

Les glaciers himalayens vont-ils tous disparaître avant 2035 ?

Étienne Berthier¹, Patrick Wagnon², Yves Arnaud², Christian Vincent³

- 1 Laboratoire d'étude en géophysique et océanographie spatiales, CNRS, Toulouse
- 2 Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, IRD, Saint-Martin-d'Hères
- 3 Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, CNRS, Saint-Martin-d'Hères

Résumé

En 2007, le quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) annonçait la fin des glaciers himalayens en 2035. Assertion surprenante et erronée, mais révélant aussi un manque criant de données fiables le long de cette chaîne de montagnes. Depuis, des mesures de terrain et, surtout, de nouvelles observations satellitaires ont montré que les glaciers himalayens fondent en moyenne moins vite que les autres glaciers du globe et que la majorité d'entre eux existera au-delà de 2035. Ces nouvelles mesures révèlent aussi de très fortes disparités régionales : les glaciers sont quasiment à l'équilibre à l'ouest de la chaîne (Karakorum), alors qu'ils accusent des pertes rapides à l'est (Népal, Bhoutan et sud-est du plateau du Tibet).

Abstract

Will all Himalayan glaciers have disappeared by 2035?

In 2007, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) announced in its fourth assessment that Himalayan glaciers would disappear by 2035. A surprising and erroneous statement, which also revealed the lack of measurements in this vast mountain range. Since then, field and satellite observations have shown that Himalayan glaciers are in fact losing mass at a slower rate than others glaciers around the globe. This average moderate thinning is hiding a highly contrasted pattern of glacier wastage: in the west (Karakoram), glaciers are nearly in equilibrium whereas in the east (Nepal, Bhutan and South-east Tibetan plateau), they are losing mass at a rapid rate.

Etienne.Berthier@legos.obs-mip.fr

Janvier 2010. Quelques semaines seulement après la Conférence mondiale des Nations unies sur le climat à Copenhague (COP15). Les médias du monde entier se font l'écho d'une erreur mise en évidence dans le deuxième volume du 4^e rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec, ou IPCC en anglais), publié en 2007 (Cruz *et al.*, 2007). Le Giec écrivait alors « Les glaciers en Himalaya reculent plus vite que partout ailleurs sur le globe et la probabilité qu'ils disparaissent en 2035, ou même avant, est élevée si la Terre continue de se réchauffer au rythme actuel. » C'est effectivement une erreur grossière. Il suffit d'ailleurs d'aller lire dans le premier volume du même rapport le chapitre 4 sur la cryosphère (Lemke *et al.*, 2007) pour vérifier que le comportement des glaciers himalayens ne semble pas atypique. L'assertion qu'ils pourraient disparaître en 2035 est encore plus énigmatique et il faudra un peu de temps pour retracer l'origine, typographique, de cette erreur : la date de disparition (partielle) des glaciers ayant été estimée en 2350 (et non 2035 !) dans un rapport non relu par les pairs. Bref, une confusion complète qui malheureusement, aux yeux de certains, jette le discrédit sur le Giec et son rapport.

Pourquoi une telle amplification par les médias de la polémique entourant cette erreur au sujet des glaciers himalayens ? Probablement parce que ces glaciers restent peu étudiés (Bolch *et al.*, 2012), alors qu'ils sont à la source de grands fleuves (Indus, Gange, Brahmapoutre, Fleuve jaune) qui irriguent l'Asie du Sud-Est, une des régions les plus peuplées du globe (Kaser *et al.*, 2010). Par manque de travaux scientifiques, il

n'y avait pas à l'heure de la rédaction du 4^e rapport du Giec de conclusion robuste sur l'évolution des glaciers de ces montagnes.

Les glaciers himalayens sont proches des populations, impactent directement leur ressource en eau et peuvent parfois les mettre en danger, par exemple lors de vidanges brutales de lacs pro-glaciaires (Richardson et Reynolds, 2000). Ceci les distingue des calottes polaires de l'Antarctique, du Groenland ou des autres glaciers de la région arctique qui n'affectent les populations humaines qu'indirectement et sur des échelles de temps plus longues, via la hausse du niveau des mers.

Les études de terrain sont clairsemées sur les glaciers himalayens et, plus généralement, sur l'ensemble des glaciers des hautes montagnes d'Asie (figure 1) à cause des difficultés d'accès, de la très haute altitude et de l'absence d'une tradition d'études glaciologiques dans les pays riverains de cette chaîne de montagne. Le régime de ces glaciers est également différent de celui de leurs cousins alpins ou des régions arctiques. Dans toute la partie est de la chaîne himalayenne, les saisons de fonte et d'accumulation sont simultanées et se produisent en été au moment du paroxysme de la mousson indienne et d'Asie du Sud-Est (Fujita, 2008). À l'ouest de la chaîne (Karakorum, Hindu Kush, Pamir), un régime plus « classique » avec accumulation hivernale et fonte estivale prévaut (Kapnick *et al.*, 2014).

L'objectif de cet article est de présenter les progrès réalisés depuis 2010 sur la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des glaciers de l'Himalaya.

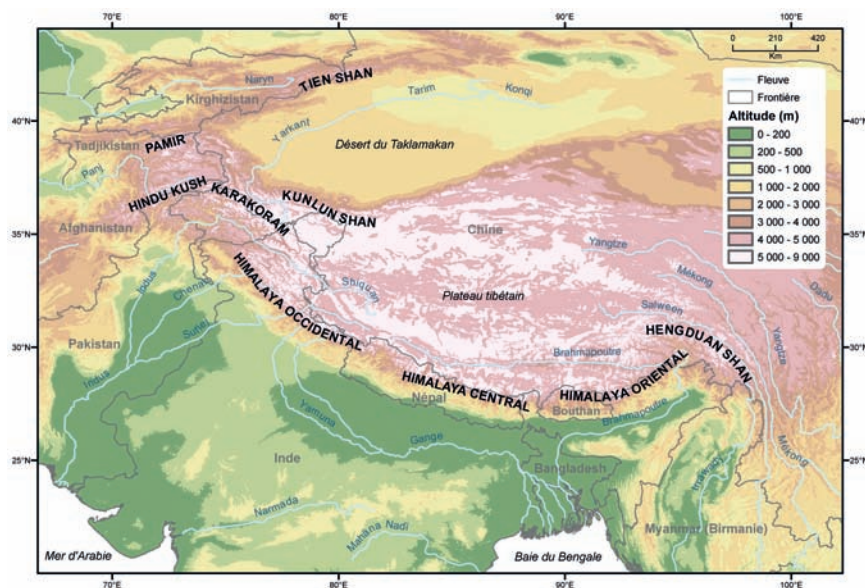


Figure 1. Répartition des différents massifs des hautes montagnes d'Asie. D'après Gardelle (2012).

