



HAL
open science

Évolution du manteau neigeux pendant la sécheresse de 2022 en France

Simon Gascoin, Jean-Michel Soubeyroux, Fatima Karbou, Guillaume Thirel,
Laura Sourp, Yves Lejeune, Isabelle Gouttevin, Samuel Morin

► **To cite this version:**

Simon Gascoin, Jean-Michel Soubeyroux, Fatima Karbou, Guillaume Thirel, Laura Sourp, et al..
Évolution du manteau neigeux pendant la sécheresse de 2022 en France. LHB Hydrosience Journal,
inPress, 10.1080/27678490.2024.2314174 . hal-04516216

HAL Id: hal-04516216

<https://hal.science/hal-04516216>

Submitted on 22 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Évolution du manteau neigeux pendant la sécheresse de 2022 en France

Simon Gascoin, Jean-Michel Soubeyroux, Fatima Karbou, Guillaume Thirel, Laura Sourp, Yves Lejeune, Isabelle Gouttevin & Samuel Morin

To cite this article: Simon Gascoin, Jean-Michel Soubeyroux, Fatima Karbou, Guillaume Thirel, Laura Sourp, Yves Lejeune, Isabelle Gouttevin & Samuel Morin (01 Mar 2024): Évolution du manteau neigeux pendant la sécheresse de 2022 en France, LHB, DOI: [10.1080/27678490.2024.2314174](https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2314174)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2314174>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 01 Mar 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)

Évolution du manteau neigeux pendant la sécheresse de 2022 en France

Simon Gascoin ^a, Jean-Michel Soubeyroux^b, Fatima Karbou ^c, Guillaume Thirel ^d, Laura Sourp ^a, Yves Lejeune^c, Isabelle Gouttevin ^c and Samuel Morin ^e

^aCentre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, CESBIO, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UT3 Paul Sabatier, Toulouse, France ;

^bDirection de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC), Météo-France, Toulouse, France ; ^cUniversité Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France ; ^dUniversité Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France ; ^eCNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

RÉSUMÉ

En 2022, l'Europe de l'Ouest a connu un déficit de précipitations ainsi que des vagues de chaleur. La combinaison de ces conditions météorologiques a eu un impact profond sur la cryosphère des montagnes françaises, dont le manteau neigeux saisonnier. Les données issues de mesures de terrain et de la télédétection indiquent que le manteau neigeux a disparu de façon précoce dans tous les massifs. Toutefois, l'analyse révèle des différences régionales. Un fort déficit d'accumulation et une fonte particulièrement précoce dans les Alpes du Sud ont causé des étiages estivaux record. Des étiages estivaux très bas ont été aussi atteints malgré un hiver très arrosé dans des bassins sous influence nivale des Pyrénées et dans les Alpes du Nord.

MOTS-CLÉS

sécheresse ; neige ; hydrologie nivale ; manteau neigeux ; télédétection ; Pyrénées ; Alpes

KEYWORDS

Drought; snow; snow hydrology; snow cover; remote sensing; Pyrenees; Alps

Evolution of the snow cover during the 2022 drought in France

ABSTRACT

In 2022, Western Europe experienced a precipitation deficit as well as heat waves. The combination of these weather conditions had a profound impact on the cryosphere of the French mountains, including the seasonal snow cover. Data from field measurements and remote sensing indicate that the snow cover disappeared early in all the Alps and Pyrenees. However, the analysis reveals regional differences. A strong accumulation deficit and particularly early melting in the Southern Alps caused record summer low flows. Very low summer flows were also reached despite a very wet winter in snowdominated catchments in the Pyrenees and in the Northern Alps.

1. Introduction

Le manteau neigeux est une forme de stockage saisonnier et naturel des précipitations hivernales qui influence le débit de nombreuses rivières en Europe (Blöschl et al., 2017). En particulier, le débit d'étiage estival des rivières de montagne est fortement corrélé à la quantité de neige accumulée dans leur bassin versant à la fin de l'hiver (Jenicek et al., 2016). Ainsi, des chutes de neige abondantes au cours de l'hiver 2002–2003 ont atténué la sévérité des étiages lors de l'été caniculaire de 2003 dans les Alpes (Zappa & Kan, 2007).

La sécheresse 2022 désigne une sécheresse météorologique, hydrologique et agricole qui a touché l'ensemble de la région EuroMéditerranéenne au cours l'année hydrologique 2021–2022. Cette sécheresse a résulté d'un déficit de précipitations en hiver et au printemps suivi par des épisodes de forte chaleur qui ont augmenté la demande évaporative dès le début de l'été (Toreti et al., 2022). Ces anomalies ont été causées par une vaste

situation anticyclonique anormalement persistante qu'une étude a indiqué avoir été favorisée par le changement climatique d'origine anthropique (Faranda et al., 2023). En France, au 15 septembre 2022, à cause du manque d'eau dans les nappes et les rivières, la totalité des départements de la métropole étaient soumis à des arrêtés préfectoraux de vigilance ou d'alerte, 77 d'entre eux subissant des arrêtés de crise (Valo, 2022).

Dans cette étude nous nous intéressons à l'impact de la sécheresse 2022 sur le manteau neigeux en France. S'il est déjà bien établi que la sécheresse 2022 a entraîné une perte de masse record des glaciers dans les Alpes (Berthier et al., 2023 ; Cremona et al., 2023 ; Six et al., 2023 ; Voordendag et al., 2023), l'état du manteau neigeux dans les Alpes françaises et les Pyrénées avant et pendant la sécheresse 2022 n'a pas encore été spécifiquement documenté. En Italie, une analyse des chroniques in situ de hauteur de neige a révélé que l'anomalie d'équivalent en eau du manteau neigeux en mars 2022 était la plus négative depuis 1930 (Colombo

CONTACT Simon Gascoin  simon.gascoin@univ-tlse3.fr

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

et al., 2023), ce déficit ayant entraîné le pire étiage du fleuve Pô depuis 216 ans (Montanari et al., 2023). Pour décrire l'évolution du manteau neigeux en 2022 dans les Alpes françaises et les Pyrénées, nous avons assemblé différents jeux de données : mesures in situ, observations satellitaires et résultats de modèle. L'analyse conjointe de ces données nous permet de dresser le tableau de la situation nivologique au cours de l'année hydrologique 2021–2022. Nous n'avons pas analysé la situation dans le Massif Central où l'influence hydrologique du manteau neigeux est moindre.

2. Données et méthode

Nous avons mobilisé les sources de données suivantes :

- (1) **Hauteur de neige** : Nous avons utilisé les hauteurs de neige journalières de neuf stations automatiques de haute montagne (stations Nivoses) du réseau opérationnel de Météo-France (Table 1 et localisation sur la Figure 2). Ces stations ont été sélectionnées en raison de la qualité et de la longueur des chroniques et de façon à échantillonner la situation dans les Pyrénées (Lac d'Ardiden, Port d'Aula, Puigmal), les Alpes du Nord (Col de Porte, Aiguilles Rouges, Bonneval) et les Alpes du Sud (Orcières, Restefond, Millefont). La durée d'observation varie selon les stations entre 15 et 28 ans. Les données sont en accès libre depuis le 01 janvier 2024.
- (2) **Surface enneigée (SCA)** : Nous avons utilisé les produits MOD10A1 (version 6.1) issus des observations du capteur MODIS à bord du satellite Terra (Hall & Riggs, 2021). Ces données ont été post-traitées afin d'interpoler les données manquantes à cause des nuages (Gascoin et al., 2022). Nous avons utilisé les 22 années d'observation MODIS en tant que référence climatologique (Gascoin et al., 2015).
- (3) **Équivalent en eau du manteau neigeux (SWE)** : Nous avons utilisé les sorties du modèle Safran-Isba-Modcou (SIM2) de MétéoFrance (Le Moigne et al., 2020). Ce modèle hydrologique opérationnel à l'échelle nationale simule notamment

l'évolution du manteau neigeux à partir d'une représentation multi-couches du bilan de masse et d'énergie (Boone & Etchevers, 2001). Les forçages météorologiques sont issus de la réanalyse SAFRAN à 8 km de résolution depuis 1958 (Vidal et al., 2010). Ces forçages sont désagrégés par tranche d'altitude pour prendre en compte les gradients météorologiques verticaux (Le Moigne et al., 2020 ; Martin et al., 2016).

- (4) **Débit de rivières** : Nous avons utilisé les données de débits mensuels de rivières dans les Alpes et les Pyrénées qui sont sous influence nivale (Figure 1). Nous sommes partis d'un jeu de stations hydrométriques peu influencées par les activités humaines et pour lesquelles des observations sont disponibles de 1970 à 2022 (Strohmer et al., 2023). Nous avons ensuite conservé les stations ayant un régime nival marqué en nous basant sur la différence normalisée entre le débit moyen mensuel de l'été et le débit moyen mensuel de l'hiver, qui caractérise un régime nival marqué lorsqu'elle est positive :

$$\frac{Q_{JJA} - Q_{DJF}}{Q_{JJA} + Q_{DJF}} > 0,$$

où Q_{JJA} est la moyenne des débits mensuels de juin, juillet et août (JJA) depuis 1970, tandis que Q_{DJF} est la moyenne des débits des mois de décembre, janvier et février (DJF) sur la même période. Ces critères conduisent à sélectionner six stations listées dans la Table 2. Les données de débit ont été téléchargées depuis le site Hydroportail (SCHAPI – HydroPortail, 2023).

Nous avons ensuite calculé pour chaque station conservée le ratio entre le débit estival en 2022 (Q_{JJA}^{2022}) et sa valeur moyenne entre 1970 et 2021 (Q_{JJA}). Cet indice noté QDI (DI pour *deficit index*) nous permet de caractériser l'anomalie du débit estival pour différentes rivières :

$$QDI = \frac{Q_{JJA}^{2022}}{Q_{JJA}}$$

De la même façon, nous avons défini un indice *SWE deficit index* (SDI) comme le ratio entre le SWE des mois de décembre, janvier et février de l'année

Table 1. Données utilisées pour l'analyse de la hauteur de neige. Emplacement, altitude et période temporelle couverte par les stations automatiques de haute montagne (Stations Nivoses, Météo-France).

