



Mieux appréhender la neige par le croisement de données qualitatives et quantitatives dans la région de l'Everest (Népal)

Ornella Puschiasis, Marie Savéan, Pierre Chevallier, Joëlle Smadja, Olivia Aubriot, François Delclaux

► To cite this version:

Ornella Puschiasis, Marie Savéan, Pierre Chevallier, Joëlle Smadja, Olivia Aubriot, et al.. Mieux appréhender la neige par le croisement de données qualitatives et quantitatives dans la région de l'Everest (Népal). *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 2022, 110 (4), <10.4000/rga.9794>. <hal-03491721v2>

HAL Id: hal-03491721

<https://hal.science/hal-03491721v2>

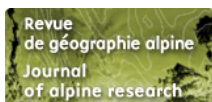
Submitted on 9 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



Mieux appréhender la neige par le croisement de données qualitatives et quantitatives dans la région de l'Everest (Népal)

**Ornella Puschiasis, Marie Savéan, Pierre Chevallier, Joëlle Smadja, Olivia
Aubriot et François Delclaux**



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/9794>

DOI : [10.4000/rga.9794](https://doi.org/10.4000/rga.9794)

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

Improving Knowledge about Snow by Crossing Qualitative and Quantitative Data from the Everest
Region (Nepal) - URL : <https://journals.openedition.org/rga/9826> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Ornella Puschiasis, Marie Savéan, Pierre Chevallier, Joëlle Smadja, Olivia Aubriot et François Delclaux,
« Mieux appréhender la neige par le croisement de données qualitatives et quantitatives dans la région
de l'Everest (Népal) », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 4 | 2022, mis en
ligne le 21 janvier 2022, consulté le 08 février 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/9794> ;
DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.9794>

Ce document a été généré automatiquement le 8 février 2022.



La Revue de Géographie Alpine est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons
Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Mieux appréhender la neige par le croisement de données qualitatives et quantitatives dans la région de l'Everest (Népal)

Ornella Puschiasis, Marie Savéan, Pierre Chevallier, Joëlle Smadja, Olivia Aubriot et François Delclaux

NOTE DE L'AUTEUR

Nous tenons à remercier tout particulièrement les membres de l'équipe PAPRIKA (ANR-09-CEP-005-05/PAPRIKA) qui ont permis ces interactions disciplinaires et suscité la rencontre et les échanges entre la géographie et l'hydrologie, puis ceux du projet PRESHINE (ANR 13- SENV-0005-01 et ANR-13-SENV-0005-02) durant lequel ils ont perduré. De même, un immense merci aux Népalais qui nous ont accompagnés sur les missions de terrain tout au long du programme, notamment au chercheur hydrologue Devesh Koirala ainsi qu'à nos assistants de terrain Harka Bahadur Majhi et Dawa Nuru Sherpa. Enfin, une pensée particulière pour tous les villageois de Pangboche qui nous ont chaleureusement ouvert leurs portes et qui ont partagé leur ressenti malgré les réticences du début.

Introduction

- 1 Durée de l'enneigement, épaisseur, extension ou densité du couvert neigeux, chutes de neige : les paramètres caractérisant le vocable « neige » sont nombreux, mais « la neige » en général est l'une des variables climatiques les plus mal connues et les plus difficiles à intégrer dans les modèles. Cela se vérifie en Himalaya, où les précipitations sont difficiles à appréhender tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. De ce fait, les processus climatiques et hydrologiques à l'origine des ressources en eau ne sont

qu'imparfaitement compris, ce qui limite l'estimation fiable de la contribution des précipitations liquides, de la fonte nivale, de la fonte glaciaire et des eaux souterraines aux débits des rivières (Pellicciotti *et al.*, 2012). En conséquence, si la hausse des températures (Pörtner *et al.*, 2019 ; Wester *et al.*, 2019) et la fonte des glaciers (Brun *et al.*, 2017 ; Shea *et al.*, 2015) y sont l'expression avérée de changements climatiques, des marges d'erreur sur l'estimation de cette fonte ou sur le fonctionnement des hydrosystèmes subsistent (Eeckman *et al.*, 2017 ; Savéan *et al.*, 2015)¹. Ainsi, les connaissances qui permettent de comprendre les conséquences de l'évolution du climat sur les ressources en eau restent encore pour une large part à approfondir (Bharati *et al.*, 2014 ; Immerzeel *et al.*, 2010). Ce constat nous a poussés à croiser résultats qualitatifs et quantitatifs issus de recherches en géographie et en hydrologie pour analyser l'évolution des précipitations neigeuses dans le haut Khumbu, au pied de l'Everest au Népal.

- 2 L'objectif est ici de présenter cette démarche. Nous avons posé comme hypothèses que (i) les savoirs des populations de cette région peuvent permettre de combler des manques dans les jeux de données hydroclimatiques, et que (ii) l'analyse des modèles hydrologiques et climatiques fondés sur des données quantitatives est éclairante pour affiner l'interprétation des données qualitatives.
- 3 Après avoir décrit la méthode employée pour croiser les données, nous analyserons la manière d'intégrer les informations venant de diverses mesures et calculs avec celles issues des connaissances collectées auprès des habitants. L'accent est mis sur la neige sous ses deux aspects : la précipitation (neige qui tombe) et le couvert neigeux (neige au sol).

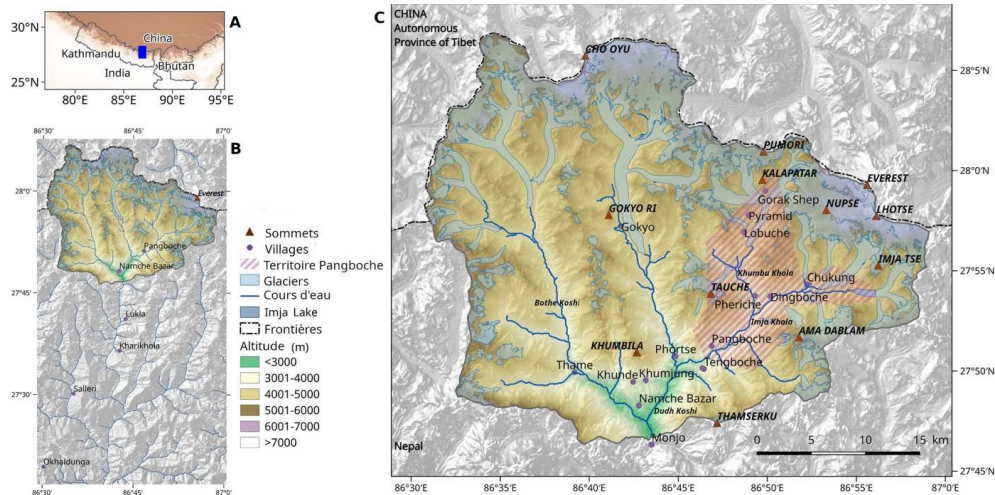
Cadre méthodologique

L'insertion fondatrice dans un projet pluridisciplinaire, au pied de l'Everest

- 4 Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet pluridisciplinaire PAPRIKA (*Cryospheric Responses to Anthropogenic Pressure in the Hindu Kush-Himalaya Regions*, 2010-2013) qui portait sur la disponibilité des ressources hydriques dans le contexte du changement climatique en Himalaya népalais (Aubriot *et al.*, 2012). Outre des échanges fréquents entre membres du projet, des missions collectives de terrain ont particulièrement favorisé les interactions disciplinaires. Lors de leur doctorat, l'hydrologue M. Savéan a partagé deux semaines de terrain avec les géographes en 2013, et la géographe O. Puschiasis a réalisé plusieurs missions avec les hydrologues en 2010, 2011 et 2015, ce qui s'est révélé fondateur pour l'émergence de nouvelles questions interdisciplinaires. Le croisement des points de vue est ainsi devenu « générateur de convergences scientifiques » (Riaux et Massuel, 2014).
- 5 Notre terrain se trouve dans le haut Khumbu, partie amont de la vallée de la Dudh Koshi (qui draine la face sud du massif de l'Everest) à l'est du Népal (fig. 1). Insérée dans le Parc national de Sagarmatha, cette région de l'Everest, très touristique, est bien documentée en sciences physiques comme en sciences sociales (Puschiasis, 2015). Elle bénéficie de la présence du laboratoire de recherche de l'Académie des sciences et des techniques du Népal de la « Pyramid » (fig. 1) qui accueille une station météorologique et atmosphérique depuis les années 1990. Notre étude se concentre plus précisément