Nous ne cherchons pas à rédiger une synthèse exhaustive des nombreux résultats publiés récemment par l'ensemble de la communauté internationale, mais mettons l'accent sur quelques travaux clés auxquels nous avons contribué, à la fois à partir des mesures *in situ* et d'observations satellitaires.

Apport des mesures de terrain : exemple du glacier du Chhota Shigri en Inde

Les équipes françaises n'ont pas attendu la polémique de 2010 pour deviner l'enjeu scientifique et sociétal du suivi des glaciers himalayens. Dès 2002, les chercheurs de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) amorcent, dans le cadre d'une collaboration avec les glaciologues indiens de la Jawaharlal Nehru University (Delhi), le suivi du glacier du Chhota Shigri (15 km²) au cœur du Spiti Lahaul, au nord-ouest de l'Himalaya (32° N de latitude). Ils disposent aujourd'hui de 12 années consécutives de mesures du bilan de masse sur ce glacier, ce qui en fait la série la plus longue obtenue par la méthode glaciologique, c'est-à-dire en utilisant des balises pour les mesures d'ablation et des carottages pour les mesures d'accumulation (figure 2) en Himalaya (Azam *et al.*, 2016). Compte tenu de la qualité et de la longueur de cette série du Chhota Shigri, nous nous

focalisons sur celle-ci, mais le lecteur gardera à l'esprit que des mesures glaciologiques existent ailleurs dans la chaîne himalayenne.

Bilan de masse du glacier du Chhota Shigri depuis 1998

Depuis 2002, ce glacier accuse une perte de masse modérée avec un bilan moyen annuel de $-0,53$ m d'eau par an, soit une perte totale de masse entre 2002 et 2015 équivalente à une lame d'eau liquide de 6,88 m sur l'ensemble de la superficie du glacier. Cette perte de volume n'est bien sûr pas continue et

régulière, mais présente une forte variabilité interannuelle. Entre 2002 et 2015, seules quatre années ont vu un bilan de masse positif : 2004-2005 et les trois années consécutives 2008-2011.

Pour remonter avant 2002, les chercheurs ont utilisé des observations topographiques de très bonne qualité effectuées sur ce glacier en 1988 par des scientifiques indiens et ont répété les observations aux mêmes points en 2010. Cette comparaison leur a permis de montrer qu'entre 1988 et 2010 la perte d'épaisseur moyenne sur l'ensemble du glacier était de $0,17 \pm 0,09$ m d'eau par an. Les pertes de ce glacier entre 1999 et 2010 sont contraintes par les mesures de terrain et satellitaires et indiquent que ce glacier s'est aminci d'environ $0,44 \pm 0,16$ m d'eau par an. Ils ont ainsi pu en déduire que finalement le glacier avait gagné $0,09 \pm 0,24$ m d'eau par an entre 1988 et 1999 (Vincent *et al.*, 2013). Un bilan quasi équilibré qui remet en cause les rares reconstructions existantes du bilan de masse des glaciers en Himalaya qui indiquaient des glaciers en récession durant cette période.

Le rôle des chutes de neige estivales

Pour aller plus loin dans cette étude et relier l'évolution temporelle de la masse du glacier et le climat local, l'équipe franco-indienne a eu recours aux observations météorologiques. D'une part, ils ont comparé les chroniques de



Figure 2. Mesure d'accumulation à l'aide d'un carottier manuel dans la zone d'accumulation (5 300 m) du glacier Chhota Shigri, Himachal Pradesh, région Lahaul et Spiti, Inde du Nord, octobre 2011. Programme Glacioclim/Cefipra. © P. Wagnon

données météorologiques disponibles depuis plusieurs décennies dans la région au bilan de masse du glacier (Azam *et al.*, 2014b). D'autre part, ils ont installé leurs propres stations météorologiques sur le glacier et ses moraines pour déterminer quels processus physiques prédominent pour contrôler l'accumulation ou l'ablation sur le glacier (Azam *et al.*, 2014a). Même si l'accumulation de neige se fait majoritairement en hiver via les dépressions d'ouest, la période critique pour le bilan de masse est l'été, pendant lequel le glacier fond et reçoit occasionnellement des précipitations (solides ou liquides selon l'altitude) lors d'intrusions liées à la mousson indienne.

L'analyse du bilan d'énergie de surface, c'est-à-dire l'inventaire de tous les échanges d'énergie entre les basses couches de l'atmosphère et la surface du glacier, a montré que la fonte est très majoritairement contrôlée par le bilan radiatif (solaire et infrarouge atmosphérique). Ainsi, l'albédo de la surface joue un rôle clé : si la surface est blanche, couverte de neige fraîche, le rayonnement solaire est fortement réfléchi et la fonte est faible ; au contraire, si la surface est constituée de glace sale, grise, le rayonnement solaire est largement absorbé par le glacier et la fonte est accentuée. Or ce sont les précipitations qui contrôlent majoritairement cet état de surface : s'il neige, l'albédo est fort et s'il pleut ou s'il n'y a pas de précipitations, la glace, plus sombre, finit par affleurer. Finalement, le glacier est très sensible à la quantité et à la phase (pluie ou neige) des précipitations estivales. Indirectement, comme la température est le facteur principal qui contrôle la phase des précipitations, le glacier y est donc très sensible (Azam *et al.*, 2014a).

En suivant cette même idée, les chercheurs de cette équipe ont montré que le bilan de masse estival du glacier est donc aussi son bilan annuel est largement dépendant des plus importantes chutes de neige estivales. Certains étés, de fortes chutes de neige, qui ne durent pas plus que quelques jours, viennent recouvrir tout le glacier, venant limiter la fonte ou même, dans certains cas comme en 2004-2005 ou en 2008-2009, mettre prématurément un terme à la saison de fonte, dès début septembre, alors qu'en temps normal la saison de fonte se termine en octobre (Azam *et al.*, 2014a). Ces étés marqués par ces événements exceptionnels mettent temporairement un terme à la décruce glaciaire observée dans la région.