Nom	longitude	latitude	altitude (m)	Période
Aiguilles Rouges	6°53'48"E	45°59'10"N	2365	1994–09-01 2022–07-01
Bonneval	7°03'04"E	45°21'06"N	2741	1996–01-08 2022–07-01
Col de Porte	5°45'55"E	45°17'42"N	1325	2003–04-09 2022–06-10
Orcières	6°20'01"E	44°43'08"N	2280	2006–12-21 2022–07-01
Restefond	6°47'59"E	44°20'24"N	2550	1995–09-27 2022–07-01
Millefont	7°11'31"E	44°07'05"N	2430	2007–10-19 2022–07-01
Lac d'Ardiden	0°03'57"O	42°50'53"N	2445	1995–10-18 2022–07-01
Port d'Aula	1°06'51"E	42°46'12"N	2140	1995–10-17 2022–07-01
Puigmal	2°05'43"E	42°23'04"N	2471	2009–10-02 2022–07-01

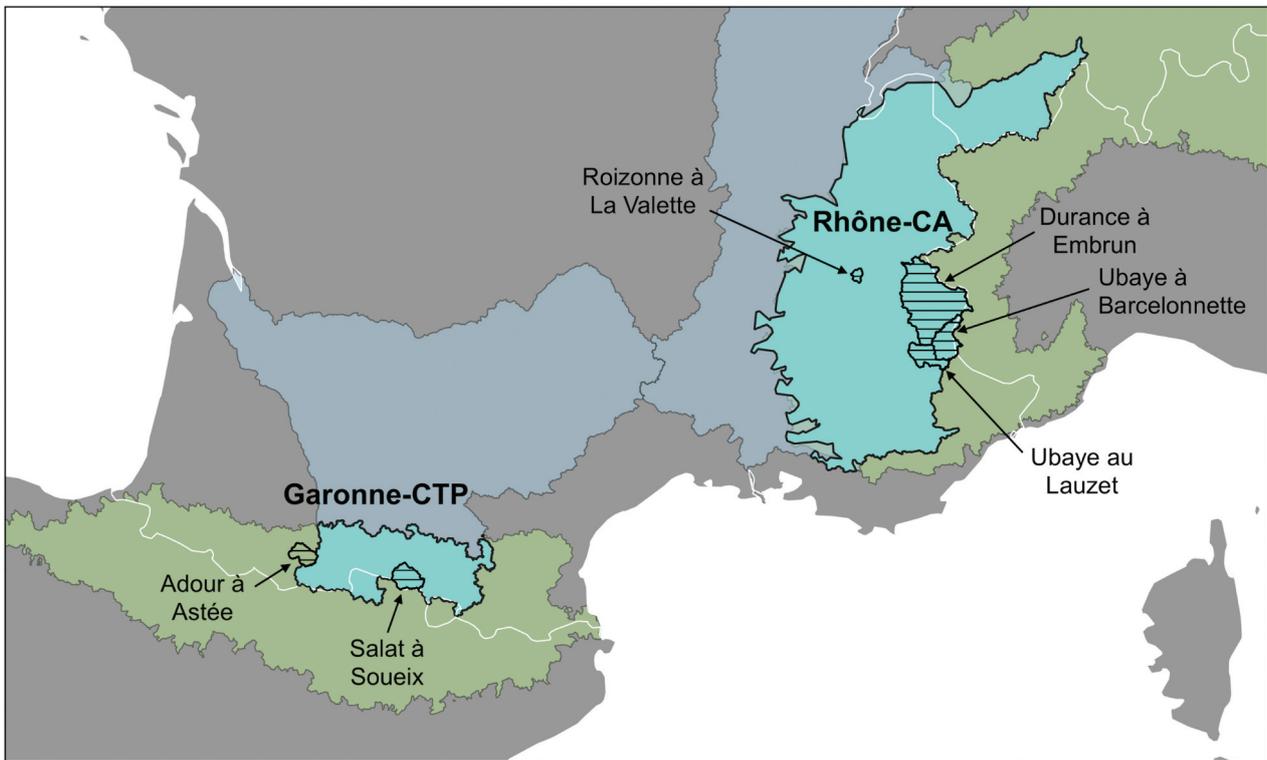


Figure 1. Carte des régions d'étude considérées. Les deux domaines utilisés pour analyser le SWE (équivalent en eau de la neige) et SCA (surface enneigée) sont Garonne-CTP (intersection du bassin versant de la Garonne avec le polygone de la Communauté de Travail des Pyrénées) et Rhône-CA (intersection du bassin versant du Rhône avec le polygone de la Convention Alpine). Les bassins versants de la Table 2 sont également indiqués.

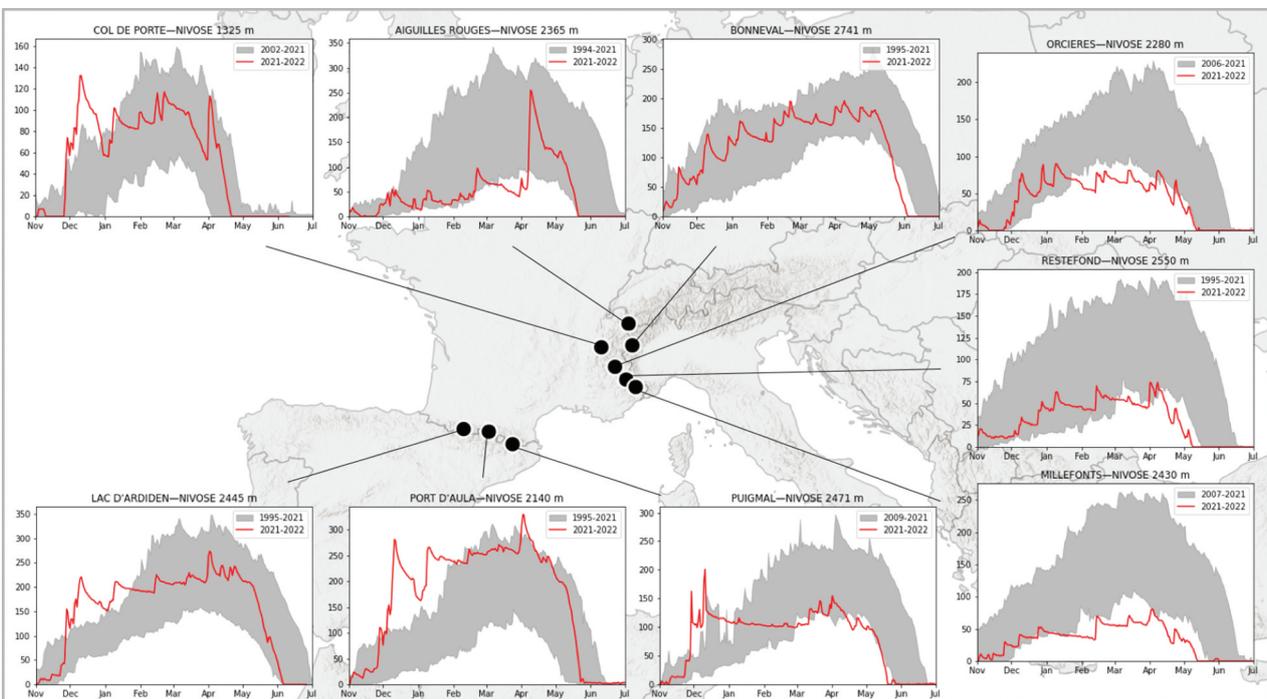


Figure 2. Hauteur de neige (en cm) mesurée par neuf stations Nivoises dans les Alpes et les Pyrénées sur la saison 2021–2022 (courbe rouge). L'enveloppe grise représente les percentiles 10 et 90 pour les périodes de référence (variables selon les stations).

Table 2. Données utilisées pour l'analyse du débit des rivières sous influence nivale. Nom et identifiant des stations hydro-métriques et période couverte. La Durance à Embrun et l'Ubaye au Lauzet sont les stations immédiatement en amont de la retenue de Serre-Ponçon.

Nom	Code BD HYDRO	Bassin versant (km ²)	Période de mesure
Roizonne à La Valette	W2335210	71	1970–2022
Durance à Embrun	X0310010	2283	1970–2022
Ubaye à Barcelonnette	X0434010	542	1970–2022
Ubaye au Lauzet	X0454010	943	1970–2022
Salat à Soueix-Rogalle	O0362510	385	1970–2022
Adour à Astée	Q0100010	272	1970–2022

hydrologique 2021–2022 et sa moyenne pendant la période 1970–2021 :

$$SDI = \frac{SWE_{DJF}^{2022}}{SWE_{DJF}}$$

où le SWE est issu de la réanalyse SIM2 et moyenné à l'échelle des bassins versants considérés.

- (1) Nous avons agrégé les surfaces enneigées MODIS et le SWE de SIM2 dans deux régions hydrologiques représentatives (Figure 1). La première région est définie comme l'intersection du bassin versant du Rhône avec le domaine de la Convention Alpine et correspond ainsi à la partie alpine du bassin versant du Rhône (Rhône-CA). Nous avons suivi la même logique pour le bassin de la Garonne que nous avons recoupé avec le polygone de la Communauté de Travail des Pyrénées afin de sélectionner sa partie pyrénéenne seulement (Garonne-CTP). Ce découpage permet de caractériser l'état du manteau neigeux à grande échelle dans les deux principaux hydrosystèmes français sous influence nivale.
- (2) **Neige humide** : Nous avons utilisé les cartes de neige humide calculées à partir des données des satellites Sentinel-1 pour la période de 2016 à 2022 couvrant les massifs alpins. Sur la base de ces cartes de neige, les probabilités d'enneigement ont été calculées pour le massif des Grandes-Rousses dans les Alpes du Nord par classes d'altitude et d'orientation. Les altitudes inférieures et supérieures de neige humide (ou lignes de fonte), avec des probabilités d'enneigement supérieures à 50 %, sont alors estimées pour différents versants des massifs.

3. Résultats

3.1. Hauteur de neige

La hauteur de neige a connu pendant l'hiver 2021–2022 et les printemps et été 2022 une évolution contrastée à travers le territoire (Figure 2). On observe

des écarts fortement positifs en début de saison dans les Pyrénées et en Chartreuse (percentile 90 largement dépassé pour les Nivoses Col de Porte, Lac d'Ardiden, Port d'Aula et Puigmal) alors que les stations au sud des Alpes (Restefond et Millefont) ont connu un début de saison plutôt déficitaire avec des valeurs proches du percentile 10 à la même période.

