

■ **EN DEUX MOTS** ■ Les alertes concernant les glaciers himalayens se multiplient. Ils se réduiraient, et la ressource en eau qu'ils procurent aux hautes vallées des grands fleuves de la

région se tarirait. Il est cependant trop tôt pour conclure, car, hormis pour le Chhota Shigri indien, aucune mesure de volume n'est effectuée en continu depuis les années 2000.

La source himalayenne se tarit

Les glaciers himalayens ne sont pas le château d'eau de l'Asie. Mais dans les régions de la chaîne non soumises à la mousson, cette eau stockée est une ressource cruciale dans les hauts bassins. La tendance est à la décrue.

Patrick Wagon et Yves Arnaud sont glaciologues à l'IRD. Ils travaillent au laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement de Grenoble.

Pierre Chevallier est hydrologue à l'IRD. Il dirige l'institut languedocien de recherche sur l'eau et l'environnement de Montpellier. patrick@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Gange, Brahmapoutre, Indus, Mékong, Salouen, Yangzi Jiang. Six grands fleuves, qui tous prennent leur source dans la chaîne himalayenne et dont dépendent plus de 1,2 milliard d'habitants [1]. En ajoutant le bassin endoréique du Tarim, ces sept bassins fluviaux couvrent une superficie d'environ 6,5 millions de kilomètres carrés, plus de douze fois celle de la France. Seules les extrêmes parties amont des bassins, soit moins de un pour cent de la surface, sont englacées. Contrairement à l'idée reçue, ce ne sont pas les glaciers himalayens qui fournissent la grande majorité de l'eau à l'Asie, mais les précipitations. Car la plupart des pays de la région sont soumis au régime des moussons. Les pluies estivales y sont tellement intenses que, par exemple, dans le golfe du Bengale, à l'embouchure du Gange, les glaciers ne contribuent qu'à moins de 1 % du volume total d'eau écoulée, en moyenne annuelle.

Cependant, la ressource en eau provenant des glaciers pourrait venir à manquer dans certaines régions arides. Surtout que, dans un contexte de réchauffement climatique, de moindres chutes de neige et une fonte printanière plus précoce occasionneront, pour les fleuves, des étiages plus longs [2]. Pour prévoir leur évolution comme celle de la ressource qu'ils procurent, ces glaciers, à la limite

© PATRICK WAGON



entre les influences tropicales et tempérées, commencent seulement à être mesurés de manière continue.

Avec un total de 59 000 kilomètres carrés de surface englacée, les glaciers de l'Himalaya se répartissent sur plus de 2 500 kilomètres si l'on inclut ceux du Karakoram et de l'Hindu Kush [fig.1]. Les conditions climatiques qu'ils subissent sont très différentes à chaque bout de la chaîne qui s'étire du nord-ouest au sud-est. Au sud-est, le rôle de la mousson asiatique prédomine. Il pleut tellement en été que les fleuves se rechargent presque uniquement par le ruissellement de la pluie sur les bassins. Dans ces régions, les glaciers ne contribuent que très peu aux ressources en eau, et ce, d'autant moins qu'ils sont éloignés de la région considérée. Même à Rishikesh, ville indienne pourtant située à 330 mètres d'altitude, au pied sud de la chaîne, l'eau fournie par les glaciers ne représente en moyenne annuelle qu'entre 4 % et 8 % des ressources disponibles.

