

	<b>Jordi Bolibar NAVARRO (01/10/2017 - 29/10/2020)</b>
	Evolution passée et future des glaciers alpins français sous changement climatique : une approche de modélisation glacio-hydrologique avec deep learning
	Encadrants : Antoine Rabatel (IGE), Isabelle Gouttevin (CEN, Météo-France), Éric Sauquet (HyBV, RiverLy, INRAE)
	Université Grenoble Alpes, École doctorale Sciences de la terre, de l'environnement et des planètes (Grenoble, Isère, France)

### Mise au point d'un modèle d'évolution des glaciers. Intégration des projections d'évolution des contributions glaciaires dans le modèle hydrologique J2000 sur l'Arvan (sous-affluent du Rhône).

#### Diagnostic sur les évolutions passées et futures des glaciers à l'échelle des Alpes françaises.

Les Alpes européennes sont parmi les régions du monde les plus touchées par le changement climatique, avec des taux de recul des glaciers parmi les plus élevés. Les interactions à long terme entre la société, les écosystèmes de montagne et les glaciers de la région soulèvent d'importantes questions sur l'évolution future des glaciers et les impacts environnementaux et socio-économiques qui en découlent. Afin d'évaluer correctement la réponse régionale des glaciers des Alpes françaises au changement climatique, il est nécessaire de disposer d'outils de modélisation adéquats. Dans ce travail, nous explorons de nouvelles façons d'aborder à la fois l'évolution des glaciers et la modélisation glacio-hydrologique à l'échelle régionale. La modélisation de l'évolution des glaciers a traditionnellement été réalisée à l'aide d'approches empiriques ou physiques, dont l'optimisation est de plus en plus difficile compte tenu de la quantité croissante de données disponibles. Ici, nous présentons, à notre connaissance, le premier effort jamais entrepris pour appliquer l'apprentissage profond (i.e. des réseaux neuronaux artificiels profonds) pour simuler l'évolution des glaciers. Comme les système climatique et glaciaire sont tous deux fortement non linéaires, les modèles traditionnels linéaire de bilan de masse offrent une représentation limitée des interactions entre le climat et les glaciers. Nous montrons comment des non-linéarités importantes liées au bilan de masse des glaciers sont capturées par une méthode d'apprentissage profond, ce qui améliore considérablement les performances des modèles par rapport aux méthodes linéaires. Cette nouvelle méthode a été appliquée pour la première fois dans une étude visant à reconstruire les changements annuels du bilan de masse de tous les glaciers des Alpes françaises pour la période 1967-2015. En utilisant des réanalyses climatiques, des données topographiques et des inventaires de glaciers, nous démontrons comment une telle approche peut être utilisée avec succès pour reconstruire les changements de bilan de masse à grande échelle à partir d'observations. Cette étude a également apporté de nouveaux éclairages sur l'évolution des glaciers dans les Alpes françaises au cours du dernier demi-siècle, confirmant les taux de bilan de masse observés plutôt neutres dans les années 1980 et montrant une accélération bien marquée de la perte de masse à partir des années 2000. On constate des différences importantes entre les régions, le massif du Mont-Blanc présentant la perte de masse la plus faible et le Chablais étant le plus touché. Ensuite, nous avons appliqué ce cadre de modélisation pour simuler l'évolution future de tous les glaciers de la région selon de multiples scénarios de changement climatique (N=29). Nos estimations indiquent que la plupart du volume de glace dans la région sera perdue d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, indépendamment des scénarios climatiques futurs. Nous prévoyons des pertes moyennes de volume des glaciers de 74%, 80% et 88% dans le cadre des scénarios RCP 2.6 (n=3), RCP 4.5 (n=13) et RCP 8.5 (n=13), respectivement. D'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, les Alpes françaises seront en grande partie libres de glace, avec des glaciers ne subsistant que dans les massifs du Mont-Blanc et du Pelvoux.



*Extensions et épaisseurs (échelle de couleurs, en m) des glaciers d'Argentière et de la Mer de Glace simulées entre 2020 et 2100 sous le scénario climatique « modéré » RCP 4.5. L'échelle de couleur représente les épaisseurs de glace.*

**Financement :**

INRAE, Labex OSUG@2020 (Investissement d'Avenir, ANR ANR10 LABX56), région Auvergne-Rhône-Alpes (projet BERGER), le projet VIP Mont-Blanc (ANR-14 CE03-0006-03) and le CNES (projets KALEIDOS-Alpes et ISIS)

**Pour plus d'information :**

Jordi Bolibar, Antoine Rabatel, Isabelle Gouttevin, and Clovis Galiez. A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps: 1967–2015. *Earth System Science Data*, 12(3):1973–1983, September 2020.

Jordi Bolibar, Antoine Rabatel, Isabelle Gouttevin, Clovis Galiez, Thomas Condom, and Eric Sauquet. Deep learning applied to glacier evolution modelling. *The Cryosphere*, 14(2):565–584, February 2020.

Christian Vincent, Vincent Peyaud, Olivier Laarman, Delphine Six, Adrien Gilbert, Fabien Gillet-Chaulet, Etienne Berthier, Samuel Morin, Deborah Verfaillie, Antoine Rabatel, Bruno Jourdain, and Jordi Bolibar. Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI<sup>e</sup> siècle : Argentière et Mer de Glace. *La Météorologie*, (106):49, 2019.

Jordi Bolibar Navarro. Past and future evolution of French Alpine glaciers in a changing climate: a deep learning glacio-hydrological modelling approach. Glaciology. Université Grenoble Alpes, 2020. English, <https://theses.hal.science/tel-03052063>