumbu

### 2.2.1. Évolution du bassin du Khumbu face au changement climatique

#### Retrait glaciaire

Le changement climatique impacte les glaciers y compris à haute altitude. Entre 1992 et 2008, les couvertures de débris rocheux de certaines sections du glacier ont seulement ralenti le processus de fonte (Nuimura *et al.*, 2012).

Malgré cette capacité à ralentir la fonte, la partie couverte du glacier du Khumbu a perdu entre 10 et 30 m d'épaisseur de 2000 à 2019, là où la partie supérieure du glacier n'en a pas perdu plus de 5 m, voire stagne (Berthier *et al.*, 2023).

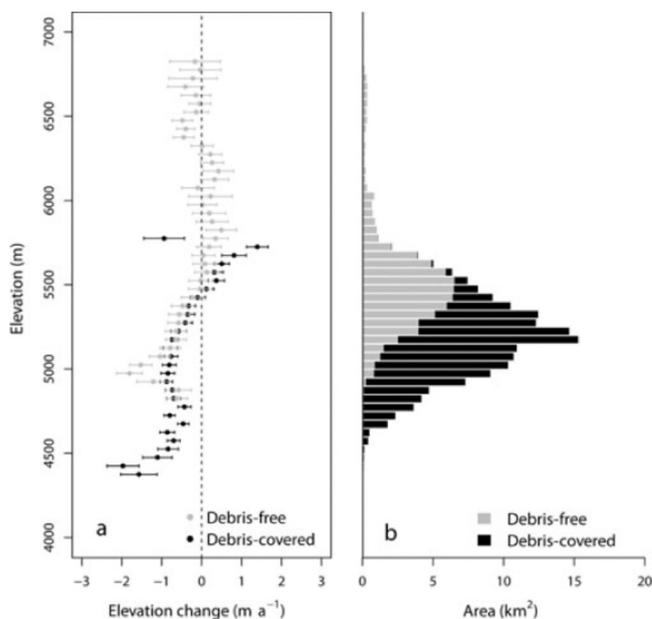


Figure 12 : Évolution de l'altitude et de la surface du glacier du Khumbu de 1992 à 2008 (Nuimura *et al.*, 2012).

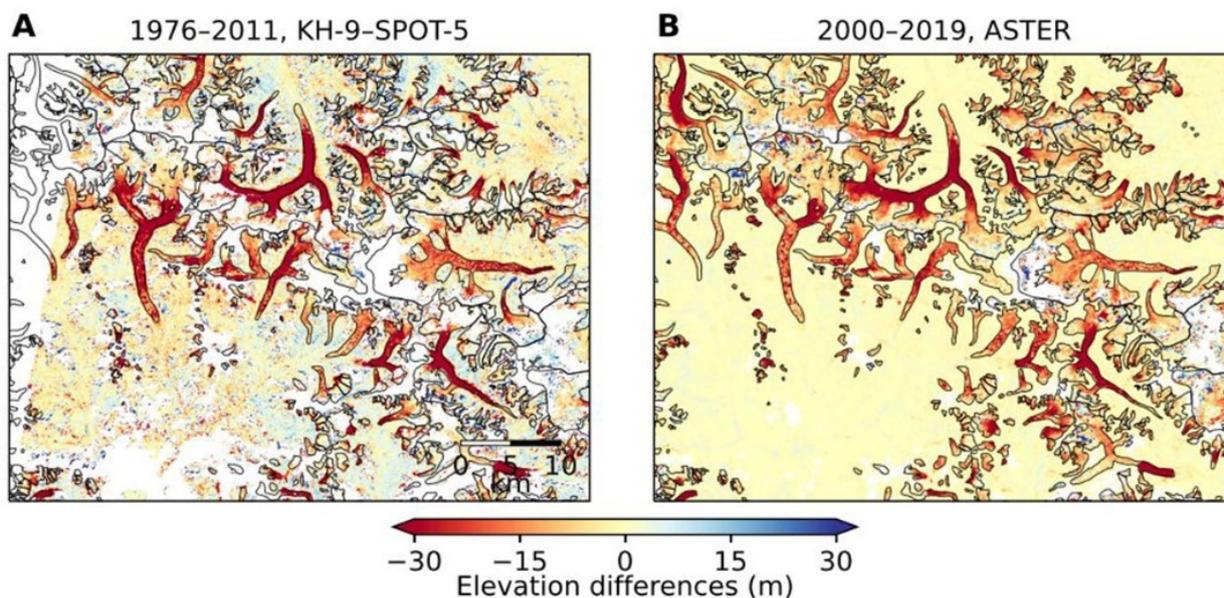


Figure 13 : Comparaison diachronique de MNT centrés sur l'Everest montrant les pertes d'épaisseur des glaciers autour de l'Everest (Berthier *et al.*, 2023).

## Glaciers rocheux

Les glaciers rocheux sont composés d'une épaisse couche de débris rocheux fluant en bourrelets et sillons convexes (Giardino *et al.*, 1987). La couche de blocs de surface isole la glace des conditions thermiques extérieures. Cette couche joue un rôle important dans le retardement de la fonte des glaciers en réduisant l'exposition du glacier aux rayonnements solaires (Jones *et al.*, 2019).



Figure 14 : Glacier rocheux au Sud du cirque du Nuptse (Google Earth, 2021).

Ces glaciers rocheux manquent encore de documentation, notamment en ce qui concerne leur teneur en glace. Leur volume équivalent d'eau est estimé à près de 20 Gt dans la chaîne de l'Himalaya (Jones *et al.* 2018).

## Lacs supraglaciaires

Les lacs supraglaciaires stockent une partie des eaux de fonte des glaciers, transportées à la surface par les « bédrières ». Ils suivent deux cycles (Zeller *et al.*, 2024) :

- À court terme, leur surface diminue pendant la mousson (mars à septembre) et augmente l'hiver. Elle a tendance à doubler d'une phase à l'autre.
- À long terme, on observe une augmentation moyenne de la surface des lacs, avec une accélération du phénomène sur la partie aval du glacier (Figure 15).

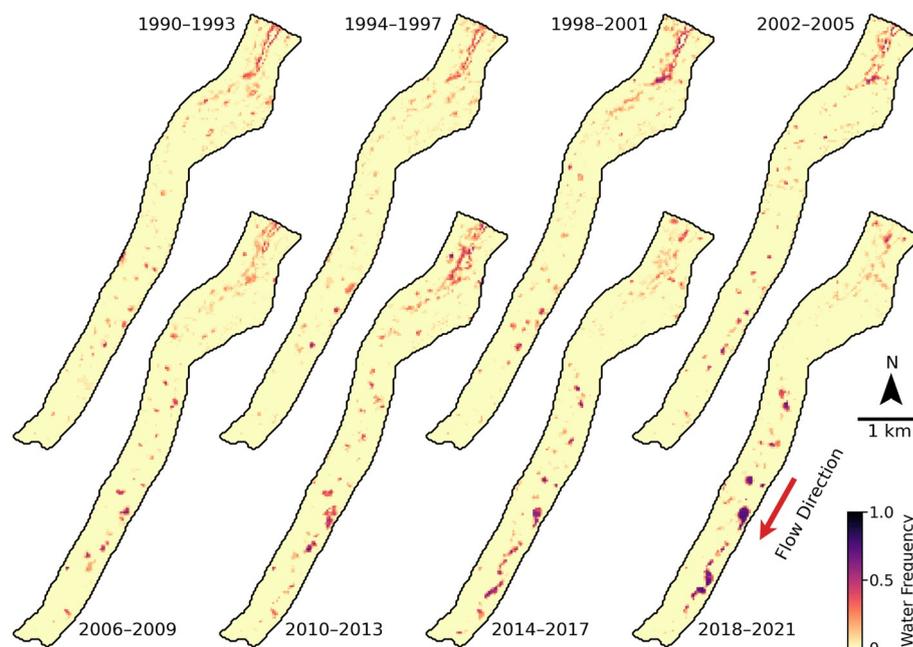


Figure 15 : Représentation de l'accumulation d'eau dans les lacs supraglaciaires de la partie aval du glacier du Khumbu, par périodes de 4 ans (Zeller *et al.*, 2024). La couleur des pixels symbolise la fréquence d'identification d'eau.

## Risques naturels

Avec le recul du glacier, de nouveaux lacs glaciaires apparaissent (Rinzin *et al.*, 2023). Les barrages retenant ces lacs peuvent céder, causant potentiellement des vidanges brutales et dévastatrices pour les populations à l'aval. Le terme de GLOF<sup>7</sup> apparaît pour la première fois sous le nom de « *jökulhlaup* » (Thórarinnsson, 1939). Le GLOF est une association de plusieurs éléments. Le barrage retenant le lac est la plupart du temps constitué de tills peu stables ou de glace. Le lac est éventuellement entouré de parois rocheuses à permafrost ou de glaciers suspendus qui, avec le réchauffement du climat, peuvent se déstabiliser. Ainsi, lorsque des masses de roche et/ou de glace tombent dans le lac, une cascade de processus s'opère : une vague se forme, détruit ou endommage le barrage, qui en cédant déverse son eau dans la vallée (Rinzin *et al.*, 2023). Un tel phénomène a eu lieu au Népal en juillet 2016 : un lac tibétain a cédé, laissant s'écouler plus de 100 000 m<sup>3</sup> d'eau dans la partie népalaise de la rivière Bhote Koshi (Khadka *et al.*, 2024).

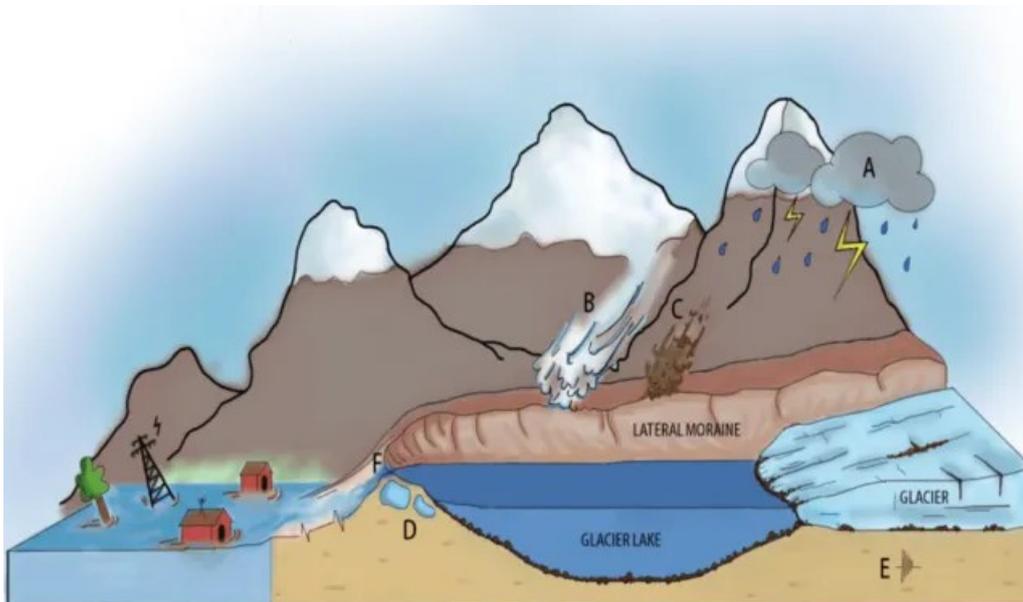


Figure 16 : Éléments menant à l'apparition d'un phénomène de GLOF et conséquences induites (Kulkarny *et al.*, 2018)  
(A) averses importantes, (B) avalanche de neige/séracs, (C) coulée de boue, (D) affaiblissement du barrage par dégradation de la moraine gelée, (E) séisme, (F) dépassement de la capacité de rétention du lac

Le bassin du Khumbu est sujet à d'autres aléas tels que les avalanches, chutes de séracs et tremblements de terre qui peuvent impacter les camps et les alpinistes (risques, Figure 21), mais aussi des risques sanitaires comme la contamination des eaux de fonte par les déchets humains et matériels liés aux expéditions (Miner *et al.*, 2020). La question de la qualité et la quantité d'eau disponible pour les populations locales se pose pour les années à venir (Qasthary *et al.*, 2022).

7 *Glacial Lake Outburst Flood*

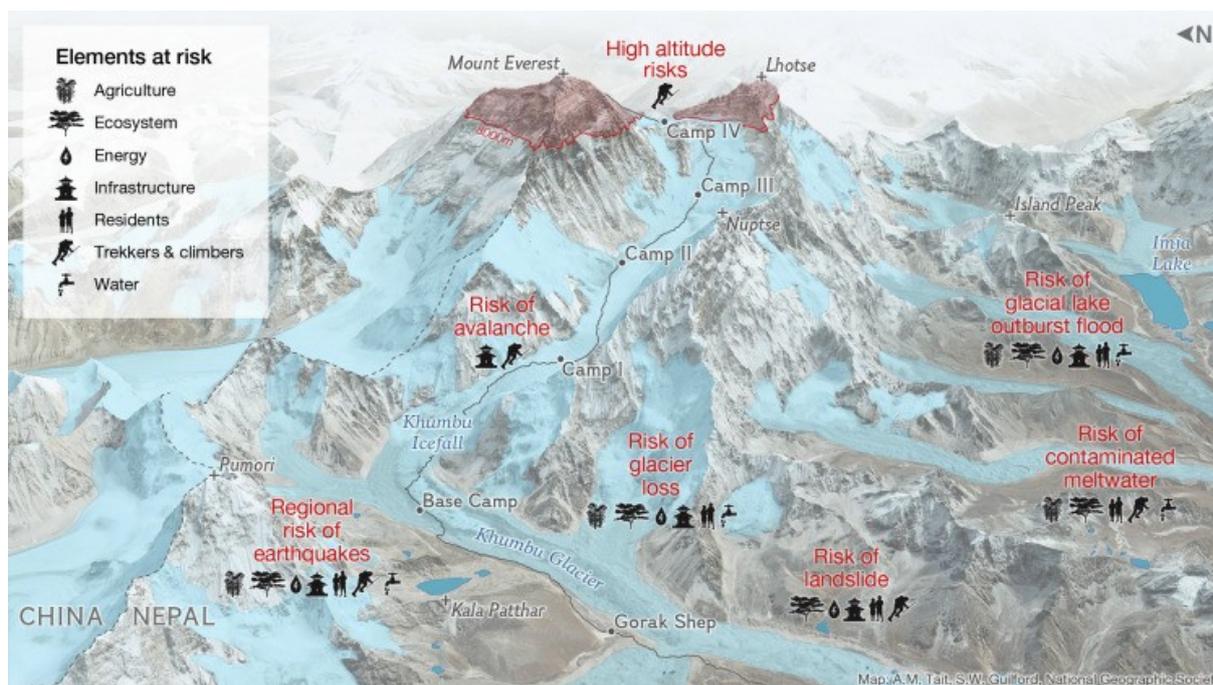


Figure 17 : Principaux risques naturels liés à la vallée du Khumbu (Miner et al., 2020).

### 2.2.2. Le tourisme himalayen

L'Everest est gravi pour la première fois en 1953 par la cordée composée de l'Anglais E. Hillary et du sherpa T. Norgay. La conquête du plus haut sommet du monde fait grand bruit, et invite d'autres expéditions à venir le gravir et l'étudier. Ce début de démocratisation marque la première fissure dans le caractère impossible et mystérieux que possédait ce secteur de très haute montagne. Dès lors, trois périodes principales se dégagent. La première, de 1953 à 1969, est appelée la « Période des expéditions ». Celle qui lui succède est qualifiée de « Période de transition » ; elle voit l'émergence d'une volonté de réaliser l'exploit, de repousser les limites de la pratique. Les expéditions se font en adoptant le style de l'alpinisme et non plus de ce qui sera plus tard qualifié d'himalayisme. La différence réside dans le fait que l'alpinisme se pratique en plus grande autonomie : pas d'oxygène, pas de corde fixe, l'évolution se fait sans laisser de traces (R. Messner en était le pionnier).



Figure 18 : E. Hillary et T. Norgay au sommet de l'Everest en 1953 (source : National Geographic).

