



CNRM UMR 3589

# Quels outils pour appréhender les évolutions des composantes amont du cycle de l'eau ?

---

**Isabelle Gouttevin (CNRM/CEN : Centre d'Etudes de la Neige)**

Sur la base de travaux du CEN (S. Morin, M. Lafaysse, M. Vernay, ...)

de Météo-France (R. Samacoits, J-M Soubeyroux, H Dumas,.. ), de l'INRAE et l'IGE (M. Menegoz, J. Beaumet, J. Bolibar)

Gap, 11 Mars 2021



**INRAE**

# Plan

---

- 1 – Observation (essentiellement in-situ : météo de montagne et neige)  
Tendances observées d'enneigement dans l'Arc Alpin
- 2 – La réanalyse Nivo-météorologique S2M (« SAFRAN-Crocus »)  
Pour le futur : projections ADAMONT
- 3 – Et les glaciers ?

*NOTA : - objectif : état des lieux  
- exposé non-exhaustif !*



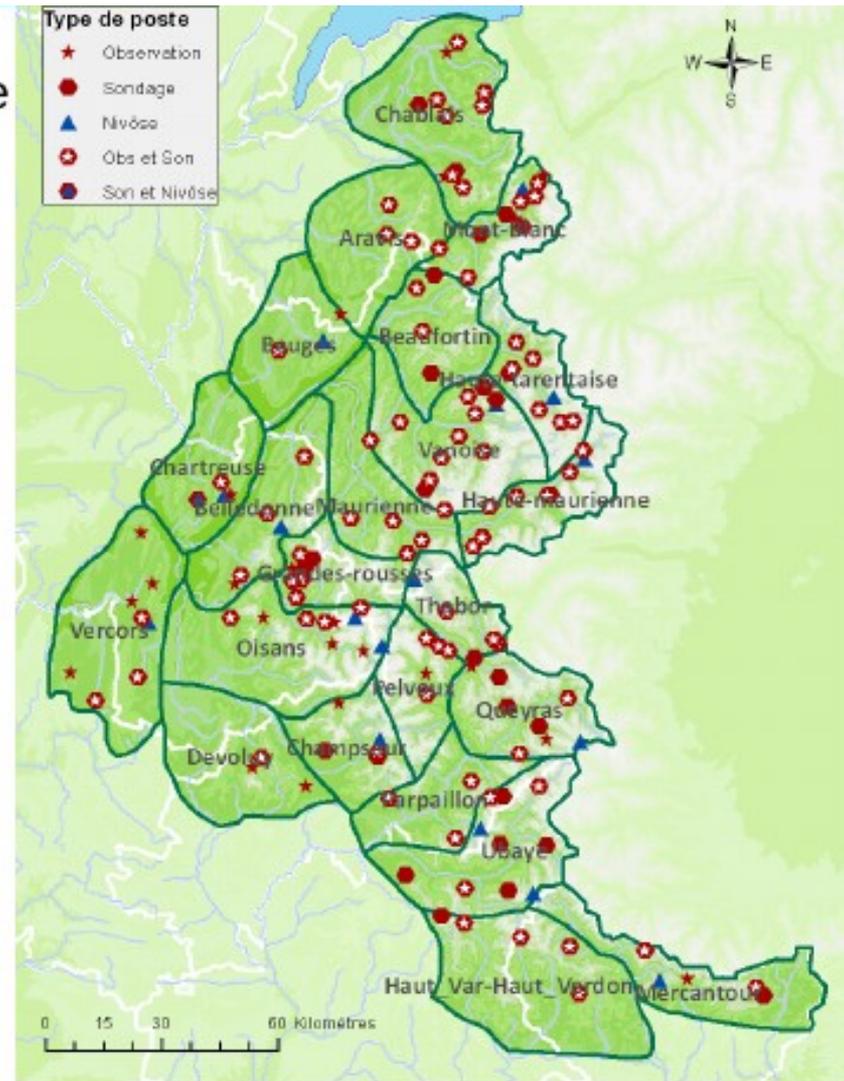
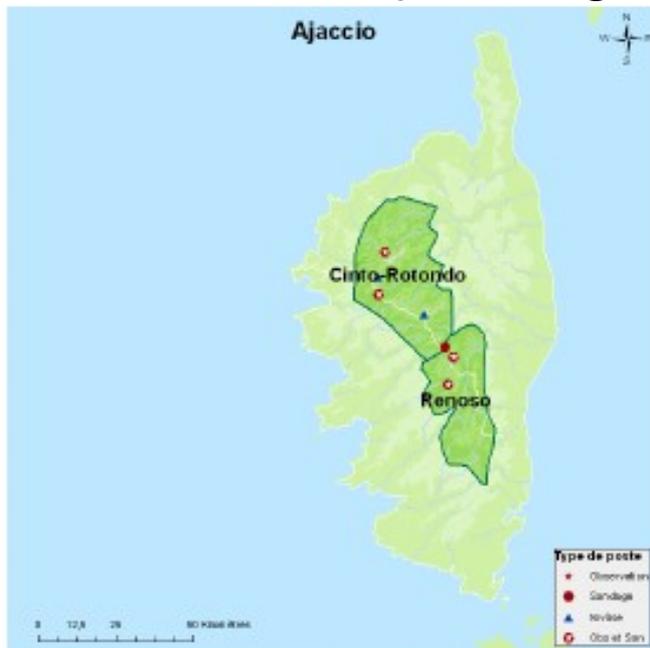
CNRM UMR 3589

# Les Observations

---

## Réseau nivo-météorologique

- 143 postes d'obs - 156 profils neige
- Alpes + Pyrénées + Corse
- Fonctionnement du 15/12 – 30/04
- En station de ski donc selon ouverture....
- 12 postes dans les Écrins (+9 sondages)**



# Réseau nivo-météorologique : observation météorologique bi-quotidienne

Effectuée par les observateurs nivométéo (généralement des pisteurs de station de ski) à 8h et 13h loc.

## ■ Conditions météo générales :

- Température
- Humidité
- Précipitations



- Vent
- Temps présent et passé
- Nébulosité

Limite pluie neige  
État du sol

## ■ Conditions nivologiques



- Hauteur de neige fraîche et totale

- Température de surface de la neige



- État de la neige
- Type de grain



- Pénétration de la sonde de battage
- Masse volumique



# Réseau nivo-météorologique : observation hebdomadaire du manteau neigeux (sondages et profils)

---

Réalisées par les observateurs nivo-météo dans les stations de ski

Résistance à l'enfoncement  
Sondage par battage



Profil stratigraphique



## Réseau Nivôses

---

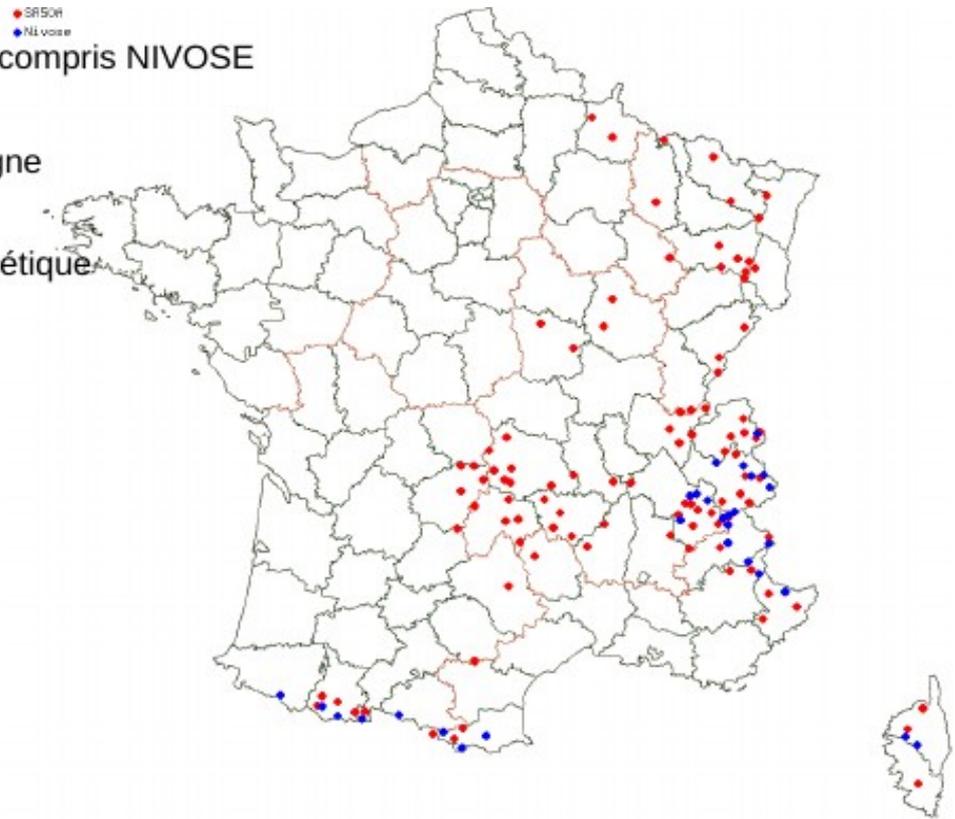
- 29 stations automatiques d'altitude (1700 – 3000 m)
  - Fonctionnement :
    - ▶ autonomes en énergie, transmission par satellite
    - ▶ mesures horaires
    - ▶ (hauteur de neige, température, humidité, vent)
    - ▶ maintenance (visite annuelle)



**3 dans les Ecrins, 1 à proximité :**  
**Meije, Ecrins, Orcières, Galibier**

## Stations automatiques (ici pour la hauteur de neige)

- 123 capteurs déployés, y compris NIVOSE
- Principalement en montagne
- Mesure sur un tapis synthétique

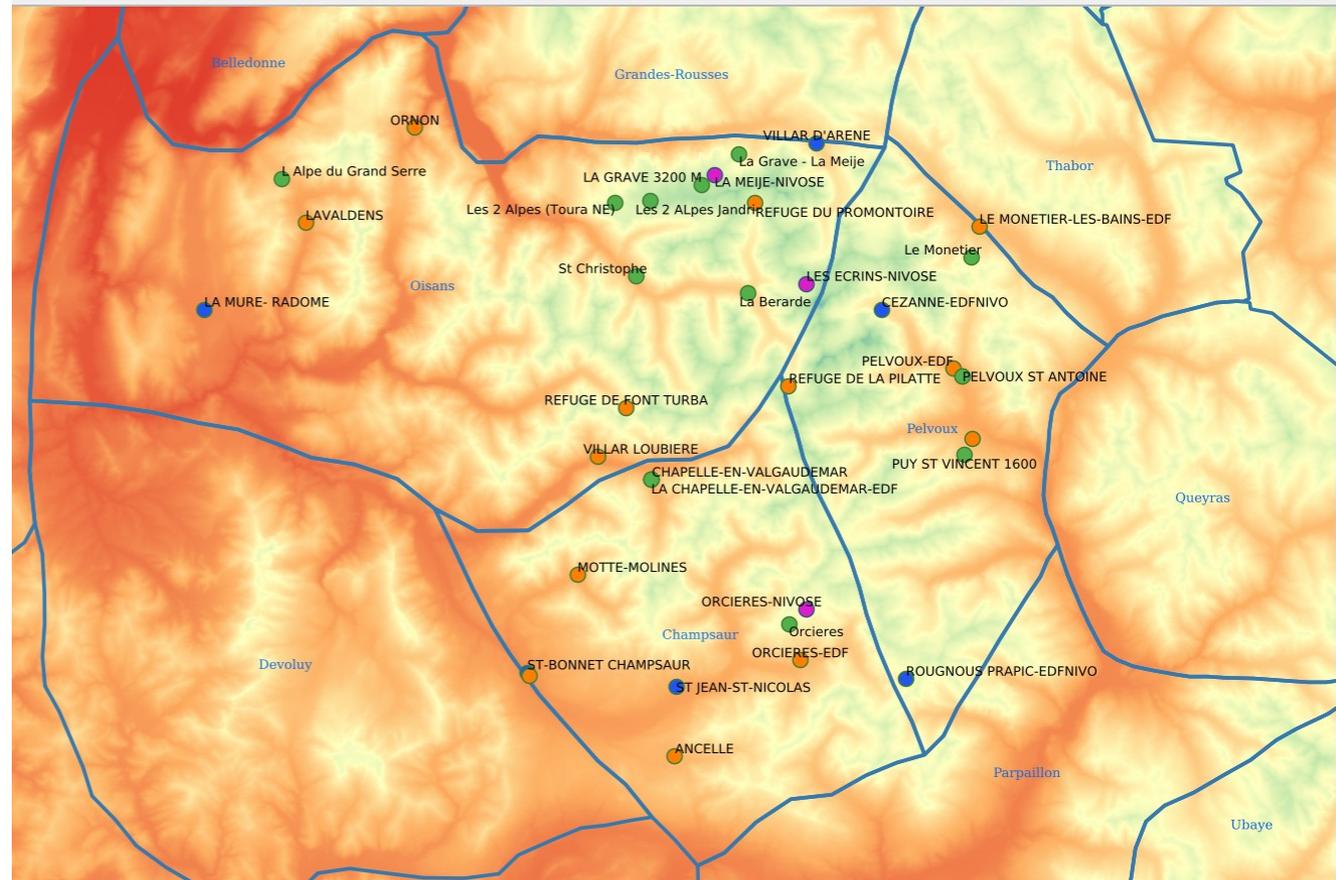


### Mais aussi :

Réseau climatologique (RCE, en cours d'automatisation)

