

SHVR
SOCIÉTÉ D'HISTOIRE
DU VALAIS ROMAND



Annales
valaisannes
2019

Giétro 1818 sous la loupe des sciences
Actes du colloque 14-17 juin 2018

Les débâcles glaciaires au Népal

par

Monique Fort
professeur émérite,
Université de Paris

INTRODUCTION

La chaîne himalayenne et le plateau Tibétain sont considérés dans leur ensemble comme le « château d'eau » de l'Asie¹. C'est en effet dans les hauts massifs englacés que les plus grands fleuves de l'Asie (l'Indus, le Gange, le Brahmapoutre, l'Irrawady, la Salouen, le Mekong, le Yangzi Jiang et le Huang-ho) prennent leur source, avant d'alimenter près d'un tiers de la population mondiale vivant dans les basses terres situées en aval, notamment en Inde, en Chine et dans la péninsule indochinoise (Fig. 1). Ces fleuves et leurs affluents sont par ailleurs une ressource pour la production d'hydro-électricité², dont ces pays en développement ont le plus grand besoin. Pourtant et paradoxalement, ces cours d'eau contribuent à engendrer des risques naturels tout au long de leur tracé au travers de la montagne³, allant des glissements de terrain aux crues les plus brutales, à l'origine de très graves dégâts et parfois d'un nombre élevé de victimes.

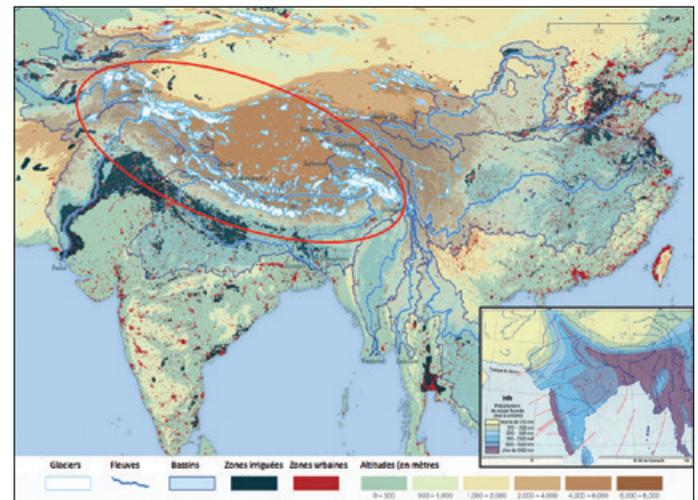


Figure 1. Le « château d'eau » de l'Asie : les sources des huit plus grands fleuves se trouvent dans l'ellipse rouge centrée sur le haut plateau du Tibet. (National Mission on Himalayan Studies, nmhs.org.in)

¹ IMMERZEEL *et al.* 2010.

² SCHWANGHART *et al.* 2016.

³ FORT 2011.

Dans les parties englacées situées en amont de ces bassins fluviaux, les débâcles glaciaires font partie de ces dangers⁴, et sont de plus en plus prises au sérieux par les scientifiques et les autorités⁵ du fait du retrait accéléré des

glaciers himalayens au cours des dernières décennies⁶, en lien entre autres avec l'élévation des températures moyennes annuelles, manifestation d'un changement climatique à l'échelle du globe terrestre.

LES TYPES DE DÉBÂCLES GLACIAIRES EN HIMALAYA

Au moins trois types de débâcles glaciaires ont été décrits en Himalaya⁷.

1. Le type de débâcle le plus fréquent est le lâchage d'eaux issues de la fonte des glaciers et retenues en amont de moraines frontales sous forme de lacs (Fig. 2). La stabilité des barrages morainiques n'est qu'apparente ; elle peut être remise en cause brutalement et la vidange des lacs qui en résulte provoque en aval des crues catastrophiques, ou GLOF (glacial lake outburst flood)⁸.

2. D'autres débâcles sont liées à la rupture de poches d'eau sous-glaciaires, à l'instar de ce qui s'est produit en 1892 à Tête-Rousse (Alpes françaises)⁹ : ces débâcles sont d'autant plus dangereuses que les poches d'eau ou les lacs sous-glaciaires (dans le cas d'irrégularités du substrat rocheux) ne sont pas faciles à mettre en évidence, notamment en Himalaya où les moyens techniques et les facilités d'accès manquent, en particulier dans les massifs isolés. Nous en présenterons brièvement un exemple ci-après.

3. Enfin, des débâcles peuvent être provoquées par la rupture de barrages de glace¹⁰ : toute langue glaciaire occupant le fond d'une vallée entrave directement les écoulements venus de l'amont de cette vallée. Si les eaux peuvent le plus souvent se frayer un chemin sous le glacier, il n'est pas

rare qu'un lac se forme en amont, jusqu'à ce que le glacier finisse par céder, provoquant la vidange brutale du lac ou d'une série de lacs qui se relaient dans la vallée (Fig. 3). Peu fréquent au Népal, ce type de débâcle est commun dans le Karakorum, où les glaciers ont un comportement erratique et imprévisible bien connu¹¹ : on parle en général de « surges », ou d'avancées par à-coups, pour caractériser les accélérations brutales de la vitesse d'écoulement de la glace, vitesse qui peut atteindre plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres, par jour. Parmi les exemples les plus étudiés, les vallées supérieures de Karambar, de Shyok, de Shimshal et de la Hunza (toutes au Pakistan) ont subi des inondations à répétition liées à la vidange de tels lacs de barrage glaciaire. Contrairement aux deux types précédents, ce type de débâcle ne semble pas être directement lié au changement climatique, le Karakorum étant considéré comme une « anomalie » de ce point de vue¹² : il n'y a pas de recul généralisé des glaciers, bien au contraire, car leur bilan de masse est stationnaire, voire positif¹³.

Nous illustrerons ici les deux premiers types de débâcles, puisque ce sont essentiellement ceux que l'on rencontre au Népal, en particulier le premier type lié à la rupture d'un barrage morainique.

⁴ IVES 1986.

⁵ MOOL *et al.* 2001.

⁶ CHALISE *et al.* 2006, FUJITA *et al.* 2013, LINSBAUER *et al.* 2016, MAHARJAN *et al.* 2018.

⁷ IVES *et al.* 2010, ICIMOD 2011, GARDELLE *et al.* 2011, ICIMOD 2015, LIU *et al.* 2013.

⁸ CENDERELLI, WOHL 2001 ; WESTOBY *et al.* 2014.

⁹ VINCENT *et al.* 2012.

¹⁰ HEWITT, LIU 2010 ; ITURRIZAGA 2011.

¹¹ HEWITT 1982.

¹² HEWITT 2005.

¹³ BHAMBRI *et al.* 2017.



Figure 2. A gauche, le lac Dig Tsho et sa moraine frontale éventrée par le GLOF dévastateur d'août 1985. (ICIMOD 2009)

A droite, le lac Thulagi : la retenue lacustre s'étend en longueur au fur et à mesure du retrait glaciaire. Ces types de lacs de barrage morainique, souvent invisibles depuis les vallées habitées, présentent une menace pour les populations et les infrastructures situées en aval. (IKONOS-2 du 14 novembre 2009 superposée à un modèle numérique de terrain Google Earth)

LES DÉBÂCLES GLACIAIRES ENGENDRÉES PAR LA RUPTURE D'UN BARRAGE MORAINIQUE

Quels sont les facteurs qui interviennent dans la rupture d'un barrage morainique?¹⁴ Le premier facteur est la solidité intrinsèque du barrage, qui doit résister à la pression du volume d'eau. Les matériaux morainiques sont par définition transportés par un glacier et déposés soit longitudinalement (moraines latérales) soit frontalement (moraines frontales) : dans les deux cas, on y trouve des blocs rocheux de tous calibres et une masse variable de matériaux plus fins. La poussée de la glace, latéralement et frontalement,

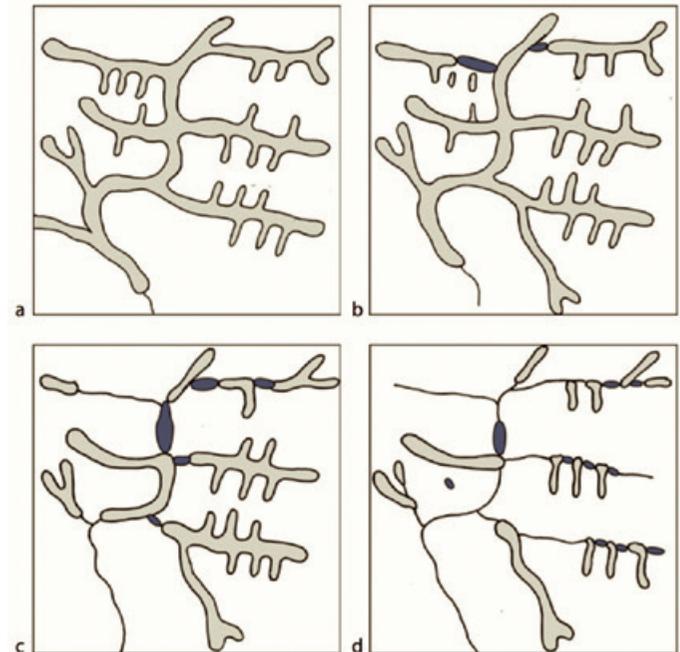


Figure 3. En période de déglaciation, le système glaciaire se désintègre en glaciers individuels (a), avec d'abord des lacs barrés par les glaciers principaux (b), puis des lacs barrés par des glaciers tributaires (c). La dernière phase (d) montre l'apparition de lacs de barrage morainique. (ITURRIZAGA 2011)

a compacté ces débris, mais il n'est pas rare d'observer des éboulements localisés ou de petites coulées de débris, voire des affaissements, sur les flancs externes ou internes de ces moraines¹⁵ (Fig. 4). Néanmoins, le volume des moraines des glaciers népalais est en général suffisamment important pour leur assurer une résistance minimale.