sur le village de Pangboche (3940 et 4100 m) — dernier lieu de résidence permanente du haut Khumbu — et sur son territoire (fig. 2). Ce dernier s'organise sur environ 150 km² autour de plusieurs lieux d'activités agropastorales. Outre Pangboche, il englobe tous les hameaux jusqu'à Gorak Shep (5300 m) et Chukung (4730 m). En 2012, on dénombrait 70 familles, soit 280 habitants, vivant au moins six mois de l'année sur le territoire et appartenant majoritairement au groupe ethnolinguistique sherpa.

Figure 1



Localisation de l'étude. A. Situation générale. B. La région du Solukhumbu avec les sites des observations. C. Extension du site d'étude et « territoire de Pangboche ».

Figure 2



Village de Pangboche en hiver et au printemps depuis le versant opposé — à gauche, février 2011 — à droite, mai 2010.

Photographies : O. Puschiasis

Des données météorologiques hétérogènes et lacunaires, particulièrement celles de la neige

- 6 En Himalaya où, comme partout en montagne, la variabilité des températures et des précipitations est forte en raison de la grande hétérogénéité des milieux (différences altitudinales, exposition des versants, orientation et encaissement des vallées), le phénomène est amplifié par la taille de la chaîne (2700 km d'ouest en est), son très fort

gradient altitudinal, sa latitude subtropicale, et par ses effets de façades (sud de la chaîne arrosé alors que le nord est plus aride, car en position d'abri relatif). S'y ajoute la combinaison du flux de la mousson asiatique qui apporte 80 % des précipitations annuelles dans l'Himalaya Central entre juin et septembre (Bookhagen et Burbank, 2010) et des flux d'ouest qui peuvent apporter de l'humidité et des précipitations en hiver (*Ibid.*). La complexité du milieu nécessiterait un nombre important de stations météorologiques et d'observations pour en appréhender le climat et son évolution. Or les difficultés d'accès limitent la densité et la maintenance à long terme de telles stations. Les enregistrements à des pas de temps journalier et infrajournalier, principalement de précipitation et de température, présentent aussi des incertitudes liées en particulier au site ou au dispositif de mesure (Eeckman *et al.*, 2017 ; Savéan *et al.*, 2015). La mesure de la neige qui dépend de l'appareillage en pâtit particulièrement. Quant aux images satellitaires utilisées pour évaluer l'extension de la couverture neigeuse, elles sont souvent « biaisées » par la résolution spatiale et temporelle des capteurs ou par la présence de nuages. C'est pourquoi les connaissances sur la cryosphère (eau solide sous forme de glace ou de neige) sont encore restreintes (Bolch *et al.*, 2012 ; Bouchard *et al.*, 2019 ; Gurung *et al.*, 2011). Tous ces facteurs compliquent l'élaboration et l'interprétation des modèles climatiques en Himalaya (Nepal *et al.*, 2017 ; Savéan *et al.*, 2015).

Des données sur les perceptions du climat collectées par entretiens

- 7 Les données dites « qualitatives », portant sur la façon dont les habitants perçoivent les variations météorologiques ou climatiques, ont été recueillies à partir d'observations et d'enquêtes de terrain auprès de résidents permanents et non permanents. Au total près de 200 entretiens ont été menés en 2010 et 2011 dont 88 plus spécifiquement au niveau du village et sur le territoire de Pangboche. La majorité des personnes interrogées étaient pluriactives : pour la plupart des agriculteurs et des acteurs du tourisme âgés de 35 à 49 ans, et un quart avait plus de 50 ans (voir Puschiasis, 2019). L'échantillon comportait autant de femmes que d'hommes. Pour la présente comparaison, seules ont été retenues les données concernant la neige, la température et les événements particuliers tels que les avalanches. Elles sont complétées par l'étude des calendriers des pratiques agropastorales et par l'identification de marqueurs temporels comme les rituels religieux issus des entretiens et des observations réalisées *in situ*. Ces entretiens enregistrés, traduits puis retranscrits, ont le plus souvent été réalisés en langue népalie ou sherpa avec l'aide d'un assistant.
- 8 L'acquisition de ce type de données nécessite une présence longue sur le terrain pour multiplier les observations et faciliter les interactions avec les villageois (Olivier de Sardan, 2008). Malgré la richesse du matériel collecté, cette méthode présente plusieurs limites : à celles de la traduction, il faut ajouter la disparité des données en fonction du lieu et de la saison (Aubriot, 2014) ainsi que les incertitudes portant sur les temporalités puisque les personnes interrogées idéalisent fréquemment le passé et utilisent un pas de temps flou (de la Soudière, 1999). De plus, le traitement des données qualitatives peut susciter des difficultés d'interprétation tant les perceptions recueillies lors des enquêtes concernent des sujets larges et profus. Il consiste en différents tris qui introduisent un biais. L'interprétation des perceptions est en effet aussi subjective que les perceptions elles-mêmes (Meze-Hausken, 2004). Toutes ces limites justifient

l'intérêt de s'appuyer sur des données quantitatives pour préciser les informations recueillies par entretiens.

Données en hydrologie : mesurées, spatialisées ou simulées

- 9 En hydrologie, les données quantitatives préparées pour la comparaison diffèrent selon leur mode d'acquisition qui relève de trois catégories :
 1. données observées à un nombre réduit de stations de terrain ;
 2. données spatialisées issues de grilles spatiales régulières fournies par des bases de données internationales ;
 3. données simulées qui sont les résultats du modèle HDSM (*Hydrological Distributed Snow Model*) (Savéan *et al.*, 2015).
- 10 Les données observées de précipitations analysées dans cet article sont issues de la station locale (fig.1) de Pyramid (5035 m ; 2000-2016) et de la station plus éloignée d'Okhaldunga (1720 m) à une cinquantaine de kilomètres au sud-ouest de la zone d'étude (fig. 1B) qui offre une série temporelle plus longue (1977-2012)². Elles sont complétées par des données de grilles issues du modèle APHRODITE (Yatagai *et al.*, 2012). Chaque élément de grille représente une surface d'environ 4 km². La procédure de partition entre précipitations neigeuses et pluvieuses est détaillée par Savéan *et al.* (2015) et par Eeckman *et al.* (2017).
- 11 L'analyse de la couverture neigeuse a été réalisée de 1977 à 2007 à l'aide du modèle HDSM. Elle est complétée de 2000 à 2012 par le produit MOD10A1 (Hall *et al.*, 2002), issu du capteur satellitaire MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) à un pas de temps journalier et une résolution de 15 arcs-secs. Toutes les données d'enneigement sont sujettes à des incertitudes significatives, qu'il s'agisse de leur quantité ou de leur extension (Bouchard *et al.*, 2019).

Croisement des données qualitatives et quantitatives

- 12 L'analyse croisée des données cherche à dépasser les cloisonnements disciplinaires et à trouver un vocabulaire commun afin de conforter les connaissances, de combler les lacunes et de limiter les incertitudes.