Refuges, et échanges de données, avec EDF notamment

# Synthèse des postes disponibles dans les Écrins (météo et neige)



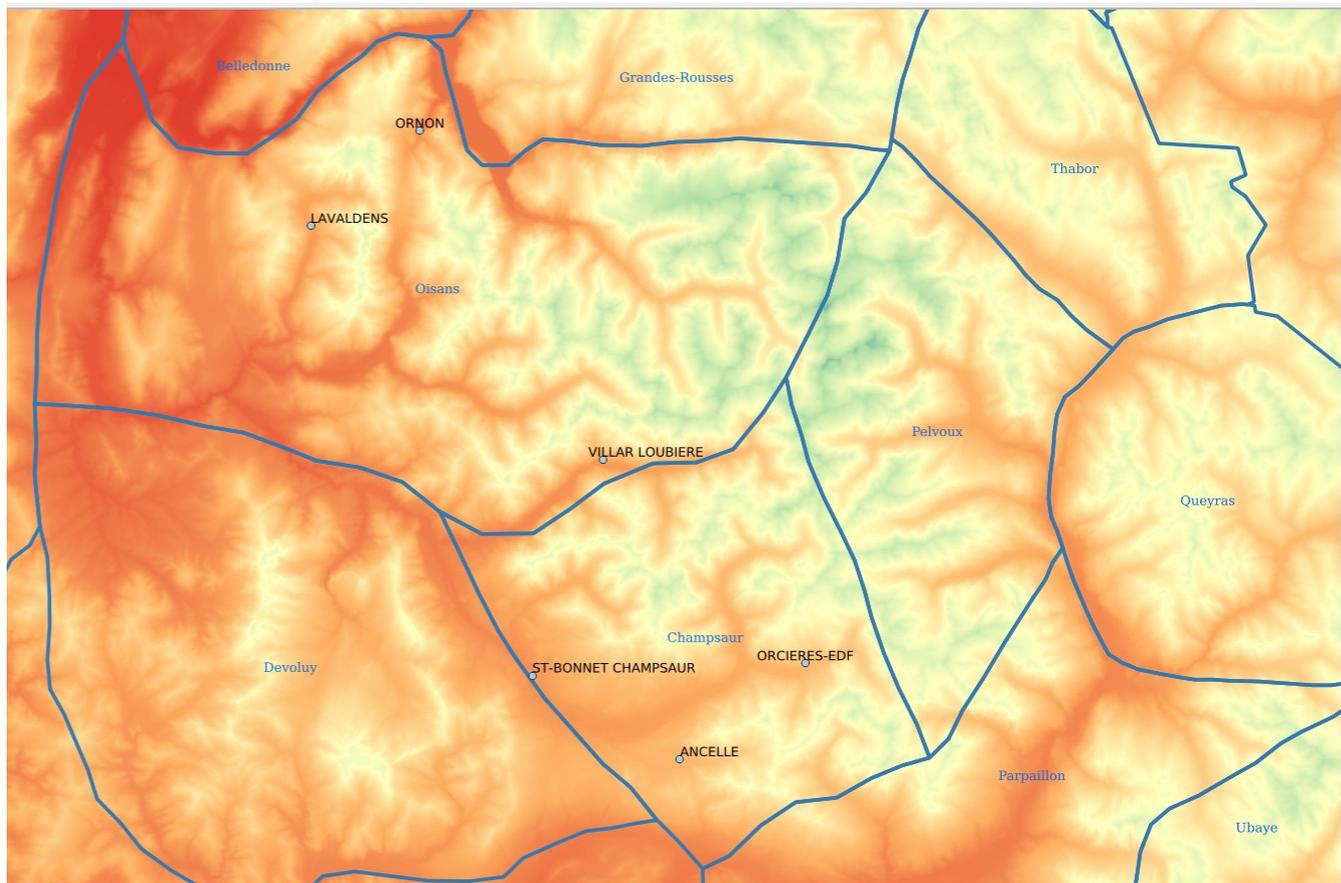
- 37 postes : - 12 postes nivo-météo (+ 9 sondages)  
 - 3 nivôses  
 - 16 clim et refuges et EDF (attention : postes parfois uniquement été)  
 - 6 auto



# Synthèse des postes disponibles dans les Ecrins (météo et neige)

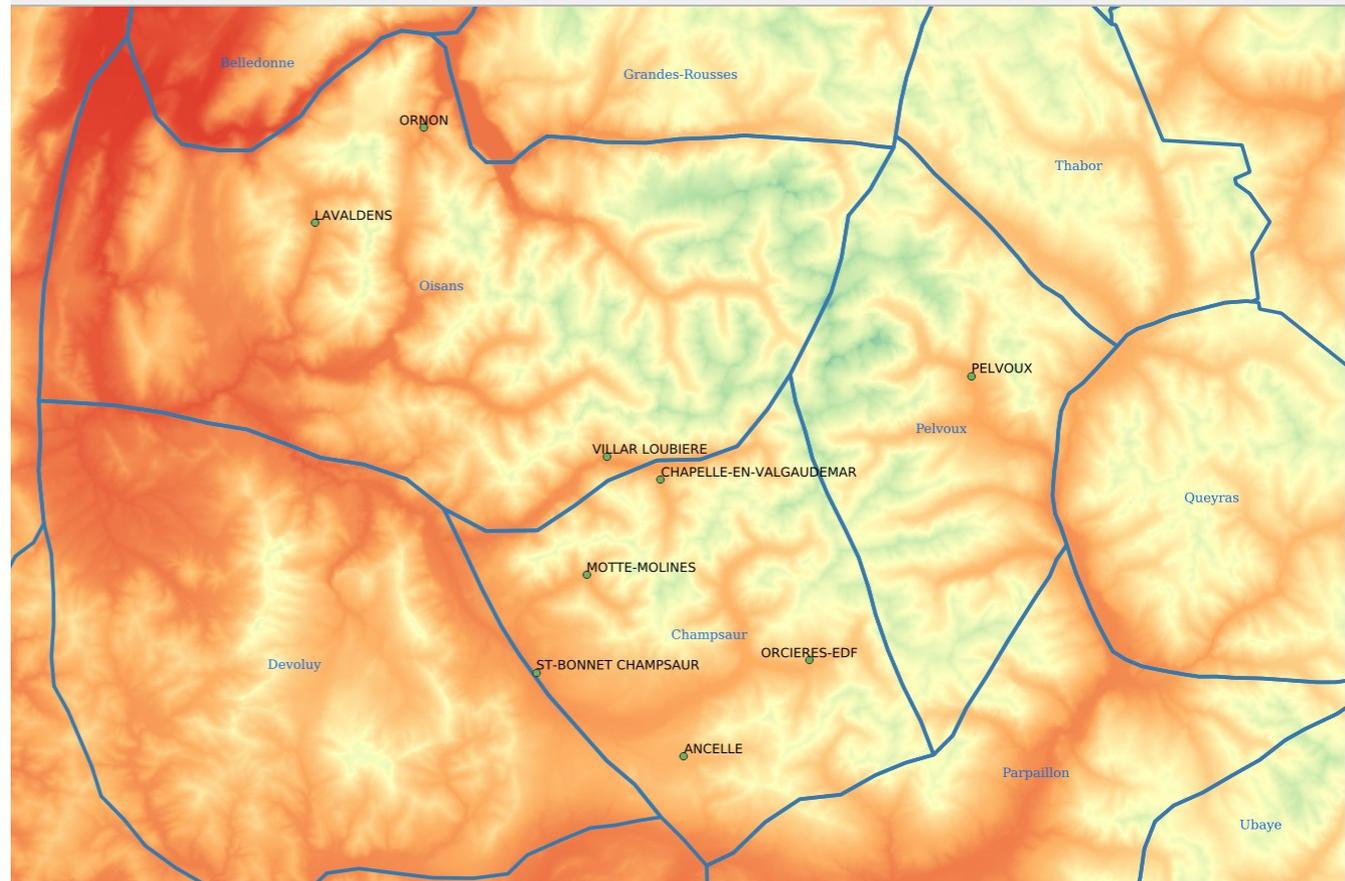
---

1920 : 6 postes



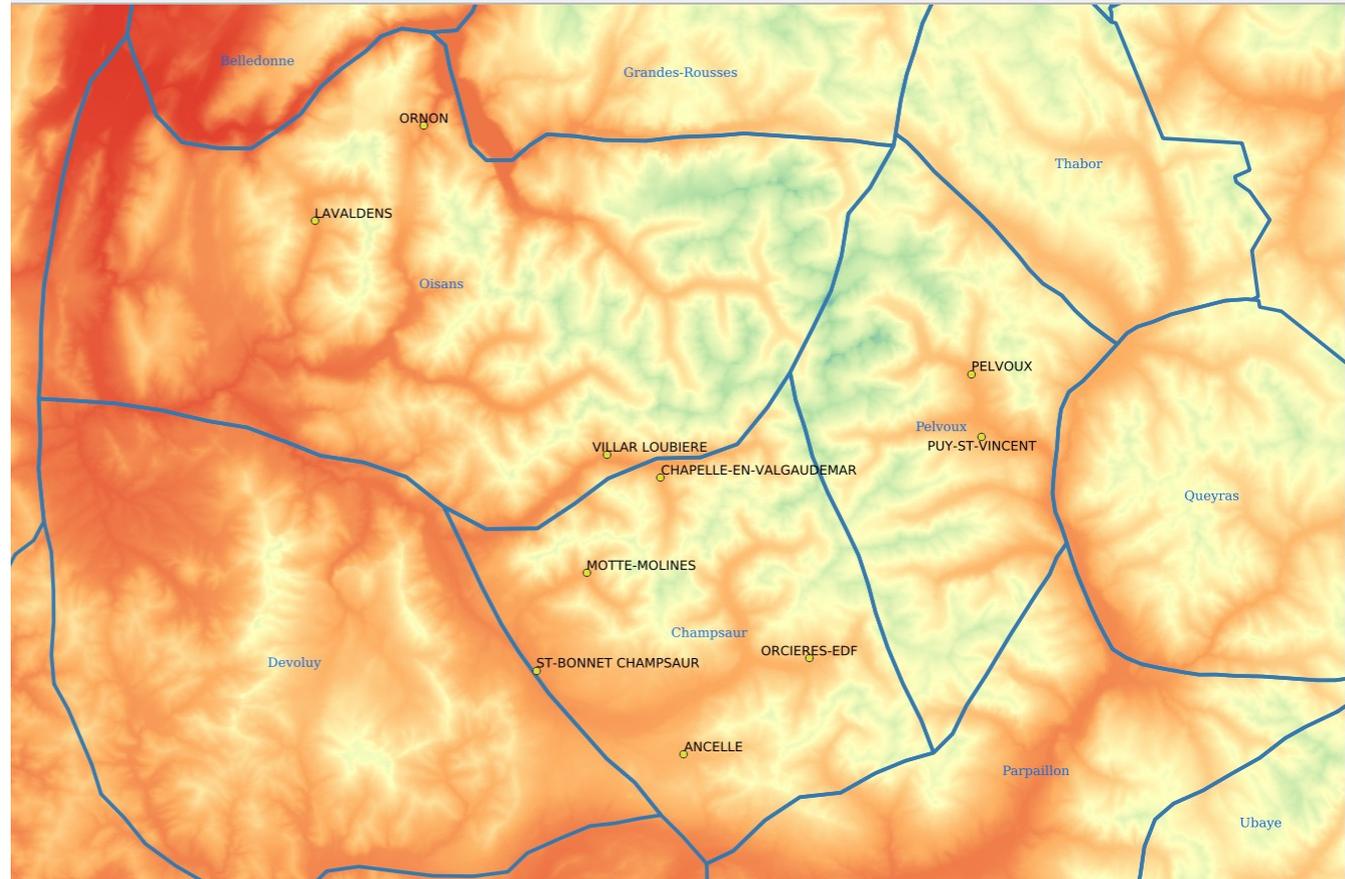
# Synthèse des postes disponibles dans les Ecrins (météo et neige)

1940 : 9 postes



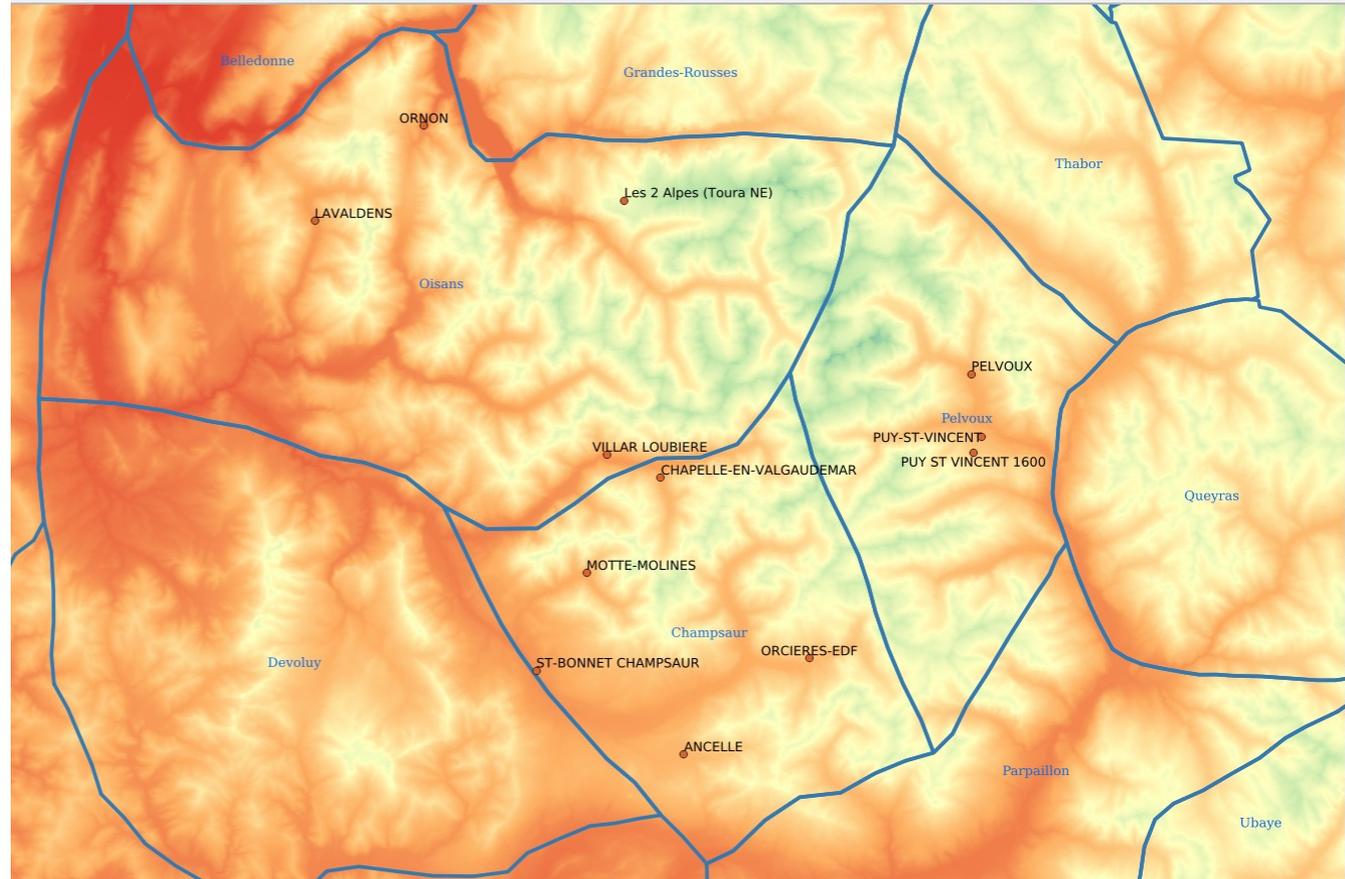
# Synthèse des postes disponibles dans les Ecrins (météo et neige)

