



Le camp de base sur le glacier Yala, à 5 300 mètres d'altitude (ci-dessus), est le point de départ d'expéditions bisannuelles destinées à installer des équipements et à collecter les données des instruments de mesure disséminés dans les montagnes (ci-contre). Les chercheurs (dont l'auteur, en veste bleue sur la structure métallique), doivent aussi assurer l'entretien des capteurs, qui sont soumis à des conditions extrêmes.

froid extrême a déjà fait exploser des batteries, des vents violents ont abîmé des capteurs et des avalanches ont parfois fait tomber la structure sur laquelle ils sont installés.

MESURER LA SUBLIMATION

La mesure de la sublimation, processus turbulent qui se produit dans des conditions froides, ensoleillées, venteuses et sèches, courantes durant l'hiver himalayen, est particulièrement délicate. Des instruments, tels ceux que nous avons installés à 5 600 mètres d'altitude, nous ont permis de la quantifier à partir des variations de l'humidité et de la température de l'air. Nous avons constaté que dans les endroits exposés au vent, environ 21% de la neige tombée ne finit jamais dans les rivières, mais se sublime dans l'atmosphère. Cela suggère que même à des températures très inférieures à 0 °C, le manteau neigeux peut se réduire.

Nous avons aussi mis en évidence que lorsque la température de l'air est inférieure à 0 °C à deux mètres au-dessus de la neige, il y a assez d'énergie à sa surface pour la faire fondre. Cette énergie est apportée par le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde, par le rayonnement de grandes longueurs d'onde (infrarouges) émis par la surface et l'atmosphère, et par des flux de chaleur turbulents. D'intéressants phénomènes se produisent aussi à l'intérieur du manteau neigeux : au moins 30% de la neige qui s'y transforme en eau liquide pendant la journée regèle au cours de la nuit. La fonte du manteau neigeux nécessite beaucoup plus d'énergie que celle que l'on calculerait en ne considérant que sa masse.

Nous avons aussi installé au-dessus de la neige un instrument qui mesure le rayonnement gamma émis naturellement par les roches sous-jacentes. L'atténuation de ce rayonnement par la neige permet en effet d'estimer approximativement la quantité d'eau stockée dans le manteau neigeux.

Parfois, nous recueillons des données par des voies inattendues. Il y a environ huit ans, un collègue travaillant en Tasmanie a fait voler des drones au-dessus d'un glissement de terrain et a

ainsi collecté des informations intéressantes sur le volume de roches concerné et sur la vitesse de leur mouvement. Nous nous sommes rendu compte que la même méthode était susceptible de nous fournir des données sur les glaciers couverts de débris rocheux, particulièrement difficiles d'accès. Nous avons ainsi fait voler en 2013 notre premier drone, au-dessus d'une langue glaciaire située juste au-dessus de Kyanjin.

Le drone a pris sous divers angles des centaines de photos de ce glacier. Un logiciel les a ensuite exploitées pour déterminer le relief de la surface de glace avec la remarquable résolution d'une dizaine de centimètres. En répétant ces relevés tous les six mois environ jusqu'en 2019, nous avons découvert que, chaque année, le glacier s'amincit d'environ 80 centimètres, tandis que son front recule de quelque 40 mètres ; de plus, il ne s'écoule presque plus de glace. Bientôt, cette masse froide ne pourra plus être considérée comme un glacier, mais plutôt comme une langue de glace en voie de dépérissement, à l'image d'un tas de neige sale au bout d'un parking.

En théorie, un glacier couvert de débris, qui font l'effet d'isolants thermiques, devrait, à la même altitude, fondre beaucoup plus lentement qu'un glacier blanc. Nous avons toutefois identifié à la surface de tels glaciers noirs des zones singulières où la fonte est accrue et qui amplifient donc la perte de masse du glacier. Nous ne les aurions jamais identifiées sur des images satellitaires, de résolution trop faible.

Nous rassemblons toutes ces pièces du puzzle dans nos modèles afin d'estimer les quantités d'eau qui couleront dans les rivières. Toutefois, avant de prédire l'évolution des débits, il nous faut savoir combien d'eau les rivières transportent aujourd'hui.