Données communes et données manquantes

- 13 Si l'intérêt de recueillir les savoirs des populations pour décrypter ce qu'elles perçoivent, comprennent et expérimentent de la climatologie locale n'est plus à démontrer (Smadja *et al.*, 2015), la démarche de croisement entre ces savoirs et ceux issus des sciences du climat reste peu fréquente. Les travaux recensés concernent souvent des zones rurales, principalement sur le continent africain (Dahlberg et Blaikie, 1999 ; Meze-Hausken, 2004 ; Peyrusaubes, 2010 ; Ulrich *et al.*, 2013) et sud asiatique (Manandhar *et al.*, 2010 ; Thapa *et al.*, 2015 ; Vedwan et Rhoades, 2001), ou plus récemment l'Europe (Furberg *et al.*, 2018 ; Metzger, 2015). Dans la plupart de ces articles, la méthode de comparaison s'attache uniquement à vérifier si les perceptions concordent avec les données quantitatives qui restent la référence. Manandhar *et al.*

(2010) étoffent en outre leur analyse par l'usage du test statistique du χ^2 qui évalue la dépendance entre deux variables.

- 14 Le tableau 1 met en avant les données disponibles par type de variable relative à la neige, mais fait aussi apparaître les données non disponibles (cases blanches). Il est important de préciser que les données qualitatives concernent le village et l'ensemble du territoire, apportant des informations qui remontent jusqu'aux années 1950. Les données quantitatives spatialisées et simulées concernent le territoire de Pangboche.

Tableau 1

Critères	Données qualitatives	Données quantitatives		
		mesurées	spatialisées	simulées
Précipitations neigeuses	Entretiens (1950-2011)	Pyramid (2000-2012)	APHRODITE (1977-2007)	HDSM (1977-2007)
Durée d'enneigement	Entretiens (1950-2011)		MOD10A1 (2000-2012)	HDSM (1977-2007)
Surface du couvert neigeux	Entretiens (1950-2011)		MOD10A1 (2000-2012)	HDSM (1977-2007)
Hauteur du couvert neigeux	Entretiens (1950-2011)			
Équivalent en eau du stock de neige				HDSM (1977-2007)

Sources : Données sur la neige collectées par entretiens, modélisation ou mesures in situ.

- 15 Cinq critères ont été retenus pour caractériser la neige : les précipitations (la neige qui tombe), le couvert neigeux (superficie de celle qui tient au sol), la hauteur de la couverture neigeuse, la durée d'enneigement (nombre de jours avec de la neige au sol) et l'équivalent en eau du stock de neige qui dépend de sa densité. Cette distinction ne ressort pas expressément dans les dialogues avec les habitants de Pangboche qui parlent de la neige dans sa globalité sans différencier chute de neige et couvert neigeux. Il a fallu extraire des entretiens les parties correspondant aux cinq critères retenus, sachant que les villageois ne font jamais référence à la densité et donc à l'équivalent en eau du stock de neige. Quant à la hauteur de neige, même si elle est mentionnée par les habitants, on ne dispose de données simulées qu'à partir de 2000. Seules les informations collectées sur les précipitations neigeuses, sur l'extension du couvert neigeux et sur la durée d'enneigement permettent de croiser les données qualitatives et quantitatives de 1977 à 2012.

Des clés de lecture communes

- 16 Nous n'avons retenu dans les deux jeux de données que les informations « utiles » à la comparaison. Pour les données quantitatives, le tri est effectué en fonction des

variables, de leur durée, de leur localisation et de l'objectif de la comparaison. Pour les données qualitatives, l'éclectisme des différentes perceptions constituant en lui-même un résultat (Byg et Salick, 2009), le tri a été particulièrement difficile.

- 17 Afin d'harmoniser les repères temporels retenus par les hydrologues et les géographes, trois clés de lecture communes ont été définies :
 - la saisonnalité, fournie par les moyennes mensuelles des données quantitatives et par les perceptions que la population a des variations saisonnières de la neige ;
 - les tendances, collectées auprès de la population et obtenues statistiquement sur les séries temporelles quantitatives ;
 - les événements notables, évalués statistiquement sur les données quantitatives et retenus par la population quand ils sont perçus comme tels. Il s'agit, entre autres, des années particulièrement neigeuses.
- 18 Ces clés de lecture sont obtenues par des méthodes de calcul appliquées aux données quantitatives et après un traitement manuel des données qualitatives. Cet extrait d'entretien illustre la façon dont les villageois parlent de la neige et nous permet d'expliquer comment le traitement est effectué :

Normalement il y a beaucoup de neige durant l'hiver à Pangboche. Mais depuis l'avalanche de Panga, il ne tombe plus que quelques centimètres seulement, la neige ne tient plus, et elle vient plus tard, surtout après *Losar*. Je me souviens quand j'étais jeune il pouvait y avoir plus de 1 à 1,5 m de neige au sol et ce, trois à quatre fois durant la saison. (homme de 63 ans, avril 2011, Pangboche.)
- 19 Ce villageois, lorsqu'il parle des variations de neige qu'il observe, se réfère de façon assez synthétique à des éléments qui correspondent aux trois clés de lecture de notre analyse : il évoque à la fois un événement (avalanche de Panga de 1995, près de Gokyo ; fig. 1C) ; il donne une tendance (« il ne tombe plus que quelques centimètres ») ; il parle de saisonnalité (« après *Losar* », le Nouvel An tibétain). Toutes les enquêtes portant sur la neige ont été traitées de façon à faire ressortir les éléments se rapportant à ces trois clés de lecture, et les aspects récurrents sur l'évolution de la neige mentionnés par les habitants de Pangboche. Cela permet de les comparer avec les données quantitatives et de valider ou non leur concordance.
- 20 Dans cette étude nous ne nous contentons pas de faire des allers et retours entre les deux types de données (qualitatives et quantitatives) à l'aide de clés de lecture communes. La réalisation de tests de tendance temporelle de Mann-Kendall (Kendall, 1975) sur les données quantitatives dont le résultat est comparé aux données qualitatives, vient appuyer le croisement et a été systématiquement appliqué pour confirmer la dépendance, ou non, entre elles.

La neige : facilement identifiable par les habitants mais difficilement mesurable par les appareils

« Il n'y a plus de neige en hiver » : un propos à nuancer

- 21 La tendance la plus significative pour les habitants de Pangboche est la diminution de la présence de la neige en hiver (Puschiasis, 2019). Autrefois, elle couvrait de blanc les sommets environnants (Ama Dablam 6812 m et Tauche 6110 m). Aujourd'hui, ces sommets, domaine de divinités tutélaires, deviennent plus noirs. « Il n'y a plus de neige en hiver » est la remarque la plus fréquente que font les villageois à l'évocation des

tendances observées sur la neige. Mais comment interpréter cette phrase ? Ne neige-t-il plus ? Neige-t-il moins ? Ou la neige ne tient-elle plus au sol, laissant l'impression qu'il « n'y a plus de neige » ?

- 22 Il est en effet fréquent d'entendre que la neige « ne tient pas » (homme de 75 ans), « ne reste pas au sol » (femme de 56 ans), « ne laisse pas de trace quand on marche » (homme de 42 ans). Les personnes d'une trentaine d'années évoquent plutôt l'abandon de la pratique du ski (fig. 3), une version très artisanale de ce sport, mais qui était leur jeu favori quand ils étaient enfants. Cette information peut servir de marqueur pour noter une raréfaction de la neige depuis la fin des années 1990, aussi bien en termes de quantité que d'étendue. À ce titre, l'année 2011 a été perçue par les habitants comme une année remarquable parce qu'il y eut beaucoup de neige. Après de fortes chutes de neige en octobre, l'hiver fut assez sec jusqu'au mois de février, au cours duquel la neige est tombée en abondance et a même tenu trois semaines dans le village de Pangboche permettant ainsi le retour de pratiques de jeux d'hiver.

