

Evolution des ressources en eau en Savoie dans un contexte de changement climatique

Diagnostic départemental

Mai 2023



SAVOIE

LE DÉPARTEMENT

POLE AMENAGEMENT

Direction de l'Environnement
Service de l'Eau

Hôtel du Département CS 31802

73018 Chambéry CEDEX

tél. 04 79 96 75 00

environnement@savoie.fr

www.savoie.fr

Les personnes et les organismes sollicités dans le cadre de cette étude, et listés ci-dessous, sont vivement remerciés pour leur contribution.

AGence Alpine des Territoires (AGATE) : *Christophe CHAIX.*

Agence de l'eau : *Laurent CADILHAC.*

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) : *Stéphane OROFINO, François CRASTES-DE-PAULET.*

Comité Intercommunautaire pour l'Assainissement du Lac du Bourget (CISALB) : *Florent BERARD, Théo QUENOUILLE.*

DREAL Auvergne Rhône Alpes

Electricité De France (EDF) : *Hervé TISSOT.*

Fédération de Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FSPPMA) : *Manuel VALLAT, Damien PRONER, Eulanie MEVEL, Rédouane MOHRA.*

Grand Chambéry (Service de l'eau) : *Etienne CHOLIN.*

Institut des Géosciences de l'Environnement - Grenoble : *Delphine SIX, Christian VINCENT.*

Météo-France : *Sophie TESSIER, Samuel MORIN, Gilles BRUNOT, Mathieu FRUCTUS.*

Office Français de la Biodiversité (OFB) : *Nicolas ROSET.*

Syndicat Mixte Interdépartemental d'Aménagement du Chéran (SMIAC) : *Régis TALGUEN.*

Syndicat Mixte du Bassin Versant Arly (SMBVA) : *Marie COMBAZ.*

Société Tunnel Euralpin Lyon-Turin (TELT) : *Xavier DARMENDRAIL, Simon VIAT, Elena LUCHETTI, Solenne CLERGEAT, Elsa HUGOT, Marie LAROCHE, Thomas BROYER (GEOTEC).*

Sommaire

1	INTRODUCTION ET CONTEXTE DE L'ETUDE	3
2	L'EVOLUTION CLIMATIQUE	5
2.1	COMMENT DEFINIT-ON L'EVOLUTION DU CLIMAT ?	5
2.2	LES TEMPERATURES	7
2.2.1	À l'échelle mondiale et en France	7
2.2.2	Dans les Alpes du Nord et en Savoie	8
	À retenir sur les températures en Savoie	11
2.3	LES PRECIPITATIONS	12
2.3.1	Des évolutions visibles au niveau national	12
2.3.2	Une certaine stabilité actuelle en Savoie	13
2.3.2.1	Les pluies annuelles et saisonnières	13
2.3.2.2	Les épisodes intenses	14
	À retenir sur les précipitations annuelles et saisonnières en Savoie	16
2.4	LES PLUIES EFFICACES (OU LE BILAN HYDRIQUE)	17
	À retenir sur les pluies efficaces en Savoie	19
2.5	LA NEIGE ET LES GLACIERS	20
2.5.1	La neige	20
2.5.1.1	Les cumuls de neige	20
2.5.1.2	Les surfaces enneigées	22
2.5.2	Les glaciers	25
2.5.2.1	Les glaciers dans le monde et en France	25
2.5.2.2	Les glaciers en Savoie	25
	À retenir sur la neige et les glaciers en Savoie	27
	SYNTHESE DE L'EVOLUTION DU CLIMAT EN SAVOIE	28
3	QUELLES EVOLUTIONS DES RESSOURCES EN EAU ?	30
3.1	PRECISIONS SUR LES ECHELLES DE TEMPS POUR SITUER L'ANALYSE DES RESSOURCES EN EAU PAR RAPPORT A CELLE DU CLIMAT	30
3.1.1	Des chroniques de données inégales suivant les thématiques suivies	30
3.1.2	Focus sur les tendances climatiques depuis 40 ans (période 1980-2020)	31
3.1.2.1	Pluviométrie	31
3.1.2.2	Température de l'air	32
3.1.2.3	Neige	32
3.1.2.4	Pluies efficaces et bilans hydriques	32
3.2	LES EAUX SUPERFICIELLES	33
3.2.1	Les cours d'eau	33
3.2.1.1	A l'échelle nationale	33
3.2.1.2	A l'échelle des Alpes	35
3.2.1.3	Bilan quantitatif des cours d'eau de Savoie	36
3.2.1.3.1	Réseau hydrographique et régimes hydrologiques	36
3.2.1.3.2	Objectifs et méthodologie de la démarche (analyses du débit en relation avec le climat)	39
3.2.1.3.3	Analyse du débit du Chéran à Allèves	41
	À retenir sur l'évolution de l'hydrologie du Chéran	48
3.2.1.3.4	Analyse du débit des autres cours d'eau d'altitude faible à moyenne	49
	À retenir sur l'évolution hydrologique des autres cours d'eau d'altitude faible à moyenne	53
3.2.1.3.5	Analyse du débit des cours d'eau de montagne de haute altitude	54
	À retenir sur l'évolution de l'hydrologie des cours d'eau de montagne de haute altitude	57
	SYNTHESE de l'évolution des débits des cours d'eau de Savoie	58
3.2.1.4	Bilan sur la température de l'eau des cours d'eau savoyards	59
3.2.1.4.1	Evolution de la température de l'eau à l'échelle des Alpes du Nord	59
3.2.1.4.2	Evolution de la température de l'eau dans les cours d'eau de Savoie	60
	À retenir sur la température de l'eau des cours d'eau de Savoie	63
3.2.1.5	Bilan sur la qualité de l'eau des cours d'eau savoyards	64
3.2.2	Les lacs	65

3.2.2.1	Evolution de la température de l'eau des grands lacs	65
3.2.2.1.1	A l'échelle mondiale	65
3.2.2.1.2	A l'échelle des Alpes du Nord françaises	65
3.2.2.2	Les lacs d'altitude	67
	<i>À retenir sur les lacs en Savoie</i>	69
3.3	LES EAUX SOUTERRAINES	70
3.3.1	<i>Les principales études globales en France</i>	70
3.3.2	<i>Les aquifères en nappe en Savoie – analyse de la nappe du Guiers</i>	71
	<i>À retenir sur les aquifères en nappe en Savoie</i>	75
3.3.3	<i>Les sources gravitaires</i>	76
3.3.3.1	Méthodologie de l'analyse des données TELT.....	76
3.3.3.2	Premières tendances : des étiages globalement à la baisse.....	78
3.3.3.3	Des débits influencés par les pluies efficaces et les cumuls de neige	81
3.3.3.4	Des recharges moins fréquentes et des basses eaux qui durent plus longtemps	85
3.3.4	<i>Evolution de la température de l'eau des sources de Moyenne et Haute Maurienne</i>	86
	<i>À retenir sur les sources gravitaires</i>	88
	SYNTHESE DE L'EVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU EN SAVOIE	89
4	CONCLUSION	92
5	BIBLIOGRAPHIE	93
6	ANNEXES	96

1 Introduction et contexte de l'étude

Depuis plusieurs années déjà, de nombreux groupes scientifiques, tel le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), alertent les instances gouvernementales sur la réalité du changement climatique et ses impacts actuels et à venir pour l'ensemble la planète.

La récurrence des épisodes de canicule et de sécheresse témoigne des effets réels du changement climatique. Contrairement à certaines idées reçues, les territoires de montagne ne sont pas épargnés, ce sont mêmes les secteurs où ces effets sont les plus marqués. Mais quels impacts ont-ils réellement sur les ressources en eau ?

En Savoie, le Département a décliné à l'échelle de son territoire un état des lieux du climat *via* la création en 2010 d'un Livre Blanc sur le Climat (Chaix *et al.*, 2010). Cette démarche a été le point de départ de plusieurs actions menées sur cette thématique parmi lesquelles : la création d'un observatoire du changement climatique dans les Alpes du Nord (Département 73, AGATE) ainsi que la réalisation d'une étude synthétique menée en 2012 sur « les ressources et usages de l'eau en Savoie dans un contexte d'évolutions climatiques » (Paccard *et al.*, 2012).

Dix ans plus tard, l'actualité climatique est toujours aussi présente et les tensions sur les ressources en eau deviennent de plus en plus prégnantes tant sur les volumes disponibles que sur les usages associés.

L'un des enjeux majeurs du nouveau SDAGE 2022-2027 (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) du bassin versant Rhône-Méditerranée est d'ailleurs la gestion équilibrée des ressources en eau dans un contexte d'adaptation au changement climatique. Dans sa déclinaison savoyarde, plusieurs bassins versants sont identifiés comme étant déjà en tension (avec un objectif de résorber les déséquilibres quantitatifs sur les ressources) alors que d'autres apparaissent comme étant potentiellement en tension (avec un objectif de préserver l'équilibre quantitatif sur les ressources).

Des outils en vue de la gestion quantitative des ressources en eau tendent à se développer. Ces territoires pointés dans le SDAGE sont encouragés par exemple à lancer des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE). Ces projets visent à mettre en œuvre des actions pour rééquilibrer et réajuster des besoins et des usages, et les faire coïncider avec les ressources disponibles. L'Agence de l'Eau, quant à elle, propose depuis 2014 un Plan de Bassin pour l'Adaptation au Changement Climatique (PBACC) visant à aider les acteurs de l'eau à mettre en place des actions d'atténuation ou d'adaptation des modes de gestion de l'eau dans ce contexte de changement climatique (une nouvelle version du PBACC sortira en 2023).

De fait, de plus en plus d'acteurs savoyards prennent conscience de la nécessité de suivre localement les effets du changement climatique pour anticiper l'avenir, notamment sur la problématique de la gestion de l'eau.

C'est dans ce contexte que le Département de la Savoie a décidé de réaliser une « Synthèse actualisée de l'évolution des ressources en eau en Savoie dans un contexte de changement climatique ». L'objectif de cette étude est d'actualiser un certain nombre d'indicateurs sur le

climat et l'état des ressources en eau mis en évidence lors de la précédente étude départementale de 2012 évoquée ci-dessus.

Cette actualisation se veut une contribution à l'établissement d'un socle de connaissances des acteurs concernés sur la situation du changement climatique en Savoie et ses impacts sur les ressources en eau.

Le document aborde successivement :

- ✓ un rappel des principales données caractérisant le changement climatique en Savoie. Cette partie s'appuie très largement sur l'Observatoire du changement climatique dans les Alpes du Nord (Département 73, AGATE ; OCCAN (2020)),
- ✓ puis successivement pour les eaux superficielles (débit des cours d'eau), et les eaux souterraines (aquifères souterrains et sources gravitaires), l'inventaire critique des données disponibles susceptibles de rendre compte de l'évolution de la ressource en eau, et les conclusions que le traitement de ces données permet de faire émerger.

2 L'évolution climatique

2.1 Comment définit-on l'évolution du climat ?

Contrairement à la météorologie, la climatologie est l'étude sur une longue période de temps des statistiques de variables atmosphériques (températures, précipitations...) (Figure 1).

Les normes pour caractériser un climat de référence ont été codifiées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et appliquées depuis la première moitié du XX^{ème} siècle (1900 en France). Les recommandations ont fixé à 30 ans la durée des chroniques de données nécessaires pour établir l'ensemble des normales climatiques.

L'échelle de temps doit être suffisamment longue pour que les caractéristiques climatiques d'un territoire ne soient plus influencées par les variations interannuelles ou par des cycles périodiques. En effet, des hausses ou baisses passagères de températures ou précipitations peuvent avoir des origines plus globales, liées à l'existence de fluctuations au niveau des courants atmosphériques (cycles El Niño/la Niña) ou de l'activité solaire (tâches solaires) affectant le globe entier. Ces fluctuations naturelles sont à l'origine de la variabilité interne du climat. L'utilisation de chroniques de longue durée permet d'atténuer les influences extérieures au climat d'une région donnée.

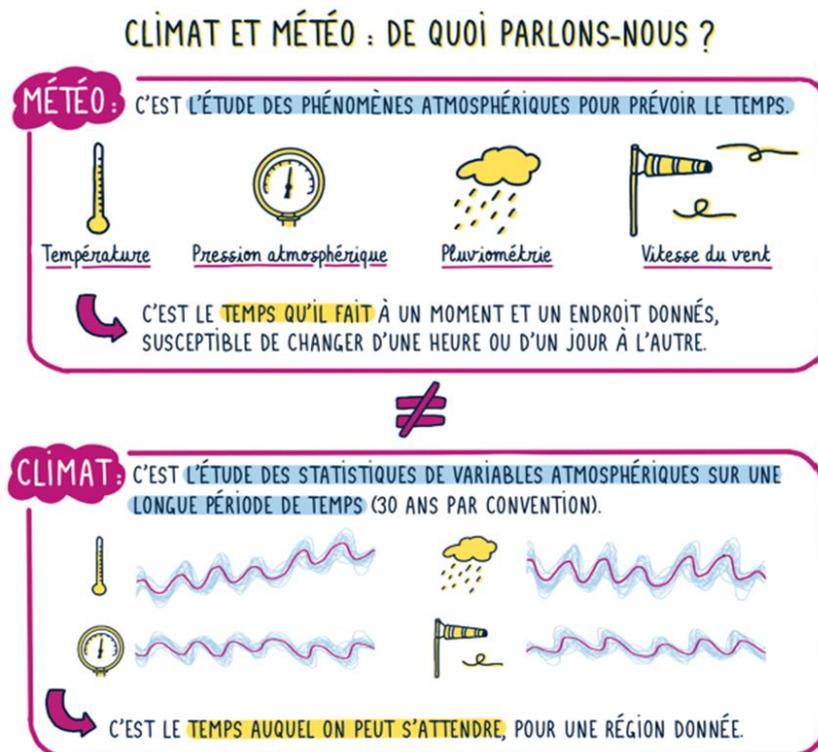


Figure 1 : Illustration de la différence entre climat et météo ; Extrait du livre *Tout comprendre (ou presque) sur le climat* (Crédits : CNRS éditions, BonPote et al., 2022).

Néanmoins, ces normales (moyennes calculées sur 30 ans) sont actualisées tous les 10 ans, notamment pour suivre plus précisément l'évolution du changement climatique. En France, comme dans les autres pays du monde, les nouvelles normales de référence calculées sur la période 1991-2020, ont été mises en application en 2022.

Ces dernières valeurs de référence sont par contre influencées par les effets du changement climatique. C'est pourquoi, pour évaluer l'impact du changement climatique sur un plus long terme, l'OMM préconise de conserver comme référence la période 1961-1990, dernière période avant que l'influence des activités humaines soit clairement visible sur le climat mondial. D'autres périodes de référence peuvent aussi être utilisées suivant le type de comparaison visé : la période préindustrielle (1850-1900), le climat dit actuel (1976-2005) dans les modélisations du GIEC par exemple...

Dans la suite, l'étude prendra comme référence la période 1961-1990 pour l'étude de l'évolution de la température de l'air.

Actuellement, l'évolution du changement climatique est à ce point rapide que les experts du climat se requestionnent sur des méthodes plus appropriées que sur celles consistant à calculer des moyennes sur 30 ans.

Les paragraphes suivants vont s'attacher à analyser les évolutions des variables atmosphériques.

2.2 Les températures

2.2.1 À l'échelle mondiale et en France

Au niveau mondial, le réchauffement des températures moyennes est très net, en particulier depuis les années 1980-1990 avec une augmentation forte et continue depuis cette période jusqu'à aujourd'hui.

La Figure 2 montre depuis 1850 l'évolution des températures moyennes annuelles mondiales sous forme d'écart à la moyenne sur la période de référence 1961-1990. Depuis le début du XX^{ème} siècle, les températures moyennes mondiales ont ainsi augmenté de presque 1°C (+ 0,97 °C entre 1900 et la moyenne 2010-2019).

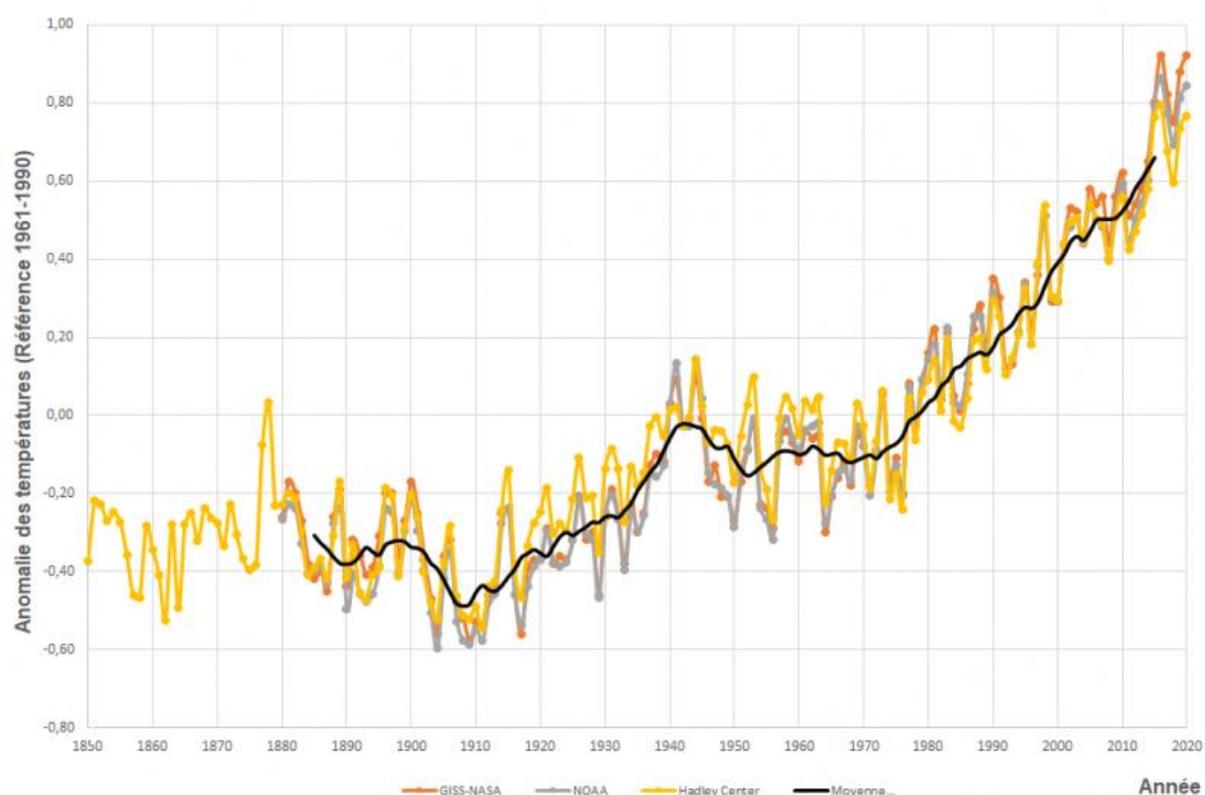


Figure 2 : Evolution des températures moyennes mondiales de 1850 à 2020 par rapport aux références 1961-1990 – Courbe noire : moyenne des 3 sources de données de la moyenne annuelle (Crédits : NOAA, NASA, UKM - Traitement : ONERC).

La décennie 2010-2019, avec des températures supérieures de 0,66°C aux normales 1961-1990, a été la plus chaude jamais mesurée. Elle dépasse même de + 0,19 °C la décennie 2000-2009, qui constituait déjà le précédent record. Autre fait marquant, les 5 années les plus chaudes depuis 1850 ont toutes été observées ces 5 dernières années, avec une année 2020 se classant en seconde position (1^{er} rang : 2016).

En France, comme à l'échelle mondiale, l'évolution des températures moyennes annuelles montre un réchauffement depuis 1900, mais 2 fois plus fort que sur le globe avec une augmentation générale de 1,7°C en 120 ans (Figure 3). Ce réchauffement plus intense s'explique par un effet continental et latitudinal, à savoir une tendance à la hausse plus rapide pour les terres que pour les océans ainsi que pour les plus hautes latitudes.

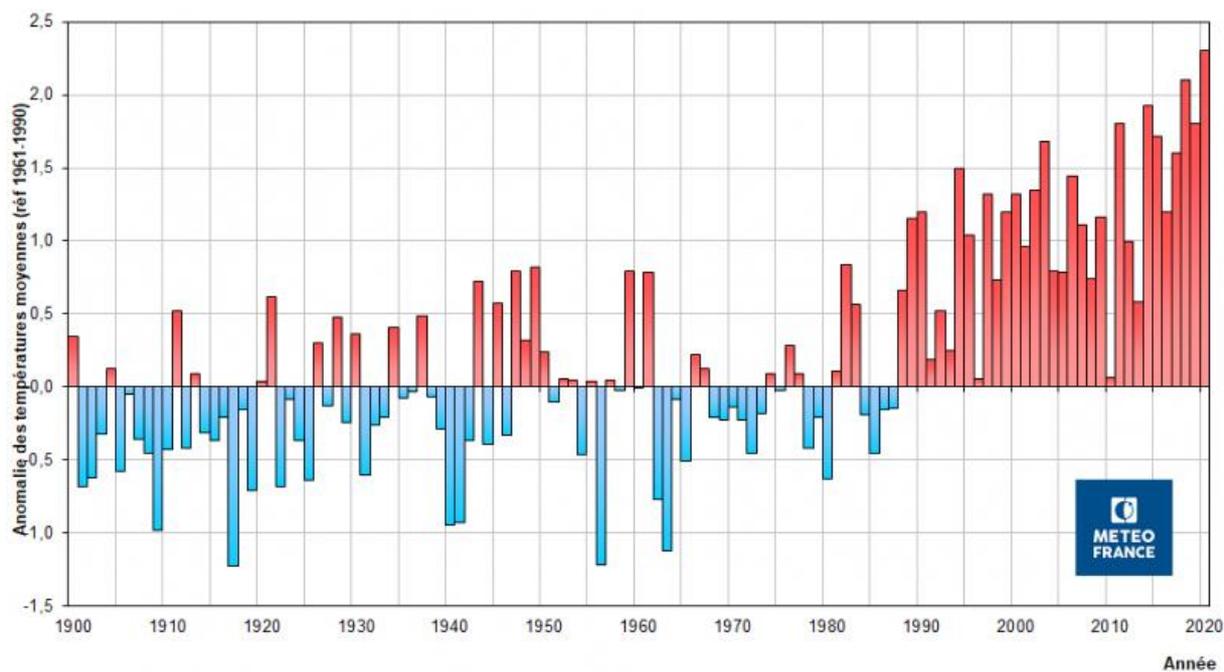


Figure 3 : Ecart à la normale (1961-1990) des températures moyennes annuelles en France de 1900 à 2020 (Crédits : Météo-France).

Au cours des 120 années de mesures, ce réchauffement a connu un rythme variable et depuis les années 1980-1990, l'augmentation des températures s'est particulièrement renforcée. Ainsi, depuis 50 ans, chaque décennie est plus chaude que la précédente en moyenne de 0,3°C. La plus forte progression est la décennie passée (2011-2020), avec une hausse de 0,59°C par rapport à 2001-2010. Cette tendance ne semble pas ralentir. En effet, avec un écart de + 2,3 °C par rapport à la moyenne 1961-1990, l'année 2020 a été en France métropolitaine l'année la plus chaude jamais enregistrée depuis le début des mesures.

2.2.2 Dans les Alpes du Nord et en Savoie

La station météorologique d'Annecy possède des chroniques de températures depuis 1876, soit près de 150 ans de mesures (Figure 4). Les mêmes tendances se retrouvent qu'à l'échelle mondiale ou nationale, avec un emballement des températures depuis 35 ans, particulièrement visible sur la dernière décennie (record en 2018). Ce réchauffement spectaculaire et continu fait suite à 2 cycles de 30 ans globalement stables (1925-1985), succédant à un demi-siècle globalement froid (1875-1925).

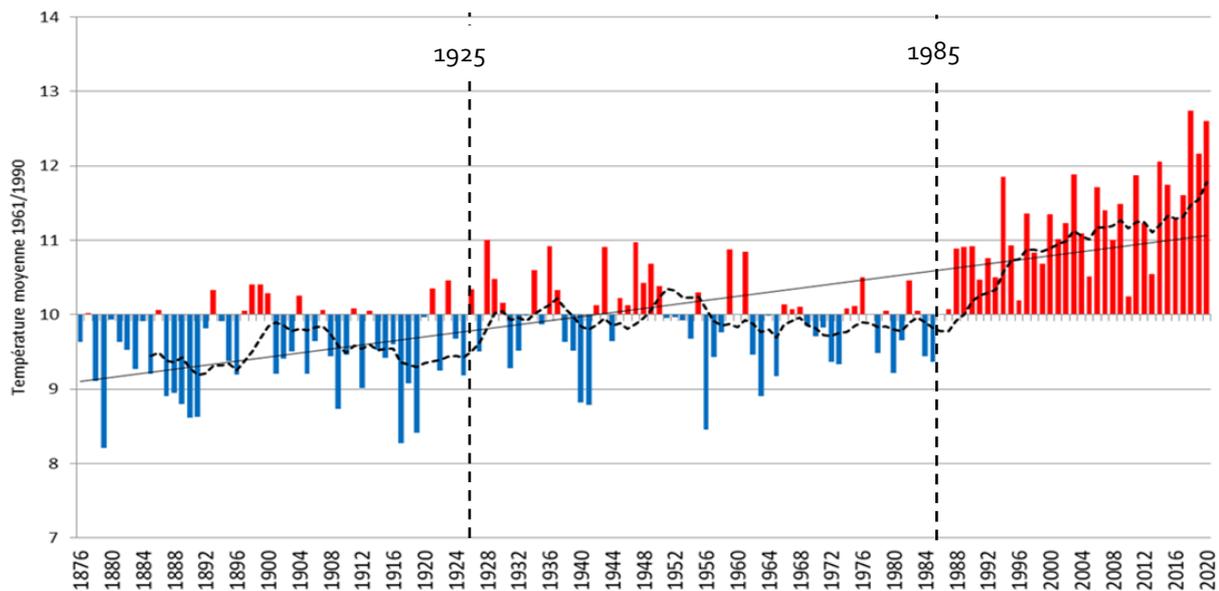


Figure 4 : Evolution des températures moyennes annuelles à Annecy (426 m - 74) de 1876 à 2020 avec comme référence la normale 1961-1990 – Tendence 1876-2020 : courbe noire linéaire ; Moyenne mobile sur 10 ans : courbe noire en tireté (Crédits : Météo-France – Traitement : AGATE).

La Figure 5 montre que l'évolution concerne également les secteurs d'altitude des Alpes du Nord et de Savoie (moyenne de 5 stations situées entre 630 m et 1100 m). Sur les 60 dernières années, les températures ont ainsi tendance à augmenter de près de 2,4°C.

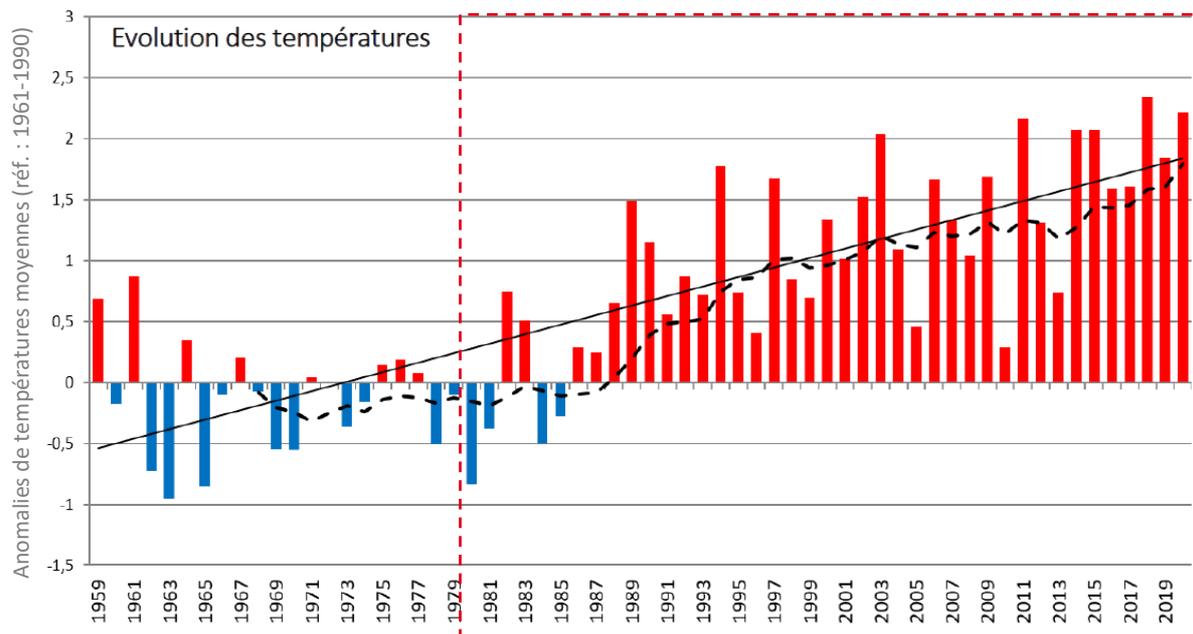


Figure 5 : Écarts des températures moyennes annuelles (en °C) de 1959 à 2020 par rapport à la normale 1961-1990 dans les Alpes du Nord (moyenne de 5 stations : Thônes - 630 m ; Bourg-Saint-Maurice - 865 m ; Saint-Pierre-de-Chartreuse - 945 m ; Arêches-Beaufort - 1030 m ; Avrieux - 1102 m) (Crédits : Météo-France - Traitement AGATE). Tendence 1959-2020 : courbe noire linéaire ; Moyenne mobile sur 10 ans : courbe noire en tireté. La localisation des stations météorologiques est disponible en Annexe 1.

Le cadre rouge en pointillé fait le focus sur les 40 dernières années (période 1980-2020).

En remontant depuis 1950 et en prenant Bourg-Saint-Maurice uniquement, la tendance à la hausse s'élève même à + 2,7°C sur les 70 ans de chronique de la station.

À l'échelle de la Savoie, depuis 1985, aucune année n'a été plus froide que les normales 1961-1990, période pré-emballement climatique. La dernière décennie (2011-2020) connaît des températures record, avec une augmentation de 1,8 °C en moyenne sur 40 ans (référence 1961-1990), légèrement plus forte qu'au niveau national et 2 fois plus importante qu'au niveau mondial (Tableau 1). Cette hausse est particulièrement visible ces dernières années, notamment en 2020, avec + 2,6°C sur Annecy et Bourg-Saint-Maurice par rapport à 1961-1990.

Tableau 1 : Focus de la température sur la décennie record 2011-2020 dans le monde, en France et en Savoie.

Comparatif de la température de la décennie 2011-2020	Avec la période de référence 1961-1990 (40 ans)	Avec la décennie précédente 2001-2010 (10 ans)
Monde	+ 0,66°C	+ 0,19°C
France	+ 1,6°C	+ 0,59°C
Savoie	+ 1,8°C	+ 0,58°C

Des conséquences visibles de ce réchauffement climatique sont une baisse du nombre de jours de gel par an ainsi qu'une augmentation des journées dites « estivales » (journées supérieures à 25°C), témoignant depuis les années 1980 de changements profonds dans les caractéristiques climatiques.

Ainsi, sur Bourg-Saint-Maurice, en 30 ans (1960-1989/1990-2019), 21 jours par an de gel en moins ont été mesurés (passage de 120 jours par an à 100 jours par an), baisse particulièrement visible au printemps (- 10 jours) (Figure 6), alors que le nombre de journées estivales a augmenté de 23 jours (Figure 7).

