

# Tendances de l'enneigement dans les Alpes européennes – 1971- 2019

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.



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

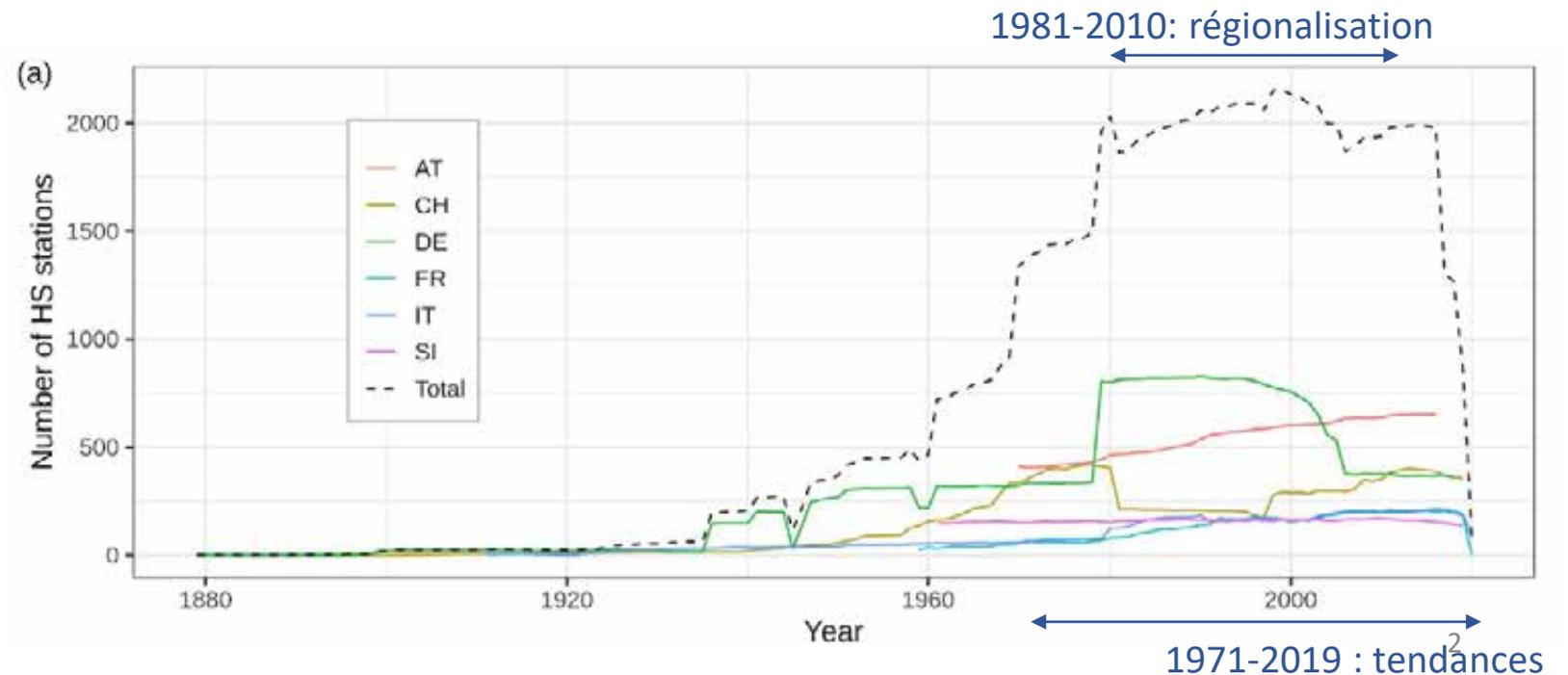
Michael Matiu<sup>1</sup>, Alice Crespi<sup>1</sup>, Giacomo Bertoldi<sup>2</sup>, Carlo Maria Carmagnola<sup>3</sup>, Christoph Marty<sup>4</sup>, Samuel Morin<sup>3</sup>, Wolfgang Schöner<sup>5</sup>, Daniele Cat Berro<sup>6</sup>, Gabriele Chiogna<sup>7,8</sup>, Ludovica De Gregorio<sup>1</sup>, Sven Kotlarski<sup>9</sup>, Bruno Majone<sup>10</sup>, Gernot 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 Debernardi<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 Weilguni<sup>23</sup>

# Objectifs et données

- Caractériser les tendances de l'enneigement sur l'ensemble de l'Arc Alpin
- Identifier les modes de variabilité de l'enneigement (« Régionalisation »)

- Rationnel : beaucoup d'études existantes, mais souvent à l'échelle régionale, avec de fortes inhomogénéités dans la définition des périodes, la profondeur temporelle, les méthodes d'analyses, la nature et la correction des données...