À l'opposé, au nord-ouest, au nord de l'Inde et au Pakistan, la mousson se fait peu sentir. Les cumuls de précipitations n'excèdent bien souvent pas les 300 millimètres par an. C'est, par exemple, le cas des hautes val-



LE CHHOTA SHIGRI est un glacier indien (État de l'Himachal Pradesh) situé dans la zone de transition entre la partie aride de l'Himalaya et la région influencée par la mousson. C'est un des seuls glaciers de la chaîne surveillé en continu.

lées de l'Indus, un des plus grands fleuves himalayens qui prend sa source au mont Kailash, au nord-ouest du Tibet. L'été, seule l'eau libérée par la fonte des glaciers permet de soutenir le débit du fleuve jusqu'à son entrée dans la plaine. C'est elle qui approvisionne la population pour ses besoins domestiques, agricoles, ou encore énergétiques. De même, alors que le versant sud de la chaîne est très arrosé par la mousson, l'intérieur, en particulier le plateau du Tibet, est nettement plus sec. Les glaciers y ont un intérêt vital en tant que réservoirs d'eau gelée.

Dépressions d'ouest

Dans la partie occidentale de la chaîne, l'hiver est la saison pendant laquelle les dépressions d'ouest apportent l'humidité et, en altitude, la neige. Faute de mousson, l'été est très sec. Le contraste saisonnier est tellement marqué que surviennent souvent des périodes d'aridité. Dans ces situations de pénuries pluviométriques, l'irrigation ne peut être poursuivie que grâce à l'apport de l'eau de fonte des glaciers. Au Pendjab, dans le Nord-Ouest indien et au Pakistan, les canaux qui sillonnent la plaine bordant la chaîne de montagnes en dépendent fortement.

Ils sont alimentés par de grands barrages installés sur les derniers contreforts himalayens, comme celui de Bhakra au nord de la ville de Chandigarh, sur la Satledj, dans le bassin de l'Indus, ou celui de Tehri sur la Bhagirathi, qui devient le Gange quelques kilomètres à l'aval.

En période sèche, ces ouvrages, qui stockent une part importante d'eau de fonte des glaciers, contribuent à une gestion concertée de la ressource. Et ce, autant pour la production hydroélectrique que pour une agriculture irriguée qui occupe une très grande partie d'une vaste région dont elle constitue la principale ressource économique. Un affaiblissement de la ressource en eau d'origine glaciaire amènerait à devoir reconsidérer le mode de gestion des barrages, ainsi que leur impact économique, non seulement en termes de fonctionnement, mais aussi en termes d'amortissement d'infrastructures.

Plusieurs alertes ont été lancées récemment : les glaciers himalayens seraient en recul généralisé. Ce verdict ne peut être rendu de façon si nette, car nous manquons de données fiables et diversifiées aussi bien sur les fluctuations des fronts des glaciers que de leurs volumes. En ce qui concerne les fronts glaciaires, des observations ⇒

[1] C. Revenga *et al.*, *Watersheds of the World*, CD, World Resources Institute, 2003.

[2] T. P. Barnett *et al.*, *Nature*, 438, 303, 2005.

[3] Y. Tandong *et al.*, *Science in China D, Earth Sciences*, 47, 2004.

[4] M. B. Dyurgerov et M. F. Meier, http://instaar.colorado.edu/other/download/OP58_dyurgerov_meier.pdf

[5] D.P. Dobhal *et al.*, *Bull. Glaciol. Res.*, 25, 9, 2008.

[6] K. Fujita *et al.*, *J. Glaciol.*, 43, 583, 1997.

[7] P. Wagnon *et al.*, *J. Glaciol.*, 53, 603, 2007.

[8] E. Berthier *et al.*, *Remote Sensing Environ.*, 108, 327, 2007.

⇒ ont été répertoriées en Chine par Yao Tandong et ses collaborateurs de l'université de Lanzhou [3], alors que diverses équipes indiennes ont décrit les positions des fronts successifs du glacier Gangotri, une des sources du Gange, depuis 1780. Les glaciers de l'Himalaya et du Tibet auraient ainsi évolué à peu près comme ceux de nombreuses autres régions du monde : au début du XX^e siècle, plusieurs épisodes d'avancées auraient précédé le net recul des années 1950-1960 ; dans les années 1960-1970, les glaciers seraient restés assez stables ou auraient avancé légèrement ; durant la décennie 1980, la tendance se serait à nouveau inversée avec un recul généralisé au cours des années 1990.

