



## ANNEXE 2

### Présentation du projet de thèse

Descente d'échelle météorologique et applications nivologiques à enjeux

**Résumé pour un public non scientifique (saisie libre de 1000 caractères max. impérativement en français)**

*Ce paragraphe pourra être communiqué, sauf avis contraire du porteur de projet.*

La connaissance et la prévision des conditions météorologiques et de l'enneigement dans les massifs montagneux, sont essentielles à de nombreux acteurs scientifiques et socio-économiques (prévision du risque d'avalanches, production d'énergie, enneigement artificiel...). Au CNRM, un outil dédié a été élaboré dans cet objectif : la chaîne S2M<sup>1</sup>. Elle fournit des renseignements à l'échelle des massifs montagneux considérés comme homogènes, et discrétisés selon l'altitude et la pente. Cette configuration ne permet pas de rendre compte de la variabilité des conditions nivo-météorologiques à plus fine échelle, pourtant déterminantes dans certaines situations à enjeux.

Le projet proposé vise à pallier ces limitations, en contribuant à un futur système de prévision nivo-météorologique à haute résolution spatiale (250 m), basé sur le modèle AROME (1.3 km) et sa prévision d'ensemble. Il s'attachera à réaliser une descente d'échelle d'AROME vers la résolution cible, à laquelle le manteau neigeux sera simulé en tenant compte d'effets locaux liés notamment au transport de neige par le vent. Les apports de ces développements seront évalués pour différents enjeux.

**Présentation scientifique du projet de recherche (objectifs, méthode, ...) (saisie libre de 5000 caractères max.) :**

Objectifs :

Le projet de recherche s'attachera à :

-i) l'exploration et la mise en oeuvre de méthodes de descente d'échelle appliquées aux champs météorologiques d'AROME et de sa prévision d'ensemble, pour atteindre une résolution cible de 250 m sur les régions de montagne françaises, en particulier les Pyrénées

-ii) la prise en compte des effets de processus de fine échelle spatiale impactants pour la modélisation des conditions nivo-météorologiques à 250 m, notamment la redistribution de neige par le vent

-iii) l'analyse de l'apport des points (i) et (ii), sur la modélisation du manteau neigeux et en particulier sur la prévision du risque d'avalanches. L'impact sur les enjeux hydrologiques pyrénéens sera abordés via des collaborations avec des projets en cours sur les bassins de Bassiès et Oule (Région Occitanie)

Méthodes :

La littérature scientifique fait état de nombreuses méthodes de descente d'échelle de champs météorologiques, développées et mises en oeuvre pour pallier au manque de données observationnelles et aux limitations des simulations météorologiques de méso-échelles en contexte montagneux (e.g. Fiddes and Gruber, 2014 ; Bavay et al., 2014 ; Helbig

1 S2M : chaîne de modèles développés au CNRM : Safran/Surfex-ISBA-Crocus/Meptra

et al., 2012 ; Liston and Elder, 2006 ; Steinacher et al., 2006). Ces approches sont adaptées à des échelles spatiales variables, et couvrent une gamme importante de complexité allant de paramétrisations statistiques appuyées sur l'information topographique disponible (e.g. Liston and Elder, 2007 ; Winstral et al., 2017), à de l'apprentissage ou de l'adaptation dynamique de modèles physiques à la résolution spatiale cible (Helbig et al., 2017 ; Vionnet et al., 2017). Cependant, ces méthodes n'ont, à notre connaissance, jamais été adaptées et mises en oeuvre pour un passage de l'échelle kilométrique à l'échelle hectométrique, sur de vastes zones spatiales (plus de 200 000 km<sup>2</sup> pour les Pyrénées et Alpes françaises), et de façon conjointe sur l'ensemble des champs météorologiques nécessaires à une application nivologique, particulièrement sensible au forçage atmosphérique. Dans le cadre de cette problématique spécifique, une analyse critique des approches existantes sera réalisée, et un système original sera développé, s'appuyant sur l'existant tout en circonvolvant une partie de ses limites. Des collaborations en cours avec l'Université du Saskatchewan (V. Vionnet) et amorcées avec le SLF Davos (N. Helbig, F. Gerber) bénéficieront à ce travail. Il s'appuyera aussi sur des méthodes simples déjà mises en oeuvre dans le contexte nivologique sur des zones limitées au CNRM/CEN (Revuelto et al., 2018).