1960 : 10 postes



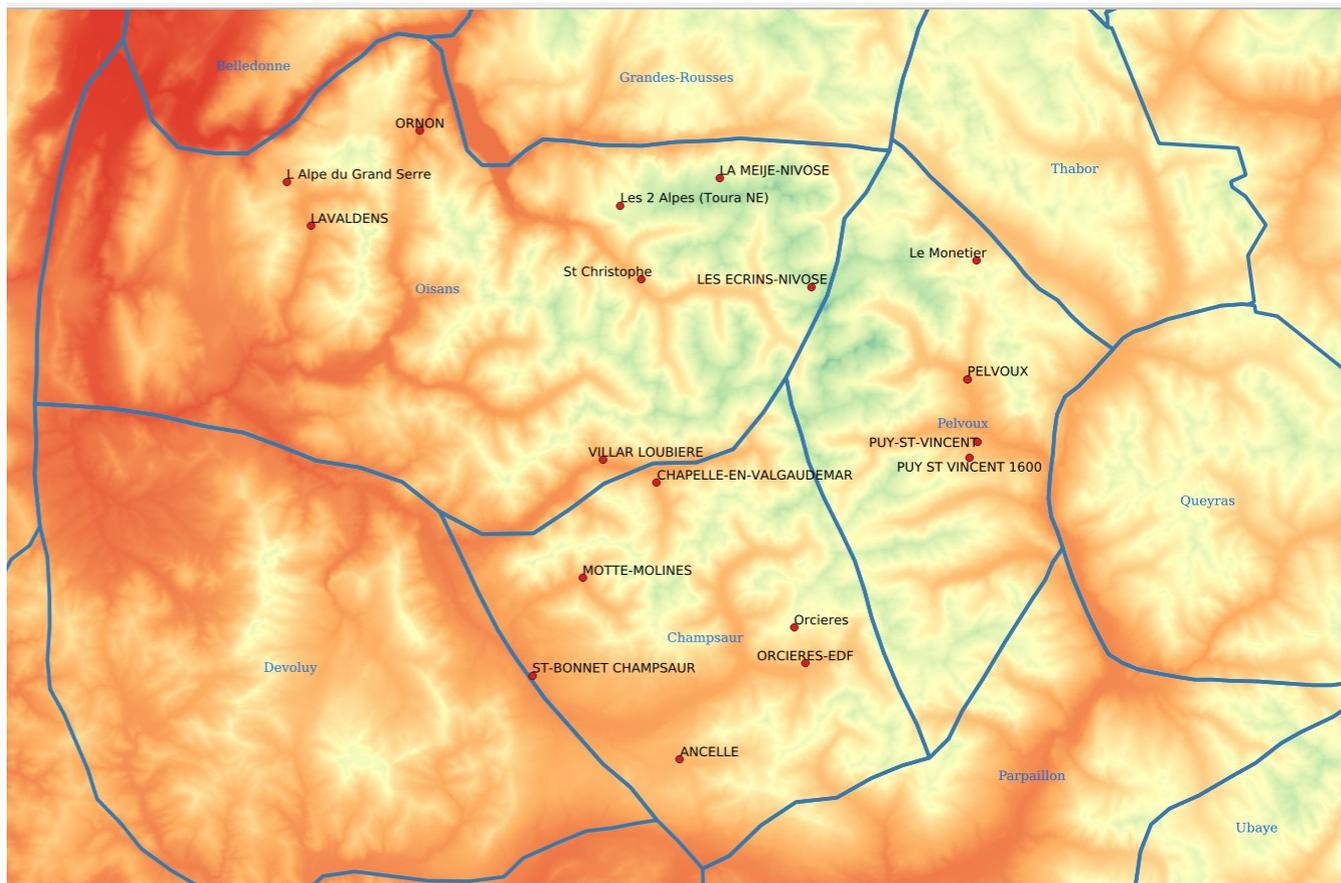
# Synthèse des postes disponibles dans les Ecrins (météo et neige)

1980 : 12 postes



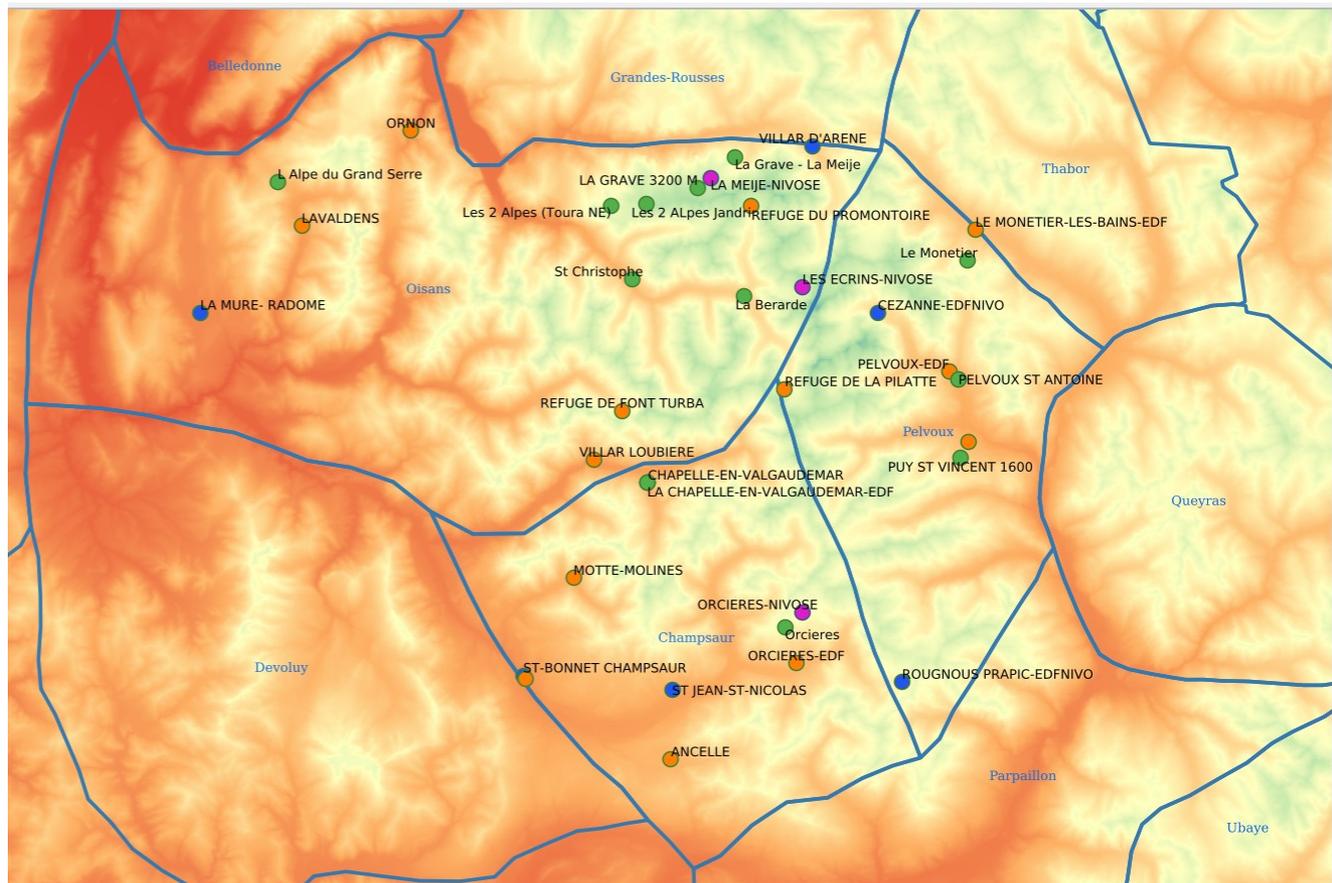
# Synthèse des postes disponibles dans les Ecrins (météo et neige)

2000 : 19 postes



# Synthèse des postes disponibles dans les Écrins (météo et neige)

2020 : 37 postes



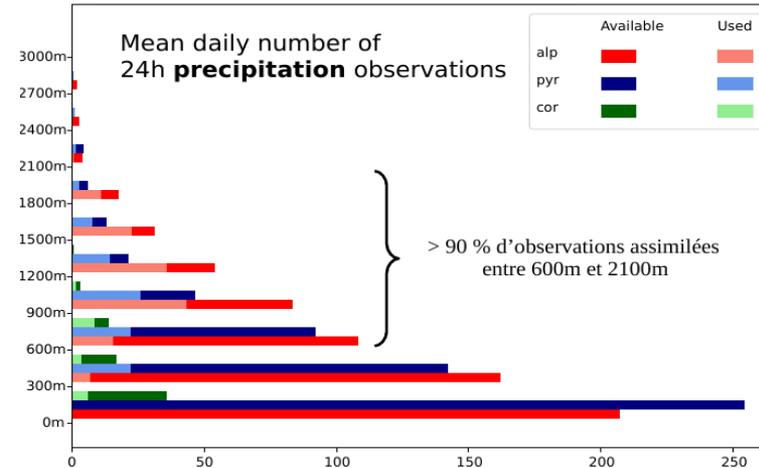
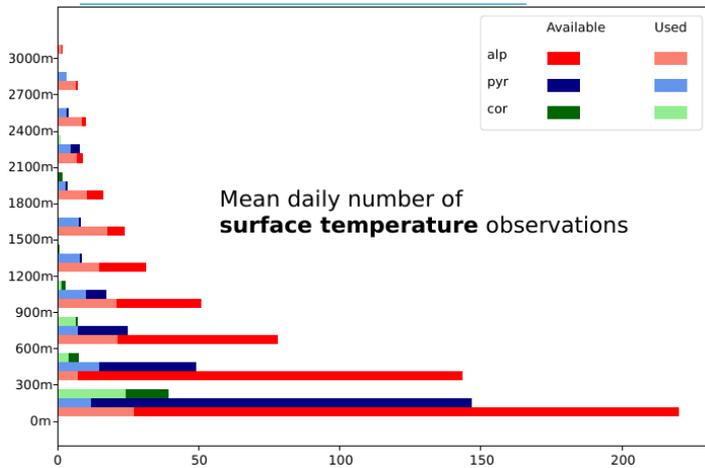
- 37 postes : - 12 postes nivo-météo (+ 9 sondages)  
 - 3 nivôses  
 - 16 clim et refuges et EDF (attention : postes parfois uniquement été)  
 - 6 auto



CNRM UMR 3589

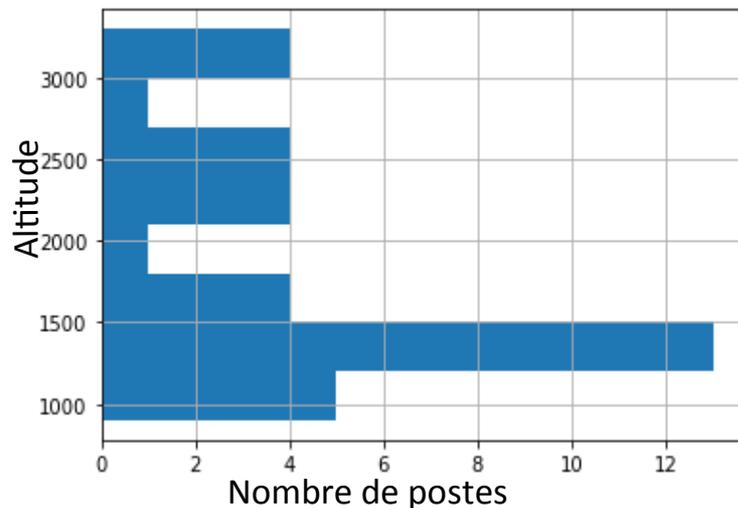
# Quel échantillonnage altitudinal ?

- Pour l'ensemble des massifs Français



*Beaucoup moins de renseignements disponibles au-delà de 2000m d'altitude.*

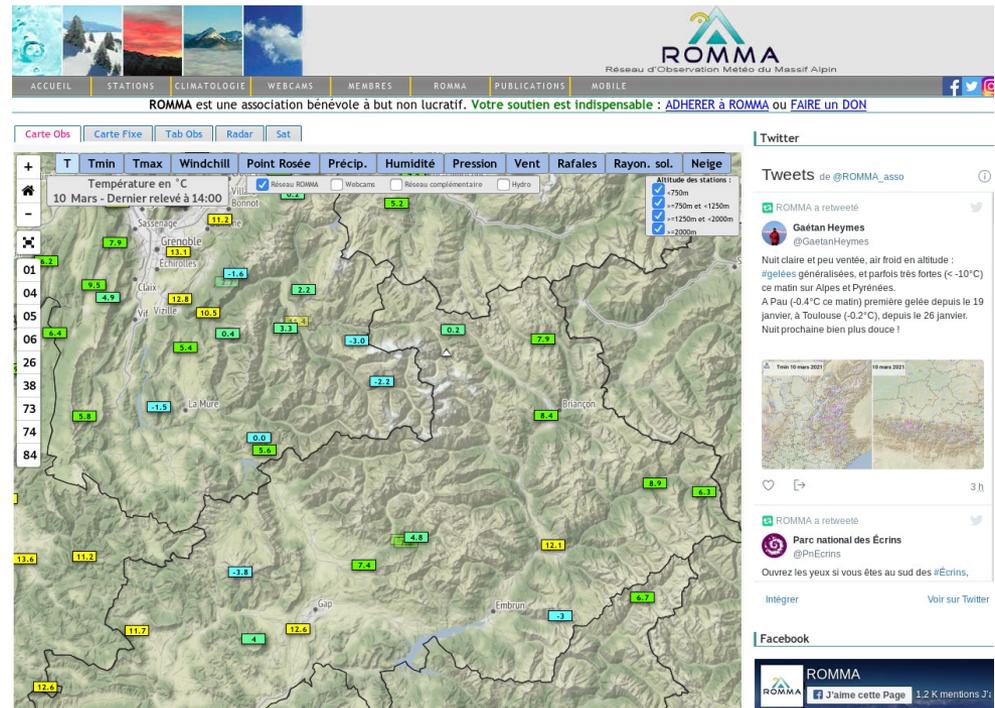
- Pour les Ecrins



**4 postes > 3000m : 1 nivose, 2 nivo-météo, 1 refuge**

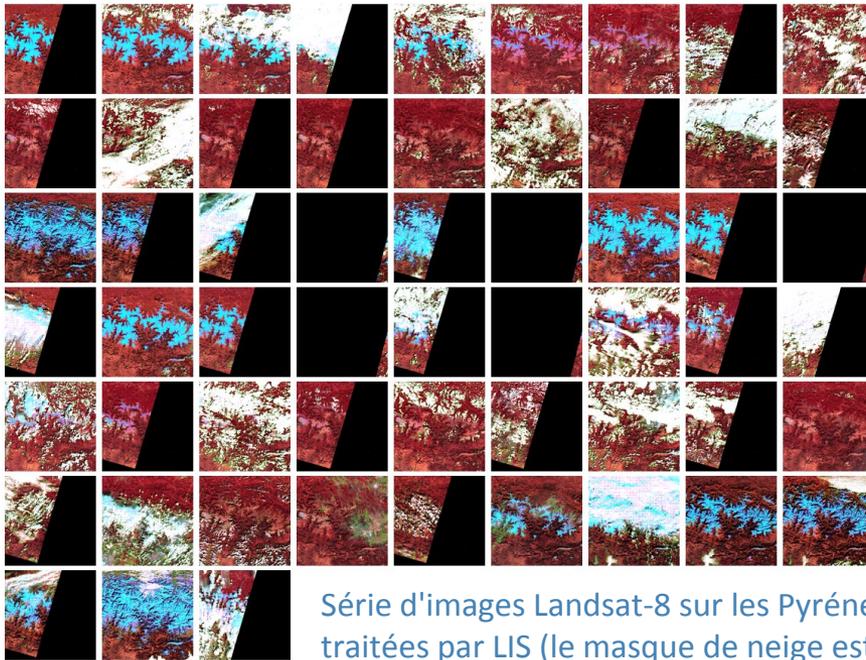
# Autres observations hors réseaux Météo-France

- sites instrumentés de recherche (CNRM, IGE, autres..), à proximité : Col du Lac Blanc, Lautaret, Glacier Blanc (?)
- réseau EDF complet
- Données non-conventionnelles – ex : ROMMA : Réseau d'Observation Météo du Massif Alpin ([www.romma.fr](http://www.romma.fr))
- ...