Mesures irrégulières

Le conditionnel est de rigueur, car ces quelques données éparses ne peuvent fournir que des tendances. De plus, la position du front d'un glacier ne suffit pas à déterminer son volume. Si on veut utiliser les glaciers comme indicateurs climatiques et estimer leur devenir, il faut pouvoir disposer de données fiables sur leurs variations de volume actuelles et passées. Or pour l'instant, il n'existe pas de telles séries sur les glaciers himalayens. En Inde, seuls huit glaciers ont été mesurés [4]. Pour ceux dont les variations de volume ont été recueillies, les quelques bilans de masse indiquent des pertes autour de 0,3 à 0,4 mètre d'eau par an entre 1974 et 1990 (lire « Le bilan de masse d'un glacier », p. 51) [5]. L'incertitude sur cette valeur est grande au vu du petit nombre de glaciers mesurés et de la courte durée de ces mesures,



DANS LA ZONE D'ABLATION du glacier, les glaciologues plantent des perches en bambou afin de mesurer la fonte.

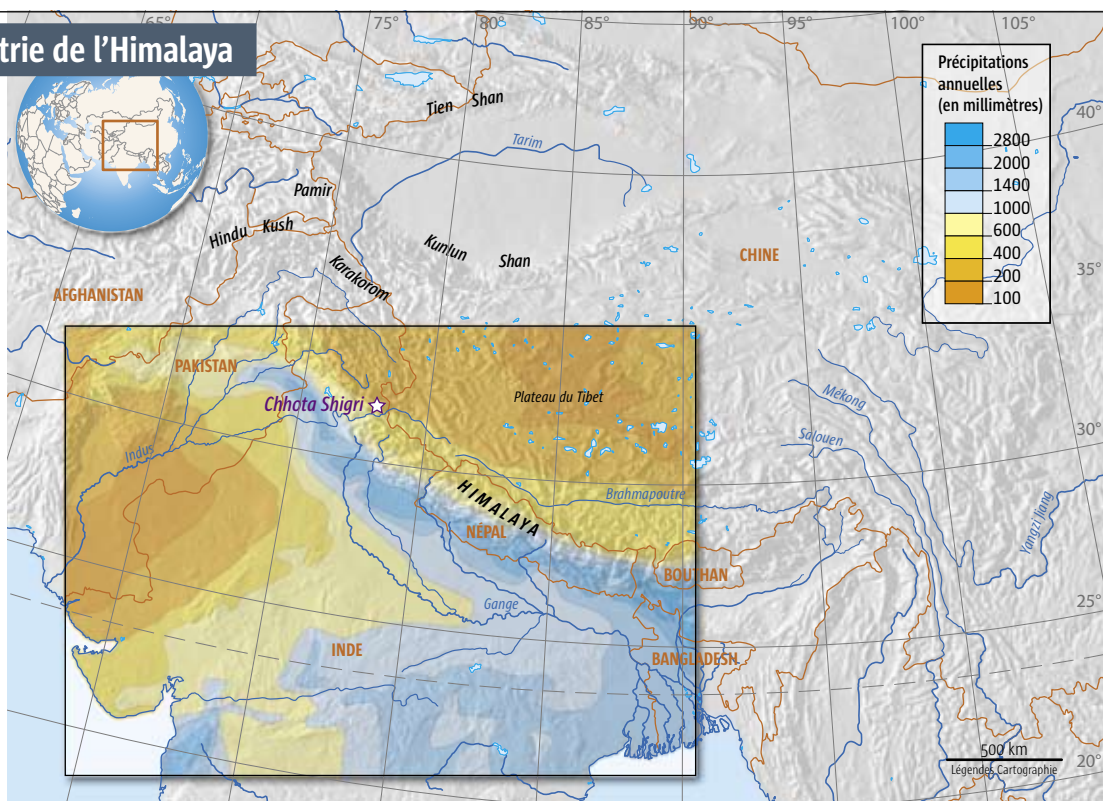
© P. WAGNON

puisqu'une seule série atteint neuf ans. De plus, ces observations sont discontinues, et, hormis celles du glacier de Dokriani dans le haut bassin du Gange, toutes s'arrêtent avant 1990. Au Népal, la plus longue série de données n'atteint que quatre ans, malgré un effort des scientifiques japonais jusqu'en 1994 [6]. Ainsi, au début des années 2000, il n'existait plus aucun programme de suivi des volumes des glaciers himalayens.

Cela a changé en 2002. En partenariat avec l'université Jawaharlal Nehru de Delhi, nous avons alors entamé un suivi du bilan de masse du Chhota Shigri, dans l'État indien de l'Himachal Pradesh. Ce glacier de 9 kilomètres de long et de 16 kilomètres carrés de surface totale est situé entre 4 050 et 6 260 mètres d'altitude dans la zone de transition entre la partie aride de la chaîne et la région influencée par la mousson. Il est facilement accessible et en grande partie dépourvu de débris. Il est donc moins protégé de l'énergie solaire incidente que les glaciers couverts de roches comme le Dokriani dans sa partie aval. L'observation du Chhota Shigri complète

Fig.1 Pluviométrie de l'Himalaya