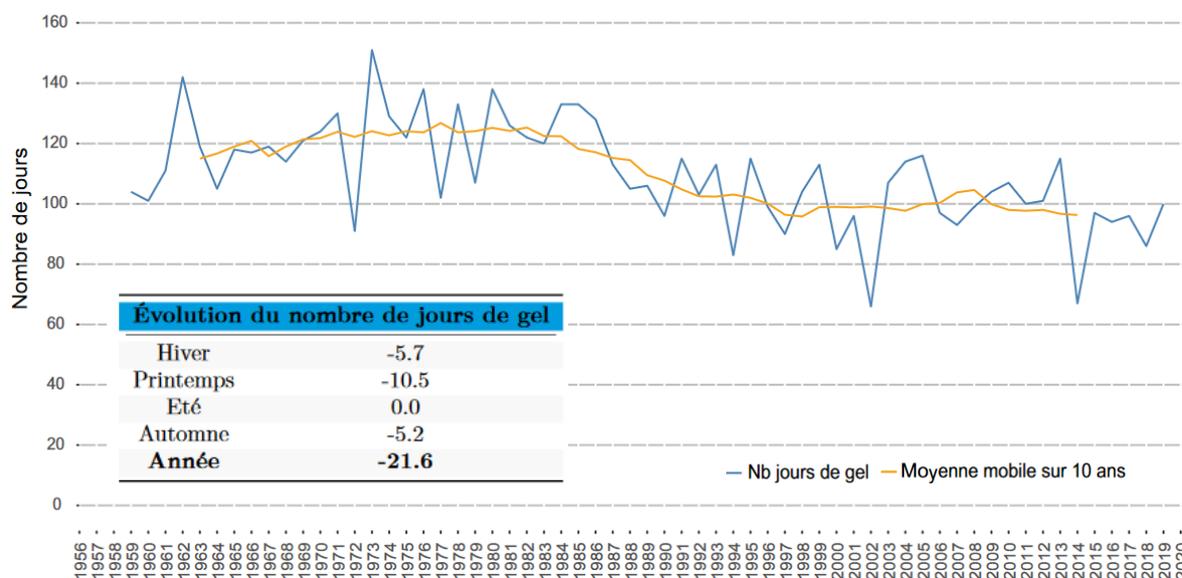


Figure 6 : Evolution des nombres de jours de gel par an de 1950 à 2019 et saisonniers (comparaison 1960-1989/1990-2019) à Bourg-Saint-Maurice (865 m - 73) (Crédits : Météo-France – Traitement : ORCAE).

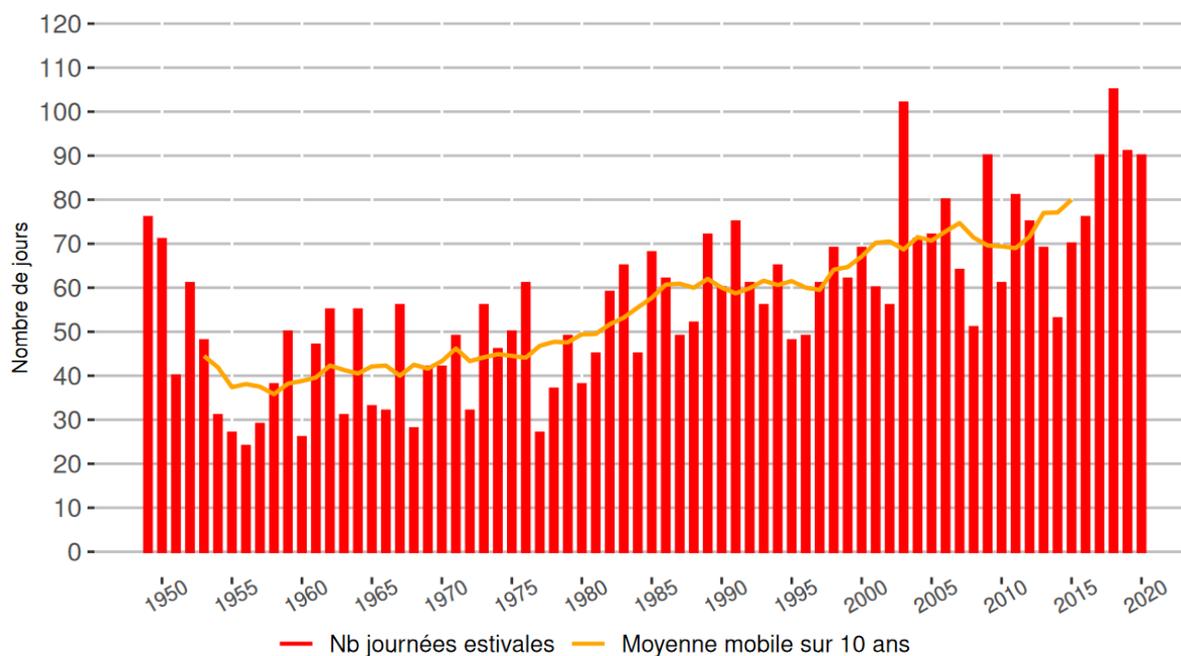


Figure 7 : Evolution du nombre de journées estivales (températures supérieures à 25°C) par an de 1950 à 2019 à Bourg-Saint-Maurice (865 m - 73) (Crédits : Météo-France - Traitement : ORCAE).

À retenir sur les températures en Savoie

Le réchauffement climatique se matérialise en Savoie par une **hausse des températures** :

- plus forte que sur le globe : **1°C supplémentaire en 120 ans** (effet continentalité),
- depuis 1950 à Bourg-Saint-Maurice : **+ 2,7°C en 70 ans**,
- avec un emballement depuis 1980 : **+ 1,8°C en 40 ans**,
- une décennie 2010-2020 record : **+ 0,6°C en 10 ans**,
- une année 2020 exceptionnelle avec +2.6 °C (par rapport à la référence 1961-1990) à Annecy et Bourg-Saint-Maurice.

Avec un constat sur ces 30 dernières années à Bourg-Saint-Maurice :

- d'une diminution du nombre de jours de gel : - 21 jours / an,
- d'une augmentation des journées estivales (température > 25°C) : + 23 jours / an.

2.3 Les précipitations

Nota : Les précipitations étudiées ci-après intègrent les chutes sous forme de neige.

2.3.1 Des évolutions visibles au niveau national

Sur la base de 50 années (1959-2009) de données homogénéisées par Météo-France, des synthèses cartographiques de l'ensemble des stations analysées au niveau national montrent que les cumuls de précipitations évoluent différemment sur le territoire français en un demi-siècle suivant une disparité Nord-Sud marquée (Figure 8).

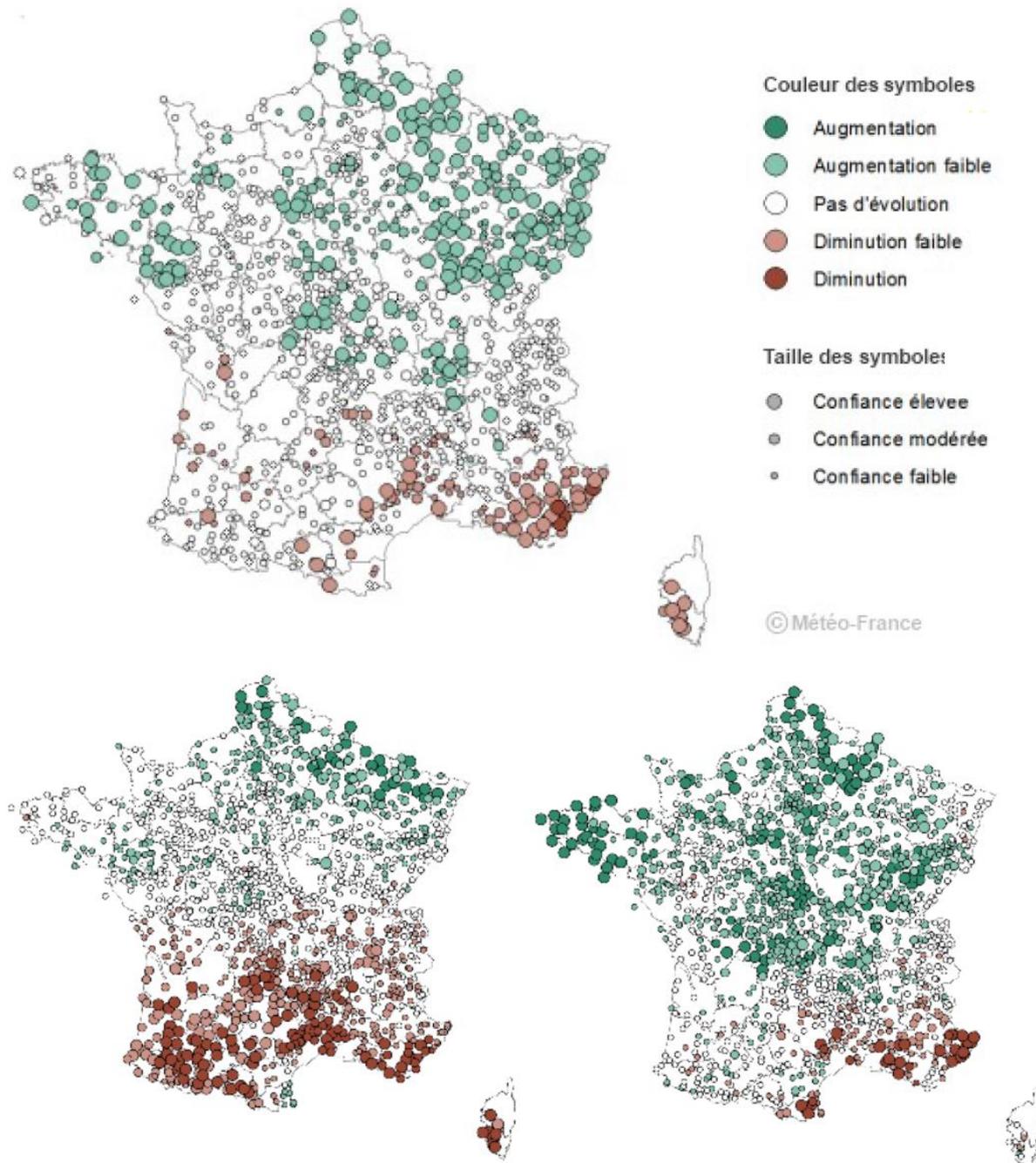


Figure 8 : Evolution des cumuls annuels (en haut), hivernaux (en bas à gauche) et estivaux (en bas à droite) des précipitations sur la période 1959-2009 (Crédits : Météo-France - Climat HD (2022)).

Le tiers Sud de la France a globalement vu ses cumuls annuels de pluies baisser sur le pourtour méditerranéen, plus fortement sur la Côte d'Azur. *A contrario*, bon nombre de stations de la moitié Nord montrent une tendance à l'augmentation de ses précipitations annuelles sur cette période 1959-2009, particulièrement visible sur le quart Nord-Est de la France et la Bretagne.

En zoomant saison par saison, les analyses montrent une évolution à la baisse des pluies plus généralisée en hiver avec toute la moitié Sud concernée, et plus marquée en été sur la région PACA.

À noter aussi l'évolution constatée des intensités de précipitations sur les régions méditerranéennes (Ardèche, Drôme et Hautes-Alpes comprises). Ribes *et al.* (2018) ont montré sur plus de 55 années de données (1961-2017), une augmentation significative des maxima quotidiens de précipitations de + 17 % (Annexe 2). Ces régions sont ainsi touchées plus durement par des épisodes de pluies extrêmes.

2.3.2 Une certaine stabilité actuelle en Savoie

2.3.2.1 Les pluies annuelles et saisonnières

En Savoie, sur les 60 années de mesures de précipitations, aucune tendance notable ne se dégage sur l'évolution des cumuls annuels, que ce soit sur les stations de plaine dont Challes-les-Eaux est représentative (Figure 9) ou sur les stations d'altitude (voir en Annexe 3 les données sur un ensemble de 5 stations réparties à différentes altitudes entre 290 à 1715 m sur l'ensemble du département).

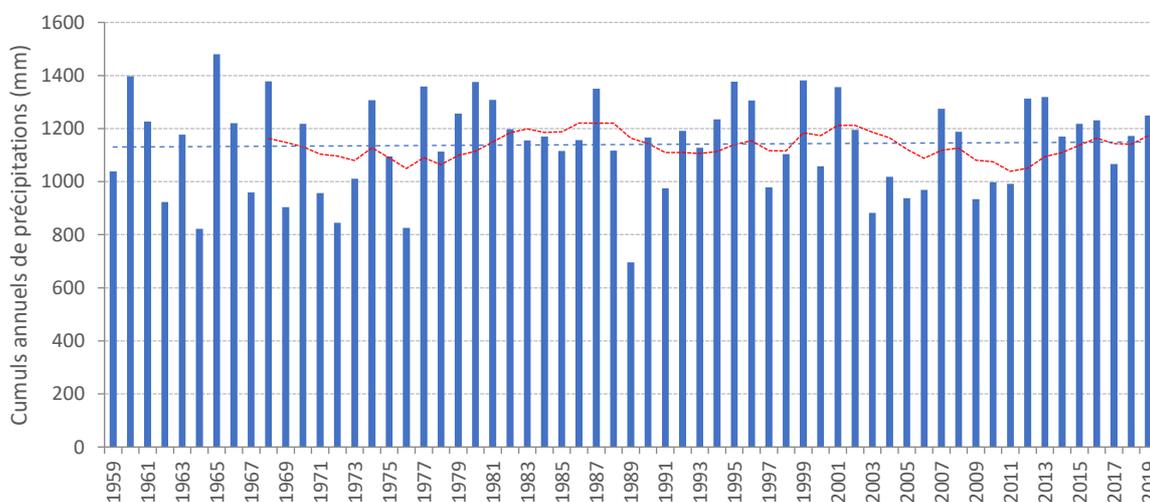


Figure 9 : Evolution des cumuls annuels de précipitations (en mm) à Challes-les-Eaux (291 m) de 1959 à 2020 (Crédits : Météo-France – Traitement : AGATE).

Tendance 1959-2020 : courbe bleue linéaire en pointillé ; Moyenne mobile sur 10 ans : courbe rouge en pointillé.

Cette stabilité globale n'interdit évidemment pas une variabilité annuelle parfois notable. Les cumuls vont quasiment du simple au double entre les années les moins pluvieuses comme 1964, 1976, 2003, et surtout 1989, année record en termes de déficit de pluviométrie, et les années humides comme 1965, 1980, 1995 1999 et 2001.

Cette variabilité s'exprime également à l'échelle pluriannuelle avec des cycles d'années successives plutôt sèches, voire même franchement déficitaires (années 1971-1977 et plus récemment entre 2003 et 2011) et des cycles humides particulièrement visibles sur la période 1977-1981 et plus globalement sur la décennie 1980 et la période 1990-1996.

Ces fluctuations interannuelles sont également illustrées sur la Figure 10 présentant les relevés par décennie sur Bourg-Saint-Maurice avec une décennie 2001-2010 sèche, suivie de près par 1971-1980 alors que les décennies 1980 et 1990 sont les plus humides. À noter que la décennie écoulée (2011-2020) se situe dans les moyennes hautes en termes de cumuls annuels, presque à égalité avec 1991-2000, alors que plusieurs sécheresses estivales ont marqué les esprits durant ces 10 dernières années.

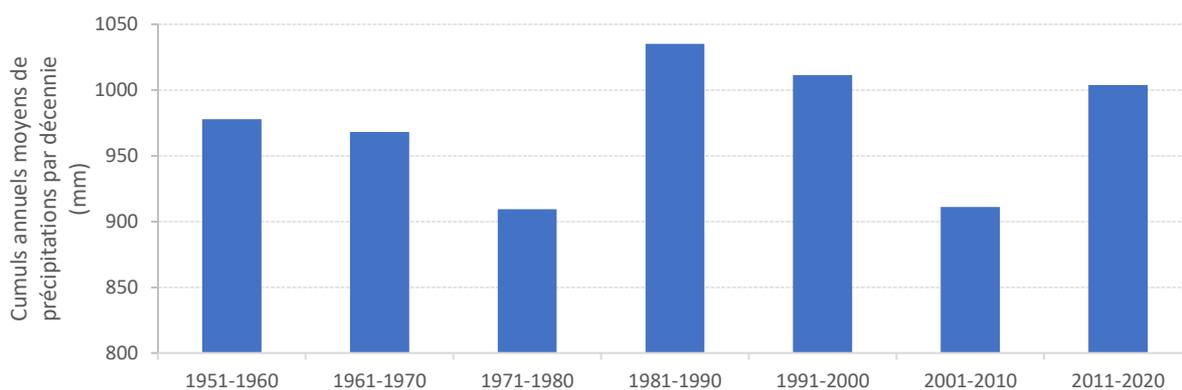


Figure 10 : Evolution des moyennes par décennie des cumuls annuels de précipitations (en mm) à Bourg-Saint-Maurice (865 m) de 1951 à 2020 (Crédits : Météo-France - Traitement : AGATE).

S'agissant de la répartition des pluies à l'échelle des saisons, l'analyse montre comme tendance sur les 45 années de données de la station de Voglans (Annexe 4), une baisse d'environ 100 mm de pluies sur les cumuls automnaux, mais aussi dans une moindre mesure sur les cumuls hivernaux. La tendance actuelle est donc à une répartition plus homogène des précipitations au cours de l'année, tendance retrouvée aussi sur les 60 ans de chroniques agglomérées de 5 stations des Alpes du Nord. Néanmoins, au vu de la grande disparité interannuelle des mesures, ces évolutions des pluies au niveau saisonnier restent légères, bien moins marquées que sur les données de température par exemple.

2.3.2.2 Les épisodes intenses

Si les volumes annuels, et dans une moindre mesure, saisonniers, sont globalement stables au cours du temps en Savoie, il est nécessaire de savoir si les précipitations se concentrent sur moins de jours et avec plus d'intensité.

Les différentes analyses réalisées dans cet objectif n'ont pas permis de détecter une évolution significative allant dans le sens d'un renforcement des pluies de forte intensité.

- Sur la chronique de 72 ans de la station de Bourg-Saint-Maurice, aucune tendance claire ne se dégage sur une baisse du nombre de journées avec précipitations (Annexe 5), ce qui serait le corollaire de pluies plus intenses alors que le cumul annuel reste stable.

- Il n'existe pas de tendance notable sur le nombre de jours de fortes pluies (supérieures à 20 mm) comme le montre l'Annexe 6 relative à la station de Bourg-Saint-Maurice sur les 60 dernières années. Leur nombre varie fortement d'une année à l'autre et se situe en concordance avec les cumuls annuels des 60 années de chroniques.
- L'analyse est identique pour les intensités maximales journalières, que ce soit en vallée préalpine ou plus en altitude dans les Alpes internes (Annexe 7). Aucune tendance particulière à l'augmentation de l'intensité des cumuls journaliers ne se retrouve en 90 ans, ni même ces dernières années.

Sur Thônes, la série des maximums sur 24 h est très homogène, montrant ainsi sur presque 90 ans une forte stabilité de l'intensité des pluies (Figure 11).

En Maurienne, le phénomène d'intensification des maximums journaliers n'est pas non plus visible. Cette stabilité globale n'exclut pas certaines années saillantes telles que 1940, 1990 (ou 1991) et 2015.

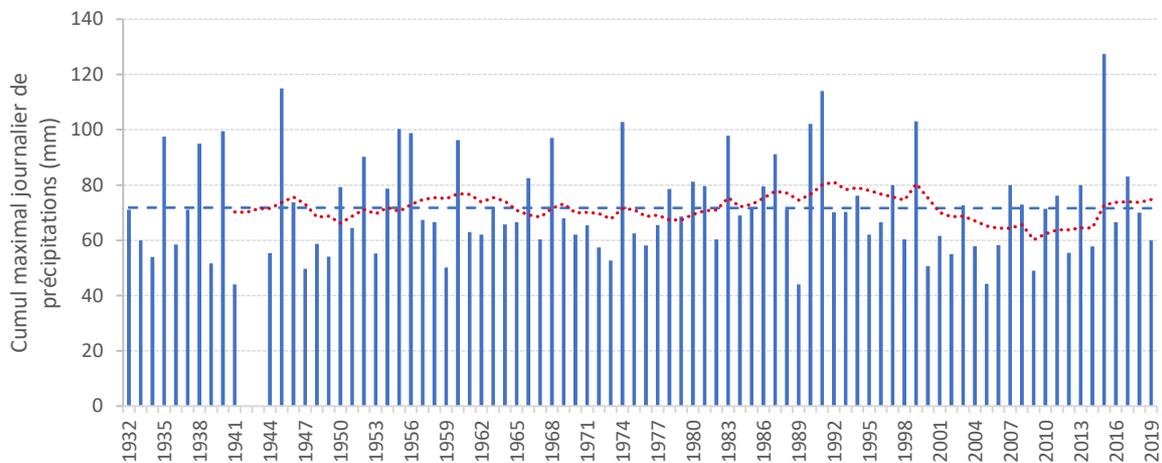


Figure 11 : Evolution de l'intensité maximale journalière de précipitations (en mm) de 1932 à 2020 sur la station de Thônes (630 m - 74) (Crédits : Météo-France – Traitement : CD73).
Tendance 1932-2020 : courbe linéaire bleue en pointillé - Moyenne mobile sur 10 ans : courbe rouge en pointillé

À noter que la station de Bourg-Saint-Maurice sera régulièrement reprise par la suite, et tout particulièrement pour l'étude des pluies efficaces, comme station représentative de la Savoie car en plus d'avoir une chronique longue (60 ans) et fiable (données homogénéisées), les conclusions sur les évolutions de cette station sont en phase avec celles observées en Savoie.

À retenir sur les précipitations annuelles et saisonnières en Savoie

Bien que fortement fluctuantes à l'échelle annuelle ou pluriannuelle, aucune évolution notable n'est observée sur les précipitations mesurées en Savoie aussi bien du point de vue des cumuls annuels que des précipitations intenses.

Tout au plus une légère évolution est détectée en ce qui concerne la répartition saisonnière des pluies allant dans le sens d'une répartition un peu plus homogène.

Alors que la dernière décennie 2010-2020 ressort comme plutôt humide (1000 mm en moyenne à Bourg-Saint-Maurice, soit 10 % plus humide que la décennie 2001-2010), des records de sécheresse sont enregistrés : un paradoxe apparent qui s'explique par l'analyse des pluies efficaces et des bilans hydriques, exposée ci-après.

2.4 Les pluies efficaces (ou le bilan hydrique)

Les pluies efficaces, ou bilan hydrique, a pour objectif l'évaluation de la fraction des pluies qui vont effectivement contribuer à la recharge et l'alimentation de la ressource en eau qu'elle soit souterraine ou superficielle.

Il s'agit de soustraire aux quantités totales de précipitation reçues, une estimation de l'évapotranspiration (ETP) laquelle correspond aux volumes d'eau évaporés au sol et/ou captés par la végétation.

L'ETP est estimée par Météo-France par calcul reprenant des paramètres physiques mesurables, principalement la température mais aussi l'ensoleillement, le vent et l'humidité. Il s'agit d'une valeur théorique et potentielle, en ce sens qu'elle peut sur une période donnée être supérieure aux précipitations. Ainsi, en les cumulant sur l'année, des résultats négatifs peuvent survenir témoignant d'une situation générale de sécheresse pour l'année considérée dans la mesure où les conditions climatiques ont été telles que les potentialités d'évaporation ont été supérieures aux précipitations effectivement reçues (Figure 12).

La notion de « Pluies efficaces » renvoie donc cette fraction des pluies qui ne sont pas interceptées et qui contribuent effectivement à l'alimentation de la ressource en eau sur le territoire considéré.

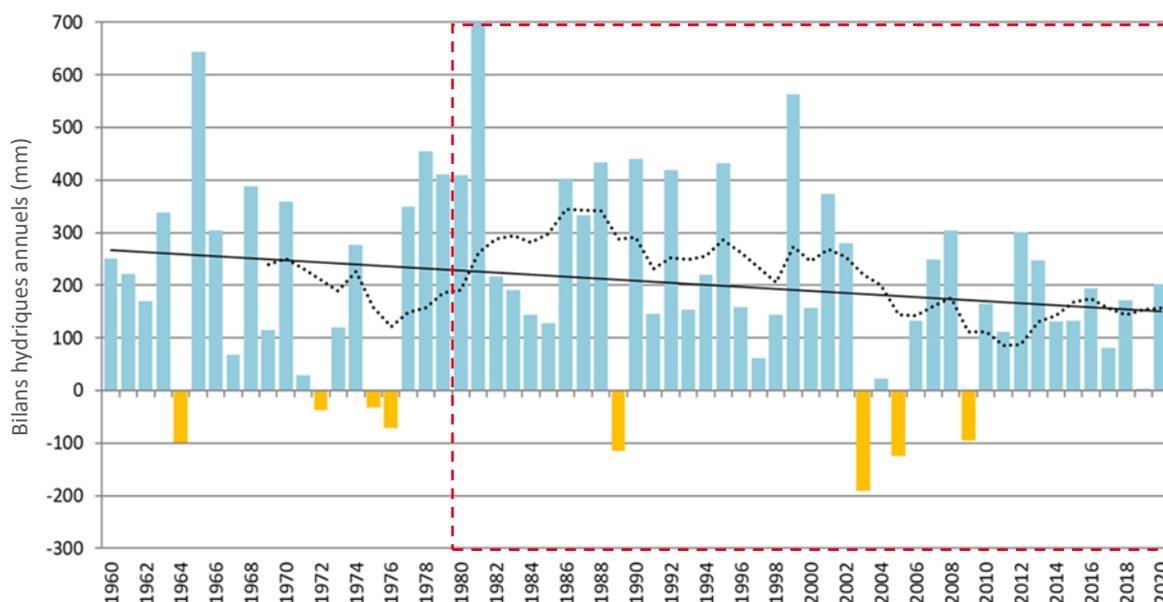


Figure 12 : Evolution des bilans hydriques annuels sur la période 1960-2020 sur la station de Bourg-Saint-Maurice (865 m) (Crédits : Météo-France - Traitement : AGATE).

Tendance 1960-2020 : courbe linéaire noire – Moyenne mobile 10 ans : courbe noire tiretée.

Le cadre rouge en pointillé fait le focus sur les 40 dernières années (période 1980-2020).

Depuis 60 ans, et particulièrement sur les 30 dernières années, le bilan hydrique sur Bourg-Saint-Maurice est en baisse régulière, avec une perte de 40 % des volumes en eau disponibles pour les ressources. Cette diminution représente environ 115 mm de précipitations efficaces, soit l'équivalent de plus d'un mois de pluies qui ne vont plus dans les cours d'eau ou les nappes. L'été et l'automne sont les périodes les plus impactées par un manque de recharge des ressources, en témoignent des bilans hydriques saisonniers en nette baisse (Annexe 8).

La Figure 13 met en évidence un fait majeur : elle montre clairement que si les précipitations annuelles de ces 10 dernières années se situent plutôt sur des valeurs hautes, cela ne suffit pas à recharger correctement les ressources en eau. En effet, la hausse de la température fait croître l'ETP et pèse lourdement sur le bilan hydrique qui ne parvient pas à retrouver des valeurs comparables à celles du siècle dernier. La comparaison entre les décennies 1991-2000 et 2011-2020 est à cet égard tout à fait parlante : avec des pluies annuelles similaires, le bilan hydrique de la seconde période est très sensiblement inférieur (près de 100 mm en moins). Il en est de même pour la comparaison des deux décennies 1971-1980 et 2001-2010.

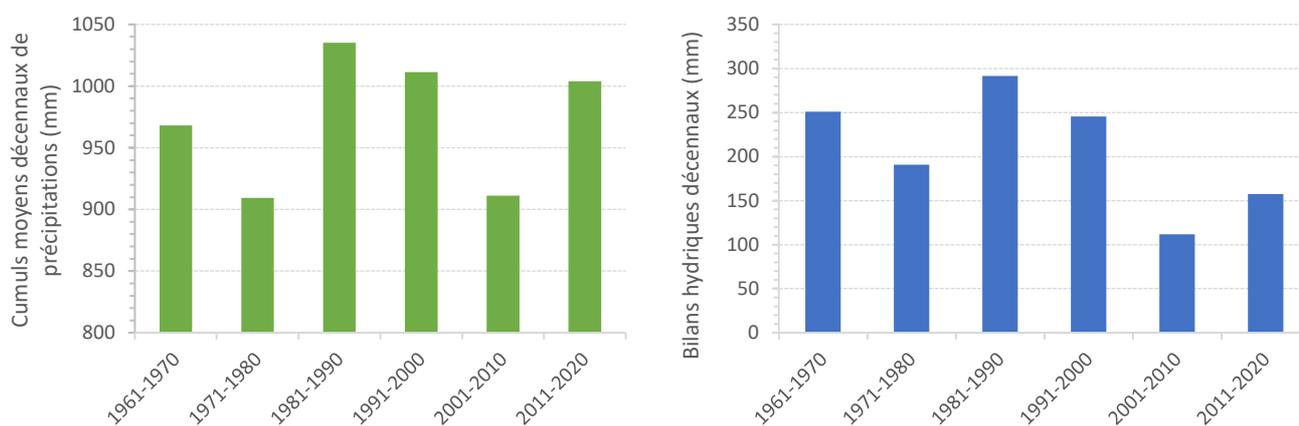


Figure 13 : Evolution des précipitations (à gauche – en vert) et des bilans hydriques (à droite – en bleu) à l'échelle décennale sur la station de Bourg-Saint-Maurice (865 m) entre 1961 et 2020 (Crédits : Météo-France – Traitement : AGATE-CD73).

La comparaison des bilans hydriques sur la seule période végétative (mars à septembre) produit des résultats encore plus saillants que ceux à l'échelle annuelle présentés ci-dessus. Ainsi, en comparant les 2 dernières décennies, la plus récente (2011-2020) devient même bien plus sèche sur cette période végétative que la décennie record 2001-2010 (Annexe 9). Cette longue période continue de 7 mois affecte lourdement l'évolution des ressources en eau qui ne peut se maintenir que par les 5 mois restants (octobre à février), durant lesquels vont se concentrer les pluies efficaces propices aux recharges. La Figure 14 illustre l'impact que peut avoir cette inégale répartition des pluies efficaces sur les ressources en eau sur la dernière décennie avec comme exemple la baisse du lac d'Annecy en Octobre 2018.



Figure 14 : Vue du lac d'Annecy (depuis le Pâquier d'Annecy) (A) le 13 Octobre 2018 à une côte de 13 cm et (B) le 29 Août 2019 à une côte habituelle de 80 cm (Crédits : (A) CC-BY-SA 4.0 Florian Pépelin, (B) Tiia Monto).

En résumé, malgré des précipitations nettement plus importantes que sur la décennie précédente, les pluies efficaces de la décennie 2011-2020 restent sur des niveaux bas, à cause de la forte hausse des températures.

À retenir sur les pluies efficaces en Savoie

L'analyse du bilan hydrique montre :

- une baisse régulière des pluies efficaces et donc de la reconstitution de la ressource : - **40 %** en 60 ans (équivalent de plus d'**un mois de précipitations en moins** pour les ressources en eau),
- une saisonnalité plus forte avec une chute des pluies efficaces durant les mois d'été et d'automne.

Elle met en exergue l'influence majeure de l'évolution de la température sur l'évapotranspiration et les pluies efficaces et donc sur la recharge de la ressource en eau disponible qu'elle soit souterraine ou superficielle.

2.5 La neige et les glaciers

2.5.1 La neige

2.5.1.1 Les cumuls de neige

Dans les Alpes du Nord, les données de cumuls de neige sur 3 stations (Megève - 1080 m, Peisey-Nancroix – 1350 m et Bessans – 1715 m) montrent qu'en 60 ans, il tombe en moyenne 1 m de neige en moins (-1,08 m) sur l'ensemble de la saison, de novembre à avril (Figure 15). Ainsi, sur la saison complète, la baisse de l'enneigement est de 20 % entre les deux périodes climatiques 1959/1987 et 1988/2021 (avant et après le début du réchauffement).

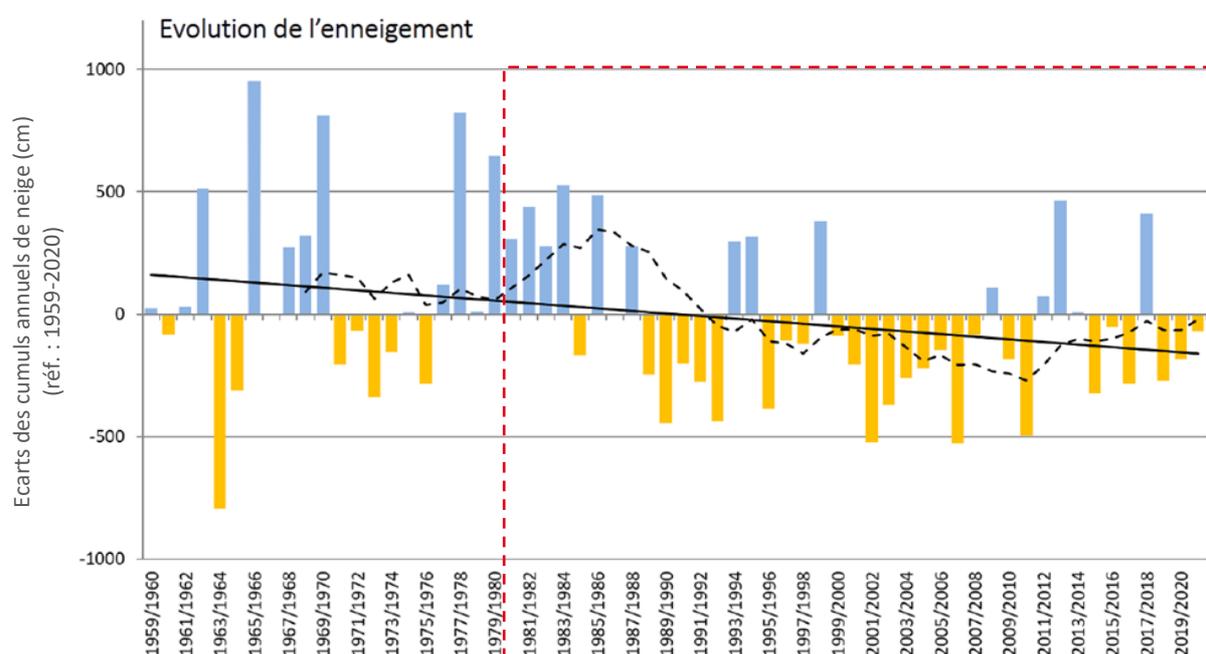


Figure 15 : Ecart des cumuls de neige de **novembre à avril** de 1959/60 à 2020/21 par rapport à la moyenne 1959-2020 dans les Alpes du Nord (cumul de 3 stations entre 1080 m et 1715 m d'altitude) (Crédits : Météo-France – Traitement : AGATE).