Un deuxième facteur peut intervenir sur la stabilité de la moraine : la présence ou non de glace interne (Fig. 4). Cette glace dérive d'une double origine : 1° on peut avoir

14 BENN *et al.* 2012.

15 WESTOBY *et al.* 2014.

des blocs détachés du front glaciaire puis ensevelis au sein de la moraine suite à l'avancée et au stationnement du front glaciaire ; 2° par ailleurs, les eaux de fonte superficielles s'infiltrent et regèlent en profondeur, formant un ciment de glace diffuse, une sorte de permafrost. Avec le réchauffement climatique, la fonte progressive de la glace interne est un facteur de fragilisation car l'eau ainsi libérée provoque le « ramollissement » des matériaux morainiques, effet qui s'ajoute aux vides créés par la disparition des blocs de glace : ces effets conjugués aboutissent peu à peu à déstabiliser l'édifice morainique¹⁶.

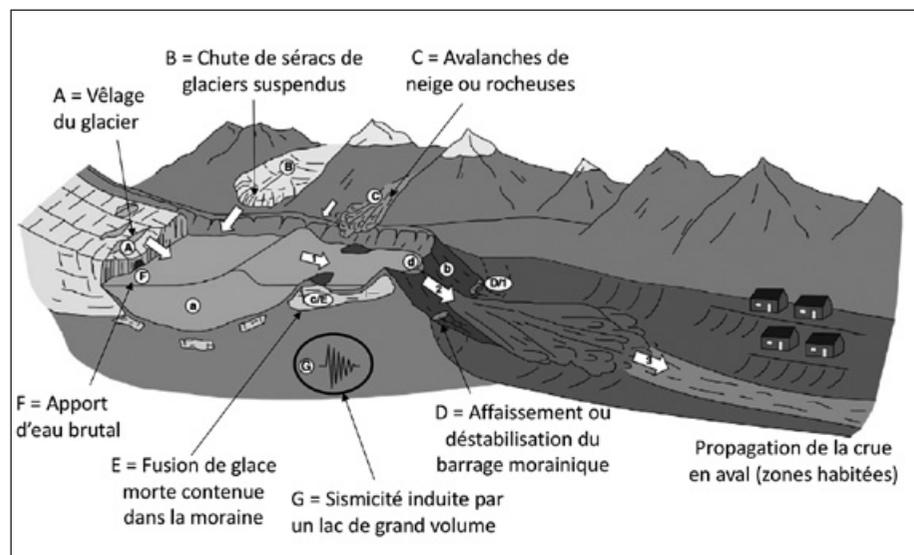


Figure 4. Schéma montrant un lac de barrage morainique et les différents facteurs (représentés par les lettres A, B, etc.) pouvant provoquer la vidange brutale du lac. La vidange elle-même s'effectue en trois étapes représentées par des flèches blanches numérotées : 1. Déclenchement d'une seiche. 2. Rupture du barrage morainique. 3. Propagation de la crue en aval, dans les zones habitées. [Adapté de RICHARDSON, REYNOLDS 2000 et WESTOBY *et al.* 2014]

Mais le facteur le plus redouté est la formation d'une seiche, autrement dit d'une onde oscillatoire engendrée dans le lac par un choc extérieur, onde qui se propage en surface du lac avant de déborder du barrage morainique, l'entailler et inonder la vallée en aval (Fig. 4)¹⁷. Dans un milieu de haute montagne comme celui de l'Himalaya, il existe plusieurs facteurs potentiels de déclenchement d'une telle onde, ou vague¹⁸. Le vèlage du glacier au front duquel le lac s'est développé est une première cause possible : les glaciers himalayens, surtout ceux de la région de l'Everest, ont souvent plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, et les crevasses nombreuses observées

à leur extrémité favorisent l'écroulement brutal de pans de glace dans le lac et la formation d'une onde. Autre cause possible : la chute de séracs depuis des glaciers suspendus dominant le lac ; c'est ce qui s'est produit en 1985 dans le lac du Dig Tsho¹⁹ et a engendré un GLOF extrêmement dévastateur en aval (Fig. 2). D'autres causes moins spectaculaires doivent également être mentionnées : l'arrivée brutale d'avalanches de neige ou de roches dans le lac²⁰, ou un apport d'eau brutal depuis le front du glacier, voire même une sismicité induite par le volume d'eau²¹, phénomène bien connu des gestionnaires de barrages artificiels, sismicité d'autant plus marquée que le niveau d'eau est élevé et que le rapport largeur/hauteur du lac est faible.

Enfin, dans une chaîne de montagnes aussi active que l'Himalaya, on ne peut exclure l'influence de vrais séismes, comme ceux qui se sont produits les

¹⁶ FUJITA *et al.* 2009, WATANABE *et al.* 2009, ICIMOD 2011, BOLCH *et al.* 2018.

¹⁷ WESTOBY *et al.* 2014.

¹⁸ RICHARDSON, REYNOLDS 2000 ; BALLANTYNE 2002 ; HAEBERLI *et al.* 2017.

¹⁹ VUICHARD, ZIMMERMANN 1987.

²⁰ LALA *et al.* 2018.

²¹ WESTOBY *et al.* 2014.

25 avril et 12 mai 2015 au Népal, qui ont localement dés-stabilisé les moraines terminales et latérales bordant certains lacs, déjà en cours de détérioration, par la création de fissures massives, de blocs décalés et d'effets sur l'exutoire

existant²². Par ailleurs, les séismes peuvent aussi être les déclencheurs potentiels des phénomènes précédemment évoqués (chutes de séracs, avalanches de glace et débris...) et ainsi induire des débâcles catastrophiques.

LA PRISE DE CONSCIENCE SUR LES DÉBÂCLES GLACIAIRES ENGENDRÉES PAR LA RUPTURE D'UN BARRAGE MORAINIQUE

En 2011, le Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD) a publié un inventaire²³ recensant 1466 lacs glaciaires du Népal, dont au moins 21 sont considérés comme potentiellement dangereux, susceptibles d'être vidangés brutalement sous forme de GLOF (Fig. 5). Une étude plus récente²⁴ précise que parmi les lacs recensés, 131 d'entre eux ont une superficie supérieure à 0,1 km², et que sur ces 131 lacs, 19 présentent un très fort risque de GLOF, 26 autres une forte probabilité, 86 autres une probabilité modérée et les 4 restants un faible potentiel de GLOF. Ces prévisions s'inscrivent dans une évolution observée sur les cinquante dernières années, au cours desquelles 26 débâcles ont été recensées, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y en ait pas eu davantage, mais les crues qu'elles auraient pu engendrer n'ont à l'époque pas toujours été identifiées comme telles par les habitants.

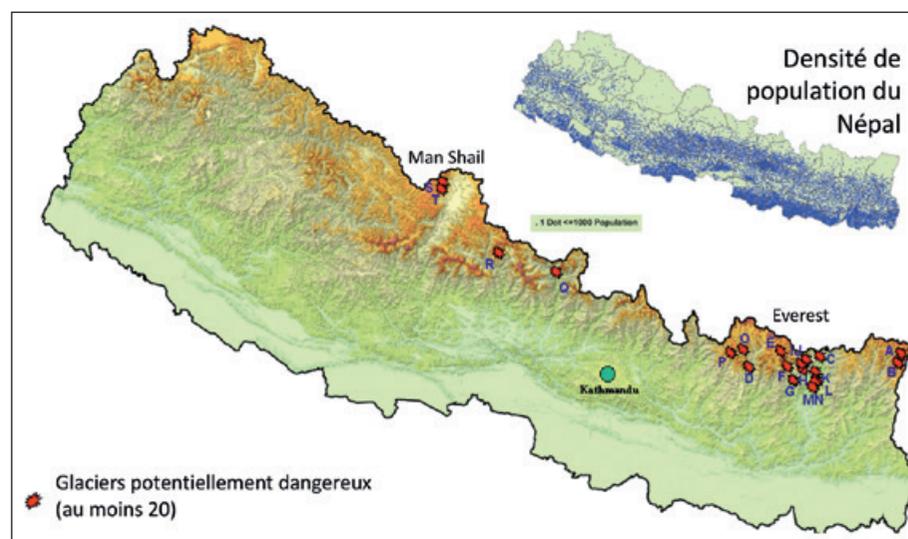


Figure 5. La carte principale du Népal localise les glaciers considérés comme potentiellement dangereux, surtout concentrés dans la zone de l'Everest-Khumbu Himal, là où les fonds de vallées englacées sont situés à des altitudes proches de 5000 m ou plus et ont un profil longitudinal relativement faible, permettant la formation durable des lacs. Les fortes densités de population (carte en haut à droite ; 1 point représente 1000 hab.) sont situées en général très en aval des glaciers, ce qui explique la méconnaissance des dangers encourus en cas de débâcle glaciaire (GLOF). (ICIMOD 2011)

²² BYERS *et al.* 2017, ICIMOD 2015.

²³ ICIMOD 2011.

²⁴ ROUNCE *et al.* 2017.