MESURER LES DÉBITS DES RIVIÈRES

Le niveau d'un cours d'eau ne suffit pas pour déterminer son débit. Pour ce faire, on a besoin de la « courbe de tarage », qui donne la relation entre le niveau d'eau et le débit du cours d'eau considéré. Cette courbe doit être assez complète pour indiquer tant les débits élevés pendant la mousson que les débits faibles l'hiver.

Obtenir des données fiables à cet égard n'est pas une mince affaire. Nous pouvons utiliser soit des capteurs de pression placés au fond des rivières dans un tube d'acier, soit des capteurs radar de niveau installés quelques mètres au-dessus de la surface de l'eau. Nous pouvons aussi mesurer le débit en jetant une quantité connue de sel en un point de la rivière, puis en mesurant l'augmentation de la conductivité de l'eau quelques dizaines de mètres en aval. Même si les conditions sont moins difficiles que celles régnant sur le glacier Yala, il arrive pendant la mousson que des inondations emportent nos

ÉTABLIR LE
BILAN DE MASSE
DES GLACIERS

Depuis 2002, des équipes françaises sont actives dans l'Himalaya.

Avec leurs partenaires locaux, elles se concentrent sur un glacier situé au nord de l'Inde et, depuis 2007, sur trois glaciers de la région népalaise de l'Everest. L'objectif est de déterminer le bilan de masse, variable qui reflète le mieux l'état des glaciers année après année, car elle permet de quantifier leur apport d'eau aux rivières et à l'océan. En Himalaya ou ailleurs, deux grandes techniques sont déployées à cette fin.

La première, dite « glaciologique », repose sur des mesures de terrain effectuées en général une fois par an. Elle concerne d'une part la zone d'accumulation,

là où le glacier gagne plus de neige qu'il n'en fond.

Des sondages accompagnés de mesures de densité permettent d'y déterminer l'épaisseur de neige déposée en une année. Elle est appliquée d'autre part plus bas en altitude, où des jalons en bois implantés dans la zone d'ablation de la glace nous informent sur la quantité de glace disparue. En extrapolant ces relevés ponctuels, on obtient le bilan de masse, exprimé par l'épaisseur d'une lame d'eau uniforme étendue à la surface du glacier.

Depuis le début des mesures, les glaciers suivis ont en moyenne perdu l'équivalent de 0,5 à 1,5 mètre d'eau par an. Ceux situés le plus bas en altitude, dont la zone d'accumulation est souvent réduite à néant, affichent des pertes record. Le bilan de masse de chaque glacier suivi varie cependant beaucoup d'une année à l'autre. Positif les années où des typhons entraînent de grosses chutes de neige, il est le plus souvent négatif, comme cela l'a été au cours des six dernières années, caractérisées par une très forte fonte.



Un glaciologue examine un jalon en bois servant à mesurer l'évolution de la surface d'un glacier d'une année sur l'autre. On distingue au fond l'Everest (à droite sous un panache) et plusieurs grands glaciers.

La seconde technique, dite « géodésique », repose sur les données satellitaires. La comparaison de cartes topographiques réalisées à quelques années d'intervalle permet de mesurer les variations d'altitude de la surface du glacier, dont on déduit la variation de volume. En faisant une hypothèse raisonnable sur la densité de la neige ou de la glace, on détermine alors la variation de masse glaciaire. Appliquée aux images de très haute résolution comme celles du couple de satellites *Pléiades* du Cnes, cette technique aide à vérifier les bilans mesurés sur le terrain. Mais la méthode géodésique démontre surtout son potentiel quand on l'applique à l'ensemble des

glaciers des hautes montagnes d'Asie. Elle nous a permis de caractériser leur évolution depuis 2000, de mettre en évidence de fortes pertes en Himalaya, notamment au sud-est du plateau tibétain où les glaciers perdent plus de 0,6 mètre d'eau par an. Plus à l'ouest, les glaciers du Karakoram, de l'est du Pamir et du massif du Kun Lun sont presque à l'équilibre. Une exception dont les travaux de l'équipe de Walter Immerzeel aident à élucider l'origine.

ÉTIENNE BERTHIER ⁽¹⁾
et PATRICK WAGNON ⁽²⁾

⁽¹⁾CNRS-Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos), Toulouse

⁽²⁾IRD-Institut des géosciences de l'environnement, Grenoble

> appareils de mesure. Malgré ces difficultés, après des années d'effort, nous avons aujourd'hui une assez bonne idée des quantités d'eau qui s'écoulent dans les rivières.