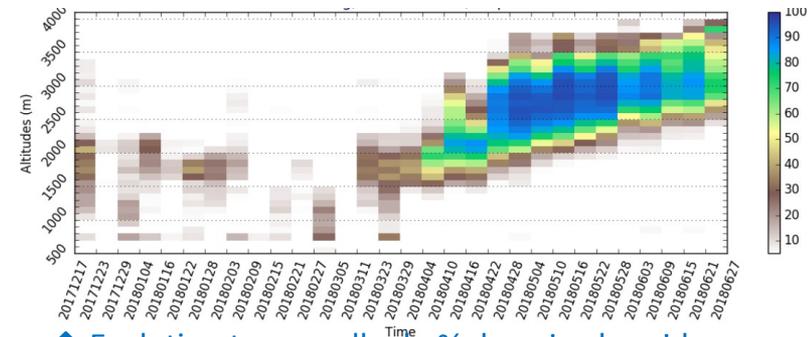
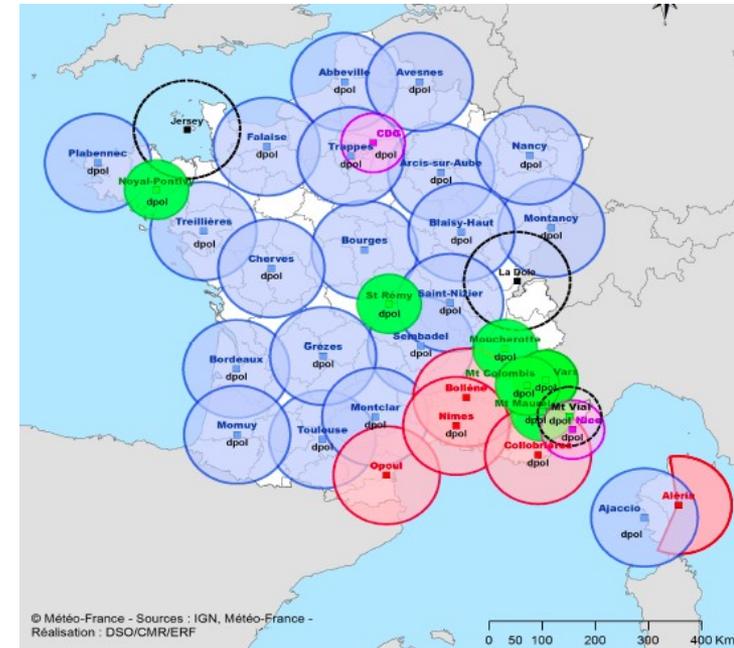


# Autres observations

- radar de précipitation (peu de profondeur temporelle ; masques lié au relief)
- observations satellites (MODIS depuis 2000, entre 250m et 500m de résolution en optique ; Sentinel 2 et 3 (open) ; SPOT ; Sentinel 1) @Simon Gascoin (CESBIO) Marie Dumont et Fatima Karbou (CEN)



Série d'images Landsat-8 sur les Pyrénées traitées par LIS (le masque de neige est délimité en magenta et celui des nuages en vert) @S. Gascoin



↑ Evolution temporelle du % de neige humide en face sud. Zone Ecrins. [Karbou et al., 2021](#)



CNRM UMR 3589

# Tendances de neige observées dans l’Arc Alpin sur les 50 dernières années

Travail collaboratif de 37 chercheurs –  
PI: Alice Crespi et Michael Matiu

**eurac**  
research

<https://doi.org/10.5194/tc-2020-289>  
Preprint. Discussion started: 12 October 2020  
© Author(s) 2020. CC BY 4.0 License.



The Cryosphere  
Discussions  
EGU

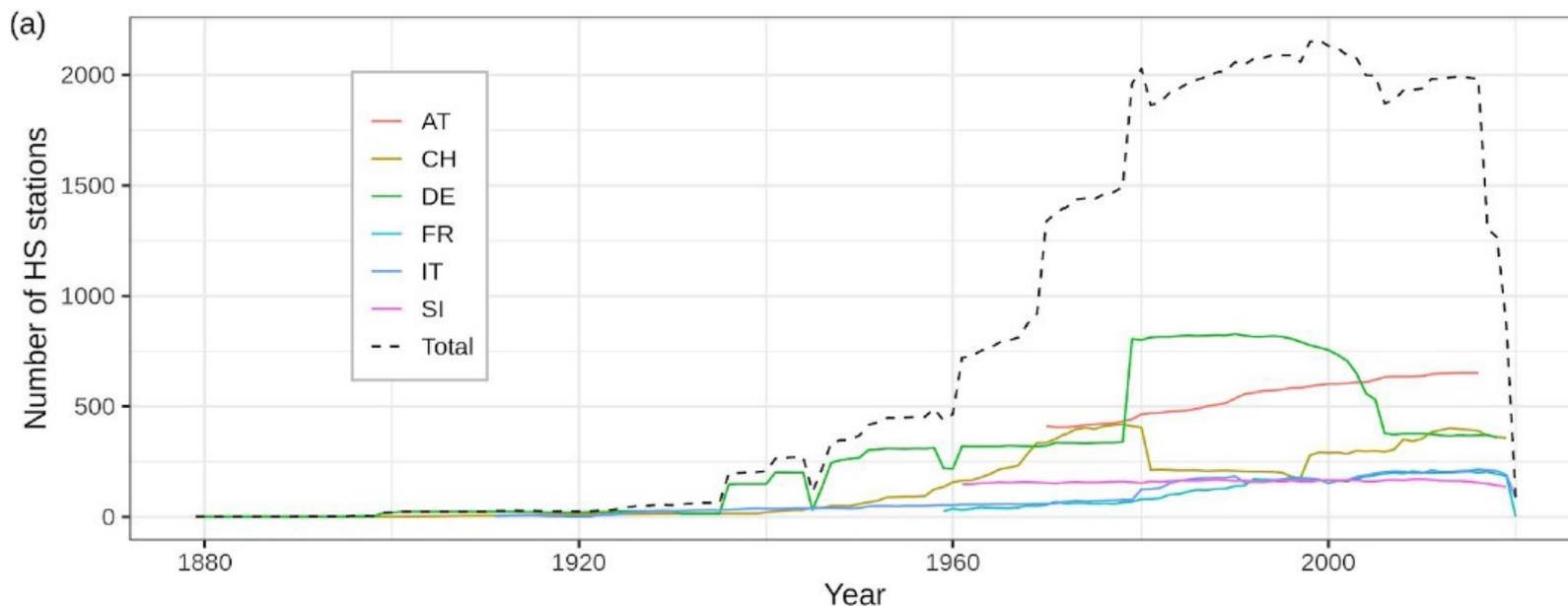
## Observed snow depth trends in the European Alps 1971 to 2019

Michael Matiu<sup>1</sup>, Alice Crespi<sup>1</sup>, Giacomo Bertoldi<sup>2</sup>, Carlo Maria Carmagnola<sup>3</sup>, Christoph Marty<sup>4</sup>, Samuel Morin<sup>3</sup>, Wolfgang Schönner<sup>5</sup>, Daniele Cat Berro<sup>6</sup>, Gabriele Chiogna<sup>7,8</sup>, Ludovica De Gregorio<sup>1</sup>, Sven Kotlarski<sup>9</sup>, Bruno Majone<sup>10</sup>, Gemot Resch<sup>5</sup>, Silvia Terzago<sup>11</sup>, Mauro Valt<sup>12</sup>, Walter Beozzo<sup>13</sup>, Paola Cianfarra<sup>14</sup>, Isabelle Gouttevin<sup>3</sup>, Giorgia Marcolini<sup>8</sup>, Claudia Notarnicola<sup>1</sup>, Marcello Petitta<sup>1,15</sup>, Simon C. Scherrer<sup>9</sup>, Ulrich Strasser<sup>8</sup>, Michael Winkler<sup>16</sup>, Marc Zebisch<sup>1</sup>, Andrea Cicogna<sup>17</sup>, Roberto Cremonini<sup>18</sup>, Andrea Debemardi<sup>19</sup>, Mattia Faletto<sup>18</sup>, Mauro Gaddo<sup>13</sup>, Lorenzo Giovannini<sup>10</sup>, Luca Mercalli<sup>6</sup>, Jean-Michel Soubeyroux<sup>20</sup>, Andrea Sušnik<sup>21</sup>, Alberto Trenti<sup>13</sup>, Stefano Urbani<sup>22</sup>, Viktor Weigluni<sup>23</sup>

## Tendances de l'enneigement sur les 50 dernières années dans les Alpes

Collecte de > 2000 séries temporelles de données de hauteur de neige :

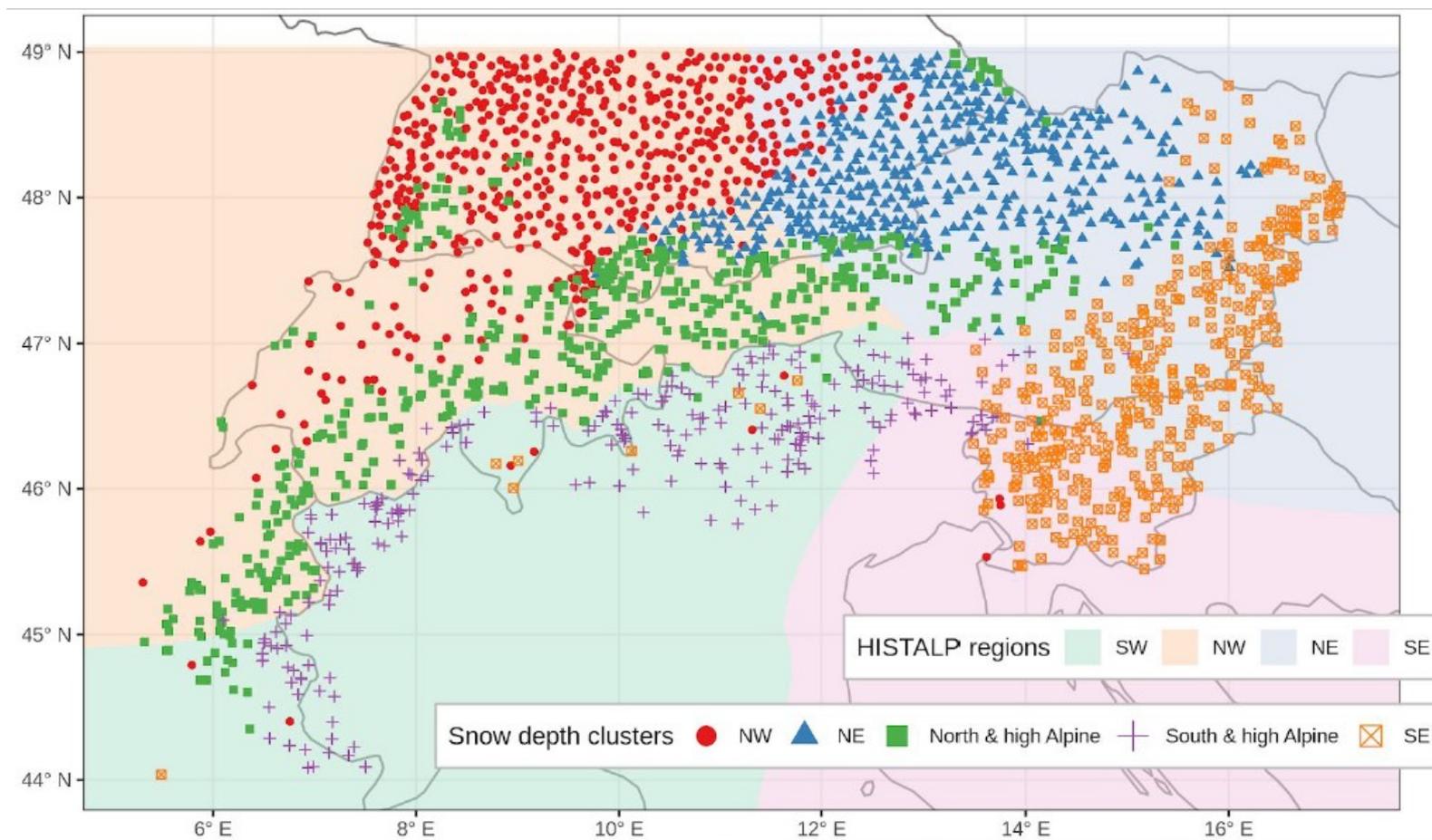
- Données surtout manuelles
- Journalières
- Quality-check et Gap-filling commun
- De 6 pays européens (Autriche Allemagne Suisse France Italie Slovénie)



## Tendances de l'enneigement sur les 50 dernières années dans les Alpes

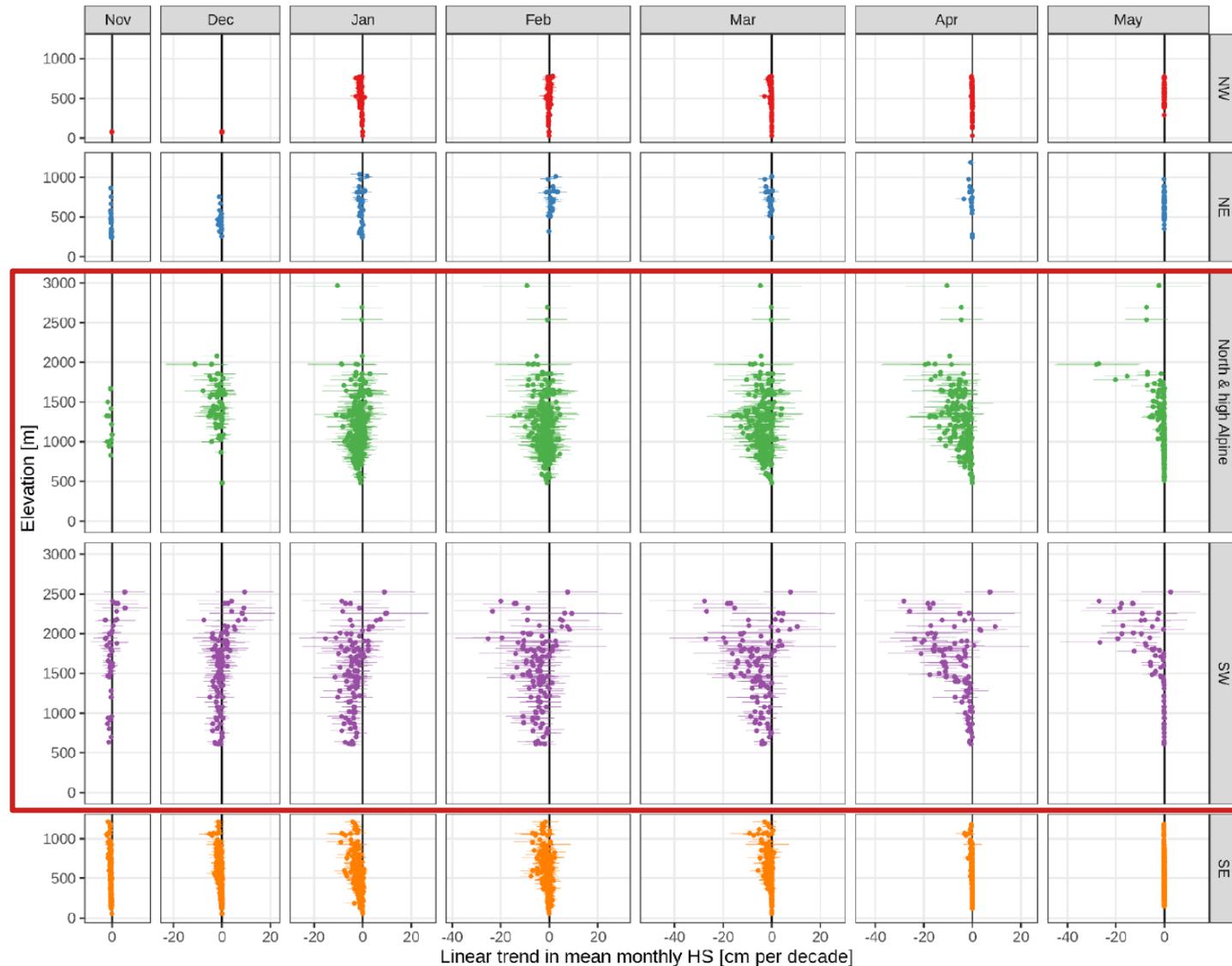
Mise au jour de zones homogènes vis-à-vis de la variabilité de l'enneigement (méthodes de clustering) :