La dernière phase démarre en 1990 et correspond à celle que nous connaissons encore aujourd'hui : la « Période commerciale » (The Himalayan Database, 2019). Les plus hauts sommets sont chaque année assaillis au printemps et à l'automne par de nombreuses cordées plus

ou moins aguerries. C'est cette période qui nous intéresse particulièrement dans le cadre du projet *NeverRest*, car c'est là qu'apparaissent les premiers impacts forts en termes de pollution et de surfréquentation<sup>8</sup>. En ouvrant l'accès à l'Everest à un plus grand nombre, les pratiques ont évolué : le camp de base se transforme en petit village de « *plusieurs centaines d'habitants* »<sup>9</sup>. Les risques naturels jouent sur la fréquentation : en 2014 et 2015, les ascensions ont été annulés à la suite d'une avalanche dans la *Icefall*, puis d'un tremblement de terre touchant le camp de base (Figure 21), faisant 35 morts ces deux années-là (Miner *et al.*, 2020).



Figure 20 : R. Messner au sommet de l'Everest en style alpin, 1978 (source : Montagnes Magazine).



Figure 19 : Surfréquentation sur les pentes de l'Everest (source : The Himalayan Times, 2021).

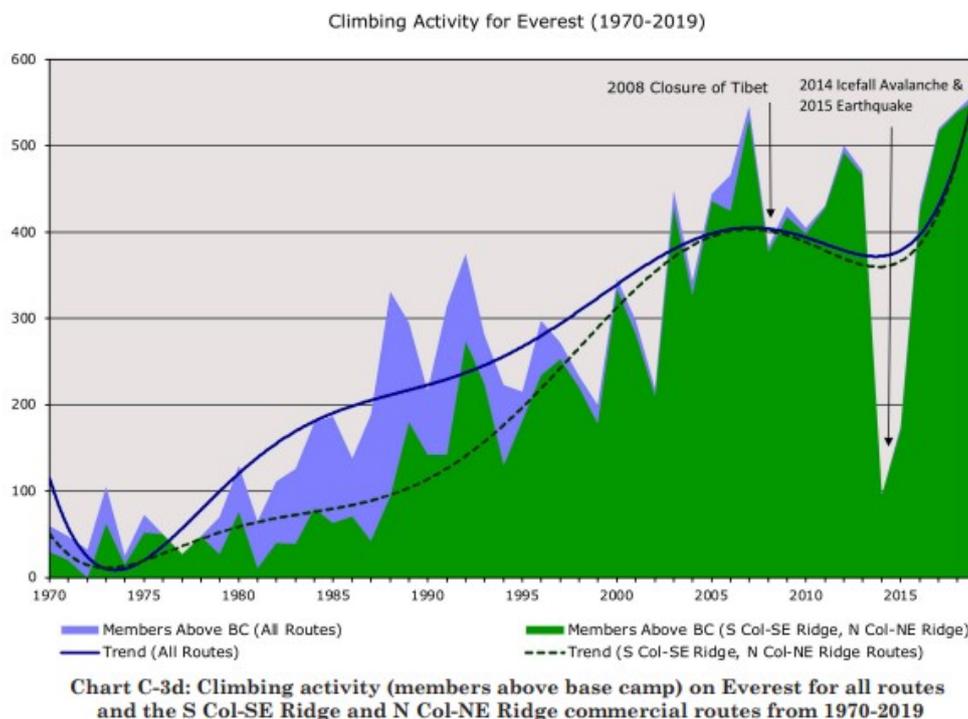


Figure 21 : Recensement des ascensions sur l'Everest de 1970 à 2019 (source : The Himalayan Database, 2021).

8 <https://www.montagnes-magazine.com/librairie-livre-himalaya-business-enquete-nouvelle-ere-expeditions-commerciale-8-000-metres>

9 <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/2020/04/a-quoi-ressemble-la-vie-dans-le-camp-de-base-de-leverest>

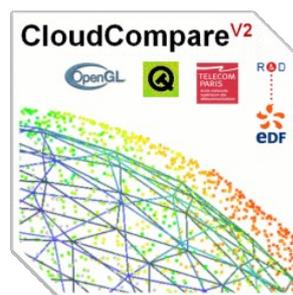
## III) Cadre méthodologique

### 3.1. Données disponibles et produites

Avant de me lancer dans le travail de cartographie, je me suis documenté sur les formes et formations géomorphologiques présentes en haute montagne, et j'ai étudié plusieurs exemples de cartes géomorphologiques. Elles sont présentées en annexes : Annexe 1 (Deline *et al.*, 2020), Annexe 2 (Deline *et al.*, 2018) et Annexe 3 (Landry, 2008). Elles m'ont servi à mieux identifier les formations sur le terrain et à mieux apprécier le rendu souhaité.

En complément de ces cartes, l'Annexe 4 indique la géologie du bassin du Khumbu, et l'Annexe 5 les différentes sections du glacier.

Les logiciels QGIS et CloudCompare (tous deux disponibles en *open source*) ont été au centre de la réalisation de la carte géomorphologique du bassin du Khumbu : la méthodologie qui suit est essentiellement tournée sur les étapes qu'il a fallu suivre en les utilisant.



#### Jeux de données

La première étape de la cartographie géomorphologique a été de trouver un fond permettant une bonne représentation de la zone d'étude. Pour cela, j'ai utilisé deux jeux de données dont un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 8 m téléchargé depuis le portail de la NASA (Shean, 2017) sous la forme d'un raster (.tif). Ce MNT constitue le fond de la carte géomorphologique finale. Le second jeu de données est un ensemble de fichiers LiDAR (Tait, 2019), importé sous la forme de 33 nuages de points (.laz). Ces données LiDAR ont été particulièrement utiles pour identifier précisément certains modelés (moraines, glaciers rocheux, bédrières,...).

## Traitement des données

Pour obtenir un fond exploitable, il a fallu donner au MNT brut téléchargé un ombrage. Pour cela, sur QGIS, une fois le raster importé, on sélectionne *Raster>Analyse>Pente*, puis on exécute le programme. On obtient le raster présenté en Figure 22.



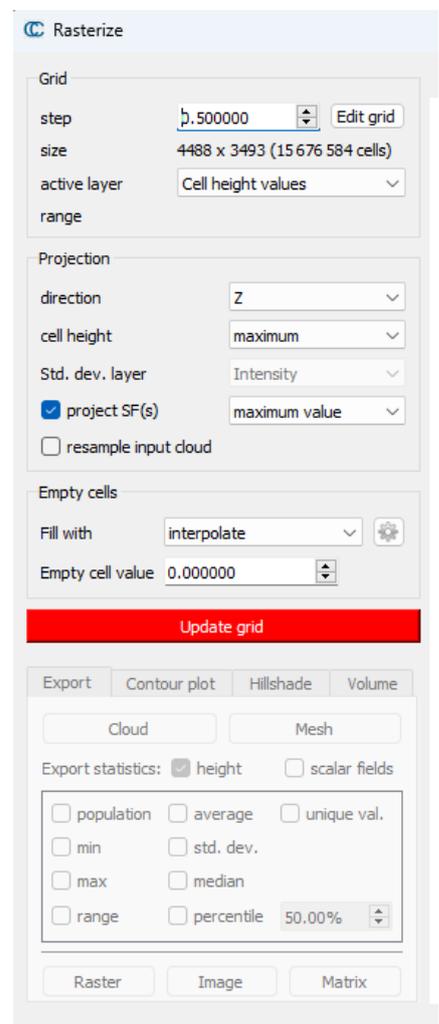
Figure 22 : Ombrage du bassin versant du Khumbu, résolution 8 m.

Concernant les données LiDAR, le protocole est plus complexe et implique l'utilisation du logiciel CloudCompare, permettant d'ouvrir, visualiser et traiter des nuages de points. Il faut convertir les 33 nuages de points en MNT, pour ensuite les fusionner afin d'obtenir l'ensemble sous QGIS.

Pour cela, il faut importer un fichier LiDAR dans le logiciel, puis utiliser la fonction *Rasterize*. On entre ensuite les paramètres comme présentés dans la Figure 23, puis on sélectionne *Update grid*, pour enfin obtenir un MNT via la commande *Raster*.



Figure 23 : Paramètres pour générer un MNT à partir d'un modèle LiDAR sous CloudCompare.



Une fois l'opération réalisée pour tous les fichiers, on importe les MNT correspondants dans QGIS. Dans un premier temps, il faut les intégrer dans un Système de Coordonnées de Référence (SCR). Ici, c'est l'EPSG 32445. La superposition de tous les MNT rend l'ensemble illisible à cause des cadres noirs qui les entourent.

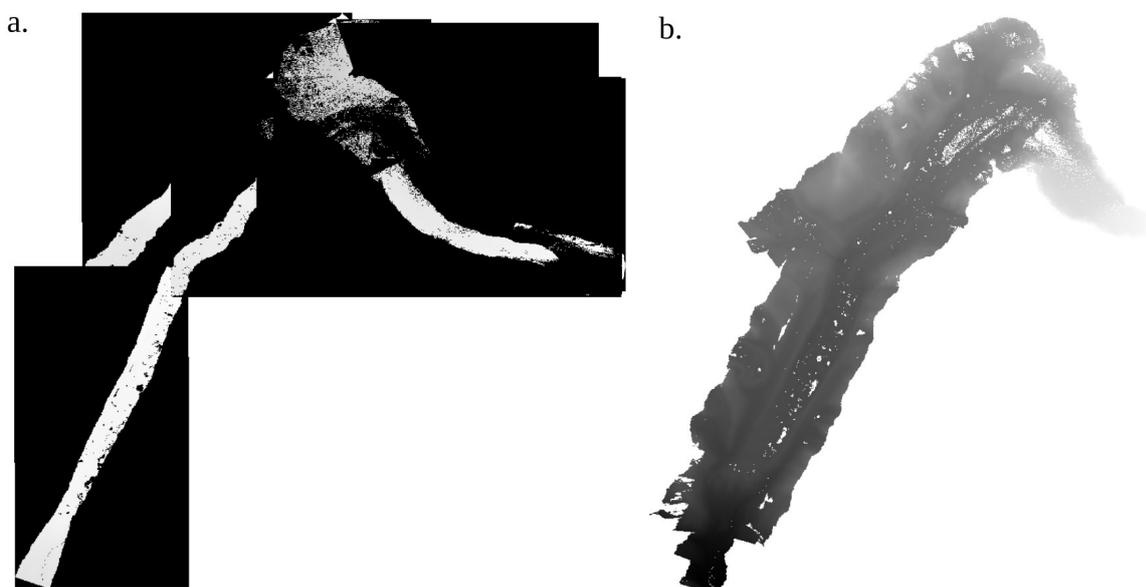


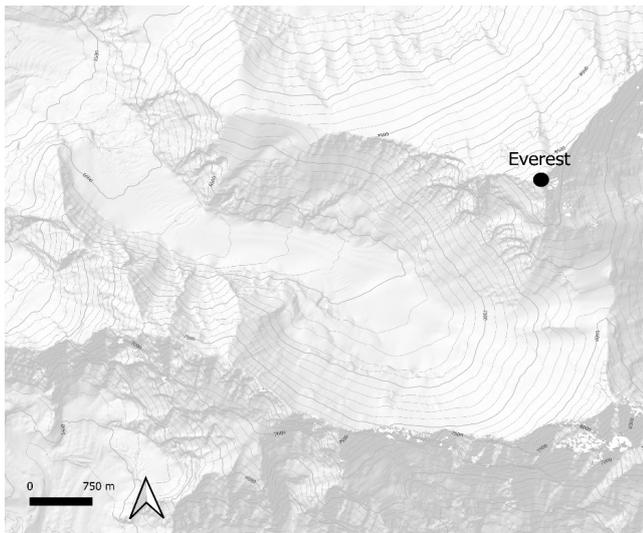
Figure 24 : (a) Ensemble de MNT issus de CloudCompare ouverts dans QGIS; (b) MNT du glacier du Khumbu après fusion dans QGIS.

Ce problème est résolu lors de l'assemblage de tous les MNT avec la commande *Raster>Divers>Construire un raster virtuel*. Lors de la sélection des paramètres, toutes les couches de MNT à fusionner sont sélectionnées puis on choisit l'option *highest* dans l'onglet *Resolution*. Enfin, dans les paramètres avancés, on entre la valeur « 0 » dans la fenêtre liée à *NoData value for input bands* : cela a pour résultat d'enlever du raster final tous les pixels ayant pour valeur « 0 », à savoir les pixels noirs. On obtient alors le résultat présenté dans la Figure 25.

On répète l'étape d'ombrage à partir de ce nouveau MNT. Nous avons alors à disposition un fond de carte très précis qui sera utile pour des analyses locales de la zone d'étude.



Figure 25 : Ombrage LiDAR du village de Gorak Shep, au Sud d'un lac asséché et au Nord d'un cordon morainique



La dernière étape de la création du fond de carte est l'affichage des courbes de niveau *via Raster>Extraction>Contour*. J'ai créé deux courbes : une d'un pas de 100 m d'altitude, l'autre de 500 m. Après avoir modifié la symbologie associée et ajouté une étiquette pour les courbes de 500 m, j'ai obtenu le fond présenté dans la Figure 26.

Figure 26 : Détail du fond de carte final, centré sur le cirque glaciaire de l'Everest.

## 3.2. Méthode de la cartographie géomorphologique

### Sources utilisées pour représenter les formes et formations géomorphologiques

J'ai utilisé le plugin *QuickMapServices* pour accéder aux images satellites de *Bing Maps Satellite Imagery* et *Google Satellite*. Les images *Bing* sont un assemblage de tuiles prises en 2023. Celles de *Google* sont plus variées, prises entre 2016 et 2024. Pour contrer ce problème de dates, j'ai également utilisé *Google Earth*, pour vérifier la date de production des images. J'ai pu utiliser la fonction *3 Dimensions* de *Google Earth* ainsi que les photographies d'une expédition de Xavier Cailhol de 2022 pour identifier certaines formes et formations d'un autre point de vue. En association à ces images, un feu vert du CNES m'a été donné par Etienne Berthier (UMR Legos Toulouse) pour utiliser des images provenant des satellites Pléiades. Ces dernières datent de 2017. Leur résolution étant très bonne, elles me permettent de confirmer la présence et l'interprétation de certains ensembles, comme dans la Figure 27 dans laquelle l'image la plus récente ne permet pas de bien distinguer le tracé de la bédrière s'écoulant du glacier, là où les contrastes de l'image du satellite Pléiade la rend plus évidente.

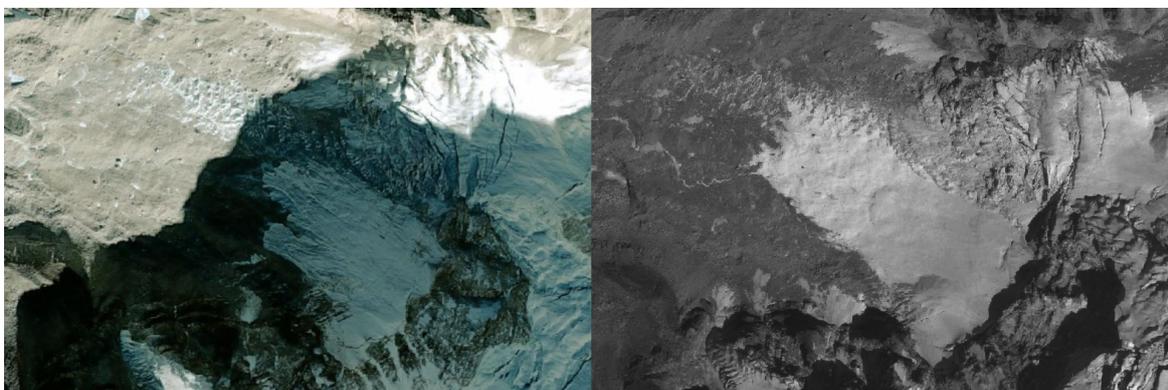


Figure 27 : Comparaison entre les images Bing et Pléiades (Microsoft, Pléiades © CNES 2017, Distribution AIRBUS DS).

La carte géomorphologique est un assemblage de couches vectorielles représentant chacune un élément de légende. On y précise leur nom, emplacement, type (figuré linéaire ou ponctuel, polygone) ainsi que leur SCR (EPSG:32445).

