

SUIVRE LA FONTE DES NEIGES : des mesures terrains aux satellites

Clarisse Nguyen, 20 août 2025

Dans les Alpes françaises, les données d'observation satellite et des sites de mesures en haute montagne permettent de suivre l'évolution du manteau neigeux. D'une importance majeure pour le suivi des ressources en eau et la prévision d'avalanches, ces données nécessitent d'être analysées pour comprendre le type de neige observée et anticiper les risques naturels.

Un manteau neigeux à surveiller

Le changement climatique, au fil des dernières décennies, a des effets visibles sur la neige avec une baisse générale de sa couverture en basse altitude et une diminution de sa persistance dans presque toutes les régions (Hock et al., 2019). Les conséquences sont notables sur les écosystèmes montagnards (Huss et al., 2017), confrontés aux problématiques socio-économiques que sont la gestion des ressources en eau et la prévention de catastrophes naturelles comme les crues soudaines ou les avalanches (Barnett et al., 2005).

A titre d'illustration, le village de La Bérarde, dans le sud de l'Isère (figure 1), a été fortement impacté par une crue exceptionnelle au cours de la nuit du 20 au 21 juin 2024, causant de nombreux dégâts. Il faut noter parmi les causes de cet événement la formation d'un lac glaciaire et la fragilisation du glacier de Bonne Pierre. Pour autant, l'impact de la fonte du manteau neigeux et d'un épisode de pluie sur la neige ne saurait être écarté (Blanc et al., 2024).

Quelques jours avant la crue, une masse d'air très douce avait accéléré la fonte d'un manteau neigeux assez épais pour la saison. Le 20 juin, ainsi que durant la nuit suivante, d'importants cumuls de précipitations ont été enregistrés, avec une limite pluie-neige particulièrement haute, comprise entre 3.500 et 4.000 mètres. Sur toutes les zones en dessous de ces altitudes les précipitations sont tombées sous forme de pluie qui,



Site instrumenté du Col du Lac Blanc. Photo Clarisse Nguyen



Figure 1. Le village de la Bérarde après la catastrophe avec la carte du département de l'Isère et la position de La Bérarde (en rouge). (Photo de Benoit Lagneux - Le Dauphiné).

cumulée à la fonte de la neige dans les parties enneigées, a généré des apports d'eau importants pour les ruisseaux et rivières en aval. Au cours des années à venir, des événements similaires seront rendus plus probables à cause du changement climatique. Bien que l'évènement n'ait fait aucune victime, il a nécessité l'évacuation par hélicoptère des habitants du village et détruit de nombreuses habitations. Le suivi de la fonte du manteau neigeux et de son contenu en eau liquide permet de prévenir certains risques comme les avalanches ou les fortes crues, semblables à celles qui ont été observées à La Bérarde.

Il est donc essentiel de pouvoir quantifier et mesurer les variations du manteau neigeux à l'aide de différents moyens d'observation. Les mesures in situ permettent de connaître certaines caractéristiques du manteau neigeux en un point donné. Cela permet de suivre l'évolution temporelle de l'enneigement, mais pas sa variabilité spatiale. En complément, la télédétection spatiale, c'est-à-dire l'observation du manteau neigeux par des moyens distants que sont les capteurs à bord de satellites, permet de rendre compte de l'état de la couverture neigeuse et de sa variabilité spatiale. Plusieurs types de technologies ont été développés afin d'obtenir des images et mesures à haute résolution spatiale. Toutefois, l'interprétation des données satellite en milieux de montagne représente encore aujourd'hui un défi scientifique majeur étant donnée la complexité du relief. Ces observations fournissent des mesures indirectes sur la neige mais sont aussi impactées par une multitude d'autres facteurs, tels que la topographie, la pente ou encore la variété de types de sol et de végétation.