Si les mesures de terrain sont indispensables pour comprendre les processus qui contrôlent la fonte des glaciers et pour calibrer les modèles glaciologiques, elles ne sont actuellement pérennes que sur, au plus, une dizaine de glaciers à travers la chaîne himalayenne. Seule l'observation satellitaire permet d'embrasser l'ensemble de la chaîne et de cartographier les hétérogénéités dans la réponse des glaciers aux évolutions du climat. S'il est relativement facile de mesurer les variations de longueur ou de superficie des glaciers par satellite, ces grandeurs ne reflètent pas directement l'état de santé des glaciers et leur rôle hydrologique. Nos efforts ont donc surtout porté sur l'estimation du gain ou de la perte de masse des glaciers, autrement dit sur la mesure de leur bilan de masse. Chronologiquement, ce travail a d'abord été effectué sur une sous-région (la chaîne du Karakorum) avant d'être étendu à l'ensemble de l'Himalaya.

L'anomalie des bilans de masse des glaciers du Karakorum

Situé dans la partie ouest de l'Himalaya, entre Pakistan, Inde et Chine, le Karakorum est une région montagneuse abritant plusieurs sommets de plus de 8 000 m d'altitude et recouverte par près de 20 000 km² de glaciers, soit près de la moitié des glaciers himalayens (figure 1). Avant 2012, différents indices suggéraient que le comportement de ces glaciers différait de celui des autres glaciers du globe qui, en grande majorité, perdent de la masse depuis le milieu des années 1980 (Vaughan *et al.*, 2013 ; Zemp *et al.*, 2015). Des observations *in situ* avaient montré que certains glaciers gagnaient en épaisseur et que les fronts glaciaires ne reculaient pas, voire avançaient. Ceci a amené les scientifiques à définir « l'anomalie du Karakorum » (Hewitt, 2005). Mais la représentativité de ces quelques observations ponctuelles vis-à-vis du reste du massif n'avait pas été démontrée. Aussi, une mesure du bilan de masse pour l'ensemble de cette région glaciaire était indispensable pour confirmer sans équivoque l'existence d'une anomalie des bilans de masse au Karakorum.

Pour estimer les variations d'épaisseur de ces glaciers (puis de masse, avec une hypothèse sur la densité des gains et des

pertes), nous avons comparé deux topographies (ou modèle numérique de terrain, MNT), acquises depuis l'espace à environ 10 ans d'intervalle, dans la zone centrale du Karakorum. Le premier MNT avait été produit par la Nasa à partir des données acquises en février 2000 lors de la mission SRTM (*Shuttle radar topography mission*). Comme le signal radar de SRTM pénètre à travers la neige fraîche hivernale, on considère que ce MNT correspond à la surface des glaciers au cours de l'automne 1999. Le second MNT résulte de l'assemblage de deux MNT déduits d'images acquises en décembre 2008 et octobre 2010 par le satellite Spot 5. Une attention toute particulière a été portée sur le bon ajustement relatif des topographies, notamment pour bien prendre en compte le fait qu'elles ont une résolution différente (Gardelle *et al.*, 2012).

La carte de variation d'épaisseur (figure 3) révèle une structure étonnamment complexe. Pour certains glaciers, on observe une alternance de zones de fort épaissement (> 10 m/an) et d'amincissement de même amplitude, le résultat direct d'un phénomène dynamique nommé *surges*¹. Ces *surges* sont de brusques avancées du glacier se produisant sur une durée courte (~1-2 ans) liées à des vitesses temporairement très élevées, parfois de plusieurs kilomètres par an. Durant cette phase active, un excès de masse est transporté sous forme d'une onde cinématique : la partie haute du glacier s'affaisse pendant que la partie basse gonfle rapidement. Ces avancées sont suivies d'une phase plus longue, dite de quiescence, au cours de laquelle le glacier stagne et se reconstruit dans sa partie haute. Durant cette phase, la neige accumulée engendre des gains d'épaisseurs à haute altitude, alors que la glace qui été transportée pendant la phase active à basse altitude, où il fait plus chaud, fond rapidement. D'après nos cartes de variations d'épaisseur, près d'un quart de la superficie englacée de la zone étudiée est affectée par ce phénomène.

Le bilan de masse moyen des 10 000 km² de glaciers couverts par cette étude est de +0,10 ± 0,16 m d'eau équivalente par an, soit un léger gain de masse (Gardelle *et al.*, 2013). En outre,

1. Il n'y a pas vraiment de traduction en français pour *surge*. On lit parfois « foirage » ou « glaciers galopants », mais ces termes restent très peu usités.

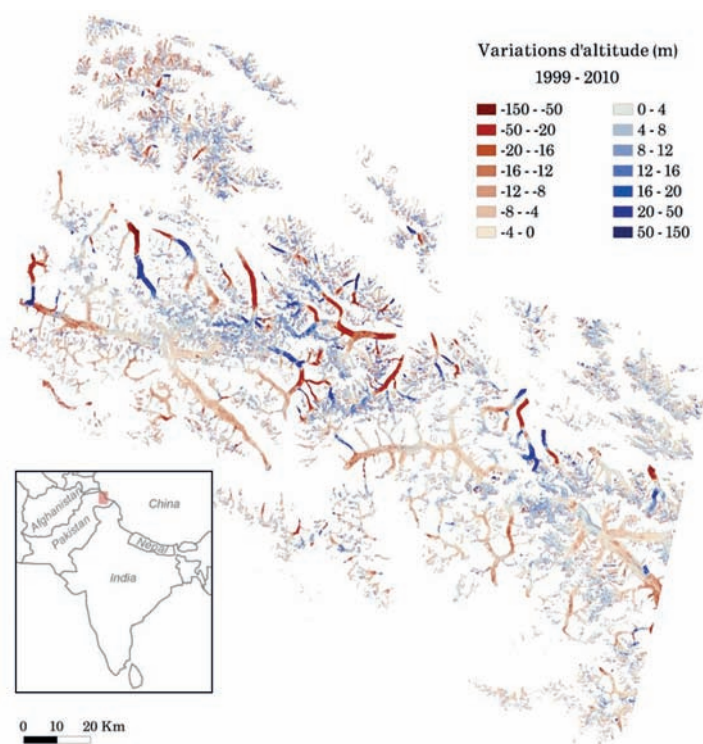


Figure 3. Variations d'épaisseur (en m) des glaciers du Karakorum central entre 1999 et 2010. D'après Gardelle (2012).