Figure 6. Moraine frontale du Dig Tsho, éventrée par la débâcle de 1985. Suite au séisme de 2015, une petite débâcle s'est à nouveau produite, mais sans conséquences notables en aval. (Photo Rainer Bell, 2018)



Figure 8. Plus de trente ans après l'événement, en aval de la confluence entre la Bhothe Koshi et la Dudh Koshi, en amont de Jorsale (kilomètre 15 du diagramme de la figure 7), les énormes blocs charriés pendant le GLOF du Dig Tsho sont toujours visibles dans le paysage. Pour la localisation de Jorsale, voir la figure 12. (Photo Monique Fort, 2018)

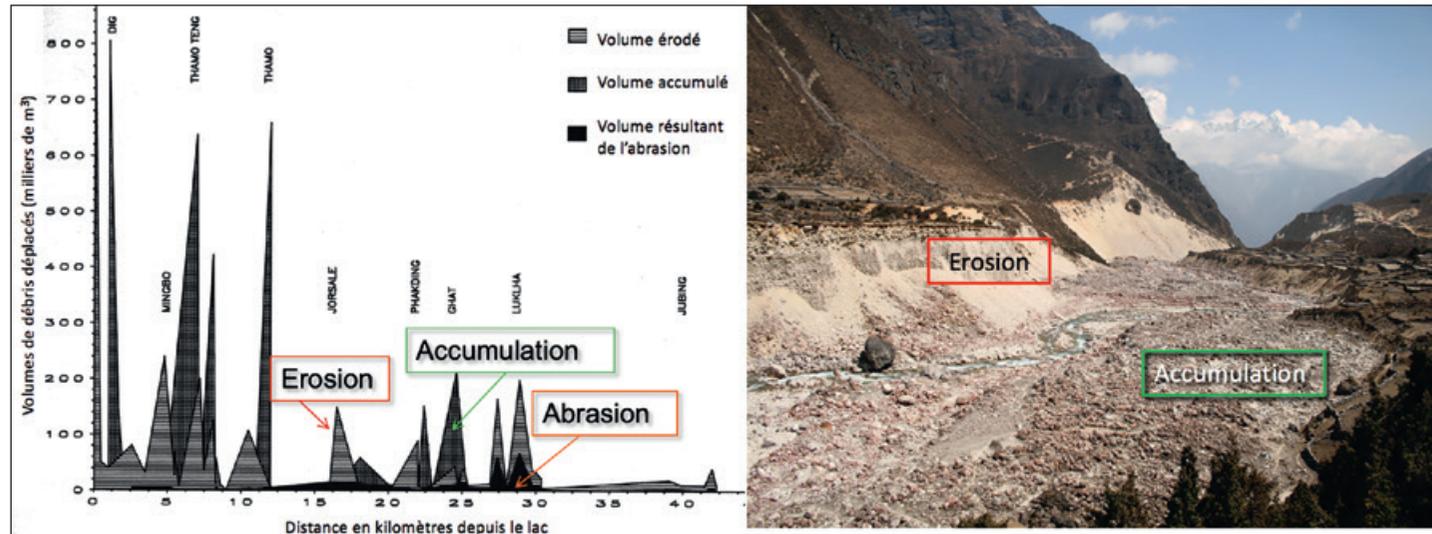


Figure 7. Caractéristiques du GLOF du Dig Tsho (vallée de la Bhothe Koshi, Khumbu Himal). A gauche, le diagramme (adapté de VUICHARD, ZIMMERMANN 1987) montre bien les caractéristiques hydromorphologiques d'un GLOF : les phénomènes d'érosion, d'accumulation (ou aggradation) et d'abrasion coexistent tout au long de la vallée et se relaient temporellement en un même lieu. La photo de droite illustre les variations de comportement du flot de crue en fonction de la largeur de la vallée, de la nature des matériaux (substrat géologique ou dépôts d'anciennes terrasses ou moraines) et de la trajectoire suivie (linéaire ou sinueuse). Quelques années après l'événement, on perçoit encore l'alternance des processus d'érosion et d'accumulation. (Monique Fort, 1989)

LA DÉBÂCLE DU DIG TSHO

L'événement fondateur à l'origine d'une prise de conscience du véritable danger que représente la rupture d'un barrage morainique est, en 1985, le GLOF du Dig Tsho²⁵, lac situé dans la vallée de la Bhote Koshi, à l'ouest du massif de l'Everest. Cette débâcle glaciaire s'est propagée sur plus de 40 km en aval et a détruit une centrale hydro-électrique toute neuve (perte de plus de 2 millions de dollars), de nombreux ponts, et a fait au moins 5 victimes. La cause initiale de ce GLOF est une chute de séracs massive (environ 150 000 m³) qui, depuis le front suspendu du glacier de Langmoche, a directement plongé dans le Dig Tsho. La vague (5 m de haut) créée par cette chute s'est propagée au travers du lac avant de submerger le barrage morainique et de l'éroder (Fig. 6), ce qui a eu pour effet immédiat la libération de 5 × 10⁶ m³ d'eau et 3 × 10⁶ m³ de débris, et leur transfert en aval, le long de la Bhote Koshi puis de la Dudh Koshi²⁶. Cette débâcle glaciaire a eu des conséquences dramatiques tout au cours de sa trajectoire, avec des zones d'érosion des berges parfois à l'origine du déclenchement de glissements de terrain, mais avec aussi des zones de sédimentation (aggradation) sur de vastes surfaces, modifiant totalement la physionomie antérieure du fond de vallée (Fig. 7). Plusieurs décennies après, les traces de cette débâcle exceptionnelle restent toujours visibles dans le paysage, comme en témoignent des blocs de plus de 10 m³ accumulés en amont de Jorsale (Fig. 8).

²⁵ VUICHARD, ZIMMERMANN 1987.

²⁶ *Ibidem*.

Depuis cet événement, de nombreuses recherches ont été menées sur des lacs actuels particulièrement menaçants, comme le lac Thulagi (massif du Manaslu ; Fig. 2) et, dans la région de l'Everest-Khumbu Himal, le Tsho Rolpa (dans le Rolwaling) et le lac Imja (massif du Lhotse)²⁷.

LE LAC THULAGI

Situé au sud-ouest du Manaslu, le lac Thulagi, ou lac Dona (altitude 4050 m, 2,5 km de long, 40 × 10⁶ m³), a commencé à se former il y a une cinquantaine d'années²⁸ (Fig. 9).

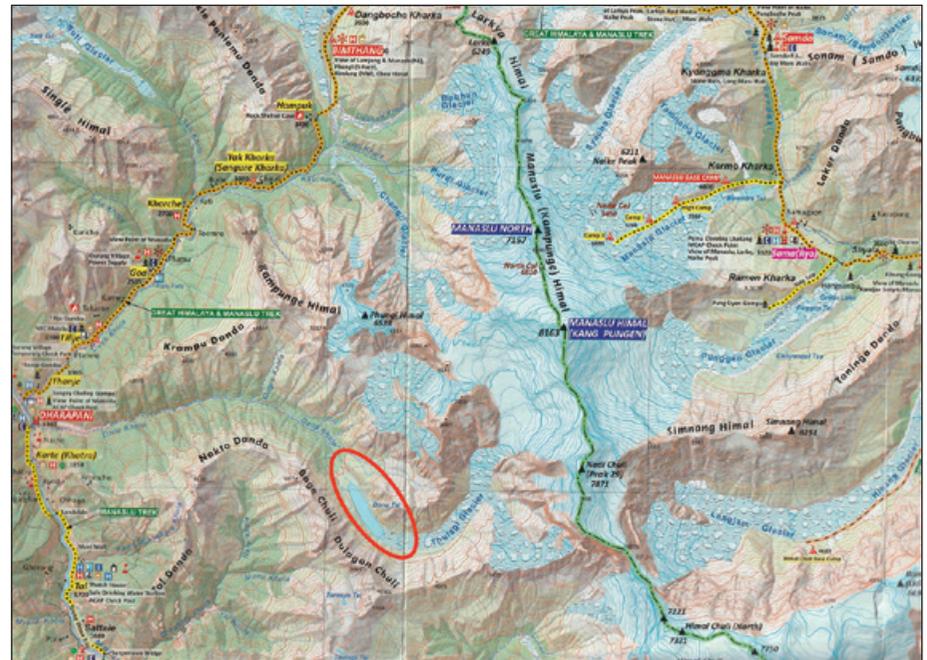


Figure 9. Extrait de la carte topographique *Around Manaslu and Tsum Valley*, montrant la localisation du lac Thulagi (ellipse rouge), au pied du Manaslu (8163 m) et les enjeux existants dans la vallée de la Marsyangdi depuis Dharapani, avec en aval le village hautement touristique de Tal (au sud-ouest). (Himalayan Map House)

²⁷ KHANAL 2009, SHRESTHA *et al.* 2010.

²⁸ HANISCH *et al.* 1998, HARITASHYA *et al.* 2018.

Il a été classé comme le sixième lac le plus dangereux du Népal²⁹, car son exutoire se déverse directement, au travers de gorges profondes, à Dharapani, dans la vallée de la Marsyangdi, là où des milliers de touristes randonnent chaque année pour faire le tour du massif de l'Annapurna (8091 m). Compte tenu des nombreux enjeux qui se trouvent en aval de cette vallée, notamment des villages situés à proximité du lit de la Marsyangdi, ainsi que deux centrales hydro-électriques (l'une de 69 MW, l'autre de 70 MW), l'évolution du lac Thulagi est donc particulièrement suivie.