Tendance 1959-2021 : trait linéaire noir ; Moyenne mobile sur 10 ans : courbe noire en tireté.

Le cadre rouge en pointillé fait le focus sur les 40 dernières années (période 1980-2020).

Au cours de la dernière décennie, les déficits de cumuls de neige ont été bien moins marqués que sur la décennie précédente grâce à la hausse des précipitations au cœur de l'hiver (décembre à février) et des températures plutôt froides impliquant une limite pluie-neige suffisamment basse en altitude.

En revanche, si depuis 10 ans les cumuls de neige en plein hiver repartent à la hausse en moyenne et haute altitudes (altitudes supérieures à 1000 m), la tendance globale est très nettement à la baisse (- 40 % en 60 ans) et s'observe presque en continu sur l'arrière-saison (mars-avril), en lien direct avec la hausse des températures au printemps qui remonte la limite pluie-neige (Annexe 10).

En Chartreuse, sur le site du Col de Porte (1325 m), l'observatoire du Centre d'Etudes de la Neige (CEN) apporte d'autres illustrations de l'impact du réchauffement sur la limite pluie/neige et par conséquent sur la baisse de l'épaisseur de neige hivernale (Figure 16).

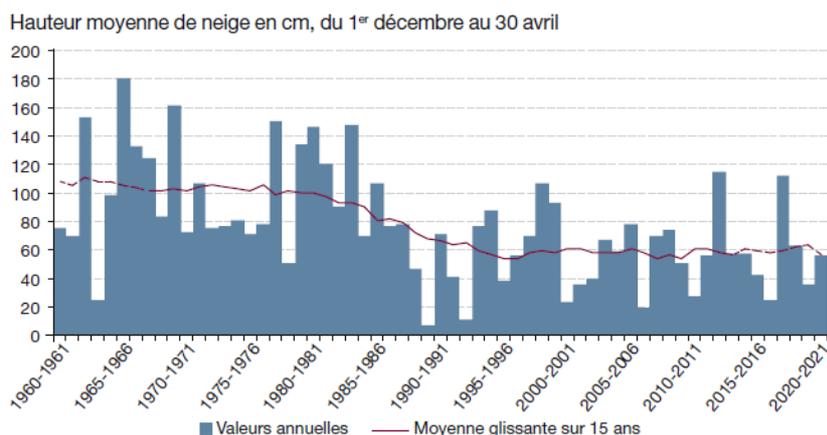


Figure 16 : Enneigement au Col de Porte (Chartreuse – 1365 m) depuis l’hiver 1960-61 (Crédits : Météo-France).

En 30 ans (1960-1990/1990-2020), le manteau neigeux a fondu de près de 40 cm (- 38 cm), passant de 1 m à environ 60 cm. Cette hauteur moyenne de neige au sol de décembre à avril diminue depuis 1960 alors que les précipitations restent globalement stables sur cette période (Annexe 11).

Au-delà des impacts sur les épaisseurs de neige, le réchauffement climatique réduit aussi la durée de présence de la neige au sol.

En comparant les 2 derniers cycles climatiques sur la station du Col de Porte (1960-1990/1990-2020), le nombre de jours avec des hauteurs de neige au sol supérieures à 1 m est en diminution, passant d’environ de 75 jours /an à 33 jours /an, soit 42 jours /an de moins en 30 ans (Annexe 12).

Depuis les années 1970, la durée d’enneigement entre 1100 m et 2500 m s’est réduite de 5 semaines dans les Alpes du Nord. En 40 ans (1965-1975/2005-2015), les périodes sans neige au sol ont augmenté de + 25 % à 2500 m et de + 10 % à 1500 m (Figure 17).

Ainsi, les volumes de neige accumulés fondent de plus en plus tôt et au milieu du printemps, les stocks de neige ont des niveaux en baisse continue depuis les années 1980. Dans les Alpes du Nord, le volume du manteau neigeux en place (en équivalent eau) au 1^{er} mai décroît de 12 % par décennie (Annexe 13).

Cette perte de stockage implique un déficit de disponibilité des ressources en eau lors des mois les plus chauds.

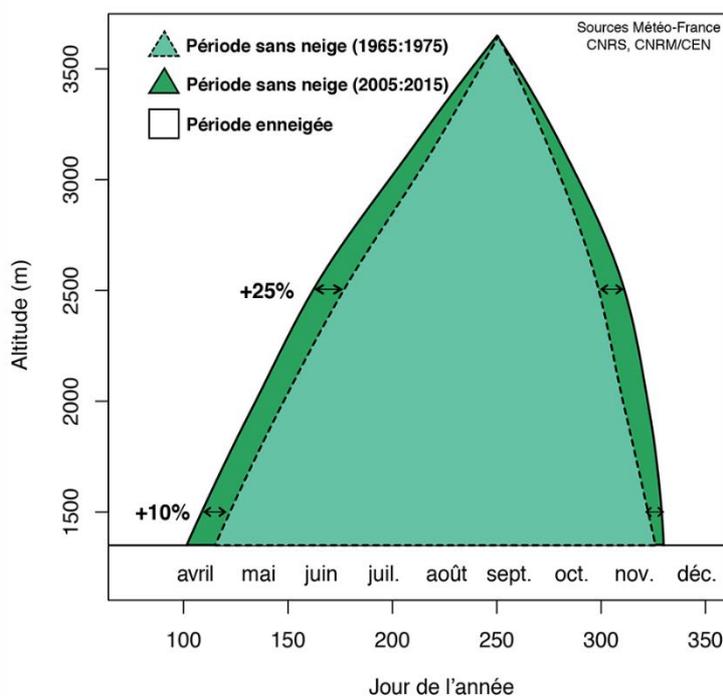


Figure 17 : Périodes (en jours/dates) avec présence ou non de neige au sol en fonction de l’altitude (de 1500 m à 3500 m) entre 1965-1975 et 2005-2015 dans le massif du Mont-Blanc (Crédits : Météo-France, CEN, CNRS).

Dans les Alpes du Nord, selon les dernières projections climatiques d'enneigement du CEN¹, l'ensemble des baisses observées avec le réchauffement climatique semblent devoir se poursuivre notamment en moyenne montagne. Néanmoins, sur le moyen terme et en pleine saison (décembre à février) une hausse des précipitations est envisagée et pourrait conduire au maintien, voire à une augmentation de l'enneigement en haute altitude (supérieure à 2000 m).

2.5.1.2 Les surfaces enneigées

Un autre indicateur permettant de mesurer l'évolution de la couverture neigeuse en Savoie est l'utilisation de données de type MODIS (MODerate - resolution Imaging Spectroradiometer), mesures provenant de l'imagerie satellitaire du programme de surveillance de la planète par la NASA.

Il s'agit de données combinées sur 8 jours sous forme d'images, déterminant principalement la présence ou non de neige au sol sur un pixel donné (500 m x 500 m). Dans le cadre de la présente étude, ces mesures en libre accès ont été traitées à l'échelle de la Savoie sur la période allant de 2000 à 2020. Ainsi, à chaque huitaine est calculée le pourcentage de surface du département où la neige a été présente pendant au moins un jour au sol. La technologie MODIS permet aussi de repérer les lacs mais aussi les nuages, qui constituent des artefacts dans l'analyse. La Figure 18 illustre un exemple du traitement pour la période du 21 au 28 mars 2000.

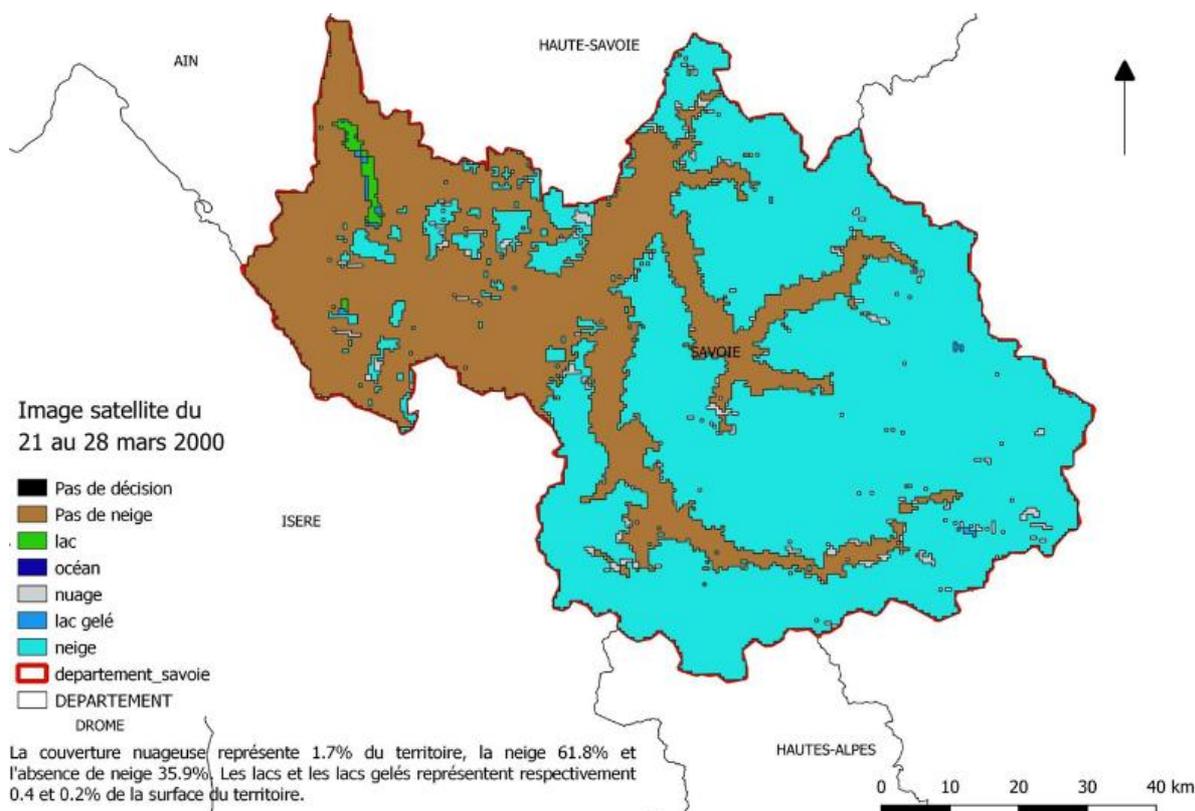


Figure 18 : Imagerie de la couverture neigeuse en Savoie du 21 au 28 mars 2000 (Crédits : NASA (MODIS) – Traitement : CD73).

¹ Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la Métropole (Soubeyroux *et al.*, 2021)

La limite principale de l'utilisation de ces données MODIS provient de la présence de nuages qui perturbe la qualité du traitement en empêchant la détermination de la présence de neige sous cette couche nuageuse. Durant certaines périodes en particulier, notamment au printemps, la part de nuages mesurée peut représenter plus de 15 % du jeu de données. Ainsi, 2 méthodes de calcul de surface ont été utilisées, l'une en englobant l'ensemble des données sans discrimination et l'autre en éliminant les jeux de données présentant des taux de couverture nuageuse supérieurs à 15 %.

Ces pourcentages calculés par huitaine peuvent ensuite être moyennés à l'échelle du mois ou de l'année pour produire un taux moyen d'enneigement mensuel ou annuel.

Les résultats et évolutions sont relativement similaires entre les 2 méthodes sur les calculs de surface enneigée moyenne sur l'année, et ceci même si les incertitudes sont plus grandes en utilisant l'ensemble des données (Figure 19). En près de 20 ans (2001-2019), il n'apparaît pas possible de dégager une tendance particulière au niveau des taux moyens annuels d'enneigement de la Savoie. Par contre, les années exceptionnellement basses (2011) ou hautes (2010, 2012 et 2013) se retrouvent particulièrement bien avec les 2 méthodes.

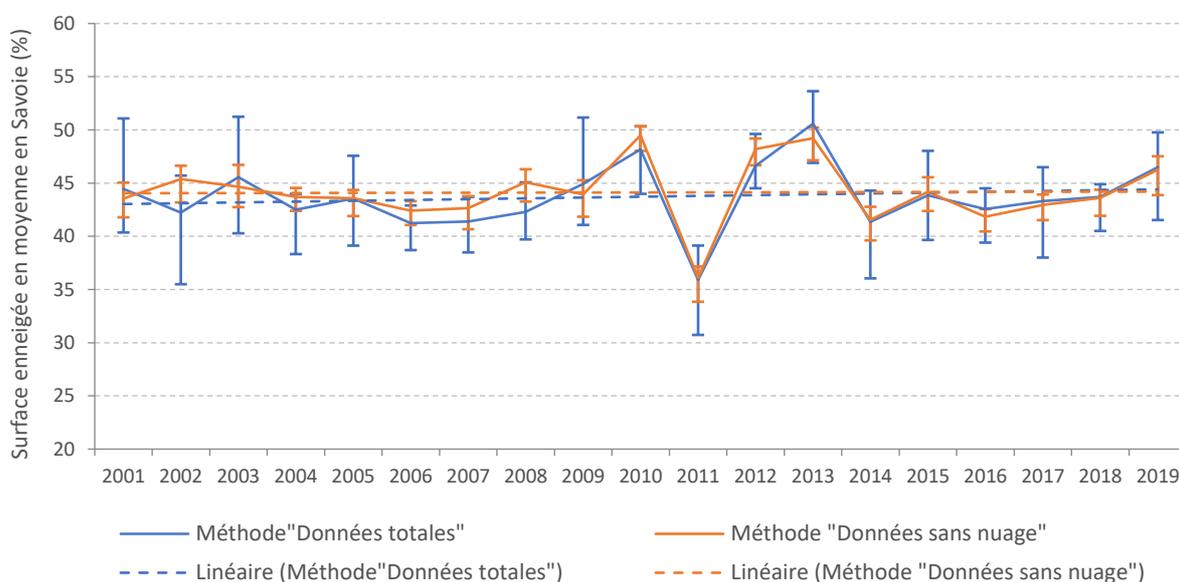


Figure 19 : Evolution de la surface enneigée en Savoie, en moyenne annuelle sur la période 2001-2019 et selon 2 méthodes de calcul : 1) « Données totales » (en bleu) et 2) « Données sans nuage » (en orange) avec leurs barres d'incertitude (Crédits : NASA (MODIS) – Traitement : CD73).

Les tendances linéaires des deux jeux de données sont représentées en lignes tiretées.

En revanche, l'examen des données à l'échelle mensuelle met clairement en évidence entre 2001 et 2019 une baisse des surfaces enneigées principalement l'hiver et à la fin de l'été (Annexe 14). Ce constat est à rattacher à l'impact de la hausse des températures, entraînant une remontée de la limite pluie-neige l'hiver et de l'isotherme 0°C l'été.

Par ailleurs, une légère augmentation des surfaces enneigées est également observée sur de courtes périodes de l'automne (octobre/novembre) ou entre mai et juillet (Annexe 14). Ce constat s'explique directement par l'augmentation de la pluviométrie sur la décennie 2011-2020 par rapport à la décennie précédente (vue aux paragraphes précédents), mais il s'agit là d'une fluctuation temporaire de la pluviométrie qui ne témoigne pas d'une tendance lourde.

Même si les surfaces au sol enneigées semblent annuellement stables, les faibles couvertures enregistrées ont quant à elles tendance à devenir plus fréquentes. Par exemple, la récurrence d'une couverture neigeuse inférieure à 10 % du territoire de la Savoie a été augmentée de 2 semaines en 20 ans (Annexe 15).

Par ailleurs, l'évolution à la hausse depuis 2000 des cumuls de neige fraîche à moyenne altitude (entre 1000 m et 2000 m d'altitude) ne se retrouve que partiellement sur les données MODIS de couverture neigeuse (Figure 20). Cet indicateur à l'échelle départementale montre bien sous un nouvel angle l'impact de la hausse des températures sur le maintien au sol avec une augmentation de la fonte.

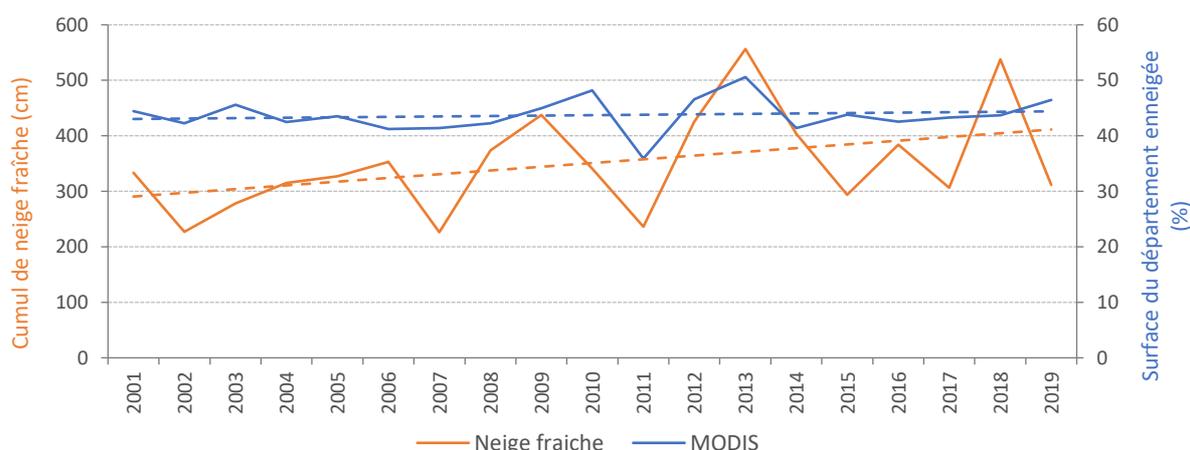


Figure 20 : Evolution de la couverture annuelle de neige en Savoie comparée aux cumuls annuels de neige fraîche entre 2001 et 2019 (Crédits : NASA (MODIS) ; AGATE – Traitement : CD73).

En résumé, l'exploitation des données MODIS porte sur un pas de temps assez court des deux dernières décennies et celles-ci s'inscrivent dans un contexte pluviométrique très différent.

Sur cette période, le taux global d'enneigement annuel est stable mais il s'agit probablement d'un résultat en trompe l'œil car il réside en toute logique sur le fait que la dernière décennie a été correctement arrosée contrairement à la précédente. En fait, l'accélération de la hausse des températures de ces dernières années explique les surfaces enneigées moindres par rapport à ce que les précipitations et les chutes de neige pouvaient laisser attendre. En effet, les chutes de neige à basse altitude (moins de 1000 m) se raréfient l'hiver avec la remontée de la limite pluie-neige et la fonte est désormais plus importante l'été, atténuant ainsi les chiffres annuels des surfaces enneigées.

Certains constats permettent de s'abstraire de cet effet masquant de la pluviométrie et mettent en évidence un enneigement toujours plus précaire du fait des températures en hausse : évolution à la hausse du nombre de jours de très faible enneigement et tenue moindre de la neige fraîche au sol.

2.5.2 Les glaciers

2.5.2.1 Les glaciers dans le monde et en France

Au niveau mondial, l'ensemble des glaciers du globe subit une baisse généralisée depuis déjà les années 1950. La fonte s'est, tout comme l'augmentation des températures, accélérée à partir des années 1990 et avec des records sur la dernière décennie passée (Figure 21).

En Europe (Figure 21, *courbe grise « Central Europe »*) ainsi qu'en France (Annexe 16), les glaciers subissent une fonte massive quasi continue depuis les années 1990, avec une accélération depuis 2003. Comme à l'échelle mondiale, la température et son augmentation jouent un rôle prépondérant à cette chute. Avant cette date de bascule des années 1990, les cumuls de neige durant les hivers conditionnaient grandement les variations annuelles des glaciers. Par exemple, la baisse du niveau des glaciers français durant les années 1940 s'expliquait principalement par la faiblesse des précipitations hivernales durant cette décennie.

Sur la dernière décennie 2011-2020, tous les glaciers présentent des bilans de masse franchement déficitaires. À l'heure actuelle et à long terme, la hausse des températures est et sera telle, que les prévisions annoncent qu'aucune région du globe n'arrivera à voir ses glaciers regagner en volume.

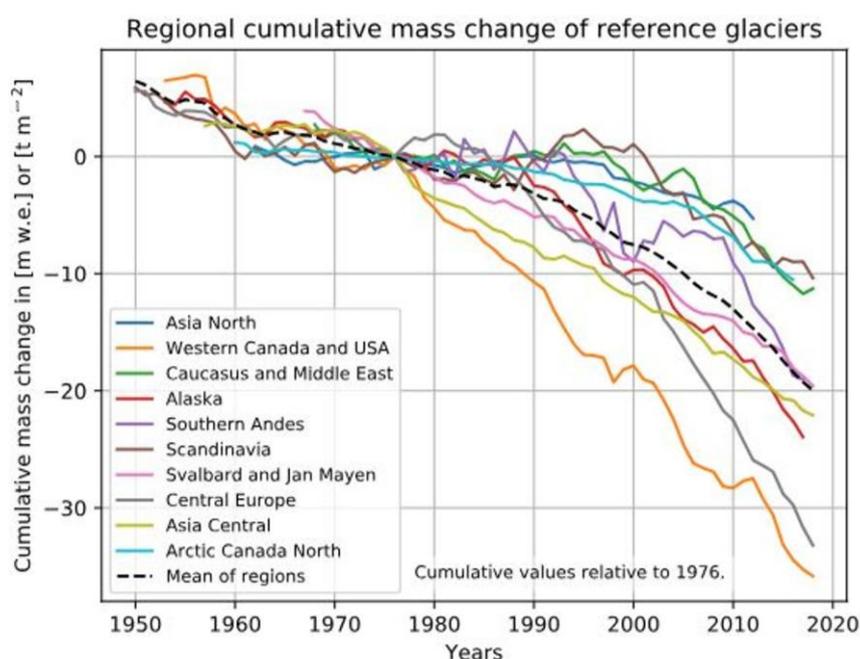


Figure 21 : Evolution des bilans de masse des glaciers mondiaux par région (en m équivalent eau) de 1950 à 2018 (base 0 en 1976) (Crédits : Agence européenne de l'environnement).

Moyenne mondiale : courbe noire en tireté

2.5.2.2 Les glaciers en Savoie

En Savoie, depuis 30 ans, la fonte s'est considérablement accélérée avec une diminution continue de l'épaisseur des glaciers : - 23 m équivalent eau pour Gébroulaz dans le massif de la Vanoise et - 44 m pour Saint-Sorlin-d'Arves. Saint-Sorlin est le glacier le plus impacté à

cause de sa faible taille et son altitude (entre 2600 m et 3400 m). Les 2 glaciers ont ainsi plus perdu de masse en 20 ans que pendant tout le siècle dernier (Figure 22, Figure 23).

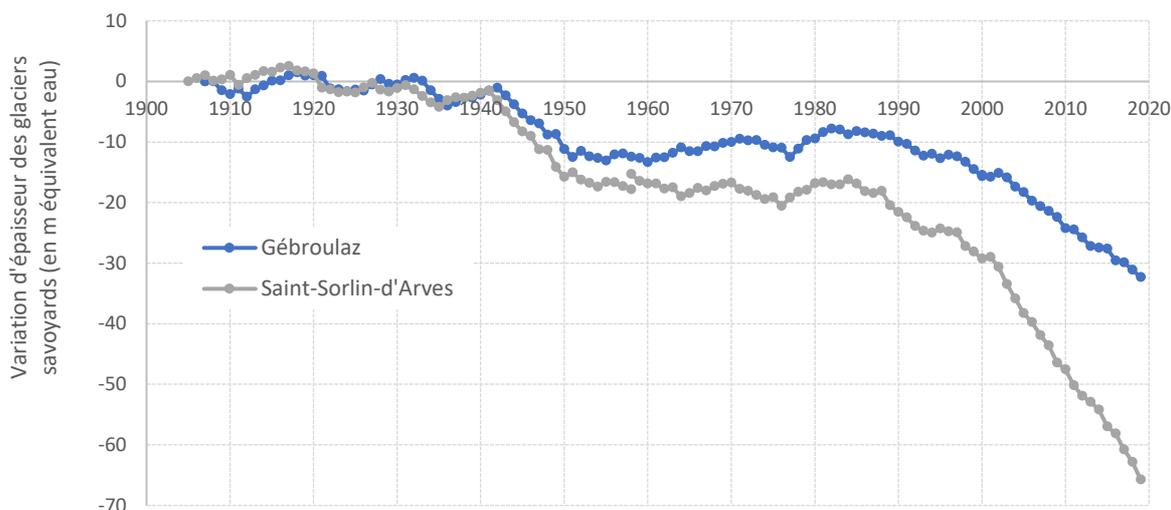


Figure 22 : Evolution des bilans de masse des glaciers savoyards de *Gébroulaz (Vanoise)* et de *Saint-Sorlin-d'Arves* (en m équivalent eau) de 1905-1907 à 2019 (Crédits : Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE Grenoble) – Traitement : CD73).



Figure 23 : Glacier de Gébroulaz, Dôme de Poset, Aiguille de Polset (commune Les Allues) photographiés à différentes dates (Crédits : Observatoire photographique des paysages de Vanoise – Parc national de la Vanoise (A) Fonds RTM, (B) Karine RENAUD).

À l'avenir, vu les températures actuelles et la tendance au réchauffement, les glaciers savoyards devraient continuer à perdre massivement en volume. Episodiquement, lors d'hivers particulièrement neigeux couplés à des étés frais, d'éventuels gains en épaisseur pourront être mesurés mais l'évolution future restera toujours au rétrécissement des glaciers en Savoie sur les décennies à venir.

L'Institut des géosciences de l'environnement de Grenoble estime ainsi que le glacier de Saint-Sorlin disparaîtra dans 60 ans, voire vraisemblablement plus tôt au vu de l'évolution récente des températures.

À retenir sur la neige et les glaciers en Savoie

Le réchauffement climatique a des impacts sur les eaux solides, notamment sur :

- les chutes de neige : - **1 m de cumul en 60 ans** en moyenne montagne (1400 m),
- les hauteurs de neige : - **40 cm en 30 ans** en moyenne montagne (1300 m),
- la durée de l'enneigement : + **25 % de jours sans neige au sol en 40 ans** à 2500 m,
- les surfaces enneigées : peu d'évolution en 20 ans à l'échelle annuelle mais un résultat en trompe l'œil lié au contraste de la pluviométrie entre les deux dernières décennies, et des baisses en haute saison (janvier-février) et sur les niveaux bas (août-septembre) à cause de la hausse des températures (limite pluie-neige et isotherme 0°C),
- les épaisseurs des glaciers : **accélération de la fonte sur les 20 dernières années plus importante que sur l'ensemble du XX^{ème} siècle** (exemple sur Saint-Sorlin-d'Arves : - 30 m durant le XX^{ème} / - 35 m depuis 2000).

SYNTHESE de l'évolution du climat en Savoie

Le climat à l'échelle mondiale connaît des bouleversements majeurs depuis maintenant près de 40 ans, dont les évolutions récentes sont suivies et documentées avec une grande précision. Il est acté que les activités humaines sont responsables de ce dérèglement climatique qui se caractérise par une hausse rapide et sans précédent des températures de l'air sur la totalité de la planète.

Le constat se retrouve aussi au niveau de la Savoie avec une intensité et des effets encore plus marqués que sur le reste du globe, voire même vis-à-vis d'autres régions de France (effet de la continentalité).

En effet, les données locales montrent toutes un emballement quasi continu des températures de l'air depuis le milieu des années 1980. En 40 ans, une hausse de 1,8°C a été enregistrée en moyenne sur le département, alors que l'augmentation de la température mondiale est de 1°C moindre (hausse de 0,66°C), montrant ainsi l'effet accru du réchauffement climatique dans les Alpes.

La hausse des températures de l'air semble ne pas ralentir ces dernières années mais plutôt s'accélérer de nouveau. Les 10 années passées (2011-2020) ont battu des nouveaux records de chaleur tant au niveau de la moyenne décennale (+ 0,58°C en Savoie par rapport à 2001-2010, décennie record précédente) qu'au niveau annuel (sur le podium des années les plus chaudes en Savoie : 2018, puis 2020 et 2011).

Ce réchauffement induit des effets de plus en plus marqués sur le climat en Savoie.

L'impact le plus visible est la fonte accélérée des glaciers dans les Alpes. Sur les 20 dernières années, les glaciers ont perdu autant, voire plus en volume que sur l'ensemble du siècle dernier, en lien direct avec la hausse des jours dits estivaux recensés (+23 jours supérieurs à 25°C en 30 ans à Bourg-Saint-Maurice).

Les impacts sont similaires sur les chutes de neige enregistrées en Savoie autour de 1500 m. La hausse des températures réduit alors les cumuls (- 1 m en 60 ans) et les stocks (- 40 cm en moyenne de neige au sol en 30 ans) observés. Il tombe donc moins de neige à ces altitudes, notamment hors période hivernale, et celle-ci reste moins longtemps au sol.

À l'heure actuelle, seules les précipitations ne semblent pas être affectées par le changement climatique sur le territoire de la Savoie. Les cumuls annuels observés restent globalement stables au cours du temps, même si des cycles périodiques particulièrement secs (2003-2011) apparaissent, alternant avec d'autres plus humides (années 1980).

Pour autant, la hausse des températures de l'air a un effet majeur sur l'évolution des ressources en eau par l'augmentation de l'évapotranspiration qui réduit les quantités de pluies dites efficaces. Ces dernières ont baissé de 40 % en 60 ans en Savoie, représentant l'équivalent d'un mois de précipitations qui ne se retrouvent plus dans les eaux superficielles ou souterraines (cours d'eau, nappes, sources).

Le réchauffement climatique impacte ainsi fortement tant les pluies efficaces que les eaux solides (neige et glaciers) et ces dernières participent à l'alimentation des ressources en eau.

Le réchauffement climatique se manifeste en Savoie par :



Des températures qui s'emballent depuis 40 ans (+ 1,8°C), avec une augmentation record sur la dernière décennie (2020 : + 2,6°C sur Bourg-Saint-Maurice, juste derrière 2018)



Une pluviométrie annuelle stable au cours du temps, alternant entre des cycles décennaux secs et humides



De la neige en moindre abondance autour de 1500 m d'altitude, tant au niveau des chutes (- 1 m de cumul en 60 ans) que des stocks (- 40 cm de neige au sol en moyenne en 30 ans)



des glaciers qui se réduisent à vue d'œil, les glaciers savoyards ayant perdu plus d'épaisseur au cours de ces 20 dernières années que lors de l'ensemble du XX^{ème} siècle



Des pluies efficaces de plus en plus limitées (- 40 % en 60 ans, l'équivalent d'un mois de précipitations en moins pour les ressources en eau).

3 Quelles évolutions des ressources en eau ?

3.1 Précisions sur les échelles de temps pour situer l'analyse des ressources en eau par rapport à celle du climat

3.1.1 Des chroniques de données inégales suivant les thématiques suivies

L'analyse du climat en Savoie peut s'appuyer sur 60 à 70 années de chroniques de données qualifiées de fiables (précipitations, neige, évapotranspiration), et parfois même sur presque 150 ans (température de l'air à Annecy).

Au sein de ces longues chroniques, des variations pluriannuelles peuvent néanmoins apparaître pendant plusieurs années, voire une ou deux décennies, sans remettre en question l'évolution globale du climat sur une plus longue échelle de temps. Autrement dit, ces longues chroniques permettent de recontextualiser et prendre du recul sur des fluctuations plus temporaires.