La télédétection spatiale

Les satellites embarquent des capteurs radiométriques sensibles à différentes fréquences du spectre électromagnétique qui permettent d'explorer une variété de propriétés du manteau neigeux. Parmi ces capteurs, on distingue les capteurs optiques, fonctionnant pour une gamme de fréquences allant du visible à l'infrarouge, et les capteurs micro-ondes. Les capteurs optiques qui permettent d'obtenir des images de la surface terrestre, semblables aux photos prises depuis l'espace, sont souvent passifs, c'est à dire qu'ils reçoivent un signal lumineux réfléchi par la surface et dépendent des conditions d'ensoleillement et de la couverture nuageuse. Les capteurs fonctionnant dans le domaine des micro-ondes ne sont pas limités par ces conditions car le signal est peu affecté par les nuages. Les instruments dits actifs émettent un signal qui est ensuite réfléchi par la surface terrestre. Le signal reçu par le satellite, dit rétrodiffusé, est quantifié par un coefficient de rétrodiffusion (backscatter coefficient, en anglais), exprimé en décibels (dB), qui constitue la mesure propre à ce type de capteur (figure 2).

Pour l'étude de la neige, le capteur micro-ondes actif qu'est le radar à synthèse d'ouverture SAR (Synthetic Aperture Radar) permet d'explorer de nombreuses propriétés du manteau neigeux, de jour comme de nuit, en présence de nuages ou non. Le SAR, fonctionnant à une fréquence de 5.405 GHz, embarqué sur les satellites de la mission Sentinel-1, produit des images à très haute résolution spatiale (20 m) sur les Alpes françaises. De plus, certaines études théoriques assurent que le SAR est très sensible au contenu en eau liquide du manteau neigeux et semble donc idéal pour la détection de la neige humide.

Sentinel-1

Sentinel-1 est une mission opérée par l'Agence Spatiale Européenne, dans le cadre du programme Copernicus.

Les satellites de la mission Sentinel-1 sont équipés d'un imageur SAR. Depuis 2014, la mission a vu le lancement de quatre satellites Sentinel-1A, Sentinel-1B, Sentinel-1C et Sentinel-1D lancés respectivement en avril 2014, avril 2016, décembre 2024 et novembre 2025. L'idée est d'avoir au moins deux satellites

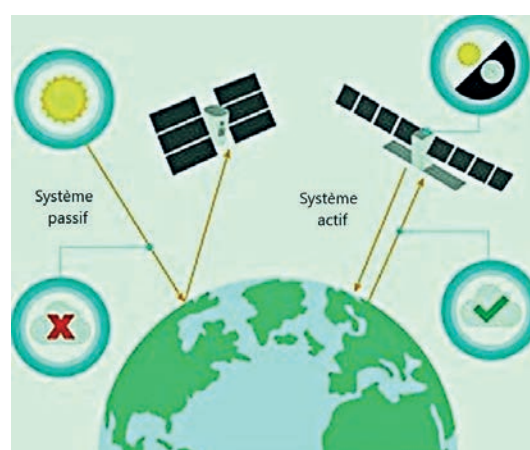


Figure 2. Fonctionnement des capteurs actifs et passifs avec trajet des ondes électromagnétiques en orange (Extrait des ressources pédagogiques de ArcGIS sur le site <https://www.esri.com/arcgisblogproducts/arcgispro/imagery/introduction-to-synthetic-aperture-radar>).

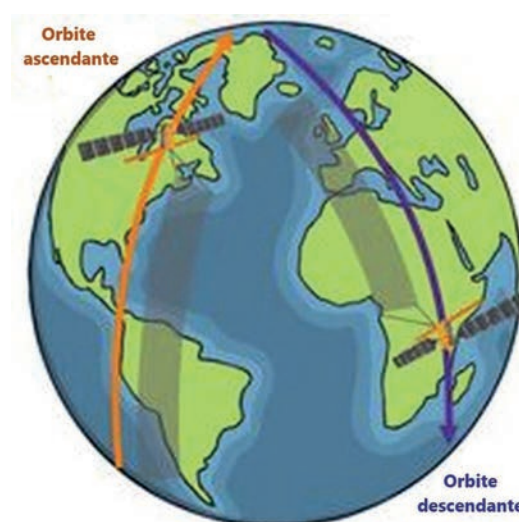


Figure 3. Orbites descendante (violet) et ascendante (orange) des satellites de la mission Sentinel-1 - Clémence Turbé.

1. Web "OSCAR" de l'Organisation Météorologique Mondiale : https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/sentinel_1

opérationnels à chaque instant¹. Les satellites de la mission Sentinel-1 ayant un cycle orbital de 12 jours, le temps de revisite d'une zone est de 6 jours lorsque deux satellites sont en fonctionnement. Pour les Alpes françaises, l'heure de passage se situe autour de 18 h 00 UTC pour l'orbite dite ascendante et autour de 6 h 00 UTC pour l'orbite dite descendante (figure 3). Dans notre cas, il faut retenir que les satellites de la mission Sentinel-1 passent le matin et l'après-midi tous les 6 jours (12 jours dans le cas où un seul satellite fonctionne). Ces deux orbites sont à étudier séparément dans les zones de montagne, compte tenu de leur topographie et de l'angle de mesure du satellite lors de son passage.

