

**Watershed modelling with regard to socio-ecological objectives:
Application to Kunhar River Basin (Pakistan)**

M. Asim, supervised by I. Charpentier

June 10, 2022

Abstract

Over half of the non-polar glacial watersheds are found in the Himalayas. They are sources of water for billions of people. Understanding how variations in precipitation and snow melt affect their lives is of prime interest. This case study focuses the Kunhar river watershed that coincides with the administrative unit named Balakot Tehsil. Experiencing many changes, this constitutes a relevant case study for a long-term socio-ecological research.

Social and biophysical components, processes, eco-systemic services and disservices, social and natural events may be monitored through timeseries on population, climate, biodiversity... Conceptual frameworks describing the socio-ecosystem and the watershed response may be then mobilized to evaluate the impact of local practices and external drivers on the socio-ecosystem. These reveal that natural hazards, climate change and hydro-power plants are the key pressures that endanger the socio-ecosystem, including through losses of culture and biodiversity.

Keywords : Long term socio-ecological research, socio-ecosystem, watershed response, climate change

Résumé

Plus de la moitié des bassins versants glaciaires non polaires se trouvent dans l'Himalaya. Ils sont des sources d'eau pour des milliards de personnes. Comprendre comment les variations de précipitation et de fonte des neiges affectent leur vie est d'un intérêt primordial. Cette étude de cas se concentre sur le bassin versant de la rivière Kunhar qui coïncide avec l'unité administrative appelée Balakot Tehsil. Sujet à de nombreuses mutations, celui-ci constitue un cas d'étude pertinent pour une recherche socio-écologique sur le long terme.

Les composantes sociales et biophysiques, les processus, les services et disservices éco-systémiques, les événements sociaux et naturels peuvent être suivis à travers des séries temporelles portant sur la population, le climat, la biodiversité... Des cadres conceptuels décrivant le socio-écosystème et la réponse du bassin versant peuvent alors être mobilisés pour évaluer l'impact des pratiques locales et des facteurs externes sur le socio-écosystème. Ceux-ci révèlent que les risques naturels, le changement climatique et les centrales hydroélectriques sont les principales pressions qui mettent en danger le socio-écosystème, avec des pertes de culture et de biodiversité.

Mots-clés : Recherche socio-écologique à long terme, socio-écosystème, réponse du bassin versant, changement climatique

Chapter 1

Introduction

Version Française

Près de la moitié des bassins versants glaciaires non polaires se trouvent dans l'Himalaya. Ils sont une source d'eau pour des milliards de personnes. Comprendre comment les variations de précipitation et de fonte des neiges affecteront leur vie est donc d'un intérêt primordial.

Le cycle hydrologique est considéré comme un facteur clé de l'activité écologique et physique à la surface de la Terre. Nombre d'activités anthropiques sont directement liées au ruissellement généré comme l'utilisation des terres, la croissance de la végétation, l'agriculture irriguée, les ouvrages hydrauliques, la quantité et la qualité de l'eau au niveau régional [Wada et al., 2017, Ranasinghe et al., 2019]. Tout changement dans le cycle hydrologique peut entraîner des problèmes hydrologiques et écologiques critiques, en particulier dans les régions où les ressources en eau douce sont limitées [Punkari et al., 2014, Gulahmadov et al., 2021].

Le réchauffement climatique prévu devrait perturber le cycle hydrologique. En conséquence, les systèmes hydrologiques devront faire face plus fréquemment à des événements extrêmes et à des variations de la disponibilité de l'eau [Solomon et al., 2007, Khattak et al., 2011]. Cela pourra impacter les écosystèmes, la santé publique, les besoins industriels et municipaux en eau, et l'exploitation hydroélectrique. Dans le monde entier, les activités humaines et le changement climatique provoquent de graves perturbations dans les systèmes hydrologiques et écologiques [Piao et al., 2010, Zhao et al., 2014, Jiang et al., 2015]. Au cours des dernières décennies, en raison de catastrophes naturelles répétées et des changements dans les ressources en eau, la réponse des bassins versants aux pratiques anthropiques et au changement climatique ont attiré l'attention des chercheurs [Gulahmadov et al., 2021].

Les impacts de la variabilité climatique sur les systèmes hydrologiques peuvent être différents d'une région à l'autre [Chu et al., 2010, Khattak et al., 2011, Zhang et al., 2011a, IPCC, 2013]. Les systèmes hydrologiques ont une grande importance car ils influencent de manière significative le développement économique et environnemental de celles-ci. Ces systèmes sont très complexes et difficiles à comprendre en profondeur car ils se composent de l'atmosphère, de l'hydrosphère, de la biosphère, de la cryosphère, de la géosphère et de leurs interrelations, ainsi que de leur relation avec la sphère sociale. Par conséquent, il est très important d'étudier les régimes hydrologiques en réponse aux activités anthropiques et à la variabilité climatique pour améliorer notre compréhension et développer de nouvelles approches scientifiques pour la surveillance et la gestion durable des ressources en eau.

