

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : STEP - Sciences de la Terre de l'Environnement et des Planètes

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement

Unité de recherche : Institut des Géosciences de l'Environnement

## Modélisation de la variabilité et des tendances climatiques dans les Hautes Montagnes d'Asie pour une meilleure compréhension de leurs impacts sur la cryosphère

## Modeling climate trends and variability in High Mountain Asia to understand cryosphere changes

Présentée par :

**Mickaël LALANDE**

### Direction de thèse :

**Gerhard KRINNER**  
DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS  
**Martin MÉNÉGOZ**  
CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS

Directeur de thèse

Co-encadrant de thèse

### Rapporteurs :

**Bertrand DECHARME**  
CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS  
**Richard ESSERY**  
PROFESSEUR, University of Edinburgh

### Thèse soutenue publiquement le **28 février 2023**, devant le jury composé de :

<b>Gerhard KRINNER</b> DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS	Directeur de thèse
<b>Bertrand DECHARME</b> CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS	Rapporteur
<b>Richard ESSERY</b> PROFESSEUR, University of Edinburgh	Rapporteur
<b>Delphine SIX</b> PHYSICIEN, Université Grenoble Alpes	Examinatrice
<b>Simon GASCOIN</b> CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS	Examineur
<b>Catherine OTTLÉ</b> DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS	Examinatrice
<b>Frédérique CHERUY</b> CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS	Examinatrice

### Invités :

**Martin MÉNÉGOZ**  
CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS



## Résumé

Les Hautes Montagnes d'Asie (HMA) hébergent le plus gros stock de glace après ceux des régions polaires. Cette ressource constitue une réserve d'eau douce utilisée par près de 1,4 milliard d'habitants, ce qui en fait une région particulièrement vulnérable au changement climatique. HMA comprend les chaînes de montagnes les plus hautes de la planète, dont l'Himalaya, le Karakoram et l'Hindu Kush, qui entourent le plateau tibétain, une zone de près de 2,5 millions km<sup>2</sup> avec une altitude moyenne d'environ 4 000 m.

Étudier le changement climatique en HMA est un défi à cause de sa topographie complexe qui rend délicate l'application de modèles de climat, et limite la possibilité de récolter des observations. L'enjeu de cette thèse est d'étudier la variabilité et les tendances climatiques en HMA. Elle se décline en deux objectifs principaux : (1) étudier et quantifier les changements climatiques en HMA à l'aide de modèles de circulation générale (GCMs) et de jeux d'observations, et (2) améliorer la représentation de la couverture de neige en région de montagne dans les GCMs.

La plupart des GCMs simulent un biais froid sur la région HMA atteignant en moyenne annuelle -1,9 °C, associé à une surestimation de la couverture neigeuse et des précipitations de 12 % et 1,5 mm j<sup>-1</sup> respectivement (soit des biais relatifs de 52 et 143 % par rapport aux observations). Aucun lien clair entre les biais des modèles et leur capacité à simuler les tendances n'a été mis en évidence, ce qui invalide la possibilité de discriminer des modèles en fonction de leurs biais dans la mise en place de projections futures.

Le réchauffement médian simulé en HMA avec les modèles CMIP6 sur la période 2081-2100 par rapport à 1995-2014 atteint respectivement 1,9 et 6,5 °C dans les scénarios de basses (SSP1-2,6) et hautes (SSP5-8,5) émissions de gaz à effet de serre. Ce réchauffement est associé à une diminution relative de l'étendue de la couverture neigeuse de -9,4 à -32,2 % et à une augmentation relative des précipitations de 8,5 à 24,9 % dans chacun de ces scénarios respectifs. Le réchauffement est 11 % plus élevé en HMA par rapport aux autres surfaces continentales de l'hémisphère Nord, à l'exclusion de la zone Arctique.

Dans un second temps, 5 paramétrisations de la fraction de la couverture de neige (SCF) ont été testées, calibrées et validées à partir d'une réanalyse de neige en HMA. Nos résultats montrent que la relation entre SCF et hauteur de neige (SD) diffère fortement entre les zones plates et les régions montagneuses, ce qui induit une surestimation de la SCF dans les paramétrisations qui ne tiennent pas compte de la topographie sous-maille. D'autre part, l'évolution de la SCF en fonction de la SD suit une hystérésis, avec une croissance rapide de SCF pendant la phase d'accumulation, et un retrait plus lent et spatialement hétérogène de la couverture neigeuse pendant les périodes d'ablation, discréditant les paramétrisations qui ne considèrent pas cet effet.