On note un pic d'accumulation en avril à la nivose des Aiguilles Rouges qui résulte vraisemblablement d'un dépôt de neige transportée par le vent. Les graphes de stations proches ne montrent pas une telle accumulation à cette période (annexe). Le Bulletin d'estimation du Risque d'Avalanche du 8 avril 2022 du massif du Mont-Blanc faisait état "d'importants cumuls de neige récente et fraîche soufflée à plus de 1900/2000 m, tombée depuis jeudi 7 avril (60 à 80 cm en moyenne)".

3.2. Surface enneigée

La surface enneigée est globalement inférieure au premier quartile des valeurs de référence dès le mois de février 2022 dans les domaines Garonne-CTP et Rhône-CA (Figure 3). La surface enneigée du domaine Rhône-CA a même atteint un minimum absolu en mars 2022 puis en juin 2022 (Figure 4). Dans les deux domaines, la surface enneigée avait pourtant atteint des valeurs élevées au début de la saison d'enneigement, avec un même maximum absolu atteint en décembre 2021 dans le domaine Garonne-CTP.

3.3. Equivalent en eau

A l'échelle nationale, l'équivalent en eau agrégé (SWE) était déficitaire dans les Alpes du Sud, le Massif Central, le Jura et les Vosges dès le mois de janvier (Figure 5). Ce déficit n'a fait que s'accroître au cours de la saison. Dans les Pyrénées, le SWE était excédentaire en janvier et février en particulier à l'ouest de la chaîne. La situation s'est inversée à partir du mois d'avril. En mai et juin 2022 pratiquement tous les massifs français étaient marqués par un déficit important de SWE dépassant parfois 100 mm.

Dans le domaine Rhône-CA, l'équivalent en eau (SWE) est devenu déficitaire à partir du mois de février et cette anomalie négative s'est creusée au printemps en dépit d'un léger regain à la mi-avril (Figure 6). Au final, le SWE a atteint son minimum annuel avec un mois et demi d'avance sur les références (prises ici comme la médiane). La valeur du SWE au 1^{er} juin 2022 était la deuxième valeur la plus faible après celle du 1^{er} juin 1976 (Figure 7).

Dans le domaine Garonne-CTP, l'équivalent en eau (SWE) était largement excédentaire jusqu'au début du mois de février, mais une fonte printanière rapide l'a ramené à un niveau inférieur au premier quartile à partir de la mi-mai (Figure 6).

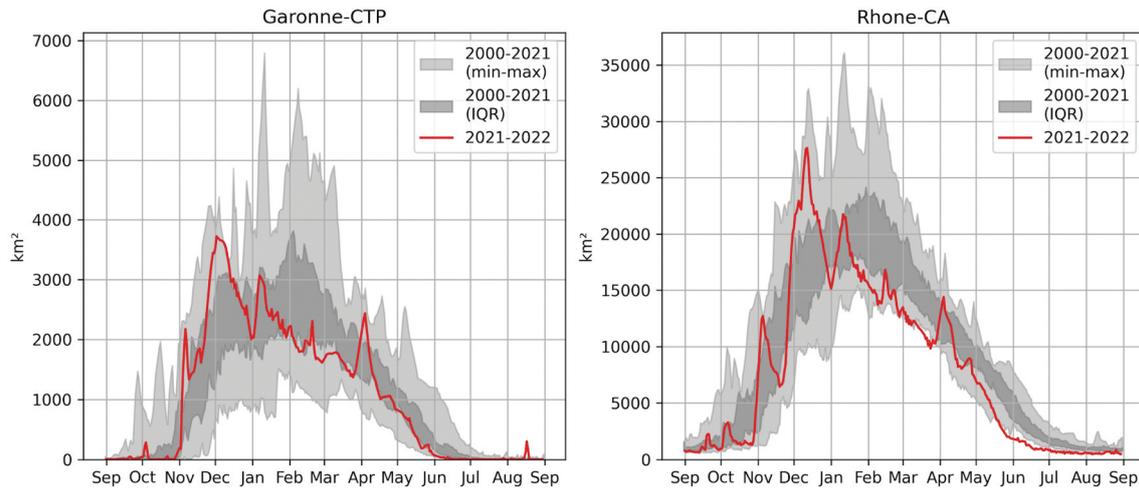


Figure 3. Evolution journalière de la surface enneigée (en km^2) des domaines Garonne-CTP et Rhône-CA calculée à partir des observations du capteur Terra/MODIS sur la saison 2021–2022 (courbe rouge). Les surfaces grisées représentent l'écart interquartile (IQR) et l'écart entre le minimum et le maximum sur la période allant du 01/09/2000 au 31/08/2021.

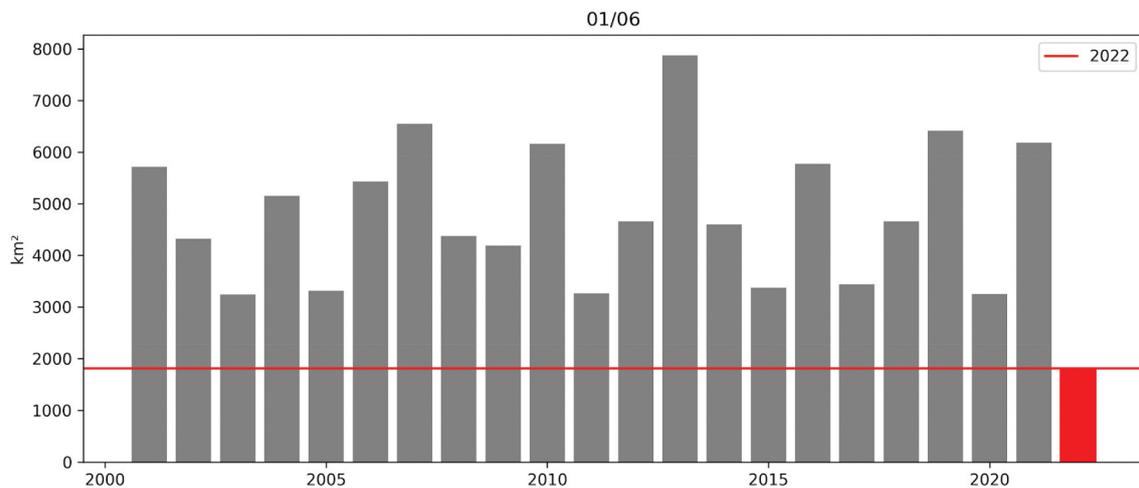


Figure 4. Surface enneigée (en km^2) dans le domaine Rhône-CA au 1er juin calculée à partir des observations du capteur Terra/MODIS. En rouge, 2022.

On note un épisode de fonte important à la mi-décembre qui a consommé le quart de la masse de neige dans ce domaine en trois semaines. Dans le domaine Garonne-CTP, le minimum annuel d'équivalent en eau a été atteint de façon moins précoce que dans le domaine Rhône-CA, mais tout de même avec deux semaines d'avance par rapport à la médiane calculée sur la période 1970–2021.

3.4. Neige humide

L'examen des lignes de fonte montre que l'altitude inférieure de la surface de neige humide dans le Massif des Grandes Rousses (Alpes du Nord) a augmenté à un rythme plus rapide que les années précédentes (Figure 8, pour les faces nord). Au début de la fonte nivale, l'altitude inférieure de la surface de neige humide en 2022 était comparable aux altitudes observées les autres années, se positionnant autour de 1900 m. Au fur et à

mesure de l'avancement de la saison 2022, les altitudes inférieures de la neige sont significativement plus élevées, mettant en évidence un retrait plus précoce et plus rapide du manteau neigeux. Par exemple, on observe une avancée de trois semaines début juin à 2200 m en 2022, équivalent à un décalage de 500 m d'altitude par rapport aux années précédentes.

3.5. Débits des rivières

Pour les six stations sélectionnées, les débits mensuels entre mai et août 2022 ont été systématiquement inférieurs au premier quartile observé depuis 1970 (Figure 9). Les étiages estivaux ont été particulièrement sévères dans les rivières des Alpes du Sud. Ainsi, les débits de l'Ubaye et de la Durance ont été à la fois très déficitaires (inférieurs à la moitié de la valeur médiane) et précoces (pic de fonte printanier en avance d'un mois). Les débits du mois de juillet ont