Le Pakistan est un pays agricole car, dans une large mesure, son économie dépend de l'agriculture. Le pays mise sur l'irrigation en développant un immense système de canaux, de barrages et d'ouvrages de dérivation alimentés par le fleuve Indus et ses affluents. Les perturbations du cycle hydrologique dans les zones montagneuses et à la frontière indo-pakistanaise impactent les basses terres constituées de régions arides et semi-arides [Milly et al., 2005, Zhang et al., 2011b, Xue et al., 2017]. L'eau de fonte des glaciers du Karakoram, de l'Himalaya et des hauts plateaux de l'Hindu-Kush alimente finalement le système fluvial de l'Indus [Bookhagen and Burbank, 2010]. En ce qui concerne les ressources en eau et la vie du réservoir, la connaissance de ces systèmes hydrologiques des montagnes est donc d'une grande importance pour un pays comme le Pakistan [Khan, 2018].

Dans cette thèse, nous nous concentrons sur le bassin versant de la rivière Kunhar comme cas d'étude car ce petit bassin versant alpin (2626 km²) coïncide avec l'unité administrative nommée Balakot Tehsil. Tous deux connaissent de nombreuses mutations, ce qui constitue une étude de cas pertinente pour une recherche socio-écologique à long terme (LTSER).

La rivière Kunhar (Pakistan) provenant du lac Lulusar dans la vallée de Kaghan, est située sur le versant sud du massif Himalayen. Il contribue à 11% du débit de la rivière Jhelum au barrage de Mangla [Mahmood et al., 2016]. La fonte des neiges fournit 65% du débit total de la rivière, offrant environ un potentiel de 1 600 MW de production d'énergie hydroélectrique [HaglerBailly, 2019]. Actuellement, un plan de développement est mis en œuvre par la construction de cinq centrales hydroélectriques impliquant des structures majeures telles que des barrages et des canaux de dérivation qui affectent considérablement l'écoulement naturel, la flore et la faune de la rivière Kunhar, ainsi que les habitants du tehsil de Balakot .

Les composantes sociales et biophysiques, les processus, les services écosystémiques et disservices, les événements sociaux et naturels peuvent être suivis à l'aide séries temporelles portant sur la population, le climat, la biodiversité... Ensuite, des cadres conceptuels [Bretagnolle et al. \[2019\]](#) peuvent être utilisés pour analyser les facteurs externes et les pratiques qui impactent un socio-écosystème. Pour aller plus loin, En particulier, les relations complexes entre Humains et Nature peut être décrites dans une frise chronologie [Bruley et al. \[2021\]](#) pour répondre à des questions portant sur la durabilité de ce socio-ecosystème. Le cycle hydrologique peut lui aussi être modélisée. Au Pakistan, plusieurs groupes de scientifiques ont étudié le bassin supérieur de l'Indus en utilisant des modèles hydrologiques tels que le modèle "Snowmelt Runoff" (SRM) [Azmat et al., 2018], le modèle "Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning" (HBV) [Akhtar et al., 2008], le modèle "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) [Cheema, 2012], modèle "WEB-DHM-S" [Shrestha et al., 2015b] et système de modélisation hydrologique "HEC-HMS" [Azmat et al., 2018, Mahmood et al., 2016] sous des scénarios climatiques différents.

Les socio-écosystèmes sont des systèmes complexes. Il peut être difficile de séparer et d'analyser leurs composants car ils sont profondément interconnectés. Dans la thèse, nous proposons une recherche originale qui considère les deux approches pour aborder des questions telles que "*Comment pouvons-nous détecter les seuils critiques/points de basculement dans la réponse socio-écosystémique ?*" ou "*Comment l'hydrologie et les bilans hydrologiques des captages changeront-ils selon des scénarios climatiques ?*", qui sont des questions classiques dans une recherche LTSER. Le plan de la thèse est le suivant.