Une partie des effets du transport de la neige par le vent est prise en compte dans la chaîne S2M actuelle. Notamment, l'effet du transport sur la compaction des couches de neige superficielles, et leurs propriétés, y est représenté (Vionnet et al., 2013). Est aussi calculé un indice de mobilité qui, complété par une information sur la vitesse du vent, permet un diagnostic de la neige érodée et redéposée sur des pentes opposées dans la géométrie conceptuelle des massifs (Vionnet et al., 2018). Cette approche ne permet cependant pas la redistribution de la neige transportée d'un point de grille vers un ou plusieurs autres dans une géométrie réelle et sous l'influence de la topographie locale de plus fine échelle. Cette limite doit être surmontée pour atteindre une simulation distribuée du manteau neigeux à 250m, où l'effet du transport de neige par le vent peut être prépondérant. Dans cet objectif, le doctorant pourra s'appuyer sur le modèle de transport de la neige en suspension turbulente et saltation développé pour le modèle de très fine échelle Méso-NH (Vionnet et al., 2014), sur le schéma d'advection correspondant. Des approches empiriques abondamment utilisées dans la littérature (Winstral et al., 2002 ; Schön et al., 2018), mais peu adaptées à des simulations continues dans le temps, pourront servir de référence dans l'évaluation des résultats de la nouvelle approche.

Enfin, les apports des développements ci-dessus seront évalués par rapport à la chaîne existante, par confrontation à des jeux de données de nature diverse, et adaptés aux échelles spatiales et à la nature des processus considérés (atmosphère et neige, effets du transport de neige par le vent, haute montagne). Nous nous appuyerons sur les données ponctuelles du réseau nivo-météorologique des Pyrénées et des Alpes (e.g. Quéno et al., 2016) mais aussi sur les bilans de masse glaciologiques (e.g. Vionnet et al., in prep.) et les observations du réseau CRYOBSCLIM<sup>2</sup> documentant la haute altitude. Une grande importance sera accordée aux données spatialisées, particulièrement adaptées à l'évaluation de simulations distribuées. Seront utilisées en particulier des cartes de hauteur de neige à haute résolution spatiale développées sur les Pyrénées (thèse en cours de César Deschamp-Berger, co-direction CNRM/CEN et CESBIO ; Marti et al., 2016), des estimations de fraction enneigées vues par satellites optiques (e.g. Masson et al., 2018), des indicateurs spatialisés de persistance du couvert nival (Wayand et al., 2018), et tous les produits à valeur ajoutés de l'Animation Régional Theia Occitanie (dont le CNRM est membre) d'intérêt pour le sujet. En outre, l'évaluation de l'apport pour la prévision d'avalanche pourra passer par le croisement des distributions de neige simulées, avec des dépôts d'avalanches estimés par imagerie SAR (Karbou et al., 2018) et les données de l'Enquête Permanente sur les Avalanches (collaboration avec IRSTEA). Enfin, des collaborations avec le projet OPCC<sup>3</sup> PIRAGUA et avec le laboratoire CESBIO, verront l'évaluation et la valorisation des données

2 <https://cryobsclim.osug.fr>

3 <https://opcc-ctp.org>

atmosphériques à haute résolution spatiale produites, pour des applications hydrologiques dans les bassins de l'Oule et de Bassies.