Pour caractériser l'évolution des ressources en eau, les données disponibles sont beaucoup plus récentes que celles mesurées pour le climat (Figure 24). Les chroniques les plus longues débutent dans les années 50 pour quelques points de suivi de débits en cours d'eau. Mais la grande majorité des autres données sur les ressources en eau sont postérieures aux années 80.

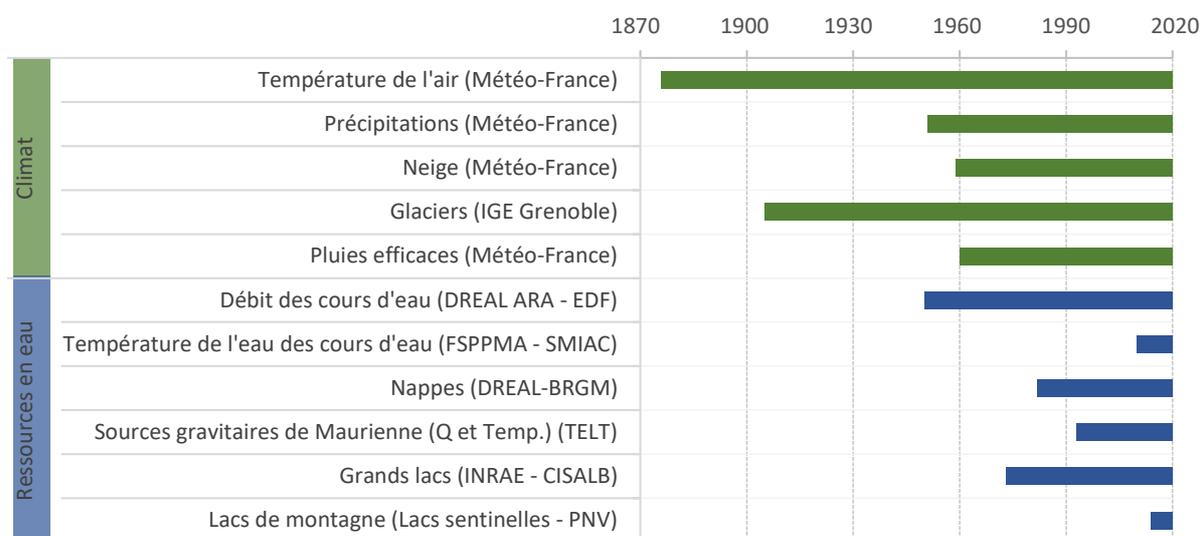


Figure 24 : État des lieux (début enregistrement, source) des données historiques les plus anciennes disponibles pour chacun des compartiments étudiés dans le cadre de cette étude en Savoie.

Il est de fait difficile (et risqué) de tirer des conclusions sur de grandes tendances évolutives à partir de chroniques limitées en durée comme c'est le cas pour celles des ressources en eau.

Aussi, dans l'analyse des données permettant de caractériser les ressources en eau et leur évolution, afin d'éviter des conclusions erronées dues à ce manque de recul, il sera précieux de systématiquement recontextualiser les données disponibles sur les ressources dans le cadre de la vision climatique disponible à une plus grande échelle de temps.

3.1.2 Focus sur les tendances climatiques depuis 40 ans (période 1980-2020)

Dans cet objectif de recontextualisation des données sur les ressources en eau, le présent paragraphe rappelle les grandes caractéristiques du climat de les 40 dernières années en Savoie.

3.1.2.1 Pluviométrie

Aucune tendance franche n'est observée concernant l'évolution des précipitations annuelles au cours des 70 dernières années (légère hausse ou baisse suivant les stations).

En revanche, sur les 40 dernières années pour lesquelles portent nos données disponibles sur les ressources en eau (1980-2020), ces mêmes précipitations annuelles sont plutôt à la baisse. Il s'agit ici d'un effet de zoom car les tendances calculées sur les 40 dernières années démarrent sur 2 décennies (1980-1999) globalement plus humides que la moyenne (exemple avec la station de Challes-les-Eaux en Figure 25).

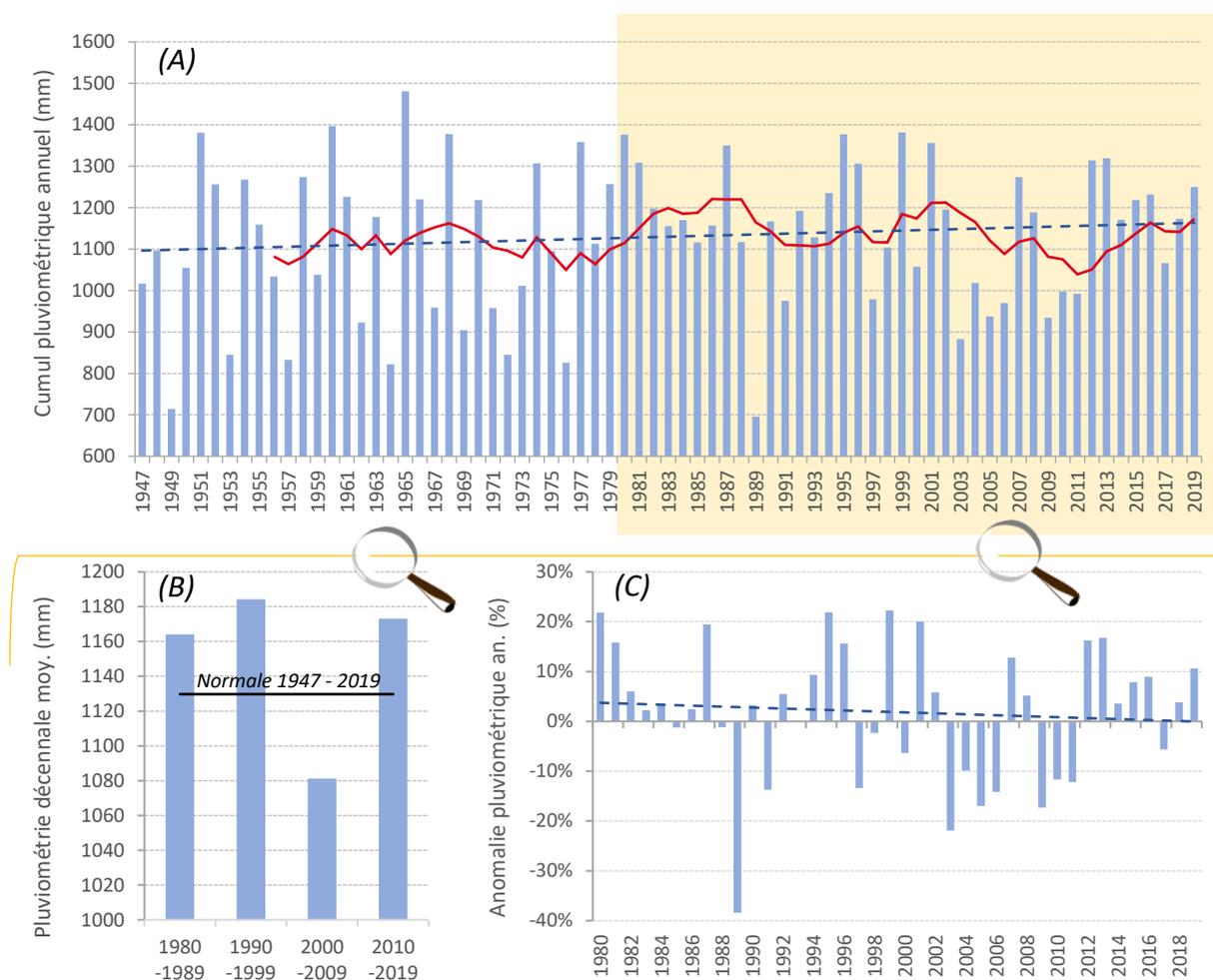


Figure 25 : Sur la station de Challes-les-Eaux (A) Pluviométrie avec les cumuls annuels 1947-2019, (B) zoom sur les moyennes décennales de la période 1980-2019 et (C) les anomalies de pluviométrie annuelle sur la période 1980-2019 par rapport aux normales 1947-2019 (Crédits : Météo-France - Traitement : CD73).

La ligne bleue en pointillé correspond à la tendance linéaire sur la période observée (A : période longue de 1947 à 2019 ; C : période récente de 1980 à 2019). En B, le trait plein noir correspond à la moyenne interannuelle 1947-2019.

Avec une première moitié de la chronique pluvieuse (les deux décennies 1980-1989 et 1990-1999), la pluviométrie entre 1980 et 2019 a donc forcément une tendance à la baisse au cours du temps.

3.1.2.2 Température de l'air

Depuis 1980 (début de la majorité des suivis sur les ressources en eau), la température de l'air suit une hausse quasi-continue sur cette période avec 2 phases notables de réchauffement qui s'additionnent, les décennies 1990-2000 et 2010-2020 (Figure 5).

3.1.2.3 Neige

Au niveau des cumuls de neige, un pic est observé au milieu des années 1980 puis une forte baisse se mesure dès lors, maintenant des niveaux bas dès 1990. La décennie 2000 est particulièrement pauvre en neige sur les Alpes du Nord (Figure 15).

3.1.2.4 Pluies efficaces et bilans hydriques

Les pluies efficaces affichent une baisse marquée, faisant suite à des hauts niveaux enregistrés lors de la décennie 1980 et dans une moindre mesure sur celle des années 1990. Cette baisse est particulièrement visible dès le début des années 2000 et se prolongeant sur les 20 années suivantes, créant une période particulièrement peu propice à une recharge conséquente des ressources en eau (Figure 12).

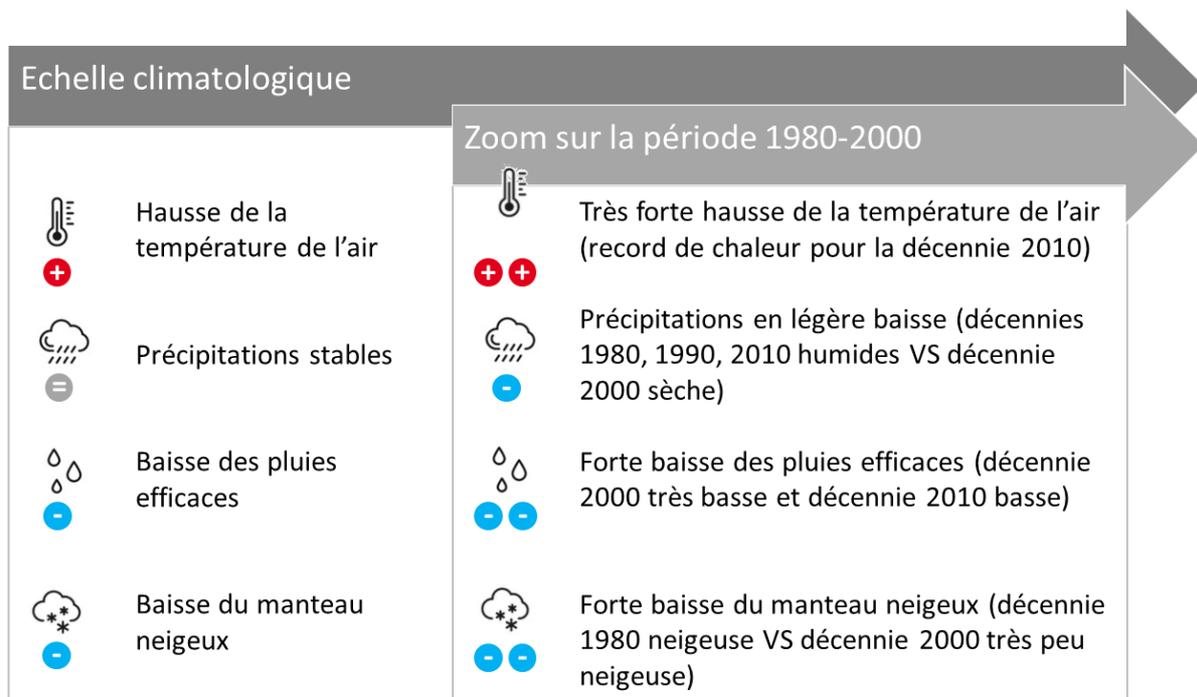


Figure 26 : Synthèse des tendances des différentes variables climatologiques observées sur le long terme (échelle climatologique) et sur la période récente 1980-2020.

3.2 Les eaux superficielles

3.2.1 Les cours d'eau

3.2.1.1 A l'échelle nationale

Giuntoli *et al.* (2010, 2012) ont travaillé sur un réseau de 220 stations hydrologiques sélectionnées pour leurs chroniques de données longues (au minimum 40 ans de données), fiables et réputées pas ou faiblement influencées par les activités anthropiques. Plusieurs indicateurs ont été définis pour étudier les évolutions des périodes d'étiage (période où le niveau d'eau est le plus bas), de moyennes et hautes eaux. Dans un second temps, ces indicateurs ont été mis en relation avec des indices climatiques de grandes échelles pour évaluer la part de la dérive de long terme liée au changement climatique de celle des oscillations climatiques inter-décennales à l'échelle planétaire.

Ce travail a permis de mettre en évidence sur la période 1968-2007 (Figure 27) :

- une évolution de la sévérité des étiages (tendance à la hausse de la durée et du déficit de volume) sur la partie sud de la France qui semble aller au-delà des fluctuations climatiques habituelles. À l'inverse, sur la moitié nord, les étiages en Bretagne et Pays de la Loire ont tendance à être moins sévères.
- un décalage significatif du début de la période de l'étiage. Cette période critique se déclare de plus en plus précocement en de nombreux points du territoire et semble ressortir comme une conséquence du changement climatique.
- de nombreuses tendances à la baisse du module (débit moyen interannuel) dans la moitié sud de la France, avec en particulier une baisse significative dans les Pyrénées, les Cévennes et le Massif Central (hors contexte nival). Cette tendance semble influencée par les courants atmosphériques (circulation d'ouest (type de temps WP2) et anticyclonique (type de temps WP8)).
- une tendance à la hausse du maximum annuel dans le nord-est de la France alors que dans des régions de la partie sud de la France (Pyrénées, Cévennes et Massif Central), l'indice « volume de hautes eaux » semble amorcer une tendance à la baisse.

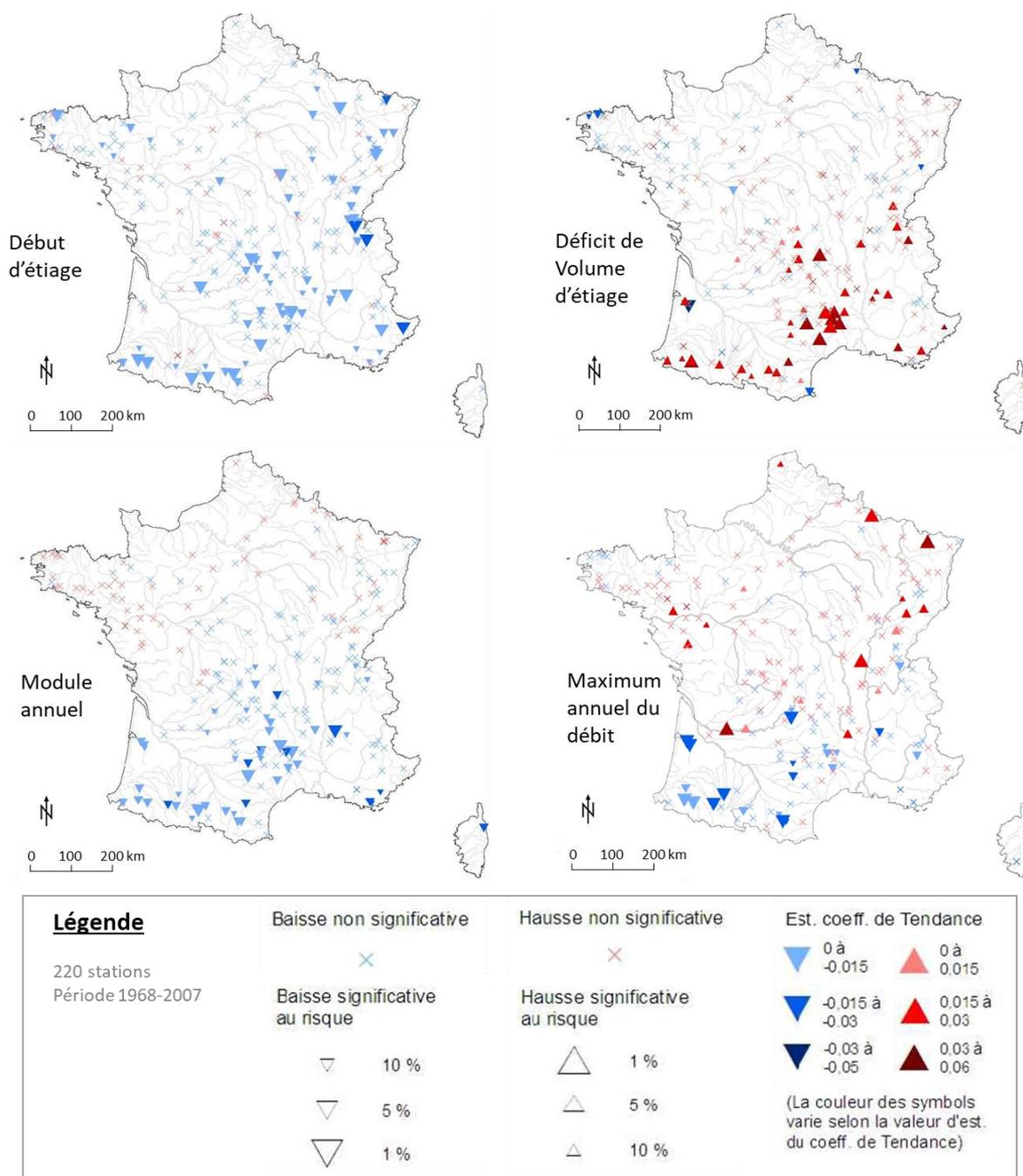


Figure 27 : Tendances temporelles détectées à l'échelle nationale sur l'évolution de 4 indices hydrologiques sur la période 1968-2007 (Crédits : Giuntoli & Renard, 2010 ; Giuntoli et al. 2012).

D'autres travaux menés à l'échelle nationale, sur des chroniques de débit plus longues et plus anciennes, ont approfondi la relation entre les oscillations inter-décennales du climat et celles des débits. Sutton et Dong (2012), Boé et Habets (2014) et Bonnet (2018) suggèrent que la variabilité multi-décennale Atlantique (AMV²) par le biais de la circulation atmosphérique, influence la variabilité multi-décennale des précipitations et des débits (en particulier au

² La variabilité multi-décennale atlantique est un cycle climatique qui affecte la température de surface de la mer de l'océan Atlantique Nord sur des échelles de temps multi-décennales (des précisions sont fournies en Annexe 17).

printemps) des rivières de France depuis les années 1850. Autrement dit, environ tous les 20 à 40 ans, les débits des rivières de France sont alternativement supérieurs puis inférieurs à la moyenne interannuelle d'environ 15 % du fait de la cyclicité du climat en atlantique nord (Annexe 18).

Cette cyclicité naturelle des débits viendra successivement amplifier et atténuer les effets projetés du changement climatique sur les débits des cours d'eau des prochaines décennies.

3.2.1.2 A l'échelle des Alpes

Le projet européen AdaptAlp (2008-2011) dresse le bilan des impacts du changement climatique sur les cours d'eau du massif alpin grâce à un réseau de 177 stations hydrologiques (dont celle du Chéran en limite de la Savoie et la Haute-Savoie) réparties sur 6 pays (Annexe 19) (Bard *et al.*, 2011, 2012). Le travail s'appuie sur des chroniques de minimum 40 ans, enregistrées sur des bassins versants exempts d'influences anthropiques majeures et dont les rivières ont une partie au moins de leur régime hydrologique³ influencé par la neige (c'est-à-dire, une période de hautes eaux au printemps et une période de basses eaux en hiver). Les méthodes d'analyses mises en œuvre sont les mêmes que celles réalisées par Giuntoli *et al* (2010) à l'échelle nationale.

Bard *et al.* (2011, 2012) montrent que les tendances qui affectent les rivières alpines sont très dépendantes de leur régime hydrologique et donc de l'altitude de leur bassin versant (régime à influence glaciaire, nivale ou pluviale).

A l'échelle des Alpes, les étiages hivernaux tendent à être de moins en moins sévères. Cette période de basses eaux hivernales va vers un raccourcissement. La fin de l'étiage hivernal est plus précoce pour les régimes sous influence glaciaire et nivale, tandis qu'elle est plus tardive pour les régimes sous influence pluviale (Annexe 19).

A l'inverse, les étiages estivaux (qui concernent essentiellement les cours d'eau sous influence pluviale) ont tendance à être plus sévères et plus précoces.

Les constats sur les moyennes eaux diffèrent également en fonction du type de régime hydrologique des cours d'eau. Le débit moyen annuel des cours d'eau sous influence glaciaire tend à augmenter alors que la tendance est inverse pour les cours d'eau sous influence pluviale.

La période de hautes eaux en montagne se caractérise par la période de fonte de la neige et/ou de la glace. Cette période semble être de plus en plus précoce à l'échelle des Alpes. Pour les cours d'eau sous influence glaciaire, la fonte tend à être plus intense (augmentation du débit maximum et du volume de fonte) mais pas plus étendue dans le temps.

³ La notion de régime hydrologique et la définition des différents types de régimes hydrologiques rencontrés pour les cours d'eau alpins sont évoquées au 3.2.1.3, p 34.

3.2.1.3 Bilan quantitatif des cours d'eau de Savoie

3.2.1.3.1 Réseau hydrographique et régimes hydrologiques

La Savoie est riche d'un réseau hydrographique de plus de 10 000 km de cours d'eau (en intégrant le petit chevelu) qui se caractérise par des régimes hydrologiques très variés.

Ces régimes hydrologiques sont directement liés à l'altitude des bassins versants qui détermine le rôle de la neige et de la glace dans la rétention ou au contraire la libération de l'eau. De fait, d'Ouest en Est, les régimes évoluent de manière graduelle entre les types suivants :

- le régime pluvial : la neige n'exerce pas d'influence perceptible. Les débits d'hiver sont élevés tandis que ceux d'été sont bas.
- le régime pluvial avec une influence secondaire nivale (dit pluvio-nival) : les débits restent avant tout déterminés par des précipitations sous forme pluvieuse mais l'influence de la neige est toutefois perceptible notamment en générant un étiage en hiver lié à la rétention d'eau sous forme de neige, étiage dit secondaire car moins important que l'étiage principal intervenant au cours ou à la fin de l'été.
- le régime nivale à influence secondaire pluviale (dit nivo-pluvial) : les effets de la neige prennent de l'ampleur et deviennent prépondérants (rétention hivernale et fonte de printemps). L'étiage principal est situé en hiver à la faveur des basses températures et du stockage sous forme de neige. Les hautes eaux ont lieu au printemps lors de la fonte et un étiage secondaire moins marqué que le précédent est observé en fin d'été. Les pluies de l'automne ramènent des débits potentiellement soutenus (mais qui restent plus faibles que lors de la fonte).
- le régime nivale : par rapport au précédent, les effets de la neige sont déterminants, la fonte des neiges détermine des hautes eaux de printemps et des débits qui restent soutenus tout l'été. L'étiage se produit en hiver durant les périodes de grand froid.
- le régime glaciaire : observé en haute altitude avec des débits dictés par le gel et le dégel des glaciers. Les débits sont très contrastés : très faibles en hiver, très forts en été.

Ces différents régimes sont localisés et illustrés avec leurs périodes de hautes et basses eaux sur les Figure 28 et Figure 29.

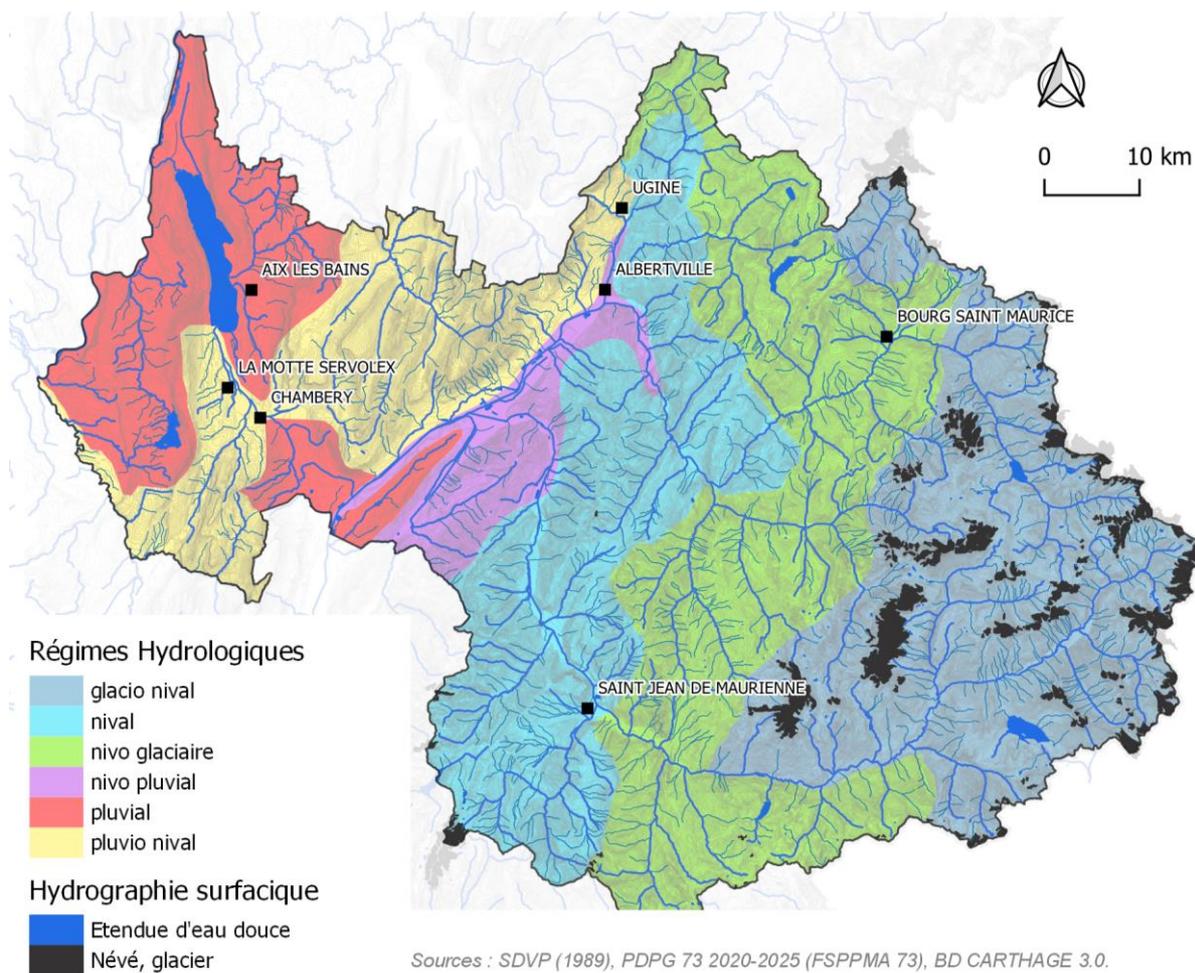


Figure 28 : Les régimes hydrologiques spatialisés en Savoie (redessinés en fonction des sources d'informations suivantes : Schéma Départemental de Vocation Piscicole de la Savoie (SDVP), 1989 ; Plan Départemental de Protection du milieu aquatique PDPG 73 2020-2025 ; HydroPortail (hydro.eaufrance.fr)) (Traitement : CD 73).

A l'ouest du département, les cours d'eau sont alimentés majoritairement par les précipitations sous forme de pluie. La cluse du lac du Bourget, les bassins versants des petits affluents du Rhône, de l'Albanne et du Coisetan se définissent par un régime pluvial avec des basses eaux en été et des hautes eaux en hiver.

Les bassins versants avec des sources perchées sur les massifs montagneux (le Chéran, la Leysse, l'Hyères, le Guiers et la Chaise) se caractérisent par un régime pluvio-nival avec une période de hautes eaux étendue de novembre à mai et un soutien des forts débits printaniers par la fonte de la neige. L'étiage estival reste toujours bien marqué.

La partie aval des cours principaux de l'Isère (aval d'Aigueblanche), l'Arc (aval d'Argentine) et l'Arly (aval d'Ugine), sont de type nivo pluvial. Leur période de hautes eaux se situe au printemps (de mars à mai) sous l'influence de la fonte de la neige. Les parties moyennes à hautes de ces bassins versants se caractérisent par un régime nival où l'influence de la pluie ne se fait plus ressentir sur les débits hivernaux.

Les têtes de bassins versant de l'Arc et de l'Isère sont de type glacio nival avec un pic des hautes eaux situés en juin-juillet dû à la fusion glaciaire et nivale puis un étiage en période hivernale lorsque les précipitations tombent sous forme de neige.

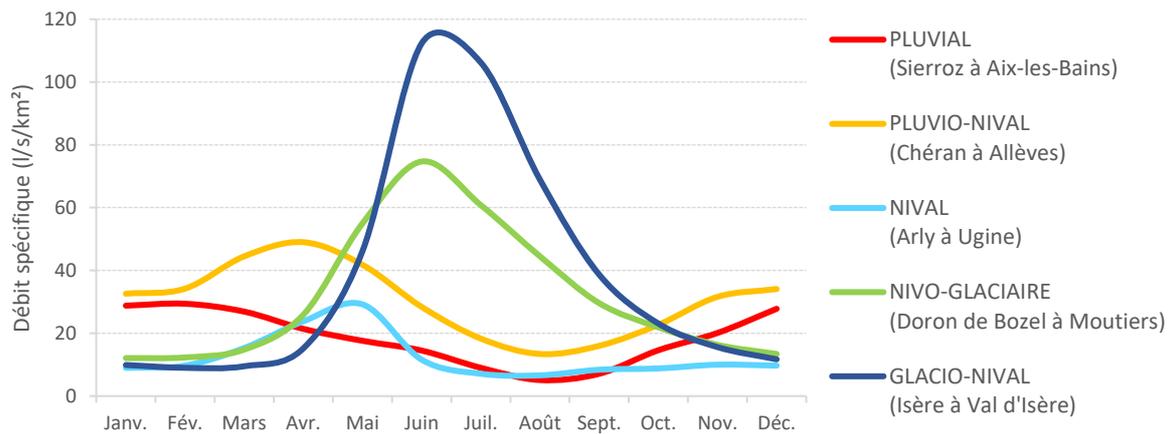


Figure 29 : Hydrogrammes des différents régimes hydrologiques recensés en Savoie (Source des données : HydroPortail - Traitement : CD 73).

Il faut garder à l'esprit qu'une grande partie du réseau hydrographique départemental est largement mobilisé pour l'usage hydroélectrique. L'écoulement de nombreuses rivières se retrouvent artificialisé du fait des prélèvements alimentant les centrales hydroélectriques⁴ et/ou des lâchers d'eau correspondant aux turbinages de l'eau. Parmi ces rivières figurent les principales du département, à savoir l'intégralité des cours de l'Isère, de l'Arc et du Doron de Beaufort ainsi qu'une grande partie des cours du Guiers et du Rhône.

En 2019, 12 586 Mm³ ont été déclarés turbinés à l'échelle de la Savoie par l'ensemble des producteurs hydroélectriques (source BNPE.OFB/BRGM⁵), soit presque 3 fois la totalité de la somme des débits sortant du département. Ceci s'explique par le fait que chaque volume prélevé peut être turbiné plusieurs fois, en cascade, avant de sortir du département.

Au final, et compte tenu de la présence prépondérante d'aménagements hydroélectriques sur les cours d'eau d'altitude, les régimes glaciaire et nival ne sont quasiment plus observables à ce jour. Les débits réels de la quasi-totalité des cours d'eau correspondants sont largement altérés et sont très éloignés des débits naturels dont la description vient d'être faite.

⁴ L'étendue des tronçons de cours d'eau court-circuités est cartographiée à la Figure 30.

⁵ BNPE.OFB/BRGM (Office Français de la Biodiversité / Bureau de Recherches Géologiques et Minières). Données sur les prélèvements en eau issues de "<https://bnpe.eaufrance.fr/>" le 03/2022 et originellement issues des agences de l'eau, offices de l'eau et/ou de la DREAL pour Mayotte.

3.2.1.3.2 Objectifs et méthodologie de la démarche (analyses du débit en relation avec le climat)

Les études de l'évolution de l'hydrologie des cours d'eau français et alpins précédemment présentées ont établi des tendances à partir de chroniques de données qui s'arrêtent avant 2010.

