



> étudié les principaux châteaux d'eau naturels de la planète, la situation pourrait changer.

Les montagnes fonctionnent comme des châteaux d'eau parce qu'il pleut et neige davantage en altitude que dans les plaines et parce qu'une grande partie de l'eau y est stockée temporairement sous forme solide. Puisque la neige et la glace fondent lentement et de façon régulière, ces dernières constituent une source fiable et prévisible, et amortissent les effets des sécheresses.

LE RÔLE DOMINANT DE LA MOUSSON

L'eau emmagasinée dans les montagnes du Népal est ainsi cruciale pour les populations vivant en contrebas. Elle provient pour l'essentiel de la mousson, qui, entre juin et septembre, fournit 70 à 80% des précipitations annuelles sur l'Himalaya. Combinées avec les modèles météorologiques, les données de nos stations révèlent les interactions de la mousson avec le relief. Même dans un petit bassin versant comme celui du Langtang, une vallée orientée est-ouest, les pluies varient beaucoup d'un endroit à l'autre. Une grande partie de l'air chaud et humide qui entre dans la vallée donne des pluies entre le début de la vallée, à environ 1350 mètres d'altitude, et le village de Lama Hotel, à 2480 mètres. Nous avons mesuré à cet

endroit de l'ordre de 2500 millimètres de précipitations annuelles, ce qui fait de Lama Hotel le lieu plus humide de la vallée. Kyanjin, à 3900 mètres d'altitude et seulement 15 kilomètres plus à l'est, ne reçoit que 800 millimètres d'eau chaque année: bien que tout proche, il est trois fois moins arrosé.

La position et la forme des montagnes créent d'autres effets locaux. Si l'on monte de Kyanjin au glacier Yala situé à 5300 mètres, les précipitations augmentent de nouveau, de 40% en moyenne. L'ensemble des divers processus locaux ou à l'échelle de la vallée façonnent la répartition des pluies et de la neige dans la région. Ainsi, le débit de la rivière observé au cours du temps en aval de la vallée est par exemple très différent s'il pleut surtout à basse altitude ou s'il neige surtout en hauteur.

Pour comprendre la dynamique des châteaux d'eau naturels, nous avons particulièrement étudié la dynamique du manteau neigeux proche du glacier Yala. La quantité d'eau présente dans ce manteau – ce que l'on nomme l'«équivalent en eau de la neige» – dépend des chutes de neige, puis de comment cette neige se répartit sous l'effet du vent, fond, regèle et se sublime. Les instruments de mesure installés dans notre camp de base à 5300 mètres d'altitude permettent d'estimer et quantifier la plupart de ces processus. Les conditions peuvent y être très rudes: le



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