Ainsi, depuis plusieurs années, nous intégrons les résultats obtenus sur divers bassins versants himalayens dans un modèle qui décrit tous les processus dont dépend le débit des rivières de l'Himalaya; d'autres chercheurs font de même pour d'autres régions montagneuses du monde. D'abondants ensembles de données sont par exemple disponibles pour les Alpes et les Andes; et la connaissance de ce qui se passe en Himalaya s'améliore, depuis que des chercheurs des universités de Katmandou et de Tribhuvan amassent des données dans des bassins versants situés à plus haute altitude encore, dans les massifs de l'Annapurna et de l'Everest.

Par ailleurs, il faut, pour les prévisions, prendre en compte les effets du changement climatique, par exemple le fait que les montagnes se réchauffent plus vite que les plaines en raison de rétroactions atmosphériques liées à la formation de nuages, à l'humidité et à la diminution de l'albédo (le pouvoir réfléchissant de la surface) due à la réduction du manteau neigeux. Un réchauffement global de la planète de 1,5 °C signifiera ainsi un réchauffement de 2,1 °C dans l'Himalaya.

Au-delà de l'étude du bassin versant du Langtang, mon équipe a aussi réalisé des simulations hydrologiques à l'échelle de la planète pour quantifier l'approvisionnement en eau des rivières. Dans ces travaux, publiés en 2020, nous proposons une classification des réservoirs d'eau naturels de montagne du monde entier (voir l'encadré pages 28 et 29).

LES GRANDS CHÂTEAUX D'EAU
DE LA PLANÈTE RECENSÉS
ET CLASSÉS

Nous considérons comme « important » un réservoir s'il est riche en glaciers, en neige ou en lacs et s'il alimente une forte population en aval. Parmi les plus importants châteaux d'eau naturels, citons ceux du Colorado, du Fraser dans l'ouest du Canada, du Río Negro en Argentine, des Alpes dont dépendent le Rhin et le Pô.

Cette vaste modélisation montre que les bassins versants asiatiques, qui alimentent de grands fleuves tels que l'Amou-Daria et l'Indus, sont les plus importants de la planète. Ils sont aussi parmi les plus vulnérables: les modèles prévoient de forts taux de réchauffement dans ces régions ainsi qu'une croissance rapide de leurs populations et de leurs économies, ce qui augmentera énormément les besoins en eau. La disponibilité moyenne en

eau ne devrait pas diminuer avant le milieu du siècle, en partie grâce à l'augmentation des pluies de mousson, mais les prévisions à plus long terme sont sombres. Nous prévoyons ainsi que 50 à 60% du volume de glace seront perdus d'ici à la fin du siècle, à moins que l'humanité ne réduise radicalement ses émissions de gaz à effet de serre.

À court terme, le grand défi pour les populations de ces régions d'Asie sera de faire face aux changements du régime des rivières et aux risques naturels. Dans certains bassins, la fonte des neiges débutera peut-être plusieurs semaines plus tôt qu'auparavant, ce qui obligera les agriculteurs à modifier leurs cultures ou à décaler les semailles. Les accumulations de neige, moins intenses, auront un rôle tampon plus limité. On peut donc s'attendre à une augmentation des niveaux d'eau dans les rivières dans une région du monde déjà confrontée à de fortes inondations chaque année.

Les pluies extrêmes dans les montagnes provoquent aussi davantage de glissements de terrain, notamment lors de la mousson. Une fonte accrue remplit les lacs glaciaires à ras bord, provoquant des inondations désastreuses lorsque les barrages morainiques qui les endiguent cèdent sous la pression de l'eau. Au cours des deux dernières décennies, les catastrophes naturelles telles que les avalanches, les glissements de terrain et les inondations soudaines ont fait des milliers de victimes et causé des milliards d'euros de dommages matériels. L'augmentation future des précipitations extrêmes et le réchauffement vont exacerber ces risques. Les dégâts se multiplieront aussi, car les populations en croissance construisent des villes et des barrages hydroélectriques à des altitudes croissantes.

Bien que ces tendances générales soient claires, chaque région doit être étudiée en détail afin que l'on puisse fournir à ses habitants des informations pertinentes.