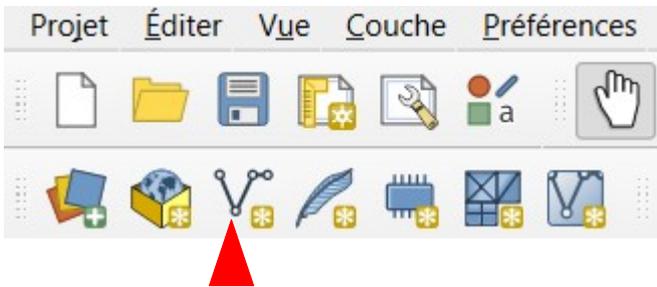
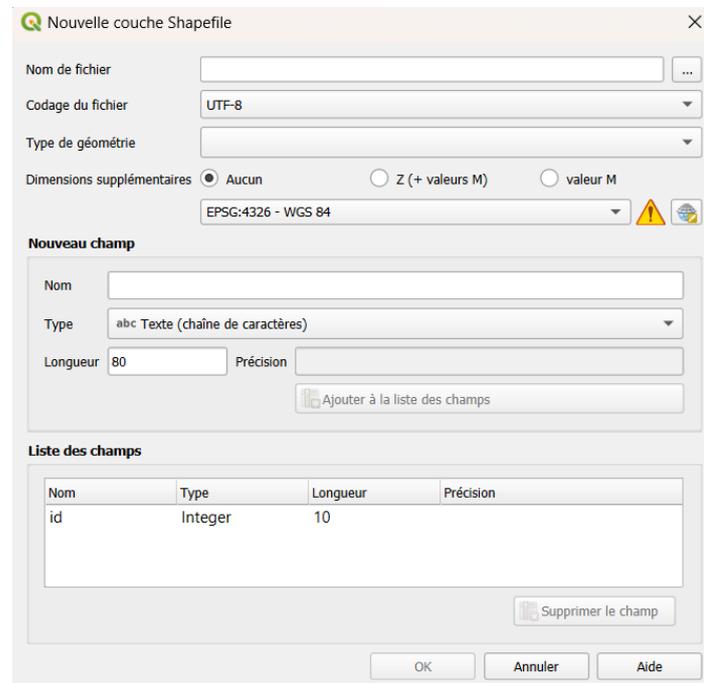


Figure 28 : Paramètres de création d'une couche vectorielle sur QGIS.



Les formes et formations géomorphologiques sont dessinés sous QGIS par dessus les images satellite. Pour verrouiller la symbologie de la couche et permettre de l'ouvrir à l'identique sur un autre ordinateur, il faut enregistrer son style.

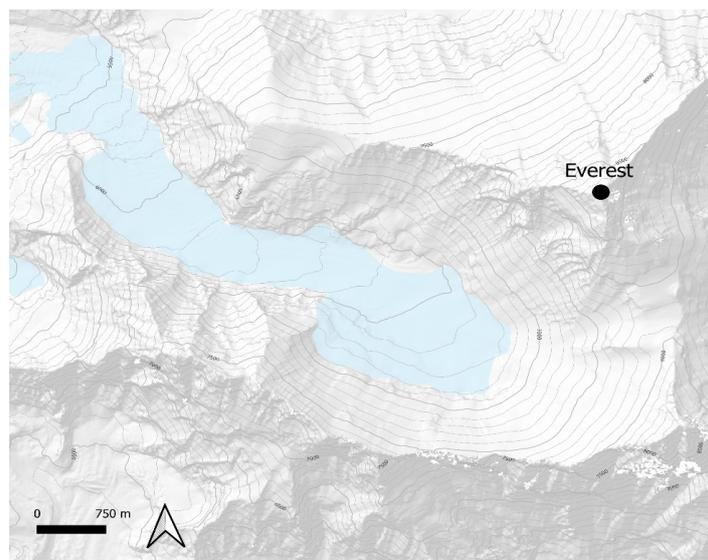


Figure 29 : Création de la couche "Glacier non-couvert" sous QGIS.

Les entrées de ma légende ont été adaptées de celle de l'UNIL<sup>10</sup> (Lambiel *et al.*, 2012) qui répertorie les formes structurales, fluviales, gravitaires, glaciaires, périglaciaires, nivales et l'hydrographie et leur donne un figuré avec une couleur correspondant au type de processus. Cependant, dans le contexte du Khumbu, certaines entrées ont eu besoin de précisions. Une distinction était par exemple nécessaire entre les glaciers de cirque, de versant, suspendus, rocheux, couverts, la glace morte, les couvertures glacio-nivales et les tabliers de glace. Il en a été de même pour les lacs (asséchés, d'origine glaciaire, supra-glaciaires) et les cours d'eau (distinction entre cours d'eau et bédrières). Les lignes de crête des cirques glaciaires ont aussi eu besoin d'une retouche : lorsqu'ils partageaient une ligne de crête, les symboles se superposaient. J'ai donc créé manuellement une nouvelle couche (*Cirques majeurs liés*) résolvant ce problème.

Les couches liées à la géologie (Annexe 4) ont été rassemblées pour n'en former que trois : *Leucogranites*, *Calcaires* et *Gneiss* (Searle *et al.*, 2003), en utilisant la fonction *Fusionner des couches vecteur*.

Les entrées de légende sont à afficher sous QGIS dans le même ordre que dans la Figure 30. Cela est dû aux priorités de calques, certaines couches doivent passer devant d'autres pour être correctement affichées.



Figure 30 : Légende complète de la carte géomorphologique du bassin versant du Khumbu

### 3.3. Traitements statistiques

Pour obtenir les superficies des glaciers, il faut utiliser l'outil *Calculatrice de champs* depuis la couche que l'on veut traiter. On donne le nom *Superficie* au nouveau champ, auquel on associe la formule  $\$area$  qui calcule la superficie à partir de l'ensemble des données entrées. On passe en *Nombre décimal (réel)* pour avoir le résultat le plus précis possible. On crée alors un second champ *SupTotHa* (pour Superficie Totale exprimée en ha) avec la formule  $sum(Superficie) / 10000$  pour obtenir un résultat en hectares.

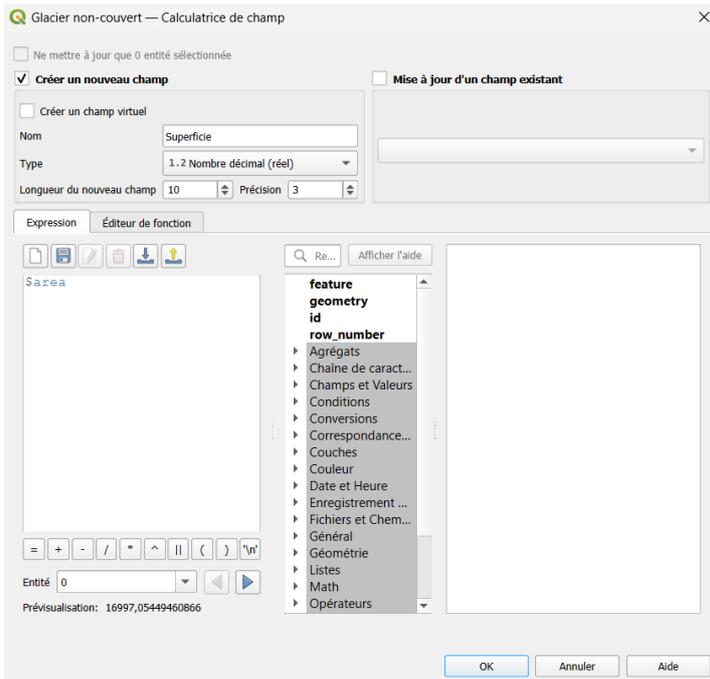


Figure 31 : Paramètres de création du champ "Superficie".

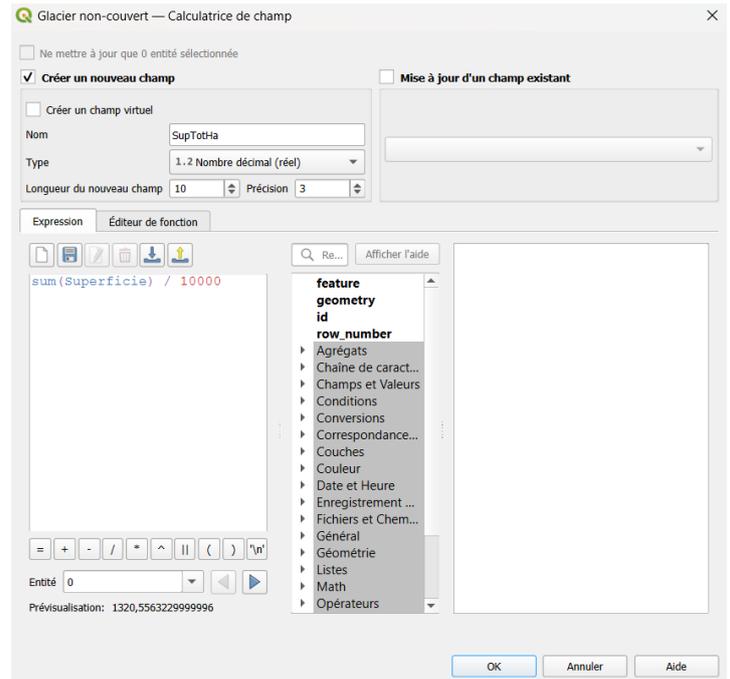


Figure 32 : Paramètres de création du champ "Superficie Totale (ha)".

Glacier non-couvert — Total des entités: 31, Fi...

	Superficie	SupTotHa
1	7005376,417	1320,556
2	1183073,243	1320,556
3	1124974,971	1320,556
4	815468,418	1320,556
5	635857,161	1320,556
6	579405,302	1320,556
7	389294,523	1320,556
8	384490,079	1320,556

Figure 33 : Résultats du traitement statistique, "Superficie" en m<sup>2</sup>, "SupTotHa" en ha.

## **IV) Résultats**

### **4.1. Présentation des résultats**

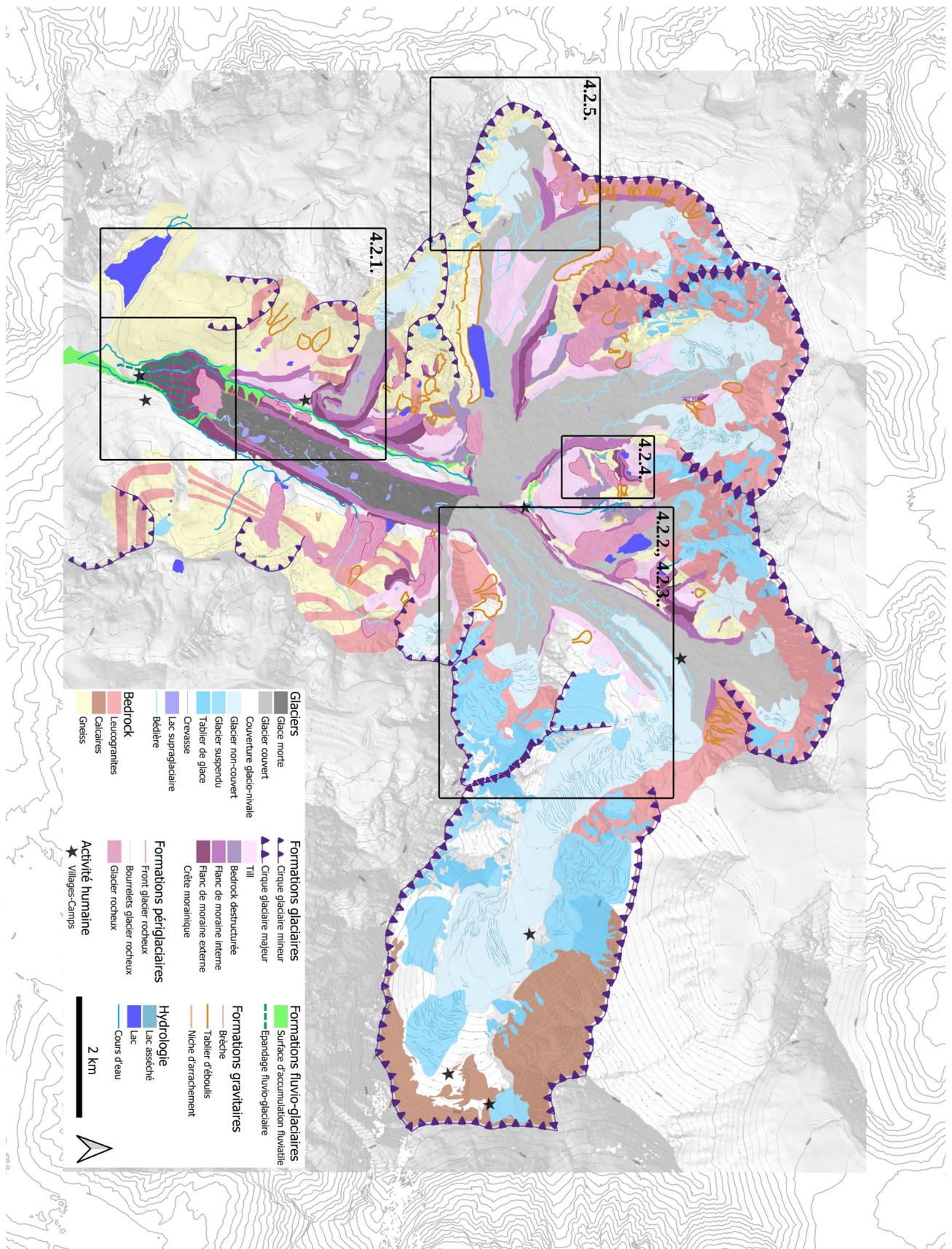


Figure 34 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu, avec cadres de localisation des résultats.

Carte complète disponible en Annexes 7 et 8

## 4.2. Analyse par secteur

Sur chaque comparaison, le « V » apparaissant sur la carte géomorphologique correspond à l'angle de prise de vue de la photographie.

### 4.2.1. Secteur aval du bassin du Khumbu

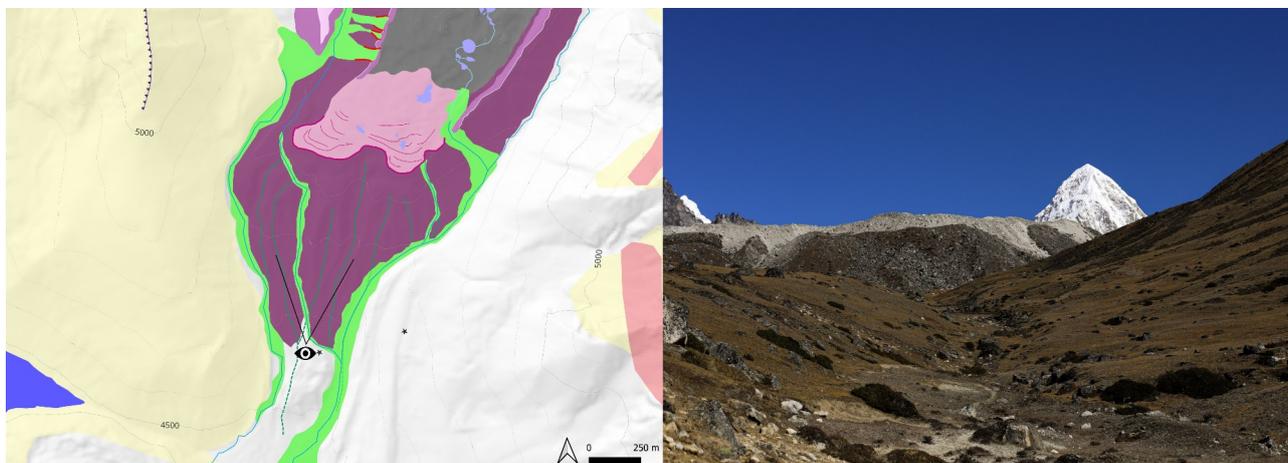


Figure 35 : Bastion morainique du glacier du Khumbu, (ph.: X. Cailhol, 2022).

La Figure 35 présente le bastion morainique du glacier du Khumbu. Il s'étale sur une longueur de près de 1 km, pour un dénivelé de 300 m. Il est constitué par l'accrétion de moraines frontales, dont la succession est repérée par les deux teintes de tills.