Un schéma conceptuel de la fonte du manteau neigeux

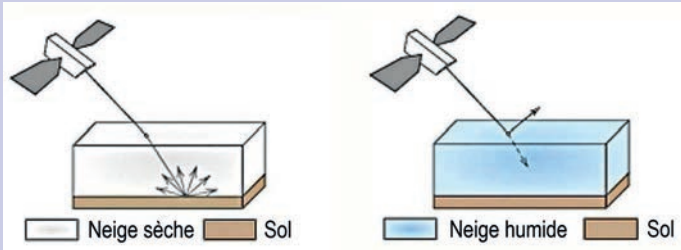
D'après Dingman (2015) ainsi que Marin et al. (2020), un schéma théorique de fonte du manteau neigeux conceptualise la réponse du signal SAR pour différents états de fonte du manteau neigeux, en utilisant les deux orbites. Lorsque les températures sont basses, la neige est plutôt sèche : c'est ce qui est observé durant l'hiver. Le signal SAR varie alors peu et on détermine une moyenne des coefficients de rétrodiffusion pour chaque orbite appelée « référence sèche ». La phase d'humidification commence lorsque les températures passent au dessus de zéro dans la journée mais qu'il regèle durant la nuit. C'est ce qui est observé par les skieurs au printemps : la neige est plus « lourde » en fin de journée.

Cela signifie que la neige contient plus d'eau liquide dans l'après-midi et commence à fondre. La baisse du signal SAR est alors observée uniquement dans l'orbite du soir, à 18 h. Lorsque cette baisse est inférieure à un certain seuil par rapport à la référence sèche, alors la **phase d'humidification** démarre. La **phase de maturation** débute lorsque l'humidité de la neige perdure jusqu'au matin et se traduit par une baisse du signal SAR dans l'orbite du matin. Cela signifie que la fonte globale du manteau neigeux est bien amorcée. Enfin, la **phase de ruissellement** commence lorsque le minimum du signal SAR est atteint. Le manteau neigeux est alors gorgé d'eau et ne peut plus contenir davantage d'eau liquide : il se met à ruisseler (figure 4).

Ce schéma conceptuel a été déterminé empiriquement à partir de travaux d'hydrologie ; simple et facilement applicable, il peut être testé sur une zone d'étude pour prouver son efficacité et faire comprendre ses avantages et ses limites. Afin de valider la théorie, des données précises d'observation du manteau neigeux sont nécessaires. C'est pourquoi, une analyse multi-données a été menée au Col du Lac Blanc.

SENSIBILITÉ DE LA MESURE SAR À LA NEIGE

Le manteau neigeux est constitué de couches successives, avec certaines propriétés comme la taille de leurs grains, leurs contenus en eau liquide, leurs épaisseurs... Au cours d'une saison hydrologique, c'est-à-dire du mois d'août de l'année au mois d'août de l'année suivante, l'épaisseur du manteau neigeux ainsi que les propriétés de chacune des couches qui le composent évoluent et influencent le signal SAR. Les coefficients de rétrodiffusion des surfaces enneigées résultent de différents phénomènes de diffusion.



Phénomènes de diffusion en présence de différents types de neige, pour le signal SAR (M. Gallet, 2024).

Lorsque la neige est humide, le radar capte surtout ce qui se passe à la surface du manteau neigeux. Comme celui-ci contient plus d'eau liquide, il absorbe davantage le signal SAR et devient alors « opaque » : le radar ne voit donc pas ce qu'il y a en dessous. Le signal réfléchi par la surface est donc plus faible. À l'inverse, lorsque la neige est sèche et contient très peu d'eau liquide, le signal SAR traverse facilement toute l'épaisseur du manteau neigeux et peut même atteindre le sol. Dans ce cas, la mesure est tout à fait semblable à celle effectuée avec un sol nu. Pour cette raison il est compliqué de faire la différence entre un sol sans neige et un sol recouvert de neige sèche. La différence entre ces deux types de neige se traduit par une diminution du signal SAR en présence de neige humide. Les variations des coefficients de rétrodiffusion sont à la base des travaux de Nagler et Rott (2000), Nagler et al. (2016) et de Marin et al. (2020), qui permettent de détecter la neige humide.