Figure 3



Jeux d'hiver à Pangboche en février 2011. À gauche, un jeune s'élance sur les pentes de Pangboche sur des skis que son père, guide, a reçus en cadeau à la suite d'une expédition. Au milieu, image de skis artisanaux fabriqués à l'aide de tuyaux en PVC coupés en deux dans le sens de la longueur et attachés aux souliers à l'aide de cordelettes. À droite, des enfants du village s'adonnent au plaisir de la luge artisanale.

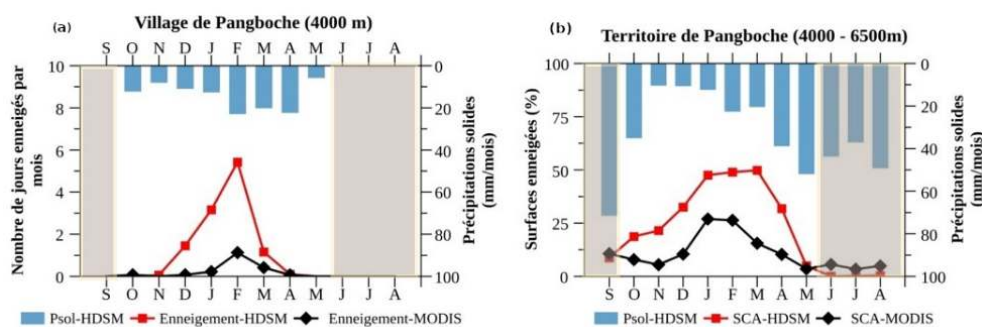
Photographies : O. Puschiasis

- 23 Ces propos mentionnant un moindre couvert neigeux sont à mettre en parallèle avec l'énonciation de durées d'enneigement plus courtes. En effet, certaines personnes indiquent que les années où le sol du village était couvert de neige pendant cinq mois d'affilée (de mi-octobre à mi-mars) contraignant le déplacement des hommes et des animaux, sont désormais exceptionnelles, voire inexistantes, alors qu'elles étaient la norme auparavant. C'est bien l'empêchement d'une activité qui marque la mémoire des villageois, comme l'ont aussi montré Vedwan et Rhoades (2001) à propos de l'influence du climat sur les activités économiques et culturelles.
- 24 Par ailleurs, l'hiver était encadré par deux rituels religieux pour les villageois. Les chutes de neige débutaient lors du *Mani Rimdu* (grand rituel bouddhiste) entre fin-octobre et mi-novembre, et diminuaient à partir de *Losar*, entre mi-janvier et mi-février. Ces repères ne semblent plus pertinents aujourd'hui car les chutes de neige seraient moins nombreuses entre ces deux fêtes (Puschiasis, 2019). En revanche, les habitants notent des épisodes tardifs de neige de plus en plus fréquents aux mois de mars-avril. Ils les interprètent comme un décalage de la saison hivernale : le

changement de saison ne coïncide plus avec les marqueurs temporels qu'étaient les festivités.

- 25 La volonté de comparer des données de type différent selon trois clés de lecture ayant été postérieure à leur collecte, nos enquêtes manquent de précision sur la durée d'enneigement et les chutes de neige. Les données quantitatives permettent alors d'affiner l'interprétation. Pour celles-ci le village de Pangboche correspond à un point, qu'il s'agisse du pixel satellitaire ou de la cellule de calcul du modèle. Des précipitations solides sont observées entre octobre et mars, mais les durées d'enneigement sont courtes, inférieures à 10 jours d'octobre à avril, qu'elles soient simulées par HDSM ou extraites des données satellitaires MODIS (fig. 4a). Les données qualitatives confirment ces informations car pour les habitants le nombre de jours enneigés au village « se compte sur les doigts des mains », à l'exception de l'année 2011.

Figure 4



Moyenne mensuelle des précipitations solides et comparaison des durées moyennes mensuelles d'enneigement proposées par HDSM et par MODIS : a) au village de Pangboche ; b) sur le territoire de Pangboche. Psol = précipitations solides ; SCA = % de la surface du territoire couverte de neige. Les périodes correspondant à la mousson sont grisées.

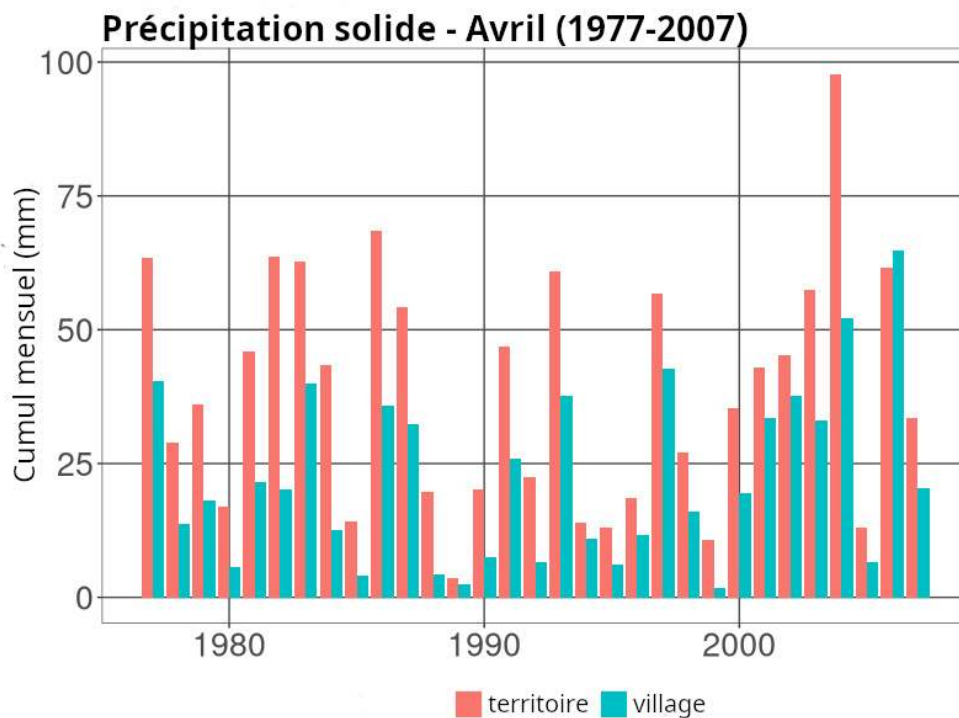
Sources : Simulations HDSM 1977-2007 pour les données avec le suffixe HDSM et produit de grille spatialisée MOD10A1 2000-2012 pour les données avec le suffixe MODIS.

- 26 Compte tenu de son étendue, le territoire de Pangboche présente de multiples configurations. La fig. 4b représente, par similitude avec celle du village (fig. 4a), les mêmes grandeurs moyennées sur cet espace. Il n'est cependant pas surprenant d'y noter d'assez grandes différences puisque les altitudes considérées sont largement supérieures à celle du village et que la dynamique climatique est plus complexe. À propos du territoire, les villageois parlent de la présence de neige durant 1 à 5 mois en se référant aux sommets environnants qui, même s'ils sont moins blancs, reçoivent toujours des chutes de neige visibles. Toutefois, ils n'évoquent pas celles qui surviennent pendant la mousson et qui apparaissent pourtant dans les données quantitatives (fig. 4b). Cela ne signifie pas qu'ils ne les voient pas, mais ils parlent plus facilement de la neige qui reste au sol pendant plusieurs jours d'affilés, et dont la quantité est suffisante pour être remarquable et avoir des répercussions sur les activités, que des chutes de neige de mousson qui se déposent principalement sur les sommets et les glaciers pendant la nuit mais fondent rapidement à l'altitude du village et des champs. D'où l'intérêt de croiser les données qualitatives et quantitatives. Par ailleurs, les différences remarquées entre les surfaces enneigées simulées par HDSM et celles observées par MODIS (fig. 4b) sont probablement dues au fait que les moyennes

mensuelles sont calculées sur deux périodes différentes (1977-2007 et 2000-2012) et ne portent pas sur la même résolution spatiale.