ces observations indiquent que les bilans de masse des glaciers subissant des surges ne sont pas différents de ceux des glaciers « normaux », ce qui tend à montrer que les surges n'affectent pas le bilan de masse moyen des glaciers de cette région. Compte tenu des barres d'erreur, on parlera plutôt d'une stabilité de la masse des glaciers, ce qui en soit suffit à les démarquer des glaciers des autres régions du globe et confirme donc l'anomalie du Karakorum. En extrapolant ce gain à l'ensemble du Karakorum (nos mesures portent sur environ la moitié de la surface englacée totale), nous réévaluons la contribution des glaciers de cette région à la hausse du niveau des mers à $-0,01$ mm/an (des glaciers qui gagnent de la masse font baisser le niveau des mers). C'est beaucoup moins que les estimations précédentes qui, par nécessité, extrapolaient des mesures de terrain réalisées hors de cette chaîne de montagne et suggéraient une contribution de $+0,04$ mm/an, soit 5 % de la contribution totale des glaciers à la hausse du niveau des mers (Church *et al.*, 2011).

La principale limite de notre étude est la difficile estimation de la pénétration du signal radar en bande C, la longueur d'onde qui a servi à produire le MNT SRTM. Cette pénétration fait que le MNT SRTM cartographie une surface qui se situe quelques mètres en dessous de la surface réelle des glaciers. Nous

essayons de corriger au mieux cet effet, notamment en comparant deux versions du MNT SRTM acquis dans deux bandes de longueur d'onde différentes (bandes C et X), mais cela reste peu satisfaisant. Pour exploiter avec sérénité les MNT déduits de l'imagerie radar comme SRTM, il convient de progresser dans les prochaines années sur l'estimation des profondeurs de pénétration du signal radar dans la neige et le névé. La comparaison de MNT déduits uniquement de couples d'images optiques ou de données d'altimétrie laser permet de s'affranchir de ces biais potentiels affectant les données micro-ondes.

Des bilans de masse contrastés du Pamir à l'est de l'Himalaya

Après avoir confirmé l'anomalie des bilans de masse des glaciers du Karakorum, il était nécessaire de cartographier son extension et, plus généralement, de déterminer les bilans de masse le long de tout l'arc himalayen.

Pour mesurer les bilans de masse régionaux, trois techniques différentes ont été mises en œuvre depuis 2012, toutes reposant sur des observations

depuis l'espace. En effet, les données *in situ* sont beaucoup trop fragmentaires pour offrir une vision d'ensemble des bilans de masse de la chaîne. Par exemple, il n'y a aucune mesure de bilan de masse *in situ* pour le Pamir central ($\sim 10\,000$ km² de glaciers) et seulement 4 ans de mesures pour le Karakorum dans les années 1980 par une méthode (hydrologique) très indirecte.

Par différence de MNT

La même méthodologie qui a permis de confirmer l'anomalie du Karakoram a été étendue à six autres sites répartis du Pamir jusqu'à la terminaison est de l'Himalaya dans l'Hengduan Shan (aussi nommé East Nyainqêntanglha Shan). Ces MNT *Spot 5* ont été tous acquis entre 2008 et 2011 et comparés à la topographie de SRTM pour mesurer les variations d'épaisseur, puis le bilan de masse (Gardelle, 2012 ; Gardelle *et al.*, 2013).

Le principal avantage de cette méthodologie est qu'elle offre une vision exhaustive des glaciers à l'intérieur de la zone couverte par les MNT. Cela permet de comparer l'amincissement pour les langues glaciaires avec et sans couverture détritique, d'identifier les variations d'épaisseur liées à des phénomènes dynamiques comme les *surges*. En revanche, cette approche est limitée aux sites pour lesquels des acquisitions *Spot 5* ont pu être réalisées (figure 4). Pour extrapoler à toute la chaîne, il faut faire l'hypothèse forte que ces sites sont représentatifs de la région glaciaire où ils se trouvent. Dans notre étude, nous avons ainsi mesuré les variations d'épaisseur pour 30 % des glaciers de la région du Pamir-Karakorum-Himalaya.

Nos mesures suggèrent que l'anomalie des bilans de masse du Karakorum peut être étendue aux glaciers du Pamir qui auraient, eux aussi, connu un bilan légèrement positif au cours de la première décennie du XXI^e siècle. En revanche, dans la partie est de la chaîne himalayenne (du site West Nepal au site Hengduan Shan), les bilans sont assez homogènes et négatifs, entre $-0,22$ et $-0,33$ m d'eau équivalent par an. C'est dans la région du Spiti Lahaul au nord-ouest de l'Inde (région où se trouve le glacier du Chhota Shigri) que les bilans sont les plus négatifs à $-0,45$ m d'eau équivalent par an, une valeur en accord avec les mesures de terrain.

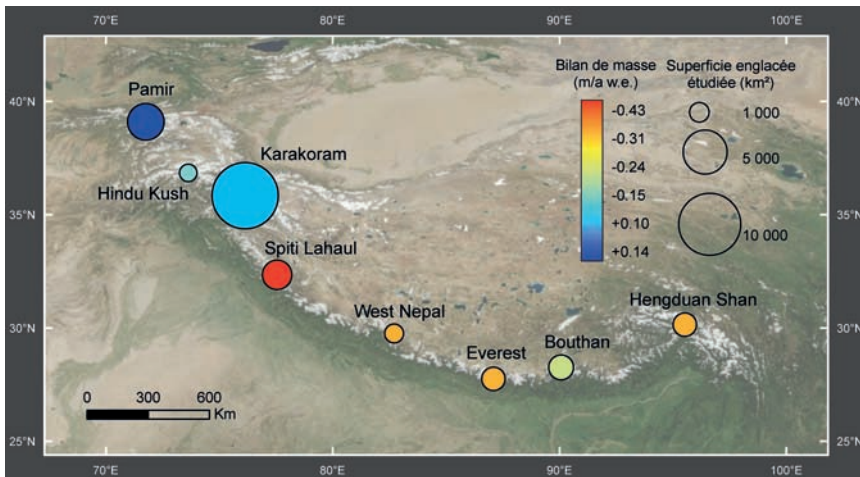


Figure 4. Bilans de masse des glaciers pour huit sites situés le long de l'arc himalayen. Ces bilans ont été estimés en comparant des MNT *Spot 5* acquis entre 2008 et 2011 avec le MNT SRTM de février 2000. La taille des cercles indique la surface englacée couverte, alors que la couleur indique la valeur du bilan de masse (en m d'équivalent eau par an). D'après Gardelle (2012).