Sur le même pas de temps, une étude intitulée « Synthèse départementale des ressources en eau en Savoie », a été réalisée en 2012 sous le timbre du Département de la Savoie (Paccard *et al.*, 2012). Elle avait dressé un bilan de l'impact de l'évolution climatique sur les eaux superficielles et mis en évidence :

- la diminution des débits moyens annuels des cours d'eau, bien marquée sur l'ouest du département,
- l'accentuation de l'étiage estival en fin d'été y compris pour des cours d'eau à régime nivo pluvial,
- le glissement progressif des régimes hydrologiques sous influence nivale et glaciaire avec une période de fonte nivale plus précoce au printemps (avancée de presque un mois) associée à une diminution des débits mensuels estivaux.

Au regard de l'accélération de l'accroissement de la température au cours de la dernière décennie ainsi que la répétition des épisodes de sécheresse (2009, 2011, 2014, 2015, 2018 et 2020), il est apparu indispensable d'actualiser l'étude de 2012 sus visée grâce aux 10 années d'observations supplémentaires disponibles.

L'évolution des débits des cours d'eau savoyards a été étudiée à partir de quelques stations hydrologiques sélectionnées à partir des critères suivants :

- débit peu ou pas influencé par les activités humaines, en particulier par l'exploitation hydroélectrique qui altère les débits naturels et restreint l'exploitation possible des données,
- station représentative d'un type de régime hydrologique,
- chronique de données, longue, fiable et si possible sans interruption.

Parmi les stations existantes dans le département, six stations ont été retenues pour l'analyse, plus une en Haute-Savoie. Elles sont présentées au Tableau 2 et localisées sur la Figure 30.

Tableau 2 : Caractéristiques des stations retenues pour l'analyse des débits.

Cours d'eau	Station	Code station (Banque HYDRO)	Localisation	Altitude (m)	BV drainé (km ²)	Régime	Débits influencés	Période des données disponibles	Période retenue	Producteur
Isère	Val d'Isère	W00000010 (W00000010)	amont confl. Calabourdanne	1831	46	glacio-nival	non	1948 - 2017	60 ans	EDF
Avérole	Bessans	W1006010 (W1000002)	Chapelle Saint-Pierre	1950	45,4	glacio-nival	non (*)	1969 - 2016	45 ans	EDF
Doron de Bozel	Perrière	W0224010	Vignotan	617	330	nival	non (*)	1948 - 2003	55 ans	EDF
Chéran	Charniaz (Allèves)	V1255010	La Charnia	575	249	pluvio-nival	non	1950 - 2020	70 ans	DREAL ARA
Gélon	La Rochette	W110501002	centre de la Rochette	331	62,5	nivo-pluvial	non	1984 - 2020	36 ans	DREAL ARA
Sierroz	Aix-les-Bains	V1325020 (W1105030)	2ème passerelle - quartier Lafin	245	130	pluvial	non	1978 - 1984 1986 - 1992 1994 - 2020	26 ans	DREAL ARA
Fier	Dingy--Saint-Clair	V1214010	Pont de la voie romaine	514	222	pluvio-nival	non	1906 - 1913 1921 - 1950 1962 - 2020	94 ans	DREAL ARA

(*) Débits naturels reconstitués

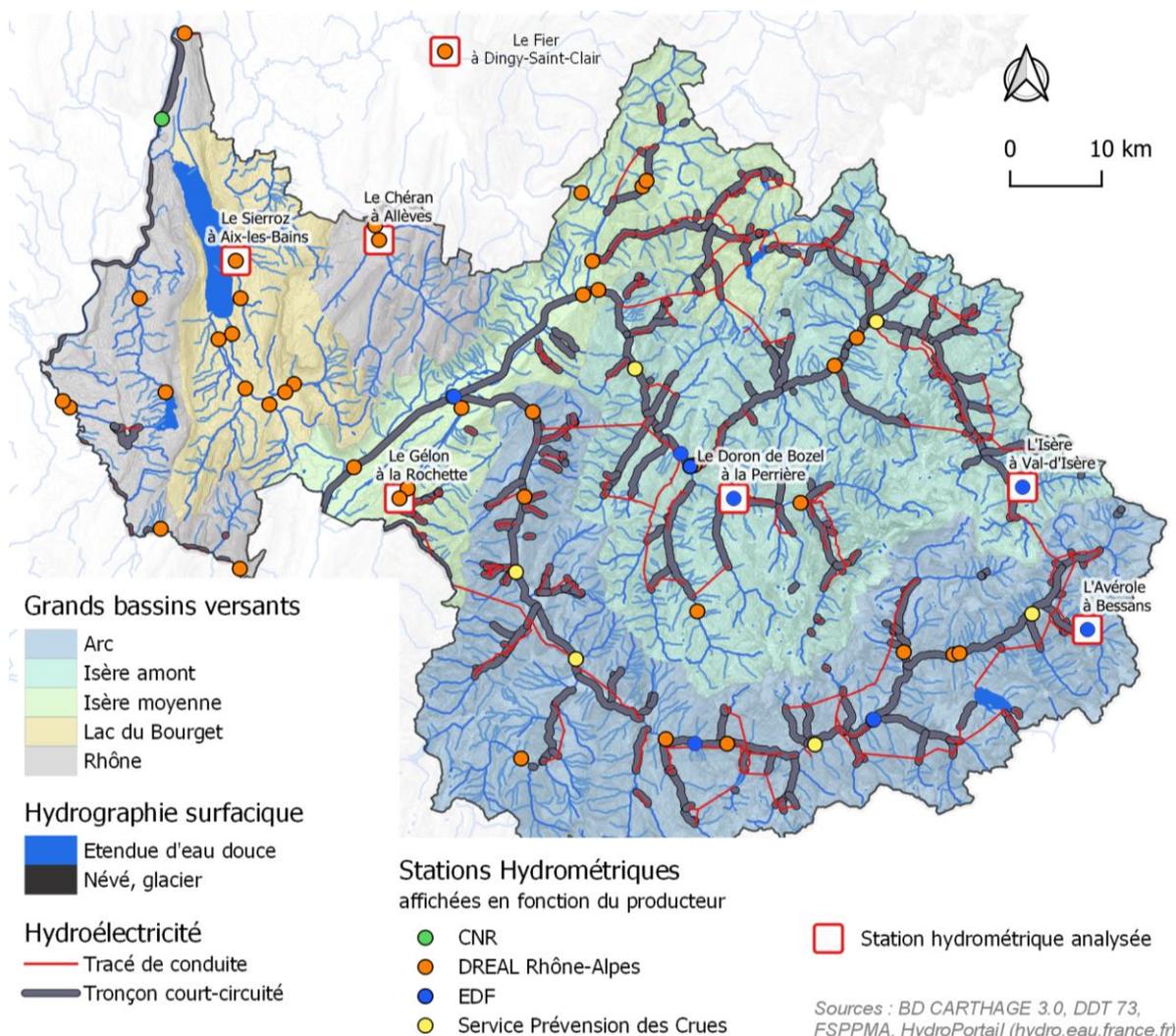


Figure 30 : Localisation des stations hydrométriques existantes et retenues pour l'analyse, mises en relation avec le contexte hydroélectrique (Traitement : CD 73).

Pour chacune des stations retenues, un certain nombre d'indicateurs a été calculé à différents pas de temps (voir détails en Annexe 20) :

- les débits moyens annuels pour appréhender l'évolution globale de l'état hydrologique de chacun des cours d'eau,
- les débits moyens mensuels : leur évolution et leur répartition au cours de la période étudiée pour déceler d'éventuelles évolutions des régimes hydrologiques,
- les débits de basses eaux et d'étiage : leur évolution, leur importance annuelle et leur rigueur au cours de la période étudiée pour estimer l'impact des périodes de stress hydrologique,
- les débits de hautes eaux et de crues : leur évolution et leur récurrence annuelle pour appréhender une évolution potentielle des risques hydrologiques,
- les débits moyens journaliers des périodes printanière et estivale pour évaluer l'influence de la fusion nivale et glaciaire sur ces derniers.

La station sur le Chéran à Allèves (V1255010), c'est-à-dire à la limite des deux départements de la Savoie et de la Haute-Savoie, a servi d'étalon pour tester et cerner l'intégralité de ces indicateurs.

Pour étayer cette analyse quantitative, les indicateurs de débits ont été mis en relation avec d'autres données relatives aux conditions climatologiques.

Un travail pour définir la pluviométrie à l'échelle du bassin versant des Bauges a été effectué en confrontant trois méthodes :

1. l'extrapolation par altitude des données de pluviométrie enregistrées sur 3 stations météorologiques de Météo-France, à savoir Leschraines (591 m), Ecole (734 m) et Aillon-le-Jeune (900 m),
2. les images radar de Météo-France (effectuée uniquement pour l'année 2019),
3. les données modélisées du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF) sur la maille WS 3016 (Bauges aval) (voir sa localisation en Annexe 1).

Les résultats pour l'année 2019 affichent un delta de 350 mm entre les deux premières méthodes mettant en exergue une surestimation de la méthode par extrapolation des altitudes. Les données du ECMWF, plus intégratrices, fournissent quant à elles une valeur plus proche de celle du radar.

Cette source d'information, uniforme et facile d'accès, a donc été retenue pour définir les conditions climatiques locales à chaque bassin versant étudié, ceci pour permettre une confrontation des données hydrologiques et climatiques.

3.2.1.3.3 Analyse du débit du Chéran à Allèves

Le Chéran est une rivière à caractère torrentiel longue de 54 km relevant d'un régime pluvio-nival. Il prend sa source dans les Bauges et se jette dans le Fier. Son bassin versant, relativement préservé, en particulier sur sa partie savoyarde, se caractérise par une forêt dominante et une agriculture raisonnée. Sur son parcours en Savoie, aucun prélèvement ou rejet pour l'hydroélectricité, la neige de culture et l'industrie ne vient impacter son hydrologie. Sa chronique de mesures de débit reflète donc essentiellement les évolutions climatiques.

3.2.1.3.3.1 Le débit moyen annuel (ou module)

Le débit moyen annuel du Chéran enregistre de fortes fluctuations interannuelles qui suivent globalement celles de la pluviométrie locale (Figure 31). La moyenne annuelle glissante sur 5 ans permet un effet de lissage et fait mieux apparaître des cycles humides et secs irréguliers qui s'échelonnent sur une quinzaine d'années.

Les débits moyens annuels les plus bas observés actuellement ont déjà été mesurés par le passé ponctuellement au début des années 70. Cependant, leur fréquence répétée sur les deux dernières décennies est inédite. Ainsi, depuis 1980 avec l'emballement de l'accroissement de la température, l'amplitude des cycles secs et humides s'amenuise et le débit moyen annuel du Chéran tend à diminuer, de l'ordre de 0,8 m³/s par décennie (soit un débit spécifique de 3,4 l/s/km²/10 ans).

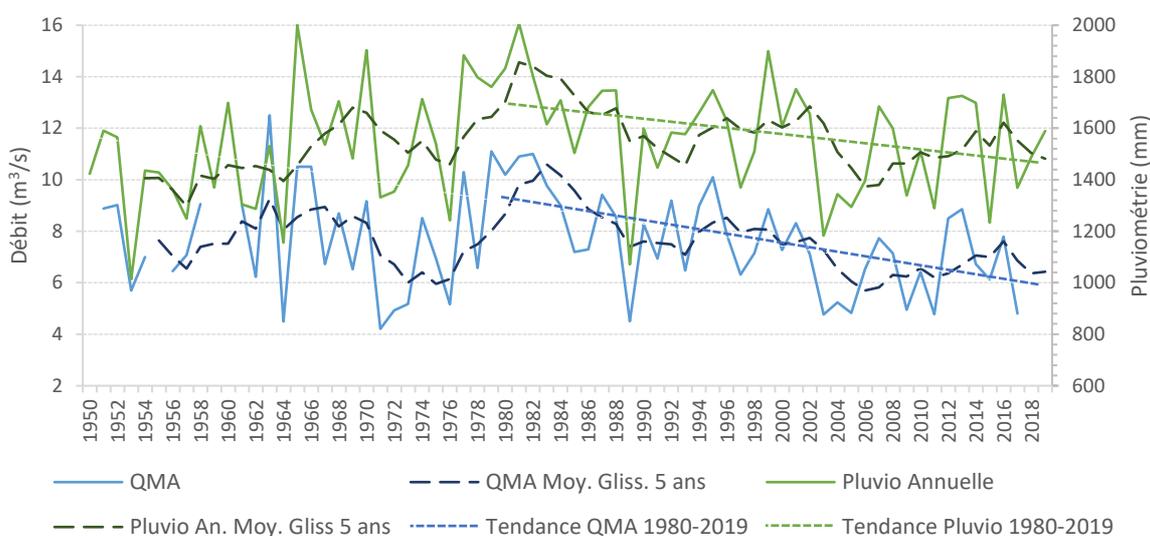


Figure 31 : Débit moyen annuel (QMA) du Chéran à Allèves (Station DREAL ARA V1255010) associé au cumul annuel des précipitations modélisées sur la maille (20 x 30 km) WS 3016 (Bauges aval) par le Centre Européen des prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). (Crédits : DREAL ARA, MF, ECMWF – Traitement : CD 73).

Les lignes pointillées correspondent aux tendances linéaires du QMA et du cumul annuel des précipitations sur la période 1980-2019.

La Figure 31 permet de mettre en relation l'évolution des débits moyens annuels avec les cumuls de précipitations de l'année. Nous retrouvons ici la tendance globale à la baisse des précipitations sur les 40 dernières années qui a été évoquée précédemment au paragraphe 3.1.2.1 (p 31). L'important réside dans le fait que la baisse des débits est plus rapide que celle de la pluie (réduction de l'ordre de 25 % de la pluie annuelle entre 1980 et 2020, et de 55 % du débit moyen annuel sur la même période). Cette chute excessive des débits par rapport aux précipitations s'explique par la hausse des températures de l'air et de la hausse de l'évapotranspiration. Ce constat fait donc écho aux développements de la partie 2.4 sur le bilan hydrique (ou les pluies efficaces).

Pour obtenir un même débit [Q] sur la période récente (1980-2019) que par le passé (1950-1980), il faut environ 12 % de plus de précipitations [P]. La hausse du rapport P/Q depuis les années 80 est concomitante à celle de la hausse de la température de l'air (Figure 32).

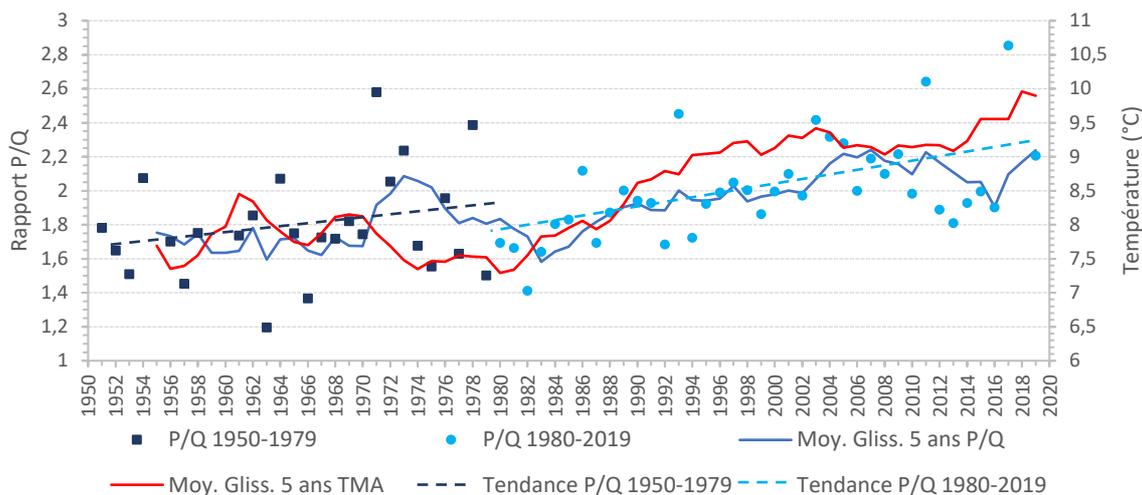


Figure 32 : Rapport du cumul de précipitations annuel dans le Bauges [P] sur le débit moyen annuel du Chéran à Allèves [Q] mis en relation avec la température moyenne annuelle de l'air [TMA] enregistrée à la station météorologique de Leschraines (Crédits : DREAL ARA, ECMWF, Météo-France – Traitement : CD 73).

Les lignes pointillées correspondent aux tendances linéaires du rapport P/Q à deux périodes distinctes, à savoir 1950-1979 et 1980-2019.

3.2.1.3.3.2 Les débits moyens mensuels et leur répartition

Seul le débit du mois de janvier se caractérise par une légère tendance à la hausse au cours des 30 dernières années, allant de pair avec une élévation de la température et des précipitations qui tombent davantage sous forme de pluie et alimentent directement le débit du Chéran (Annexe 21, Figure 33).

La majorité des autres mois enregistre une baisse de débit, observable depuis 40 ans (notamment sur les mois printaniers).

- Les débits de printemps alimentés par la fonte de la neige culminent toujours au mois d'avril. Cependant, les moyennes mensuelles ont tendance à diminuer du fait de la moindre importance du manteau neigeux de ces dernières années liée à la hausse de la température de l'air.
- Le débit du mois d'octobre est aussi très marqué par une baisse qui peut s'expliquer par la conjugaison d'un déficit de précipitations à cette saison, amorcée depuis 1980, et d'une vidange plus rapide de la nappe d'accompagnement du Chéran, conséquence différée de sa moindre alimentation lors de la fonte d'un manteau neigeux plus réduit.

L'analyse de l'évolution des débits moyens mensuels depuis la décennie 1971-1980 jusqu'à la dernière (2011-2020) met en évidence ces tendances et appuie la récurrence des faibles débits au cours des deux dernières décennies (Figure 33).

On retiendra que la décennie 2011-2019 se caractérise par :

- un étiage estival qui s'amorce dès le mois de juin (puis très marqué sur la période juillet-septembre) et qui dure jusqu'au mois d'octobre,
- une légère augmentation des débits au cœur de l'hiver (décembre – janvier) du fait d'un regain de pluviométrie au cours de cette décennie en lieu et place de retombées sous forme de neige,

- et une tendance à la baisse des débits printaniers (avril, mai et juin) en lien avec une diminution du stock de neige constitué durant l'hiver.

Cette dernière distribution mensuelle des débits dessine petit à petit un glissement du régime hydrologique pluvio-nival du Chéran vers un régime pluvial.

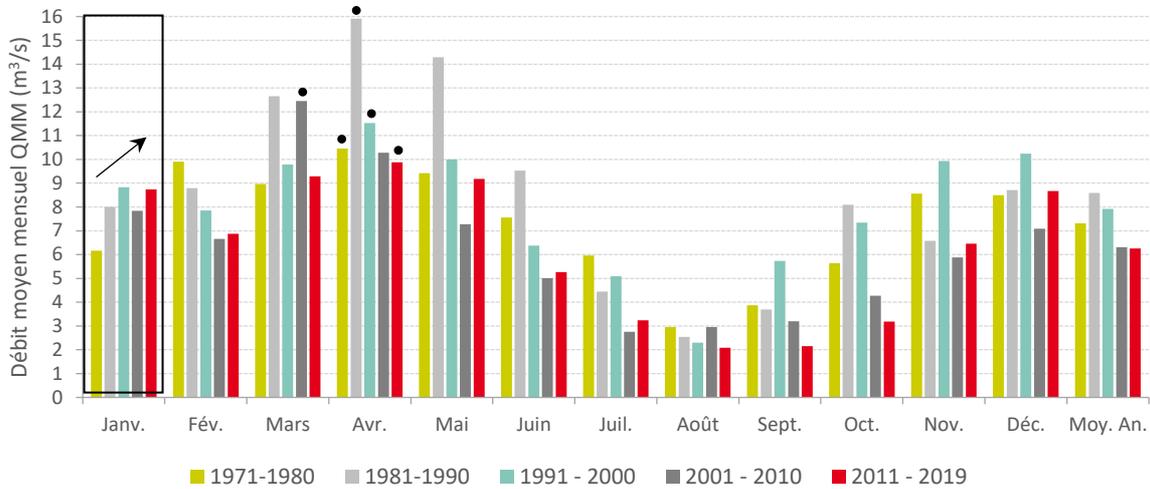


Figure 33 : Evolution par décennie des débits moyens mensuels du Chéran à Allèves (Crédits : DREAL ARA – Traitement : CD 73).

La flèche noire met l'accent sur l'augmentation croissante des débits du mois de janvier par décennie sur la période 1971-2019. Les points noirs désignent le mois du pic de fonte pour chaque décennie.

3.2.1.3.3.3 Les débits journaliers

L'étude des débits à l'échelle journalière permet d'appréhender la rigueur et l'étendue des étiages d'une part et les phénomènes de hautes eaux voire de crues d'autre part. La récurrence de ces phénomènes, leur intensité et leur durée sont des variables qui façonnent le milieu aquatique.

Les débits journaliers ont été traités pour faire apparaître le nombre de jours de dépassement des débits « seuil » (Figure 34, courbes) :

- les forts débits définis comme supérieurs à $30 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un débit de crue de retour annuel (le débit de référence d'une crue biennale est égal à $61,2 \text{ m}^3/\text{s}$),
- et les faibles débits inférieurs à $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ (valeur du QMNA5, soit le débit moyen mensuel qui ne se produit en moyenne qu'une année sur cinq).

Les débits de hautes eaux ($> 30 \text{ m}^3/\text{s}$) ressortent moins fréquemment depuis 2000 et tendent à se stabiliser autour de 6 jours par an en moyenne (Figure 34, somme des aires violette-bleue-grise). Entre 1965 et 1990, cette moyenne s'élevait à plus de 10 jours par an et des périodes humides apparaissaient clairement avec notamment des hautes eaux alimentées par la fonte de neige au printemps.

Ce constat pourrait être mis en relation avec la diminution du cumul de neige liée à l'élévation de la limite pluie-neige. Les hautes eaux printanières tendent à diminuer au profit d'écoulement hivernaux évoluant à la hausse (en janvier) mais sans pour autant dépasser ce débit seuil de $30 \text{ m}^3/\text{s}$.

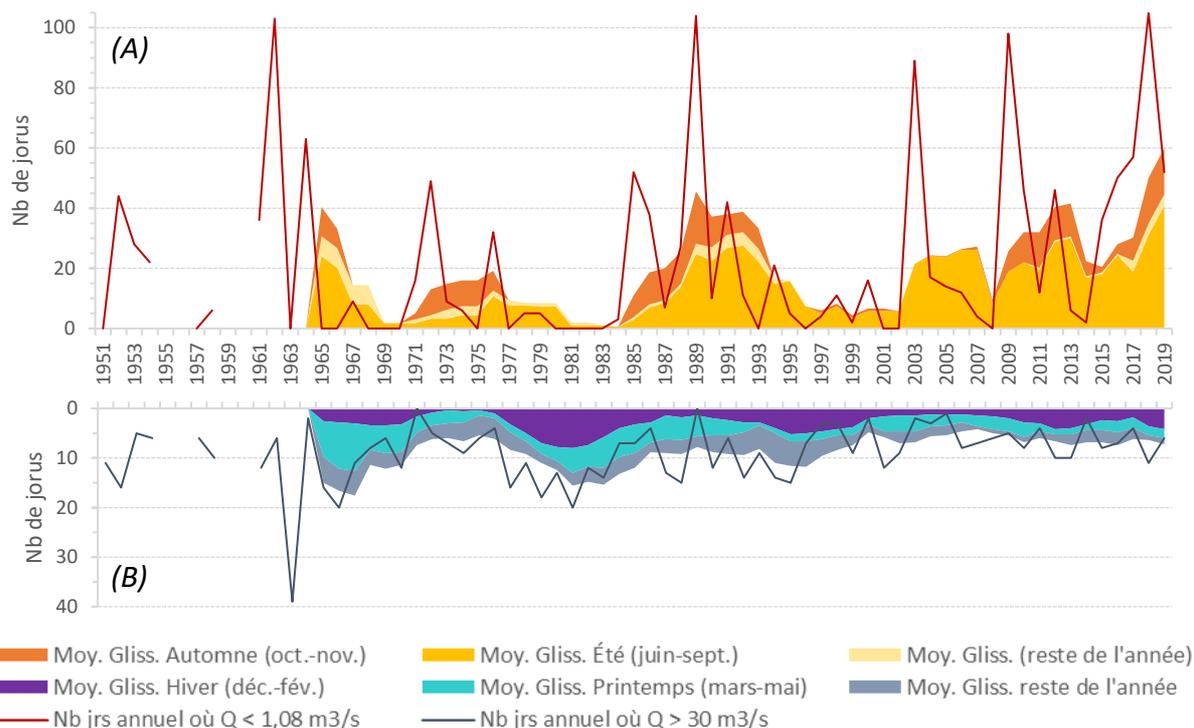


Figure 34 : Nombres de jours où le débit moyen journalier du Chéran à Allèves est (A) inférieur à $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ (= $QMNA_5^6$) et (B) supérieur à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit de référence de crue biennale = $61,2 \text{ m}^3/\text{s}$), en effectif brut annuel (courbe) et en moyennes glissantes sur 5 ans par saison (aires superposées) (Crédits : DREAL ARA – Traitement : CD 73).

La partie supérieure (A) décrit les conditions d'étiage ($Q < 1,08 \text{ m}^3/\text{s}$) du Chéran. Le nombre de jours par an où le débit du Chéran est inférieur à $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ est affiché grâce à la courbe rouge. Des pics (> 80 jours) rapprochés et successifs sont détectés au cours des 20 dernières années. La somme des surfaces colorées jaunes à oranges correspond à la moyenne glissante sur 5 ans de ce nombre de jours annuel où le débit est inférieur à $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$. A l'échelle annuelle, ce nombre de jours tend à augmenter de manière continue depuis 20 ans. Le découpage en saison (tons jaunes-orangés) montre que les nombres de jours d'étiage en été et en automne augmentent sur la période récente.

La démarche est similaire pour la partie inférieure (B) avec le nombre de jours de hauts débits (soit $Q > 30 \text{ m}^3/\text{s}$). La fréquence du nombre de jours de hautes eaux tend à diminuer depuis plus de 20 ans avec une part moins importante des hautes eaux printanières.

⁶ Le $QMNA_5$ est le débit (Q) mensuel (M) minimal (N) ayant la probabilité $1/5$ de ne pas être dépassée une année donnée. C'est la valeur du débit moyen mensuel qui ne se produit en moyenne qu'une année sur cinq. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage. Il est communément appelé « débit d'étiage quinquennal ». Cette valeur seuil donne une idée d'un débit d'étiage typique d'une année sèche.

L'examen de la Figure 35 illustre le fait qu'aucune évolution particulière ne se dégage sur l'intensité des crues du Chéran tout comme sur celle des précipitations maximales journalières sur le secteur des Bauges amont.

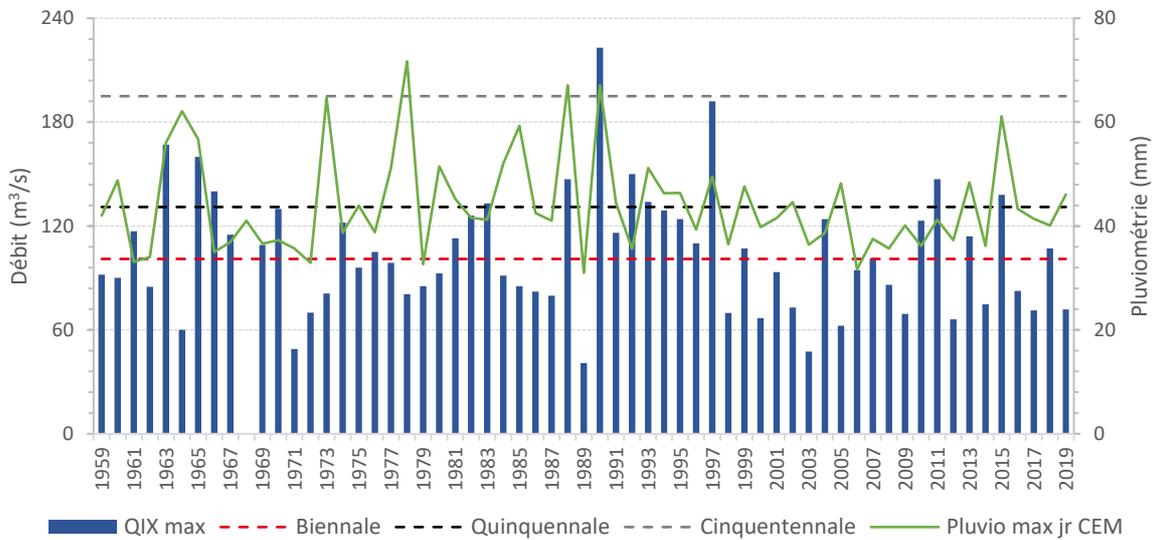


Figure 35 : Débits maxima instantanés annuels du Chéran à Allèves au cours de la période 1959 à 2019 mis en relation avec la pluviométrie maximale journalière annuelle modélisée sur la maille (20 x 30 km) WS 3016 (Bauges aval) par le ECMWF (Crédits : DREAL ARA, ECMWF - Traitement : CD 73).

En parallèle, le nombre de jours où le débit du Chéran est inférieur au QMNA₅ (soit < 1,08 m³/s) connaît un accroissement remarquable depuis les années 2000 et enregistre un record en 2018 (détrônant ceux de 1962 et 1989) (Figure 34 ; Figure 36). Ce sont clairement au cours et à la sortie de l'été que la durée des étiages tend à s'amplifier. Au cours de la dernière décennie, 11 % de l'année (soit plus d'un mois en cumulé) se caractérise par une situation de fort étiage contre 5 % (soit 19 jours cumulés) sur la période de référence 1961-1990. Cette augmentation de la sévérité de la période d'étiage se discerne également via les indices de débit moyen minimum sur plusieurs jours consécutifs (VCN₃₀, VCN₁₀, VCN₃) (Figure 37). Quelle que soit la longueur de la plage de calcul du débit minimum, ce dernier tend à diminuer drastiquement (de l'ordre de 0,08 m³/s par décennie) et n'enregistre plus de valeur supérieure à 2 m³/s depuis les années 90. Le niveau d'alerte est rencontré plus régulièrement. De plus, ces minima n'apparaissent plus en hiver depuis 1980 et se concentrent sur la période août-septembre, voire septembre-octobre pour la dernière décennie.

Les maxima thermiques se rencontrent entre le 1^{er} juin et le 15 août (du fait de la forte corrélation des températures de l'air et de l'eau). Le décalage dans le temps des minima hydrologiques allonge la période durant laquelle les conditions du milieu aquatique sont contraignantes pour les biocénoses. Cette période est devenue longue de presque 5 mois contre environ 3 mois auparavant (Figure 38).



Figure 36 : Le Chéran dans la plaine de la Compôte (Massif des Bauges) (A) en période normale (prise de vue le 10 avril 2015 à 10h ; débit = $8,8 \text{ m}^3/\text{s}^7$) et (B) en période d'étiage estival (prise de vue le 16 juillet 2018 à 16h ; débit = $1 \text{ m}^3/\text{s}$) (Crédits : SMIAC).