Si la surface du lac augmente régulièrement (retrait du front glaciaire), il semble que depuis quelques années, le niveau d'eau tende à baisser légèrement, réduisant le risque potentiel d'un GLOF³⁰. Certains indices de terrain, comme la présence d'anciens chenaux (Fig. 10), suggèrent que peut-être une ou deux débâcles se seraient produites dans un passé récent, mais il n'en existe aucun témoignage oral. L'émissaire du lac actuel entaille deux petits cordons morainiques situés en aval de la masse principale de la moraine frontale qui, elle, semble bien stabilisée comme en témoigne sa couverture végétale³¹, ce qui est plutôt rassurant. Une digue a néanmoins été construite pour écrêter le passage éventuel d'une seiche. Mais des phénomènes d'érosion régressive (vers l'amont) ont été observés, qui pourraient à terme déstabiliser cette digue³². En cas de disparition de la

digue, l'écrêtage ne serait plus effectif et pourrait mettre directement en danger les vallées de la Dona et de la Marsyangdi en aval. Un site est particulièrement problématique, celui du village de Tal (Fig. 11) construit à peine quelques mètres au-dessus du lit de la Marsyangdi, dans une section où la rivière a un profil longitudinal très plan, car ce profil est hérité du remplissage d'un ancien lac créé par un énorme glissement de terrain – non daté – ayant barré la vallée de la Marsyangdi en aval. Le site de Tal serait

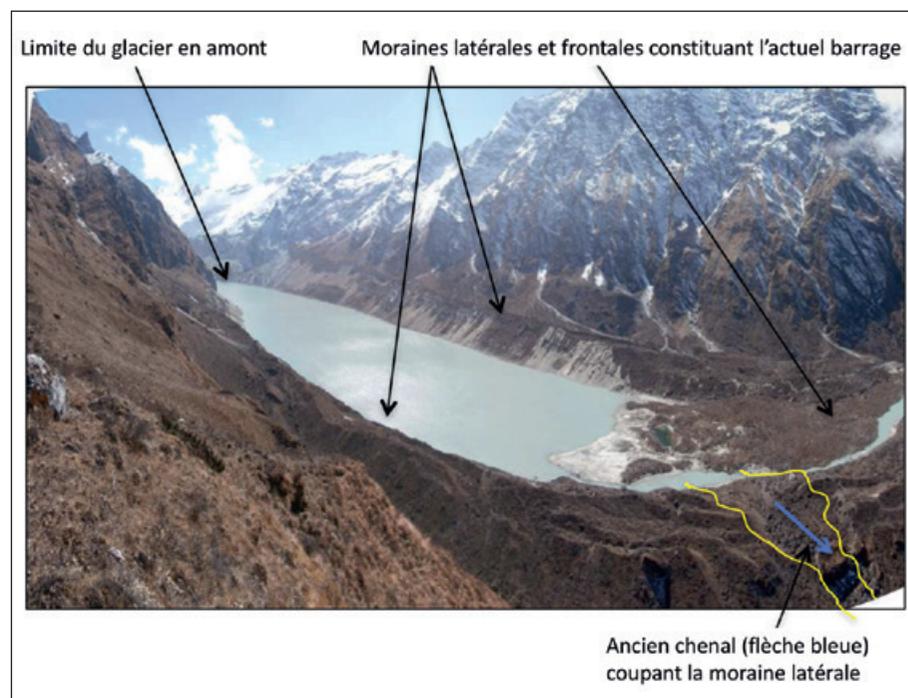


Figure 10. Lac Thulagi (longueur environ 2,5 km) et son front, vu depuis le nord. Les moraines montrent des traces d'érosion sur leur face interne (vers le lac), mais en aval elles sont totalement recolonisées par une végétation arbustive. (Image adaptée de GDH, Association des géorisques et des hommes, Fondation Petzl)

²⁹ ICIMOD 2011.

³⁰ GDH 2013, PELTO 2016, HARITASHYA *et al.* 2018.

³¹ HARITASHYA *et al.* 2018.

³² GDH 2013, p. 26.

submergé en cas de vidange partielle du lac Thulagi (abaissement de 18 m du niveau du lac), comme l'ont montré de récentes modélisations³³, et tous les ponts et passerelles de la vallée seraient détruits. En fait, les études les plus récentes suggèrent que les menaces s'éloignent peu à peu, car le front du glacier, en amont du lac, est beaucoup moins actif qu'il y a vingt ans³⁴.



Figure 11. Vallée de la Marsyangdi à Tal (vue depuis le sud du village en direction de l'amont). A cet endroit, la vallée est large et en faible pente, entre deux sections à gorges profondes. En cas de débâcle glaciaire issue du lac Thulagi, le niveau d'eau monterait (cf. blocage par le resserrement de la vallée en aval) et atteindrait le village de Tal (au centre au fond). Le nouveau pont métallique (à gauche), installé sur l'éboulement préhistorique (cf. les gros blocs au premier plan) serait lui aussi emporté en cas de débâcle, car il n'est qu'à quelques mètres au-dessus du niveau actuel de la Marsyangdi. L'éboulement rocheux tout frais [2012] a détruit la route et montre que les risques naturels sont nombreux dans ces vallées du haut Himalaya. (Photo Monique Fort, 2012)

LE LAC IMJA

Dans l'est du Népal, si de nombreux lacs sont également suivis comme le Tsho Rolpa dans le Rolwaling, c'est le lac Imja (ou Imja Tsho), situé dans la région du Khumbu Himal, qui depuis de nombreuses années retient l'attention de la plupart des chercheurs³⁵, en raison des enjeux

importants de cette région, peuplée par l'ethnie sherpa et haut lieu de l'alpinisme mondial (Fig. 12). Ce lac se situe au pied de l'Island Peak (ou Imja Tse, 6189 m) et non loin de la face sud du Lhotse (8516 m).

³³ GDH 2013.

³⁴ HARITASHYA *et al.* 2018.

³⁵ BOLCH *et al.* 2008 ; BAJRACHARYA, MOOL 2009 ; FUJITA *et al.* 2009 ; WATANABE *et al.* 2009 ; ICIMOD 2011 ; BOLCH *et al.* 2018 ; HARITASHYA *et al.* 2018.

Un premier lac est apparu à la fin des années 1950 en surface et vers le front du glacier Imja, puis il s'est rapidement agrandi devant le glacier au fur et à mesure du recul de ce dernier (Fig. 13). Cette évolution s'est accélérée au cours des dernières années. Compte tenu des nombreux enjeux en aval, ce lac (5010 m) fait l'objet d'un suivi continu

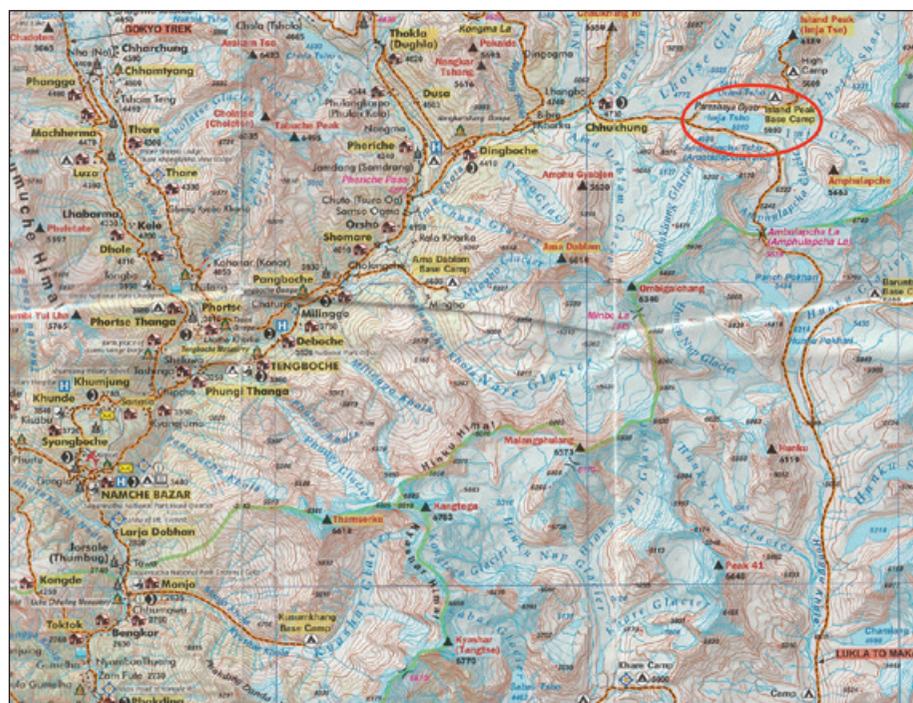


Figure 12. Extrait de la carte topographique Jiri - Everest - Khumbu, Sagarmatha National Park, montrant la localisation du lac Imja (ou Imja Tsho, ellipse rouge), au pied de l'Island Peak, et l'ampleur des enjeux (ponts et villages) dans la vallée de l'Imja Khola puis, en aval de Namche Bazar, dans la Dudh Koshi. Les villages de Chhukung et Dingboche, les plus proches du lac, seraient les premiers affectés en cas de débâcle. (Trekkling Map, Nepal Map Publisher)

depuis plus de vingt ans³⁶. La profondeur du lac Imja est passée de 90,5 m en 2002 à $116 \pm 5,2$ m en 2012³⁷, pour un volume d'eau augmentant de $35,8 \pm 0,7 \times 10^6$ m³ à $61,7 \pm 3,7 \times 10^6$ m³ pendant la même période. En 2014, le volume avait atteint $75,2 \times 10^6$ m³ pour une profondeur maximale de 149,8 m. Ceci révèle un recul toujours plus

rapide du front du glacier, estimé à 52,6 m/an, qui s'est traduit par un accroissement spectaculaire de la surface du lac de 0,04 km² en 1975 à 1,8 km² en 2017³⁸ (soit un accroissement de $0,032 \pm 0,004$ km²/an). Par ailleurs, depuis une dizaine d'années, deux nouveaux petits lacs sont apparus directement sur la face externe de la vaste moraine frontale, juste en aval du grand lac Imja (Fig. 14). En 2016, de nouvelles mesures³⁹ ont montré que le lac avait acquis un volume de $88 \pm 1,4 \times 10^6$ m³, une profondeur moyenne de $65,2 \pm 1$ m et une profondeur maximale de $157,7 \pm 1$ m.