Par analyse des données de l'altimètre laser d'*ICESat*

Avant les travaux himalayens de Kääb *et al.* (2012, 2015), les données de l'altimètre laser d'*ICESat* (en orbite entre 2002 et 2009) avaient largement contribué à l'étude des variations récentes du volume des calottes polaires et des glaciers des régions arctiques, généralement peu pentus. En revanche, *ICESat* restait peu exploité dans les régions montagneuses des plus basses latitudes. Les raisons sont multiples : (i) à plus basse latitude, les traces d'*ICESat* sont de plus en plus espacées et l'échantillonnage spatial est donc moins bon (figure 5) ; (ii) pour une trace donnée, la répétition de l'orbite n'est pas parfaite, donc on ne peut pas faire une soustraction simple des

altitudes mesurées par *ICESat* lors de deux passages successifs ; (iii) plus la topographie est abrupte et plus la précision altimétrique est dégradée. La précision est typiquement de 0,1 m sur les zones très plates comme en Antarctique et proche de 1 m sur des reliefs plus chahutés comme pour les glaciers de montagne. Cette dernière observation se comprend bien en constatant qu'au sein même d'une empreinte au sol *ICESat* de 70 m de diamètre il peut y avoir un dénivelé de plusieurs dizaines de mètres en région de montagne.

Toutes ces difficultés expliquent qu'*ICESat* n'ait été utilisé que tardivement pour étudier les variations d'épaisseur de glaciers nichés au cœur de reliefs abrupts comme ceux de

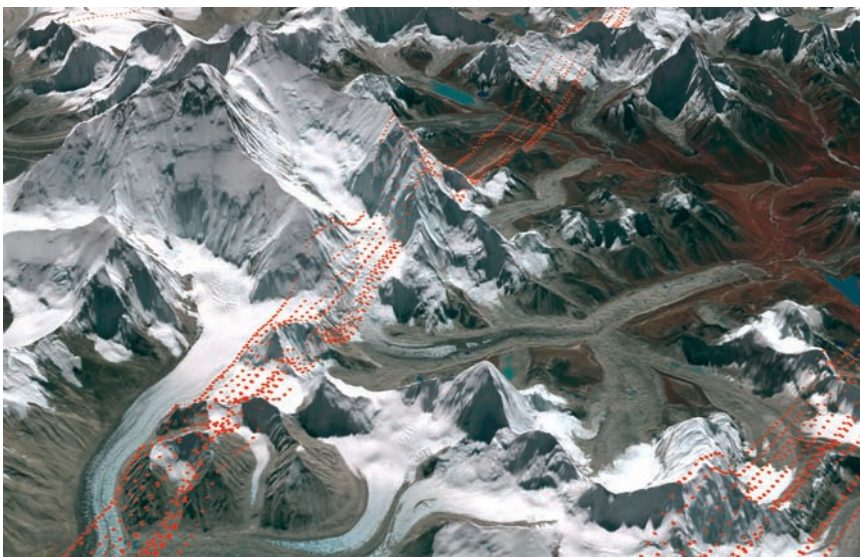


Figure 5. Exemple de la distribution clairsemée des mesures *ICESat* pour une région de 20 km par 20 km autour de l'Everest. Chaque point rouge correspond à l'empreinte au sol d'une mesure *ICESat*. © A. Kääb, University of Oslo.

l'Himalaya. Pourtant, en moyennant sur des zones suffisamment vastes, des tendances d'altitudes fiables et régionalement représentatives peuvent être extraites pour la période entre novembre 2003 et novembre 2008 (figure 6). Une des clefs de l'analyse a été de travailler en relatif par rapport à un MNT unique (SRTM), ce qui a permis de s'affranchir en grande partie des différences topographiques entre les différentes mesures d'*ICESat*.

L'échantillonnage à partir des données d'*ICESat* est radicalement différent de celui obtenu par différence de MNT : les deux techniques sont donc très complémentaires. *ICESat* ne peut fournir des tendances d'altitudes significatives que pour des régions vastes, typiquement de plus de 10 000 km². Aussi, *ICESat* ne permet pas d'accéder au bilan de chaque glacier pris individuellement. En revanche, les mesures éparées d'*ICESat* sont disponibles tout le long de la chaîne, ce qui permet d'établir la carte de variations de l'altitude des glaciers sur une grille de 1° par 1° entre fin 2003 et fin 2008 (figure 6).

L'analyse avec *ICESat* confirme en partie les résultats obtenus par soustraction des MNT. Il existe bien une anomalie des bilans dans l'ouest de la chaîne, mais elle n'est pas limitée au Karakorum. Le Karakorum se trouve en fait en bordure ouest d'une anomalie plutôt centrée sur le Kunlun Shan et qui s'étend sur une partie du plateau tibétain. L'étendue géographique de cette anomalie suggère qu'elle résulte d'une anomalie climatique régionale. Comme l'indiquaient déjà les différences de MNT, les glaciers perdent de la masse à un rythme modéré dans la partie centrale de la chaîne himalayenne.