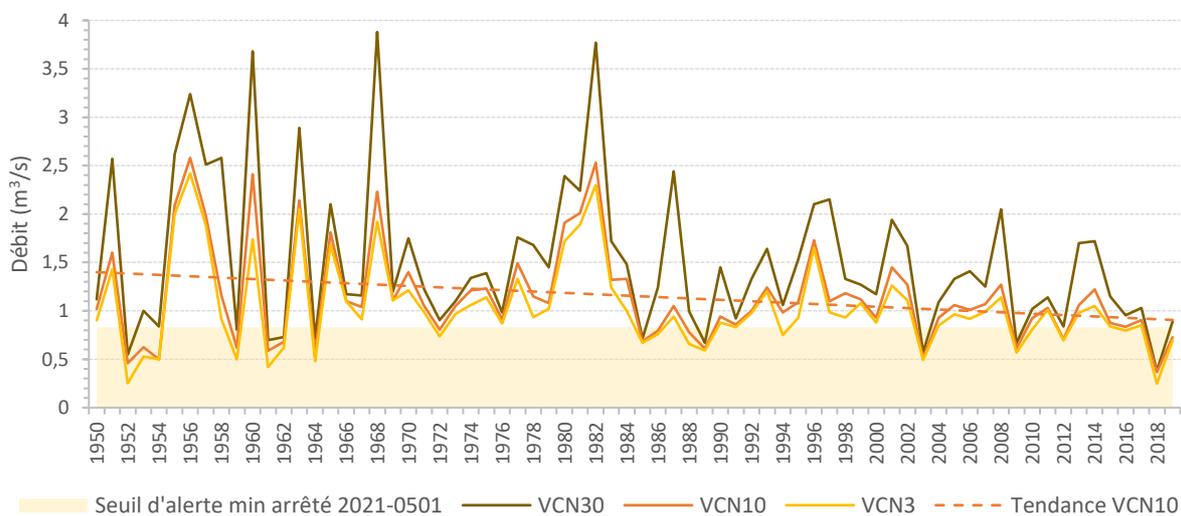
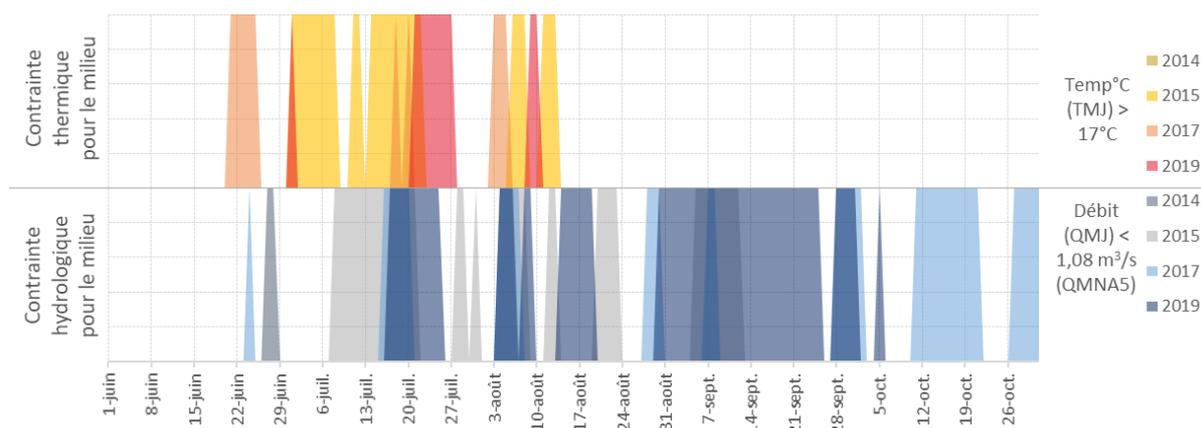


Figure 37 : Débit moyen minimum annuel sur 30 jours (VCN₃₀), sur 10 jours (VCN₁₀) et sur 3 jours (VCN₃) du Chéran à Allèves au cours de la période 1950-2019 (Crédits : DREAL ARA - Traitement : CD 73). La ligne pointillée orange correspond à la tendance linéaire du VCN₁₀ annuel sur la période 1950-2019. Le seuil d'alerte minimal défini pour le Chéran à Allèves dans l'arrêté préfectoral N° 2021-0501 est mentionné à titre indicatif. Il donne une notion d'un niveau bas où le milieu aquatique commence à être contraint.

⁷ Le module (ou débit moyen interannuel) du Chéran à Allèves est de $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (source : DREAL ARA).



À retenir sur l'évolution de l'hydrologie du Chéran

La station hydrologique du Chéran à Allèves, en activité depuis 1950 et implantée sur un bassin versant faiblement anthropisé, permet d'appréhender très directement l'impact des évolutions climatiques sur les ressources en eau en Savoie.

Pour ce cours d'eau d'altitude moyenne et de régime pluvio-nival, les tendances observées les plus marquantes sont les suivantes :

- une diminution de son débit moyen interannuel (module) de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ par décennie depuis 1980 (soit un débit spécifique de $3,4 \text{ l/s/km}^2/10 \text{ ans}$),
- un allongement important de la période de l'étiage estival qui s'initie précocement au mois de juin pour se clôturer plus tardivement au mois d'octobre,
- une augmentation de la sévérité des indices d'étiage (VCNx) depuis les années 90,
- et dans une moindre mesure une diminution de la fréquence des hautes eaux ($> 30 \text{ m}^3/\text{s}$) notamment au printemps sans pour autant discerner de tendance sur les événements de crue.

Ce premier travail exhaustif sur le Chéran a été ensuite décliné et présenté plus synthétiquement sur les autres points de mesure retenus pour caractériser l'évolution des ressources en eau superficielles dans un contexte de changement climatique, à savoir :

- le Fier à Dingy-Saint-Clair (Haute-Savoie),
- le Gelon à la Rochette,
- le Sierroz à Aix-les-Bains,
- l'Isère à Val d'Isère,
- l'Avérole à Bessans,
- et le Doron de Bozel à la Perrière.

3.2.1.3.4 Analyse du débit des autres cours d'eau d'altitude faible à moyenne

L'analyse sur le Chéran a permis de dégager de grandes tendances, qui se retrouvent aussi sur les 3 autres cours d'eau dont les bassins versants se développent, comme le Chéran, sur des altitudes faibles à moyennes (et en tout état de cause avec des superficies limitées au-dessus de 2000 m). Il s'agit donc de cours d'eau dont le régime est pluvial avec influence nivale secondaire, à savoir le Fier, le Gelon et le Sierroz.

3.2.1.3.4.1 Commentaire sur le cas spécifique du Fier à Dingy-Saint-Clair

Bien que situé en Haute-Savoie, le Fier à Dingy-Saint-Clair (Haute-Savoie) est particulièrement intéressant à considérer dans la mesure où sa chronique de données débute dès 1906 et offre une vision du débit d'un cours d'eau alpin sur la première moitié du XX^{ème} siècle. De plus, le Fier et le Chéran sont très similaires du point de vue hydrologique (altitude du bassin versant, contexte géologique, bassin versant voisin).

La Figure 39 fait apparaître conjointement les débits moyens annuels du Chéran et du Fier (exprimé en l/s/km² de bassin versant pour faciliter la comparaison) et met en exergue les grandes similitudes entre les deux cours d'eau. De très bonnes corrélations ont également pu être mise en évidence sur les débits mensuels de ces deux cours d'eau (Annexe 22).

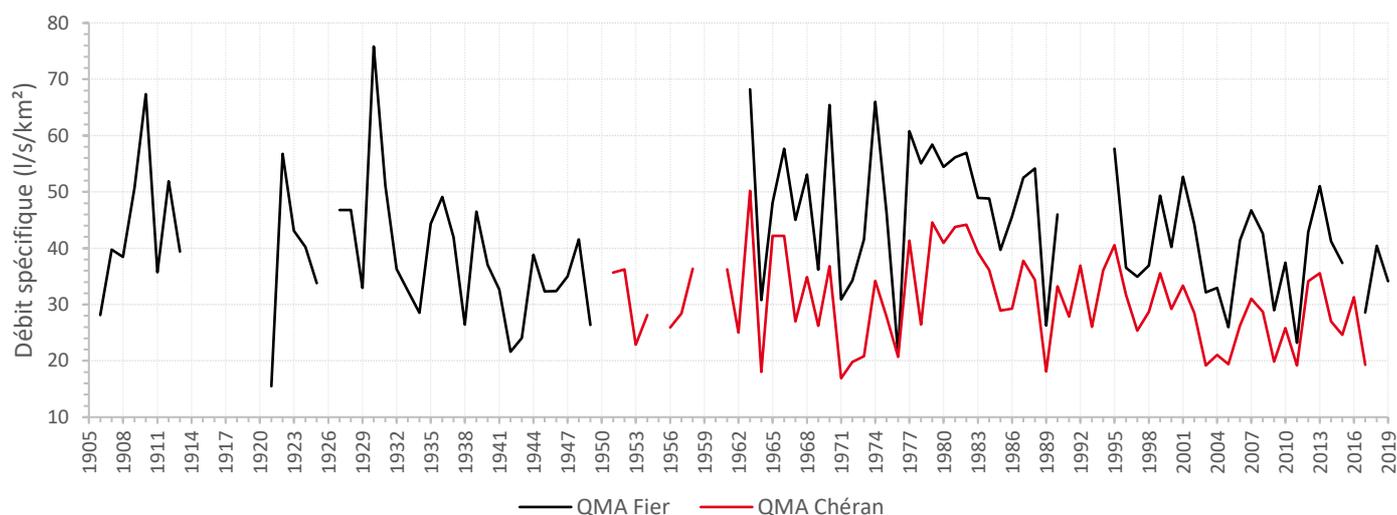


Figure 39 : Débits moyens annuels (QMA) du Fier à Dingy Saint Clair (74) et du Chéran à Allèves (73) sur la période 1905 – 2019 (Crédits : DREAL ARA – Traitement : CD 73).

En cela, la longue chronique de débits du Fier complète bien les informations hydrologiques obtenues avec celle du Chéran qui ne débute qu'à partir de 1950. Elle fournit une des rares possibilités qui nous sont offertes de pouvoir assez directement esquisser une contextualisation des données hydrométriques récentes vis-à-vis d'un passé plus lointain.

Toutefois, l'exploitation de ces données anciennes appelle un certain nombre de précautions et de recoupements préalables au regard de l'incertitude qui pèse sur leur fiabilité. Ces vérifications n'ont pas pu totalement être faites dans le cadre de la présente étude. Dans ces conditions, il n'est pas possible de tirer des enseignements sur les débits moyens annuels mesurés avant 1950. Il pourra ultérieurement être utile de tenter d'interpréter les faibles valeurs des débits moyens interannuels régulièrement observées entre 1930 et 1950, largement comparables aux valeurs actuelles qui ne seraient donc pas inédites.

En revanche, la répartition mensuelle des débits du Fier sur ces chroniques anciennes peut parfaitement être analysée (les débits mesurés étant alors exploités en valeur relative et non plus en valeur absolue). Ils se révèlent effectivement porteurs d'enseignements.

3.2.1.3.4.2 Les débits annuels et la répartition des débits mensuels

Les constats observés sur le Chéran se retrouvent sur les 3 cours d'eau du Fier, du Gelon et du Sierroz : leurs débits moyens annuels enregistrent tous une baisse à partir de 1980 d'environ 10 % par décennie (soit environ 40 % au total entre 1980 et 2019) (Annexe 23). Depuis cette date, l'alternance des cycles humides et secs est moins évidente et les années sèches se répètent régulièrement.

A l'échelle des débits mensuels, des observations marquantes ressortent des valeurs mesurées sur le Fier dans la 1^{ère} moitié du 20^e siècle.

Les températures plus basses de ces années d'avant-guerre déterminent un étiage hivernal beaucoup plus marqué qu'aujourd'hui (même s'il reste secondaire par rapport à l'étiage estival). L'évolution des débits moyens des mois de janvier illustre la tendance nette à la hausse des débits sur cette période hivernale, ceci témoignant d'une moindre importance des phénomènes de rétention liés à l'enneigement du bassin versant (Figure 40).

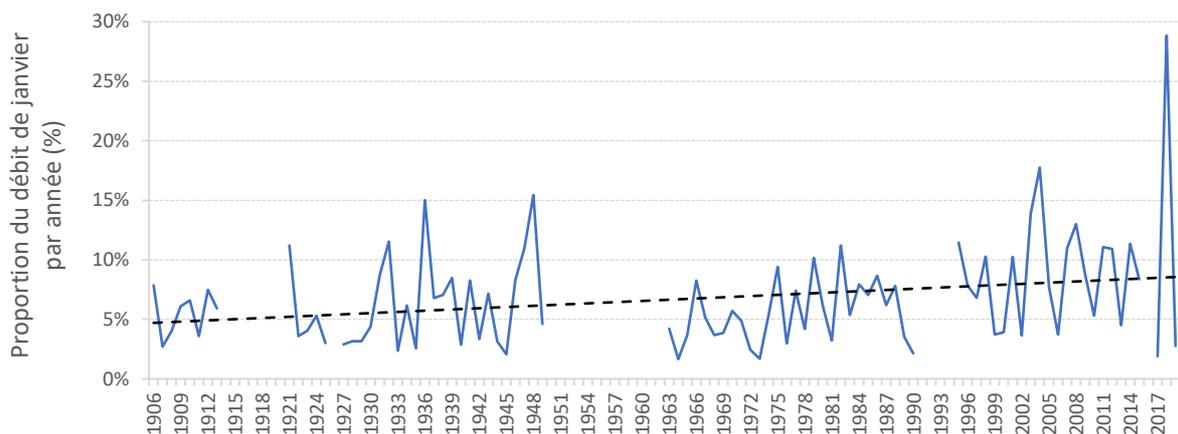


Figure 40 : Pourcentage que représente le débit du Fier à Dingy-Saint-Clair au mois de janvier sur l'année au cours de la période 1906 – 2019 (Crédits : DREAL ARA– Traitement : CD 73).

3.2.1.3.4.3 Etiage estival

Pour les 3 cours d'eau (Fier, Gelon, Sierroz), l'étiage estival s'est accentué au cours des deux dernières décennies en sévérité et en durée (Figure 41 et Figure 42), plaçant régulièrement et pour plusieurs mois les milieux aquatiques dans une situation très critique.

La Figure 41 met en évidence que ces cours d'eau ont perdu 30 % à 50 % de leur débit moyen sur la période juin à octobre au cours des 40 dernières années.

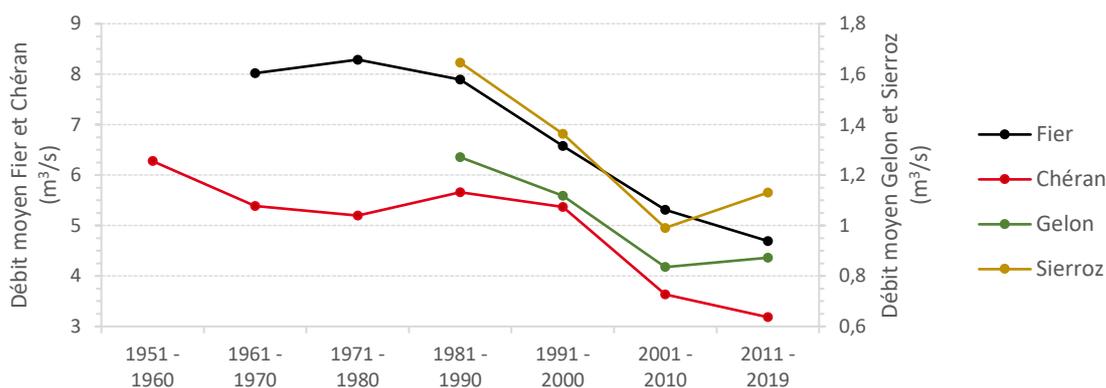


Figure 41 : Débits moyens calculés sur la période juin-octobre (étiage estival) par décennie définis pour le Fier à Dingy-Saint-Clair, le Chéran à Allèves, le Gelon à la Rochette et le Sierroz à Aix-les-Bains sur la période 1951 – 2019 (Crédits : DREAL ARA – Traitement : CD 73).

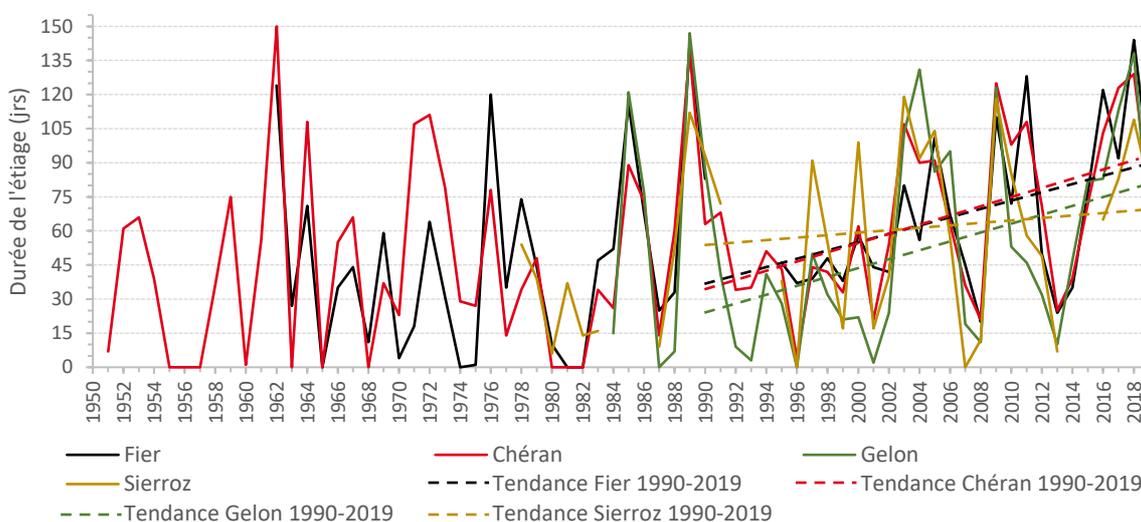


Figure 42 : Durée de l'étiage définie pour le Fier à Dingy-Saint-Clair, le Chéran à Allèves, le Gelon à la Rochette et le Sierroz à Aix-les-Bains sur la période 1950 – 2019 (Crédits : DREAL ARA – Traitement : CD 73).

La durée de l'étiage est la durée annuelle sous le seuil de bas débit = $q_{15\%}$ (définition selon Giuntoli & Renard, 2009). Les lignes pointillées correspondent à la tendance linéaire de la durée d'étiage sur la période 1990-2019 pour chacun des 4 cours d'eau.

Nous assistons sur la dernière décennie à une hausse du nombre de jours où le débit est inférieur au QMNA₅ (débit mensuel minimal atteint en moyenne une année sur cinq), notamment sur la période juin-septembre. Sur les 5 dernières années, cette situation de faible débit est observée en moyenne durant un à deux mois en cumulé annuel suivant les cours d'eau (Annexe 24). En cela, la période récente est inédite au regard d'autres périodes « sèches » antérieures.

Avant les années 90, l'étiage estival se concentrait sur les mois d'août et septembre, voire juillet. Au cours des 20 dernières années, elle s'est progressivement allongée jusqu'au mois d'octobre. Les cours d'eau ont « gagné » un mois d'étiage à l'échelle annuelle en 20 ans (Figure 42). Pour certains cours d'eau (Gelon et Fier), le débit du mois d'octobre est devenu quasiment aussi bas que celui des mois d'août et septembre (Annexe 25). La tendance de l'augmentation de la durée d'étiage est moins marquée pour le Sierroz (+ 10 jours en 20 ans).

Ce constat est toutefois moins robuste du fait du manque de données au début des années 90 (Figure 42).

Cette augmentation de la sévérité et de la durée de l'étiage estival peut être approchée de manière conjointe grâce aux indices de débits minima sur plusieurs jours consécutifs. Ces derniers montrent une même tendance à la baisse depuis les années 90 pour les cours d'eau sous influence pluviale et nivale (Annexe 26).

3.2.1.3.4.4 Etiage hivernal

Pour les cours d'eau subissant l'influence de la neige (Fier, Chéran, Gelon), la dernière décennie se caractérise par un débit hivernal plus abondant (essentiellement sur les mois de décembre et janvier) à mettre en lien avec des précipitations sous forme de pluie du fait d'un réchauffement global. Ainsi, l'étiage hivernal se révèle nettement moins sévère qu'auparavant voire à peine marqué (Annexe 25). Ce constat est également bien traduit par une légère hausse de l'indice de débit minimum sur 10 jours consécutifs (VCN 10) du mois de janvier pour les cours d'eau sous influence nivale (Annexe 27).

3.2.1.3.4.5 Fonte printanière

Malgré la hausse des températures et la diminution du manteau neigeux, les hydrogrammes des cours d'eau étudiés ne montrent pas de fonte précoce printanière. Le pic de débit de fonte se situe toujours au mois d'avril ou mai suivant les cours d'eau et les décennies, même s'il est de moindre importance par rapport à celui des années 80 et 90 (Annexe 25 et Figure 33).

Les débits moyens journaliers de hautes eaux (retour annuel) sont globalement moins fréquents depuis les années 2000 que par le passé (Annexe 24). Ceci s'explique essentiellement par la diminution des hauts débits printaniers, en particulier pour les cours d'eau sous influence nivale, du fait de la réduction de la couche de neige. Par contre, les événements de crue restent bien présents avec des niveaux similaires à ceux rencontrés précédemment (Annexe 28).

À retenir sur l'évolution hydrologique des autres cours d'eau d'altitude faible à moyenne

Les résultats obtenus pour l'ensemble des cours d'eau d'altitude faible à moyenne partiellement influencé par la neige, confirment les observations précédentes relevées pour le Chéran.

- Depuis 1980, le module de ces cours d'eau enregistre une baisse d'environ 10 % par décennie.
- Depuis 1980, la période de très basses eaux à l'échelle annuelle a augmenté de 1 à 2 mois pour les cours d'eau sous influence nivale et de moins d'un mois pour les cours d'eau de régime pluvial. L'étiage estival est plus sévère (perte de 30 % à 50 % du débit sur la période juin-septembre en 40 ans).
- L'étiage hivernal est moins marqué que par le passé et les hautes eaux (surtout printanières) sont moins fréquentes en lien avec la réduction du manteau neigeux.
- A ce stade, aucune évolution du régime des crues n'est détectée.

3.2.1.3.5 Analyse du débit des cours d'eau de montagne de haute altitude

Les cours d'eau dits montagneux sont situés plus à l'Est du département, sur les bassins versants de l'Isère amont et de l'Arc amont. Leurs bassins versants se développent jusqu'à de hautes altitudes, voisines ou supérieures de 2000 m.

Les débits de ces cours d'eau sont de manière presque systématiquement très largement modifiés par les aménagements hydroélectriques. Les stations hydrologiques existantes mesurent donc le plus souvent des débits dits influencés rendant ainsi extrêmement délicat, voire impossible, l'analyse des évolutions hydrologiques en lien avec le changement climatique.

La Figure 43 présente à titre d'illustration l'influence combinée des grands aménagements hydroélectriques de Tarentaise (Chaîne du Chevril et aménagement de la Coche), du Beaufortain (Roseland, Girotte ...) et de Maurienne (Chaîne du Mont Cenis) sur les débits mensuels de l'Isère à Pont Royal.

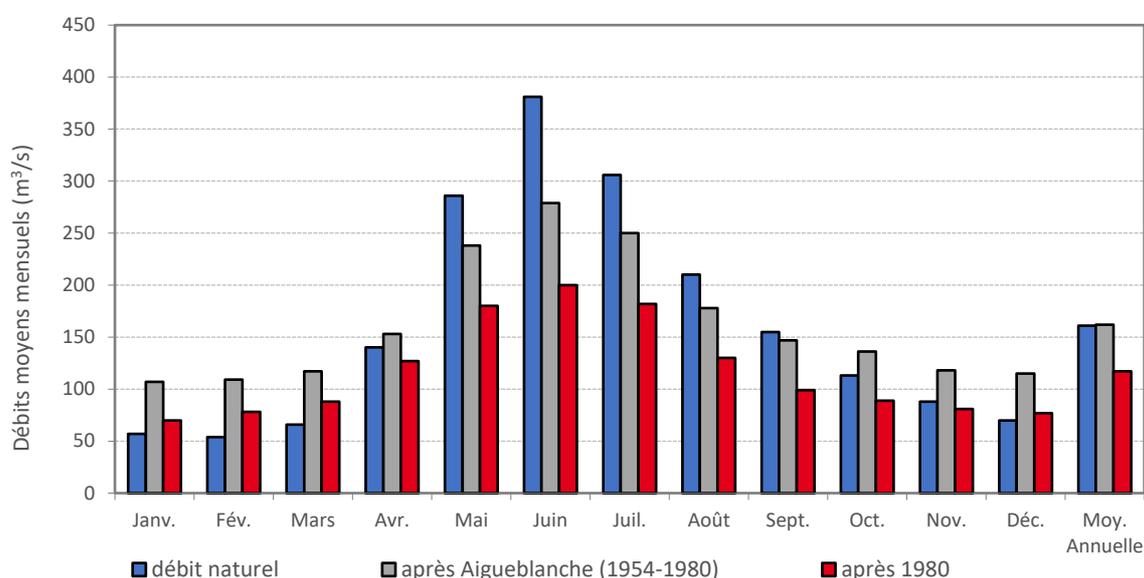


Figure 43 : Débit naturel de l'Isère à Pont Royal (commune de Chamousset) avant 1950 (débit naturel) et débits influencés par les ouvrages hydroélectriques à différentes périodes (Crédits : EDF REH Alpes Nord (1972)).

Sur l'ensemble des stations hydrologiques existantes, seules trois d'entre elles sont susceptibles d'être exploitées aux fins de la présente étude (voir leur localisation à la Figure 30) :

- Celle de l'Isère à Val d'Isère mesure le débit « naturel » du cours d'eau. Elle est située en amont de Val d'Isère et draine un bassin versant relativement naturel, bordé de glaciers. L'impact anthropique sur le débit de l'Isère en ce point est considéré comme négligeable. Seuls les 10 premiers kilomètres de son cours (du glacier des Sources de l'Isère à la confluence avec le Ruisseau de la Calabourdane) bénéficient d'un écoulement naturel.
- Celle de l'Avérole à Bessans est largement influencée par les dérivations hydroélectriques mais peut toutefois être exploitée dans la mesure où les services gestionnaires mettent à disposition les débits naturels reconstitués de 1969 jusqu'en 2016. L'Avérole est un torrent glaciaire qui coule dans une vallée très rurale où seuls

quelques hameaux témoignent de l'activité humaine. Il naît de la jonction du Torrent de la Lombarde et du Ruisseau du Veilet qui sont tous deux captés à plus de 2000 m d'altitude pour alimenter le lac du Mont-Cenis.

- Celle du Doron de Bozel à la Perrière est également sous influence de plusieurs aménagements hydroélectriques situés sur les Dorons de Champagny, de Pralognan, de Bozel et le Torrent de la Rosière. Comme pour l'Avérole, les débits naturels reconstitués sont fournis à partir de 1948 mais jusqu'en 2003 uniquement.

3.2.1.3.5.1 Les débits moyens annuels

La chronique de débit de l'Isère à Val d'Isère débute en 1948. Elle permet donc d'avoir une courte référence de débit antérieure à la période de référence climatique 1961-1990 tout comme celle du Chéran à Allèves.

L'Isère à Val d'Isère et l'Avérole à Bessans laissent entrevoir une légère baisse de leur module à partir de 1980, en moyenne 0,1 m³/s par décennie, soit 5 % de leur module par décennie (Figure 44). En débit spécifique, cela correspond à une baisse moyenne de 2,2 l/s/km²/10 ans, soit environ 1/3 inférieure à celle du Chéran. Ce constat va de pair avec la diminution (de moitié) de la fréquence du nombre de jours de forts débits (notamment en période estivale) (Annexe 29).

Une évolution similaire semble apparaître pour le Doron de Bozel à la Perrière : sur la période récente 1980-2003, baisse du débit moyen annuel de l'ordre de 0,8 m³/s par décennie, soit en débit spécifique une baisse de l'ordre de 2,6 l/s/km²/10 ans. Cette diminution sur la période récente se révèle être du même ordre de grandeur que celle de l'Isère à Val d'Isère (2,5 l/s/km²/10 ans).

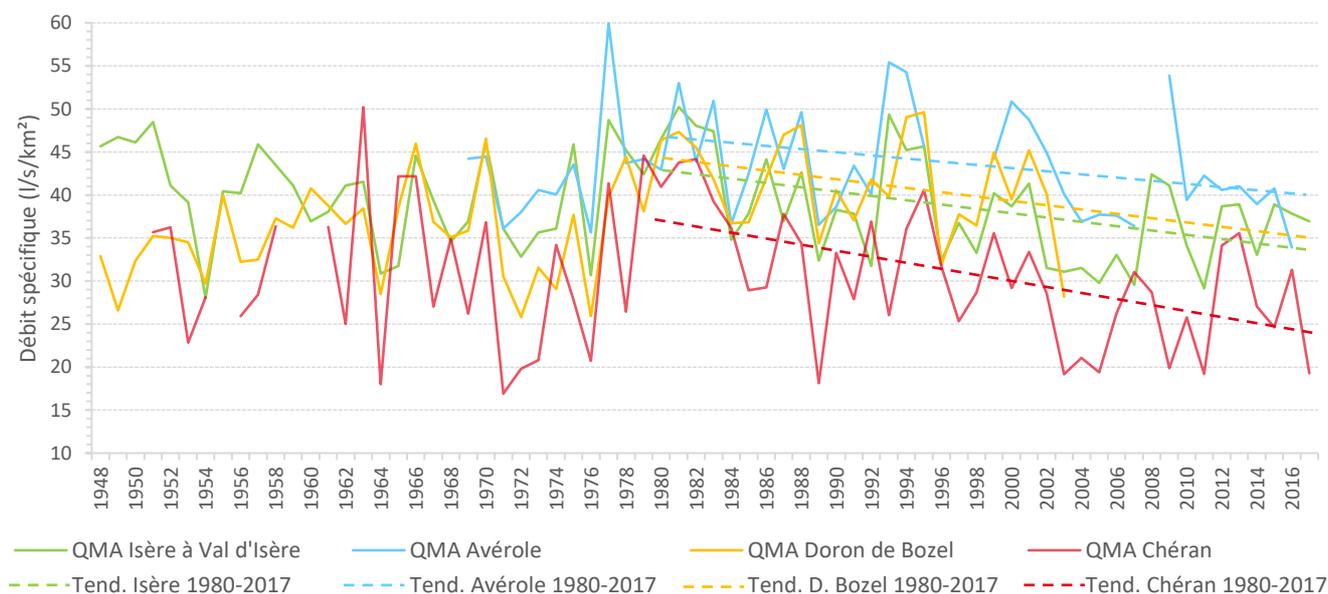


Figure 44 : Débits moyens annuels de l'Isère à Val d'Isère, de l'Avérole à Bessans, du Doron de Bozel à Perrière comparés à ceux du Chéran à Allèves sur la période 1948-2017 pour la plus longue chronique et 1970-2016 pour la plus courte (Crédits : EDF, DREAL ARA – Traitement : CD 73).

Les lignes en tireté correspondent aux tendances linéaires des débits moyens annuels de chaque cours d'eau sur la période 1980-2017.

3.2.1.3.5.2 Répartition annuelle des débits

Les évolutions des débits moyens mensuels montrent majoritairement une période de fonte estivale plus précoce et plus rapide en lien avec la hausse des températures. Les débits moyens des mois d'avril à juin ont tendance à augmenter tandis que ceux de juillet à septembre accusent une baisse (Figure 45).

Le pic de hautes eaux dans la répartition des débits mensuels est avancé d'un mois et a lieu en juin à la place de juillet. Pour l'Isère à Val d'Isère, ce pic de fonte en juin avait déjà été connu avant 1961 (Figure 46). Cependant à cette époque les débits estivaux (juillet à septembre) étaient plus élevés, induits par la fonte d'un manteau neigeux plus abondant. Ainsi la période de moyennes eaux était plus soutenue avant le retour à l'étiage hivernal. A l'échelle mensuelle, l'étiage hivernal est resté homogène sur tous les secteurs d'étude au cours des différentes périodes avec des débits stables et bas de novembre à avril.

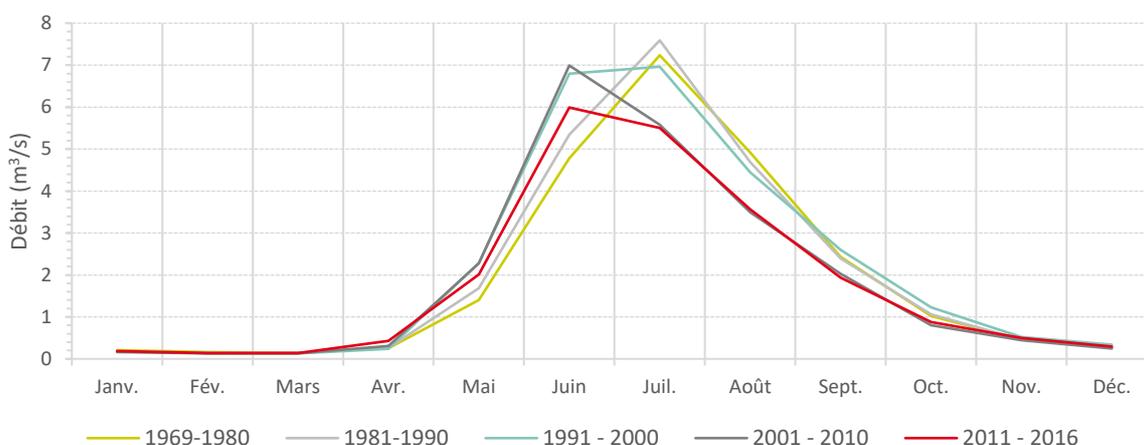


Figure 45 : Débits moyens mensuels par décennie de l'Avèrole à Bessans (Crédits : EDF – Traitement : CD 73).

