|  |
| --- |
| Laboratoire (et n° de l’unité) dans lequel se déroulera la thèse : **CNRM - UMR 3589** |

|  |
| --- |
| Titre du sujet de thèse proposé : **Assimilation de données satellitaires Sentinel-1 pour le suivi de l’enneigement en montagne** |

|  |
| --- |
| **Nom et statut (PR, DR, MCf, CR, ...) du (des) responsable(s) de thèse (préciser si HDR) :** |
| Directrice de thèse : Fatima Karbou (DR2, HDR) (CNRM/CEN) | Autres responsable de la thèse : Matthieu Lafaysse (CNRM/CEN) |

**Résumé du sujet de thèse** : La neige en montagne joue un rôle déterminant dans le système climatique par sa capacité à modifier le transfert d’énergie et de masse entre l’atmosphère et la surface. De part la complexité du milieu montagne, la neige est sensible à différents facteurs incluant la variation des conditions météorologiques et celle du climat; elle est tout naturellement associée à des enjeux à très fort impacts socio-économiques parmi lesquels on peut citer la prévision du risque d’avalanche, la gestion des ressources en eau et la surveillance des écosystèmes montagnards. L’hétérogénéité induite par le relief rend la prévision nivo-météorologique sur ces territoires particulièrement difficile. A cela s’ajoute une forte demande sociétale de disposer de prévisions fiables de l’enneigement et du risque d’avalanche avec un niveau d’exigence sans cesse en accroissement tant sur la qualité des prévisions que sur leur forme et leur étendue géographique (communes exposées aux risques, stations d’hiver, surveillance des routes, des forêts, pratiquants de montagnes, ...). Actuellement, les outils opérationnels existants sont à l’échelle des massifs montagneux, et ne permettent pas un suivi de la neige saisonnière à des échelles spatiales plus fines. Le changement climatique peut générer une modification de la nature de l’aléa avalancheux. Dans ce contexte, l'amélioration des connaissances et des outils de modélisation fine du manteau neigeux concernant les processus de neige humide, qui conduisent à l'occurrence de déclenchement spontanés d'avalanches de neige humide, en hausse sous l'effet de l'évolution climatique et pour lesquels les approches classiques de prévision peuvent être mises en défaut. Les satellites Sentinel-1, opérés par l’Agence spatiale européenne dans le cadre du programme Copernicus, permettent désormais d’étudier le manteau neigeux à des résolutions spatiales et un temps de revisite inédits. Les images SAR (pour Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 sont acquises par télédétection active en bande C et comportent en chaque pixel une valeur d’amplitude et de phase. L’imagerie SAR permet le suivi de l’étendue de neige humide, offrant un moyen unique d’évaluer avec précision les processus d’humidification dans les modèles d’évolution de la neige.

L'objectif principal de ce projet est de réaliser l’assimilation des observations satellites Sentinel-1 dans le modèle de neige Crocus. Une telle assimilation rendra possible le suivi régulier de l’étendue de neige humide sur les massifs Français, permettra de réduire les incertitudes du modèle notamment pendant la période de la fonte de la neige, permettra de mieux décrire l’état du manteaux neigeux et d’améliorer la prévision du risque d’avalanche qui en découle. Ce travail de recherche implique une composante d’évaluation des sorties du modèle Crocus (avec et sans assimilation) permettant un suivi des performances du modèle à différentes échelles spatiales. Ce projet de thèse s’inscrit parfaitement dans le cadre des travaux actuellement menés au CEN pour le développement de la nouvelle chaîne de modélisation du manteau neigeux reposant sur une assimilation ensembliste des observations satellites d'intérêt pour la neige (objectif COP).

Des travaux passés et en cours permettent d’ores et déjà de combiner de façon ensembliste l’information des modèles (renseignant sur l’état initial du sol/neige/atmosphère) avec celle des observations de télédétection spatiale du manteau neigeux grâce à l’utilisation d’algorithmes d’assimilation de données adaptés à cette problématique (Charrois et al., 2016, Cluzet et al. 2021). L’enjeu est de mieux estimer l’état du manteau neigeux et son évolution dans le temps par la réduction des incertitudes des simulations de l’enneigement du système ensembliste et par une meilleure représentation spatiale et temporelle de la variabilité de la neige. Par ailleurs, plusieurs travaux ont porté sur des améliorations méthodologiques pour inverser une information pertinente sur la neige à partir des observations Sentinel-1. Avec notamment le suivi de l’enneigement par le biais des lignes de fonte de neige par Sentinel-1 à l’échelle des massifs (Karbou et al. 2021a), la mise en œuvre d’une méthode de seuillage adaptatif des observations SAR pour le suivi de la neige humide (Karbou et al. 2021b), l’examen de l’apport de nouvelles méthodes de segmentation pour le suivi de la neige humide par imagerie satellitaire (Guiot et al. 2022, Karbou et al. 2021c). Des travaux préliminaires visant l’assimilation des coefficients de rétrodiffusion et des produits neige humide dans le modèle Crocus ont également été entrepris (Cap et al. 2022, thèse Gaelle Veyssière, Veyssière et al. 2019).