- 2000 séries temporelles collectées
- De 6 pays européens (Autriche Allemagne Suisse France Italie Slovénie)
- Données surtout manuelles
- Journalières
- Quality-check et Gap-filling commun

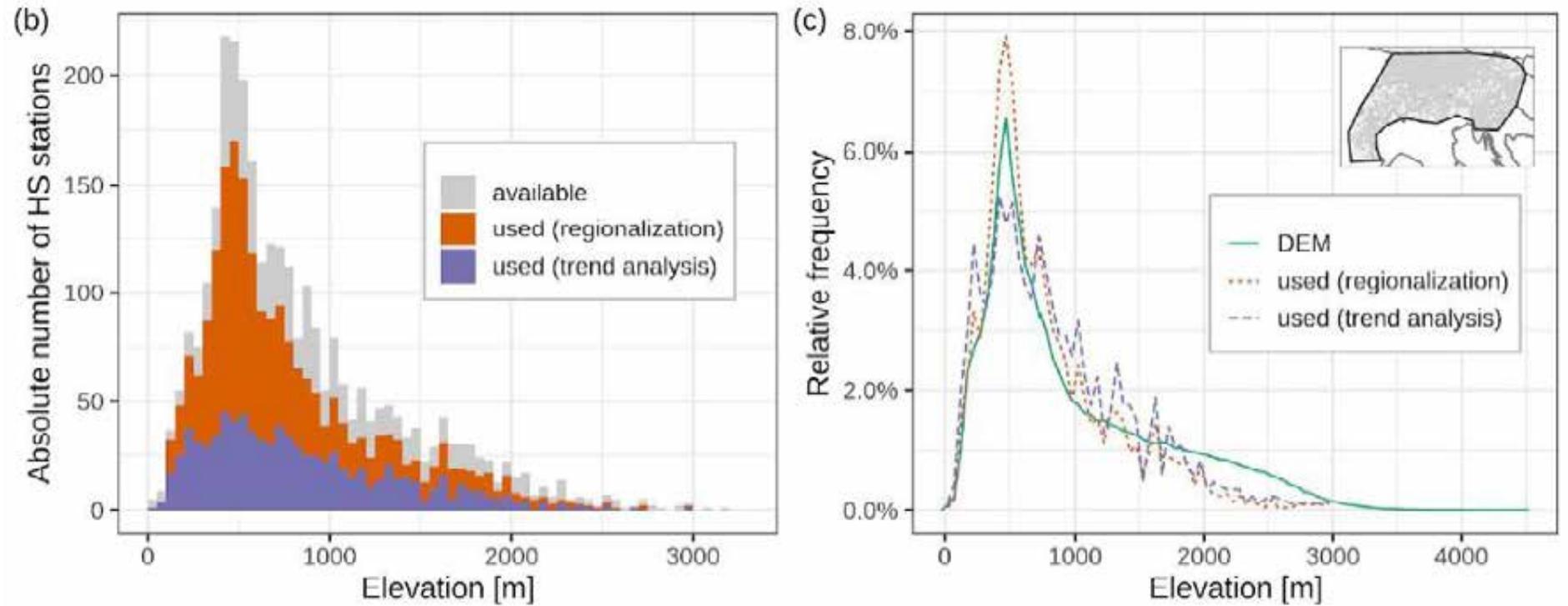


# Objectifs et données

2960 données collectées

2149 données utilisées pour la régionalisation

854 utilisées pour les tendances



=> Bonne représentativité en deçà de 2000m, confiance plus limitée au-delà.