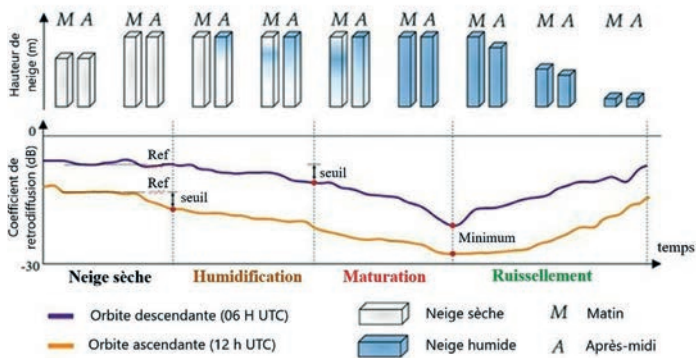


Figure 4. Schéma théorique du comportement des coefficients de rétrodiffusion en fin de saison hydrologique - La colonne de neige du matin correspond à l'orbite descendante, celle de l'après-midi à l'orbite ascendante (Adapté de Gallet, 2024).

Le site instrumenté du Col du Lac Blanc

Le Col du Lac Blanc est un site instrumenté unique dans les Alpes. Au cœur du massif des Grandes Rousses, à 2700 mètres d'altitude, sa situation géographique et sa topographie le rendent particulièrement intéressant pour l'observation du manteau neigeux en altitude. Depuis plus de vingt ans, ce site expérimental est cogéré par Météo-France et l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE). Le Centre d'Études de la Neige (CEN) de Météo-France et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) à Grenoble ont la charge d'entretenir et de gérer une partie des dix instruments présents sur ce site. Les stations de mesures les plus importantes sont les deux stations automatiques de haute montagne « Muzelle » et « Lac Blanc » de type « nivôse » gérées par Météo-France (figure 5). Ces deux stations fournissent les mesures de température de l'air et de hauteur de neige nécessaires pour suivre l'évolution du manteau neigeux.

À ces mesures s'ajoutent les données de rayonnement, à partir desquelles peut être calculée la température de surface de la neige, ainsi que les données des pluviomètres qui fournissent des cumuls de précipitations. En combinant les données de température et les cumuls, il est possible de savoir s'il a plu ou neigé sur le site instrumenté. Les observations du site du Col du Lac Blanc sont disponibles toutes les 10 minutes, ce qui permet d'avoir un suivi régulier et précis sur cette zone d'étude.

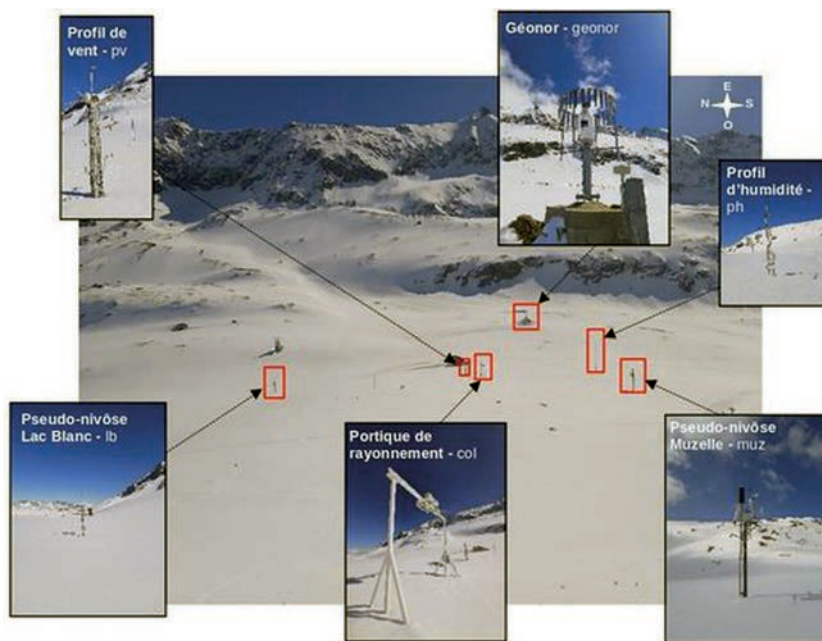


Figure 5. Instruments de mesure sur le site du col du Lac Blanc (Photo Clarisse Nguyen).