*Principales étapes de la thèse:*

**A : Générer les diagrammes de lignes de fonte de neige:** Pour tous les massifs français, de 2015 à nos jours. L’enjeu de cette étude est, entre autres possibilités, d’identifier l’altitude et les dates d’apparition de la neige humide, ainsi que les altitudes et les dates de retrait de la neige en période de fonte. Il est également possible d’observer l’étendue des zones couvertes par la neige humide en période hivernale (suite à des événements de pluie sur neige par exemple). Les diagrammes des lignes de fonte permettent, à l'échelle spatiale choisie comme l'échelle des massifs, de décrire les variations de la neige humide par dates, altitudes et orientations.

**B : Assimilation des données satellitaires:** Par le biais des cartes de neige humide et des diagrammes de ligne de fonte de la neige. Ces derniers sont directement comparables aux sorties du modèle Crocus qui opère les simulations à l'échelle des massifs. Ce travail permettra d’identifier les points d’accord et de désaccord entre observations et modèle (dates et altitude d’apparition de la neige humide, dates et altitude de retrait de la neige, …) et également un retour d’expérience pour documenter des situations d'intérêt du point de vue activité avalancheuse de neige humide.

**C : Evaluations:** Il s’agit d’évaluer les simulations d’enneigement en sortie du modèle Crocus et de la stabilité du manteau neigeux après assimilation des produits neige humide Sentinel-1 par approche ensembliste (Cap et al. 2022). L’apport des données satellitaires devrait permettre de mieux simuler les situations de neige humide et nous permettre de mieux prévoir les situations à risque avalancheux. L'enjeu de cette action est de vérifier cette hypothèse. L’impact de l’assimilation sera évalué sur des situations d'intérêt par comparaison à la version de référence du modèle sans assimilation. Une attention particulière sera portée sur les périodes de fonte pendant lesquelles le potentiel des produits Sentinel-1 est à son maximum. Le travail sur les données Sentinel-1 sera accompagné par des études de sensibilité avec l’assimilation des produits optiques de neige (Sentinel-2 et VIIRS). Notre approche basée sur l’exploitation des lignes de fonte (ou des lignes de neige pour les capteurs optiques) permettra d’assimiler différentes sources de données y compris avec des résolutions spatiales différentes.

Durant son travail de thèse, le doctorant se reposera sur tous les développements déjà en cours de développement autour de la rénovation complète de la chaîne de simulation du manteau neigeux en montagne (développement d’un module de transport et d’assimilation distribuée - thèses de Matthieu Baron et Ange Hadjeri, développement d’un système d’assimilation météo - thèse Matthieu Vernay, projet APR SENSASS)

**Références:**

Cap, E., F. Karbou, M. Lafaysse, M. Fructus, M. Dumont (2022), Towards the assimilation of snow products derived from Sentinel-1/Sentinel-2 in the Crocus snow evolution model, ESA Living Planet Symposium, Bonn, 23-27 Mai 2022.

Charrois, L., Cosme, E., Dumont, M., Lafaysse, M., Morin, S., Libois, Q., and Picard, G.: On the assimilation of optical reflectances and snow depth observations into a detailed snowpack model, The Cryosphere, 10, 1021–1038, <https://doi.org/10.5194/tc-10-1021-2016>, 2016.

Cluzet, B., Lafaysse, M., Cosme, E., Albergel, C., Meunier, L.-F., and Dumont, M.: CrocO\_v1.0: a particle filter to assimilate snowpack observations in a spatialised framework, Geosci. Model Dev., 14, 1595–1614, https://doi.org/10.5194/gmd-14-1595-2021, 2021.

Guiot, A., F. Karbou, G. James, Ph. Durand (2022), Use of different segmentation methods and Sentinel-1 SAR images for wet snow monitoring, Frontiers in Remote Sensing, soumis.

Karas, A. , F. Karbou, S. Giffard-Roisin, P. Durand and N. Eckert (2021), Automatic Color Detection-Based Method Applied to Sentinel-1 SAR Images for Snow Avalanche Debris Monitoring, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-17, 2022, Art no. 5219117, doi: 10.1109/TGRS.2021.3131853.

Karbou, F., Gouttevin, I., and Durand, P. (2021a). Spatial and temporal variability of wet snow in the french mountains using a color-space based segmentation technique on sentinel-1 Sar images. Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS , 5586–456, 5588doi:10.1109/IGARSS47720.2021.9554725457

Karbou, F., James, G., Durand, P., and Atto, A. M. (2021b). Thresholds and distances to better detect wet snow over mountains with sentinel-1 image time series. Change Detection and Image Time Series Analysis 1: Unsupervised Methods doi:https://doi.org/10.1002/9781119882268.ch5460

Karbou, F., Veyssière, G., Coléou, C., Dufour, A., Gouttevin, I., Durand, P., et al. (2021c). Monitoring Wet Snow Over an Alpine Region Using Sentinel-1 Observations. Remote Sensing 13, 381. doi:10.462, 3390/rs13030381

Veyssière, G., F. Karbou, S. Morin, M. Lafaysse, V. Vionnet (2019), Evaluation of Sub-Kilometric Numerical Simulations of C-Band Radar Backscatter over the French Alps against Sentinel-1 Observations. *Remote Sens.* 2019, *11*, 8. https://doi.org/10.3390/rs11010008