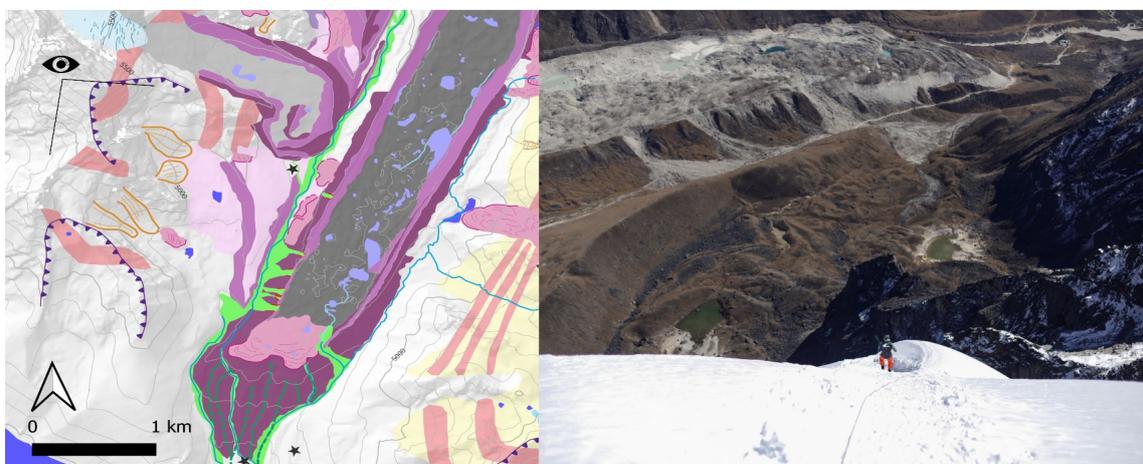


Figure 36 : Moraines latérales du cirque du Lobuche et du glacier du Khumbu (ph.: X. Cailhol, 2022).

Le bassin du Khumbu est remarquable par l'ampleur de ses glaciers actuels et passés. Cela se traduit par les dimensions des édifices morainiques. Le glacier du cirque du Lobuche a totalement disparu, laissant une couche de till, un matériau morainique fin dont l'origine est liée à l'érosion du substrat rocheux par le glacier. Il est bordé d'une moraine dont le flanc interne très régulier fait une cinquantaine de mètres de dénivellation. Le flanc externe de la moraine du glacier du Khumbu est incisé par des brèches laissant transiter des matériaux fluvio-glaciaires transportés par les bédrières à la surface du glacier, puis par les cours d'eau jusqu'en fond de vallée.

#### 4.2.2. Secteur Gorak Shep / Nuptse

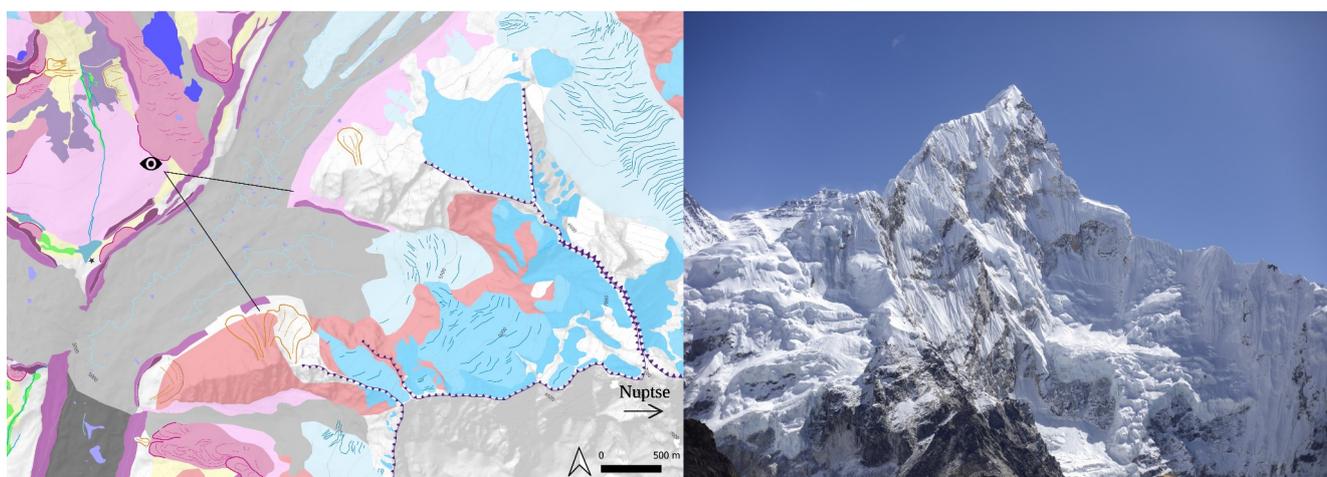


Figure 37 : Glaciers suspendus de la face ouest du Nuptse (ph.: X. Cailhol 2022).

L'activité glaciaire du bassin est encore loin d'être éteinte. Le versant ouest du Nuptse (7861 m) en est l'un des témoins : il est le support de glaciers suspendus (à base froide) de grande taille (de 6500 m à 5500 m d'altitude), surmontés par des tabliers de glace et dominant un glacier de cirque qui se couvre progressivement de débris rocheux (glacier couvert).

#### 4.2.3. Secteur de la Icefall

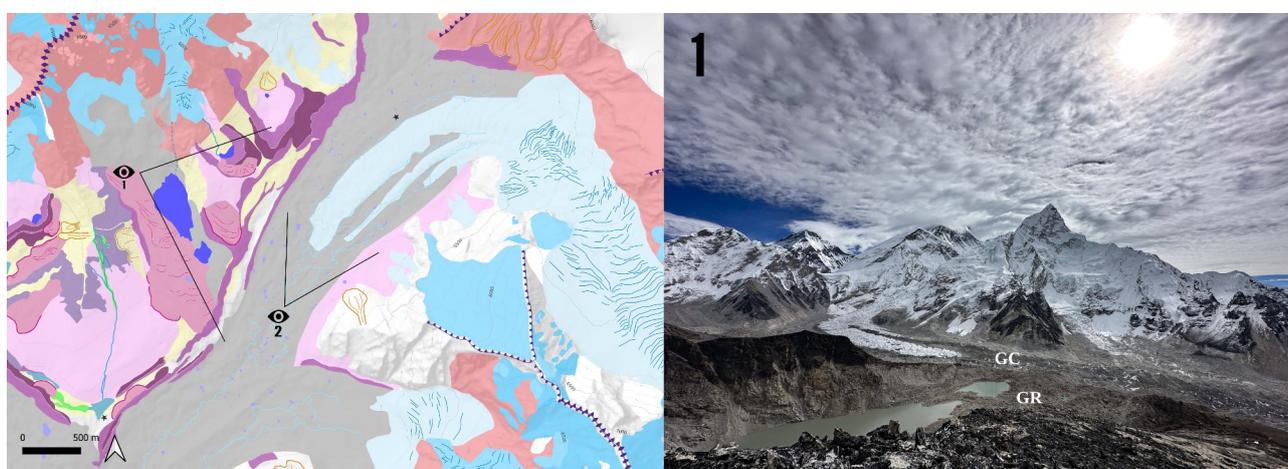
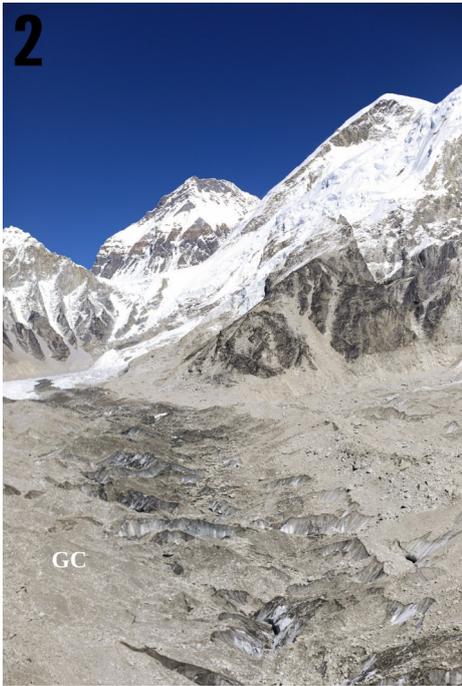


Figure 38 : Icefall du Khumbu, glacier rocheux (GR) et glacier couvert (GC) (ph.: X. Cailhol 2022).

La Figure 38 s'intéresse aux versants est du Pumori (7161 m) et du Nuptse. Au premier plan, un glacier rocheux est reconnaissable par les bourrelets et sillons convexes qu'il présente en raison du fluage de la glace (Giardino *et al.*, 1987). La teinte de la surface en amont des deux lacs est plus claire : elle représente une emprise passée du glacier sur le versant.



À l'aval du secteur précédent, on observe le glacier du Khumbu, subdivisé en plusieurs parties. On y voit à l'amont le commencement de la *Icefall*, la zone réputée pour ses avalanches de séracs (Miner *et al.*, 2020). Elle est prolongée par deux secteurs de glace nue s'insérant dans le glacier couvert (Figure 38), signant la fin du glacier du cirque de l'Everest.

#### 4.2.4. Secteur Pumori-Est

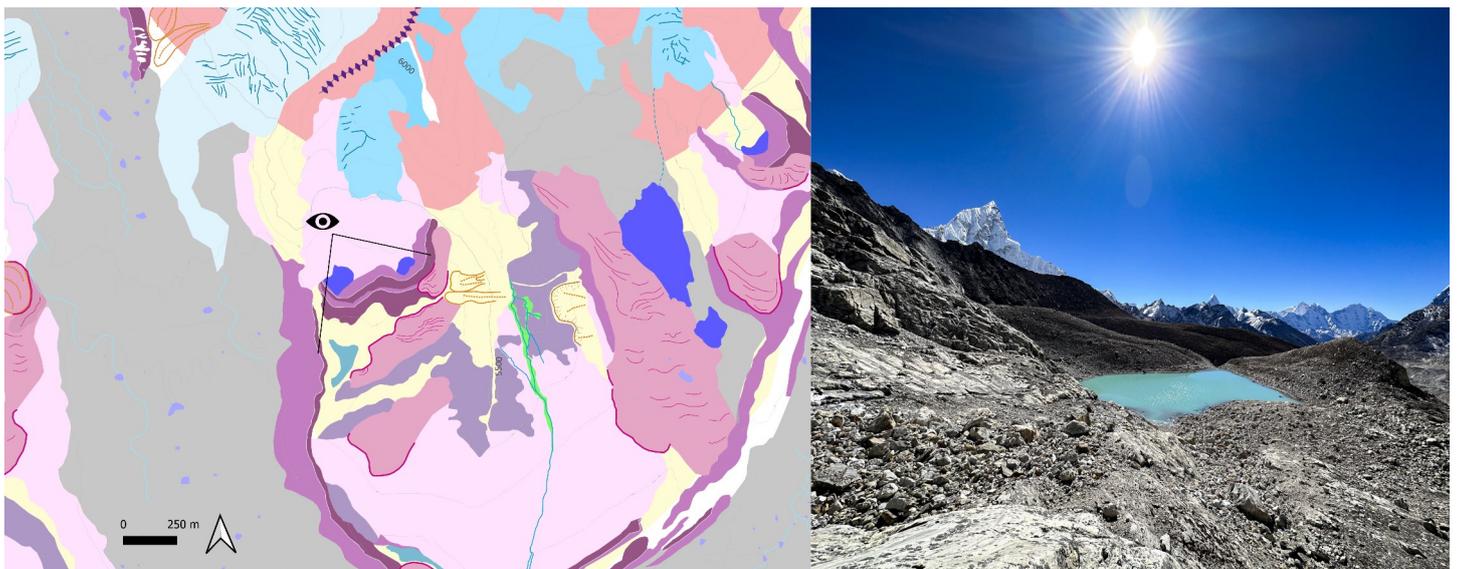


Figure 39 : Glacier rocheux, versant du Pumori-Est (ph.: X.Cailhol 2022).

Les lacs d'origine glaciaire sont assez rares dans la zone d'étude : on en dénombre 24 contre 288 lacs supraglaciaires (2024). En remontant vers l'Ouest de Gorak Shep, on trouve un de ces lacs d'origine glaciaire, long de 140m, déterminé par un bastion morainique. L'ombilic dans lequel le lac prend place est un surcreusement glaciaire.

Au troisième plan de la Figure 39, on observe une portion de glacier rocheux surmonté par du bedrock déstructuré. Le versant le plus à gauche du point de vue sélectionné est quant à lui seulement composé de gneiss en place.

#### 4.2.5. Secteur ouest du Khumbu

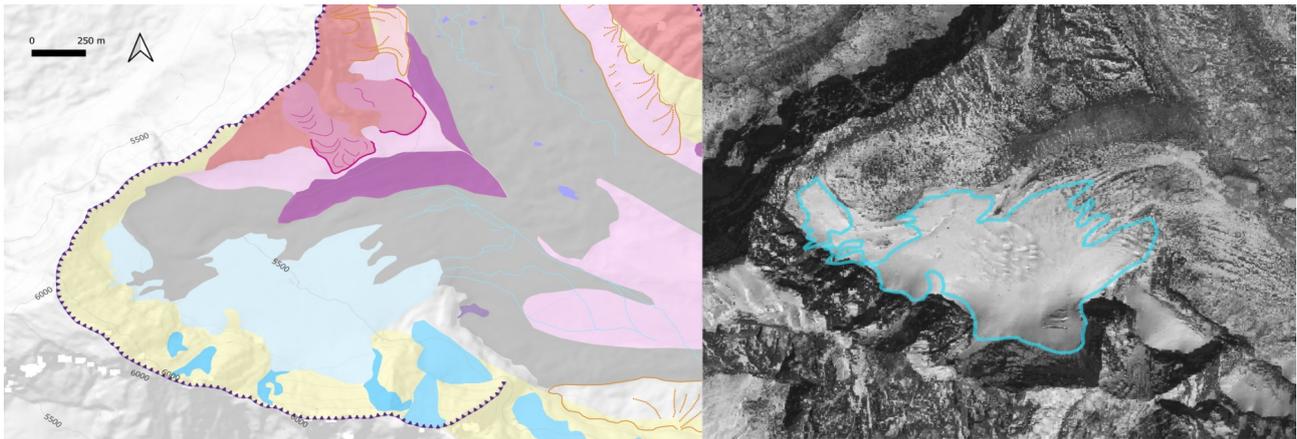


Figure 40 : Cirque du Nirekha peak, à l'Ouest du bassin versant du Khumbu (image de droite : superposition de l'emprise actuelle du glacier de cirque et de l'image satellite Pléiades © CNES 2017, Distribution AIRBUS DS).

Le bassin versant est aussi et surtout un espace dans lequel on peut observer des glaciers de cirques. Ces derniers sont de plus en plus menacés par le réchauffement climatique : la haute montagne est sujette au phénomène d'EDW (Elevation Dependent Warming) ce qui est visible dans le cirque du Nirekha Peak (Figure 40), dont le glacier culminant à 5500m montre une diminution de sa superficie entre 2017 et 2024, passant de 89,3 à 63,5 ha.

### 4.2. Analyses statistiques

***Cette partie n'a pas vocation à être utilisée à des fins scientifiques : la carte géomorphologique n'est pas terminée, les données qui en découlent ne servent qu'à rendre compte d'un ordre de grandeur sur les différents éléments de la zone d'étude à la date de leur représentation (juin 2024).***

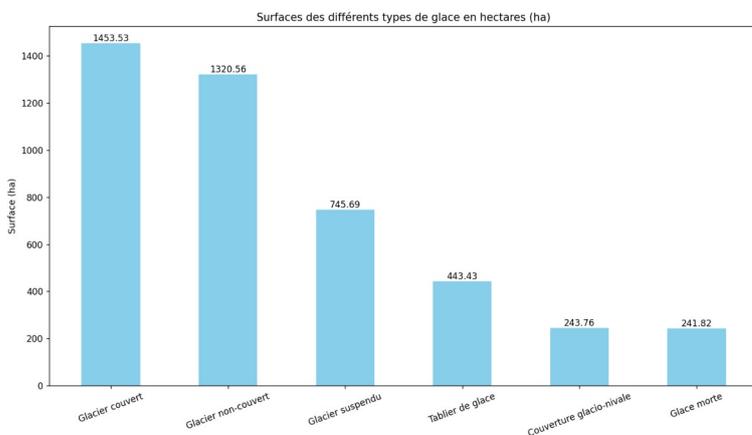


Figure 41 : Histogramme des surfaces (en hectares) occupées par les différents types de glaciers dans le bassin versant du Khumbu.

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, il est intéressant d'avoir un état des lieux de la place occupée par les glaciers dans le bassin versant du Khumbu (Figure 41, 2024). On compte actuellement 288 lacs supraglaciaires, nombre qui est amené à évoluer de par leur nature temporaire liée à la fonte du glacier. Ils ont une superficie totale de 29,8 ha, pour une moyenne de 1047 m<sup>2</sup> par lac supraglaciaire. La valeur médiane est de 251 m<sup>2</sup>.