→ les stations des Ecrins ressortent plutôt dans le Cluster Nord/High alpine



# Tendances de l'enneigement sur les 50 dernières années dans les Alpes

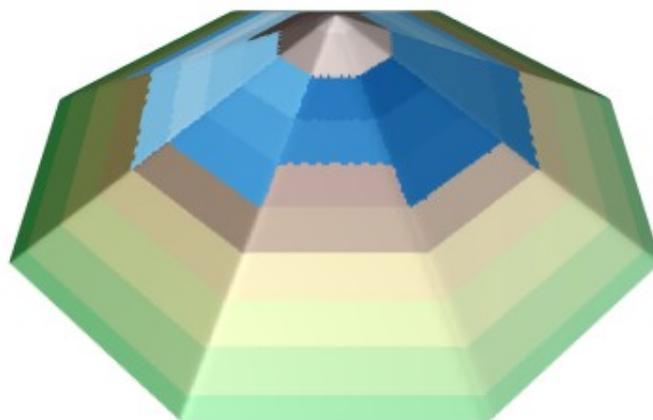
- Des tendances de hauteur de neige majoritairement négatives (86%, 26% signif, contre 15% positives, <1% signif)
- A haute altitude, de Fév à Mai, des tendances plus négatives au Sud qu'au Nord (et plus de variabilité et un gradient altitudinal plus fort au printemps)
- Des durées d'enneigement qui diminuent, en début et fin d'hiver, en deçà de 2000m et plus fortement dans la tranche 1000-2000m et au sud qu'au nord





CNRM UMR 3589

# La réanalyse Nivo-Météorologique S2M (« SAFRAN et SAFRAN-Crocus »)

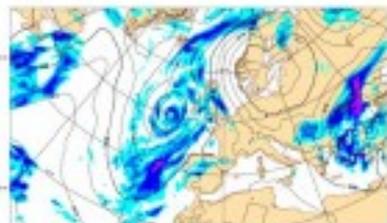


# Principe de la réanalyse

**Observations** : données nivo-météo, réseaux climatologiques, réseaux automatiques, radiosondages, observations satellites



**Modèles météo** pour estimer la chronologie des événements depuis 1960



**ERA40**  
**ARPEGE**  
**AROME**



Réanalyse SAFRAN utilisée comme « pseudo-observation »

Meilleure couverture spatio-temporelle ...

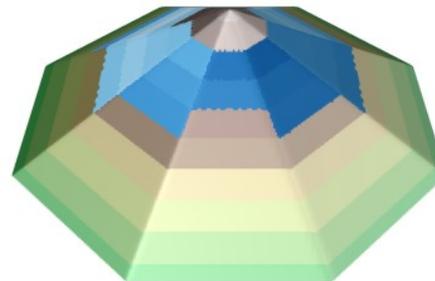
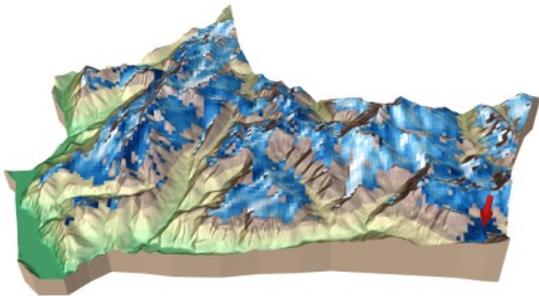
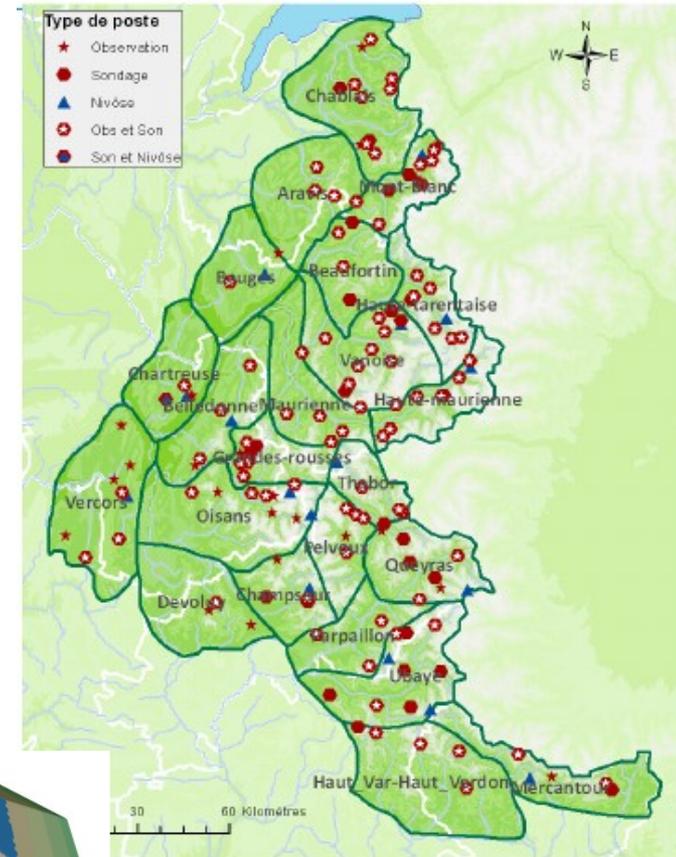
Analyse  
météo

Dans le  
passé :  
ré-analyse

# La réanalyse SAFRAN « Nivo » (montagne)

## Spécificités de SAFRAN

- une géométrie spécifique :
  - 48 massifs en France (+665 sites)
  - une géométrie conceptuelle des massifs par bandes d'altitudes, orientations, et inclinaisons de pente (pour la neige seulement)
- assimilation
  - données météo uniquement
  - observations de précipitations en montagne
  - un réseau d'obs spécifiques, le réseau nivo-météo



### Relief réel du massif\*

~ 10 km à 100km

\*Zone climatologiquement homogène

### Relief théorique simplifié

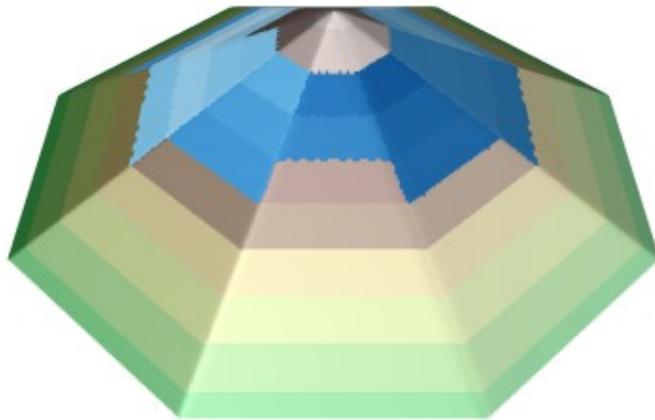
- 8 orientations, 3 pentes (0°, 20°, 40°)
- plusieurs altitudes (300m de résolution)



CNRM UMR 3589

# La réanalyse SAFRAN-Crocus (dite « S2M »)

## SAFRAN-Crocus

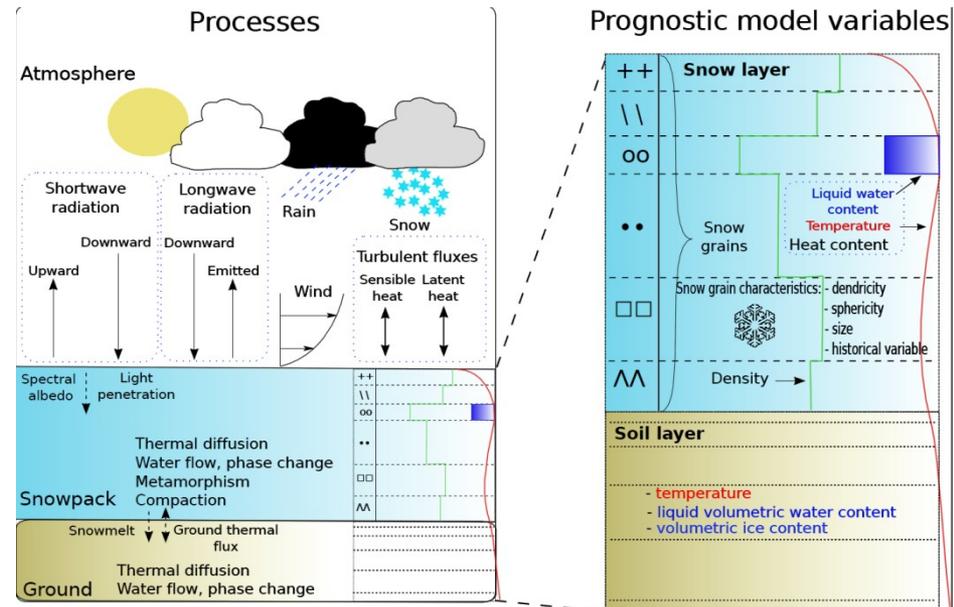


Météo sur relief conceptuel

SAFRAN

Modèle de neige ISBA-Crocus

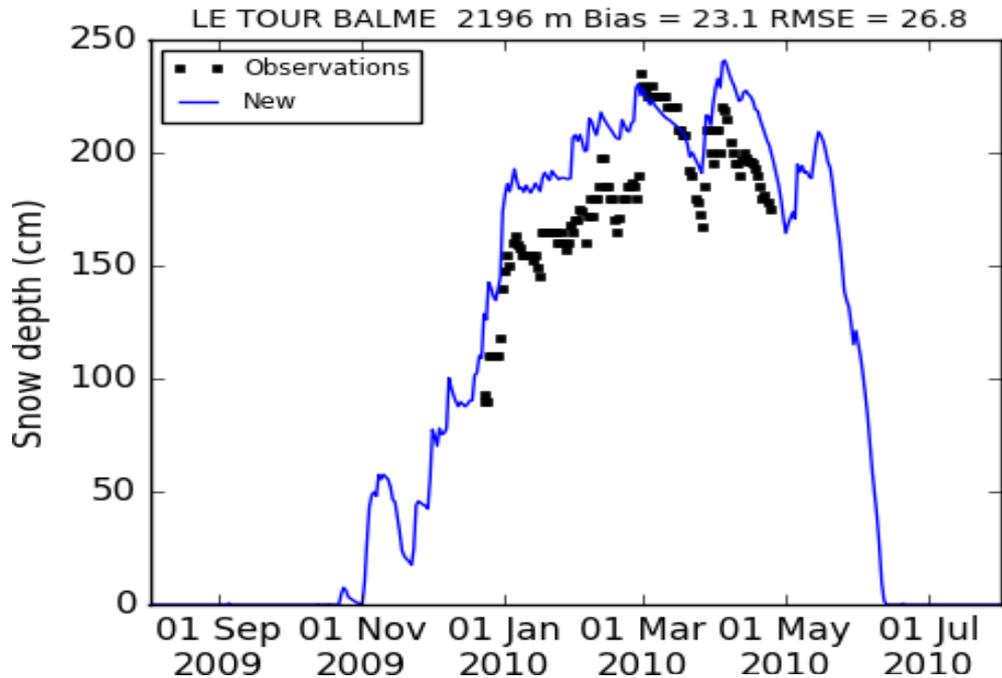
Informations détaillées sur le manteau neigeux, la fonte.....



Réanalyse SAFRAN-Crocus  
De 1958 à nos jours



# Evaluation

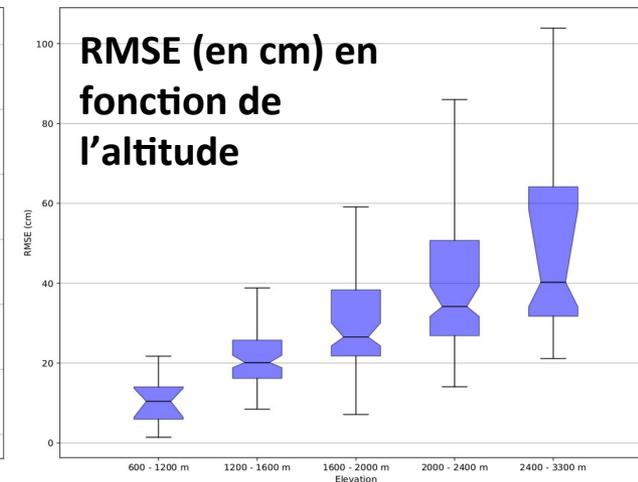
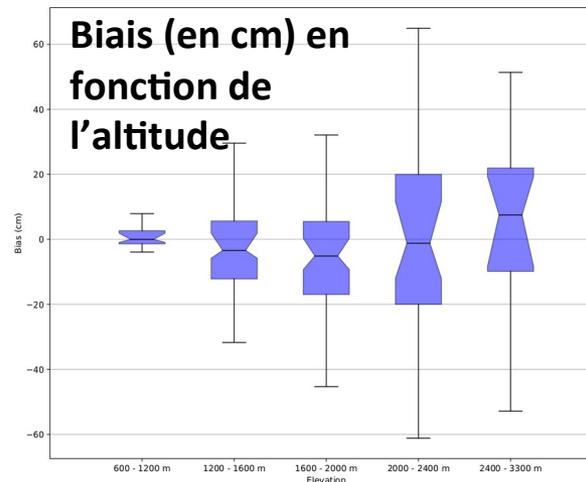