En revanche, pour deux régions, il reste un désaccord important entre les deux techniques. Tout d'abord, *ICESat* observe des pertes de masse beaucoup plus fortes pour la zone du East Nyainqêntanglha Shan (dont la terminaison est appelé Hengduan Shan, figure 6). Ensuite, alors que le différentiel de MNT indiquait un léger gain de masse pour les glaciers du Pamir, l'altimétrie laser suggère un amincissement assez rapide, de 0,48 m/an. Il y a trois explications possibles pour ces incohérences entre les deux techniques. (i) *ICESat* couvre la période 2003-2008, alors que les différences de MNT échantillonnent l'évolution des glaciers entre fin 1999

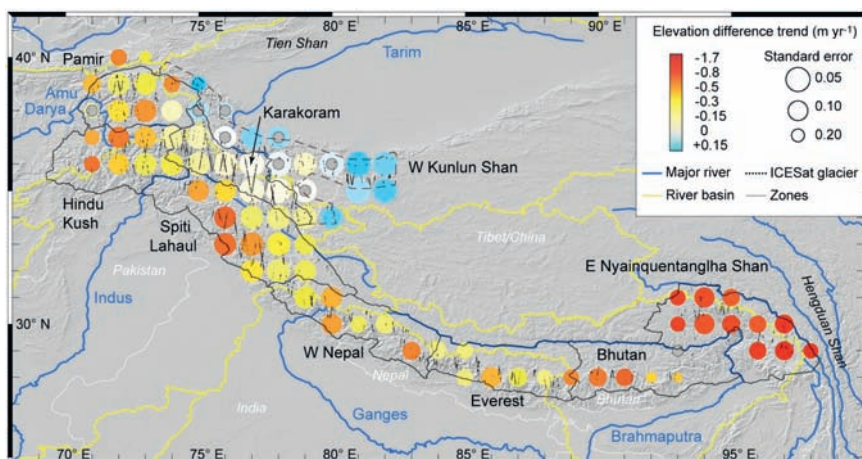


Figure 6. Taux de variation d'épaisseur (m/an) à travers la chaîne himalayenne (au sens large) entre novembre 2003 et novembre 2008 à partir des données d'ICESat. D'après Kääb *et al.* (2015).

et fin 2010 (East Nyainqentanglha Shan) ou fin 2011 (Pamir). D'ailleurs, avec des données de gravimétrie spatiale, Yi et Sun (2014) observent des gains importants de masse entre fin 2008 et fin 2011 au Pamir, ce qui permet de réconcilier partiellement les deux estimations. (ii) Toujours sur le Pamir, la différence des MNT montre de très fortes variations locales des épaisseurs glaciaires (liées à des surges comme sur le Karakorum) qui sont mal échantillonnées avec les traces espacées du satellite ICESat. (iii) La correction de la profondeur de pénétration de SRTM, appliquée par Gardelle *et al.* (2013) avant de soustraire les MNT, pourrait être sous-estimée et plus particulièrement sur ces deux régions où les différences entre les deux techniques sont les plus marquées.

Par analyse des champs de gravité Grace

La troisième technique, dite gravimétrique, repose sur une méthodologie très différente. Il ne s'agit pas de suivre l'évolution temporelle de l'altitude de la surface des glaciers comme avec les MNT ou ICESat, mais de mesurer directement l'évolution de leur masse via les champs de pesanteur mesurés régulièrement depuis 2002 par les satellites (*Tom et Jerry*) de la mission Grace. Cette mission a constitué une petite révolution pour la glaciologie : elle permet de suivre en temps quasi réel l'évolution de la masse des plus grandes étendues glaciaires, comme les calottes polaires, les glaciers de l'Arctique canadien ou de l'Alaska.

L'utilisation des données Grace pour le suivi des masses de glaces morcelées des régions de haute montagne est plus

difficile. Notamment, car les champs de gravité Grace ont une résolution faible (~500 km) et donc le signal lié aux changements de masse des glaciers est dilué par le signal hydrologique des régions périglaciaires. Ce signal hydrologique est justement particulièrement fort au nord de l'Inde du fait d'un intense pompage des nappes phréatiques pour l'irrigation (Rodell *et al.*, 2009). Une autre difficulté est la bonne prise en compte de la forte contribution du rebond postglaciaire, ce soulèvement de la croûte terrestre qui fait suite à la fonte des vastes calottes du dernier maximum glaciaire (il y a 20 000 ans). La méconnaissance de ces deux signaux, qui contaminent le signal Grace, explique en partie les incohérences entre les différentes estimations issues des données gravimétriques pour les hautes montagnes d'Asie : un ordre de grandeur sépare deux estimations de la perte annuelle des glaciers: -47 ± 12 Gt/an d'après Matsuo et Heki (2010) et -5 ± 6 Gt/an d'après Jacob *et al.* (2012).

Dans un effort de synthèse préparatoire au 5^e rapport du Giec, Gardner *et al.* (2013) ont comparé deux nouvelles estimations des pertes de masse des glaciers des hautes montagnes d'Asie, obtenues avec Grace pour la période 2003-2009 : -14 ± 17 Gt/an et -23 ± 24 Gt/an. Pour la même période, les données d'ICESat indiquent une perte de masse de $-29,0 \pm 13,4$ Gt/an. Aussi, avec l'amélioration des traitements des données et des corrections qui leur sont appliquées, il y a une certaine convergence entre les différentes techniques de mesure. Dans le détail, lorsqu'on étudie des régions de plus petite taille, il reste cependant des écarts

importants entre les différentes techniques. Il est important de résoudre ces incohérences, car des études à l'échelle régionale sont nécessaires pour comprendre les causes climatiques des évolutions glaciaires.

Rôle hydrologique des glaciers himalayens

Pour simplifier, on peut séparer la contribution des glaciers aux débits des rivières en deux composantes. Une première composante est liée au déséquilibre de masse : un glacier dont le bilan de masse est négatif augmente sa contribution aux débits des rivières et in fine à la hausse du niveau des mers. Nous y reviendrons ci-après. L'autre composante, dite saisonnière retardée (ou à l'équilibre), est liée, pour un glacier dont le bilan de masse est nul, à sa capacité à stocker de l'eau sous forme de neige au cours de la période froide et humide et à la restituer via la fonte pendant l'été, ce qui fait de lui un véritable château d'eau naturel (Kaser *et al.*, 2010). Ce rôle est particulièrement important et plus facile à appréhender dans les bassins-versants où la fonte de la neige et de la glace est découplée temporellement de leur accumulation, comme dans les Alpes (Huss *et al.*, 2008), mais aussi à l'ouest de l'Himalaya et au Karakorum (Immerzeel *et al.*, 2010). Dans ces dernières régions, les glaciers fondent essentiellement en été (de juin à septembre), qui est la saison sèche, donc la période où la demande en eau est la plus forte (par exemple pour l'irrigation des cultures). À l'inverse, les glaciers de l'Est himalayen ont un rôle hydrologique plus faible. Ces glaciers ont en effet la particularité d'accumuler de la neige pendant la mousson estivale (de juin à septembre), qui est aussi la période de fonte intense. Autrement dit, les glaciers fondent au moment où les rivières sont déjà grossies par l'écoulement des pluies de mousson et la fonte des neiges saisonnières hors des glaciers. La contribution glaciaire est donc fortement diluée.