## V) Discussion

### 5.1. Critiques et perspectives

Les résultats de la carte géomorphologique soulèvent plusieurs points. D'abord, l'étude d'un secteur de montagne est facilitée par la connaissance et les travaux de terrain, or le bassin du Khumbu est situé à 7500 km de Toulouse. Seules plusieurs centaines de personnes ont l'opportunité de s'y rendre chaque année, dont seulement une poignée avec un objectif scientifique. Dans le cadre du stage, il a fallu se contenter d'images satellites et de photos prises sur le terrain par des alpinistes, ce qui peut limiter la justesse de certaines interprétations de formes et formations dans le bassin.

Les données disponibles permettent pourtant d'aboutir à des résultats similaires à d'autres études : l'analyse diachronique confirme le retrait des glaciers. On constate aussi la présence de nombreux glaciers rocheux, confirmant l'importance de l'étude du laboratoire EDYTEM vis à vis des risques sanitaires dus à la pollution des eaux par le bassin du Khumbu lorsqu'ils viendront à les relâcher.

Il serait intéressant de poursuivre l'analyse de l'évolution du retrait glaciaire avec les données produites par le satellite SWOT<sup>11</sup> (2022) mesurant le niveau des eaux de surface. Ces données pourraient permettre d'une part d'observer la dynamique des lacs supraglaciaires, et d'autre part de mieux anticiper les phénomènes de GLOFs (rupture d'une poche d'eau sous la surface du glacier suite à une potentielle alimentation par les lacs supraglaciaires). Le retrait du glacier implique aussi l'apparition de lacs pro-glaciaires pouvant eux aussi être à l'origine de GLOFs, dont l'anticipation pourrait faire l'objet d'une étude utilisant le modèle *GlabTop*<sup>12</sup> (Linsbauer, 2012), mesurant « l'épaisseur de glace et les surcreusements potentiels » (Magnin *et al.*, 2021).

### 5.2. Retour d'expérience

Ce stage avec le laboratoire EDYTEM a commencé le 02 Avril 2024. Je me suis rendu à Chambéry pendant la première semaine du stage, pour poser des bases solides pour réaliser la mission qui m'a été confiée. Cette semaine a été très positive, sur le plan personnel autant que sur celui du stage : j'ai pu pour la première fois me rendre dans les Alpes dans le cadre de mon projet d'études, tout en m'imprégnant du milieu de la recherche. Cet aspect est passé par le travail en compagnie des autres stagiaires du laboratoire, des conférences organisées par l'équipe *Morphodynamiques*, de moments et discussions plus personnels avec mon maître de stage. J'en suis reparti serein, en sachant que j'avais d'une part accès à une ressource non négligeable de travaux scientifiques, et d'autre part la possibilité de demander de l'aide sans hésiter.

À mon retour sur Toulouse, j'ai commencé par la rédaction de la partie théorique de mon mémoire, afin de me familiariser avec mon secteur d'étude et de compléter mes connaissances en géomorphologie. Cela s'est fait sur une semaine, à la suite de laquelle je suis passé aux premières

---

11 *Surface Water Observation Topography*

12 *Glacier Bed Topography*

manipulations sous QGIS et aux premières vraies difficultés. C'est durant cette période que le stage en distanciel a été le plus formateur. J'étais confronté à l'échec de la lecture des données LiDAR, j'ai dû trouver une solution car mon entourage n'était pas spécialisé dans leur traitement. Or, ces données m'étaient indispensables pour pouvoir commencer la cartographie d'une partie du bassin. Plusieurs jours ont été nécessaires pour trouver une solution. D'un point de vue personnel, cette période a été marquée par un isolement et une frustration d'être seul face à mon problème. J'ai retrouvé de la motivation en me rendant plus souvent à la bibliothèque du Mirail pour travailler avec une camarade de promotion qui rencontrait des problèmes similaires pour son stage.

Début mai, j'ai pu enfin commencer la carte géomorphologique proprement dite. C'était un tournant dans le stage : les progrès étaient bien plus visibles (Annexe 6), et le suivi hebdomadaire instauré avec mes maîtres de stage était rassurant. Ils ont pu, de manière très pédagogique, me donner leurs avis, critiquer mon travail et échauffer des pistes de travail, de manière à ce que je puisse chaque semaine proposer de vraies avancées sur mon contenu.

Bien que satisfaisante, la progression est néanmoins restée fastidieuse car le travail de cartographie doit rester extrêmement précis. À chaque discussion, un nouvel élément saute aux yeux : c'est une bonne chose du point de vue du géographe, mais cela devient un problème lorsque le temps commence à manquer. J'ai donc pris la décision de mettre en pause la cartographie afin de finaliser la rédaction de mon mémoire. C'est pour cette raison que la partie sud de mon secteur n'est pas complètement couverte, à l'instar de quelques cirques et autres secteurs restés blancs.

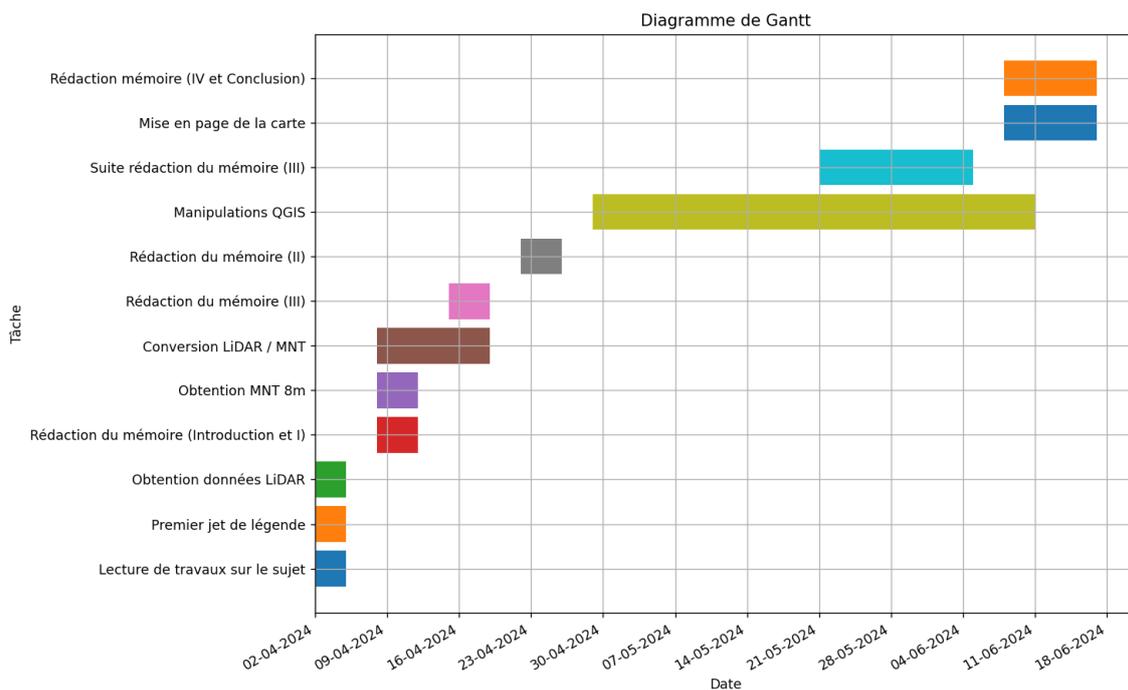


Figure 42 : Diagramme de Gantt de la répartition des tâches du début à la fin du stage.

### 5.3. Lien avec le Master

Le Master GEMO<sup>13</sup> est plutôt orienté sur les sociétés humaines, en milieu montagnard ou pas (UE702 *Socio-écosystèmes montagnards*, UE 703 *Diagnostic environnemental des territoires*, UE 803 *Action publique et territoire*, UE 806 *Atelier – projet tutoré*). Je pense que plus encore que le Master, c'est la Licence de Géographie avec option Environnement qui l'a précédé qui m'a le plus aidé pour ce stage.

Il faut toutefois bien noter que certaines UE telles que *Socio-écosystèmes montagnards* ont été particulièrement utiles à la réalisation de ma mission. Je pense notamment à la sortie effectuée en octobre 2023 à Porté-Puymorens et dont l'objectif était de réaliser un croquis des différentes formations observables, accompagné d'une analyse de ces dernières, ou encore à la sortie en Barguillère qui, même si elle n'en avait pas le but, a permis de régulièrement s'arrêter pour nous habituer à observer les paysages montagnards.

Je note aussi l'intérêt d'avoir eu une promotion majoritairement très intéressée par les questions liées aux environnements montagnards. J'ai ainsi pu réaliser faire deux randonnées (Pic des Trois Seigneurs et Cirque de Gavarnie), ainsi qu'une semaine de balades dans la vallée de l'Aragon en Espagne. Ces sorties ont largement été associées à un grand partage de l'ensemble de nos connaissances, qu'elles soient d'ordre ornithologique, botanique, ou géomorphologique. Notre passion commune a été un moteur qui a facilité l'apprentissage d'un savoir directement sur le terrain, se traduisant en partie sur la carte que j'ai produite.

Sans cette formation, je n'aurai pas pu réaliser pleinement ce stage, qui m'a ouvert la porte à une autre formation à Chambéry, me correspondant davantage. Je m'intéresse en effet surtout à la géographie physique des milieux de montagne, comme ces derniers mois m'en ont convaincu.

---

13 Gestion et Évaluation des milieux **MO**ntagnards

## Conclusions

Le laboratoire EDYTEM est tout particulièrement spécialisé dans les questions environnementales liées aux milieux montagnards. Le projet *NeverRest* est dans le cœur de cible avec l'étude des pollutions du bassin du Khumbu par les activités humaines, ainsi que des risques induits par l'instabilité des parois de glace et de roche en lien avec le réchauffement climatique.

Il m'a été demandé de réaliser un outil de base sur le bassin du Khumbu, une carte géomorphologique, de manière à identifier les formes et formations du terrain en amont d'une expédition à laquelle EDYTEM devrait prendre part au printemps 2025.

J'ai, avec l'aide de mes tuteurs, rassemblé des références bibliographiques traitant de notions générales sur la haute montagne, et d'autres plus spécifiques concernant mon secteur d'étude.

À la suite de cette contextualisation, j'ai commencé la réalisation d'une carte géomorphologique sous QGIS en m'appuyant sur un ensemble de données : modèles numériques de terrain à différentes résolutions, images satellites d'années variées, documentation sur les formes et formations déjà répertoriées.

Ce travail a permis de rassembler une partie des données déjà disponibles sur le bassin versant du Khumbu. Certaines données, bien que datées de plus de vingt ans (la carte géologique de la zone d'étude date de 2003), resteront longtemps d'actualité quand d'autres sont amenées à être régulièrement mises à jour (images satellite).

Cette carte, bien que manquant de précision sur certains secteurs, rend compte de l'état actuel du bassin du Khumbu à travers ses formes et formations variées. Ces dernières évoluent à des échelles de temps très différentes les unes des autres : d'ici quelques années, le réchauffement climatique aura certainement largement modifié certains glaciers, là où les moraines ou le bedrock ne devraient pas subir de grands changements.

Ce projet joue un rôle de jalon sur la trajectoire qu'emprunte le bassin du Khumbu avec la crise climatique : il serait intéressant de mettre à jour la carte géomorphologique dans quelques années afin d'apprécier les évolutions et les processus en jeu.

# Bibliographie

## ARTICLES SCIENTIFIQUES :

**Abegg, B.**, 1995. Changement climatique et ski sur glacier en Suisse, *Cahiers de géographie du Québec*, 39(108), 445–464

DOI : <https://doi-org.gorgone.univ-toulouse.fr/10.7202/022519ar> [consulté le 30/04/24]

**Bandyopadhyay, J.**, 2013. Securing the Himalayas as the Water Tower of Asia: An Environmental Perspective, *Asia Policy*, 16, 45-50

DOI : <https://doi.org/10.1353/asp.2013.0042> [consulté le 18/06/24]

**Bartlett, O.T., Ng, F.S.L., Rowan, A.V.**, 2021. Morphology and evolution of supraglacial hummocks on debris-covered Himalayan glaciers, *Earth Surface Processes Landforms* 46, 525–539.

DOI : <https://doi-org.gorgone.univ-toulouse.fr/10.1002/esp.5043> [consulté le 11/04/24]

**Berthier, E., Cazenave, A.**, 2010. La Montée des océans : jusqu'où ?, *Pour la science*, 388

URL : <https://nicea-bmvr.nice.fr/PATRIMOINE/doc/SYRACUSE/3332768> [consulté le 18/06/24]

**Berthier, E., Floriciou, D., Gardner, A., Gournelen, N., Jakob, L., Paul, F., Treichler, D., Wouters, B., Belart, J., Dehecq, A., Dussaillant, I., Hugonnet, R., Käab, A., Krieger, L., Palsson, F., Zemp, M.**, 2023. Measuring glacier mass changes from space—a review, *Reports on Progress in Physics*, 86

DOI : <https://doi.org/10.1088/1361-6633/acaf8e>

**Bodin, X., Schoeneich, P., Marcer, M.**, 2021. Les glaciers rocheux déstabilisés des Alpes françaises : quelles réponses face au changement climatique ?, *Institut des Risques Majeurs Grenoble*, 43

URL : [https://www.irma-grenoble.com/PDF/risques\\_infos/N43/43article10.pdf](https://www.irma-grenoble.com/PDF/risques_infos/N43/43article10.pdf) [consulté le 23/06/24]

**Boutroy, E.**, 2006. Cultiver Le Danger Dans l'alpinisme Himalayen, *Ethnologie Française*, 36(4), 591–601

URL : <http://www.jstor.org/stable/40990895> [consulté le 30/04/24]

**Cayla, N.**, 2009. Glaciers actuels et géomorphologie paraglaciale, quelques exemples de valorisation touristique au sein de l'arc alpin (Glaciers and paraglacial geomorphology, some examples of tourist promotion in the Alps), *Bulletin de l'Association de géographes français*, 86(1), 96–109

DOI : <https://doi.org/10.3406/bagf.2009.2657> [consulté le 30/04/24]

**Chabas, A.**, 2023. *Hydrologie du permafrost de haute montagne. Monitoring des infiltrations d'eau à l'Aiguille du Midi, massif du Mont Blanc* [Mémoire] [consulté le 02/04/24]

**Chambru, M., Claeys, C.,** 2023. Le tourisme scientifique dans les aires protégées multi-labellisées : transition écologique et controverse en montagne, *Réserves de biosphère et objectifs de développement durable : enjeux scientifiques et pratiques éducatives en Méditerranée*, 83-99  
DOI : <https://hal.science/hal-04085626/> [consulté le 18/06/24]

**Cook, D., Malinauskaite, L., Davíðsdóttir, B., Ögmundardóttir, H.,** 2021. Co-production processes underpinning the ecosystem services of glaciers and adaptive management in the era of climate change, *Ecosystem Services*, 50, 101342  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101342> [consulté le 23/06/24]

**Corneloup, J.,** 2004. D'hier et d'aujourd'hui. Evolution du marketing des loisirs sportifs de nature, *Les Cahiers d'Espaces*, 81, 104-116  
DOI : <https://shs.hal.science/halshs-00377054>

**Delannoy, J.J., Fudral, S., Gasquet, D., Arnaud, F.,** 2014. Introduction. 2003-2013 : dix ans de vie du laboratoire EDYTEM, *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 16, 3-6  
URL : [https://www.persee.fr/doc/edyte\\_1762-4304\\_2014\\_num\\_16\\_1\\_1256](https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2014_num_16_1_1256) [consulté le 09/04/24]

**DeLong, S. B., Hammer, M.N., Engle, Z.T., Richard, E.M., Breckenridge, A.J., Gran, K.B., Jennings, C.E., Jalobeanu, A.,** 2022. Regional-Scale Landscape Response to an Extreme Precipitation Event From Repeat Lidar and Object-Based Image Analysis, *Earth and Space Science*, 9(12)  
DOI : <https://doi.org/10.1029/2022ea002420> [consulté le 02/04/24]

**Duvillard, P.-A., Ravel, L., Schoeneich, P., Deline, P., Marcer, M., Magnin, F.,** 2021. Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps, *Cold Regions Science and Technology*, 189, 103311  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103311> [consulté le 23/04/24]

**Fushimi, H.,** 1977. Structural Studies of Glaciers in the Khumbu Region, *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, 39, 30-39  
DOI : [https://doi.org/10.5331/seppyo.39.Special\\_30](https://doi.org/10.5331/seppyo.39.Special_30) [consulté le 10/04/24]

**Hambrey, M.J., Quincey, D.J., Glasser, N.F., Reynolds, J.M., Richardson, S.J., Clemmens, S.,** 2008. Sedimentological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, Nepal, *Quaternary Science Reviews*, 27, 2361-2389  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.010> [consulté le 15/04/24]