Comparaison des hauteurs de neige observées et simulées

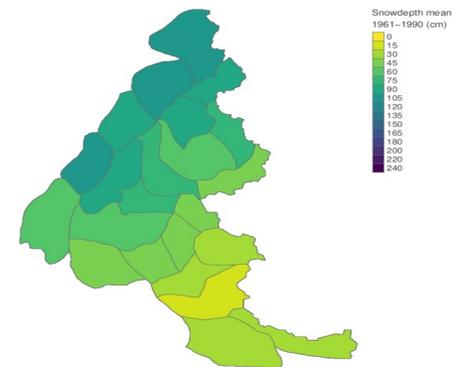
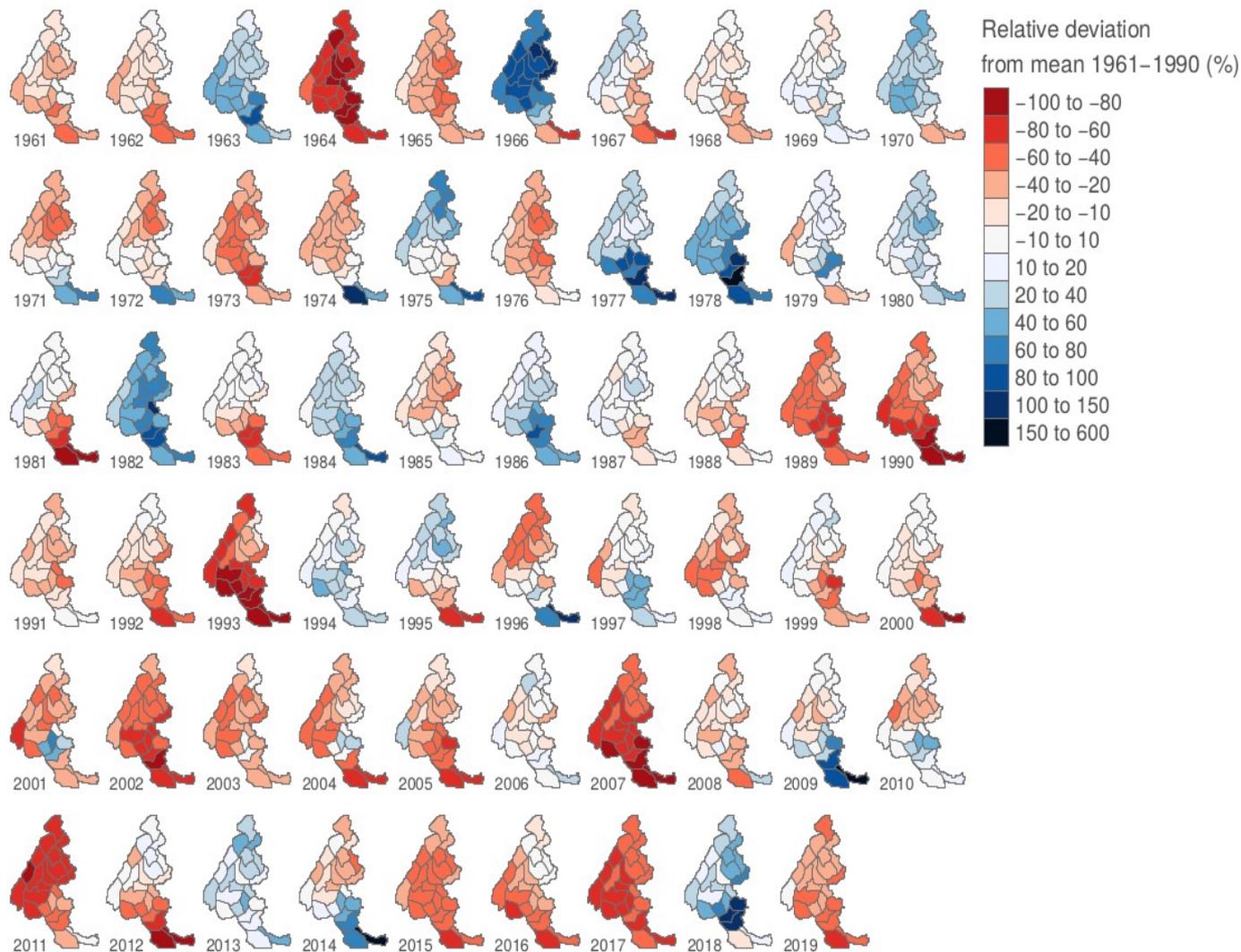
→ variable indépendante (non assimilée)

→ représentatif des performances globales de la chaîne de simulation

***Vernay et al., 2020:***  
***Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>***



# Exemple d'utilisation



Altitude : 1800m  
 Référence : période  
 1961-1990

## En résumé :

### Réanalyse SAFRAN-Crocus :

Estimation de différents paramètres concernant la météo (SAFRAN) et la neige (modèle CROCUS) de **aout 1958 à nos jours**, notamment :

- **météo** au pas de temps horaire (température précipitation humidité rayonnement vent)
- **neige** au pas de temps journalier (dont hauteur, équivalent en eau, ruissèlement..)

Toutes les données produites sont en accès libre sur le catalogue de l'AERIS :

<https://doi.org/10.25326/37>

Citation : Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>



Metadata

DATA ACCESS

ACTIVITIES

CALL FOR PROJECTS

ORGANISATION

CONTACTS

Catalog

Direct access to Aeris/Icare portal

Acknowledgment

The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present)

#### How to cite

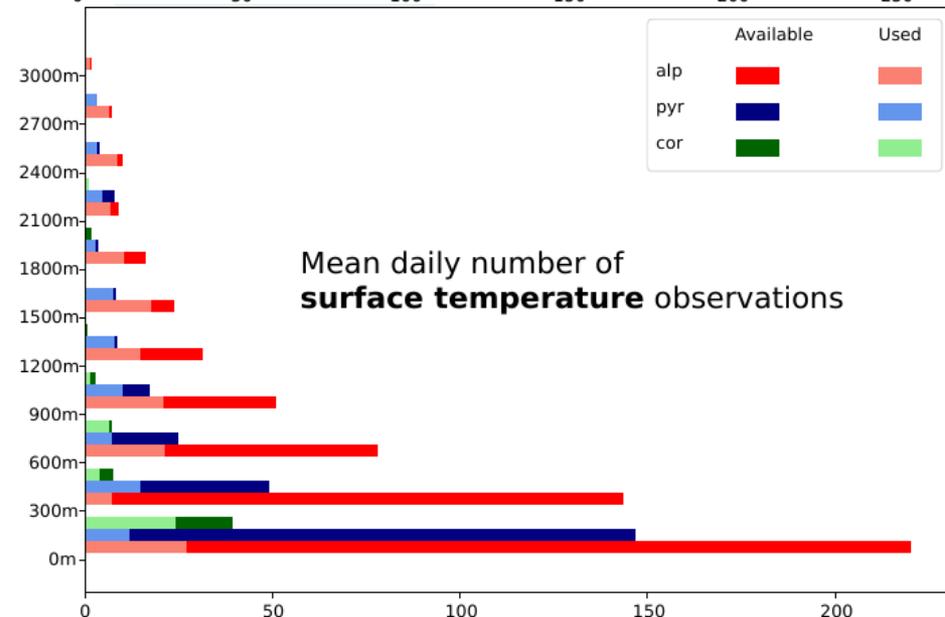
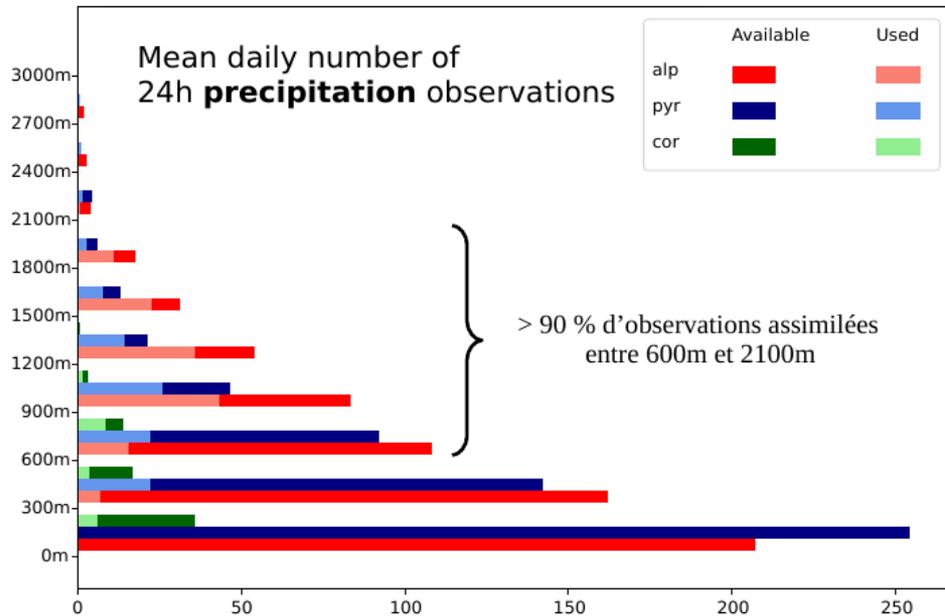
Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S. (2019). <i>The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present)</i> [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>

#### Description

FRANCAIS

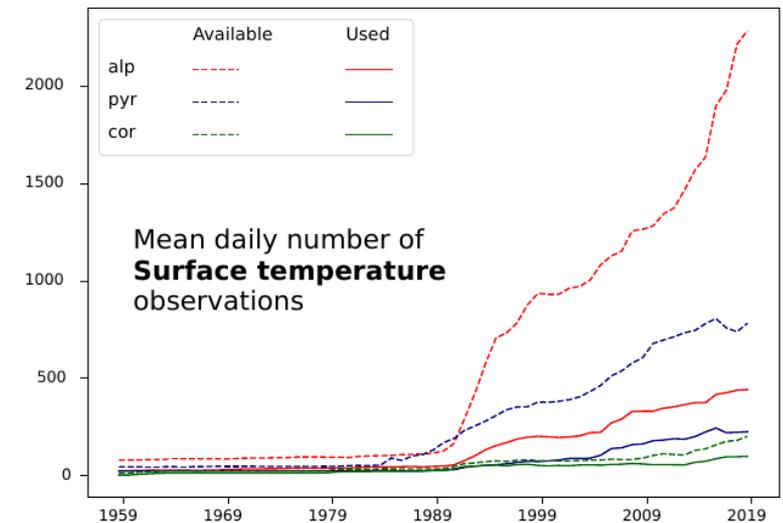
**NOTA** : il existe d'autres réanalyses, notamment SPAZM (EDF)

# Les limites de ce jeu de données



## LIMITES :

- **inhomogénéités temporelle** (lié à l'inhomogénéité temporelle des données assimilées et des modèles)



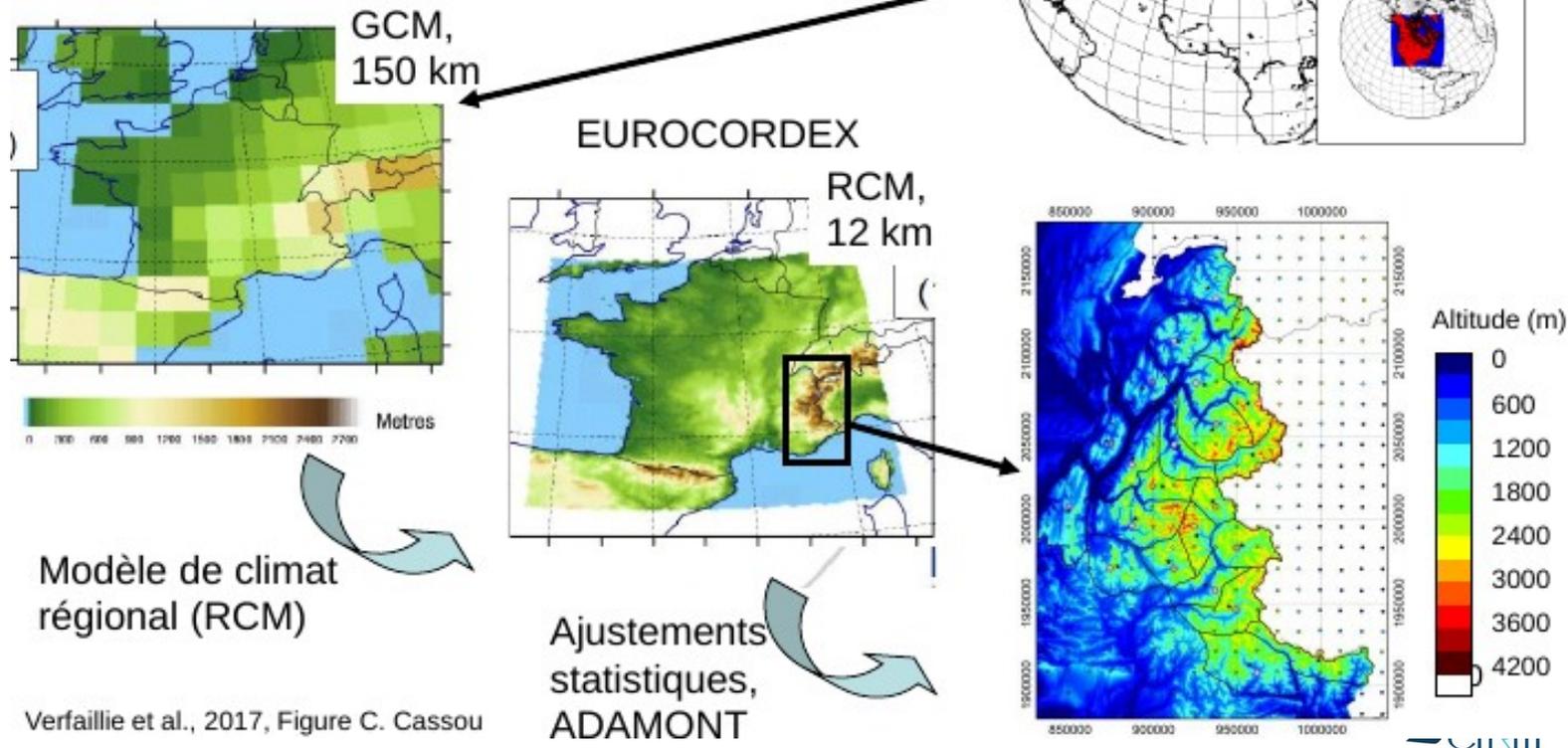
- **inhomogénéité spatiale (peu d'observations au-delà de 2500m)** => une confiance plus limitée en haute montagne

- **pas de forêt...**

# Pour le futur : projection climatiques ajustées ADAMONT

## Modèles de climat : planétaire et régional

- Cascade de modèles et ajustements pour exploiter les projections climatiques à échelle mondiale et les appliquer en France et dans les territoires de montagne