Le chapitre 2 présente l'étude de cas "bassin versant de la rivière Kunhar/Balakot tehsil" dans leurs contextes environnementaux et administratifs. Il donne un aperçu des composantes sociales et de la biodiversité du système socio-écologique avec une attention particulière à la couverture du sol, la végétation, les cultures et la population. Le contexte climatique et hydrologique est abordé au chapitre 3. Ces informations hétérogènes sont ensuite rassemblées et analysées au moyen d'une frise chronologique afin de suivre la trajectoire de ce socio-écosystème. Pour le socio-écosystème Kunhar/Balakot, il apparaît que les risques naturels, le changement climatique et les centrales hydroélectriques sont les principales pressions qui mettent en danger le socio-écosystème, y compris par des pertes de culture des habitants et des pertes de biodiversité.

Le chapitre 3 décrit le cycle hydrologique à différentes échelles pour mieux comprendre les phénomènes dans le bassin versant peu instrumenté de la rivière Kunhar. Il rend compte des données climatiques aux échelles nationale, régionale et locale, en tenant compte des données des stations météorologiques (Section 3.2) et des données satellites (Section 3.3) des missions MODIS et TRMM, pour quantifier le changement climatique dans le bassin versant au moyen d'indicateurs.

Les variables d'intérêt sont les précipitations et la température, l'enneigement et la végétation. Lié à l'agriculture et à la sylviculture, l'indice de végétation est décrit au chapitre 2. Dans les données satellites, nous avons en particulier cherché à identifier des distributions géographiques et des cycles annuels.

Le chapitre 4 propose une analyse d'images complémentaire basée sur de la corrélation d'images et appliquée à des variables météorologiques et climatiques afin de combler les lacunes sur les données de ce bassin versant alpin peu instrumenté. Les images produites par MODIS et TRMM sont utilisées pour étudier l'impact du changement climatique sur des facteurs climatiques tels que la température de surface, la couverture de neige, la végétation et les précipitations. Pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin versant de la rivière Kunhar et de son socio-écosystème, ainsi que l'impact du changement climatique sur ceux-ci, nous proposons d'exploiter les données disponibles, notamment les séries temporelles des stations météorologiques locales et les données fournies par MODIS. Les outils que nous proposons permettent de retravailler les images et de combiner leur information à des séries temporelles afin de transformer ces séries temporelles météorologiques locales en un jeu de données plausible à l'échelle du bassin versant. L'objectif est ensuite de les utiliser dans une modélisation hydrologique.

Le chapitre 5 est consacré à la modélisation hydrologique du bassin versant de Kunhar. Comme très peu de données sont disponibles, le cadre hydrologique proposé est basé sur le modèle conceptuel distribué HBV mis en place pour tenir compte de la fonte des neiges dans le Grand Himalaya. Les différents régimes météorologiques observés dans le bassin versant de Kunhar sont reproduits en mettant en œuvre le modèle HBV sur plusieurs sous-bassins dont les superficies et les élévations moyennes sont des paramètres clés. Ceux-ci sont obtenus en partitionnant le bassin versant en petites unités hydrologiques. Cette spatialisation s'accompagne d'une prise en compte des contraintes de terrain (hydrologie, occupation du sol, altitude). Les données d'entrée sont celles déduites des analyses météorologiques et de corrélation réalisées aux chapitres 3 et 4. Les débits sont utilisés pour calibrer les paramètres du modèle. La méthode appliquée au bassin versant de Kunhar révèle le rôle clé des variables corrélées de température et d'altitude.

Le chapitre 6 résume les conclusions de la thèse. Les principaux résultats sont un ensemble de séries chronologiques et d'indicateurs, et une frise chronologique rendant compte de l'évolution du socio-écosystème et du plan de développement hydroélectrique. Premièrement, celle-ci montre que le socio-écosystème a profondément changé après le séisme majeur d'octobre 2005 en raison d'un apport soudain de fonds compensatoires. En outre, un certain nombre de nouvelles structures d'ingénierie dédiées à la production d'électricité modifient le lit de la rivière Kunhar. Deuxièmement, la méthode proposée a permis d'évaluer le rôle de l'altitude et de la température sur ce bassin versant alpin. Dans les données et indicateurs biogéophysiques que nous avons étudiés, le changement climatique suspecté n'apparaît pas aussi fort que rapporté dans la littérature. D'un point de vue hydrologique, le calcul du ruissellement généré par le bassin versant pourrait aider les gestionnaires de l'eau et de l'environnement à développer de nouvelles politiques sur la disponibilité et l'utilisation de l'eau. Dans ce cas, il sera nécessaire de modéliser les ouvrages hydrauliques actuels et futurs ainsi que les aménagements ou retrait de matière importants impactant dans le lit de la rivière Kunhar.