**Hoibian, O.,** 2020. Les usagers des refuges : *terra incognita* de la fréquentation de la montagne ? Etude sur les refuges des Pyrénées centrales en haute saison touristique, *Sud-Ouest Européen*, 45, 47-64  
DOI : <https://doi.org/10.4000/soe.6751> [consulté le 17/06/24]

- Hood, E., Battin, T., Fellman, J., O’Neel, S., Spencer, R.,** 2015. Storage and release of organic carbon from glaciers and ice sheets, *Nature Geoscience*, 8, 91-96  
DOI : <https://doi.org/10.1038/ngeo2331>
- Hu, Y., Harrison, H. , Liu, L., Wood, J.L.,** 2021. Modelling rock glacier velocity and ice content, Khumbu and Lhotse Valleys, Nepal, *The Cryosphere*, 17, 2305-2321  
DOI :<https://doi.org/10.5194/tc-17-2305-2023> [consulté le 15/05/24]
- 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  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103237> [consulté le 03/05/24]
- Jones, D., Harrison, S., Anderson, K., Betts, R.,** 2018. Mountain rock glaciers contain globally significant water stores, *Scientific Reports*, 8, 2834  
DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w> [consulté le 23/06/24]
- Jones, D., Harrison, S., Anderson, K., Whalley, W.B.,** 2019. Rock glaciers and mountain hydrology: A review, *Earth-Science Reviews*, 193, 66-90  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.001> [consulté le 23/06/24]
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schlaefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozzi, T., Weidmann, Y.,** 2005. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(4), 527-554  
DOI : <https://doi.org/10.5194/nhess-5-527-2005> [consulté le 23/06/24]
- Kaushik, S., Ravanel, L., Magnin, F., Trouvé, E., Yan, Y.,** 2022. Ice Aprons in the Mont Blanc Massif (Western European Alps): Topographic Characteristics and Relations with Glaciers and Other Types of Perennial Surface Ice Features, *Remote Sensing*, 14(21), 5557  
DOI : <https://doi.org/10.3390/rs14215557> [consulté le 23/06/24]
- Khadka, N., Chen, X., Shrestha, M., Liu, W.,** 2024. Risk perception and vulnerability of communities in Nepal to transboundary glacial lake outburst floods from Tibet, China, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 107, 104476  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104476> [consulté le 23/06/24]
- Kirkbride, M.,** 2011. Landscapes of glacial erosion, *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, 4, 694-697  
DOI : [10.1007/978-90-481-2642-2](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2) [consulté le 23/06/24]

**Kirkbride, M., Deline, P.,** 2018. Spatial heterogeneity in the paraglacial response to post-Little Ice Age deglaciation of four headwater cirques in the Western Alps, *Land Degradation and Development*, 29(9), 3127-3140

DOI : <https://doi.org/10.1002/ldr.2975> [consulté le 02/04/24]

**Knight, J., Harrison, S., Jones, B.D.,** 2019. Rock glaciers and the geomorphological evolution of deglaciating mountains, *Geomorphology*, 324, 14-24

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.020> [consulté le 15/04/24]

**Magnin, F., Cathala, M., Linsbauer, A., Heberli, W.,** 2021. Modelling and characterizing glacier-bed overdeepenings as sites for potential future lakes in the deglaciating French Alps, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 27(1), 19-36

DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15255> [consulté le 25/06/24]

**Miner, K., Mayewski, P., Baidya, S., Broad, K., Clifford, H., Elmore, A., Gajurel, A., Giri, B., Guilford, S., Hubbard, M., Jaskolski, C., Koldewey, H., Li, W., Matthews, T., Napper, I., Baker Perry, L., Potocki, M., Priscu, J., Tait, A., Thompson, R., Tuladhar, S.,** 2020. An Overview of Physical Risks in the Mt. Everest Region, *One Earth*, 3(5), 547-550

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.008> [consulté le 06/05/24]

**Miner, K., Clifford, H., Taruscio, T., Potocki, M., Solomon, G., Ritari, M., Napper, I., Gajurel, A., Mayewski, P.,** 2021. Deposition of PFAS 'forever chemicals' on Mt. Everest, *Science of the Total Environment*, 759, 144421

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144421> [consulté le 17/06/24]

**Mounet, J.P.,** 1994. L'impact des activités de pleine nature sur le milieu naturel, *Sports et Environnement*, 73-82

DOI : <https://doi.org/10.4000/books.msha.13040> [consulté le 17/06/24]

**Mourey, J., Ravanel, L.,** 2017. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France), *Journal of Alpine Research*, 105(4)

DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.3780> [consulté le 18/06/24]

**Nuimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, S., Sharma, R.,** 2012. Elevation Changes of Glaciers Revealed by Multitemporal Digital Elevation Models Calibrated by GPS Survey in the Khumbu Region, Nepal Himalaya, 1992-2008, *Journal of Glaciology*, 58(210), 648-656

DOI : <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J061>

**Pogliotti, P., Cremonese, E., Morra di Cella, U.,** 2023. Réchauffement du permafrost dans les Alpes occidentales: une nouvelle preuve d'un réchauffement qui dépend de l'altitude?, *Journal of Alpine Research*, 111-2

DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.11819>

**Pepin, N., Bradley, R., Diaz, H., Baraer, M., Caceres, E., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M., Liu, X., Miller, J., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schoner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M., Williamson, S., Yang, D.,** 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world., *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430

DOI : <https://doi.org/10.1038/nclimate2563> [consulté le 03/05/24]

- Qasthary, A., Muttaqien, A.,** 2022. Water Pollution Control Policy in Nepal and Indonesia, *Jurnal Sains Riset*  
DOI : <https://doi.org/10.47647/jsr.v12i3.868>
- Ravanel, L., Magnin, F., Deline, P.,** 2017. Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif, *Science of The Total Environment*, 609, 132-143  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055> [consulté le 23/06/24]
- René, P.,** 2023. Les glaciers des Pyrénées françaises, Cycle glaciaire 2022-2023, [Rapport d'étude], *Association Moraine* [consulté le 03/05/24]
- Rinzin, S., Zhang, G., Sattar, A., Wangchuk, S., Allen, S., Dunning, S., Peng, M.,** 2023. GLOF hazard, exposure, vulnerability, and risk assessment of potentially dangerous glacial lakes in the Bhutan Himalaya, *Journal of Hydrology*, 619  
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129311> [consulté le 06/05/24]
- Sacareau, I.,** 1999. "Les Transformations d'une Haute Montagne Par Le Tourisme : Le Massif Des Annapurna Dans l'Himalaya Du Népal / Tourism and Change in a High Mountain : The Annapurna Area in the Nepalese Himalaya." *Annales de Géographie*, 108(605), 21-45.  
URL : <http://www.jstor.org/stable/45136897> [consulté le 30/04/24]
- Sacareau, I., Jacquemet, E.,** 2016. L'avion, la route et le trekkeur : accessibilité et développement touristique dans l'Himalaya du Népal, *Géotransports*, 7, 23-42  
DOI : <https://hal.science/hal-01551036>
- Salim, E., Mourey, J., Ravanel, L., Picco, P., Gauchon, C.,** 2019. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du Mont Blanc ?, *Journal of Alpine Research*, 107-4  
DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.5842>
- Salisbury, R., Hawley, E., Bierling, B.,** 2019. *The Himalaya by the Numbers : A Statistical Analysis of Mountaineering in the Nepal Himalaya, 1950-2019* (2ème édition), Michigan, The Himalayan Database, 251p  
URL : <https://www.himalayandatabase.com/hbn2019.html> [consulté le 12/04/24]
- Searle, M.P., Simpson, R.L., Law, R.D., Parrish, R.R., Waters, D.J.,** 2003. The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal – South Tibet, *Journal of the Geological Society*, 160, 345-366  
DOI : <https://doi.org/10.1144/0016-764902-126> [consulté le 15/04/24]
- Thorarinsson, S.,** 1939. The ice-dammed lakes of Iceland with particular reference to their value as indicators of glacier oscillations, *Geografiska Annaler*, 21A, 216-242  
DOI : <https://doi.org/10.1080/20014422.1939.11880679> [consulté le 06/05/24]

**Tomczyk, A., Ewertowski, M.,** 2023. Landscape degradation and development as a result of touristic activity in the fragile, high-mountain environment of Vinicunca (Rainbow Mountain), Andes, Peru, *Land Degradation and Development*, 34(13), 3953-3972  
DOI : <https://doi.org/10.1002/ldr.4729> [consulté le 17/06/24]

**Zeller, L., McGrath, D., McCoy, S. W., Jacquet, J.,** 2024. Seasonal to decadal dynamics of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Khumbu region, Nepal, *The Cryosphere*, 18(2), 525-541  
DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-18-525-2024> [consulté le 23/06/24]

**Zhang, J., Sharma, T., Khanal, N., Prodhan, F., Paudel, B., Shi, L., Nepal, N.,** 2020. Assimilation of Snowmelt Runoff Model (SRM) Using Satellite Remote Sensing Data in Budhi Gandaki River Basin, Nepal, *Remote Sensing*, 12(1951)  
DOI : <https://doi.org/10.3390/rs12121951> [consulté le 18/04/24]

## **WEBOGRAPHIE :**

**Bkhumpakha,** 2019. Sagarmatha National Park  
URL : [http://geoportal.ntnc.org.np/layers/ntnc:Sagarmatha\\_National\\_Park/#/](http://geoportal.ntnc.org.np/layers/ntnc:Sagarmatha_National_Park/#/)

**Inconnu,** 2018. Mount Everest Via South Col, *Alltrails*,  
URL : [Explorez Mount Everest via South Col | AllTrails](#) [consulté le 10/04/24]

**National Trust for Nature Conservation,** 2019. Sagarmatha National Park  
URL : [http://geoportal.ntnc.org.np/layers/ntnc:Sagarmatha\\_National\\_Park/#/](http://geoportal.ntnc.org.np/layers/ntnc:Sagarmatha_National_Park/#/)

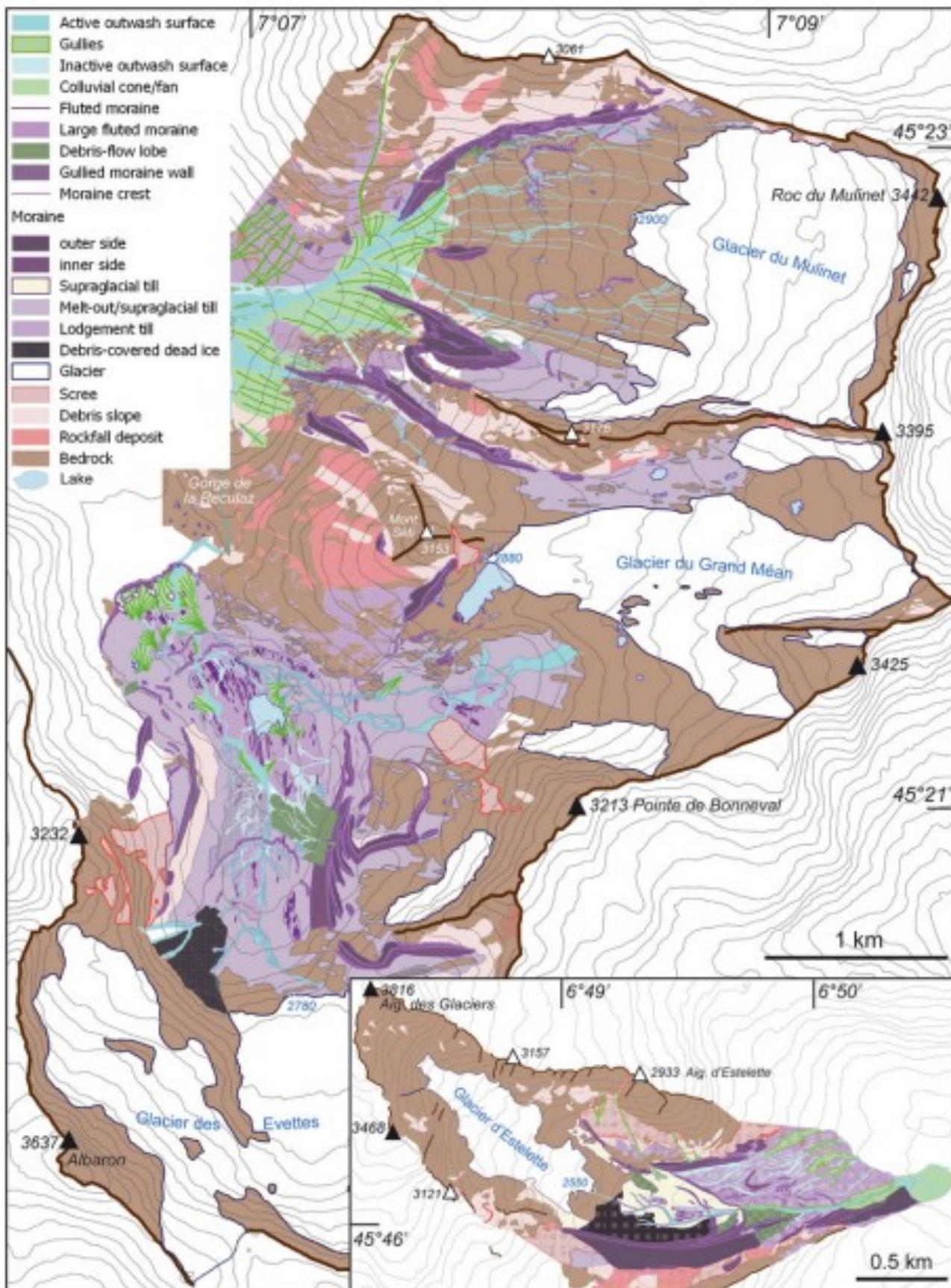
**Shean, D.,** 2017. High Mountain Asia 8-meter DEM Mosaics Derived from Optical Imagery, *NASA National Snow and Ice Data Center*  
DOI : <https://doi.org/10.5067/KXOVQ9L172S2> [consulté le 14/04/24]

**Tait, A.,** 2020. High resolution lidar data of the Khumbu glacier, *Dryad*  
DOI : <https://doi.org/10.5061/dryad.73n5tb2vx> [consulté le 02/04/24]

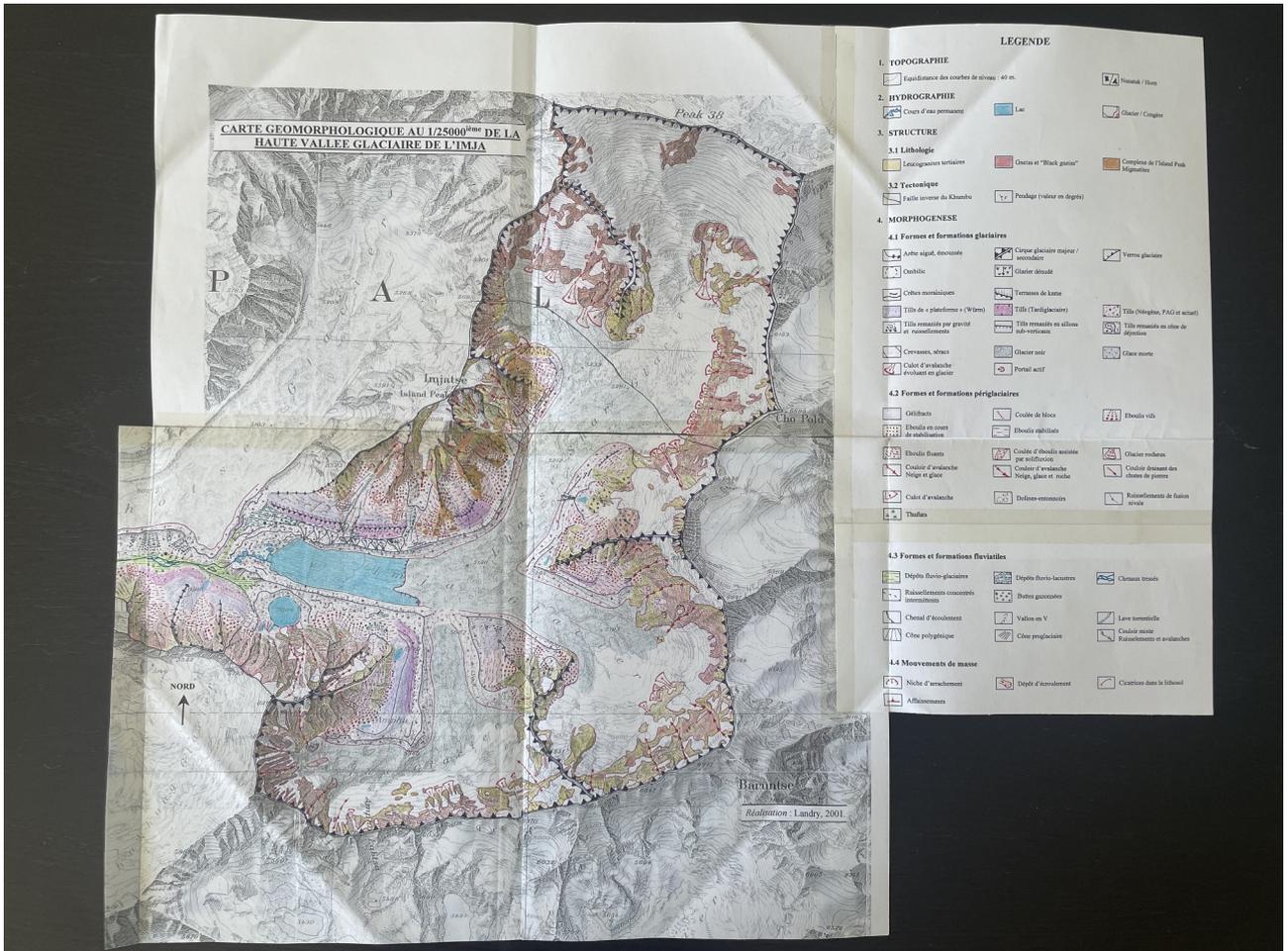
**Lambiel, C., Maillard, B., Regamey, B., Martin, S., Kummert, M., Schoeneich, P., Pellitero Ondicol, R., Reynard, E.,** 2012. Légende Géomorphologique, *Université de Lausanne*  
DOI : <https://www.unil.ch/igd/fr/home/menuinst/recherche/marges-environnement-paysages/la-legende-geomorphologique-de-lunil.html>