**Liens du sujet de thèse avec les activités de l'unité de recherche d'accueil (saisie libre de 1000 caractères max.) :**

Le projet de thèse s'inscrit dans la continuité de travaux menés depuis plusieurs années au CNRM (collaboration GMAP et CEN) visant à construire un nouveau système de prévision nivo-météorologique à haute résolution spatiale, ensembliste, et assimilant des observations satellites. Ces travaux portent sur :

- l'assimilation de données satellites pour la simulation du manteau neigeux en contexte ensembliste (Charrois et al., 2016 ; Cluzet et al., 2018, Lafaysse et al., 2017)
- l'analyse du potentiel des champs météorologiques AROME pour la simulation du manteau neigeux (Queno et al., 2016 ; Dombrowski et al., 2017 ; Gouttevin et al., 2018)
- l'exploitation de données satellites à haute résolution spatiale pour la caractérisation du manteau neigeux et l'évaluation de modèles de neige distribués (Revuelto et al., 2018, Karbou et al., 2018, Marti et al., 2016)

Le projet de thèse s'appuyera sur des données collectées aux sites pilotes du CNRM/CEN (Guyomar'ch et al., 2018 ; Dombrowski et al., 2017). Il bénéficiera de la dynamique du groupe transverse « Météo de Montagne et Neige » et du collectif TeamX<sup>4</sup> sur la dynamique fine échelle en montagne.

### **Références :**

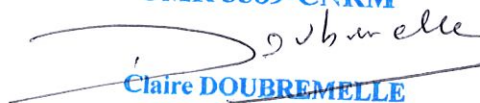
- Bavay, M., & Egger, T. (2014). Meteolo 2.4. 2: a preprocessing library for meteorological data. *Geoscientific Model Development*, 7(6), 3135-3151.
- Charrois, L., Cosme, E., Dumont, M., Lafaysse, M., Morin, S., Libois, Q., & Picard, G. (2016). On the assimilation of optical reflectances and snow depth observations into a detailed snowpack model. *The Cryosphere*, 10, 1021-1038.
- Cuzet, B., Revuelto, J., Lafaysse, M., Dumont, M., Cosme, E. & Tuzet, F. (2018). Assimilation of MODIS observations of snowpack surface properties into one year of spatialized ensemble snowpack simulations at a field site in the French Alps. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, October 07-12.
- Dombrowski-Etchevers, I., Vionnet, V., & Quéno, L. (2017) Pertinence des prévisions météorologiques à l'échelle kilométrique pour la modélisation du manteau neigeux en montagne. *La Météorologie, Rubrique: Prévision*.
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Mérindol L., & Martin E. (1999). A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 45, 469-484.
- Fiddes, J., & Gruber, S. (2014). TopoSCALE v. 1.0: downscaling gridded climate data in complex terrain. *Geoscientific Model Development*, 7(1), 387-405.
- Gouttevin, I., Vionnet, V., Karbou, F., Merzisen, H. & Deliot, Y. (2018). To the origin of the temperature bias in the AROME numerical weather model : investigations at a high altitude site. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, October 07-12.
- Helbig, N., & Löwe, H. (2012). Shortwave radiation parameterization scheme for subgrid topography. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D3)

4 TEAMx : A coordinated effort to investigate Transport and Exchange Processes in the Atmosphere over Mountains-Experiment.