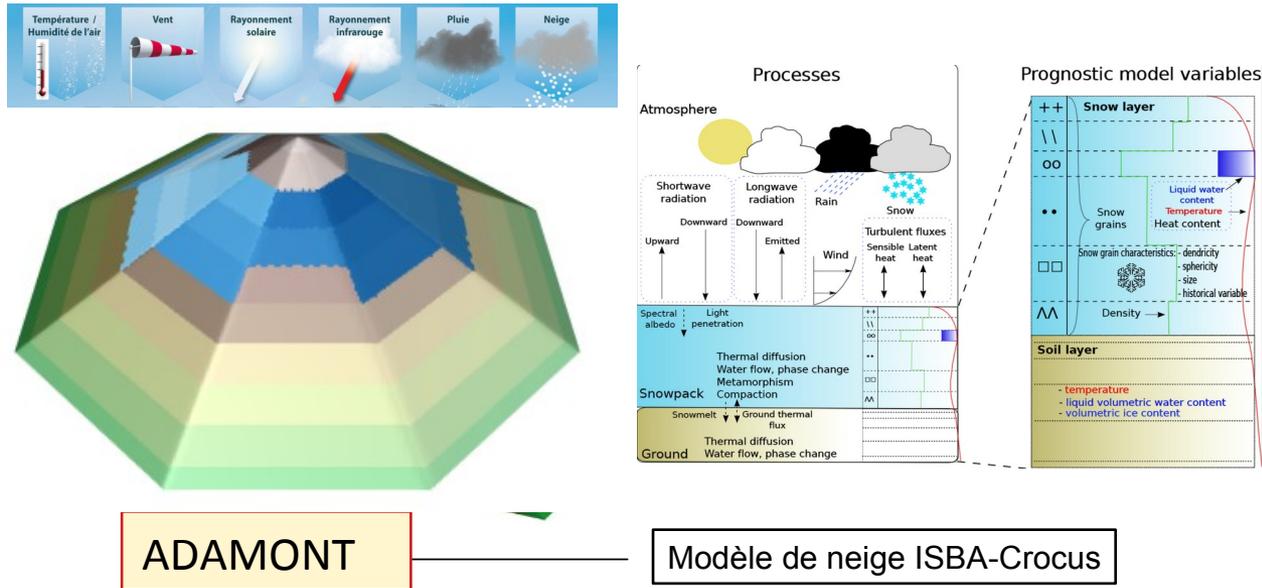


OSUG



CNRM UMR 3589

# Pour le futur : projection climatiques ajustées ADAMONT



OSUG



INRAE

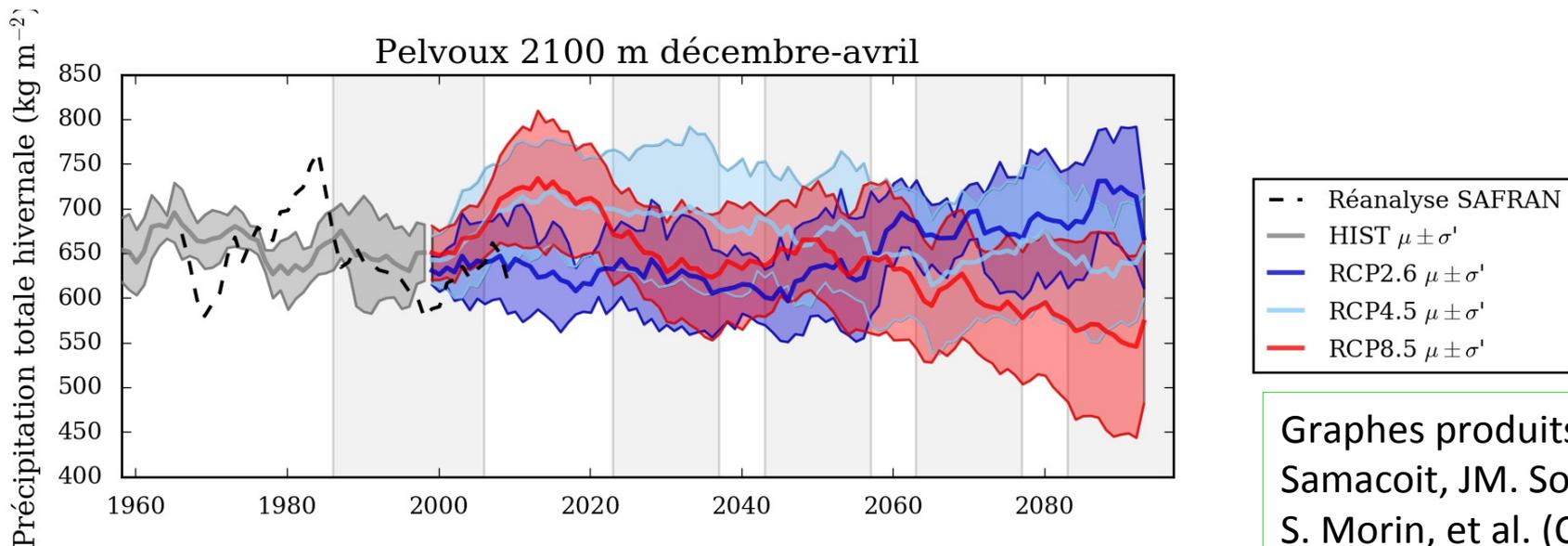
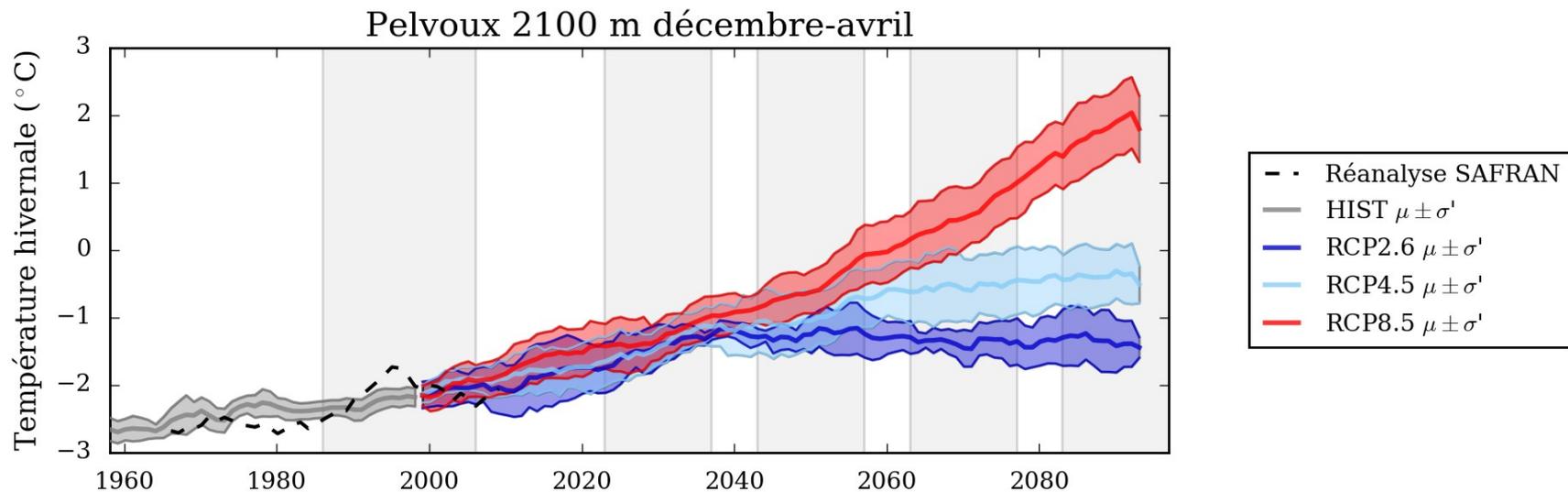


- Simulations du manteau neigeux jusqu'à l'horizon 2100
- Même géométrie que SAFRAN (Massifs, bandes d'altitude)
- données sont en libre accès sur DRIAS : <http://drias-climat.fr/accompagnement/sections/216>
- Référence : Verfaillie et al., 2017 ; 2018
- De nombreux indicateurs d'évolution du manteau neigeux déjà calculés (projets recherche)



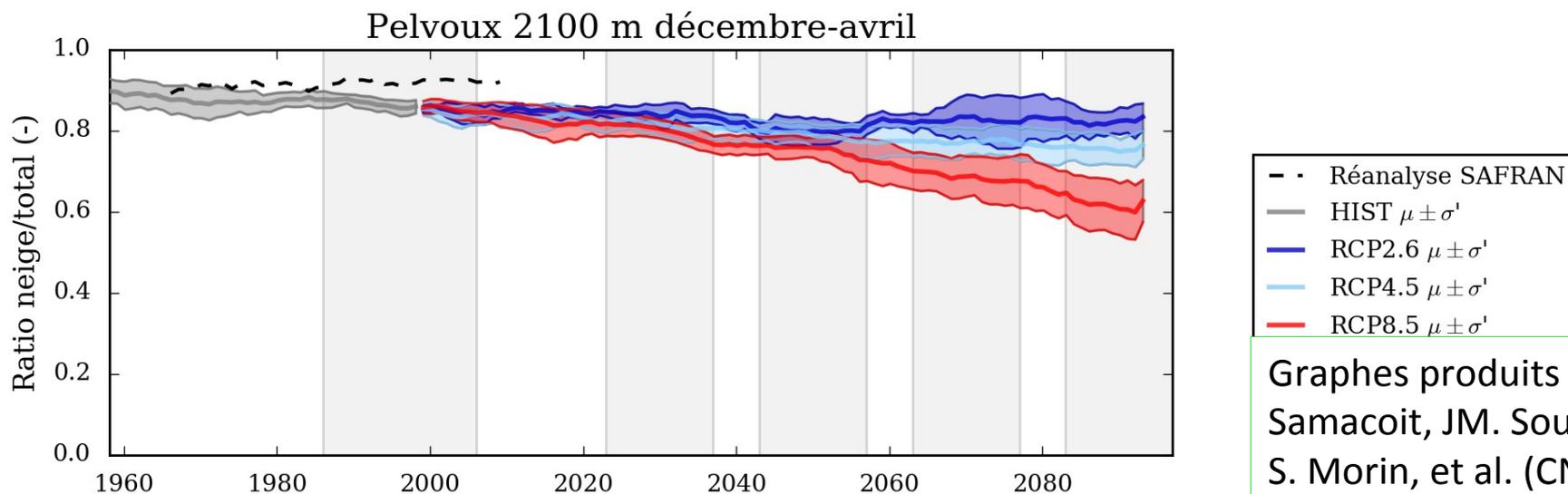
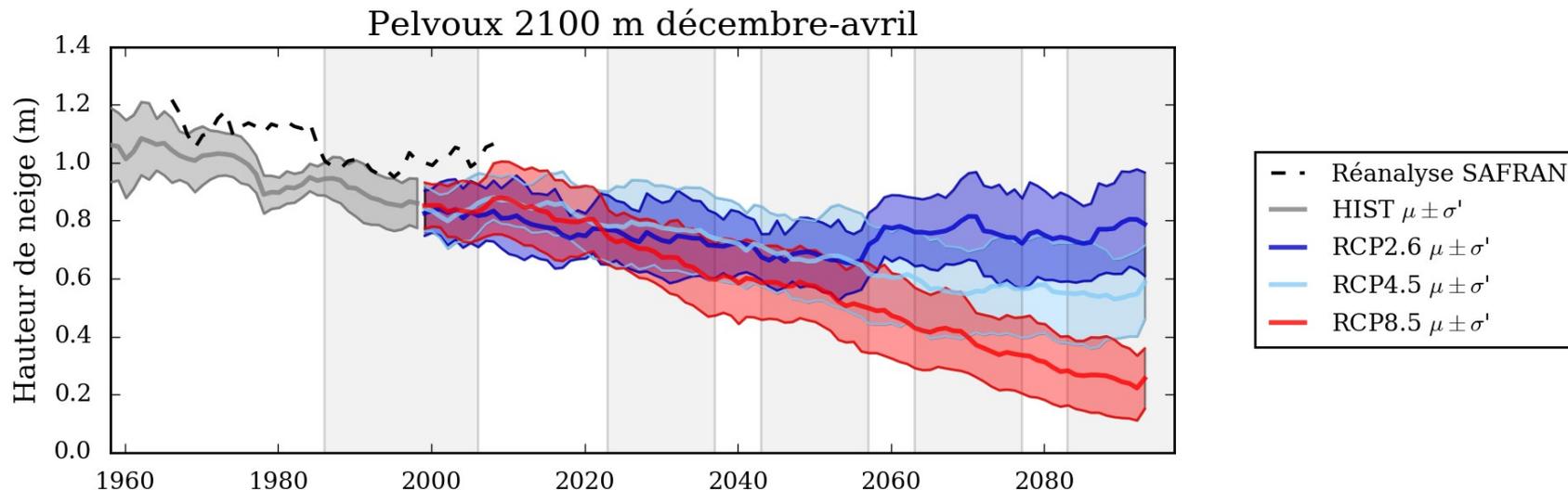
CNRM UMR 3589

## Un exemple d'indices dérivés sur le massif du Pelvoux, à 2100m



Graphes produits par R. Samacoit, JM. Soubeyroux, S. Morin, et al. (CNRM et Météo-France)

## Un exemple d'indices dérivés sur le massif du Pelvoux, à 2100m



Graphes produits par R. Samacoit, JM. Soubeyroux, S. Morin, et al. (CNRM et Météo-France)



CNRM UMR 3589

# Et pour les glaciers ?

---

Sur la base du travail de thèse de Jordi Bolibar (IGE et INRAE)

– Projet BERGER, réalisé avec le soutien de la Région Auvergne Rhône Alpes



**INRAE**

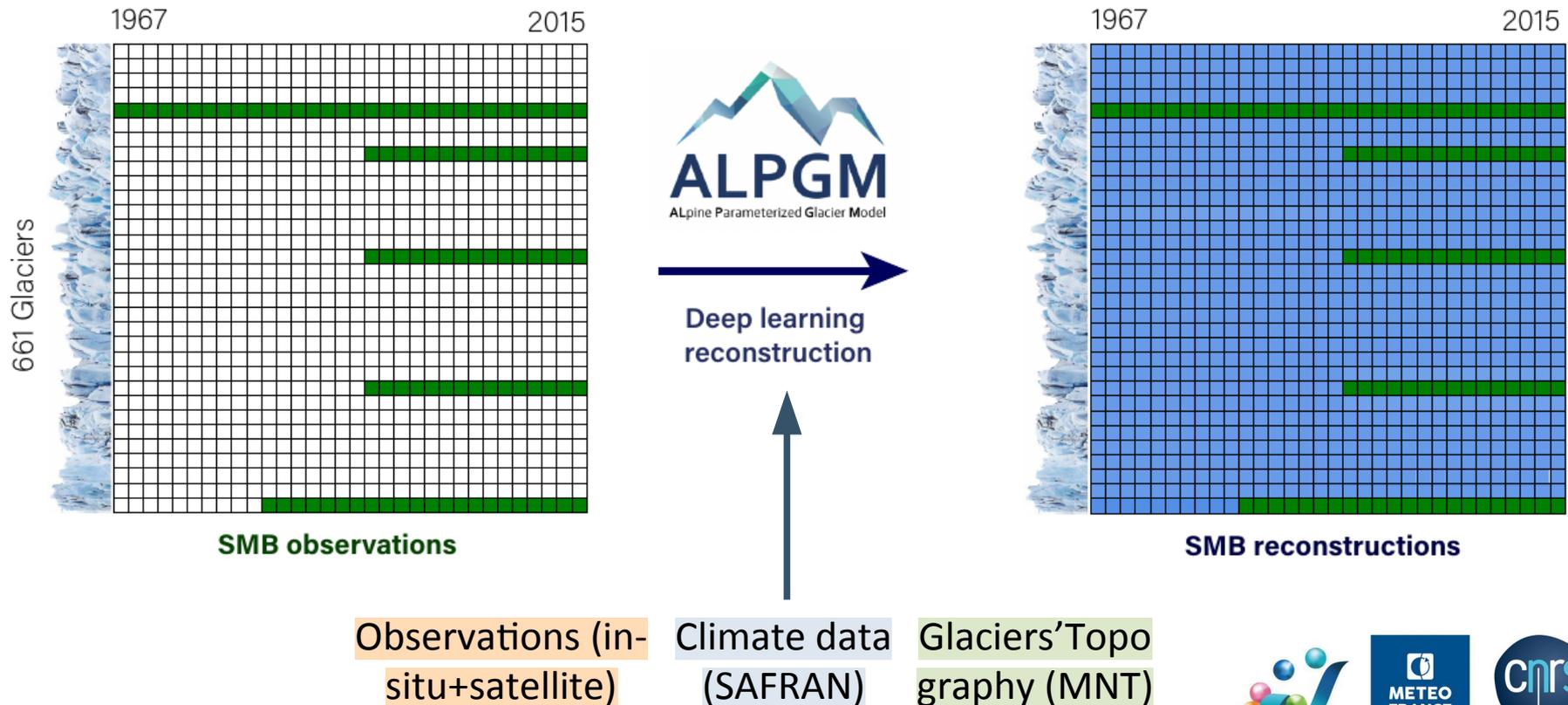


**La Région**  
Auvergne-Rhône-Alpes

# Reconstruction du bilans de masse des 661 glaciers des Alpes Françaises depuis 1967 (Bolibar et al., 2020)

Contexte :