Jusqu'à récemment, seule la composante saisonnière à l'équilibre avait été quantifiée à l'échelle des grands bassins versants du globe (Kaser *et al.*, 2010). En revanche, par construction, cette étude ne tenait pas compte du déséquilibre de masse des glaciers. À partir des bilans de masse mesurés par les satellites tout le long de

Tableau 1. Contribution des glaciers aux débits annuels des rivières (en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) à leur embouchure pour trois des grands bassins versants d'Asie. On distingue une contribution saisonnière retardée (dite à l'équilibre) et une contribution liée aux pertes de masse. D'après Gardelle *et al.* (2013).

Fleuve	Bassin-versant (km ²)	Surface glaciaire (km ²)	Contribution saisonnière retardée ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) Kaser <i>et al.</i> (2010)	Contribution déséquilibre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) Gardelle <i>et al.</i> (2013)	Débit moyen annuel ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) Papa <i>et al.</i> (2012)
Indus	1 140 000	26 000	105	103 ± 72	2 150
Gange	1 024 000	11 000	47	103 ± 49	11 740
Brahmapoutre	528 000	15 000	33	147 ± 64	19 700

la chaîne himalayenne, nous avons pu estimer, pour trois des principaux bassins versants d'Asie du Sud-Est, cette contribution liée aux gains ou pertes de masse à l'échelle de temps pluriannuelle (tableau 1).

C'est pour l'Indus que la somme des contributions des glaciers semble la plus forte, près de 10 % du débit moyen annuel à l'embouchure, une proportion probablement beaucoup plus forte pendant les mois d'été quand les glaciers fondent vite et les débits sont réduits. Comme attendu, la contribution glaciaire est plus faible pour le Gange et le Brahmapoutre, puisque ces fleuves naissent dans l'est de l'Himalaya, où les glaciers fondent en pleine période de mousson donc d'intenses précipitations. Pour ces deux fleuves, on notera que c'est surtout la contribution de déséquilibre (soit les pertes de masse pluriannuelles) qui domine, avec des valeurs 3 à 4 fois supérieures à la contribution saisonnière ou à l'équilibre.

Notons toutefois que les estimations de la contribution relative des glaciers diffèrent beaucoup d'une étude à l'autre. Elles varient fortement en fonction de la position dans le bassin-versant où l'estimation est réalisée. Logiquement, le rôle des glaciers est plus important lorsqu'on se rapproche de la source (les montagnes) et décroît quand le fleuve traverse les grandes plaines indiennes ou pakistanaïses. Par exemple, la contribution glaciaire culmine à 50-80 % du débit total lorsque les affluents de l'Indus (Hunza, Shigar, Shyok) quittent les montagnes (Lutz *et al.*, 2014).

Conclusions et perspectives

Depuis 2010, nous avons énormément appris sur l'évolution des glaciers des hautes montagnes d'Asie et sur leur contribution aux débits des rivières et à la hausse du niveau des mers. Contrairement à l'assertion erronée du deuxième volume du 4^e rapport du Giec, les glaciers n'y fondent pas plus rapidement que dans les autres régions du globe, c'est même plutôt l'inverse. Ainsi, on y trouve une vaste zone (Karakorum, West Kunlun, sud du Pamir) où les bilans de masse ont été équilibrés au cours des 10-15 dernières années et peut-être avant. L'origine de cette anomalie est probablement climatique, des températures estivales variant peu et des accumulations hivernales en légère augmentation constituant actuellement l'explication la plus probable (Kapnick *et al.*, 2014 ; Yao *et al.*, 2012). Mais cette interprétation reste préliminaire, notamment car elle se fonde sur l'analyse de données grillées de précipitations dont la fiabilité (Song *et al.*, 2016) et la représentativité vis-à-vis des zones de haute altitude (Immerzeel *et al.*, 2012) restent discutées. Mesurer l'accumulation hivernale sur les glaciers himalayens à la fois sur le terrain et, si possible, depuis l'espace constitue un des enjeux des prochaines années, notamment pour mieux contraindre les modèles glaciologiques et les projections qu'ils produisent sur l'évolution des glaciers. Ces modèles,

bien étalonnés et validés, seront aussi un outil indispensable pour comprendre le rôle respectif de la température et des précipitations dans les bilans de masse contrastés des glaciers des hautes montagnes d'Asie.

Aujourd'hui, notre vision d'ensemble de la chaîne reste limitée à la période post-2000, date d'apparition de nombreuses missions spatiales. Pour donner de la profondeur temporelle à ces analyses, différentes stratégies sont mises en œuvre, comme l'exploitation des couples stéréoscopiques de photographies acquises dans les années 1970 par les satellites espions américains (Bolch *et al.*, 2011 ; Pieczonka *et al.*, 2013), l'exploitation de mesures de terrain anciennes (Vincent *et al.*, 2013) ou l'étalonnage sur la période récente de modèles glaciologiques qui peuvent ensuite être exploités dans le passé (Azam *et al.*, 2014b ; Shea *et al.*, 2015). Ces modèles, du fait de leur pas de temps journalier ou mensuel, vont permettre de préciser la contribution actuelle et future des glaciers au débit des rivières (Lutz *et al.*, 2014). Mais ces efforts de modélisation ne seront crédibles que s'ils sont associés à un gros effort de validation à partir des données de terrain et d'observations satellitaires. Cependant, au vu des pertes de masse récentes plutôt modérées, on peut déjà sans risque annoncer que les glaciers himalayens persisteront bien après 2035.