Au début des années 2000, l'évolution rapide de ce lac a suscité de nombreux débats, certains scientifiques estimant qu'il n'y avait pas vraiment de danger⁴⁰, alors que d'autres considéraient au contraire qu'il était urgent de s'en préoccuper⁴¹, d'où une inquiétude montante chez les populations locales. Si certains habitants vivent encore de façon traditionnelle (agriculture et pastoralisme), la plupart d'entre eux tirent désormais la majorité de leurs revenus

36 IVES 1986, IVES *et al.* 2010.

37 SOMOS-VALENZUELA *et al.* 2014.

38 HARITASHYA *et al.* 2018.

39 LALA *et al.* 2018.

40 IVES *et al.* 2010.

41 BOLCH *et al.* 2008.

du tourisme et des activités associées (notamment les cultures de légumes sous serre, l'artisanat...). Les villages sont en général installés sur des terrasses qui se sont formées au cours des derniers millénaires, à la suite du retrait des glaciers. Ces terrasses ont une altitude relative variable



Figure 13. Photos prises en 1956 et en 2017, montrant le retrait spectaculaire du glacier Imja et l'occupation par le lac Imja de l'espace disponible en arrière de la moraine frontale (à droite sur la photo du bas). (Photos Erwin Schneider et Alton Byers)

par rapport au niveau des rivières torrentielles, allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de hauteur. Leur risque d'être affectées par un GLOF dépend donc de leur hauteur, mais aussi de leur distance par rapport au lac Imja, la zone source de la débâcle potentielle.



Figure 14. Le lac Imja, vu vers l'est depuis l'aval, avec le Baruntse au tout premier plan. Deux petits lacs se sont développés sur la moraine frontale depuis les années 2000. En bas à droite, exutoire le long duquel le drainage des lacs Imja (Fig. 15) a été réalisé en 2016. (D'après un cliché in ICIMOD 2011)

LES ACTIONS POUR PRÉVENIR ET RÉDUIRE LES DANGERS LIÉS AUX DÉBÂCLES GLACIAIRES

Dans le cadre du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), un « projet de réduction des inondations par débordement de lacs glaciaires » a été mis en œuvre dans le but de limiter le risque potentiel lié au lac Imja pour les communautés villageoises situées en aval⁴², en particulier celles de Chhukhung et de Dingboche, respectivement distantes de 4 km et 8 km

de ce lac. Le projet s'appuie sur la stratégie suivante : la formation d'un éventuel GLOF depuis le lac Imja peut être considérablement diminuée si, d'une part, on réduit le volume du lac grâce à un système de drainage artificiel strictement contrôlé et si, d'autre part, cette réduction est associée à un système d'alerte précoce impliquant les communautés.

⁴² UNDP 2013, BAJRACHARYA *et al.* 2007.

ABAISSER LE NIVEAU DES LACS ?

Grâce à des crédits de l'Université des Nations Unies (UNU) et avec l'aide de l'armée népalaise, le drainage partiel du lac Imja et de ses deux lacs satellites a été réalisé au cours de l'automne 2016⁴³, ce qui a permis une diminution du niveau d'eau de 3,4 m (Fig. 15), soit une réduction de volume du lac d'environ 10%. Au dire des scientifiques, cet abaissement est déjà un résultat remarquable, car il diminue d'autant les possibilités de submersion du barrage morainique par une seiche⁴⁴, mais cela est sans doute insuffisant à moyen terme. A l'aide d'une modélisation bidimensionnelle appliquée au village de Dingboche, plusieurs scénarios de GLOF ont été envisagés selon le niveau d'abaissement des eaux du lac (-3 m, -10 m, -20 m)⁴⁵. Ces simulations tiennent compte des quantités d'eau subitement relâchées et de la vitesse de propagation de l'onde de crue. Les cartes obtenues montrent quelles zones du village seraient affectées (Fig. 16). Dans le cas d'une diminution de 3 à 10 m, l'espace occupé par les champs en amont du village serait largement balayé par la crue, mais les parties centrale et méridionale du village aussi, alors qu'elles sont occupées par de nombreuses auberges qui accueillent des centaines de touristes (randonneurs ou montagnards) au printemps ou en automne. Seules les parties nord de la terrasse, situées au pied d'une moraine, seraient épargnées. Les résultats montrent clairement que le niveau du lac devrait être abaissé d'environ



Figure 15. Canal de drainage du lac Imja ayant permis un abaissement du niveau d'eau de 3,4 m. Prise en période de basses eaux et de gel, la photo ne reflète pas les débits qui sont évacués en période de fonte des neiges et de mousson, et l'on peut donc s'interroger sur la durabilité de cet équipement à moyen terme. (Photo D. Regmi, décembre 2018)

20 mètres pour pouvoir réduire de manière significative les impacts qu'un GLOF pourrait avoir à Dingboche et plus en aval.

LES SYSTÈMES D'ALERTE ET AUTRES MOYENS DE PRÉVENTION

L'autre volet du projet repose sur la mise en place de systèmes d'information et d'alerte auprès des villageois⁴⁶. Ce volet implique non seulement les scientifiques travaillant sur le lac Imja et les autres lacs menaçant de la région, mais

⁴³ REGMI 2017.

⁴⁴ HARITASHYA *et al.* 2018.

⁴⁵ SOMOS-VALENZUELA *et al.* 2015

⁴⁶ BYERS, THAKALI 2017.

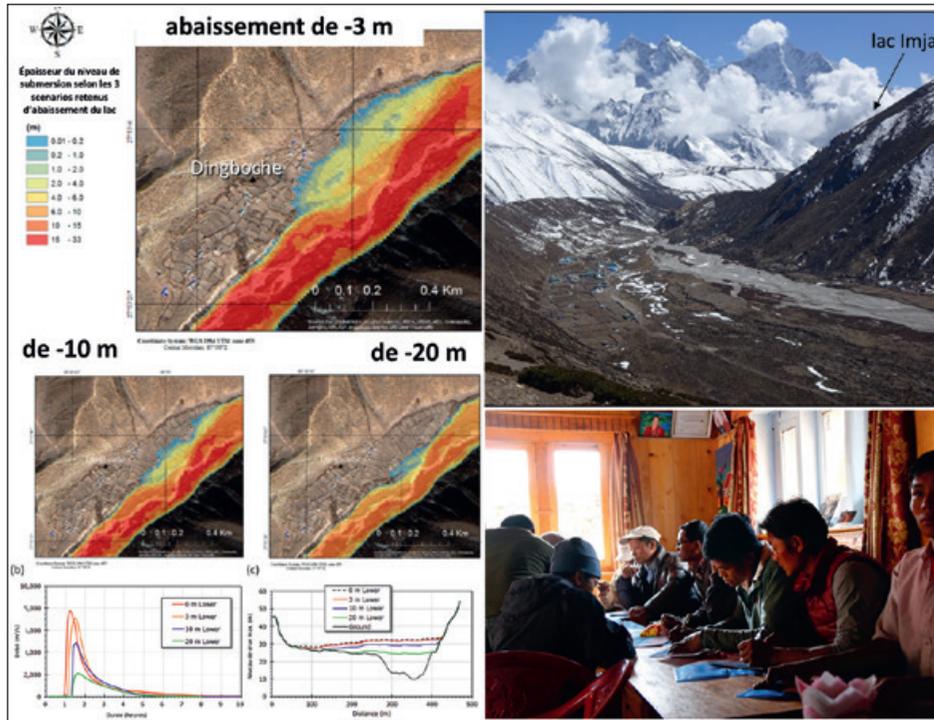


Figure 16. Différentes mesures prises pour comprendre et diminuer le risque de débâcle glaciaire à Dingboche (photo en haut à droite). (Photo M. Fort, 2018)

A gauche, cartes et profils issus de la modélisation de l'extension de l'onde de crue issue des trois lacs Imja et de ses impacts sur le territoire de Dingboche. Trois situations ont été envisagées : valeur minimale (-3 m), moyenne (-10 m), maximale (-20 m), qui ont finalement conduit à un premier abaisssement artificiel du lac de -3,4 m. (SOMOS-VALENZUELA *et al.* 2015) Des réunions d'information avec les villageois et les autorités locales ont été également organisées. (Photo O. Aubriot, 2015)

aussi le Comité de développement du district du Khumbu, le Parc national du Chomolongma (Everest) et sa zone tampon (plus en aval), et indirectement le gouvernement du Népal⁴⁷. L'appui financier et technique est non seulement fourni par le PNUD mais aussi par des monastères et la compagnie locale d'électricité.

Dans les faits, si certaines personnes des vallées de la Bhote Koshi et (en aval) de la Sun Koshi se souviennent encore de la vague déferlante de 1985 (rupture du Dig Tsho) et des dommages considérables qu'elle a entraînés, le risque de débâcle glaciaire reste mal connu, voire ignoré de la plupart des habitants. C'est pourquoi des réunions sont organisées auprès des populations locales en impliquant les responsables des comités de développement villageois⁴⁸, pour les informer et leur expliquer comment se préparer aux dangers et impacts éventuels qu'une telle débâcle pourrait faire peser sur leurs terres, leurs biens et leurs communautés. Concrètement, un système de surveillance des lacs glaciaires, du lac Imja en particulier, a été établi et est régulièrement mis à jour. En parallèle, des systèmes d'alerte précoce ont été installés, un réseau de communication a été installé et, dans chaque village menacé, des membres sélectionnés ont été formés aux exercices d'urgence. De même, des mesures d'adaptation appropriées sont progressivement

mises en place pour protéger les infrastructures, telles que les sentiers, les ponts, les réseaux de distribution d'eau et les centrales hydro-électriques. En particulier, des panneaux d'information ont été érigés dans chaque village pour que les habitants ou les promeneurs sachent où se réfugier en cas d'urgence lors du déclenchement d'une

47 CFGORRP/DHM 2017.

48 ADCM/ADAPT 2015.

alerte (Fig. 17). Ces panneaux comportent aussi des cartes multirisques, incluant non seulement les inondations, mais aussi les glissements de terrain, chutes de blocs, coulées de débris, etc., qui pourraient être liés au passage d'une crue ; mais ils sont devenus souvent illisibles car non protégés des intempéries.