Étude du schéma de fonte

La figure 6 récapitule le résultat des mesures effectuées au col du Lac Blanc lors de l'année hydrologique 2021-2022.

À partir de novembre jusqu'à la fin mars, les températures sont basses et la neige est sèche ; le signal SAR varie donc peu pour les deux orbites. C'est sur cette période qu'est calculée la valeur dite « référence sèche » qui correspond à la moyenne des valeurs des coefficients de rétrodiffusion pour chaque orbite. Au total, quatre valeurs de référence sont calculées. Il est donc maintenant important de savoir quelle phase de fonte correspond à la baisse importante du signal SAR à partir du mois d'avril.

Dans un premier temps, les températures de l'air remontent en journée à la mi-avril. La nuit, la surface du manteau neigeux regèle. En effet, les températures de surface minimales sont toujours négatives et le zéro est atteint uniquement en journée. L'examen du signal SAR révèle une baisse visible uniquement dans l'orbite de l'après-midi : c'est le début d'une **phase d'humidification** du manteau neigeux (cadre orange). Puis, ce processus d'humidification devient visible pour l'orbite du matin : les températures de l'air et de la surface augmentent fin avril et mettent progressivement fin à la saison hivernale : c'est la **phase de maturation** du manteau neigeux (cadre rouge). Enfin, début mai, les températures de l'air sont positives de jour comme de nuit ; il n'y a plus de regel nocturne et la saison hivernale touche à sa fin ; c'est la **phase de ruissellement** qui débute lorsque les minima des coefficients de diffusion dans chaque orbite sont atteints (cadre vert). Ainsi, le schéma théorique de Marin et al. (2020) est vérifié, grâce à une évaluation objective des mesures terrain et de l'information des données SAR au cours des différentes phases d'évolution de la neige saisonnière et en particulier lors des épisodes de fonte. Les mêmes comportements se retrouvent durant les dix années pour lesquelles les données d'observations in situ et satellitaires sont disponibles.