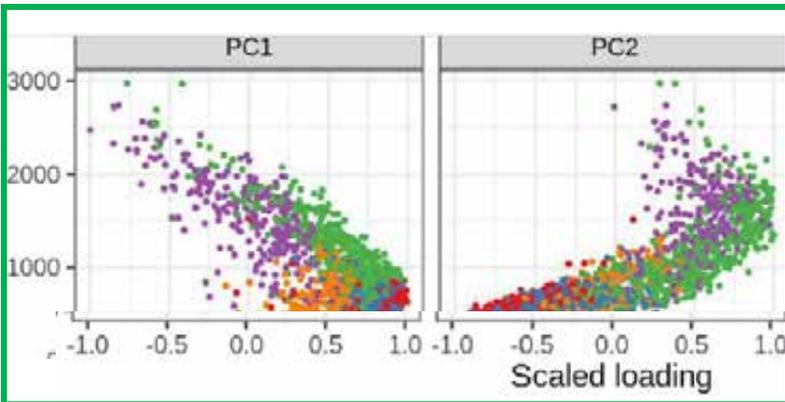
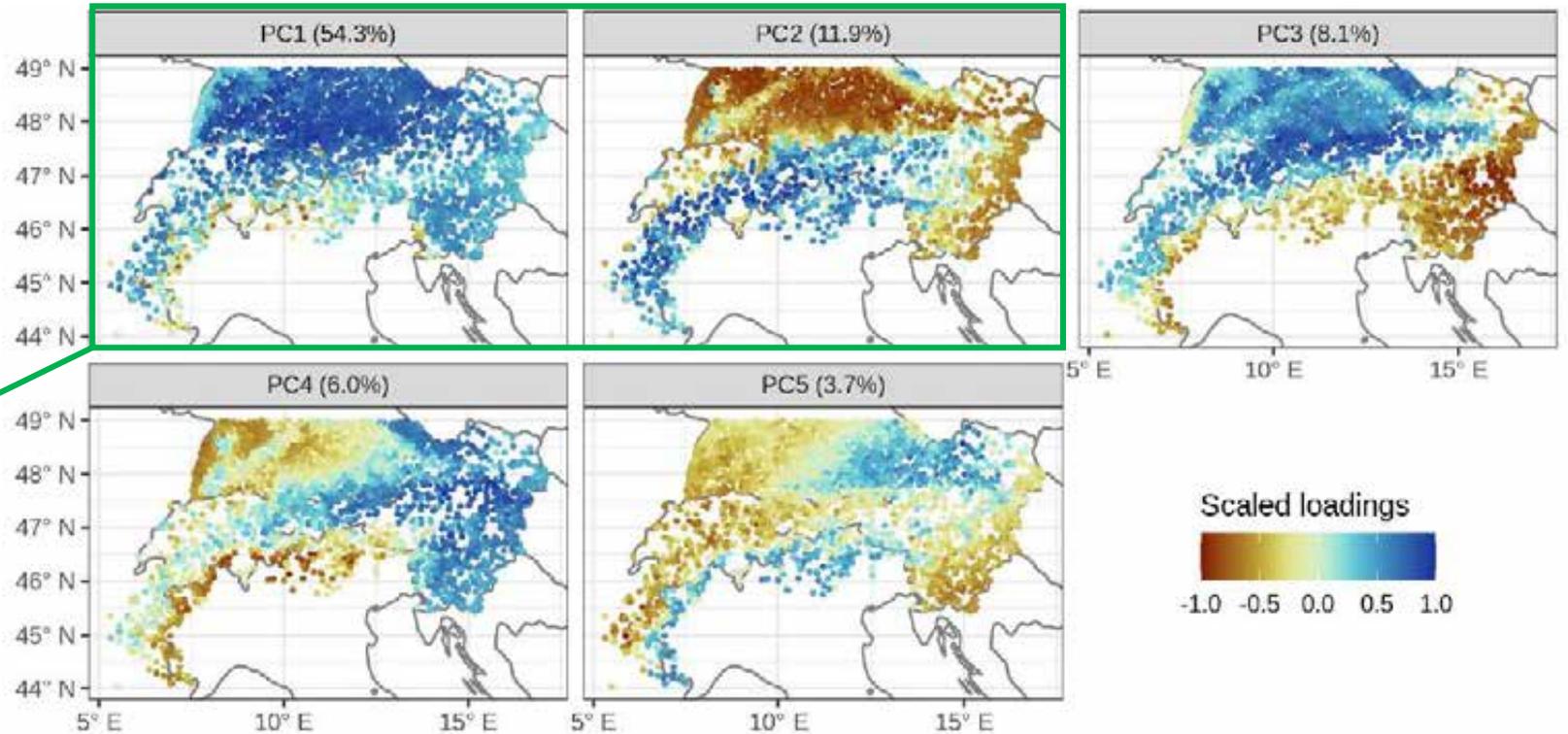
# Régionalisation