Ces actions d'information et d'alerte sont en effet loin d'être parfaitement efficaces⁴⁹. Les guides et les porteurs ne sont pas inclus dans la liste de ceux à prévenir en cas de déclenchement d'un événement majeur. Les scénarios d'occurrence de débâcles glaciaires ne considèrent pas non plus la spécificité des saisons touristiques ; la capacité des refuges et des centres d'évacuation prévus serait très insuffisante si un GLOF se déclenchait pendant ces périodes et c'est pourquoi certains responsables réfléchissent à une alternative au système d'alerte précoce actuel. Un réseau cellulaire stable serait une possibilité peu coûteuse, de sorte que les habitants des villages les plus proches du lac pourraient diffuser rapidement et plus efficacement des alertes complémentaires en direction de ceux vivant plus en aval dans la vallée.

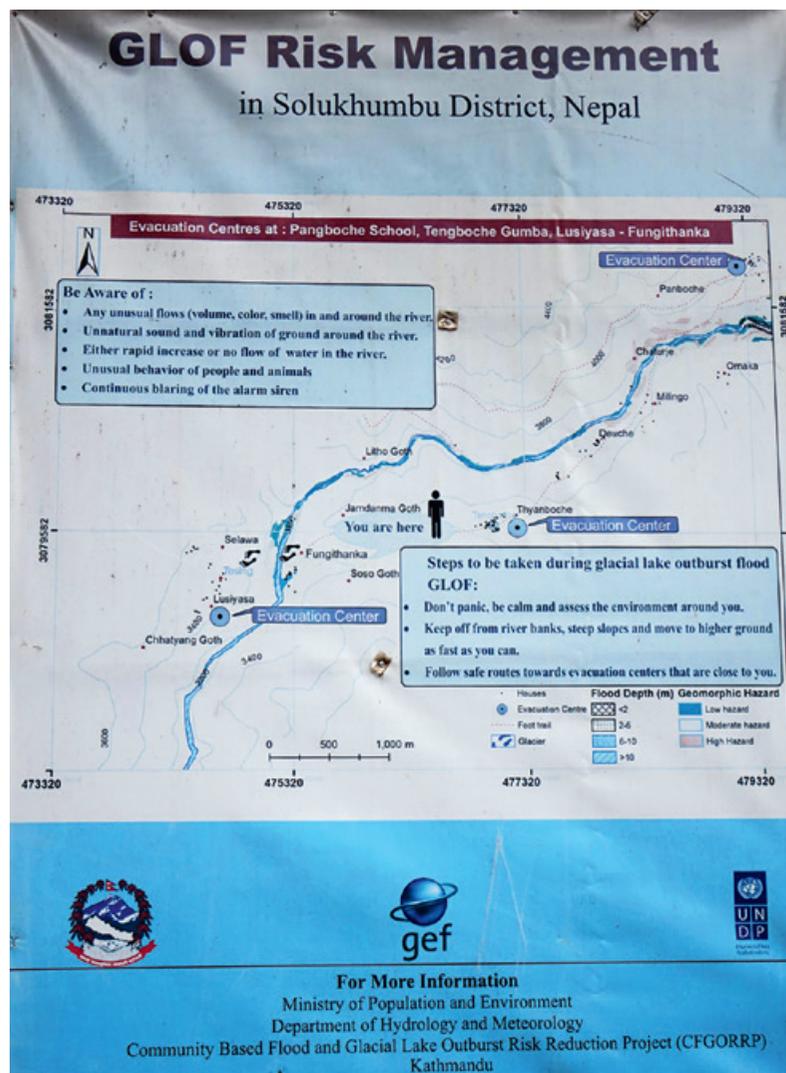


Figure 17. Panneau d'alerte visible à Fungithangka (Phungi Thanga), près du pont qui enjambe l'Imja Khola, entre Thyanboche [parfois transcrit "Tengboche", cf. fig. 12] et Namche Bazar. Trois centres d'évacuation y sont indiqués. On notera aussi la liste d'indices avant-coureurs d'une éventuelle catastrophe et la conduite à suivre en cas de confirmation d'alerte.

RENFORCER LES RECHERCHES DANS LES ZONES REÇULÉES ?

On le voit, au cours des dernières années, de très nombreuses recherches ont été menées et beaucoup d'efforts ont été investis pour mieux appréhender le risque grandissant que constituent les débâcles glaciaires dans la région de l'Everest ainsi que dans les massifs voisins plus à l'est (Makalu) ou à l'ouest (Langtang, Ganesh Himal, Manaslu).

Pourtant, la plupart des régions de l'Himalaya « sec », surtout situées à l'ouest du Népal, sont moins densément habitées et d'accès plus difficile. Elles n'ont guère été étudiées alors qu'elles ne sont pas exemptes de possibles catastrophes. L'un des exemples les plus spectaculaires, bien qu'observé a posteriori, s'est produit dans le district du haut Mustang, au nord du massif du Dhaulagiri (8167 m)⁵⁰. En 1988, une crue dévastatrice a dévalé l'ouest du fossé tectonique du Mustang depuis le Man Shail (6268 m), charriant des blocs de granite dans une masse d'eau chargée de sables blancs (Fig.18). Cette débâcle a fait des victimes et beaucoup de dégâts (maisons détruites, champs irrigués et pâturages dévastés, bétail emporté). Les villages de Choser-Garphu (4000 m), au nord de Lo Manthang, la capitale, ont été les plus touchés (Fig.19). La débâcle s'est propagée sur près d'une centaine de kilomètres en aval, affectant même le pont métallique de Jomsom (2700 m).

L'origine de cette débâcle appartient très probablement au deuxième type que nous avons identifié plus haut : elle serait liée à la rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire⁵¹. En

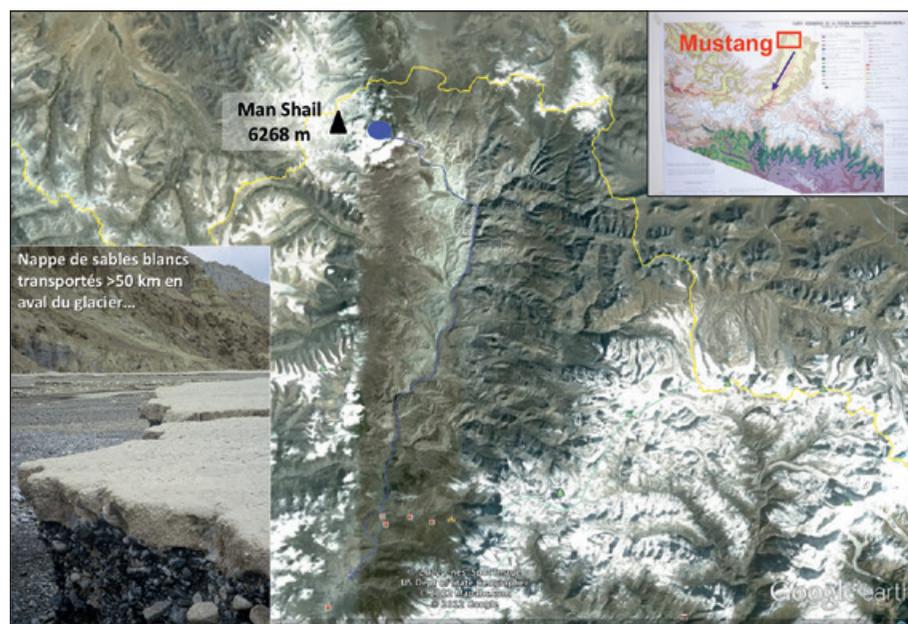


Figure 18. Débâcle survenue en 1988 dans l'extrême nord-ouest du district du Mustang, depuis la rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire, représentée en bleu à l'est du Man Shail. La crue s'est propagée le long de la Kali Gandaki jusqu'à Jomsom (point rouge, en bas de l'image), près d'une centaine de kilomètres en aval. (Google Earth)

En bas à gauche : des placages de sables blancs granitiques superposés aux terrasses préexistantes (observation près de Dhi, à plus de 50 km en aval du glacier) témoignent de la hauteur d'eau atteinte lors du passage du GLOF. (Photo Monique Fort, 1993)

En haut à droite : carte biogéographique montrant le contraste entre le nord de l'Himalaya, froid et sec (couleurs jaunes dominantes) et le sud de l'Himalaya, chaud et humide, sous la dépendance des flux de la mousson indienne. La Kali Gandaki (flèche bleue), affluent du Gange, s'écoule du nord vers le sud, entre les massifs du Dhaulagiri et de l'Annapurna, pour former les gorges les plus profondes de la planète. (DOBREMEZ, JEST 1970)

effet, la raideur des pentes et des vallons qui descendent des quelques sommets englacés de la région et la limite élevée des neiges permanentes (plus de 5500 m) ne permettent plus le maintien de glaciers de vallée, et les moraines frontales sont très peu présentes. La brutalité de déclenchement



Figure 19. Impacts de la débâcle glaciaire de 1988 au haut Mustang. La vague de crue (photo supérieure) a eu une trajectoire sinueuse, érodant les berges du torrent composées d'anciens matériaux morainiques issus du massif englacé du Man Shail. (Photo Giovanni Kappenberger, 2010)