L'utilisation d'une nouvelle paramétrisation adaptée aux régions de montagne dans le modèle LMDZ/ORCHIDEE permet de réduire le biais moyen de SCF sur l'ensemble des régions montagneuses entre 5 et 10 % en hiver, atténuant le biais froid annuel moyen en HMA de -1,8 à environ -1 °C. Cette valeur ajoutée est cependant parfois masquée par d'autres biais du modèle. L'utilisation de jeux de données complémentaires couvrant davantage de régions serait nécessaire pour permettre une calibration optimale des paramétrisations de SCF.

Le manque d'observations de la quantité de neige dans les régions montagneuses constitue actuellement une limitation majeure à l'évaluation de ces paramétrisations. Au-delà de la SCF, le développement d'autres paramétrisations sous-maille dans le but d'améliorer la représentation des processus de surface, notamment son bilan d'énergie et la distribution spatiale des précipitations est une piste

de travail fondamentale pour améliorer le réalisme des GCMs dans les régions de montagne.

**Mots clés** : Hautes Montagnes d'Asie, Régions de Montagne, Modèles de Circulation Générale, CMIP6, Couverture de Neige, Paramétrisations

## Abstract

The High Mountain Asia (HMA) is hosting the largest ice stock after the polar regions. This resource provides a freshwater supply to nearly 1.4 billion people, making it a particularly vulnerable region to climate change. HMA includes the highest mountain ranges on Earth, including the Himalayas, the Karakoram, and the Hindu Kush, which surround the Tibetan Plateau, an area of nearly 2.5 million km<sup>2</sup> with an average elevation of about 4000 m.

Studying climate change in HMA is challenging because of its complex topography which makes the application of climate models difficult in this area, and limits the possibility to collect observations. The aim of this thesis is to study the variability and trends of the climate in HMA. It is based on two main objectives : (1) studying and quantifying the climate change in HMA with general circulation models (GCMs) experiments and observation datasets, and (2) improving the simulated snow cover in mountainous regions in GCMs.

Current GCMs simulate a cold bias in HMA reaching an annual average value of -1.9 °C, associated with an overestimation of snow cover of 12 % and an excess of precipitation of 1.5 mm d<sup>-1</sup> (corresponding to relative biases of 52 and 143 % as compared to observations). Model biases and their ability to simulate trends do not show a clear link, suggesting that model bias is not a robust criterion to discard models in trend analysis.

The simulated median warming in HMA with the CMIP6 models over 2081-2100 as compared to 1995-2014 reaches respectively 1.9 and 6.5 °C in the low (SSP1-2.6) and the high (SSP5-8.5) greenhouse gas emission scenarios. This warming is associated with a relative decrease in the snow cover extent of -9.4 to -32.2 % and a relative increase in precipitation of 8.5 to 24.9 % in these two respective scenarios. The warming is 11 % higher over HMA than over the other Northern Hemisphere continental surfaces, excluding the Arctic area.

In a second step, 5 parameterizations of the snow cover fraction (SCF) are tested, calibrated, and validated using a snow reanalysis in HMA. Our results show that the relationship between SCF and snow depth (SD) differs strongly between flat and mountainous areas, leading to an overestimation of the SCF in parameterizations that do not take into account the sub-grid topography. On the other hand, the SCF changes with respect to SD follow a hysteresis, with a rapid increase in SCF during the accumulation phase and a slower patchy retreat during ablation periods, discarding parameterizations that do not consider this effect.

The use of a new SCF parameterization adapted to mountain areas in LMDZ/ORCHIDEE reduces the average SCF bias across the mountainous regions within 5 to 10 % in winter, reducing the mean annual cold bias in HMA from -1.8 to around -1 °C. However, this added value is sometimes masked by other model biases. Additional datasets covering other regions should be considered to allow an optimal tuning of the SCF parameterizations.

The lack of snowpack observations in mountainous regions is currently a major limitation to set up realistic SCF parameterizations. Beyond the SCF, the development of other subgrid parameterizations in order to improve simulated surface processes, especially its energy balance and the spatial distribution of precipitation, is a key step to improve the realism of GCMs in mountainous regions.

**Keywords :** High Mountain Asia, Mountain Areas, General Circulation Models, CMIP6, Snow Cover, Parameterizations