## Méthode (I)

ACP sur les séries temporelles gap-filled et quality-checked, de Déc à Mai (Taylor et al., 2013)

5 modes principaux expliquent 84% de la variance:

- PC1 et PC2 : gradients altitudinaux
- PC3: gradient Nord-Sud
- PC4: gradient Est-Ouest
- PC5: mix



# Régionalisation

## Méthode (II)

Clustering sur les composantes principales (résultat similaire à clustering sur les séries temporelles directement)

- Homogénéité spatiale remarquable pour un clustering automatique
- Probable artefact d'échantillonnage altitudinal pour N&High-Alpine et S&High Alpine
- Un zonage similaire à celui de HISTALP (Auer et al., 2007) notamment pour la précipitation



# Tendances

## Méthode

Différents indicateurs saisonniers et mensuels calculés: meanHS, maxHS, SCD (début/fin/saison-entière)

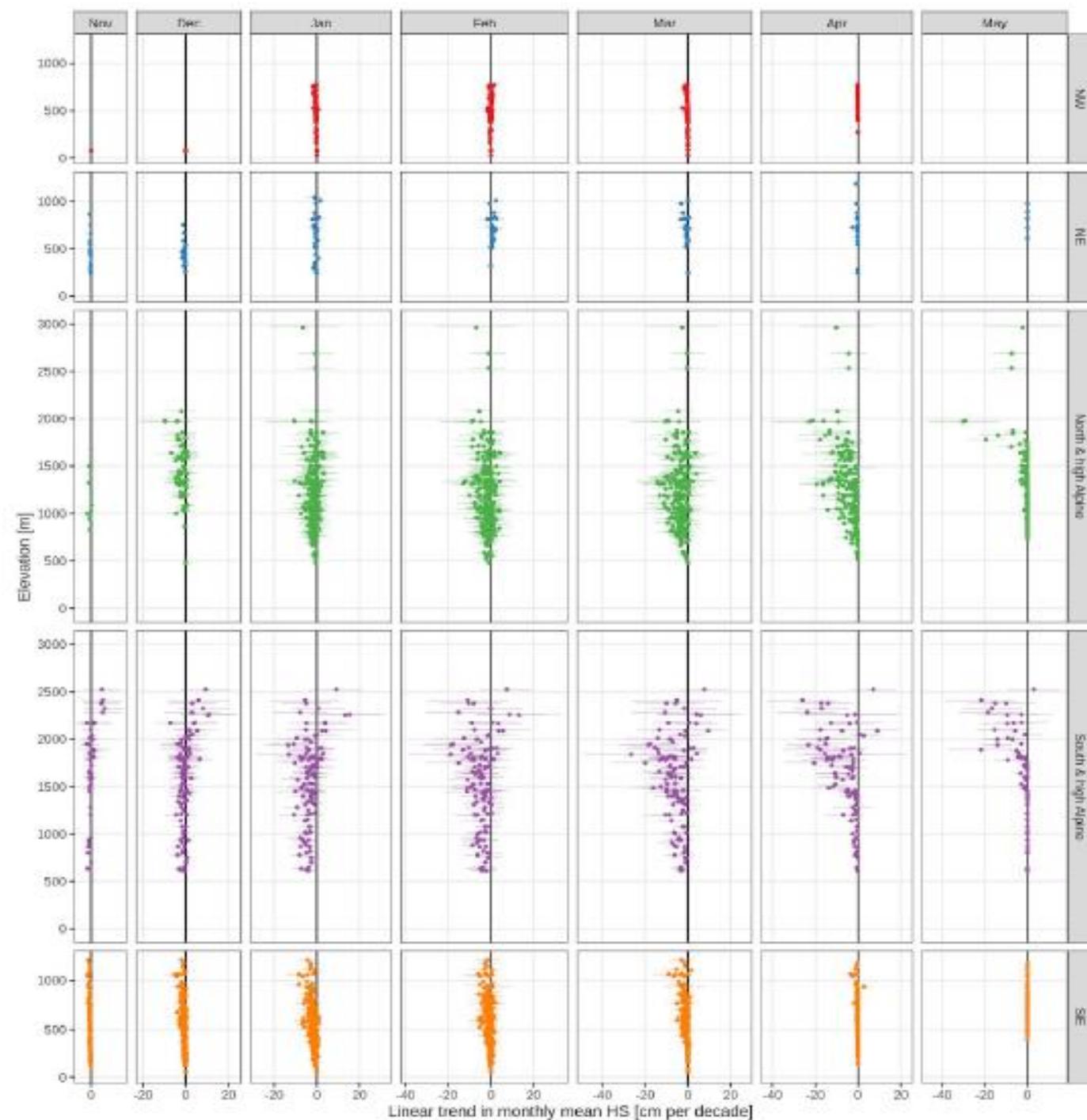
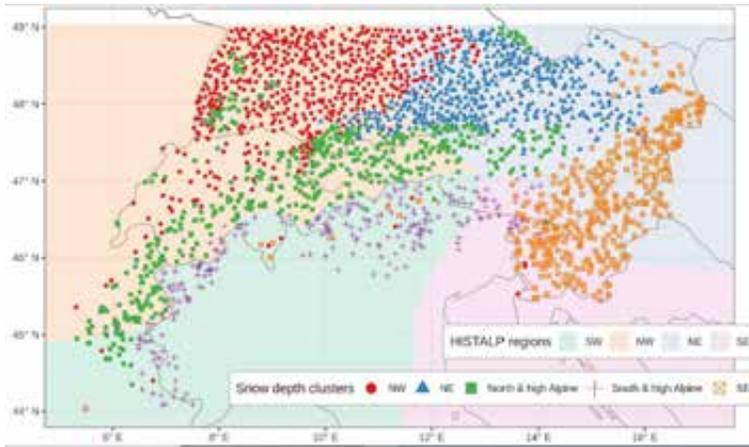
Méthodes des Moindres Carrés Ordinaires (OLS) et/ou des Moindres Carrés Généralisés (GLS) car évolution de la variance/variabilité interannuelle pour les meanHS ou maxHS par ex.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon_t$$

