

Résumé : (English version bellow)

Dépôt, devenir et impact radiatif des impuretés dans le manteau neigeux : analyse des processus, simulations numériques et implications

L'une des propriétés les plus fascinantes de la neige est sa blancheur, capable de transformer complètement un paysage en quelques heures. Cette couleur est due à la capacité unique de la neige de réfléchir le rayonnement solaire dans les longueurs d'onde visibles, c'est-à-dire son fort albédo. Cette particularité de la neige est d'une importance cruciale pour le bilan énergétique de surface et par conséquent pour un large éventail de questions sociales, écologiques et climatiques. La blancheur de la neige peut, cependant, être altérée par la présence d'impuretés absorbantes. Dans les Alpes européennes, deux types d'impuretés absorbantes impactent significativement l'évolution saisonnière du manteau neigeux : le carbone suie et les poussières minérales du Sahara. Cette thèse vise à mieux comprendre et modéliser le dépôt, l'évolution et l'impact de ces impuretés absorbantes sur les manteau neigeux saisonnier des Alpes françaises. À cette fin, trois problématiques principales sont abordées :

- Quels types d'impuretés absorbantes sont présentes dans un manteau neigeux saisonnier alpin et en quelle quantité? Avec quelle incertitude peut-on estimer leurs concentrations à partir de mesures?
- Quel impact ont ces dépôts d'impuretés absorbantes sur l'évolution du manteau neigeux et comment varie t-il d'une année sur l'autre?
- Peut on modéliser cet impact en se servant des modèles de manteau neigeux et des modèles atmosphériques de chimie-aérosols?

Tout d'abord, une représentation explicite du dépôt et de l'évolution des impuretés absorbantes a été implémentée dans le modèle détaillé de manteau neigeux SURFEX/ISBA-Crocus. Ces nouveaux développements permettent de modéliser l'assombrissement de la surface de la neige par les impuretés absorbantes (impact direct) ainsi que leurs interactions avec le métamorphisme de la neige (impacts indirects). Les simulations de l'enneigement au Col de Porte, forcées par des flux de dépôt d'impuretés absorbantes provenant du modèle atmosphérique de chimie transport ALADIN-Climate, mettent en évidence un raccourcissement de la saison de neige allant jusqu'à 9 jours en raison du carbone suie et des poussières minérales sahariennes.

Ensuite, une campagne de terrain de deux ans a été menée au site d'étude du Col du Lautaret. Pendant deux saisons d'hiver, la concentration en impuretés absorbantes ainsi que les propriétés physiques et optiques du manteau neigeux ont été mesurées chaque semaine. Ce jeu de données unique est d'abord utilisé pour ouvrir la voie à une nouvelle méthode visant à estimer le profil vertical de concentration en impuretés absorbantes dans la neige à partir de mesures de profils d'irradiance spectrale. L'évaluation de cette méthode par rapport aux mesures chimiques met en évidence la difficulté d'établir un lien entre la chimie de la neige et ses propriétés optiques. Une seconde étude compare ensuite les mesures d'albédos spectraux, les mesures chimie d'impuretés absorbantes et des simulations du manteau neigeux. Cette étude corrobore le problème mentionné précédemment et souligne une lacune dans notre compréhension actuelle des mesure chimiques dans la neige. L'impact des impuretés absorbantes au Col du Lautaret pour ces deux années est évalué en utilisant la version ensembliste de SURFEX/ISBA-Crocus. La présence d'impuretés absorbantes raccourci notamment la durée d'enneigement de 10 ± 5 et 11 ± 1 jours pour les deux saisons étudiées.

Les études ponctuelles de l'impact des impuretés absorbantes réalisées au cours de cette thèse ouvrent la voie à une étude d'impact à l'échelle de toutes les Alpes et sur de plus longues périodes.

Abstract:

Deposition, fate and radiative impact of impurities in the snowpack: process analysis, numerical simulations and consequences

One of the most fascinating properties of snow is its whiteness, and its ability to fully transform a landscape in a couple of hours. This color is due to the unique ability of snow to reflect solar radiation in the visible wavelengths, i.e. its high albedo. This particularity of snow is of crucial importance for the surface energy budget and consequently for a wide range of social, ecological and climatic issues. However, the whiteness of the snow cover can be altered by the presence of Light Absorbing Particles (LAPs) on and close below its surface. In the European Alps, two types of LAPs are suspected to have a significant impact on the evolution of seasonal snow : Black Carbon (BC) and Saharan mineral dust. This thesis aims at a better understanding and modelling of the deposition, evolution and impact of LAPs on the seasonal snowpack in the French Alps. To this aim, three main questions are addressed :

- What types of LAPs are present in a seasonal alpine snowpack and in what quantity? How well can we estimate their concentration in snow based on measurements?
- What is the impact of LAPs on snowpack evolution and how does this impact vary in time?
- Are we able to model this impact using state-of-the-art atmospheric chemical transport models and detailed snowpack models?

First, an explicit representation of LAPs was implemented in the detailed snowpack model SURFEX/ISBA-Crocus. These new developments enable to account for darkening of the snow surface by LAPs (direct impact) as well as their interactions with snow metamorphism (indirect impacts). Snowpack simulations at Col de Porte (1326 m a.s.l.) using LAP deposition fluxes from an atmospheric model highlight a shortening of the snow season by up to 9 days due to BC and dust.

Second, a two-year field campaign was conducted at Col du Lautaret study site (2058 m a.s.l, French Alps). During two winter seasons, concentrations of LAPs as well as physical and optical properties of the snowpack were measured weekly from the onset to the total melt-out of the snowpack. This unique dataset was first used to pave the way for a novel method to estimate vertical profiles of LAP concentration in snow from spectral irradiance profile measurements. This method was evaluated against chemical measurements pointing out difficulties to relate snow chemistry to its radiative properties. A second study was then dedicated to the comparison of spectral albedo measurements, chemical measurements of LAPs near the surface and snowpack simulations. This latter study corroborates the issue previously mentioned and points out a gap in the current understanding of chemical measurements of BC in snow. The impact of LAPs at Col du Lautaret over the two years was evaluated using the ensemble modeling framework of SURFEX/ISBA-Crocus. We estimated that the shortening of the snow season due to LAPs was around 10 ± 5 and 11 ± 1 days for both seasons respectively. The numerical estimation of the impact of LAPs on our simulations exhibits nevertheless a large dependency to the model configuration.

The studies of the impact of LAP carried out at a single location during this thesis pave the way for a larger scale study of the impacts of LAP deposition across the Alps over longer periods.