**World Food Programme (UN Agency),** 2019. World Administrative Boundaries – Countries and Territories  
URL : <https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/world-administrative-boundaries>

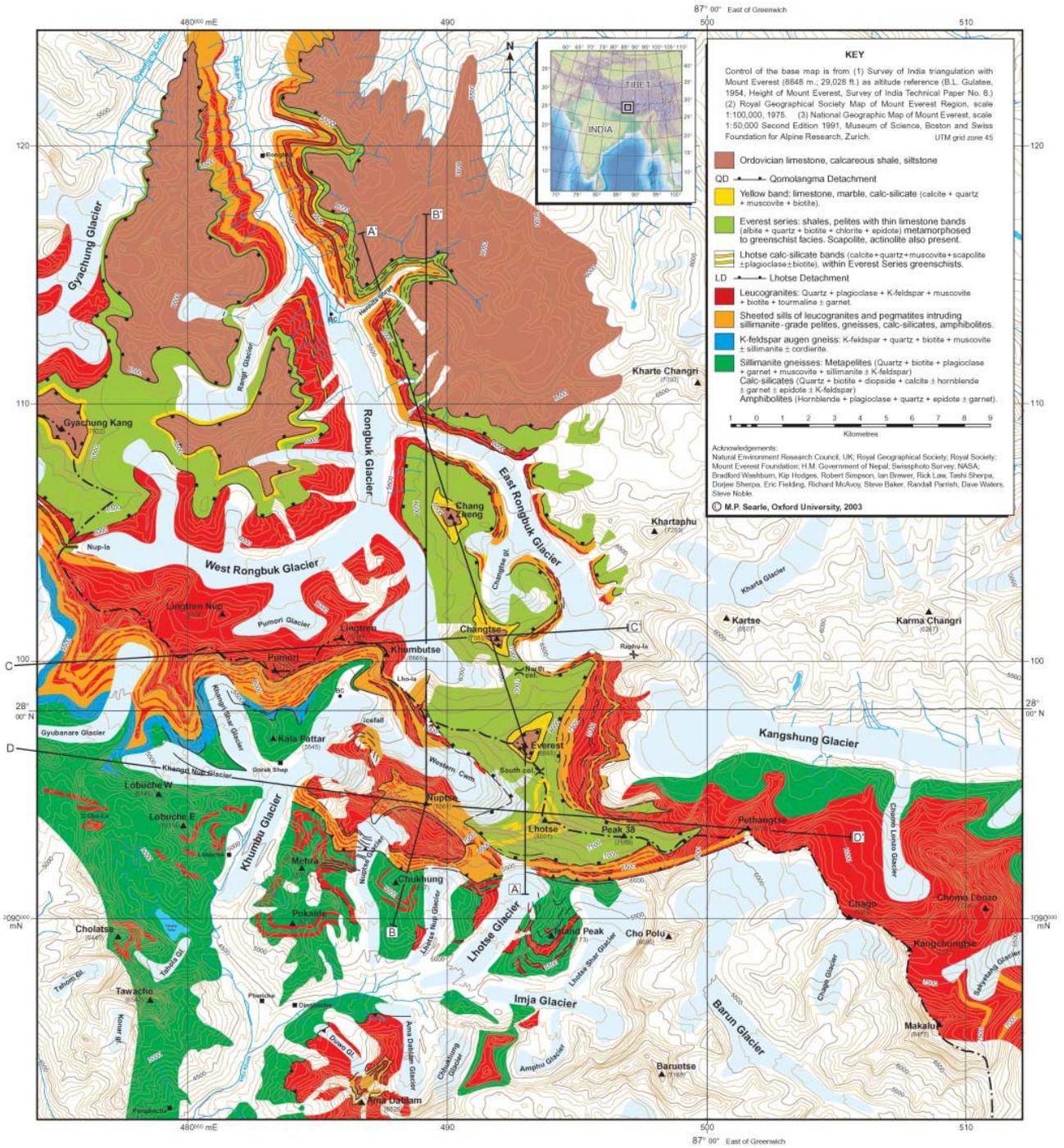




Annexe 2 : Carte géomorphologique de cirques glaciaires alpins (Kirkbride et Deline, 2018).



Annexe 3 : Carte géomorphologique du bassin versant de l'Imja Tse au Népal (Landry, 2008).



Annexe 4 : Carte géologique de l'Everest/Tibet du Sud (Searle et al., 2003).

Structural Studies of Glaciers in the Khumbu Region

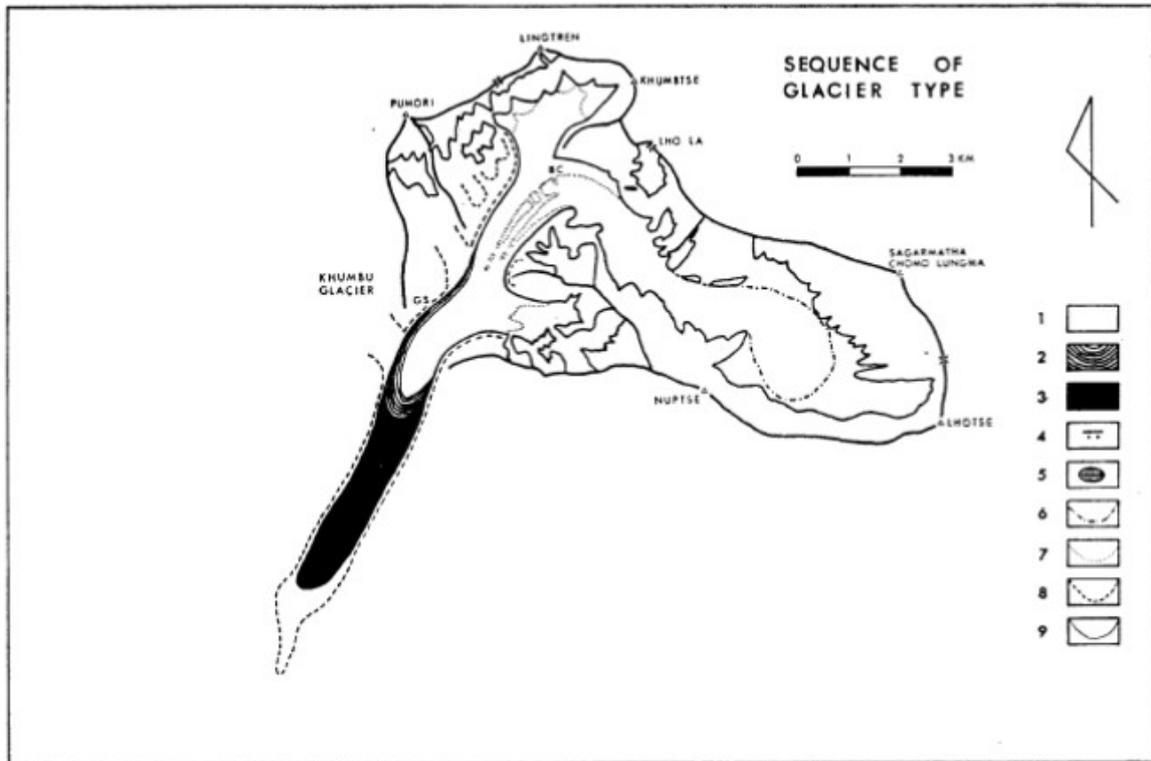
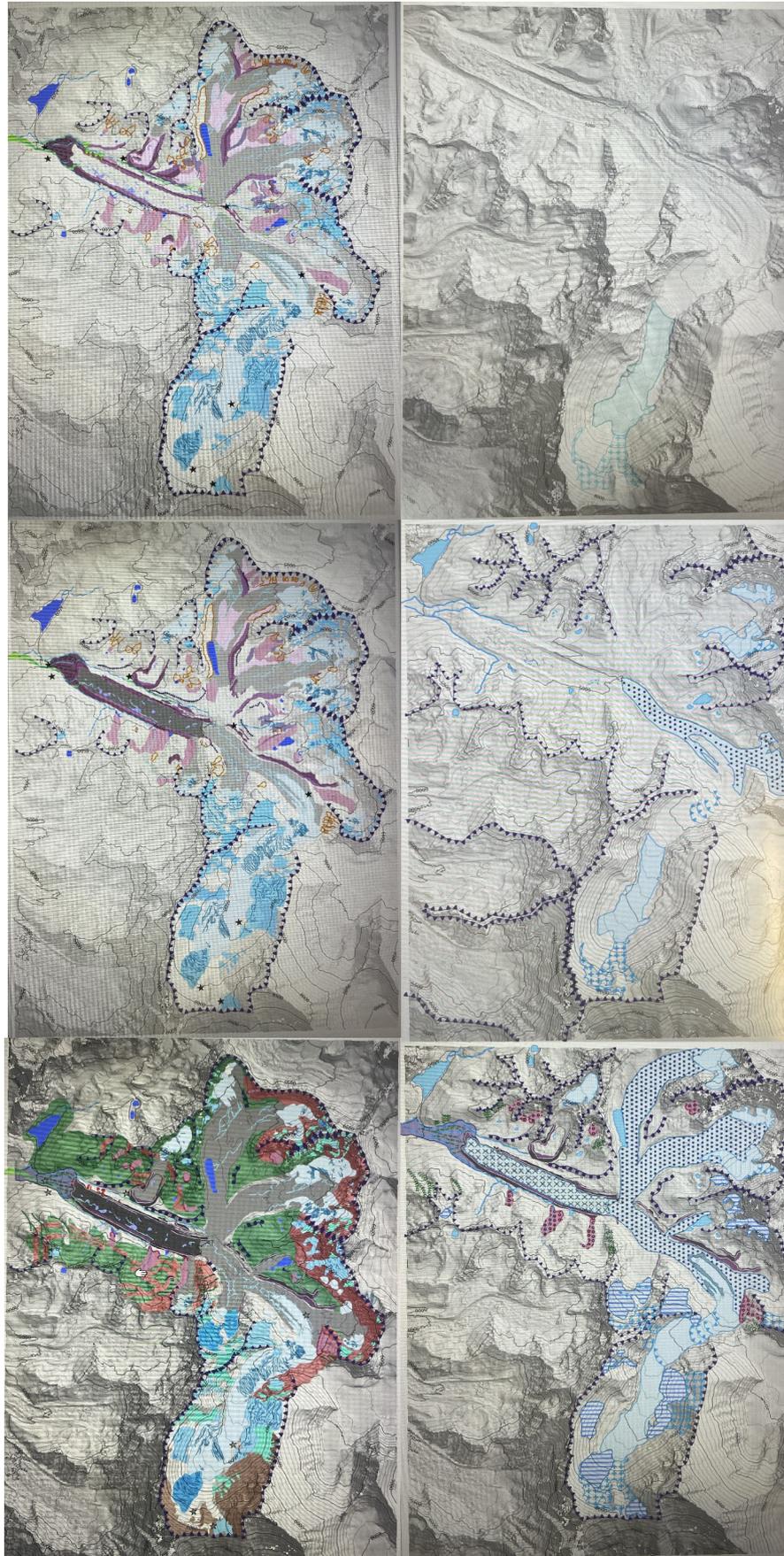
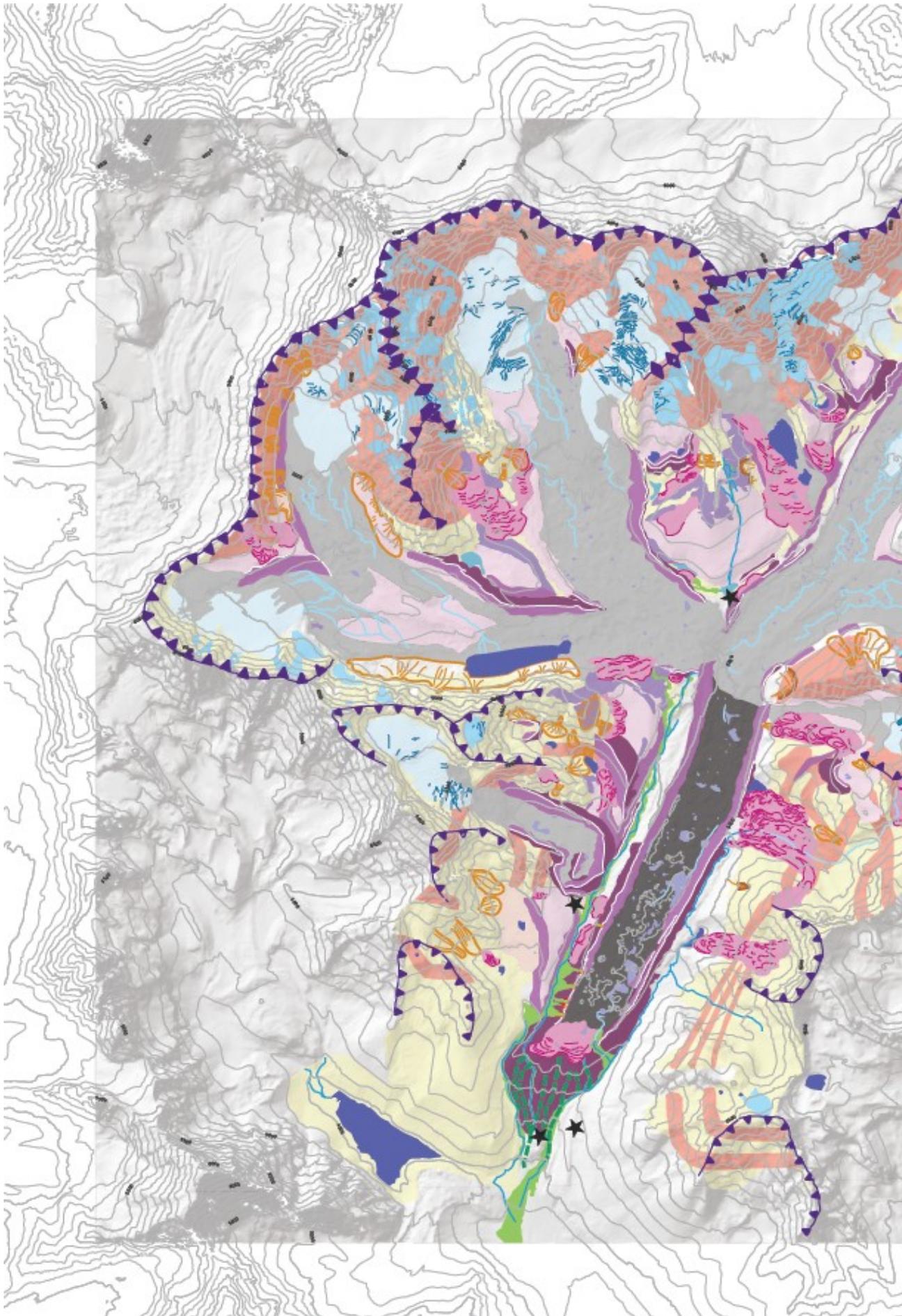


Fig. 2. Sequence of glacier types. There is found a continuous sequence of glacier types according to the volume of stagnant and dead ice body and its structural relationship to glacier flow. 1) upper and middle ice body partly covered with superficial moraines, 2) lower ice body with foliations of insoluble materials, 3) stagnant or dead ice body, 4) ice fall, 5) lake, 6) Bergschrund, 7) line showing the boundary of superficial moraines, 8) L-I sub-stage moraine, 9) L-V sub-stage moraine. Base Camp, Gorak Shep and Lobuche are indicated as BC, GS and L respectively on the map of the Khumbu glacier.