EN INCLUANT L'HINDU KUSH et le Karakoram, l'Himalaya s'étend sur 2 500 kilomètres. C'est la source des grands fleuves qui drainent l'Asie. Le régime de ses glaciers dépend de leur situation. Au sud-est, soumis au régime de mousson, ils se rechargent l'été, alors que dans la partie occidentale, ce sont les vents d'ouest d'hiver qui apportent la neige. L'Himalaya formant une barrière climatique, sa partie nord, notamment le plateau du Tibet, est plus particulièrement aride.



utilement, dans des conditions climatiques sensiblement différentes, celles de ce glacier du haut bassin du Gange, qui a perdu de façon régulière 32 centimètres d'eau par an en moyenne entre 1992 et 2000 [5].

Le bilan de masse annuel du Chhota Shigri confirme pour l'instant la tendance observée dans les autres états. Depuis 2002, le glacier maigrit. Il a perdu annuellement environ 1,3 mètre d'eau. Seule l'année 2004-2005 fut très légèrement excédentaire avec +0,1 mètre d'eau [7]. La comparaison des images satellitaires, prises en 1999 lors de la mission SRTM de la navette spatiale et en 2004 par le satellite Spot, nous a permis d'extrapoler les résultats à l'ensemble de la zone de 2 500 kilomètres carrés comprenant le Chhota Shigri. Le bilan de masse total de l'ensemble des 915 kilomètres carrés de glaciers de cette région a été en moyenne d'environ -0,8 mètre d'eau par an entre 1999 et 2004 [8].

Suivi de la fonte

C'est plus du double de la perte annuelle de 0,3 mètre, mesurée sur les quelques glaciers indiens entre 1974 et 1990 ou sur le glacier Dokriani entre 1992 et 2000. Ce résultat semble indiquer une tendance à la dérive plutôt plus rapide de nos jours. Cependant, là encore il faut être prudent. Les anciennes mesures sont irrégulières, peu fiables, et la durée de notre étude sur le Chhota Shigri est trop courte. La survenue de plusieurs années excédentaires comme en 2004-2005 remettrait en question cette conclusion rapide. Il est encore trop tôt pour statuer.

Cela ne sera possible que lorsque les séries de données auront atteint au moins une dizaine d'années. D'autres informations seront alors disponibles. En effet, plusieurs nouveaux glaciers ont été sélectionnés en 2007 par différentes équipes indiennes. Et le Chhota Shigri n'est plus le seul glacier que nous suivons. Depuis l'année dernière, nous avons aussi équipé le Mera, dans la vallée Hinku, à l'est du Népal. La comparaison des bilans de masse des deux glaciers apportera des informations sur l'influence respective des perturbations d'ouest et de la mousson sur le bilan de masse des glaciers.