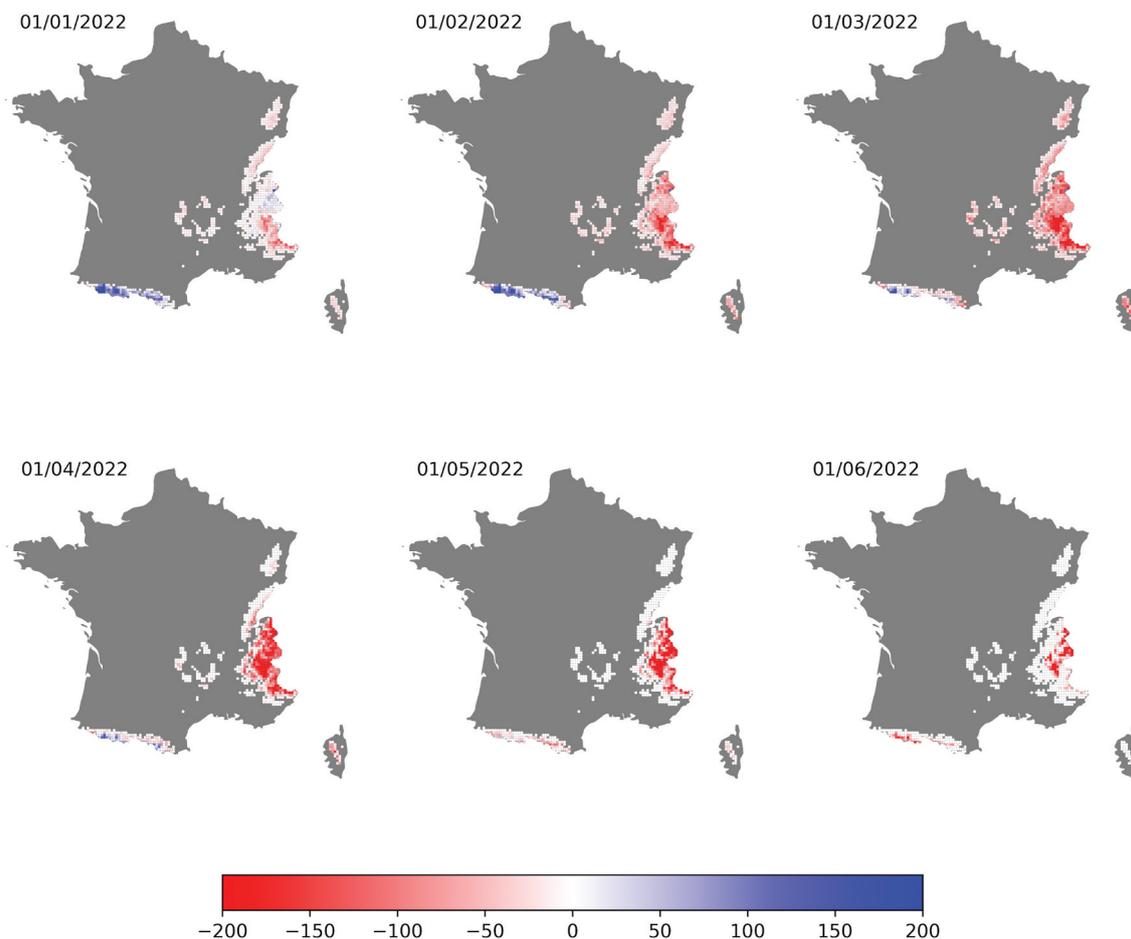


Figure 5. Cartes des écarts d'équivalent en eau (SWE, kg m^{-2} , aussi exprimé en mm eq. eau) en France métropolitaine au premier jour de chaque mois entre janvier et juin 2022 d'après le modèle SIM2 (période de référence : 1970–2021).

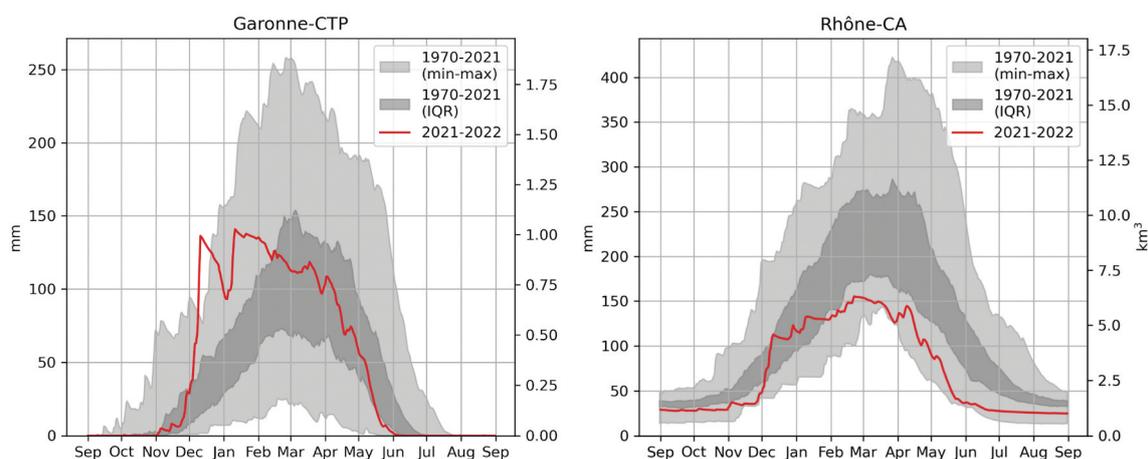


Figure 6. Evolution journalière de l'équivalent en eau (en mm et en km^3) des domaines Garonne-CTP et Rhône-CA calculé selon le modèle SIM2 en 2021–2022 (courbe rouge). Les surfaces grisées représentent l'écart inter-quartile (IQR) et l'écart entre le minimum et le maximum sur la période allant du 01/09/1970 au 31/08/2021.

atteint des minimums absolus sur la période pour les quatre stations des Alpes (Figure 10). Il est à noter qu'en 2022 le débit moyen de l'Ubaye en juillet était similaire voire légèrement inférieur à celui du mois d'août (en raison de quelques averses survenues en août), ce qui est contraire au régime hydrologique habituel. Les hydrogrammes de l'année hydrologique

2021–2022 des rivières pyrénéennes (Salat, Adour) et de la Roizonne (Alpes du Nord) sont marqués par de forts débits en hiver et une crue printanière déficitaire, mais ce déficit est moins prononcé que pour l'Ubaye et la Durance. En résumé, on observe une évolution contrastée au cours de l'année hydrologique selon les massifs, avec un double étiage dans les Alpes du Sud

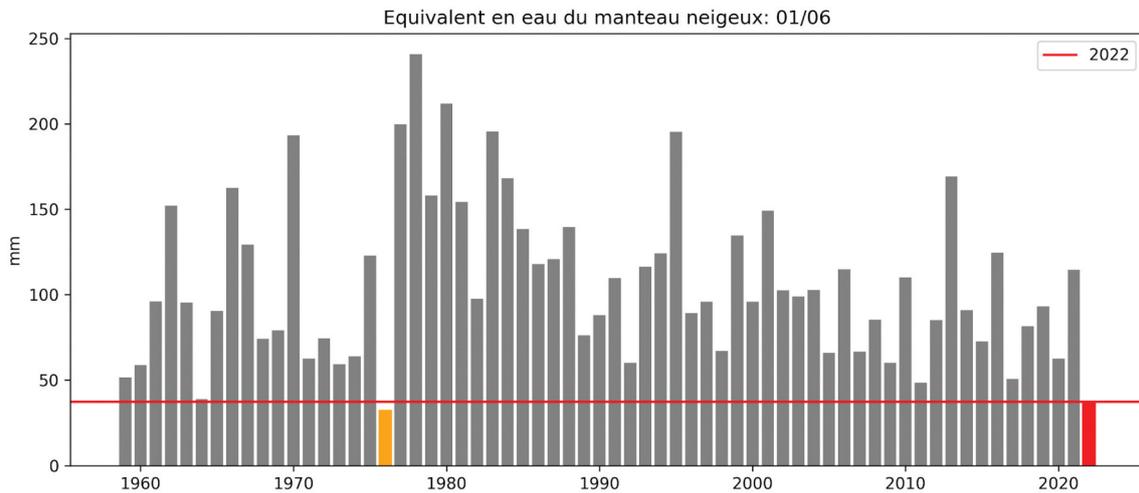


Figure 7. Équivalent en eau du manteau neigeux (en mm) dans le domaine Rhône-CA au 1er juin d'après le modèle SIM2, de 1959 à 2022. En rouge le 1er juin 2022, en Orange le 1er juin 1976, la seule valeur inférieure à 2022 sur la période d'étude.

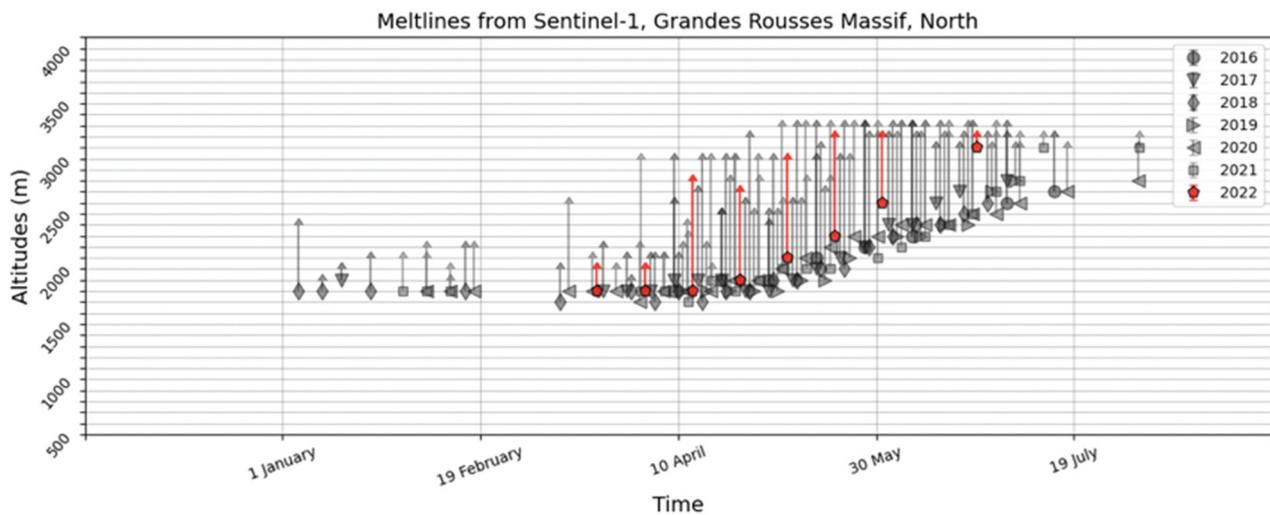


Figure 8. Lignes de fonte dérivées de Sentinel-1 de 2016 à 2022 pour les faces nord du massif des Grandes-Rousses dans les Alpes du Nord. Les lignes de fonte indiquent les altitudes inférieures de neige humide (avec au moins 50 % de probabilité), les flèches indiquent l'étendue de la neige humide en altitude (et la limite supérieure de neige humide). A noter que l'absence de neige humide peut signifier l'absence de totale neige ou la présence de neige sèche.

(étiage hivernal normal et étiage estival très sévère) et une double période de hautes eaux dans les Pyrénées (crue hivernale atypique et crue printanière faible).

Le calcul des indices QDI (anomalie de débit estival) et SDI (anomalie d'équivalent en eau) pour les bassins versants drainant ces six stations permet de résumer l'état hydro-climatique observé dans les principaux massifs français (Figure 11). Le déficit d'accumulation nivale dans les Alpes du Sud est associé à une forte anomalie négative de débit estival. A l'inverse, une anomalie positive de SWE dans les Pyrénées est associée à un étiage un peu moins sévère.

4. Discussion

Sur tous les massifs, le manteau neigeux a rapidement décliné pour atteindre une valeur basse dès le début de l'année 2022. Cette fonte rapide est la conséquence des

températures exceptionnellement hautes fin décembre puisque la fin d'année 2021 était la plus douce jamais mesurée (Météo-France, 2021). Ensuite, une longue période sèche et ensoleillée a commencé le 10 janvier avec l'installation d'une situation anticyclonique (Faranda et al., 2023 ; Météo-France, 2022a). Le déficit de précipitation à partir de janvier 2022 a limité l'accumulation de neige sur tous les massifs. La longue période d'ensoleillement suivie d'un épisode de chaleur précoce en mai puis une vague de chaleur en juin ont accéléré la fonte à la fin du printemps. Le lecteur trouvera une présentation plus détaillée de ces conditions météorologiques dans le Bilan climatique de l'année publié par Météo-France (2022b).