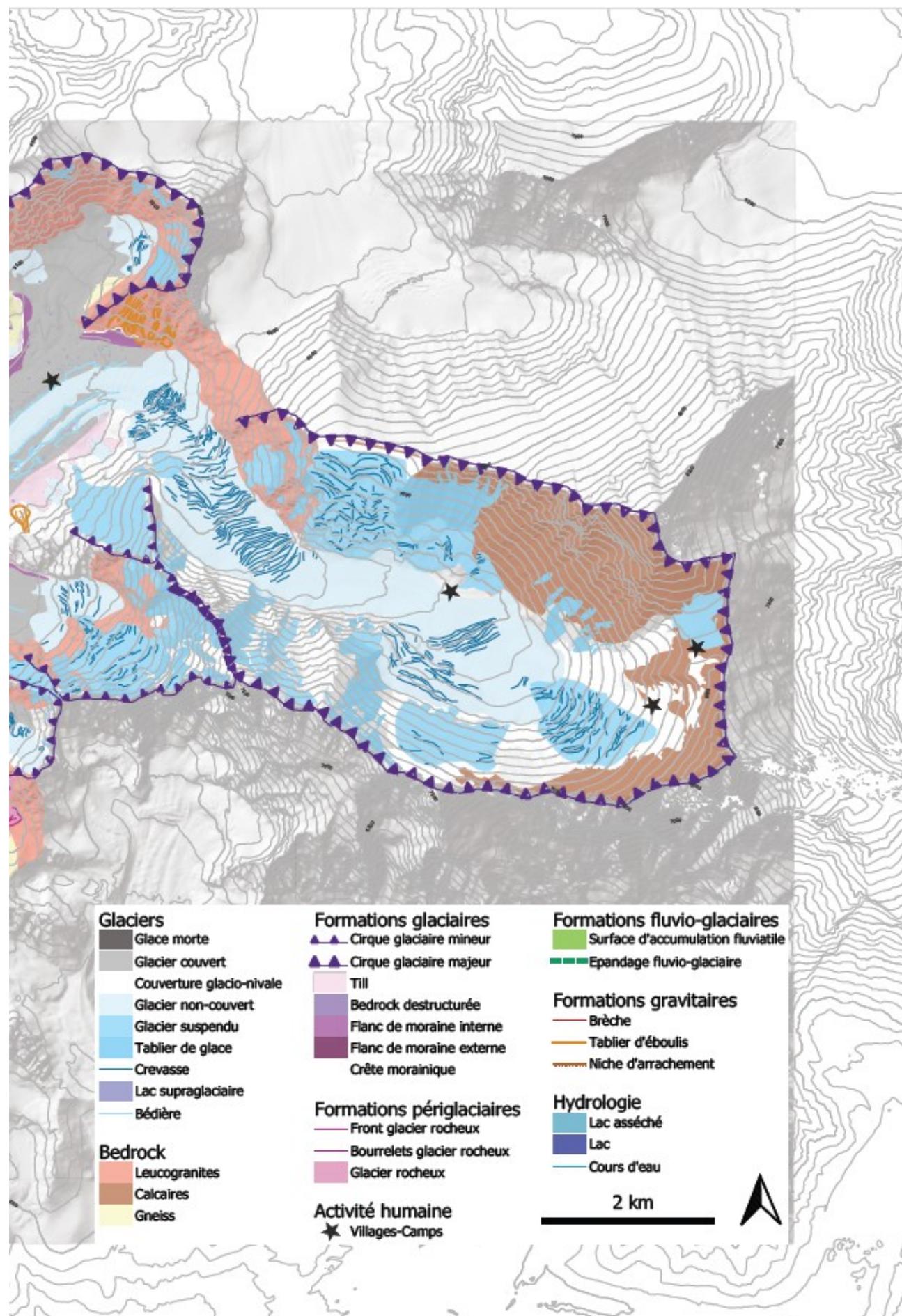
*Annexe 5 : Détail du glacier du Khumbu (Fushimi et al., 1977).*



*Annexe 6 : Etapes de progression de la cartographie géomorphologique du bassin du Khumbu, daté de gauche à droite :07/05, 13/05, 16/05, 20/05, 27/05, 04/06/2024.*



*Annexe 7 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu (partie 1/2).*



Annexe 8 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu (partie 2/2).

## Index des figures

Figure 1 : Organigramme du laboratoire EDYTEM.....	9
Figure 2 : Station météorologique à Bishop Rock 8810 m, Everest, Mai 2022.....	9
Figure 3 : Zone d'étude à l'échelle nationale.....	10
Figure 4 : Zone d'étude à l'échelle du Parc National de Sagarmatha, Népal.....	10
Figure 5 : Contexte local : Le bassin versant du Khumbu.....	11
Figure 6 : Vitesses d'écoulement du glacier du Khumbu au niveau de la Icefall.....	12
Figure 7 : (a.) Glacier de vallée d'Aletsch, 1600 m, Suisse; (b.) Glacier de cirque des Oulettes, 2400 m, Hautes-Pyrénées; (c.) Glacier suspendu du Mont-Perdu, 2800 m, Province de Huesca.....	13
Figure 8 : Glaciers suspendus (CGS), face est du Mont-Blanc, 4806 m, Haute-Savoie.....	13
Figure 9 : (a.) Glacier Noir, 2200 m, Hautes-Alpes; (b.) Glacier mort du Boum, 2700 m, Luchonnais; (c.) Couverture glacio-nivale sur la face nord du Mönch, 4110 m, Suisse.....	14
Figure 10 : a. Tablier de glace couvert de neige en août 2020 dans le Triangle du Tacul (massif du Mont-Blanc); b. tablier de glace découvert en janvier 2021.....	14
Figure 11 : Bâches réfléchissantes sur un glacier suisse.....	15
Figure 12 : Évolution de l'altitude et de la surface du glacier du Khumbu de 1992 à 2008.....	16
Figure 13 : Comparaison diachronique de MNT centrés sur l'Everest montrant les pertes d'épaisseur des glaciers autour de l'Everest.....	16
Figure 14 : Glacier rocheux au Sud du cirque du Nuptse.....	17
Figure 15 : Représentation de l'accumulation d'eau dans les lacs supraglaciaires de la partie aval du glacier du Khumbu, par périodes de 4 ans.....	17
Figure 16 : Éléments menant à l'apparition d'un phénomène de GLOF et conséquences induites(A) <i>averses importantes</i> , (B) <i>avalanche de neige/séracs</i> , (C) <i>coulée de boue</i> , (D) <i>affaiblissement du barrage par dégradation de la moraine gelée</i> , (E) <i>séisme</i> , (F) <i>dépassement de la capacité de rétention du lac</i> .....	18
Figure 17 : Principaux risques naturels liés à la vallée du Khumbu.....	19
Figure 18 : E.Hillary et T.Norgay au sommet de l'Everest en 1953.....	19
Figure 19 : Surfréquentation sur les pentes de l'Everest.....	20
Figure 20 : R. Messner au sommet de l'Everest en style alpin, 1978.....	20
Figure 21 : Recensement des ascensions sur l'Everest de 1970 à 2019.....	20
Figure 22 : Ombrage du bassin versant du Khumbu, résolution 8 m.....	22
Figure 23 : Paramètres pour générer un MNT à partir d'un modèle LiDAR sous CloudCompare....	22
Figure 24 : (a) Ensemble de MNT issus de CloudCompare ouverts dans QGIS; (b) MNT du glacier du Khumbu après fusion dans QGIS.....	23
Figure 25 : Ombrage LiDAR du village de Gorak Shep, au Sud d'un lac asséché et au Nord d'un cordon morainique.....	23
Figure 26 : Détail du fond de carte final, centré sur le cirque glaciaire de l'Everest.....	24
Figure 27 : Comparaison entre les images Bing et Pléiades.....	24
Figure 28 : Paramètres de création d'une couche vectorielle sur QGIS.....	25
Figure 29 : Création de la couche "Glacier non-couvert" sous QGIS.....	25
Figure 30 : Légende complète de la carte géomorphologique du bassin versant du Khumbu.....	26
Figure 31 : Paramètres de création du champ "Superficie".....	27
Figure 32 : Paramètres de création du champ "Superficie Totale (ha)".....	27
Figure 33 : Résultats du traitement statistique, "Superficie" en m2, "SupTotHa" en ha.....	27
Figure 34 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu, avec cadres de localisation des résultats.....	29
Figure 35 : Bastion morainique du glacier du Khumbu.....	30
Figure 36 : Moraines latérales du cirque du Lobuche et du glacier du Khumbu.....	30
Figure 37 : Glaciers suspendus de la face ouest du Nuptse.....	31

Figure 38 : Icefall du Khumbu, glacier rocheux (GR) et glacier couvert (GC).....	31
Figure 39 : Glacier rocheux, versant du Pumori-Est.....	32
Figure 40 : Cirque du Nirekha peak, à l'Ouest du bassin versant du Khumbu.....	33
Figure 41 : Histogramme des surfaces (en hectares) occupées par les différents types de glaciers dans le bassin versant du Khumbu.....	33
Figure 42 : Diagramme de Gantt de la répartition des tâches du début à la fin du stage.....	35

## Index des annexes

Annexe 1 : Carte géomorphologique de la vallée de Kalguty dans le massif de l'Altaï (Deline et al., 2020).....	44
Annexe 2 : Carte géomorphologique de cirques glaciaires alpins (Kirkbride et Deline, 2018).....	45
Annexe 3 : Carte géomorphologique du bassin versant de l'Imja Tse au Népal (Landry, 2008).....	46
Annexe 4 : Carte géologique de l'Everest/Tibet du Sud (Searle et al., 2003).....	47
Annexe 5 : Détail du glacier du Khumbu (Fushimi et al., 1977).....	48
Annexe 6 : Etapes de progression de la cartographie géomorphologique du bassin du Khumbu, daté de gauche à droite :07/05, 13/05, 16/05, 20/05, 27/05, 04/06/2024.....	49
Annexe 7 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu (partie 1/2).....	50
Annexe 8 : Carte géomorphologique du bassin du Khumbu (partie 2/2).....	51

## Table des matières

Introduction.....	6
I) Contexte du stage.....	8
1.1. Présentation du laboratoire.....	8
1.2. Présentation des objectifs de stage.....	9
1.2.1. <i>Le Khumbu : espace de sciences</i> .....	9
1.2.2. <i>Les missions d'EDYTEM</i> .....	10
1.3. Contexte géographique du Khumbu.....	10
II) Cadre théorique.....	13
2.1. La cryosphère de haute-altitude.....	13
2.1.1. <i>Typologie des appareils glaciaires</i> .....	13
2.1.2. <i>Les enjeux autour de la cryosphère de haute altitude</i> .....	15
2.2. Quelques évolutions récentes du bassin du Khumbu.....	16
2.2.1. <i>Évolution du bassin du Khumbu face au changement climatique</i> .....	16
2.2.2. <i>Le tourisme himalayen</i> .....	19
III) Cadre méthodologique.....	21
3.1. Données disponibles et produites.....	21
3.2. Méthode de la cartographie géomorphologique.....	24
3.3. Traitements statistiques.....	27
IV) Résultats.....	28
4.1. Présentation des résultats.....	28
4.2. Analyse par secteur.....	30
4.2.1. <i>Secteur aval du bassin du Khumbu</i> .....	30
4.2.2. <i>Secteur Gorak Shep / Nuptse</i> .....	31
4.2.3. <i>Secteur de la Icefall</i> .....	31
4.2.4. <i>Secteur Pumori-Est</i> .....	32
4.2.5. <i>Secteur ouest du Khumbu</i> .....	33
4.2. Analyses statistiques.....	33
V) Discussion.....	34
5.1. Critiques et perspectives.....	34
5.2. Retour d'expérience.....	34
5.3. Lien avec le Master.....	36
Conclusions.....	37
Bibliographie.....	38
Annexes.....	44

# Résumé / Abstract :

Le bassin versant du Khumbu, dans le Parc National de Sagarmatha (Népal), est un site majeur pour le tourisme sportif avec l'ascension de certains des plus hauts sommets du monde dont l'Everest (8848 m) et des treks de haute-altitude. Victime de son succès, il porte les stigmates d'un tourisme de masse apportant son lot de conséquences pour les populations locales : contamination de l'eau par les déchets (humains et matériels), dégradation des sentiers en raison d'une surfréquentation, et des conditions de travail de plus en plus dangereuses imposées par les clients.

L'équipe *Morphodynamiques* du laboratoire EDYTEM s'est positionnée pour étudier cette région sous l'angle de la pollution générée par les expéditions et celui des impacts du changement climatique sur la stabilité des parois glaciaires et rocheuses.

C'est dans ce contexte que m'a été confiée la réalisation d'une carte géomorphologique à l'échelle du bassin de l'actuel glacier du Khumbu. Il est composé de six bassins se rejoignant en un seul glacier de vallée au niveau de Gorak Shep. Le glacier est long de 32km, d'une largeur variant de 600m à plus de 1 km. Le bassin a une superficie de 80 km<sup>2</sup>. L'objectif de ce travail est de rassembler des données déjà disponibles et d'effectuer de nouvelles interprétations concernant les glaciers et les formes et formations géomorphologiques de cette région emblématique des paysages de très hautes montagnes.

Les données ont été intégrées dans le Système d'Information Géographique QGIS. Il s'agit d'images satellites récentes ainsi que d'une acquisition LiDAR d'une partie de la zone d'étude (2019).

La carte géomorphologique présente l'état quasi actuel du bassin du Khumbu, permettant une comparaison diachronique avec de plus anciennes images satellites ou photographies terrestres. On y voit un recul progressif des glaciers non-couverts aux profits des glaciers couverts, l'ancienne On observe la libération des moraines datant probablement du Petit Âge Glaciaire associée au retrait glaciaire, un développement de la couverture détritique des glaciers, ou encore la transition de la partie basse du bassin vers un modèle fluvio-glaciaire avec ces mêmes moraines percées de brèches.

**Mots clés :** carte géomorphologique, glaciers blancs, glaciers couverts, glaciers rocheux, bassin du Khumbu, Everest, Himalaya

The Khumbu basin is located in the Sagarmatha National Park (Nepal). It is known as the highway to the Everest (8848 m a.s.l.). It is seen as a victim of its own success, as it carries wounds related to a mass tourism effect. This draws consequences to local populations : water contamination caused by human and material wastes, trail degradations by the trampling of tourists, working conditions made worse each year because of the demands of clients.

The *Morphodynamics* team of the EDYTEM laboratory is about to study the pollution linked to this tourism, but also the effects of global warming on glaciers and rock walls.

My main objective of this work was to build a geomorphological map scaled to the drainage basin of the Khumbu glacier. It is composed of six majors areas which meet at Gorak Shep. The glacier is 32km long, from 600m to 1 km wide. The basin has an area of nearly 80 km<sup>2</sup>. The aim of the work is to gather already produced data with new interpretations on glaciers, forms and landforms of this region and its emblematic high mountains landscapes.

Data has been collected by linking recent satellite images with a LiDAR acquisition (2019) imported in QGIS.

The geomorphological map shows the current state of the Khumbu basin, allowing to analyse it diachronically using former satellite views or photos taken on site. As a result, we see that clean glaciers are slowly yielding ground to debris-covered glaciers ; we can also spot the former extension of the glaciers thanks to the moraines probably built during the Little Ice Age ; we could even formulate the hypothesis that the lower part of the basin is slowly migrating towards a fluvio-glacial model, with those moraines being perforated by breaches.

**Key words :** geomorphological map, clean glaciers, debris-covered glaciers, rock glaciers, Khumbu basin, Everest, Himalaya