Les blocs granitiques blancs arrachés à ces berges se sont accumulés en un vaste cône d'épandage au débouché de la Chhungma Khola (en bas à gauche). Les basses terrasses en contrebas des villages (en bas à droite) ont été submergées (tireté bleu : hauteur de la débâcle) et les systèmes d'irrigation détruits. La taille plurimétrique de certains blocs de granite transportés témoigne indirectement de l'abondance de la fraction fine (sables et limons) et donc de la densité élevée de cette débâcle, très destructrice. (Photos Monique Fort, 2014 et 1993)

de la débâcle qui, dans ces milieux désertiques d'altitude, n'a pu être reliée ni à une rupture sismique ni à une période de précipitation exceptionnelle, a surpris tout le monde et a laissé des traces, encore bien visibles dans le paysage plusieurs décennies plus tard (Fig.19). Pourtant, la mémoire

des événements passés s'estompe rapidement chez les populations locales ayant désormais d'autres préoccupations : développement du tourisme, proximité de la frontière sino-tibétaine et construction d'une route à deux voies⁵² qui est une annexe de la « nouvelle route de la soie », etc. Il est même étonnant de savoir que les habitants d'un village voisin (Samdzong), dont les ressources en eau s'épuisaient, ont été considérés comme des réfugiés climatiques et ont été relocalisés sur une terrasse⁵³, pourtant entièrement dévastée par la débâcle de 1988. Les blocs de granite témoins du passage des eaux ont été débités, supprimant ainsi la mémoire des lieux. Une autre débâcle d'ampleur plus modérée mais néanmoins destructrice s'est pourtant produite fin novembre 2016 (une période totalement inhabituelle pour cette région) dans la vallée de la Ghyung Khola, au sud de Lo Manthang, depuis le massif du Chunggen Changma Himal (6210 m), affectant essentiellement les villages de Dhakmar (3800 m) et Ghemi (3500 m) : elle ne semble pas avoir reçu d'attention spéciale de la part des scientifiques.

■ QUEL FUTUR POUR LES HAUTES VALLÉES DU NÉPAL ?

L'exemple de la Ghyung Khola amène à s'interroger sur l'évolution actuelle du Népal, où les actions pour limiter les effets du changement climatique peuvent contrecarrer le développement économique. Le retrait accéléré des glaciers va-t-il causer de nouvelles débâcles et donc affecter, non seulement les zones habitées, mais aussi les nouvelles infrastructures en cours de construction? De plus en plus de routes progressent vers les hautes montagnes (haut Mustang, massifs de l'Annapurna et du Manaslu...). Avec les besoins croissants en énergie, on assiste aussi à un développement des centrales hydro-électriques de plus en plus en amont des vallées⁵⁴. Si c'est – a priori – une bonne stratégie d'adaptation au

changement climatique et de réduction du bilan carbone (suppression progressive des feux de bois traditionnels), les sites retenus, de plus en plus proches de lacs glaciaires en expansion, augmentent l'insécurité de ces centrales et leur risque d'être affectées par un éventuel GLOF. Prévoir le comportement futur de ces lacs est le nouveau défi des scientifiques et des responsables politiques⁵⁵, afin de préserver tous ceux qui vivent et travaillent dans ces vallées de montagne, qui y développent et planifient des infrastructures afin d'assurer à ces communautés un meilleur niveau de vie et leur permettre d'accueillir dans les meilleures conditions tous ceux que le « Toit du Monde » fait toujours rêver.

BIBLIOGRAPHIE

ADCM/ADAPT 2015

Association for the development of environment and people in transition, *Preparation of GLOF hazard- zonation and safety and evacuation plan for settlement 50 km downstream of Imja Khola : final report*, Katmandou, 2015.

BAJRACHARYA *et al.* 2007

SAMJWAL RATNA BAJRACHARYA *et al.*, « Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha. Hazard assessment using GIS and hydrodynamic modeling », in *Mountain research and development*, 27-4, 2007, p. 336-344.

BAJRACHARYA, MOOL 2009

SAMJWAL RATNA BAJRACHARYA, PRADEEP MOOL, « Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal », in *Annals of glaciology*, vol. 50, n° 53, 2009, p. 81-86.

BALLANTYNE 2002

COLIN K. BALLANTYNE, « Paraglacial geomorphology », in *Quaternary science reviews*, 21, 2002, p. 1935-2017.

BENN *et al.* 2012

DOUGLAS I. BENN *et al.*, « Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards », in *Earth-science reviews*, vol. 114, n° 1-2, 2012, p. 156-174.

BERNET 2012

DANIEL BERNET, *Moving down or not ? Report of the first field visit to Upper Mustang in early May 2012 (Part II : Samzung)*, Tathali, 2012 (rapport interne non publié de l'ONG Kam For Sud).

BHAMBRI *et al.* 2017

RAKESH BHAMBRI *et al.*, « Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram », in *Science reports*, 7, art. 15391, 2017.

BOLCH *et al.* 2008

TOBIAS BOLCH *et al.*, « Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery », in *Natural hazards and Earth system sciences*, 8, 2008, p. 1329-1340.

54 SCHWANGHART *et al.* 2016.

55 KHANAL *et al.* 2015, HARRISON *et al.* 2018.

BOLCH et al. 2018

TOBIAS BOLCH *et al.*, «Status and change of the cryosphere in the extended Hindu Kush Himalaya region», in PHILIPPUS WESTER *et al.*, *The Hindu Kush Himalaya assessment*, Cham, 2018, p. 209-255.

BYERS, THAKALI 2017

ALTON C. BYERS, S. THAKALI, *Khumbu Local adaptation plan action (LAPA), Sagarmatha National Park, Solu Khumbu District*, Washington, 2017.

BYERS et al. 2017

ALTON C. BYERS *et al.*, «A field-based study of impacts of the 2015 earthquake on potentially dangerous glacial lakes in Nepal», in *Himalaya, the journal of the Association for Nepal and Himalayan studies*, vol. 37, n° 2, 2017, p. 26-41.

CENDERELLI, WOHL 2001

DANIEL A. CENDERELLI, ELLEN E. WOHL, «Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal», in *Geomorphology*, vol. 40, n° 1, 2001, p. 57-90.

CHALISE et al. 2006

SURESH R. CHALISE *et al.*, «Climate change impacts on glacial lakes and glacierized basins in Nepal and implications for water resources», in *Climate variability and change: hydrological impacts*, Wallingford, 2006, p. 460-465.

DOBREMEZ, JEST 1970

JEAN-FRANÇOIS DOBREMEZ, CORNEILLE JEST, *Carte écologique de la région Annapurna-Dhaulagiri (Népal), éch. 1/250 000, RCP Népal*, Grenoble, 1970.

FORT 2000

MONIQUE FORT, «Physical conditions and constraints for irrigation in the dry Himalaya: an example from Upper Mustang (Nepal)», in *Water in Asia*, Karachi, 2000, p. 239-258.

FORT 2011

MONIQUE FORT, «L'Himalaya, un laboratoire à ciel ouvert pour géomorphologues», in *Bulletin des séances de l'Académie royale des sciences d'outre-mer*, vol. 57, n° 2-4, 2011, p. 355-373.

FORT 2015

MONIQUE FORT, «Natural hazards versus climate change and their potential impacts in the dry, northern Himalayas: focus on the upper Kali Gandaki (Mustang District, Nepal)», in *Environmental earth sciences*, vol. 73, n° 2, 2015, p. 801-814.

FUJITA et al. 2009

KOJI FUJITA *et al.*, «Recent changes in Imja Glacial Lake and its damming moraine in the Nepal Himalaya revealed by in situ surveys and multi-temporal ASTER imagery», in *Environmental research letters*, vol. 4, n° 4, art. 45205, 2009.

FUJITA et al. 2013

KOJI FUJITA *et al.*, «Potential flood volume of Himalayan glacial lakes», in *Natural hazards and Earth system science*, vol. 13, n° 7, 2013, p. 1827-1839.

GARDELLE et al. 2011

JULIE GARDELLE *et al.*, «Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009», in *Global and planetary change*, vol. 75, n° 1-2, 2011, p. 47-55.

GDH 2013

Association des géorisques et des hommes, *Risk assessment of glacial lakes outburst floods (GLOF). Phase 2: Thulagi Lake, Nepal*, Saint-Pancrasse, 2013.

HAEBERLI et al. 2017

WILFRIED HAEBERLI *et al.*, «Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges», in *Geomorphology*, vol. 293, partie B, 2017, p. 405-417.

HANISCH et al. 1998

JOERG HANISCH *et al.*, «The Thulagi glacier lake, Manaslu Himal, Nepal – Hazard assessment of a potential outburst», in D. MOORE, O. HUNGR (éd.), *Proceedings of the 8th International IAEG Congress*, Rotterdam, 1998, p. 2209-2215.

HARITASHYA et al. 2018

UMESH E. HARITASHYA *et al.*, «Evolution and controls of large glacial lakes in the Nepal Himalaya», in *Remote sensing*, vol. 10, n° 5, art. 798, 2018.

HARRISON et al. 2018

STEPHAN HARRISON *et al.*, «Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods», in *The cryosphere*, vol. 12, n° 4, 2018, p. 1195-1209.

HEWITT 1982

KENNETH HEWITT, «Natural dams and outburst floods of the Karakoram Himalaya», in *Hydrological aspects of Alpine and high mountain areas*, 1982, p. 259-269.

HEWITT 2005

KENNETH HEWITT, «The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the “elevation effect”, Karakoram Himalaya», in *Mountain research and development*, vol. 25, n° 4, 2005, p. 332-340.

HEWITT, LIU 2010

KENNETH HEWITT, JING-JING LIU, «Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya : historical perspectives on emerging threats», in *Physical geography*, vol. 31, n° 6, 2010, p. 528-551.

