

Titre : Dynamique spatio-temporelle de l'enneigement en montagne à partir des données de Sentinel-1

Mots clés : neige humide, Sentinel-1, images SAR, fonte nivale, glaciers, Alpes françaises

Résumé : En zone de montagne, la neige a un impact significatif sur le climat, l'hydrologie, la gestion des ressources en eau et les avalanches. Le suivi de la neige humide, c'est-à-dire la neige qui contient de l'eau liquide, est crucial pour comprendre le processus de fonte des neiges et d'autres processus nivo-hydrologiques qui en résultent, comme les crues soudaines.

La télédétection spatiale nous fournit des informations spatialisées en montagne, dans des zones où la densité d'observations in situ est faible. Les images optiques, telles que celles fournies par Sentinel-2 et MODIS, permettent de détecter les étendues couvertes de neige. Les radars à synthèse d'ouverture (SAR, synthetic aperture radar) ont l'avantage d'être sensibles à la présence d'eau liquide dans le manteau neigeux. Contrairement aux images optiques, ils sont quasi indépendants des conditions atmosphériques. Les méthodes de détection de la neige humide à partir des images SAR reposent sur l'exploitation de méthodes de détection du changement avec divers niveaux de complexité. Les objectifs de cette thèse sont : (1) d'explorer le contenu en information des observations SAR dans des environnements de neige et de glaciers ; (2) d'optimiser les méthodes de détection de neige humide en montagne ; (3) d'étudier la variabilité spatio-temporelle de l'enneigement en montagne ; (4) d'analyser les événements nivo-météorologiques d'intérêts pour la neige humide tels que les événements de pluie sur neige et le dépôt des poussières désertiques.

Dans cette thèse, nous avons exploité une méthode de détection de la neige humide, dite Magenta, qui utilise l'espace RGB pour former une image composite entre une image de référence et une image à une date donnée. Cet algorithme permet d'obtenir des cartes binaires de neige humide à chaque acquisition SAR.

En exploitant le découpage des montagnes françaises en massifs, nous avons mis au point une nouvelle méthode nous permettant de reconstituer l'étendue de neige totale (humide et sèche) à partir de la neige humide de Sentinel-1. Nous avons évalué avec succès la pertinence de nos estimations sur les massifs de la Vanoise et du Queyras de 2015 à 2024 en les comparant avec la superficie totale de l'enneigement vue par des capteurs optiques de différentes résolutions au sol (Sentinel-2 et MODIS).

Nous nous sommes également intéressés aux événements de pluie sur neige (ROSE, rain-on-snow events) dont l'intérêt est capital en régions de montagne. Les signaux de pluie sur neige peuvent être détectés à partir des images SAR en examinant la variabilité des distributions de neige humide par altitudes et orientations. Deux cas d'événements de pluie sur neige intenses ont été détaillés pour évaluer une nouvelle méthode de détection dans les Alpes et dans les Pyrénées.

Enfin, la dynamique d'enneigement dans le bassin versant du glacier de Saint-Sorlin a été étudiée avec les données Sentinel-1 et des simulations du modèle de neige Crocus. Nous montrons que les trois phases de fonte du manteau neigeux peuvent être identifiées à partir des séries temporelles du coefficient de rétrodiffusion SAR. Nous montrons entre autres que le début de la fonte simulé par Crocus est en avance de 5 à 10 jours par rapport aux observations satellites. Sur les zones d'accumulation et d'ablation du glacier, le signal SAR a été confronté aux images optiques Sentinel-2 pour identifier les différents états à la surface du glacier (glace vive, neige humide, neige sèche).

Title: Spatio-temporal dynamics of snow cover in mountains with Sentinel-1 data

Key words: snow, Sentinel-1, SAR imagery, snowmelt, glaciers, French Alps

Abstract: In mountainous areas, snow is one of the cryosphere components the most relevant for climate, hydrology, avalanche risk, and water resources. More specifically, monitoring wet snow, i.e. snow that contains liquid water, is important for understanding snowmelt dynamics and other resulting hydrological processes, such as flash floods

Remote sensing has the advantage of providing spatialised information in mountain areas where the density of in situ observations is limited. Optical imaging, such as Sentinel-2 and MODIS, can be used to detect snow-covered areas. Synthetic aperture radars (SAR) have the advantage of being sensitive to the presence of liquid water in the snowpack. Unlike optical images, they are almost independent of atmospheric conditions. Many methods for wet snow detection are based on SAR images and use a ratio calculated with a reference image to determine wet snow pixels. The objectives of this thesis are: (1) to explore the information contained in the SAR signal on a glacier; (2) to further develop methods for detecting wet snow in mountains; (3) to study the spatio-temporal variability of snow cover; (4) to analyse snow-meteorological events of interest for wet snow, such as rain-on-snow events and mineral dust deposition.

In our case, we applied the Magenta algorithm, which uses the RGB space to form a composite image between the reference image and an image at a given date. This algorithm enables binary wet snow maps to be obtained for each SAR acquisition. By exploiting the division of the French mountains into massifs, we have developed a new method that allows us to reconstruct the total snow cover (wet and dry) from Sentinel-1 wet snow data.

We successfully evaluated the accuracy of our estimates for the Vanoise and Queyras mountain ranges from 2015 to 2024 by comparing them with the total snow-covered area estimated by optical sensors with different resolutions on the ground (Sentinel-2 and MODIS).

Rain-on-snow events (ROSE) are of significant interest to monitor wet snow in mountainous areas and have been studied using Sentinel-1 data. Rain-on-snow signals can be detected from SAR images by examining the variability of wet snow distributions by altitude and orientation. Two cases of intense rain-on-snow events were detailed to evaluate a new detection method in the Alps and Pyrenees.

Finally, the snow melt dynamics on the catchment of Saint-Sorlin Glacier were studied using Sentinel-1 data. The three melting phases of the snow pack were retrieved from the backscatter coefficient time series and compared with the liquid water content simulations of the Crocus snow model, on an area outside the glacier. The onset of melting is 5 to 10 days earlier in the model than in the satellite observations. In the accumulation and ablation zones of the glacier, SAR signals were compared with Sentinel-2 optical images to identify the different states of the glacier surface (bare ice, wet snow, dry snow).