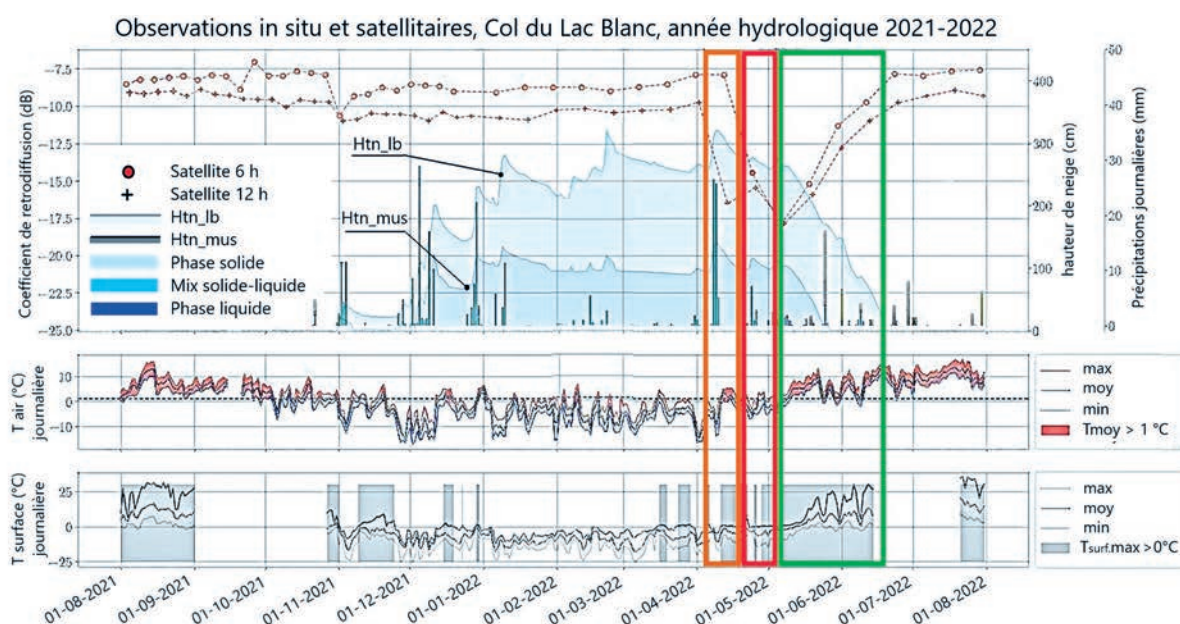


Figure 6. Données d'observations au Col du Lac Blanc pour l'année 2021-2022. Sur le premier graphique, la hauteur de neige mesurée aux deux stations de mesures Muzelle (htn_muz) et Lac Blanc (htn_lb). Sur le premier graphique les précipitations apparaissent sous forme de barres (en bleu clair pour la neige et en bleu foncé pour la neige humide ou la pluie). Les données SAR sont fournies pour l'orbite de 6 h UTC (signe « • ») et pour l'orbite de 18 h UTC (signe « + »). Sur le deuxième graphique sont affichées la température de l'air ainsi que ses valeurs maximales, minimales et moyennes, quotidiennes. Sur le troisième graphique apparaissent la température de surface ainsi que ses valeurs maximales, minimales et moyennes, quotidiennes (Graphique Clarisse Nguyen).

Et maintenant ?

Les schémas conceptuels ont l'avantage de représenter simplement des phénomènes physiques complexes. Ils permettent d'interpréter de façon rapide et claire les observations satellite ainsi que celles des stations météorologiques et nivologiques. Pour autant, il ne faut pas oublier que la réalité n'est pas toujours fidèle à la théorie et qu'il est donc important de valider la théorie par des données de terrain. Une fois cette étape franchie, ces schémas conceptuels peuvent être utilisés pour concevoir et évaluer des modèles numériques du manteau neigeux. À Météo-France tout comme dans d'autres centres météorologiques ou nivologiques, ces modèles servent pour la prévision des risques en montagne et, en particulier, des avalanches (Brun et al., 2012). Ce travail ouvre donc la voie à une nouvelle approche d'évaluation des modèles du manteau neigeux, en vérifiant leur cohérence sur des phases clés de l'enneigement (fonte, maturation, ruissellement). Ces informations sont indispensables pour améliorer les modèles en corrigeant, par exemple, d'éventuels décalages temporels et spatiaux dans le processus de fonte du manteau neigeux. À terme, des modèles plus réalistes et plus précis devraient permettre une meilleure prévision des risques en montagne.

Remerciements

Je remercie Isabelle Gouttevin et Fatima Karbou pour les conseils qu'elles m'ont prodigués tout au long de mon stage, au Centre d'Études de la Neige à Grenoble.



Bibliographie

- Barnett, P., Jennifer, T., Adam, C. and Lettenmaier, D. R. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), pp. 303-309.
- Blanc, A. et al. (2024). *Rétro-analyse de la crue du torrent des Étançons du 21 juin 2024*. Diss. HAL id. hal-04865442, ONF-RTM.
- Brun, E., Vionnet, V., Morin, S., Boone, A., Martin, E., Faroux, S., Le Moigne, P., Willemet, J.-M. (2012). Le modèle de manteau neigeux Crocus et ses applications. *La Météorologie*. 76, pp. 44-54.
- Carlo, M., Bertoldi, G., Premier, V., Calegari, M., Brida, C., Hürkamp, K., Tschiersch, J. Zebisch, M. et Notarmicola, C. (2020). Use of Sentinel-1 radar observations to evaluate snowmelt dynamics in alpine regions. *The cryosphere* 14(3), pp 835-956.
- Dingman, S. (2015). *Physical hydrology*, 643 p., Long Grove, Illinois, Waveland Press.
- Gallet, M. (2024). *Apprentissage automatique pour la caractérisation et l'analyse de la dynamique de la cryosphère par imagerie satellitaire radar*. Diss. HAL id. tel-04968551, Université Savoie Mont Blanc.
- Hock, R. et Rasul, G. (2019). High mountain areas. *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, Cambridge University Press pp. 131-202.
- Huss, M., Boolhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J.J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D.R., Greenwood, G., Mark, B.G., Milner, A.M., Weingartner, R. and Winder M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, 5(5), pp. 418-435.
- Nagler, T. et Rott, H. (2000). Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), pp 754-765.
- Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., and Hetzenecker, M. (2016). Advancements for snowmelt monitoring by means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4), p. 348.