- Helbig, N., Mott, R., Herwijnen, A., Winstral, A., & Jonas, T. (2017). Parameterizing surface wind speed over complex topography. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2), 651-667.
- Karbou, F., Coleou, C., Lefort, M., Deschatres, M., Eckert, N., Martin, M., Charvet, G. & Dufour, A. (2018) Monitoring avalanche debris in the French Mountains using SAR observations from Sentinel 1 satellites. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, October 07-12.
- Lafaysse, M., Cluzet, B., Dumont, M., Lejeune, Y., Vionnet, V., & Morin, S. (2017). A multiphysical ensemble system of numerical snow modelling, *The Cryosphere*, 11, 1173-1198, doi :10.5194/tc-11-1173-2017, 2017.
- Liston, G. E., & Elder, K. (2006). A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 217-234.
- Liston, G. E., Haehnel, R. B., Sturm, M., Hiemstra, C. A., Berezovskaya, S., & Tabler, R. D. (2007). Simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D. *Journal of Glaciology*, 53(181), 241-256.
- Marti, R., Gascoin, S., Berthier, E., Pinel, M. D., Houet, T., & Laffly, D. (2016). Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery. *The Cryosphere*, 10(4), 1361-1380.
- Masson, T., Dumont, M., Mura, M. D., Sirguey, P., Gascoin, S., Dedieu, J. P., & Chanussot, J. (2018). An Assessment of Existing Methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data. *Remote Sensing*, 10(4), 619.
- Quéno L, Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M. & Karbou F (2016). Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric resolution meteorological forecasts, *The Cryosphere*, 10, 1571-1589, doi:10.5194/tc-10-1571-2016.
- Revuelto, J., Lecourt, G., Lafaysse, M., Zin, I., Charrois, L., Vionnet, V., ... & Morin, S. (2018). Multi-Criteria Evaluation of Snowpack Simulations in Complex Alpine Terrain Using Satellite and In Situ Observations. *Remote Sensing*, 10(8), 1171.
- Schön, P., Naaim-Bouvet, F., Vionnet, V., & Prokop, A. (2018). Merging a terrain-based parameter with blowing snow fluxes for assessing snow redistribution in alpine terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 155, 161-173.
- Steinacker, R., Ratheiser, M., Bica, B., Chimani, B., Dorninger, M., Gepp, W., Lotteraner, C., Schneider, S. & Tschannett, S. (2006). A mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain. *Monthly Weather Review*, 134(10), 2758-2771.
- Vionnet, V., Guyomarc'h, G., Naaim Bouvet, F., Martin, E., Durand, Y., Bellot, H., Bel, C., & Puglièse, P. (2013). Occurrence of blowing snow events at an alpine site over a 10-year period: observations and modelling. *Adv. Water Resour.* 55, 53–63.
- Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Quéno L., Seity Y., & Bazile, E. (2016) Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps : evaluation and applications for snowpack modelling, *J. Hydrometeor.*, doi:10.1175/JHM-D-15-0241.1.
- Vionnet, V., Guyomarc'h, G., Lafaysse, M., Naaim-Bouvet, F., Giraud, G., & Deliot, Y. (2018). Operational implementation and evaluation of a blowing snow scheme for avalanche hazard forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, 147, 1-10.
- Vionnet, V., Martin, E., Masson, V., Guyomarc'h, G., Bouvet, F. N., Prokop, A., ... & Lac, C. (2014). Simulation of wind-induced snow transport and sublimation in alpine terrain using a fully coupled snowpack/atmosphere model. *Cryosphere*, 8, p-395.
- Vionnet, V., Martin, E., Masson, V., Lac, C., Bouvet, F. N., & Guyomarc'h, G. (2017). High-Resolution Large Eddy Simulation of Snow Accumulation in Alpine Terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 11-005.
- Vionnet, V., Six, D., Auger, L., Lafaysse, M., Quéno, L., Réveillet, M., Dombrowski-Etchevers, I., Thibert, E., & Dumont, M. : Influence of precipitation datasets on sub-kilometer simulations of snowpack and glacier winter mass balance in alpine terrain. In prep.
- Wayand, N. E., Marsh, C. B., Shea, J. M., & Pomeroy, J. W. (2018). Globally scalable alpine snow metrics. *Remote Sensing of Environment*, 213, 61-72.
- Winstral, A., Elder, K. & Davis, R.E. (2002). Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters. *J. Hydrometeor.*, 3, 524–538, doi: 10.1175/1525-7541(2002)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2.

Winstral, A., Jonas, T., & Helbig, N. (2017). Statistical downscaling of gridded wind speed data using local topography. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 335-348.

**La Directrice-Adjointe  
UMR 3589-CNRM**

  
**Claire DOUBREMELLE**