$$\text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma^2 * \exp(2 * \gamma * t)$$

# Tendances

- Des tendances majoritairement négatives (86%, 26% signif, contre 15% positives, <1% signif)
- A basse altitude, SE a des tendances plus négatives que NE et NW
- A haute altitude, de Fév à Mai, des tendances plus négatives au Sud qu'au Nord (et aussi plus de variabilité)



# Tendances

Elevation [m]	Region	# series (range)	meanHS	meanHS	meanHS	maxHS	SCD	SCD	SCD
			DJF	MAM	NDJFMAM	NDJFMAM	NDJF	MAM	NDJFMAM
			<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)

De 3 à 4 cm/decade en meanHS  
entre 1000m et 2000m

# Tendances

Elevation [m]	Region	# series (range)	meanHS	meanHS	meanHS	maxHS	SCD	SCD	SCD
			DJF	MAM	NDJFMAM	NDJFMAM	NDJF	MAM	NDJFMAM
			<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 tendances plus fortes au Sud qu'au Nord entre 1000m et 2000m

# Tendances

Elevation [m]	Region	# series (range)	meanHS	meanHS	meanHS	maxHS	SCD	SCD	SCD
			DJF	MAM	NDJFMAM	NDJFMAM	NDJF	MAM	NDJFMAM
			<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 tendances sur les maximas plus fortes (en valeur absolues) que sur les moyennes

# Tendances

Elevation [m]	Region	# series (range)	meanHS <i>cm per decade</i>			maxHS <i>days per decade</i>			SCD	SCD	SCD
			DJF	MAM	NDJFMAM	NDJFMAM	NDJF	MAM	NDJFMAM		
(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 deçà de 2000m

# Conclusion

Un jeu de données précieux pour de nombreuses applications en recherche (notamment détection/attribution)

**Table B3: Overview of shareable data. Column daily indicates if the original daily data can be shared, and monthly if the derived monthly data can be shared.**

Code	Country	Data provider	Daily	Monthly
AT_HZB	Austria	HZB	no	yes
CH_METEOSWISS	Switzerland	MeteoSwiss	no	yes
CH_SLF	Switzerland	SLF	no	yes
DE_DWD	Germany	DWD	yes	yes
FR_METEOFRACTANCE	France	MeteoFrance	yes	yes
IT_BZ	Italy	Bolzano	yes	yes
IT_FVG	Italy	Friuli Venezia Giulia	yes	yes
IT_LOMBARDIA	Italy	Lombardia	yes	yes
IT_PIEMONTE	Italy	Piemonte	no	no
IT_SMI	Italy	SMI	no	no
IT_TN	Italy	Trentino	yes	yes
IT_TN_TUM	Italy	Trentino (TUM)	no	no