Au-delà du diagnostic à l'échelle nationale, il existe des disparités régionales qui sont liées à la forte hétérogénéité spatiale des précipitations au début de l'hiver 2021–2022. Dans les Pyrénées, une forte anomalie

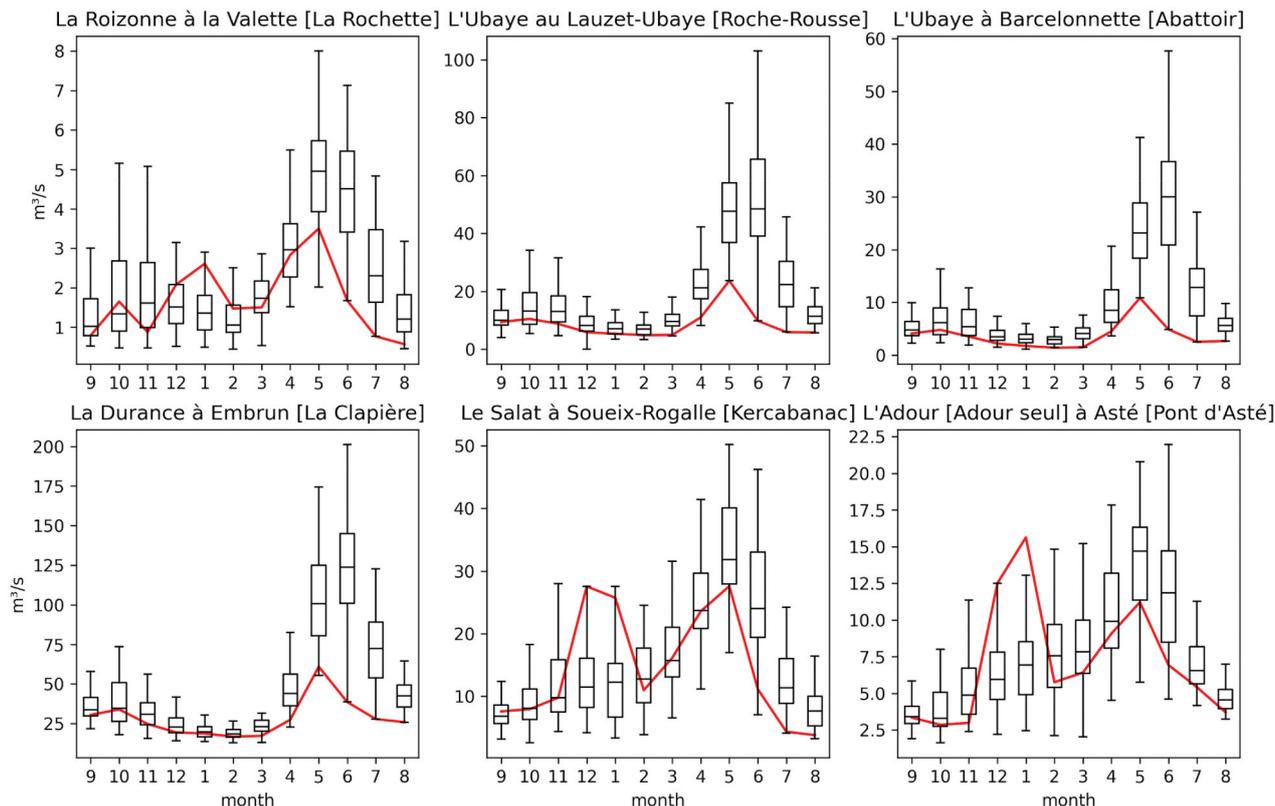


Figure 9. Distribution statistique des débits mensuels mesurés entre le 01/09/1970 et le 31/08/2021 (boîtes à moustaches : médiane, premier et troisième quartiles, 1.5 écart interquartile) et débit mensuel mesuré entre le 01/09/2021 et le 31/08/2022 (courbe rouge) pour six stations sous influence nivale et peu influencées par les activités humaines.

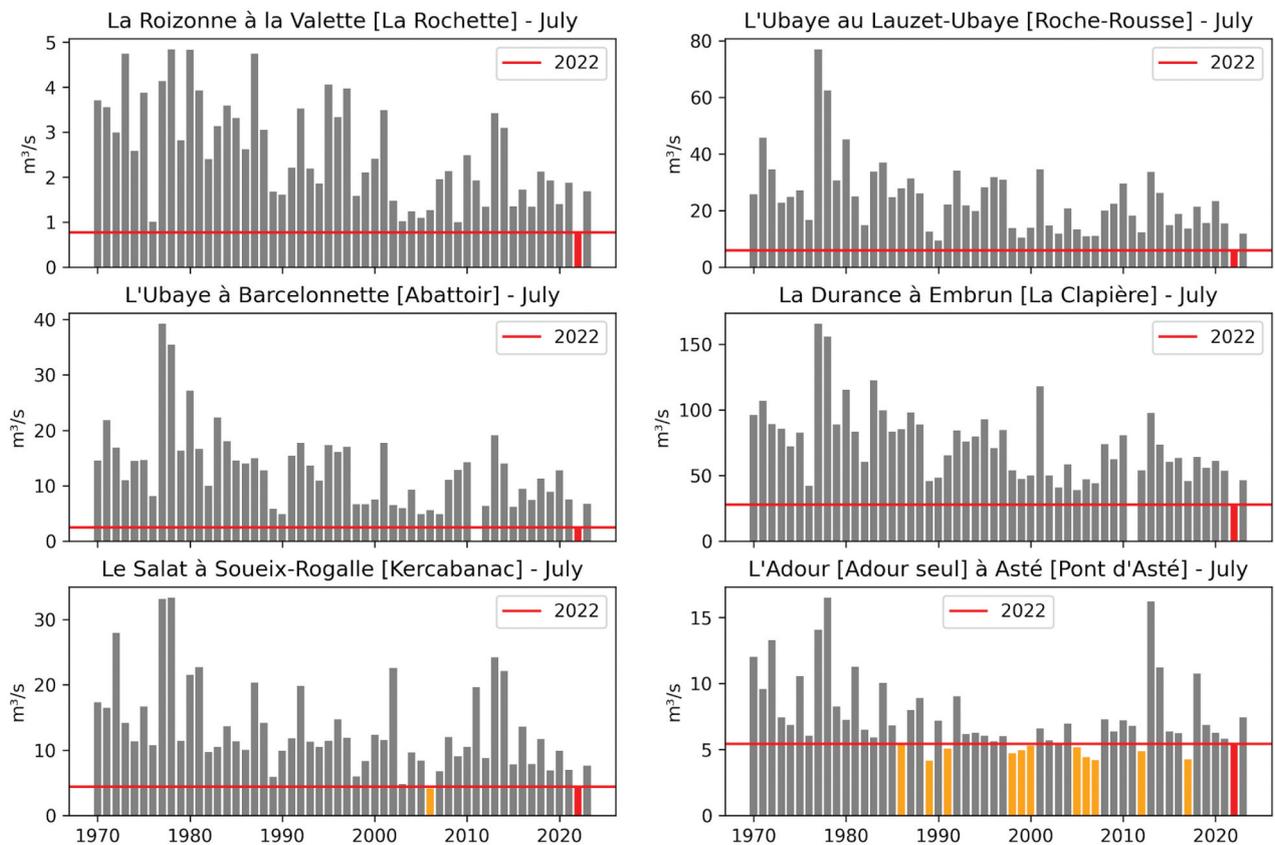


Figure 10. Débits en juillet. En rouge l'année 2022, en orange les années inférieures à 2022. Noter l'absence de données 2011 à Barcelonnette et Embrun.

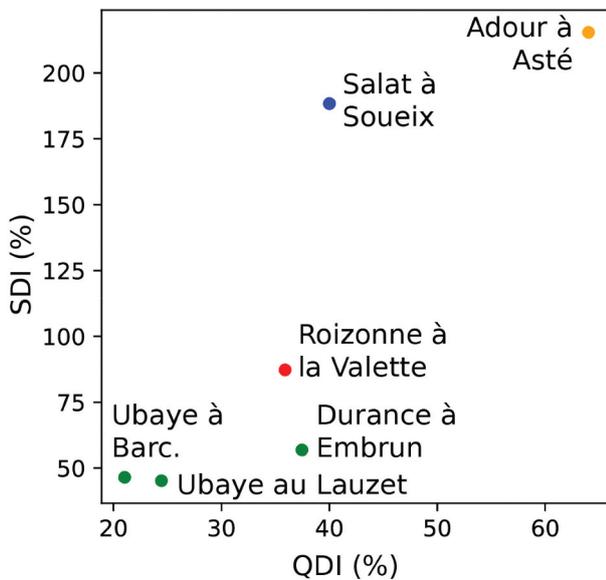


Figure 11. Comparaison des indices QDI et SDI. Le QDI représente le débit estival de 2022 en % du débit estival moyen et le SDI est le SWE hivernal de 2022 en % du SWE hivernal moyen.

positive du stock de neige en altitude en début de saison a permis au manteau neigeux de résister une partie du printemps. Le manteau neigeux s'est constitué rapidement suite à plusieurs chutes de neige abondantes voire exceptionnelles entre le 23 novembre et le 10 décembre. L'enneigement a connu un regain au début du mois de janvier avec les précipitations amenées par un front chaud aquitain. Si les chutes de neige ont été importantes en altitude, ce front a été accompagné par un fort redoux si bien que les précipitations abondantes sont tombées sous forme de pluie en moyenne montagne, y compris sur des secteurs encore enneigés, entraînant les crues remarquables de la Garonne, de l'Ariège, de l'Adour (SMEAG, 2022). Ainsi l'Adour à Tarbes a connu une première crue trentennale en décembre 2021 (La Dépêche, 2022), qui a peut-être été dépassée en janvier 2022 (données non validés sur HydroPortail).