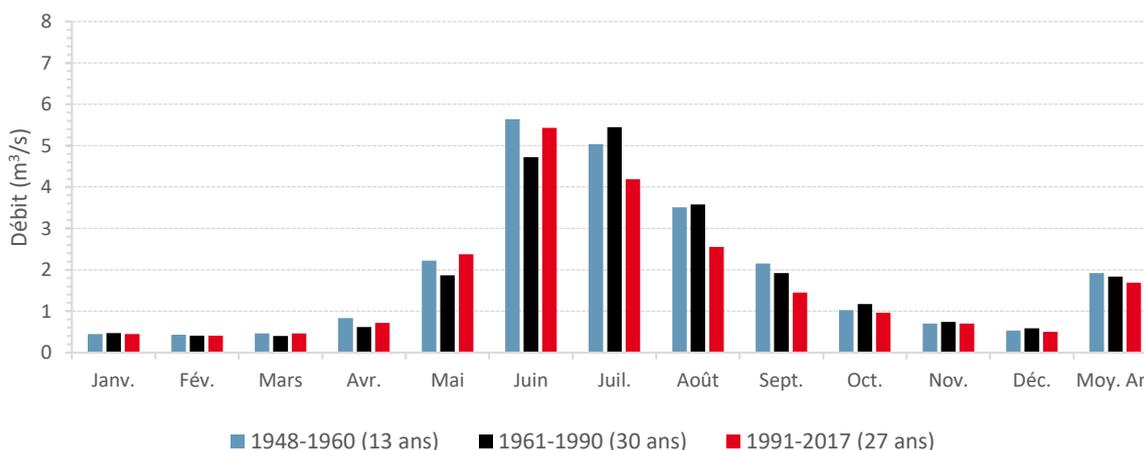


Figure 46 : Débits moyens mensuels de l'Isère à Val d'Isère pour 3 périodes distinctes, avant 1961, 1961-1990 (période de référence climatique) et 1991-2017 (période récente sous l'influence du changement climatique) (Crédits : EDF – Traitement : CD 73).

La répartition des débits mensuels du Doron de Bozel est présentée en Annexe 30. Toutefois, l'absence de données après 2003 ne permet pas de tirer de conclusion saillante.

À retenir sur l'évolution de l'hydrologie des cours d'eau de montagne de haute altitude

Les cours d'eau principaux des bassins versants de montagne sont majoritairement influencés par les aménagements hydroélectriques. De fait, les données exploitables aux fins de l'étude sont très limitées et se concentrent sur l'Isère à Val d'Isère et l'Avérole à Bessans.

Les tendances observées sont les suivantes :

- Depuis 1980, leur module (ou débit moyen interannuel) amorce une baisse plus faible qu'en plaine (en moyenne 2,3 l/s/km² par décennie).
- La période de fonte est plus précoce et moins étendue en lien avec la hausse des températures et la diminution du manteau neigeux.
- L'étiage hivernal est resté stable.

SYNTHESE de l'évolution des débits des cours d'eau de Savoie

Les évolutions climatiques et en particulier la hausse des températures se ressentent sur l'écoulement des cours d'eau de manière différente en fonction de leur régime hydrologique. Les grandes tendances relevées au cours des quatre dernières décennies sont classées par régime hydrologique et saison dans le Tableau 3

Tableau 3 : Bilan par régime hydrologique et par saison des tendances décelées sur l'évolution des débits des cours d'eau savoyards peu influencés par les activités humaines depuis 1980.

	Module	Printemps	Été - Automne	Hiver
Cours d'eau sous influence pluviale <i>Ex. : le Sierroz à Aix-les-Bains</i>	baisse d'environ 10 % par décennie	baisse des débits de la fréquence des hautes eaux du fait d'une réduction du manteau neigeux	étiage plus sévère et plus long (qui se prolonge jusqu'en début d'automne)	augmentation des débits et de la fréquence des hautes eaux du fait de la réduction de la rétention nivale en lien avec la hausse des températures de l'air
Cours d'eau sous influence nivale <i>Ex. : le Chéran à Allèves</i>				
Cours d'eau sous influence glaciaire <i>Ex. : l'Isère à Val d'Isère</i>	baisse modérée	hausse des débits et de la fréquence des hautes eaux liée à une fonte précoce	fonte précoce dont le pic intervient en juin (au lieu de juillet par le passé) baisse des débits et de la fréquence des hautes eaux	plus de jours de fort étiage

3.2.1.4 Bilan sur la température de l'eau des cours d'eau savoyards

3.2.1.4.1 Evolution de la température de l'eau à l'échelle des Alpes du Nord

L'évolution de la température des rivières en Suisse durant les 50 dernières années a été étudiée à partir de 52 stations de mesures (Michel *et al.*, 2021). Un réchauffement moyen des cours d'eau de 0,33°C par décennie a été constaté sur la période de 1979 à 2018, et de 0,37°C par décennie en moyenne durant la période de 1998 à 2018. Cela correspond environ à 90 % de la hausse de la température moyenne de l'air sur la période correspondante. En lien avec le réchauffement atmosphérique marqué en été (canicules successives au cours des dernières années), l'analyse a mis en évidence un réchauffement de l'eau plus important en été qu'en hiver. Les bassins versants alpins sont pourtant plus préservés des températures estivales extrêmes du fait de l'apport d'eau froide générée par la fonte des glaciers et de la neige résiduelle ou des rejets d'eaux froides à basse altitude lors du turbinage des réservoirs d'accumulation des usines hydroélectriques situés en altitude.

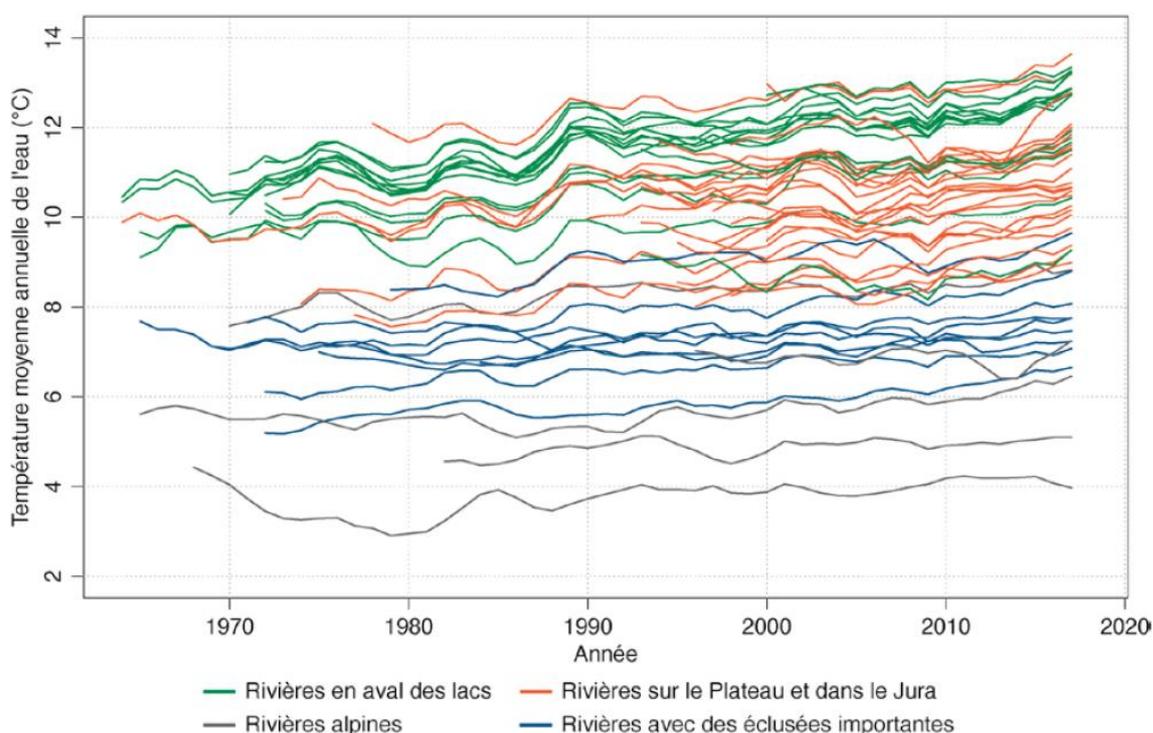


Figure 47 : Évolution passée des moyennes annuelles des températures mesurées en fonction du type de rivière (Source : Michel *et al.*, 2021).

Un lissage centré de trois ans est appliqué afin de gommer la variabilité interannuelle.

Une étude de la thermie du Rhône a été réalisée sur la période 2000-2015 par EDF en collaboration avec de nombreuses équipes scientifiques et sous la direction d'un comité réunissant plusieurs institutions⁸.

Ce suivi thermique, initié par l'État pour évaluer l'impact environnemental des rejets thermiques des Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE), a conduit à mieux

⁸ Le comité de pilotage de l'étude thermique du Rhône 2000-2015 réunissait l'État, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'ONEMA (aujourd'hui OFB), l'Agence Régionale de Santé Rhône-Alpes, l'Agence de Sûreté Nucléaire, Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et EDF.

comprendre la dynamique thermique du fleuve sous l'influence du changement climatique et de caractériser les évolutions de la faune aquatique des 30 dernières années.

Sur la période 1920-2010, la température moyenne annuelle de l'eau du Rhône a subi une nette augmentation de 0,4 °C à 2,1°C avec des maxima sur le Bas Rhône (à Aramon dans le département du Gard et Tricastin dans le département de la Drôme) et sur la Saône (Duvert *et al.*, 2014) (Figure 48). Cette augmentation est plus marquée pour les mois d'été et peut atteindre un maximum de 3,5°C en août à Aramon. L'intégralité de la hausse provient de la période récente 1987-2010 (avec un record en 2003), pendant laquelle les rejets thermiques des CNPE, le réchauffement des températures de l'air et d'autres facteurs anthropiques (prélèvements, aménagements du fleuve...) ont été à l'origine de ce réchauffement des températures du Rhône.

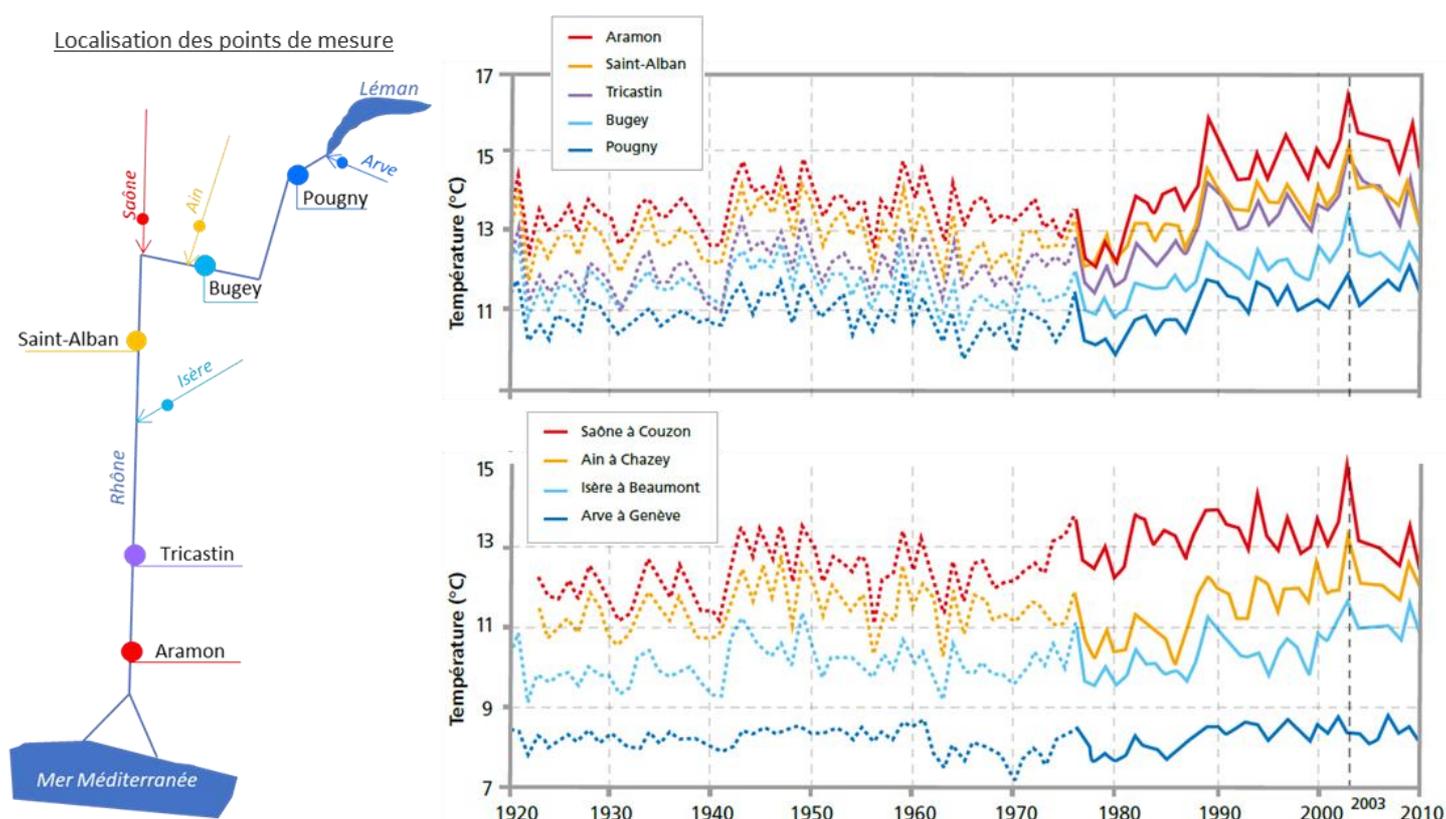


Figure 48 : Température moyenne annuelle du Rhône en différents points de son cours et de quelques principaux affluents sur la période 1920-2010 (Crédits : EDF). Les données sur la période 1920 - 1976 sont reconstituées par modélisation tandis que celles de la période 1977 - 2010 sont mesurées.

3.2.1.4.2 Evolution de la température de l'eau dans les cours d'eau de Savoie

3.2.1.4.2.1 Méthodologie du suivi de la température de l'eau en Savoie

Depuis le dernier état des lieux départemental des ressources en eau en Savoie en 2012 (Paccard *et al.*, 2012), le territoire savoyard est maintenant doté d'un observatoire thermique des cours d'eau. Ce dernier, mis en place depuis 2010 par la Fédération de Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique (FSPMA), compte 27 stations de mesure pérennes (Figure 49). Il peut être complété sur certains secteurs par des réseaux déployés par

des syndicats ayant la compétence GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations), comme sur le bassin versant du Chéran (11 stations en Savoie gérées par le SMIAC – Syndicat Mixte du Chéran). Les enregistreurs ont été disposés de manière à caractériser la diversité des situations observables sur le réseau hydrographique savoyard (typologie de cours d'eau, régime hydrologique, écoulement influencé...).

Au total, 41 stations sont aujourd'hui en place :

- 27 par le FDSSPP
- 11 par le SMIAC
- 3 par le CISALB (bassin du lac du Bourget)

La température est enregistrée au pas de temps horaire par des enregistreurs immergés (modèle *Hobo Pendant/Temp*) à l'année dans les cours d'eau. Un téléchargement des données et une maintenance des enregistreurs sont effectués régulièrement (une à deux fois par an). Des indicateurs classiques et spécifiques à la gestion piscicole sont calculés à partir d'une macro Excel MACMASalmo1.0 (Dumoutier, Vigier & Caudron, 2010) et bancarisés par station.

Dans le cadre de cette étude, pour être représentatives au maximum de la décennie 2010-2019, seules les stations ayant au minimum 5 années de suivi ont été considérées et analysées (soit 26 stations, Figure 49).

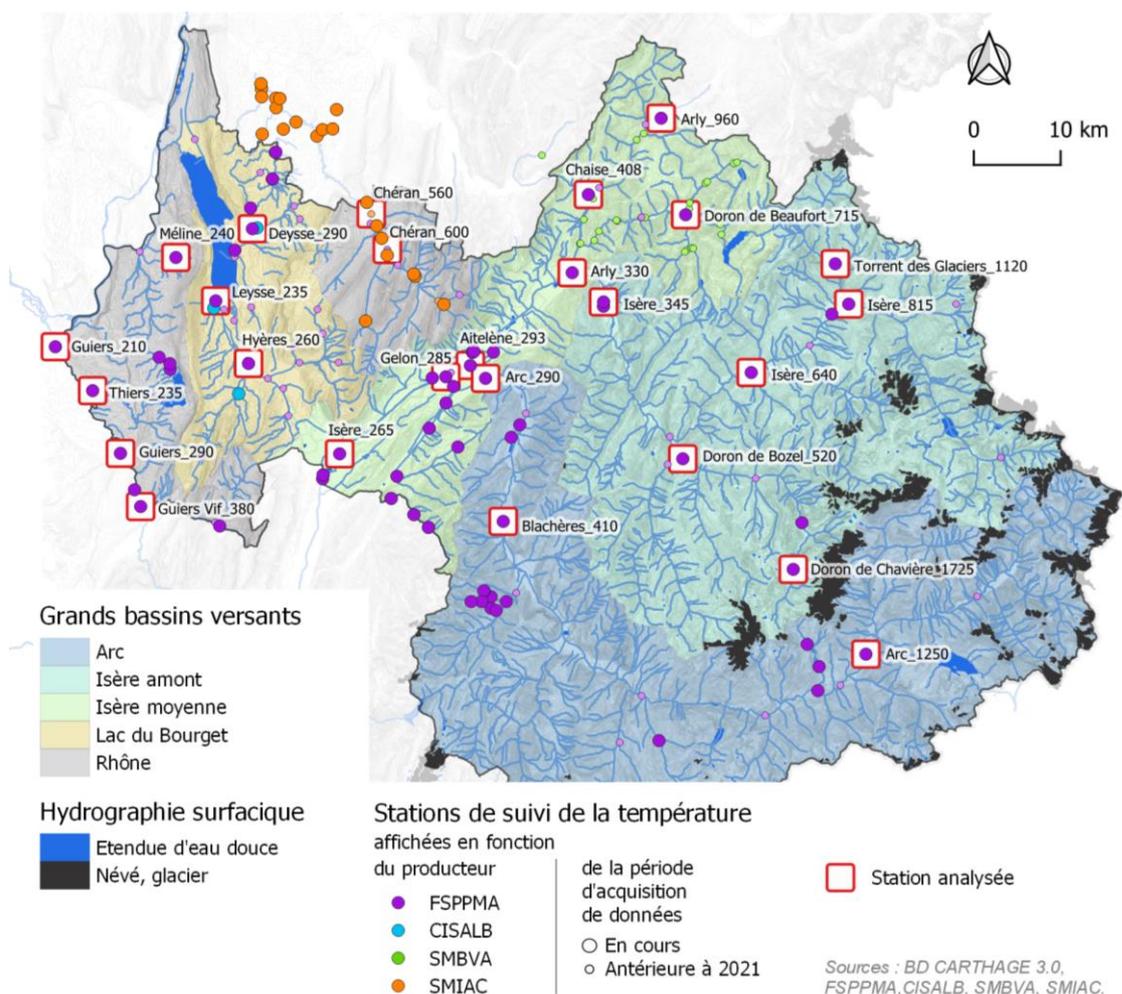


Figure 49 : Localisation des stations du suivi de la température de l'eau existantes à l'échelle départementale et retenues pour l'analyse (Traitement : CD 73).

3.2.1.4.2.2 Résultats observés sur la période suivie 2010-2019

Les données de température de l'eau en Savoie couvrent uniquement la dernière décennie qui est la plus chaude enregistrée jusqu'à maintenant pour la température de l'air. Nous ne bénéficions d'aucune référence antérieure mais les indicateurs sur ces 10 ans de chronique livrent déjà des tendances qui restent à confirmer à l'avenir.

Sur la période 2010-2019, la température moyenne annuelle de l'eau des cours d'eau de Savoie a augmenté en moyenne de 0,5°C (Figure 50). Cette augmentation s'explique surtout par une hausse des températures estivales de l'eau.

L'indicateur de la moyenne des températures de l'eau des 30 jours consécutifs les plus chauds enregistre notamment une augmentation d'environ 1°C à l'échelle départementale. Cette période, la plus chaude, se situe suivant les cours d'eau et les années, entre le mois de juin et le mois d'août, sans tendance à apparaître plus précocement. Cette variable identifie, pour le milieu et la faune aquatique, la période la plus chaude de l'année et donc la plus contraignante. La température de l'eau est un facteur prépondérant dans la répartition des espèces piscicoles. Cette variable des 30 jours consécutifs les plus chauds permet d'établir un diagnostic de l'état thermique d'un cours d'eau et de définir les cortèges piscicoles les plus à même d'y vivre dedans (selon la formulation de Verneaux (1973, 1976)).



Figure 50 : Ecart à la moyenne interannuelle (2010-2019) de la température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (Moy 30 jrs max) et de la température moyenne annuelle (TMA) des cours d'eau de Savoie (Crédits : FSPMA, SMIAC - Traitement : CD73).

Un second indicateur est constitué par la séquence maximale durant laquelle la température de l'eau ne descend pas en dessous de 15°C ($T \geq 15^\circ\text{C}$). Il est caractéristique de la période estivale et synonyme de l'état sanitaire des cours d'eau. Il montre une tendance à la hausse pour les cours d'eau de plaine (altitude < 400 m) et de régime hydrologique pluvial (Figure 51). En 10 ans sur ces secteurs, la séquence maximale $T \geq 15^\circ\text{C}$ a tendance à augmenter de plus d'un mois (990 h).

Cet indicateur est utilisé en gestion piscicole pour évaluer les potentialités du milieu à influencer le développement de la Maladie Rénale Proliférative (MRP ou PKD en anglais Proliférative Kidney Disease), maladie qui affecte les jeunes salmonidés et peut entraîner de fortes mortalités. Une température de l'eau supérieure à 15°C pendant 15 jours consécutifs

(soit 360 h) favorise le développement et la propagation du pathogène *Tetracapsula bryosalmonae* responsable de la maladie (Dumoutier, Vigier & Caudron, 2010). Les cours d'eau suivants où le risque de développement de la MRP est avéré, arborent des populations de truite fario déstructurées : la Leysse aval, la Deysse, ou la Méline en aval des lacs de Chevelu (Proner & Mevel, 2020). Le Guiers aval et le Thiers, dont la thermie globale est élevée, accueillent des peuplements cyprinicoles. Les conditions du milieu y sont défavorables pour le développement de la truite fario.

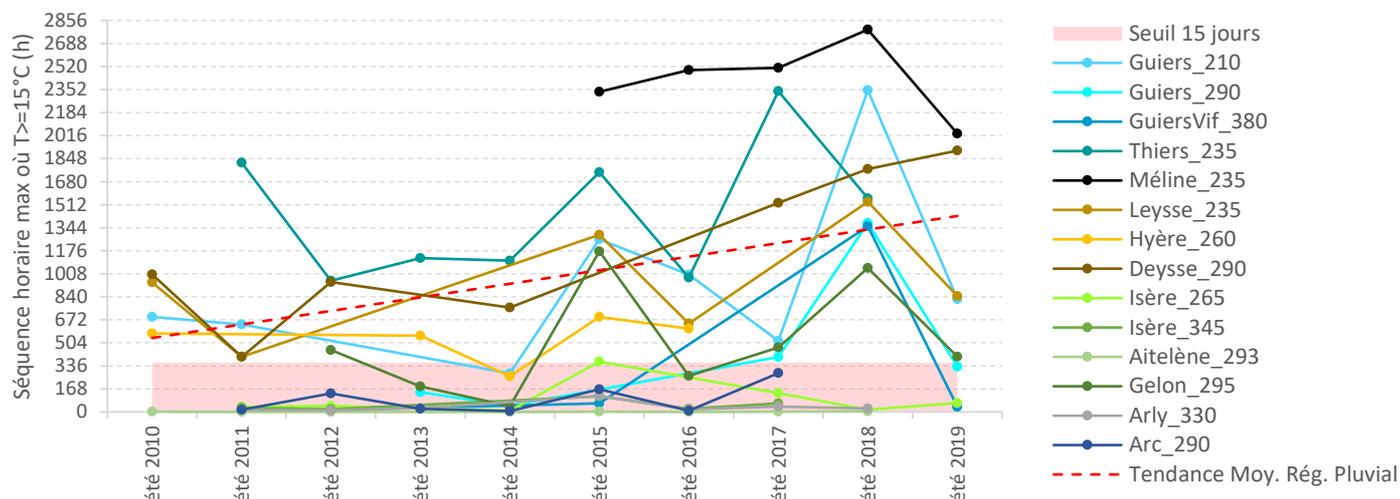


Figure 51 : Séquence maximale durant laquelle la température ne descend pas en dessous de 15°C sur la période 2010-2019 pour les stations de basse altitude (< 400m) (Crédits : FSPPMA, SMIAC - Traitement : CD73).

À retenir sur la température de l'eau des cours d'eau de Savoie

Entre 2010 et 2019, la température de l'eau des cours d'eau savoyards montre une tendance à l'augmentation de :

- + 0,5°C sur la moyenne annuelle, soit un réchauffement du même ordre de grandeur que ce qui a été observé sur les cours d'eau suisses (+0,34°C par décennie sur la période 1998-2018) et sur le Rhône (entre +0,4°C et +2,1°C sur la période 1987-2010),
- + 1°C sur la moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds au cours de la période estivale,
- + 1 mois sur la séquence maximale durant laquelle la température de l'eau ne descend pas en dessous de 15°C pour les cours d'eau de plaine, entraînant des conditions sanitaires pouvant être problématiques pour la faune piscicole.

3.2.1.5 Bilan sur la qualité de l'eau des cours d'eau savoyards

La qualité des rivières savoyards a été étudiée à partir des paramètres de physico-chimie classiques caractéristiques des pollutions organiques et de deux indices biologiques (Indice Biologique Global (IBG) basé sur la macrofaune benthique et l'Indice Biologique Diatomées (IBD) basé sur l'analyse des diatomées). Les données analysées issues des bases de données nationales (eaufrance) ont permis d'avoir une vision de l'évolution de la qualité des rivières sur la période 1970-2020 sur l'ensemble du territoire savoyard (soit 87303 données sur 264 points de mesure) (Annexe 31).

Pour l'instant, les conséquences de l'évolution des débits des cours d'eau sur la qualité physico-chimique de l'eau ne sont pas particulièrement décelables à partir des réseaux de mesure en place. L'analyse des données (notamment sur les grands cours d'eau) depuis les années 70 met en évidence une amélioration de la qualité de l'eau induite par les effets positifs des efforts consentis pour la réduction des rejets polluants notamment d'origine domestique. Ce bilan 2020 de la qualité de l'eau des rivières savoyardes pourrait constituer un état initial pour des bilans futurs.

3.2.2 Les lacs

3.2.2.1 Evolution de la température de l'eau des grands lacs

3.2.2.1.1 A l'échelle mondiale

La hausse de la température de l'air constatée depuis les années 1980 engendre des répercussions sur les masses d'eau superficielles comme les lacs.

O'Reilly *et al.* (2015) ont étudié à l'échelle mondiale, l'évolution de la température estivale des eaux de surface (entre 0 m et 1 m de profondeur) de 235 lacs sur la période 1985-2009. Celle-ci se chiffre entre - 0,7°C et + 1,3°C par décennie et montre une disparité régionale qui est dépendante des interactions entre le climat et la géomorphie de chaque lac. La grande majorité des lacs étudiés (95 %) s'est réchauffée en 25 ans, en moyenne de 0,34°C par décennie (Figure 52). Ceux des Laurentides (Canada) et du nord de l'Europe se sont réchauffés plus vite que les autres. Il semble que la température estivale de l'air soit le meilleur prédicteur de l'évolution de la température estivale des eaux de surface des lacs.

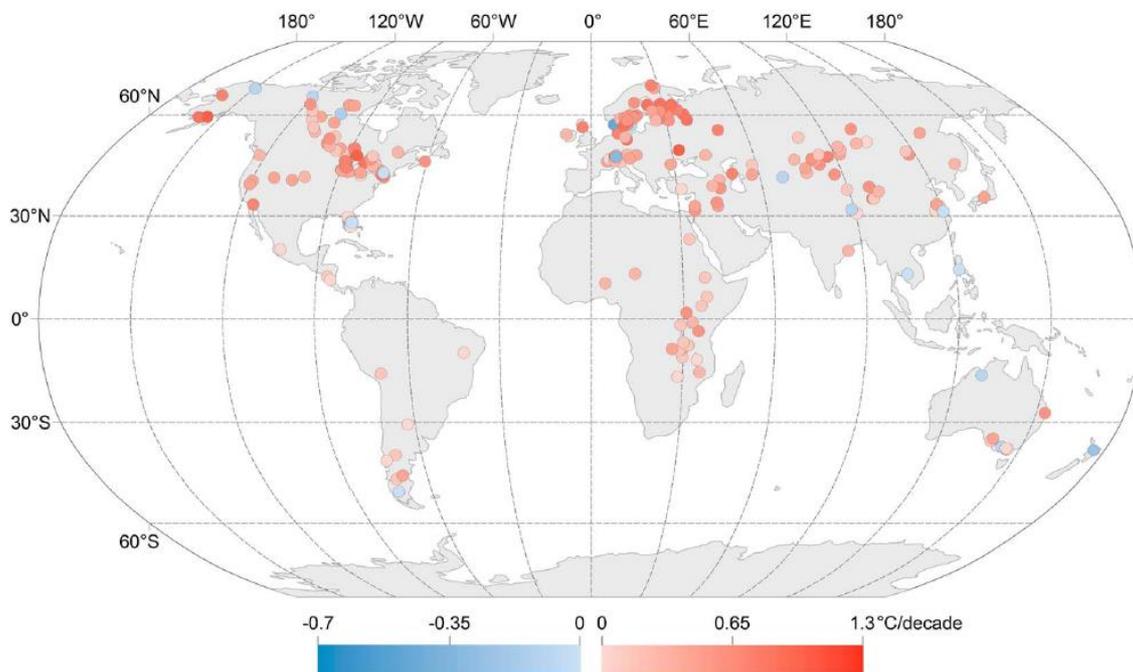


Figure 52 : Carte de l'évolution de la température estivale des eaux de surface sur la période 1985-2009 des 235 lacs étudiés (Crédits : O'Reilly *et al.*, 2015).

A noter : l'amplitude du refroidissement et du réchauffement sont différentes.

3.2.2.1.2 A l'échelle des Alpes du Nord françaises

Les Alpes du Nord françaises sont riches de 4 grands lacs naturels, à savoir le Léman, les lacs d'Annecy, du Bourget et d'Aiguebelette. Ces masses d'eau emblématiques pour la région sont nées grâce au phénomène d'érosion des glaciers qui descendaient des Alpes lors de la dernière ère glaciaire (- 110 000 ans à - 14 000 ans). Ces ressources à forts enjeux pour les territoires font l'objet depuis le début des années 1970-1980 d'un suivi scientifique complet. Cet état des lieux annuel permet de mieux connaître ces écosystèmes complexes et fragiles, de suivre leur évolution pour *in fine* améliorer leurs programmes de gestion et de préservation.

De même qu'à l'échelle mondiale, l'évolution de la température de l'eau de surface des grands lacs naturels des Alpes du Nord tend à augmenter en parallèle de celle de l'air. Par exemple, l'eau de surface (à 2 m de profondeur) du lac du Bourget enregistre un réchauffement depuis 1984 de l'ordre de 0,4°C en moyenne par décennie, soit au total + 1,4°C en 35 ans (Figure 53) (Jacquet *et al.*, 2021). Cette élévation de la température de l'eau de surface est fortement corrélée à celle de l'air qui enregistre une progression du même ordre de grandeur sur la même période à la station météorologique de Voglans (+ 0,5°C par décennie depuis 1984).