- 27 De plus, mis à part le cas de gros épisodes neigeux, il faut relativiser l'importance des données quantitatives portant sur le village et mettre en avant celles sur le territoire. En effet, l'incertitude pesant sur les données quantitatives est plus grande sur un point, celui du pixel de modélisation où se trouve le village, que sur l'ensemble du territoire qui comporte un nombre significatif de pixels sur lesquels elle peut se répartir. En outre, le village est quasiment le point le plus bas du territoire étudié avec des températures plus élevées qu'en haute altitude et il est exposé au sud : il est donc moins enneigé. C'est pourquoi les habitants du village constatent que « la neige ne tient pas » à Pangboche (fig. 4).
- 28 Selon les résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux sorties du modèle HDSM (entre 1977 et 2007, cf. section 2.4), la hauteur de neige et la durée d'enneigement moyennes annuelles ne suivent aucune tendance notable temporelle ni au village ni sur le territoire. Les villageois ne mentionnent pas la hauteur de neige, on ne peut donc comparer ces résultats avec les données quantitatives. En ce qui concerne la durée d'enneigement, on observe un manque de concordance entre les données qualitatives et quantitatives qui invite à se demander si, outre l'incertitude inhérente aux données quantitatives, le ressenti des populations portant sur les années les plus récentes (après 2007) ne serait pas biaisé par la variabilité inter et intra-annuelle des chutes de neige, du moins au niveau du territoire de Pangboche. Dans ces deux situations, la comparaison entre les deux types de données ne permet ici de tirer aucune conclusion.
- 29 Concernant les chutes de neige, selon les habitants, elles interviendraient plus tard dans la saison, tendance, quant à elle, grossièrement confirmée sur les cumuls mensuels d'avril en particulier entre 2000 et 2004, malgré une grande variabilité d'une année à l'autre (fig. 5).

Figure 5



Chronique des cumuls de précipitations neigeuses au village et sur le territoire de Pangboche pour le mois d'avril entre 1977 et 2007.

Source : modélisation HDSM 1977-2007.

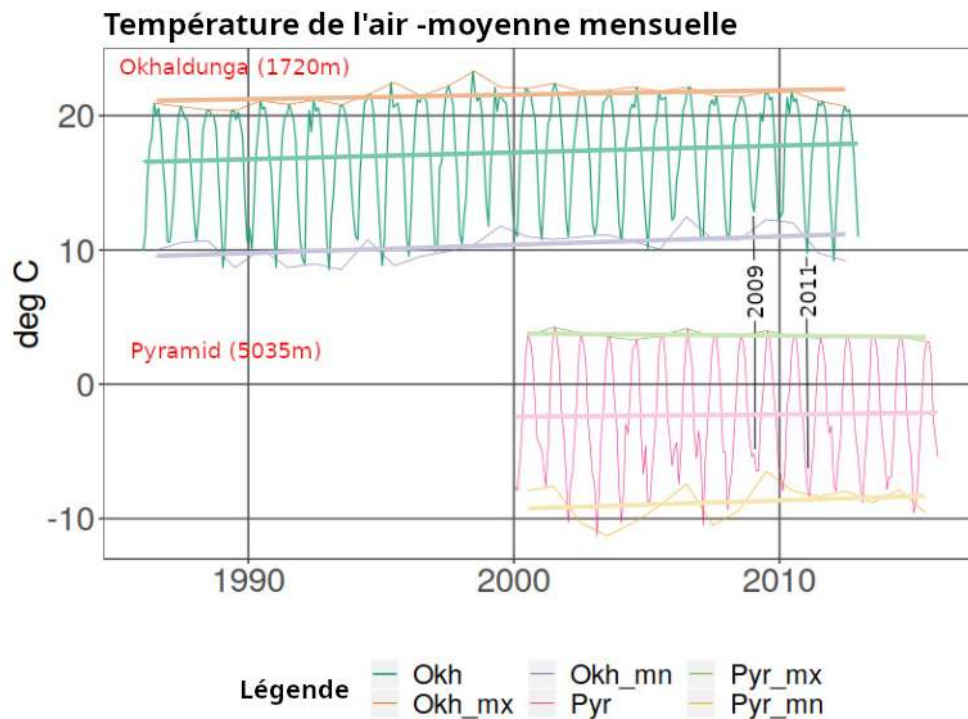
- 30 La comparaison entre données quantitatives et qualitatives met aussi en avant des limites d'interprétation des données satellitaires, en particulier parce que les chutes de neige nocturnes de faible quantité ont souvent fondu à l'heure de passage du capteur satellitaire MODIS vers 10h30 du matin. L'accès à des données issues d'entretiens et à des observations de terrain permet de savoir si sur les images l'absence de neige relève d'une absence de chute de neige ou d'une chute de neige nocturne de faible épaisseur (ce qui est le cas le plus fréquent) qui a fondu rapidement avant le passage du satellite.

Une augmentation des températures ressenties et mesurées

- 31 Une évolution des températures — qui influe sur les précipitations neigeuses et leur accumulation — est ressentie par les populations qui mentionnent : des températures minimales plus élevées que dans le passé ; une raréfaction des hivers « rudes » synonymes de froid intense et de fortes chutes de neige ; et des hivers plus « doux » qu'ils associent à la diminution de la présence de neige et à un dégel des torrents plus précoce (Puschiasis, 2019).
- 32 Sur la fig. 6, les enregistrements de température à Okhaldunga et à Pyramid (fig. 1) présentent une tendance à l'augmentation significative, confirmée par le test de Mann-Kendall : $0.041^{\circ}\text{C}/\text{an}$ à Okhaldunga et $0.052^{\circ}\text{C}/\text{an}$ à Pyramid. Ces valeurs sont élevées par rapport à celles généralement données dans la littérature : de 0.01 à $0.03^{\circ}\text{C}/\text{an}$ moyenne sur les 25 dernières années en Himalaya (Stocker, T.F. *et al.*, 2013). Si le réchauffement est indéniable, il faut néanmoins rester prudent sur une généralisation de telles valeurs. Elles sont établies sur des durées relativement courtes (26 ans et

15 ans respectivement) et pour des stations locales qui peuvent être soumises à des effets de site (exposition, encaissement, environnement villageois, etc.).

Figure 6



Légende : Okh = Okhaldunga, Pyr = Pyramid, mn = minimum, mx = maximum.

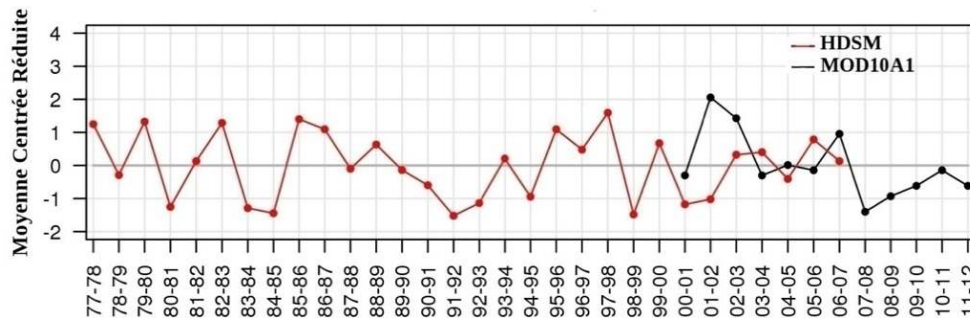
Sources : Enveloppes maximales et minimales des températures moyennes mensuelles enregistrées à Ok-haldunga (1700 m : 1986-2012) et à Pyramid (5035 m : 2001-2015) avec leurs tendances respectives.