Dans les Alpes, on note un contraste nord-sud assez marqué avec une situation critique dans les Alpes du Sud. Le démarrage de l'accumulation de neige est tardif sauf dans les pré-Alpes, puis un déficit de précipitations prolongé a conduit à des déficits de hauteurs de neige et de SWE records et généralisés sur l'ensemble des massifs à partir de février. A l'instar des Pyrénées, dans les Alpes du Nord, des chutes de neige assez importantes en début d'hiver ont sans doute atténué la sévérité de la sécheresse hydrologique par rapport aux Alpes du Sud.

Avec les vagues de chaleur qui ont touché la France au cours de l'été, la séquence 2022 peut être qualifiée d'événement conjoint de déficit en neige et de vague de chaleur ("compound snow drought and heatwave", Li & Wang, 2022). Cette caractéristique distingue notamment l'été 2022 de l'été 2003 du point de vue

hydrologique dans les Alpes du Sud où le déficit de neige était bien plus marqué en 2022 qu'en 2003, ce qui explique pourquoi les débits ont atteint des valeurs aussi basses au cœur de l'été 2022. Ainsi il apparaît qu'un hiver très arrosé n'a pas garanti un étiage soutenu en été dans des bassins de montagne sous influence nivale. Ce découplage entre accumulation hivernale et étiages estivaux est à étudier plus précisément mais c'est un des effets attendu du changement climatique. Une question ouverte est le lien entre le déficit de neige et les fortes chaleurs observées au cours de l'été 2022. A plus grande échelle et dans d'autres régions du monde, il a été montré que les sécheresses de neige contribuent à amplifier les vagues de chaleur (Li & Wang, 2022). Cette rétroaction s'explique par l'assèchement du sol et la forte hausse de l'énergie solaire absorbée en l'absence de neige, deux facteurs qui tendent à augmenter la température de l'air. Il semble important d'étudier cette question dans le cas des sécheresses nivales en France pour mieux anticiper leur impact hydroclimatique à l'échelle saisonnière.

Enfin, l'accumulation du manteau neigeux dépend des précipitations et de la température de l'air au cours de l'hiver, mais l'énergie qui entraîne la fonte du manteau neigeux provient du rayonnement solaire et atmosphérique ainsi que des flux turbulents d'énergie latente et sensible (Armstrong & Brun, 2008). Aux latitudes des Alpes et des Pyrénées, le rayonnement net est la source d'énergie principale (Bonsoms et al., 2022 ; López-Moreno et al., 2017 ; Sicart et al., 2008). Ce rayonnement est modulé par les impuretés à la surface du manteau neigeux (Réveillet et al., 2021). Ces impuretés accélèrent la fonte surtout à la fin du printemps au moment où le rayonnement solaire est le plus intense. Durant l'année hydrologique 2021–2022, un dépôt important de poussières sahariennes a eu lieu le 16 mars 2022, mais ces poussières ont été rapidement recouvertes par de faibles chutes de neige en avril. Ces dépôts ont donc accéléré la fonte plus tard dans la saison lorsqu'ils ont ré-émergé en surface. Cet effet devra être mieux étudié pour bien comprendre l'évolution du manteau neigeux au printemps 2022. Il est vraisemblable que cette accélération soit manifeste à haute altitude où le manteau neigeux persiste plus tardivement (Dumont et al., 2020).

5. Conclusion

La situation hydroclimatique au cœur de l'hiver 2021–2022 était assez contrastée en haute montagne avant de converger vers une situation de sécheresse généralisée au cours du printemps. Dans les Alpes du Sud, une sécheresse hivernale et un printemps chaud ont conduit à un étiage record sans pic de fonte. Dans les Alpes du Nord, l'enneigement était plus proche des normales mais la chaleur printanière a conduit à un

pic de fonte avancé. Dans les Pyrénées, le début d'hiver exceptionnellement arrosé a produit une crue atypique d'hiver mais la disparition précoce du manteau neigeux a finalement entraîné un étiage marqué. Il ressort que, quel que soit le régime des précipitations en hiver, l'hydrologie des massifs a été fortement impactée en 2022 par les conditions de température du printemps et début d'été. A ce titre l'année 2021–2022 peut être vue comme un analogue de la situation attendue dans les prochaines décennies (Soubeyroux, 2023).

Les mesures d'équivalent en eau réalisées par les compagnies hydroélectriques n'ont pas pu être utilisées pour cette étude. Ces données restent très difficiles à obtenir pour les études académiques ce qui est regrettable car elles constituent un complément d'information précieux pour étudier l'évolution du manteau neigeux et des ressources en eau en France. En effet, l'équivalent en eau n'est pas mesuré par Météo-France (hors station de recherche) ou par d'autres services de l'Etat. L'ouverture de ces données serait donc également bénéfique pour tous les acteurs du territoire afin d'éclairer la prise de décision en cours de saison, en particulier pour gérer une sécheresse comme celle de 2022. La mise à disposition de ces données permettrait enfin de mieux communiquer auprès du grand public sur l'état des ressources en eau et ainsi faciliter l'acceptabilité d'éventuelles mesures de restriction.

Outre la non disponibilité d'observations in-situ d'équivalent en eau, nous regrettons aussi l'absence de dispositif institutionnel de mise à disposition en temps réel et de façon homogène des informations sur l'état du stock nival en montagne (issu d'observations in-situ, par satellite ou par simulation numérique), hormis l'estimation de la hauteur de neige par massifs (Météo-France). La mise en place d'un portail d'information agrégeant en temps réel les informations exploitées dans cet article, et les contextualisant par rapport aux références climatologiques, serait aussi de nature à favoriser la circulation de l'information sur les ressources en eau en montagne. Enfin, nous appelons aussi de nos vœux une plateforme présentant les prévisions saisonnières d'évolution de ces variables en lien avec les prévisions hydrologiques des plateformes PREMHYCE et Aquif-FR.

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Déclaration de disponibilité des données

The data that support the findings of this study are available in public repositories referenced in the main text. The data can also be provided by the corresponding author, SG, upon reasonable request.

Les données qui étayent les conclusions de cette étude sont disponibles auprès des sources publiques référencées dans le texte. Les données peuvent également être fournies par l'auteur correspondant, SG, sur demande raisonnable.

Financement

This work was supported by the Agence Nationale de la Recherche [ANR-20-CE32-0002].