Publications

- Mohammad Asim, Isabelle Charpentier. Monitoring the evolution of the Kunhar River socioecosystem (Pakistan) on a timeline chart. EMCEI - Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Jun 2021, Sousse, Tunisia. <[hal-03232724](#)>
- Mohammad Asim, Isabelle Charpentier. Estimating How Variations in Precipitation and Snowmelt Affect Kunhar River Resources. Proceedings of the 2nd conference of the arabian journal of geosciences (CAGJ), 2-5 november 2020, Sousse, Tunisia, Springer, In press. <[hal-02992347](#)>

English version

Over half of the non-polar glacial watersheds are found in the Himalayas and they are sources of water for billions of people. Understanding how variations in precipitation and snow melt will affect their lives is thus of prime interest.

The hydrological cycle is considered as a key driver for the ecological and physical activities on the surface of earth. The generated runoff is directly linked with many of anthropogenic activity, through land use, growth of vegetation, irrigated agriculture, hydraulic structures, the quantity and quality of existing water uses at provincial level [Wada et al., 2017, Ranasinghe et al., 2019]. Any type of change in the hydrological cycle may produce critical hydrological and ecological issues, especially in regions with limited fresh water resources [Punkari et al., 2014, Gulahmadov et al., 2021].

The forecasted global warming is expected to disturb the hydrological cycle. As a consequence, hydrological systems have to deal more frequently with extreme events and variations in water availability [Solomon et al., 2007, Khattak et al., 2011]. It can produce issues for ecosystem, public health, industrial and municipal water requirement, and hydro-power exploitation. Worldwide, anthropic activities and climate change cause severe disturbances in the hydrological and ecological systems [Piao et al., 2010, Zhao et al., 2014, Jiang et al., 2015]. During recent decades, due to repeatedly natural disasters and water resources changes, the studies of the watershed response to anthropic practices and climate change have gained the attention of researchers [Gulahmadov et al., 2021].

The impacts of climate variability on hydrological systems might be different from area to area [Chu et al., 2010, Khattak et al., 2011, Zhang et al., 2011a, IPCC, 2013]. The hydrological systems have great importance because they significantly influence the economic and environmental development of any area. These systems are very complex and difficult to understand thoroughly as they consist of the atmosphere, the hydrosphere, the biosphere, the cryosphere, the geosphere and their interrelations, as well as their relation to the social sphere. Therefore, it is very important to study the responses of hydrological regimes to anthropogenic activities and climate variability to enhance our understanding and to develop new scientific based approaches for sustainable monitoring and management of water resources.

Pakistan is an agrarian country as its economy depends on agriculture to a large extent. The country relies on irrigation by spreading an immense system of channels, barrages and diversion structures fed by the Indus river and its tributaries. Hydrological cycle disturbance in the mountainous areas and at Indian-Pakistani border impact the lowlands consisting of arid and semi arid regions [Milly et al., 2005, Zhang et al., 2011b, Xue et al., 2017]. Melted water from glaciers in Karakoram, Himalayas and Hindu-Kush highlands ultimately fed the Indus River system [Bookhagen and Burbank, 2010]. The knowledge of the hydrological systems of the mountains is therefore of great importance for countries like Pakistan [Khan, 2018].

In this thesis, we focus on the Kunhar river watershed as a case study, notably because this small Alpine watershed (2626 km²) coincides with the administrative unit named Balakot Tehsil. Both are experiencing many changes, what constitute a relevant case study for a long term socio-ecological research (LTSER).

The Kunhar River (Pakistan) originating from the Lulusar Lake in the Kaghan valley, is situated at the southern slope of the Greater Himalayas. It contributes to 11% of Jhelum River flow at Mangla dam [Mahmood et al., 2016]. Snowmelt supplies 65% to the total river flow, offering about 1600 MW potential for energy production [HaglerBailly, 2019]. Currently, a development plan is being implemented by setting five hydropower plants involving major structures such as dams and diversion channels that considerably affect the natural flow, the riverine flora, and fauna of the Kunhar River, as well as the inhabitants of Balakot Tehsil.

Social and biophysical components, processes, eco-systemic services and disservices, social and natural events may be monitored in timeseries on population, climate, biodiversity and so forth. On

the one hand, conceptual frameworks [Bretagnolle et al. \[2019\]](#) may then be used to analyze external drivers and practices that impact socio-ecosystems. To go one step beyond, complex Human-Nature relationships may be summarized in a timeline [Bruley et al. \[2021\]](#) to answer hot sustainability questions. On the other hand, part of the hydrologic cycle may be modeled. In Pakistan, several scientific groups previously studied the Upper Indus basin by using hydrological models such as Snowmelt Runoff model (SRM) [[Azmat et al., 2018](#)], Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) [[Akhtar et al., 2008](#)], Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [[Cheema, 2012](#)], WEB-DHM-S model [[Shrestha et al., 2015b](#)] and Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) [[Azmat et al., 2018](#), [Mahmood et al., 2016](#)] model under changing climate scenarios.