Des événements extrêmes marquants

- 33 Un événement, l'avalanche du 11 novembre 1995, est régulièrement évoqué dans les entretiens (Puschiasis, 2019). Consécutive à plus de 3 mètres d'accumulation de neige à Panga près de Gokyo (fig. 1C), elle a endommagé de nombreuses maisons et emporté ponts, champs et animaux. Un habitant d'une soixantaine d'années de Dingboche se souvient : « à l'automne 1995, pendant la fête de *Mani Rimdu*, il y a eu une grosse avalanche. Depuis, il neige moins ». La plupart des personnes interrogées confirment ce témoignage. Novembre 2006 marque toutefois une exception, une avalanche ayant tué des villageois de Pangboche en pleine ascension de l'Ama Dablam, face au village. Cet événement tragique sert également de marqueur temporel, mais il reste moins évoqué que celui de Panga.
- 34 Dans les données quantitatives, nous avons cherché des indicateurs d'années extrêmes à importante quantité de neige et tenté de voir si, comme dans les données qualitatives, la surface du couvert neigeux est moins importante depuis 1995. La fig. 7 indique que l'année 1995-1996 a été particulièrement enneigée, ce qui est compatible avec l'avalanche de Panga mentionnée par les villageois. On note aussi que selon HDSM, après la séquence abondante de 1994-1995, l'extension de la couverture neigeuse est toujours restée en deçà de celle de cette période, ce qui explique que l'avalanche serve

de référence aux habitants. Les fortes chutes de neige de 2006 qui ont déclenché l'avalanche meurtrière ayant marqué les esprits coïncident aussi avec des surfaces enneigées importantes par rapport aux années qui suivent selon les données MOD10A1. Toutefois, l'analyse des courbes (HDSM, 1977-2007) ne permet guère de dégager une tendance générale qui irait dans le sens d'une réduction du couvert neigeux sur le territoire de Pangboche.

Figure 7



Moyenne annuelle centrée réduite de l'extension du couvert neigeux du territoire de Pangboche.

Sources : modélisation HDSM 1977-2007 et produit MOD10A1 2000-2012. Les « années » sont comptées d'octobre à septembre.

Discussion

- 35 Cette complémentarité entre les données témoigne de l'utilité de partager les connaissances acquises par des chercheurs de différentes disciplines.
- 36 La méthode de croisement montre toutefois quelques limites. Elle met en évidence un problème d'échelle spatiale (Dahlberg et Blaikie, 1999 ; Mérot *et al.*, 2013) : les données issues des entretiens sont recueillies pour des observations ponctuelles (village, col, sommet, etc.) qui n'est pas l'échelle des données modélisées. Les données quantitatives de précipitations ou de températures sont soumises à des effets de sites (exposition, encaissement, etc.), non pris en compte dans cette étude. La modélisation des précipitations neigeuses ne peut pas approcher de manière très détaillée les processus à l'échelle d'un village ou d'un territoire (Eeckman *et al.*, 2017 ; Savéan *et al.*, 2015). De plus, notre méthode révèle un décalage entre les séries temporelles modélisées sur la période 1977-2007 et les enquêtes réalisées en 2011, mais remontant jusqu'à 1950 pour la collecte d'informations à travers les entretiens.
- 37 Malgré ces lacunes, l'originalité de cet article réside dans le fait qu'il existe peu d'études récentes qui utilisent données quantitatives et données qualitatives sur la neige en montagne, et encore moins en Himalaya. Shrestha *et al.* (2020) comparent les perceptions des populations locales au Mustang (Népal) — qui, au nord de la Haute Chaîne, a un climat continental plus sec —, avec des résultats d'analyse biophysique. Ces auteurs montrent une bonne corrélation entre les tendances du temps ressenti (augmentation de la température) par les gens, la dégradation de la végétation et la baisse de la couverture neigeuse mesurée et perçue. La plupart des autres travaux qui utilisent les deux types de données semblent davantage se concentrer sur la dégradation des terres sur le continent africain, à l'aide de la télédétection et en

s'appuyant sur les connaissances écologiques locales (Herrmann *et al.*, 2020 ; Yiran *et al.*, 2012).

- 38 L'ensemble des études interdisciplinaires recensées s'accordent sur la nécessité de prendre en compte les savoirs des populations comme une source de connaissance précieuse, pour valider ou infirmer les données mesurées ou manquantes. Nous montrons ici que l'apport des données quantitatives se révèle également fructueux pour interpréter les données qualitatives. Bien que les incertitudes soient notables sur les deux types de données, nous avons pu constater l'intérêt de croiser les points de vue.
- 39 Les données quantitatives invitent ainsi à relativiser les données qualitatives. En effet, il peut sembler aux villageois qu'il n'a pas neigé des années entières alors que les données mesurées montrent qu'il n'en est rien. De même, des chutes de neige peuvent paraître abondantes certaines années uniquement parce qu'elles suivent des années peu neigeuses. Il s'avère aussi que le couvert neigeux doit être suffisamment important pour être inscrit dans la mémoire collective. Les données quantitatives permettent en outre d'asseoir le cadre temporel de perceptions que l'on peut parfois avoir du mal à évaluer, à juger.
- 40 Quant aux données qualitatives, elles permettent d'enrichir les données quantitatives grâce à la connaissance précise que les habitants ont de leur espace de vie. Ils évoquent des faits qui peuvent remonter à une cinquantaine d'années, alors que les données quantitatives mesurées et spatialisées sont soit dépendantes des stations où elles sont collectées, soit dépendantes de capteurs satellitaires qui ne sont disponibles que depuis une époque récente.
- 41 Pour de meilleurs résultats, il aurait été intéressant d'intégrer des données qualitatives directement dans la démarche de modélisation, ce qui n'a pas été possible car le travail comparatif qui a conduit à cette idée, a été réalisé une fois la modélisation finalisée ; de même une connaissance préalable des résultats de modélisation climatique aurait permis des enquêtes encore plus approfondies.
- 42 Cette expérience est toutefois un premier pas vers la réalisation d'une démarche interdisciplinaire de géohydrologie (Massuel *et al.*, 2018 ; Wesselink *et al.*, 2017). Si peu d'auteurs s'engagent sur cette voie, cela est principalement dû à l'incapacité actuelle des modèles hydroclimatiques à s'approprier l'information qualitative. Cette faiblesse souligne la sous-représentation des connaissances locales dans les recherches sur le changement climatique (Ford *et al.*, 2016). Les difficultés de mise en place d'approches interdisciplinaires (échelle spatiale, temporelle et mode de traitement) constituent un champ de recherche en lui-même.

Conclusion

- 43 Le croisement de données qualitatives et quantitatives permet de compléter l'interprétation des évolutions climatiques. Dans le haut Khumbu il ressort de cette comparaison (i) une moindre présence de la neige, avec des chutes moins fréquentes et moins conséquentes (sauf lors de quelques épisodes dorénavant considérés comme exceptionnels par les villageois), (ii) une augmentation des températures mesurées et ressenties qui expliquerait cette moindre présence de neige ; et (iii) un décalage du calendrier des précipitations neigeuses qui reste à vérifier quantitativement.