ORCID

Simon Gascoin  <http://orcid.org/0000-0002-4996-6768>

Fatima Karbou  <http://orcid.org/0000-0003-3499-2557>

Guillaume Thirel  <http://orcid.org/0000-0002-1444-1830>

Laura Sourp  <http://orcid.org/0009-0001-8698-8253>

Isabelle Gouttevin  <http://orcid.org/0000-0002-1801-684X>

Samuel Morin  <http://orcid.org/0000-0002-1781-687X>

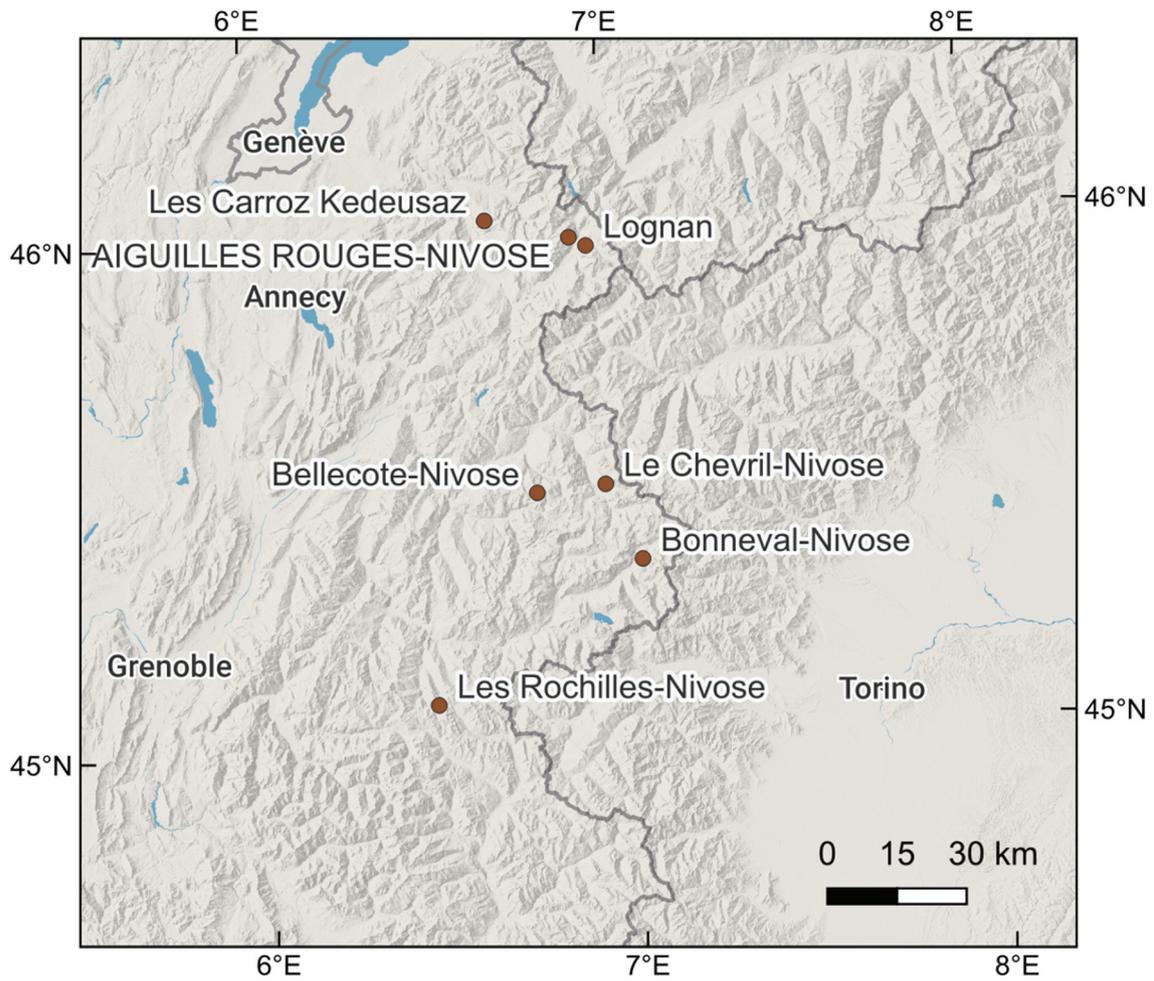
Références

- Armstrong, R. L., & Brun, E. (Éds). (2008). *Snow and climate: Physical processes, surface energy exchange and modeling*. Cambridge University Press.
- Berthier, E., Vincent, C., & Six, D. (2023). Exceptional thinning through the entire altitudinal range of Mont-Blanc glaciers during the 2021/22 mass balance year. *Journal of Glaciology*, 1–11. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.100>
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., & Živković, N. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588–590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- Bonsoms, J., López-Moreno, J. I., González, S., & Oliva, M. (2022). Increase of the energy available for snow ablation in the Pyrenees (1959–2020) and its relation to atmospheric circulation. *Atmospheric Research*, 275, 106228. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106228>
- Boone, A., & Etchevers, P. (2001). An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model: Local-scale evaluation at an alpine site. *Journal of Hydrometeorology*, 2(4), 374–394.
- Colombo, N., Guyennon, N., Valt, M., Salerno, F., Godone, D., Cianfarra, P., Freppaz, M., Maugeri, M., Manara, V., Acquaotta, F., Petrangeli, A. B., & Romano, E. (2023). Unprecedented snow-drought conditions in the Italian Alps during the early 2020s. *Environmental Research Letters*, 18(7), 074014.
- Cremona, A., Huss, M., Landmann, J. M., Borner, J., & Farinotti, D. (2023). European heat waves 2022: Contribution to extreme glacier melt in Switzerland inferred from automated ablation readings. *The Cryosphere*, 17(5), 1895–1912.
- Dépêche, L. (2022, décembre 11). *Tarbes. L'Adour à plus de 2 mètres: Une crue trentennale*. [ladepêche.fr](https://www.ladepêche.fr/2021/12/11/ladour-a-plus-de-2-metres-une-crue-trentennale-9985646.php). <https://www.ladepêche.fr/2021/12/11/ladour-a-plus-de-2-metres-une-crue-trentennale-9985646.php>
- Dumont, M., Tuzet, F., Gascoin, S., Picard, G., Kutuzov, S., Lafaysse, M., Cluzet, B., Nheili, R., & Painter, T. H. (2020). Accelerated snow melt in the Russian Caucasus Mountains after the Saharan dust outbreak in March

2018. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(9). <https://doi.org/10.1029/2020JF005641>
- Faranda, D., Pascale, S., & Bulut, B. (2023). Persistent anticyclonic conditions and climate change exacerbated the exceptional 2022 European-Mediterranean drought. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbc37>
- Gascoïn, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J.-F., Szczypta, C., Marti, R., & Sánchez, R. (2015). A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol Earth Syst Sci*, 19(5), 2337–2351.
- Gascoïn, S., Monteiro, D., & Morin, S. (2022). Reanalysis-based contextualization of real-time snow cover monitoring from space. *Environmental Research Letters*, 17(11), 114044.
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2021). *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61*. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.061>
- Jenicek, M., Seibert, J., Zappa, M., Staudinger, M., & Jonas, T. (2016). Importance of maximum snow accumulation for summer low flows in humid catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 859–874.
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., & Rousset-Regimbeau, F. (2020). The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France. *Geoscientific Model Development*, 13(9), 3925–3946.
- Li, X., & Wang, S. (2022). Recent increase in the occurrence of snow droughts followed by extreme heatwaves in a warmer world. *Geophysical Research Letters*, 49(13), e2022GL099925.
- López-Moreno, J. I., Gascoïn, S., Herrero, J., Sproles, E. A., Pons, M., Alonso-González, E., Hanich, L., Boudhar, A., Musselman, K. N., Molotch, N. P., Sickman, J., & Pomeroy, J. (2017). Different sensitivities of snowpacks to warming in Mediterranean climate mountain areas. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074006.
- Martin, E., Gascoïn, S., Grusson, Y., Murgue, C., Bardeau, M., Ancil, F., Ferrant, S., Lardy, R., Le Moigne, P., Leenhardt, D., Rivalland, V., Sánchez Pérez, J.-M., Sauvage, S., & Therond, O. (2016). On the use of hydrological models and satellite data to study the water budget of river basins affected by human activities: Examples from the garonne basin of france. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 223–247.
- Météo-France. (2021, décembre 31). *La fin d'année 2021 est la plus douce jamais mesurée*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/la-fin-dannee-2021-est-la-plus-douce-jamais-mesuree>
- Météo-France. (2022a, janvier 28). *L'anticyclone reste sur le pays malgré un léger passage perturbé*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/previsions/lanticyclone-reste-sur-le-pays-malgre-un-leger-passage-perturbe>
- Météo-France. (2022b, janvier 20). *2022: Les bilans climatiques*. <https://meteofrance.fr/actualite/publications/2022-les-bilans-climatiques>
- Montanari, A., Nguyen, H., Rubineti, S., Ceola, S., Galelli, S., Rubino, A., & Zanchettin, D. (2023). Why the 2022 Po River drought is the worst in the past two centuries. *Science Advances*, 9(32), eadg8304.
- Réveillet, M., Dumont, M., Gascoïn, S., Lafaysse, M., Nabat, P., Ribes, A., Nheili, R., Tuzet, F., Ménégoz, M., Morin, S., Picard, G., & Ginoux, P. (2021). Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change. *ResearchSquare*. Scopus. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-800501>.
- SCHAPI - HydroPortail. (2023). <https://www.hydro.eaufrance.fr/>
- Sicart, J. E., Hock, R., & Six, D. (2008). Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D24). <https://doi.org/10.1029/2008JD010406>
- Six, D., Vincent, C., Bonnefoy-Demongeot, M., Thibert, E., & René, P. (2023). 2022 : Année record pour la fonte des glaciers français. *La Météorologie*, 2023(120), 13–15. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0008>
- SMEAG. (2022). *Crue Garonne janvier 2022: Que s'est-il passé ?* <https://www.smeag.fr/focus/crue-garonne-janvier-2022.html>
- Soubeyroux, J.-M. (2023). L'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau à partir du nouveau portail DRIAS-Eau. *Annales Des Mines - Responsabilité Et Environnement*, 112(4), 13–17. <https://doi.org/10.3917/re1.112.0013>
- Strohmeier, L., Sauquet, E., Bernard, C., Bonneau, J., Branger, F., Bresson, A., Brigode, P., Buzier, R., Delaigue, O., Devers, A., Evin, G., Fournier, M., Hsu, S.-C., Lanini, S., De Lavenne, A., Lemaitre-Basset, T., Magand, C., Mendoza Guimarães, G., Mentha, M., ... Thirel, G. (2023). On the visual detection of non-natural records in streamflow time series: Challenges and impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(18), 3375–3391.
- Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Jager, A., Di Ciollo, C., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Spinoni, J., Niemeyer, S., Cammalleri, C., & Hrast Essenfelder, A. (2022). *Drought in Europe: August 2022: GDO analytical report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/264241>
- Valo, M. (2022, septembre 16). *La sécheresse historique se poursuit en France malgré les pluies récentes*. *Le Monde.fr*. https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/09/16/la-secheresse-historique-se-poursuit-en-france-malgre-les-pluies-recentes_6141843_3244.html
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644.
- Voordendag, A., Prinz, R., Schuster, L., & Kaser, G. (2023). Brief communication: The Glacier Loss Day as an indicator of a record-breaking negative glacier mass balance in 2022. *The Cryosphere*, 17(8), 3661–3665. <https://doi.org/10.5194/tc-17-3661-2023>
- Zappa, M., & Kan, C. (2007). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(3), 375–389. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-375-2007>

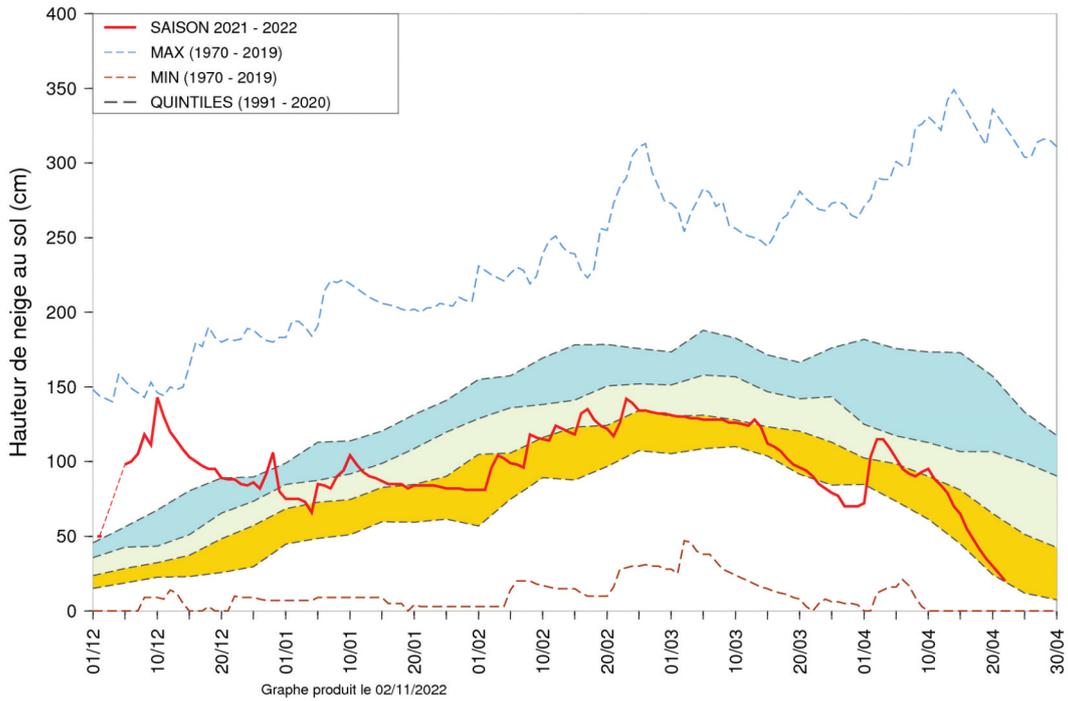
Annexe :