Socio-ecosystems are complex systems, and it may be difficult to separate and analyze component one by one as they are so much connected. In the thesis, we propose an original research that considers both approaches to address questions like “*How can we detect critical thresholds/ tipping points in socio-ecosystem response?*” or “*How will hydrology and catchment water balances change under different climate scenarios?*”, that are classical questions in a LTSER research. The outline of the thesis is as follows.

Chapter 2 presents the case study “Kunhar watershed / Balakot tehsil” from environmental and administrative contexts. It provides an overview of the social and biodiversity components of the Balakot/Kunhar socio-ecological system with a special attention to land cover, vegetation, crop and population. Climate and hydrology are discussed in Chapter 3. This heterogeneous information is then gathered and analyzed by means of a timeline chart in order to monitor the trajectory followed by the socio-ecological system. For the Kunhar/Balakot socio-ecosystem, we notably discuss natural hazards, climate change and hydro-power plants as key pressures that could endanger the socio-ecosystem in terms of losses of culture and biodiversity.

Chapter 3 describes the hydrological cycle in at different scales to understand the phenomena in a better way in the poorly gauged watershed of Kunhar river. It reports on climate data at national, regional and local scales, considering data from meteorological stations (Section 3.2) and rasters (Section 3.3) from MODIS and TRMM missions, to quantify the climate change in Kunhar watershed through indicators. The variables of interest are precipitation and temperature, snow cover and vegetation. Related to agriculture and forestry, the vegetation index is described in Chapter 2. In the rasters, we notably look for geographical patterns and yearly cycles.

Chapter 4 proposed a complementary image analysis involving some image correlation studies applied to meteorological and climate variables addressed so as to fill data gaps observed in this poorly gauged Alpine watershed. MODIS and TRMM raster data are used to study the impact of climate change on different climatic factors like day and night land surface temperature, snow cover, NDVI and precipitation. To better understand the functioning of the Kunhar watershed and its socio-ecosystem, as well as the impact of climate change on them, we propose to exploit available data, notably timeseries from local meteorological stations and raster data provided by MODIS. The tools we propose allow to rework rasters and to combine their information to timeseries so as to turn these local meteorological timeseries into a plausible gridded dataset that could be used in hydrological modeling.

Chapter 5 is dedicated to the hydrological modeling of Kunhar watershed. As very scarce data are available, the proposed hydrological framework is based on the distributed conceptual model HBV set up to account for snow melt in the Greater Himalayas. The different flow regimes occurring in Kunhar’s watershed can be reproduced by implementing the HBV model on several sub-basins, the areas and mean heights of which are key parameters. These can be inferred by splitting the watershed into small hydrological units. This spatialization is carried out with respect to terrain constraints (hydrology, land

cover, elevation). Applied to the Kunhar watershed, this reveals the key role of correlated temperature and elevation variables. Input data are those deduced from the meteorological and correlation analyses carried out in Chapter 3 and 4. The proposed method enables to deal with height and temperature in the HBV framework in a fair manner.

Chapter 6 summarized the conclusions of the thesis. Main results are a set of timeseries and indicators and a timeline reporting on the evolution of both the evolution of socio-ecosystem and the hydro-power development plan. Firstly, these show that the socio-ecosystem has profoundly changed after the major earthquake of October 2005 due to a sudden input of compensatory funds. Besides, a number of new engineering structures dedicated to power production are modifying the Kunhar river bed. Secondly, from a methodological point of view, the proposed method were able to evaluate the role of height and temperature on such an alpine watershed. However, the suspected climate change does not appear as strong as expected in the biogeophysical data and indicators we studied. Besides, the calculation of generated runoff from watershed and river stream could help water and environmental managers to develop new policies about availability of water and its proper use, subject to the modeling of the different engineering structures and sand mining area in a convenient manner.

1.0.0.1 Publications

- Mohammad Asim, Isabelle Charpentier. Monitoring the evolution of the Kunhar River socioecosystem (Pakistan) on a timeline chart. EMCEI - Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Jun 2021, Sousse, Tunisia. <[hal-03232724](#)>
- Mohammad Asim, Isabelle Charpentier. Estimating How Variations in Precipitation and Snowmelt Affect Kunhar River Resources. Proceedings of the 2nd conference of the arabian journal of geosciences (CAGJ), 2-5 november 2020, Sousse, Tunisia, Springer, In press. <[hal-02992347](#)>