Ainsi, la partie de l'Asie centrale reliant les chaînes orientales du Pamir et du Karakoram à la partie occidentale de la cordillère de Kunlun constitue une anomalie. Les glaciers y sont stables, voire grandissent, ce que l'on ne voit presque nulle part ailleurs sur la planète. Les données recueillies l'année dernière suggèrent que le développement des activités agricoles et de l'irrigation dans le bassin du Tarim tout proche pourrait jouer un rôle. L'eau prélevée dans les nappes phréatiques et les sources pour irriguer les champs s'évapore dans l'atmosphère. L'évapotranspiration des cultures contribue encore à augmenter l'humidité de l'atmosphère. Et cette vapeur d'eau vient se condenser au-dessus des montagnes pour former de la neige. Cela illustre une fois de plus à quel point les activités humaines modifient les écosystèmes.

Les recherches sur le cycle de l'eau à haute altitude font déjà prendre conscience de l'importance de l'eau en montagne pour des milliards de personnes dans le monde. Les autorités devraient commencer à agir dès maintenant pour la sauvegarder.

QUELLES POLITIQUES POUR LES MONTAGNES ?

La première étape consiste à inclure les montagnes dans les discussions plus larges sur la préservation des ressources naturelles de la Terre. Au niveau local, les autorités peuvent créer des parcs nationaux afin de protéger les hautes montagnes du développement. Elles peuvent mettre en place des politiques visant à réduire la pollution et les émissions de suie, afin de diminuer le nombre de particules en suspension dans l'air. Elles peuvent aussi faire construire des réservoirs pour stocker l'eau provenant de la pluie ou de la fonte du manteau neigeux au printemps – à condition d'analyser les effets de telles structures sur l'hydrologie et les écosystèmes.

Un bon exemple nous vient de la vallée du Langtang. Il y a encore deux ans, le village le plus haut de la vallée n'avait pas d'électricité; puis, avec l'aide d'une organisation non gouvernementale, les villageois ont construit une centrale hydroélectrique qui leur fournit aujourd'hui de l'électricité et un accès à internet.

Des pays voisins auraient intérêt à collaborer afin de réduire la demande d'eau et de réguler les prélèvements sur les cours d'eau qui traversent des frontières nationales. Des ministres de huit pays allant de l'Hindou Kouch à l'Himalaya ont montré l'exemple en octobre 2020: réunis lors d'un sommet consacré à la montagne, ils se sont engagés par écrit à s'appuyer sur la science pour améliorer les politiques relatives à la montagne, à écouter les populations très diverses de la région et à parler d'une seule voix dans les négociations internationales. L'approvisionnement en eau de millions de personnes en Afghanistan, au Bangladesh, au Bhoutan, en Chine, en Inde, au Myanmar, au Népal et au Pakistan dépend en effet de l'immense massif montagneux qui s'étend de l'Hindou Kouch à l'Himalaya. Or le régime des précipitations et les rendements agricoles sont déjà en train de se modifier dans ces régions.

Les hauts sommets de la planète se transforment rapidement. Au cours des prochaines décennies, de nombreux habitants des plaines vont devoir s'adapter à des conditions météorologiques plus extrêmes, à des risques naturels plus importants et à des modifications des ressources en eau. Les chercheurs, les ingénieurs et les autorités politiques doivent unir leurs forces et agir dès maintenant pour garantir que les ressources en eau des montagnes soient durables et que les générations futures continuent d'en bénéficier. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Wagnon et al., **Reanalysing the 2007-19 glaciological mass-balance series of Mera Glacier, Nepal, Central Himalaya, using geodetic mass balance**, *Journal of Glaciology*, vol. 67, pp. 117-125, 2021.

W. W. Immerzeel et al., **Importance and vulnerability of the world's water towers**, *Nature*, vol. 577, pp. 364-369, 2020.

R. Alley, **Le géant Thwaites va-t-il fondre ?**, *Pour la Science*, n° 502, pp. 54-61, juillet 2019.

F. Brun et al., **A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016**, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 668-673, 2017.

P. Crouzet, **L'eau comptabilisée à l'échelle européenne**, *Pour la Science*, n° 420, pp. 17-18, septembre 2012.