- 44 Cet article met en avant l'importance de saisir les perceptions des populations par rapport à la collecte de données uniquement physiques car les villageois sont les premiers à subir les effets des variations météorologiques et climatiques. Collecter leurs savoirs et les comparer avec les données quantitatives via des approches multi-échelles et pluridisciplinaires est donc essentiel dans le contexte scientifique et sociétal actuel où la compréhension des changements environnementaux futurs est un questionnement majeur dans la région de l'Everest et dans le monde.

BIBLIOGRAPHIE

- Aubriot, O., Smadja J., Arnaud Y., Chevallier P., Delclaux F., Laj P., Neppel L., Puschiasis O., Savéan M., Seidel, J.-L., 2012.- « The impact of climate change on water availability in Eastern Nepal: a presentation of the project methodology taking into account the various origins of water », dans *Hydro Nepal*, special issue (avril 2012), p. 12-17.
- Aubriot, O., 2014.- « Perceptions des changements climatiques en zone pionnière dans la plaine du Térai, Népal », dans C. Bréda, M. Chaplier, J. Hermesse, E. Piccoli, (dir.), *Terres (dés)humanisées : ressources et climat*, Academia-L'Harmattan, Louvain-la-Neuve (Belgique), coll. « Investigations d'anthropologie prospective », n° 10, p. 211-237.
- Bharati, L., Gurung, P., Jayakody, P., Smakhtin, V., Bhattarai, U., 2014.- « The Projected Impact of Climate Change on Water Availability and Development in the Koshi Basin, Nepal », dans *Mt. Res. Dev.*, vol. 34, p.118-130. DOI : <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00096.1>.
- Bolch, T., Kulkarni, A., Kaab, A., Huggel, C., Paul, F., Cogley, J.G., Frey, H., Kargel, J.S., Fujita, K., Scheel, M., Bajracharya, S., Stoffel, M., 2012.- « The State and Fate of Himalayan Glaciers », dans *Science*, vol. 336, p. 310-314. DOI : <https://doi.org/10.1126/science.1215828>.
- Bookhagen, B., Burbank, D.W., 2010. « Toward a complete Himalayan hydrological budget: Spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge », dans *J. Geophys. Res.-Earth Surf.*, vol. 115. DOI : <https://doi.org/10.1029/2009jf001426>.
- Bouchard, B., Eeckman, J., Dedieu, J.-P., Delclaux, F., Chevallier, P., Gascoin, S., Arnaud, Y., 2019.- « On the Interest of Optical Remote Sensing for Seasonal Snowmelt Parameterization, Applied to the Everest Region (Nepal) », dans *Remote Sens.*, vol. 11, p. 2598. DOI : <https://doi.org/10.3390/rs11222598>.
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kääb, A., Treichler, D., 2017.- « A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016 », dans *Nat. Geosci.*, vol. 10, p. 668-673.
- Byg, A., Salick, J., 2009.- « Local perspectives on a global phenomenon: climate change in Eastern Tibetan villages », dans *Glob. Environ. Change*, vol. 19, p. 156-166.
- Dahlberg, A.C., Blaikie, P.M., 1999.- « Changes in Landscape or in Interpretation? Reflections Based on the Environmental and Socio-economic History of a Village in NE Botswana », dans *Environ. Hist.*, vol. 5, p. 127-174. DOI : <https://doi.org/10.2307/20723098>.

- Eeckman, J., Chevallier, P., Boone, A., Neppel, L., De Rouw, A., Delclaux, F., Koirala, D., 2017.- « Providing a non-deterministic representation of spatial variability of precipitation in the Everest region » dans *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 21, p. 4879-4893. DOI : <https://doi.org/10.5194/hess-21-4879-2017>.
- Ford, J., Maillet, M., Pouliot, V., Meredith, T., Cavanaugh, A., 2016.- « Adaptation and Indigenous peoples in the United Nations Framework Convention on Climate Change » dans *Clim. Change*, vol. 139, p. 429-443. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1820-0>.
- Furberg, M., Hondula, D.M., Saha, M.V., Nilsson, M., 2018.- « In the light of change: a mixed method s investigation of climate perceptions and the instrumental record in northern Sweden », dans *Popul. Environ.*, vol. 40, p. 47-71.
- Gurung, D.R., Kulkarni, A.V., Giriraj, A., Aung, K.S., Shrestha, B., 2011.- « Monitoring of seasonal snow cover in Bhutan using remote sensing technique », dans *Curr. Sci. Bangalore*, vol. 101, p. 1364-1370.
- Hall, D.K., Riggs, G.A., Salomonson, V.V., DiGirolamo, N.E., Bayr, K.J., 2002.- « MODIS snow-cover products », dans *Remote Sens. Environ.*, vol. 83, p. 181-194.
- Herrmann, S., Diouf, A.A., Sall, I., 2020.- « Beyond bioproductivity: Engaging local perspectives in land degradation monitoring and assessment », dans *J. Arid Environ.*, vol. 173, p. 104002. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104002>.
- Immerzeel, W. W., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2010.- « Climate Change Will Affect the Asian Water Towers », dans *Science*, vol. 328, p. 1382-1385. DOI : <https://doi.org/10.1126/science.1183188>.
- Kendall, M.G., 1975.- « Rank Correlation Measures », dans *Charles Griffin Book Series*, Londres, R.-U.
- Manandhar, S., Vogt, D.S., Perret, S.R., Kazama, F., 2010. « Adapting cropping systems to climate change in Nepal: a cross-regional study of farmers' perception and practices », dans *Reg. Environ. Change*, vol. 11, p. 335-348. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0137-1>.
- Massuel, S., Riaux, J., Molle, F., Kuper, M., Ogilvie, A., Collard, A.-L., Leduc, C., Barreteau, O., 2018.- « Inspiring a Broader Socio-Hydrological Negotiation Approach With Interdisciplinary Field-Based Experience », dans *Water Resour. Res.*, vol. 54, p. 2510-2522. DOI : <https://doi.org/10.1002/2017WR021691>.
- Mérot, P., Dubreuil, V., Delahaye, D., Desnos, P. (dir.), 2013.- *Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impact, perceptions, Espaces et territoires*, Presses universitaires de Rennes, Rennes.
- Metzger, A., 2015.- « Plus de neiges et de glaces au petit âge glaciaire ? Eléments de réponses quantitatives avec David Fabricius, le pasteur qui aimait la météo », dans A. Metzger, F. Rémy (dir.), *Neiges et Glaces. Faire l'expérience Du Frois (XVII^e-XIX^e siècles)*, Hermann, Paris, p. 141-158.
- Meze-Hausken, E., 2004.- « Contrasting climate variability and meteorological drought with perceived drought and climate change in northern Ethiopia », dans *Clim. Res.*, vol. 27, p. 19-31.
- Nepal, S., Flügel, W.-A., Krause, P., Fink, M., Fischer, C., 2017.- « Assessment of Spatial Transferability of Process-Based Hydrological Model Parameters in Two Neighboring Catchments in the Himalayan Region », dans *Hydrol. Process*, vol. 31, n° 16. DOI : <https://doi.org/10.1002/hyp.11199>.
- Olivier de Sardan, J.-P., 2008.- « La rigueur du qualitatif : les contraintes empiriques de l'interprétation socio-anthropologique », dans *Anthropologie prospective*, Bruylant-Academia, Louvain-la-Neuve.