ICIMOD 2011

International centre for integrated mountain development, *Glacial lakes and glacial lake outburst floods in Nepal*, Katmandou, 2011.

ICIMOD 2015

International centre for integrated mountain development, *Little additional risk of earthquake-induced outburst floods found for many Himalayan lakes*, Katmandou, 2015.

IMMERZEEL et al. 2010

WALTER IMMERZEEL et al., «Climate change will affect the Asian water towers», in *Science*, vol. 328, n° 5984, 2010, p. 1382-1385.

ITURRIZAGA 2011

LASAFAM ITURRIZAGA, «Glacier lake outburst floods», in *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, Dordrecht, 2011, p. 381-399.

IVES 1986

JACK IVES, *Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya*, Katmandou, 1986.

IVES et al. 2010

JACK IVES et al., *Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment*, Katmandou, 2010.

KHANAL 2009

NARENDRA RAJ KHANAL, *GLOF risk assessment of the Imja, Tsho Rolpa and Thulagi glacial lakes in Nepal : final report*, Katmandou, 2009.

KHANAL et al. 2015

NARENDRA RAJ KHANAL et al., «A comprehensive approach and methods for glacial lake outburst flood risk assessment, with examples from Nepal and the transboundary area», in *International journal of water resources development*, vol. 31, n° 2, 2015, p. 219-237.

LALA et al. 2018

JONATHAN M. LALA et al., «Modeling the glacial lake outburst flood process chain in the Nepal Himalaya : reassessing Imja Tsho's hazard», in *Hydrology and Earth systems sciences*, vol. 22, n° 7, 2018, p. 3721-3737.

LAVIE, FORT 2017

EMILIE LAVIE, MONIQUE FORT, «Mountain-oases faced with new roads : case studies from the Andes and the Himalayas», in *Oasis and globalization*, Cham, 2017, p. 133-152.

LINSBAUER et al. 2016

ANDREAS LINSBAUER et al., «Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya – Karakoram region», in *Annals of glaciology*, vol. 57, n° 71, 2016, p. 119-130.

LIU et al. 2013

JING-JING LIU et al., «The two main mechanisms of glacier lake outburst flood in Tibet, China», in *Journal of mountain science*, vol. 10, n° 2, 2013, p. 239-248.

MAHARJAN et al. 2018

SUDAN BIKASH MAHARJAN et al., *The status of glacial lakes in the Hindu Kush Himalaya*, Katmandou, 2018.

MOOL et al. 2001

PRADEEP K. MOOL et al., *Inventory of glaciers, glacial lakes, and glacial lake outburst floods : monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan Regions – Nepal*, Katmandou, 2001.

PELTO 2016

MARIO PELTO, «Thulagi Glacier, Nepal retreat and GLOF potential», in American geophysical union, *From a glacier's perspective* [blog], posté le 7 novembre, 2016.

POSCH et al. 2019

EVA POSCH et al., «A qualitative evaluation of the glacial lake outburst flood (GLOF) risk management at Imja lake, Everest region, Nepal», in *Geophysical research abstracts*, vol. 21, 2019.

REGMI 2017

DHANANJAY REGMI, *Imja glacial lake monitoring and structural maintenance protocol : final report*, Katmandou, 2017.

RICHARDSON, REYNOLDS 2000

SHAUN D. RICHARDSON, JOHN M. REYNOLDS, «An overview of glacial hazards in the Himalayas», in *Quaternary international*, vol. 65-66, 2000, p. 31-47.

ROUNCE et al. 2017

DAVID R. ROUNCE *et al.*, « Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using satellite imagery from 2000-2015 », in *Remote sensing*, vol. 9, n° 7, 2017, p. 654-673.

SCHWANGHART et al. 2016

WOLFGANG SCHWANGHART *et al.*, « Uncertainty in the Himalayan energy-water nexus : estimating regional exposure to glacial lake outburst floods », in *Environmental research letters*, vol. 11, n° 7, art. 74005, 2016.

SHRESTHA et al. 2010

ARUN B. SHRESTHA *et al.*, « Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal », in *Geomatics, natural hazards and risk*, vol. 1, n° 2, 2010, p. 157-169.

SOMOS-VALENZUELA et al. 2014

MARCELO SOMOS-VALENZUELA *et al.*, « Changes in Imja Tsho in the Mt. Everest region of Nepal », in *The cryosphere*, vol. 8, n° 5, 2014, p. 1661-1671.

SOMOS-VALENZUELA et al. 2015

MARCELO SOMOS-VALENZUELA *et al.*, « Assessing downstream flood impacts due to a potential GLOF from Imja Tsho in Nepal », in *Hydrology and Earth systems sciences*, vol. 19, n° 3, 2015, p. 1401-1412.

UNDP 2013

United Nations Development Programme, *Community based flood and glacial lake outburst risk reduction*, Katmandou, 2013.

VINCENT et al. 2012

CHRISTIAN VINCENT *et al.*, « Détection d'une poche d'eau au glacier de Tête-Rousse en 2010 et mesures préventives pour éviter une catastrophe », in *La houille blanche*, n° 2, 2012, p. 34-41.

VUICHARD, ZIMMERMANN 1987

DANIEL VUICHARD, MARKUS ZIMMERMANN, « The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal : cause and consequences », in *Mountain research and development*, vol. 7, n° 2, 1987, p. 91-110.

WATANABE et al. 2009

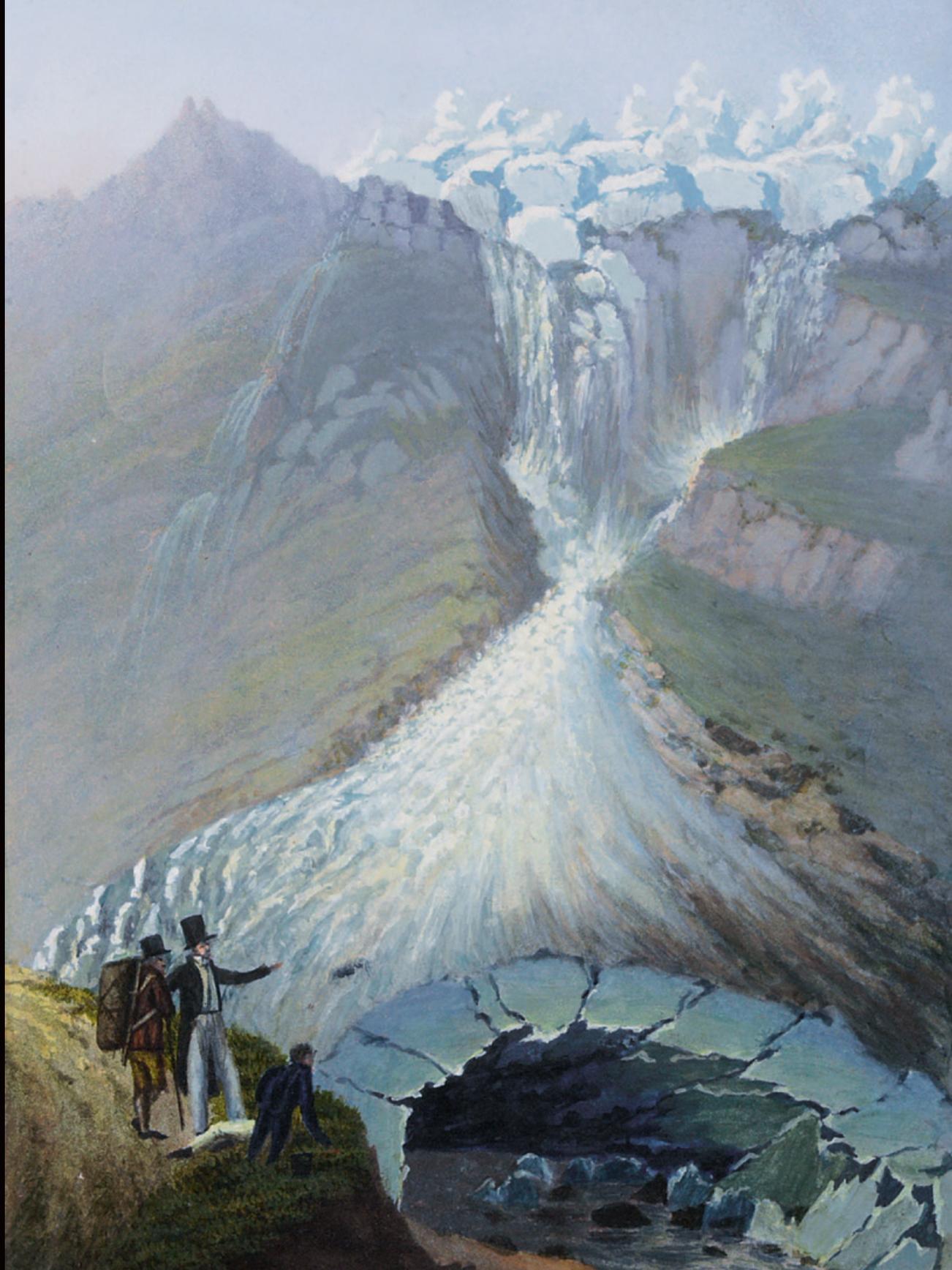
TEIJI WATANABE *et al.*, « Evaluating the growth characteristics of a glacial lake and its degree of danger of outburst flooding : Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal », in *Norsk geografisk tidsskrift*, vol. 63, n° 4, 2009, p. 255-267.

WESTOBY et al. 2014

MATT J. WESTOBY *et al.*, « Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes », in *Earth-science reviews*, vol. 134, 2014, p. 137-159.



Lac glaciaire de Märjelen, Aletsch, vers 1855. (Photo Friedrich von Martens, Coll. N. Crispini)



Avalanche
du glacier
du Giétro, vers
1825, aquatinte.
(Coll. Barryland)