- peu d'observations in-situ => tous les glaciers ne sont pas couverts
- inventaire diachronique des glaciers (*Gardent et al., 2014*) : fin du PAG, (1967-1971) et (2006-2009) => pas de continuité temporelle

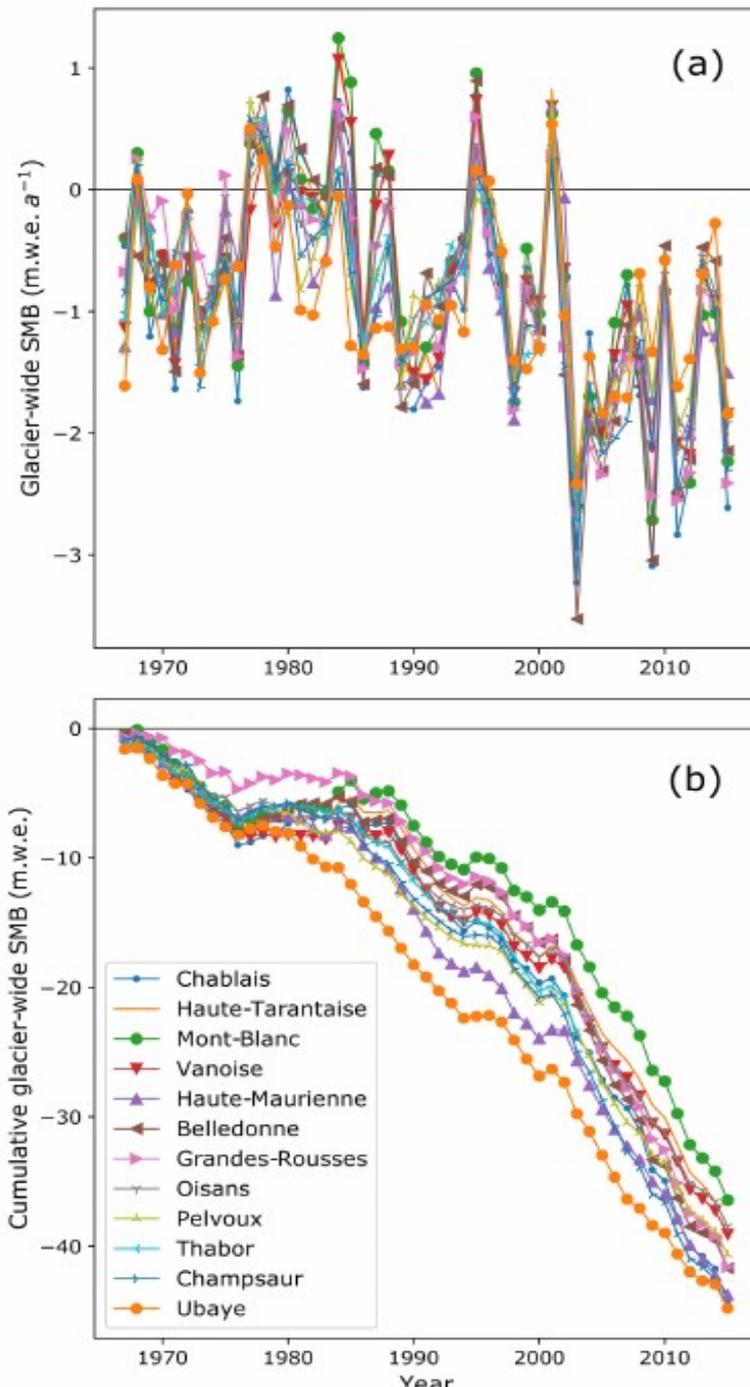


## Reconstructions

Reconstructions en accès libre via Bolibar et al, 2020 :

A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps: 1967-2015.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3925378>

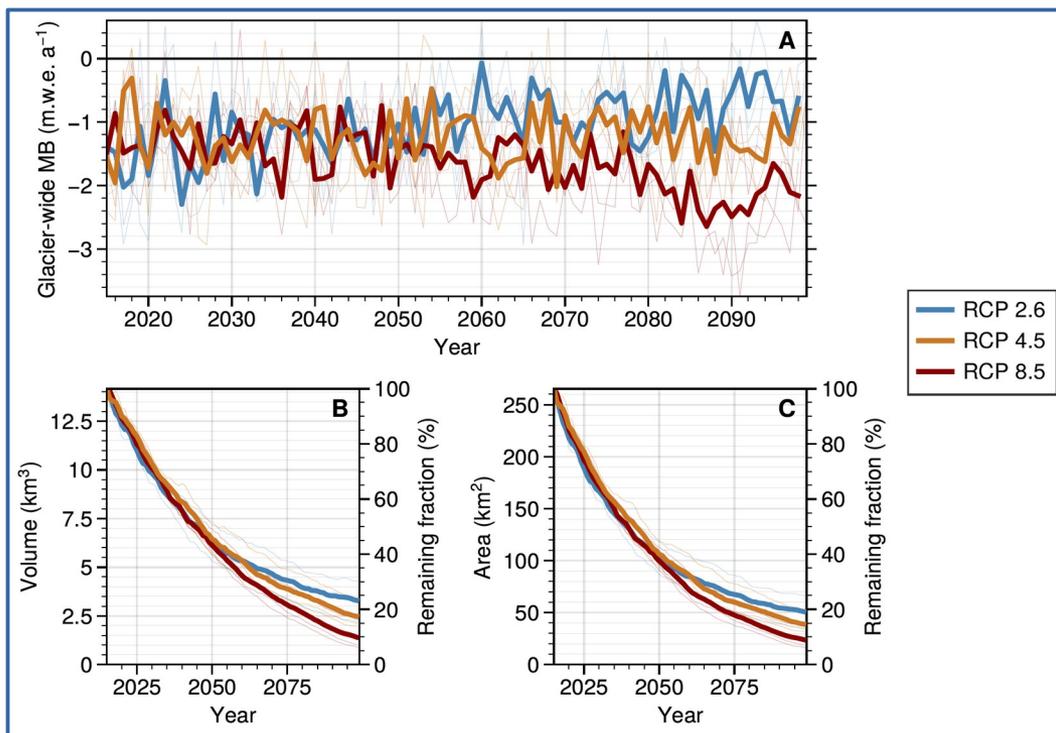


# Pour le futur

Projections  
climatiques  
ADAMONT  
(ajustées  
montagne)



Projection de l'évolution  
des glaciers des Alpes  
Françaises jusqu'en 2100

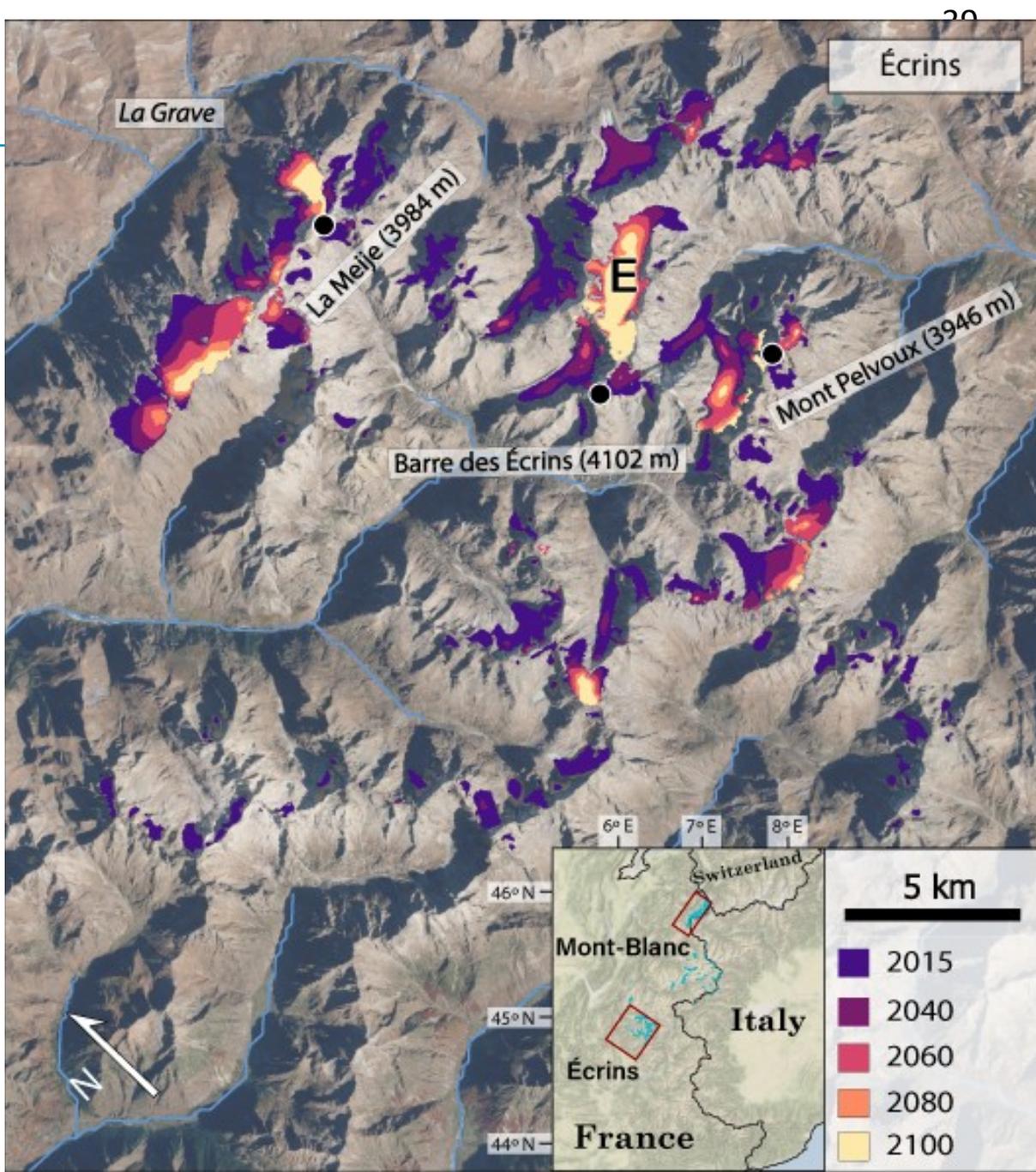


**Bolibar et al.: Deep learning unveils nonlinear climate-glacier interactions through the 21st century deglaciation of the French Alps. Submitted.**

Projections de bilan de masse et surfaces englacées pour tous les glaciers des Alpes Fr en accès libre après acceptation et parution de la publication.

# Pour le futur Écrins

**Projected glacier evolution in the Écrins region.** Projections under CLMcom-CCLM4-8-17\_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 RCP4.5, being the closest to the multi-model air temperature and precipitation mean. (image issue de la thèse de J. Bolibar)





CNRM UMR 3589

**Merci de votre attention !**

---

# Références

---

Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., & Galiez, C. (2020). 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.

Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J. P., & Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120, 24-37.

Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., ... & Weilguni, V. (2020). Observed snow depth trends in the European Alps 1971 to 2019. *The Cryosphere Discussions*, 1-50.

Ménégoz, M., Valla, E., Jourdain, N. C., Blanchet, J., Beaumet, J., Wilhelm, B., ... & Anquetin, S. (2020). Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5355-5377.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., and Morin, S.: Multicomponent ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249-1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>, 2018.

Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS.

<https://doi.org/10.25326/37>



# Tendances de l'enneigement sur les 50 dernières années dans les Alpes

Elevation [m]	Region	# series (range)	meanHS	meanHS	meanHS	maxHS	SCD	SCD	SCD	
			DJF	MAM	NDJFMAM	NDJFMAM	NDJF	MAM	NDJFMAM	
<i>Absolute changes</i>			<i>cm per decade</i>				<i>days per decade</i>			
(0.1000]	North	141-190	-0.9 (-5.3, 1.0)	-0.8 (-6.4, 0.1)	-0.8 (-4.7, 0.4)	-2.4 (-11.2, 3.1)	-2.7 (-10.0, 2.8)	-1.7 (-5.9, 0.1)	-4.4 (-12.7, 2.8)	
	South	224-241	-1.2 (-6.0, 0.9)	-0.3 (-3.2, 0.3)	-0.7 (-3.6, 0.2)	-3.2 (-15.3, 3.1)	-3.6 (-10.8, 1.1)	-1.1 (-5.3, 0.3)	-4.8 (-14.6, 0.1)	
(1000.2000]	North	122-155	-2.1 (-11.0, 3.1)	-3.7 (-21.9, 0.8)	-2.8 (-15.6, 1.6)	-5.2 (-19.9, 3.0)	-2.2 (-8.3, 5.0)	-3.0 (-7.4, 0.7)	-5.3 (-13.7, 0.8)	
	South	61-84	-3.5 (-12.6, 2.3)	-4.9 (-18.7, -0.3)	-4.1 (-14.0, 1.6)	-9.8 (-29.2, 2.6)	-2.5 (-7.4, 1.9)	-4.0 (-8.2, 1.3)	-6.7 (-14.1, -0.5)	
(2000.3000]	North	3-4	-4.3 (-9.9, -2.2)	-4.5 (-5.2, -4.1)	-5.0 (-8.2, -3.3)	-8.1 (-15.8, -4.2)	0.0 (-0.1, 0.1)		0.0 (-0.1, 0.1)	
	South	16-17	-0.1 (-9.2, 11.3)	-6.7 (-18.2, 6.6)	-2.9 (-11.5, 6.8)	-9.4 (-29.2, 6.1)	-0.3 (-2.7, 1.5)	-0.6 (-4.6, 1.3)	-0.9 (-4.8, 1.2)	

Des durées d'enneigement  
baissières en deça de 2000m