Relevés de hauteur de neige à proximité de la station des Aiguilles Rouges

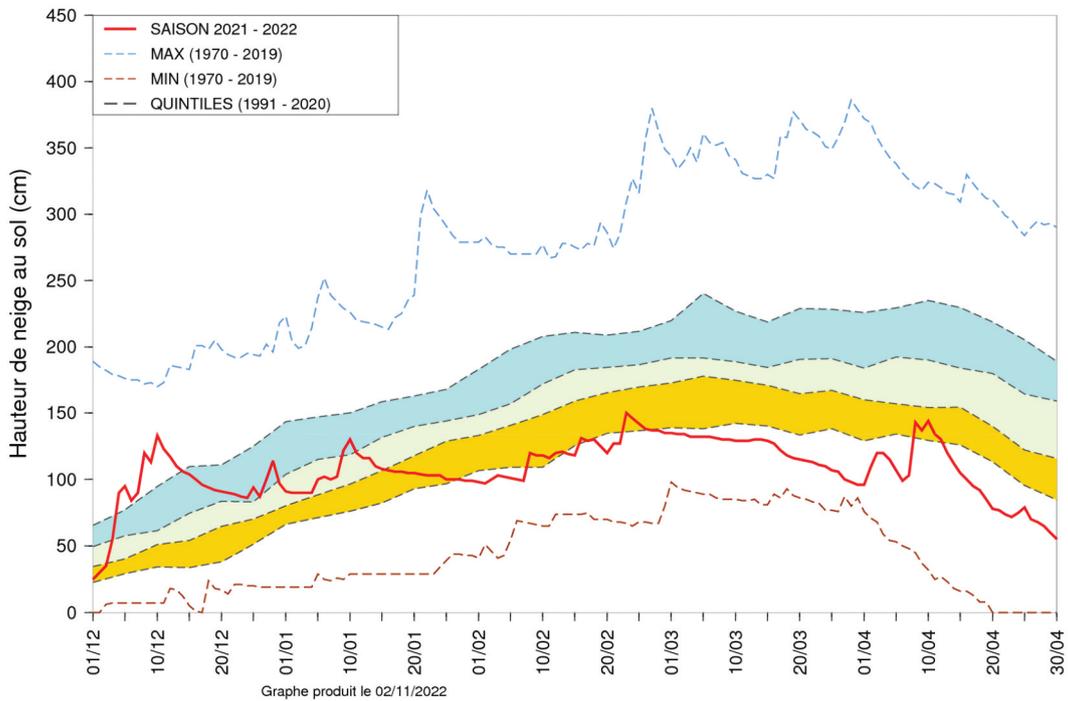


Carte des stations utilisées.

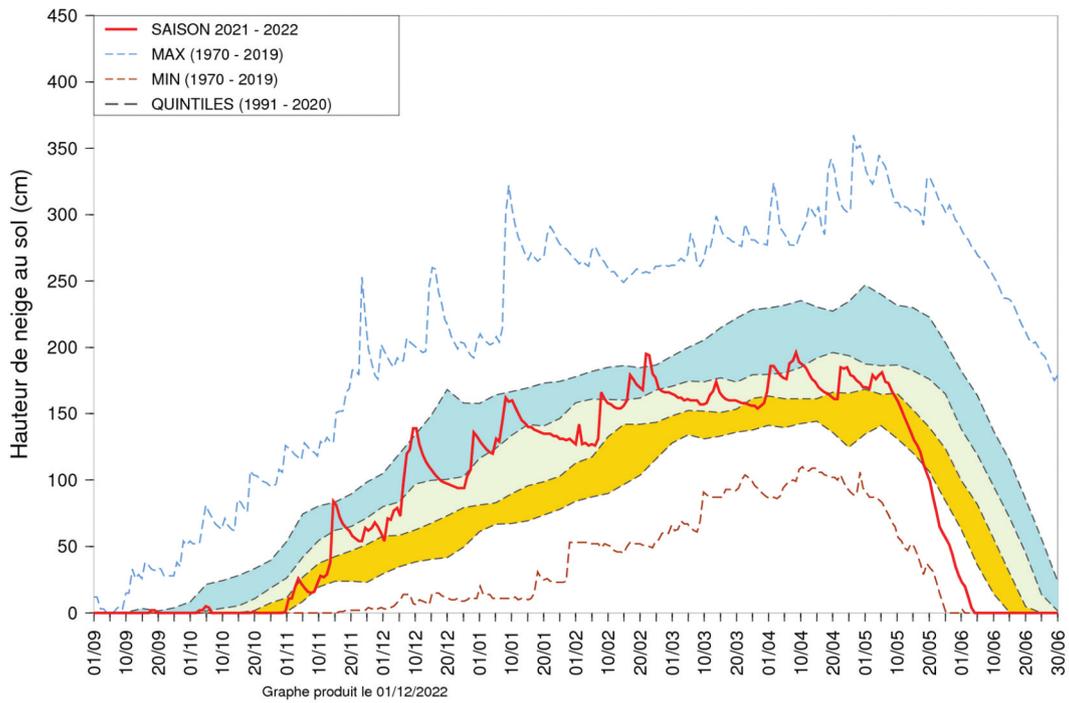
Evolution de l'enneigement LES-CARROZ-KEDEUSAZ (1747 m) Hiver 2021 - 2022



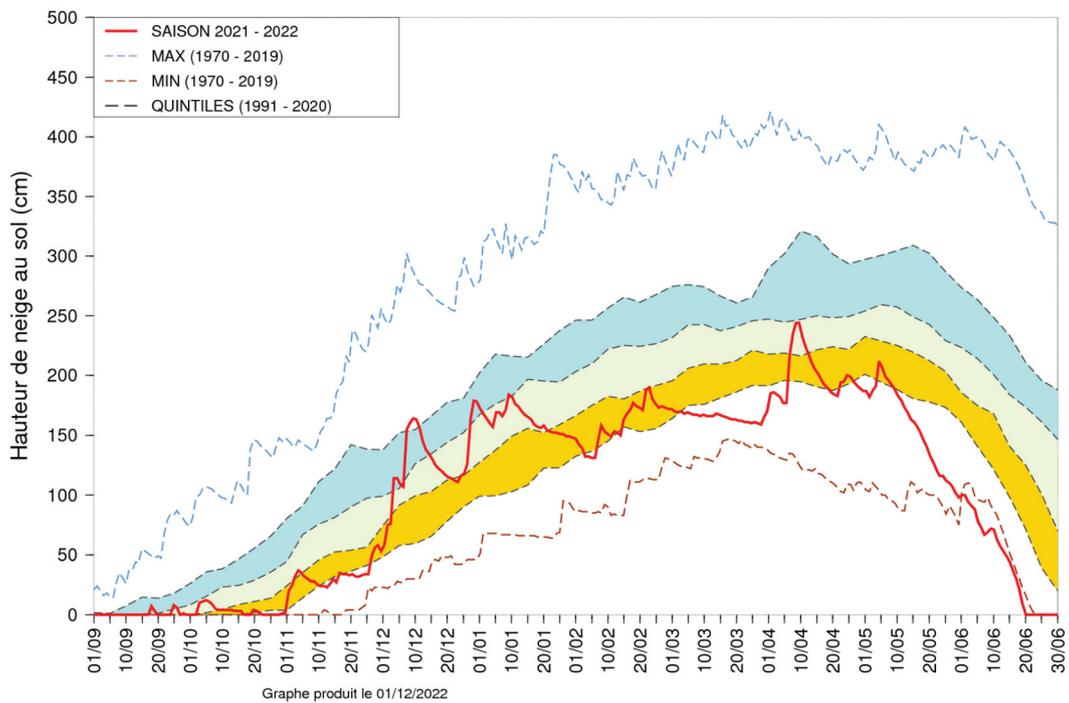
Evolution de l'enneigement LOGNAN (1970 m) Hiver 2021 - 2022



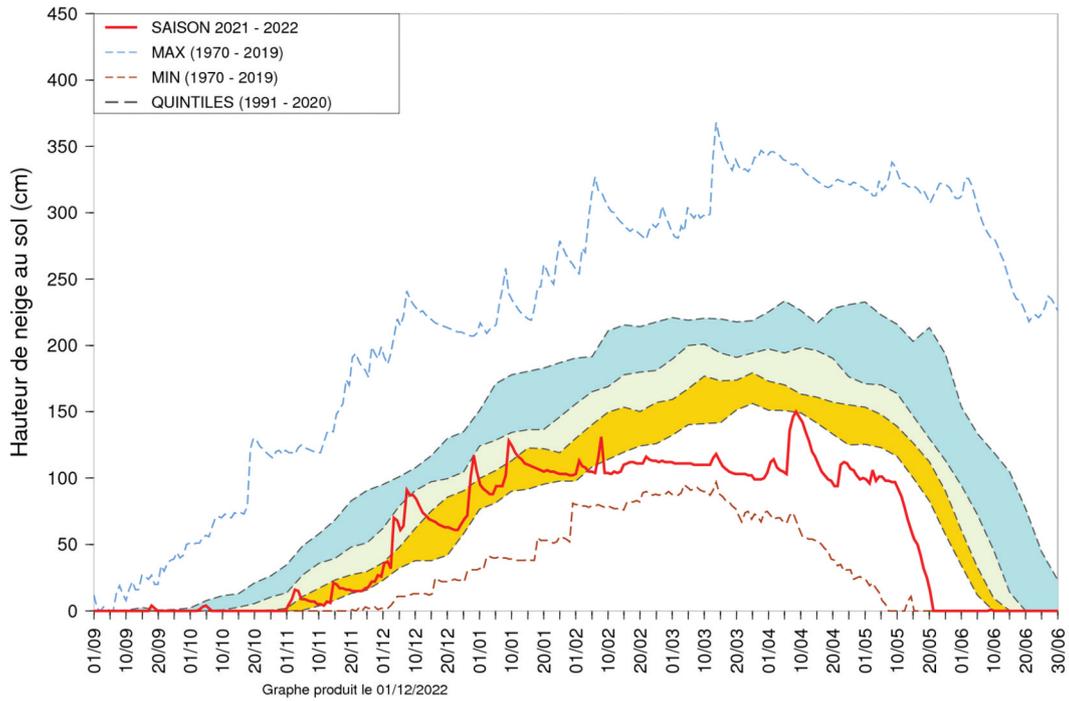
Evolution de l'enneigement BONNEVAL-NIVOSE (2740 m) Hiver 2021 - 2022



Evolution de l'enneigement BELLECOTE-NIVOSE (3000 m) Hiver 2021 - 2022



Evolution de l'enneigement LE-CHEVRIL-NIVOSE (2560 m) Hiver 2021 - 2022



Evolution de l'enneigement LES-ROCHILLES-NIVOSE (2443 m) Hiver 2021 - 2022