De plus, dès l'automne 2008, nous prévoyons de compléter ce dispositif de terrain par d'autres types de mesures. Nous installerons des stations météorologiques automatiques hors du glacier, mais aussi dessus afin de déterminer les processus qui gouvernent la fonte. Et des stations hydrographiques mesureront en continu le débit des torrents qui sortent de ces glaciers dépourvus de lacs proglaciaires. Ce dispositif permettra de quantifier de façon précise la contribution des glaciers aux débits des rivières et de prévenir les usagers de la ressource de sa raréfaction. Car le premier signe de la pénurie d'eau provenant d'un glacier est paradoxalement une augmentation du débit de fonte. En effet, si un glacier est en équilibre, son volume global reste constant, son débit de fonte est stable. Mais si le réchauffement du climat déséquilibre l'ensemble du

système, la glace va fondre plus rapidement. Le débit d'eau va donc en premier lieu augmenter. Ce qui occasionnera un rétrécissement du volume général du glacier. Et conduit inexorablement à une baisse du débit moyen d'écoulement. Entre les deux, le débit de fonte passe ainsi par une valeur maximale dont la connaissance est très importante pour les gestionnaires de l'eau. Faute de mesures, nous ne connaissons encore ni l'ampleur ni l'échéance de ce maximum de débit de fonte des glaciers de la région du Chhota Shigri.

Les dernières données indiquent que, compte tenu de leur surface, ces glaciers himalayens de la région du Chhota Shigri ont perdu environ 3,5 kilomètres cubes d'eau en cinq ans. C'est une goutte d'eau par rapport au volume moyen des précipitations de la région. Mais cette goutte d'eau perdue est un signe adressé à la planète entière, car les glaciers de montagne sont des indicateurs très fiables du climat. ■ P. W., Y. A. et P. C.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ B. Francou et C. Vincent, *Les Glaciers à l'épreuve du climat*, Belin/IRD, 2007.

■ Bernard Francou, Pierre Ribstein et Bernard Pouyaud, « La fonte des glaciers tropicaux », *La Recherche*, octobre 1997, p. 34.

MESURES Le bilan de masse d'un glacier

■ **UN GLACIER EST UN RÉSERVOIR DE GLACES ET NEIGES.** Dans sa partie haute, les précipitations solides dépassent la fonte et la sublimation. Le stock de glace y est régénéré. C'est la zone d'accumulation. Au contraire, dans la partie basse ou zone d'ablation, la fonte excède l'accumulation. Cette partie du glacier perd de la masse, et de l'eau s'en échappe. Entre ces deux zones, la glace s'écoule par gravité.

La mesure de l'ablation s'effectue à l'aide de balises régulièrement distribuées, des perches en bambou de 8 à 10 mètres de longueur, enfoncées dans la glace avec une perforatrice à vapeur. La différence d'émergence de la balise pendant une période donnée, en général un an, donne la mesure de l'ablation durant cette période. Un réseau de puits ou de carottages régulièrement répartis dans la zone d'accumulation donne, grâce aux mesures de densité, la quantité d'eau accumulée par tranche d'altitude. La moyenne de ces mesures d'ablation et d'accumulation, pondérée par les surfaces respectives, donne le volume annuel perdu ou

gagné par le glacier. Lorsque ce volume est divisé par la superficie totale du glacier, on obtient une hauteur d'eau. C'est le bilan de masse spécifique du glacier.

LE CHHOTA SHIGRI accumule de la neige en altitude, mais en perd dans sa partie basse. Hormis durant l'année 2004-2005 où il fut un peu excédentaire (courbe bleue), il a perdu environ 1,3 mètre d'eau chaque année entre 2002 et 2006.