Bibliographie

- Azam M.F., Wagnon P., Vincent C., Ramanathan A., Favier V., Mandal A., Pottakkal J.G., 2014a. Processes governing the mass balance of Chhota Shigri Glacier (western Himalaya, India) assessed by point-scale surface energy balance measurements. *Cryosphere*, 8, 2195-2217. doi: 10.5194/tc-8-2195-2014
- Azam M.F., Wagnon P., Vincent C., Ramanathan A., Linda A., Singh V.B., 2014b. Reconstruction of the annual mass balance of Chhota Shigri glacier, Western Himalaya, India, since 1969. *Ann. Glaciol.*, 55, 69-80. doi: 10.3189/2014AoG66A104
- Azam M.F. *et al.*, 2016. Meteorological conditions, seasonal and annual mass balances of Chhota Shigri Glacier, western Himalaya, India. *Ann. Glaciol.*, 57, 328-338. doi: 10.3189/2016AoG71A570
- Bohner J., 2006. General climatic controls and topoclimatic variations in Central and High Asia. *Boreas*, 35, 279-295. doi: 10.1111/j.1502-3885.2006.tb01158.x

- Bolch T. *et al.*, 2012. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336, 310-314. doi: 10.1126/science.1215828
- Bolch T., Pieczonka T., Benn D.I., 2011. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *Cryosphere*, 5, 349-358. doi: 10.5194/tc-5-349-2011
- Church J.A. *et al.*, 2011. Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophys. Res. Lett.*, 38. doi: 10.1029/2011GL048794
- Cruz R.V., Harasawa H., Lal M., Wu S., 2007. Asia. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 469-506. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Cambridge, UK, New-York, NY, USA.
- Fujita K., 2008. Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 276, 14-19. doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.028
- Gardelle J., 2012. *Évolution récente des glaciers du Pamir-Karakoram-Himalaya : apport de l'imagerie satellite*. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble.
- Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., 2012. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early 21st century. *Nat. Geosci.*, 5, 322-325. doi: 10.1038/ngeo1450
- Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., Käab A., 2013. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *Cryosphere*, 7, 1263-1286. doi: 10.5194/tc-7-1263-2013
- Gardner A. S. *et al.*, 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340, 852-857. doi: 10.1126/science.1234532
- Hewitt K., 2005. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the 'elevation effect', Karakoram Himalaya. *Mt. Res. Dev.*, 25, 332-340
- Huss M., Farinotti D., Bauder A., Funk M., 2008. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrol. Process.*, 22, 3888-3902. doi: 10.1002/hyp.7055
- Immerzeel W.W., van Beek L.P.H., Bierkens M.F.P., 2010. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 328, 1382-1385. doi: 10.1126/science.1183188
- Immerzeel W.W., Pellicciotti F., Shrestha A.B., 2012. Glaciers as a proxy to quantify the spatial distribution of precipitation in the Hunza basin. *Mt. Res. Dev.*, 32, 30-38
- Jacob T., Wahr J., Pfeffer T., Swenson S., 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482, 514-518. doi: 10.1038/nature10847
- Käab A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., Arnaud Y., 2012. Contrasting patterns of early 21st century glacier mass change in the Himalaya. *Nature*, 488, 495-498. doi: 10.1038/nature11324
- Käab A., Treichler D., Nuth C., Berthier E., 2015. Brief Communication: Contending estimates of 2003-2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya. *Cryosphere*, 9, 557-564. doi: 10.5194/tc-9-557-2015
- Kapnick S.B., Delworth T.L., Ashfaq M., Malyshev S., Milly P.C.D., 2014. Snowfall less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle. *Nat. Geosci.*, 7, 834-840. doi: 10.1038/ngeo2269
- Kaser G., Großhauser M., Marzeion B., 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 107, 20223-20227. doi: 10.1073/pnas.1008162107
- Lemke P. *et al.*, 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor *et al.*, eds.), 337-383. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Lutz A.F., Immerzeel W.W., Shrestha A.B., Bierkens M.F.P., 2014. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nat. Clim. Change*, 4, 587-592. doi: 10.1038/nclimate2237
- Matsuo K., Heki K., 2010. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 290, 30-36. doi: 10.1016/j.epsl.2009.11.053
- Papa F., Bala S.K., Pandey R.K., Durand F., Gopalakrishna V.V., Rahman A., Rossow W.B., 2012. Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal. *J. Geophys. Res.*, 117, C11021. doi:10.1029/2012JC008158
- Pieczonka T., Bolch T., Junfeng W., Shiyin L., 2013. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery. *Remote Sens. Env.*, 130, 233-244. doi: 10.1016/j.rse.2012.11.020
- Richardson S.D., Reynolds J.M., 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quat. Int.*, 65-66, 31-47. doi: 10.1016/S1040-6182(99)00035-X
- Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J.S., 2009. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 460, 999-1002. doi: 10.1038/nature08238
- Shea J.M., Immerzeel W.W., Wagnon P., Vincent C., Bajracharya S., 2015. Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya. *Cryosphere*, 9, 1105-1128. doi: 10.5194/tc-9-1105-2015
- Song C., Huang B., Ke L., Ye Q., 2016. Precipitation variability in High Mountain Asia from multiple datasets and implication for water balance analysis in large lake basins. *Global Planet. Change*, 145, 20-29. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.08.005
- Vaughan D.G., Comiso J.C., Allison I., Carrasco J., Kaser G., Kwok R., Mote P., Murray T., Paul F., Ren J., Rignot E., Solomina O., Steffen K., Zhang T. 2013. Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, eds), 317-382. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Vincent C. *et al.*, 2013. Balanced conditions or slight mass gain of glaciers in the Lahaul and Spiti region (northern India, Himalaya) during the nineties preceded recent mass loss. *Cryosphere*, 7, 569-582. doi: 10.5194/tc-7-569-2013
- Yao T. *et al.*, 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat. Clim. Change*, 2, 663-667. doi: 10.1038/nclimate1580
- Yi S., Sun W., 2014. Evaluation of glacier changes in high-mountain Asia based on 10 year GRACE RL05 models. *J. Geophys. Res.*, 119, 2013JB010860. doi: 10.1002/2013JB010860
- Zemp M. *et al.*, 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *J. Glaciol.*, 61, 745-762. doi: 10.3189/2015JoG15J017