- Pellicciotti, F., Buergi, C., Immerzeel, W.W., Konz, M., Shrestha, A.B., 2012.- « Challenges and Uncertainties in Hydrological Modeling of Remote Hindu Kush-Karakoram-Himalayan (HKH) Basins: Suggestions for Calibration Strategies », dans *Mt. Res. Dev.*, vol. 32, p. 39-50. DOI : <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-11-00092.1>.
- Peyrusaubes, D., 2010.- « Le film du temps en Imerina (Madagascar) : dialogue entre lecture paysanne et lecture “scientifique” », dans *EchoGéo*, n° 11, p. 55-66. DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.11667>.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N., 2019.- « IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate », dans *IPCC*, Genève, Suisse.
- Puschiasis, O., 2019.- « Un vent de changements souffle sur l’Everest. Multiples facettes de la perception de la météorologie et du climat chez les Sherpa », dans *ethnographiques.org*, n° 38. DOI : <https://doi.org/10.25667/ethnographiques/2019-38/005>.
- Puschiasis, O., 2015.- « Des enjeux planétaires aux perceptions locales du changement climatique : pratiques et discours au fil de l’eau chez les Sherpa de la vallée du Khumbu (Everest, Népal) », thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, Nanterre.
- Riaux, J., Massuel, S., 2014.- « Construire un regard sociohydrologique (2). Le terrain en commun, générateur de convergences scientifiques », dans *Nat. Sci. Sociétés*, vol. 22, p. 329-339. DOI : <https://doi.org/10.1051/nss/2014046>.
- Savéan, M., Delclaux, F., Chevallier, P., Wagnon, P., Gongga-Saholiariliva, N., Sharma, R., Neppel, L., Arnaud, Y., 2015.- « Water budget on the Dudh Koshi River (Nepal): Uncertainties on precipitation », dans *J. Hydrol.*, vol. 531, p. 850-862. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.040>.
- Shea, J.M., Immerzeel, W.W., Wagnon, P., Vincent, C., Bajracharya, S., 2015.- « Modelling glacier change in the Everest region, Nepal Himalaya » dans *The Cryosphere*, vol. 9, p. 1105-1128. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-9-1105-2015>.
- Shrestha, S., Rahimzadeh-Bajgiran, P., de Urioste-Stone, S., 2020.- « Probing recent environmental changes and resident perceptions in Upper Himalaya, Nepal », dans *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.*, vol. 18, p. 100315. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100315>.
- Smadja, J., Aubriot, O., Puschiasis, O., Duplan, T., Grimaldi, J., Hugonnet, M., Buchheit, P., 2015.- « Climate change and water resources in the Himalayas. Field study in four geographic units of the Koshi basin, Nepal | Changement climatique et ressource en eau en Himalaya. Enquêtes auprès de villageois dans quatre unités géographiques du bassin de la Koshi, Népal », dans *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*. DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2910>.
- de la Soudière, M., 1999.- *Au bonheur des saisons : voyage au pays de la météo*, Bernard Grasset, Paris.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (dir.), 2013.- « IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », Cambridge University Press, Cambridge (R.-U.) et New York (É.-U.).
- Thapa, L.B., Thapa, H., Magar, B.G., 2015.- « Perception, trends and impacts of climate change in Kailali District, Far West Nepal », dans *Int. J. Environ.*, vol. 4, p. 62-76. DOI : <https://doi.org/10.3126/ije.v4i4.14099>.

Ulrich, C.S., Allé, Y., Vissoh, P. V., Guibert, H., Agbossou, E.K., Afouda, A.A., 2013.– « Relation entre perceptions paysannes de la variabilité climatique et observations climatiques au Sud-Bénin » dans *VertigO*. DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.14361>.

Vedwan, N., Rhoades, R., E., 2001.– « Climate change in the Western Himalayas of India: a study of local perception and response », dans *Clim. Res.*, vol. 19, p. 109-117.

Wesselink, A., Kooy, M., Warner, J., 2017.– « Socio-hydrology and hydrosocial analysis: toward dialogues across disciplines », dans *Wiley Interdiscip. Rev.-Water*, vol. 4, n° 2, e1196. DOI : <https://doi.org/10.1002/wat2.1196>.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A., Shrestha, A.B. (Eds.), 2019.– « The Hindu Kush Himalaya Assessment. Mountains, Climate Change, Sustainability and People », dans *ICIMOD*, ed. Springer Nature, Kathmandu, Nepal.

Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., Kitoh, A., 2012.– « APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges », dans *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, p. 1401-1415. DOI : <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>.

Yiran, G.A.B., Kusimi, J.M., Kufogbe, S.K., 2012.– « A synthesis of remote sensing and local knowledge approaches in land degradation assessment in the Bawku East District, Ghana », dans *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 14, p. 204-213. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.016>.

NOTES

1. Les travaux cités dans cet article sont surtout issus des résultats de deux projets ANR PAPRIKA (2010-2013) et PRESHINE (2014-2018) qui réunissaient glaciologues, hydrologues, chimistes de l'atmosphère, modélisateurs, agronomes, et géographes. On retrouvera un très large éventail des recherches conduites en Himalaya en consultant les références des publications de ces projets.
2. Des observations de précipitation sur quelques autres sites du bassin de la Dudh Koshi ont été utilisées pour calibrer le modèle HDSD ; pour le détail voir Savéan *et al.* (2015).

RÉSUMÉS

Dans la région népalaise de l'Everest, les données sur la neige sont fragmentaires et peu fiables comme dans de nombreuses régions montagneuses du monde. Pour mieux appréhender les précipitations solides et leur évolution au cours des dernières décennies, et ainsi améliorer la connaissance des variations hydroclimatiques, nous avons croisé des données quantitatives (mesurées, spatialisées et simulées) issues de travaux en hydrologie, et des données qualitatives (entretiens sur le terrain) issues de travaux en géographie humaine. Nous présentons ici une méthode de comparaison innovante basée sur trois clés de lecture communes : la saisonnalité, les tendances et les événements notables. Si de façon similaire les données quantitatives et qualitatives mettent en évidence la diminution des chutes de neige dans la vallée du haut Khumbu prise comme cas d'étude, des divergences soulignent les incertitudes présentes dans les

deux jeux de données. Ce travail de croisement de données issues de disciplines différentes s'avère d'une grande utilité pour les zones de montagne où les stations météorologiques et les relevés précis font défaut, et où les connaissances de la population sont riches, mais insuffisamment prises en compte.

In the Nepalese region of Mount Everest, snow data is fragmentary and unreliable, as in many mountainous regions of the world. To get a better understanding of solid precipitation and how it has evolved over the last decades, and thus to improve our knowledge of hydro-climatic variations, we crossed quantitative data (measured, spatialised and simulated) produced from work in hydrology, with qualitative data (field interviews) derived from work in human geography. Here we present an innovative comparison method based on three key factors: seasonality, trends and notable events. Although quantitative and qualitative data show a similar decrease in snowfall in the Upper Khumbu Valley, which is taken as a case study, there are discrepancies that highlight the uncertainties present in the two data sets. This method of crossing data from different disciplines proves very useful for mountain areas where meteorological stations and precise surveys are lacking, and where the wealth of local people's knowledge is not sufficiently taken into account.

INDEX

Mots-clés : Himalaya, Everest, neige, changement climatique, données qualitatives, données quantitatives

Keywords : Himalayas, Everest, snow, climate change, qualitative data, quantitative data

AUTEURS

ORNELLA PUSCHIASIS

Université de Paris, Inalco, IRD, CESSMA, Paris, France
Centre d'études himalayennes (CNRS UPR 299), Aubervilliers, France

MARIE SAVÉAN

Établissement Public Territorial de Bassin Vidourle, Montpellier, France
HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IMT Mines Alès, IRD, Montpellier, France

PIERRE CHEVALLIER

HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IMT Mines Alès, IRD, Montpellier, France

JOËLLE SMADJA

Centre d'études himalayennes (CNRS UPR 299), Aubervilliers, France

OLIVIA AUBRIOT

Centre d'études himalayennes (CNRS UPR 299), Aubervilliers, France

FRANÇOIS DELCLAUX

HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IMT Mines Alès, IRD, Montpellier, France