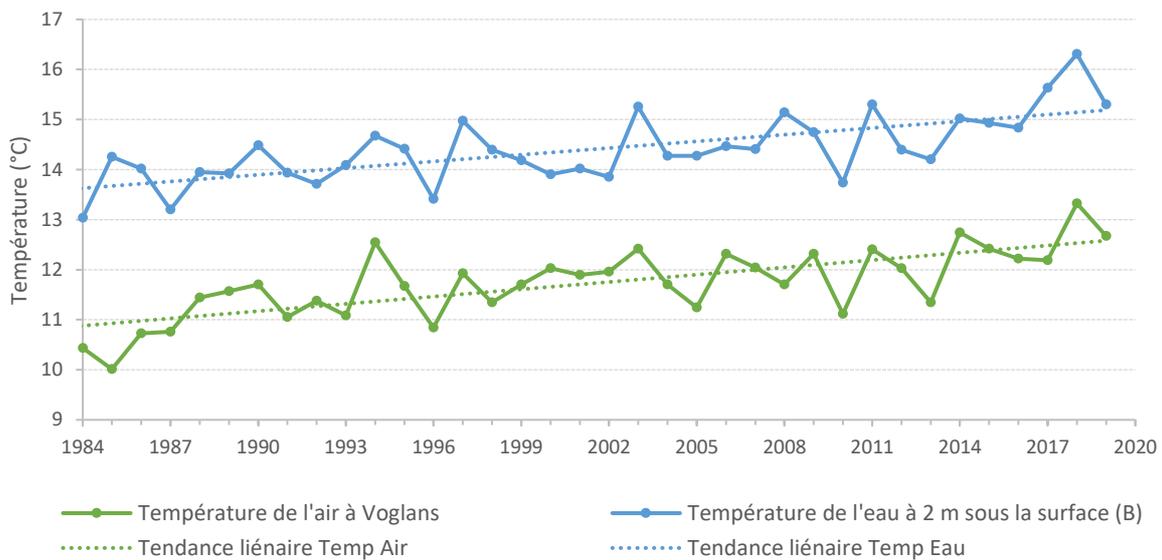


Figure 53 : Température moyenne annuelle de l'eau de surface (à 2 m de profondeur) au centre du lac du Bourget (point B) mise en relation avec la température moyenne annuelle de l'air à Voglans (station météorologique la plus proche du lac du Bourget) (Crédits : INRAE-CISALB ; Jacquet *et al.*, 2021 ; Météo-France)

Ce constat sur la température de l'eau en surface ne se retrouve pas en zone profonde. Le suivi de la température au même point B mais à 140 m de profondeur depuis 1991 montre des fluctuations entre 5°C et 6,5°C. Pour certaines années, la température moyenne annuelle de l'eau dépasse 5,9°C (1995-1998 ; 2015-2020) et pour d'autres, elle est inférieure à 5,3°C (2005-2007 ; 2012). Ces variations annuelles de la température de l'eau en profondeur dépendent des conditions météorologiques (température de l'air, vent, insolation) mais aussi d'un phénomène de brassage hivernal des eaux du lac.

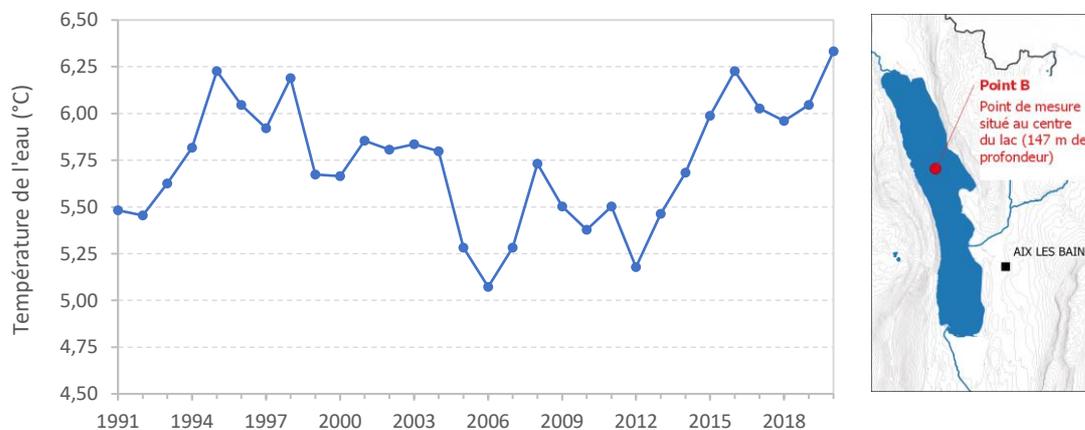


Figure 54 : Température moyenne annuelle de l'eau à 140 m de profondeur au point B du lac du Bourget (Crédits : INRAE-CISALB ; Jacquet *et al.*, 2021).

En effet, en fonction de sa température la densité de l'eau de surface évolue. En refroidissant au contact de l'air froid en automne et en hiver, les eaux de surface bien oxygénées des grands lacs alpins se densifient et descendent en profondeur. Ainsi en fonction de la rigueur de l'hiver (et de la profondeur du lac), le mélange des eaux peut se faire sur une partie ou la totalité de la colonne d'eau. Ce phénomène de brassage est important pour la réoxygénation des eaux profondes et la remobilisation et redistribution des éléments nutritifs dans la colonne d'eau. Il permet de maintenir une biodiversité au fond des lacs, dans les sédiments mais également dans les couches supérieures, notamment dans la zone euphotique (zone éclairée où s'effectue la photosynthèse).

3.2.2.2 Les lacs d'altitude

Les lacs d'altitude, situés conventionnellement à plus de 1500 m d'altitude, sont des milieux sensibles et soumis à des conditions climatiques extrêmes. Du fait d'une activité humaine réduite dans leurs bassins versants, ces milieux fragiles sont plus à même à capter le signal climatique (Jacquemin, 2009). Ils sont nés pour la plupart après la dernière grande période glaciaire (- 110 000 ans à - 14 000 ans) et le retrait progressif des glaciers associés. Leur superficie s'est généralement accentuée au fur et à mesure de la décrue glaciaire comme l'illustre la Figure 55 pour le lac de l'Arpont (commune de Val-Cenis). Ce lac a vu sa superficie multipliée par 5 en 36 ans sur la période 1953 à 1988. En 1988, il a atteint sa configuration maximale, limitée par un gradin rocheux situé au niveau du front du glacier (Edouard, 1994).

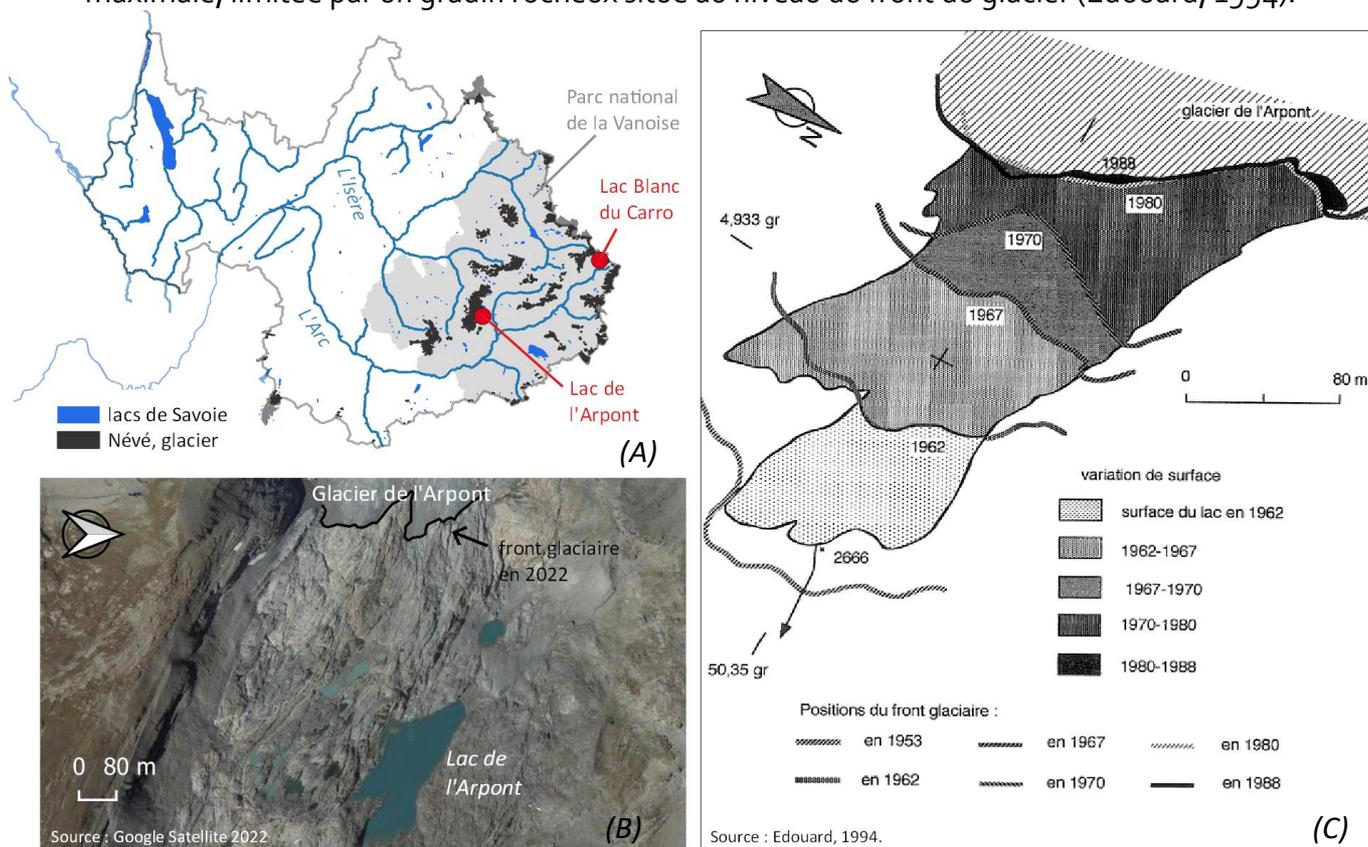


Figure 55 : (A) Localisation du Lac de l'Arpont (2666 m d'altitude, commune de Val-Cenis), (B) Vue satellite 2022 de la situation du lac et du glacier de l'Arpont et (C) Evolution du lac de l'Arpont et position du front du glacier de l'Arpont de 1951 à 1988 (établie à partir de l'agrandissement de photographies aériennes de l'IGN) (Crédits : Google satellite 2022 ; Edouard, 1994 – Traitement : CD 73).

Sur une période plus récente et en lien avec la hausse importante de la température de l'air depuis les années 80, Martinot *et al.* (2020) recense en Haute-Maurienne 33 nouveaux lacs aux abords des glaciers. L'élévation de la température influe non seulement sur la création de nouveaux lacs et leur étendue mais également sur le réchauffement de leur eau, la durée de l'englacement et de la couverture neigeuse au sein de leur bassin versant. Ces changements dans le cycle de gel/dégel ont également des effets sur l'abondance de certaines communautés biologiques et la composition chimique des eaux (OPCC, 2022).

Afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement et des menaces qui pèsent sur ces milieux fragiles et ainsi de mieux les préserver, un observatoire a été mis en place à l'échelle nationale à partir de 2014 avec le réseau « Lacs sentinelles ». Plusieurs compartiments physiques et biologiques sont suivis annuellement dans une vingtaine de lacs de montagne des Alpes et des Pyrénées.

Par exemple, le suivi depuis 2016 de la température de l'eau de surface (à - 2 m) et la profondeur de la zone euphotique⁹ sur le lac de l'Arpont a montré en 2019 une évolution marquante (Figure 56) (PVN, 2019). La température estivale à - 2 m culminait à 6°C jusqu'en 2018 et la zone euphotique sur la même période restait inférieure à 2 m en lien avec son alimentation principale en eau de fonte du glacier de l'Arpont¹⁰. Depuis 2019, la température estivale de l'eau en surface (à - 2 m) dépasse 12°C et le lac a gagné en transparence (comme le montre l'augmentation de la profondeur euphotique). Avec le recul constant du glacier de l'Arpont, le lac ne semble plus être alimenté directement par les eaux de fonte de celui-ci comme en témoigne son changement de teinte (Figure 57). Ce constat laisse présager une évolution vers des caractéristiques de lac dit « noir » (alimenté par des sources et non par des eaux glaciaires). Il rejoint la situation du lac Blanc du Carro (2752 m d'altitude, commune de Bonneval-sur-Arc) qui a connu cette déconnexion glaciaire en 2016 suite à la quasi-disparition du glacier de Derrière-les-lacs et la formation de plusieurs lacs dans les moraines supérieures jouant un rôle de filtre de l'eau (PNV, 2019).

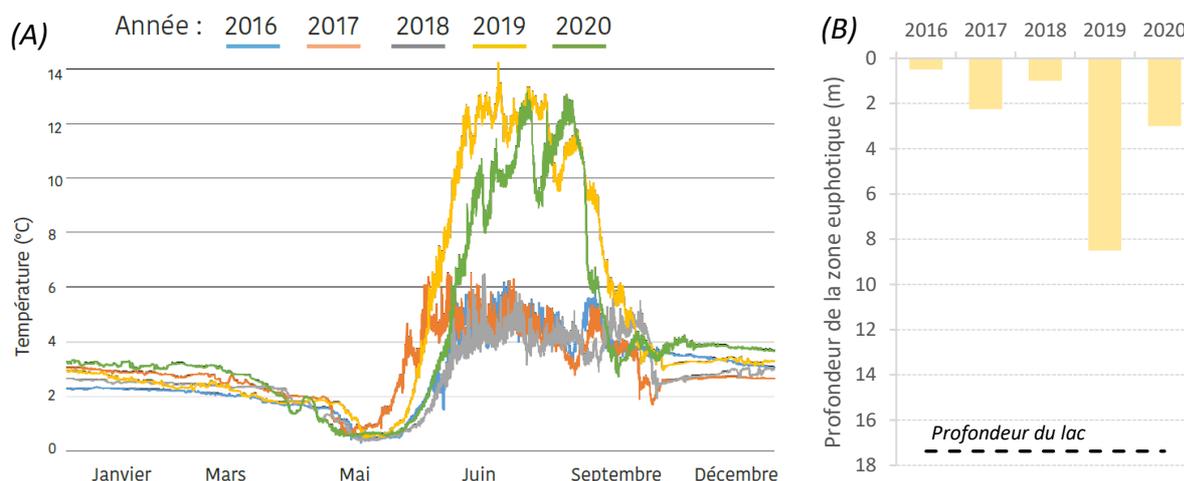


Figure 56 : (A) Température moyenne journalière de surface (à 2 m) de l'eau du lac de l'Arpont en Vanoise et (B) de la profondeur de sa zone euphotique sur la période 2016-2020 (Crédits : Réseau Lacs sentinelles).

⁹ La zone euphotique, ou zone photique, est la zone de surface des lacs ou des océans où la lumière pénètre dans les eaux et permet la photosynthèse des algues et autres végétaux photosynthétiques.

¹⁰ Les lacs glaciaires se caractérisent par des eaux blanches laiteuses dues à la suspension de microscopiques paillettes minérales produites par l'abrasion de la roche sous les glaciers et arrivées dans le lac par l'eau de fonte.

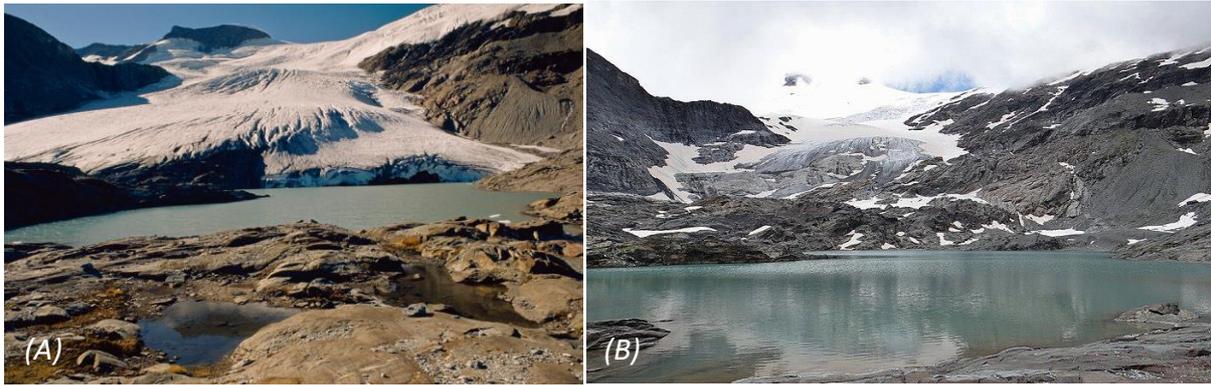


Figure 57 : Glacier et lac de l'Arpont (A) encore en communication directe en 1989 et (B) déconnectés en 2021 (Crédits (A) Parc National de la Vanoise – Patrick FOLLINET ; (B) Ibex73 - CC-BY-SA-4.0).

Une telle modification du régime thermique affecte de nombreux processus aussi bien biologiques pour les espèces qui y vivent ou en dépendent que des processus physico-chimiques du lac (Réseau Lacs Sentinelles, 2021).

À retenir sur les lacs en Savoie

En concomitance avec l'élévation de la température de l'air au cours des dernières décennies, la température moyenne annuelle de l'eau de surface des grands lacs des Alpes du Nord a tendance à augmenter de l'ordre de 0,4°C à 0,5°C par décennie. Une augmentation légèrement inférieure (0,34°C par décennie) est également relevée pour la grande majorité (95 %) des grands lacs à l'échelle mondiale.

Le réchauffement global en impactant la thermie de surface de ces grandes masses d'eau, rarifie le mélange hivernal complet des eaux ce qui a des conséquences sur les processus biochimiques et biologiques.

En altitude, avec le recul des glaciers, de nouveaux lacs de montagne apparaissent, voient leur superficie s'étendre et leur mode d'alimentation changer. N'étant plus alimentés par les glaciers depuis peu, certains ont vu leur température de surface s'élever et leur transparence augmenter.

Avec l'élévation de la température de l'air, la durée de l'englacement de ces lacs et l'importance de la couverture neigeuse de leur bassin versant se réduisent.

3.3 Les eaux souterraines

3.3.1 Les principales études globales en France

Le projet Explore 2070, qui s'est déroulé de juin 2010 à octobre 2012, avait pour objectifs :

- d'évaluer les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à l'échéance 2070, pour anticiper les principaux défis à relever et hiérarchiser les risques ;
- d'élaborer et d'évaluer des stratégies d'adaptation dans le domaine de l'eau en déterminant les mesures d'adaptation les plus appropriées tout en minimisant les risques.

Ce projet pluri-thématiques a été mené avec la participation de l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, maintenant OFB, Office Français de la Biodiversité), du CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales), des agences de l'eau, des DREAL de bassin, du CGDD (Commissariat Général au Développement Durable), de la DGEC (Direction Générale de l'Energie et du Climat) et de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques). Il a rassemblé une centaine d'experts venant d'établissements de recherche et de bureaux d'études spécialisés dont pour les eaux souterraines le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) (Carroget *et al.*, 2017).

Ce travail a montré une tendance à la baisse de la recharge des eaux souterraines.

Complété par une modélisation du BRGM en 2016 à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée-Corse, cette tendance est confirmée notamment pour la Savoie. En effet, **les prévisions pour notre département montrent en 70 ans une baisse de recharge des eaux souterraines oscillant entre 10 % et 25 %, à cause d'un recul des pluies efficaces** (Figure 58).

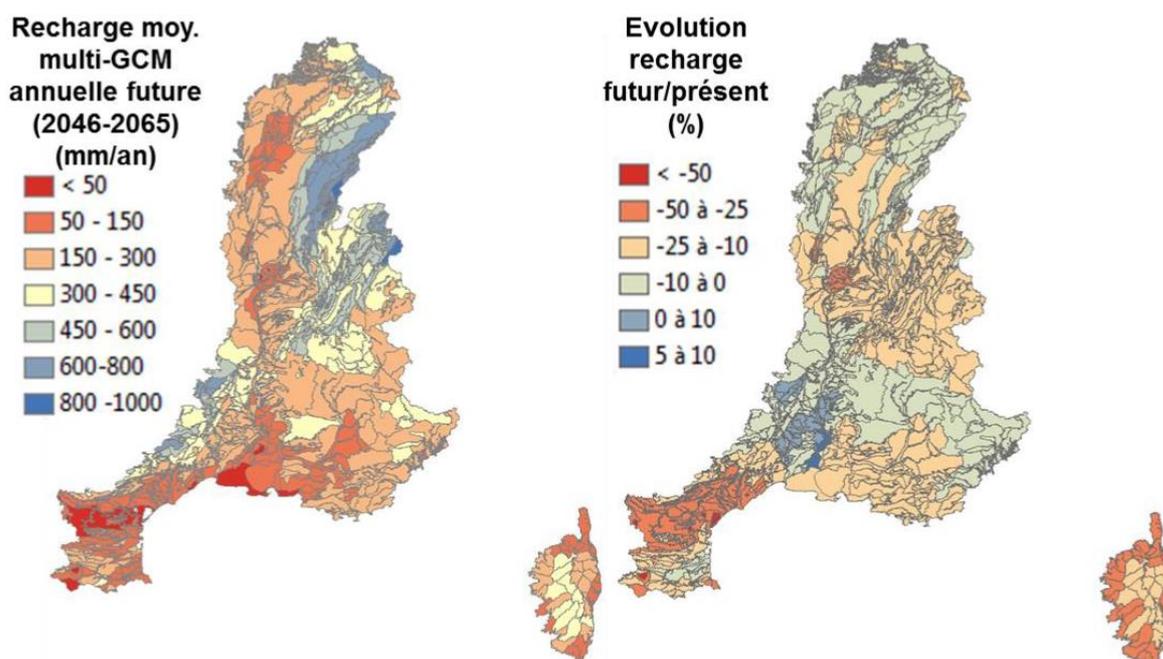


Figure 58 : Cartes de la recharge annuelle moyenne multimodèle calculée sur la grille de 8 x 8 km sur le bassin Rhône Méditerranée - Corse, déduite à partir de 6 scénarios climatiques régionalisés (SCRATCH 2010), pour la période future 2046-2065 (à gauche) et de son évolution en proportion de la recharge moyenne annuelle pour la période présente (1971-2020) (à gauche) (Crédits : Caballero *et al.*, 2016).

La présente étude a pour objectif de rassembler des données permettant de préciser cette tendance générale, et d'objectiver son évolution sur la période 2010-2020 fortement marquée par le réchauffement climatique.

3.3.2 Les aquifères en nappe en Savoie – analyse de la nappe du Guiers

Un réseau national de suivi des eaux souterraines, piloté par le BRGM, s'étend sur l'ensemble de la France et comporte 4 stations piézométriques actives en Savoie ou à proximité (Figure 59 – stations piézométriques) implantées dans des nappes alluvionnaires au niveau de :

- la plaine de Chambéry (piézomètre du Verney – Chambéry),
- la plaine de l'Isère (piézomètres de Cruet et d'Aiton),
- la plaine du Guiers (piézomètre de Saint-Joseph-de-Rivière - 38).



Figure 59 : Carte des stations des réseaux nationaux de suivi des eaux superficielles et souterraines en Savoie utilisées pour les arrêtés cadre concernant la restriction des usages de l'eau (Crédits : DREAL BRGM - Traitement : DDT Savoie).

Les carrés verts représentent les stations piézométriques de suivi des nappes.

Les 2 piézomètres de Cruet et d'Aiton qui suivent la nappe de l'Isère, sont fortement influencés par tout le complexe hydroélectrique installé en amont (barrages, tronçons court-circuités...). La nappe fonctionnant en lien étroit avec le cours d'eau, les mesures ne sont donc pas représentatives d'un fonctionnement hydrogéologique naturel. Autrement dit, l'incidence des aménagements hydroélectrique sur le bassin versant est tel qu'il masque très largement les évolutions liées au changement climatique.

Sur la nappe de Chambéry, une analyse partagée de l'historique des données du piézomètre du Verney dans le cadre de la présente étude avec le BRGM et Grand Chambéry, a fait ressortir des doutes sur la fiabilité d'une partie de la chronique.

Au final, **seul le piézomètre situé à Saint-Joseph-de-Rivière (38) et captant la nappe du Guiers et de l'Herretang**, remplit les critères de continuité et de robustesse de la donnée, tout en étant non influencé par d'autres usages (hydroélectricité, prélèvement d'eau potable...). Il présente aussi l'avantage d'être placé en contexte de moyenne montagne, similaire à la station d'Allèves sur le Chéran, référence de la partie de cette étude sur les eaux superficielles.

Dans le cadre de la présente étude, une analyse sur environ 40 ans de données (1982-2020) a donc été réalisée sur les relevés de ce piézomètre intégré dans le suivi national de la DREAL (Source : banque ADES). Le piézomètre suivi se situe dans les Préalpes à 410 m d'altitude avec un bassin versant de moyenne altitude et capte les eaux d'infiltration du Guiers, cours d'eau non influencé, ainsi que celles du massif calcaire de la Chartreuse.

Des évolutions par cycles se retrouvent avec des années où la nappe était globalement basse (fin des années 1980, 2003-2012 et 2017-2020), alternant avec des périodes de hautes eaux (années 1990 et 2013-2016).

L'analyse des données (méthode des médianes décennales) laisse toutefois apparaître que le niveau moyen de la nappe du Guiers s'est abaissé de plus de 60 cm en 40 ans (Figure 60).

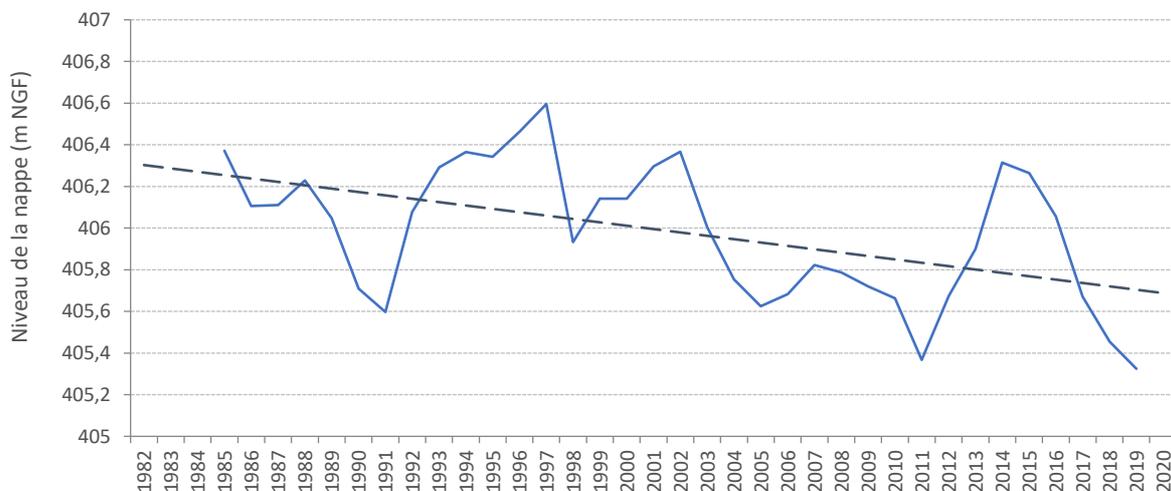


Figure 60 : Evolution du niveau moyen (moyenne glissante sur 3 ans) de la nappe du Guiers entre 1982 et 2020 à Saint-Joseph-de-Rivière (410 m - 38) (Crédits : DREAL-BRGM – Traitement : CD73).

La courbe tiretée correspond à la tendance linéaire sur la période 1982-2020.

Cette tendance à la baisse se retrouve sur les 40 ans de chroniques tant au niveau des plus basses eaux que sur les plus hautes (Annexe 32). Mais ce sont les valeurs d'étiage de la nappe qui sont le plus impactées, avec une baisse de plus de 1 m des niveaux mesurés annuellement. Les 4 dernières années (2017-2020) ont enregistré des étiages parmi les plus sévères depuis 1982, avec un record en 2018.

La baisse généralisée de la nappe ne semble pas s'accompagner d'une accentuation des extrêmes au cours d'une même année. Les battements annuels de la nappe oscillent toujours entre 2 m et 4 m, sans tendance visible à un accroissement (Annexe 33).

Il s'agit donc d'une tendance globale à la baisse du niveau de la nappe du Guiers et non d'une modification des régimes de hautes et basses eaux. L'absence d'accentuation des extrêmes constatée montre en effet plutôt un déficit général d'alimentation de la nappe que d'un changement au niveau des phases de recharge et de vidange.

Les deux dernières décennies (2001-2010 / 2011-2020) se distinguent nettement des années 1980 et 1990, avec des niveaux moyens de nappe 40 cm plus bas que ceux observés avant 2000 (Figure 61).

La décennie 2011-2020 présente des niveaux moyens inférieurs à ceux de la décennie précédente (2000-2010) alors même qu'elle a été sensiblement plus arrosée avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 1370 mm contre 1270 mm sur la décennie précédente (Figure 61 - graphique de gauche). C'est bien l'évolution des pluies efficaces, conditionnée par la hausse des températures, qui explique la poursuite de l'évolution à la baisse du niveau de nappe sur la dernière décennie (Figure 61 - graphique de droite).

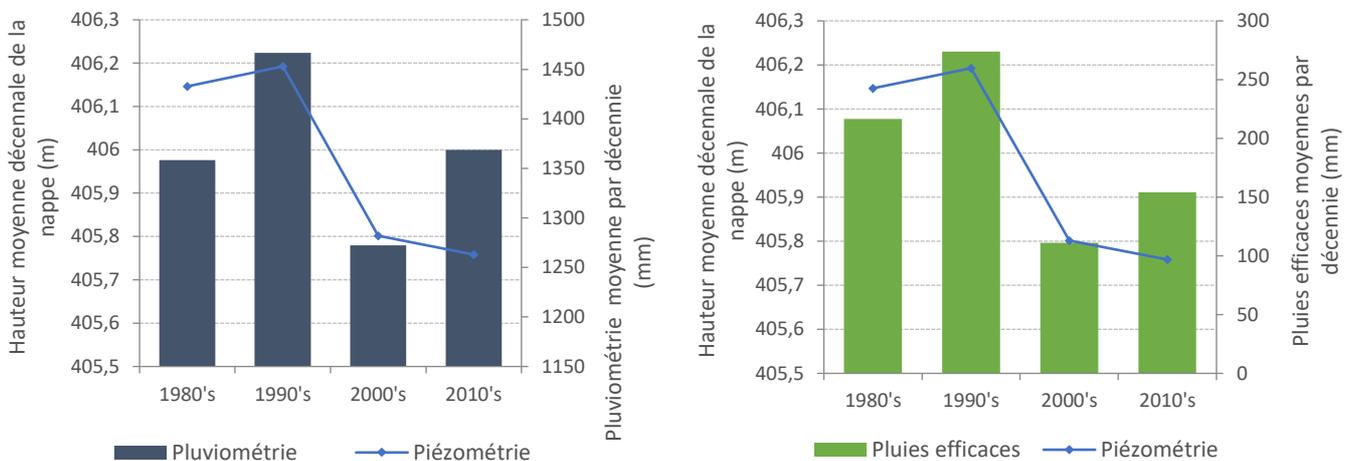


Figure 61 : Hauteur moyenne décennale de la nappe du Guiers à Saint-Joseph-de-Rivière (410 m - 38) en comparaison avec la pluviométrie (à gauche) et les pluies efficaces (à droite) moyennes par décennie (1982-2020) à Voglans (73 – 235 m) (Crédits : DREAL-BRGM ; Météo-France – Traitement : CD73).

L'analyse du comportement de la nappe au niveau mensuel montre que la nappe entre 1982 et 2020 a subi des baisses plus marquées durant les mois compris entre avril et novembre, soit au cours de 8 mois consécutifs (Figure 62).

Cette accumulation de niveaux déficitaires conduit à l'apparition d'étiages marquants en fin d'automne, et particulièrement en octobre. En effet, le mois d'octobre est le mois qui enregistre la plus forte baisse, avec une hauteur moyenne de nappe qui a perdu plus de 1,3 m en moins de 40 ans (Annexe 34). Lors de ces 5 dernières années, l'étiage historique (2018) et des valeurs historiquement basses (2016, 2017, 2019) se retrouvent ainsi sur ce mois.

À l'inverse, entre décembre et mars, la chute de la piézométrie a été atténuée en toute logique par la hausse des températures qui réduit l'étiage hivernal dû à l'effet du gel et au stockage sous forme de neige, et permet plus fréquemment une réalimentation de la nappe par des pluies ou de la fonte.



Figure 62 : Evolution de la hauteur moyenne mensuelle de la nappe du Guiers à Saint-Joseph-de-Rivière (410 m - 38) entre 1982 et 2020 (Crédits : DREAL-BRGM ; Météo-France – Traitement : CD73).

Ces constats se retrouvent sur la Figure 63 qui présente les niveaux moyens mensuels sur les 4 décennies successives d'observation.

Le creusement des étiages d'été et surtout de début d'automne est très net. La recharge de la nappe est de fait de plus en plus tardif (sur la dernière décennie, la recharge a commencé un mois plus tard, en novembre au lieu d'octobre).

Sur la dernière décennie, malgré une pluviométrie moyenne correcte, les mois d'automne plus chauds et plus secs ont accentué le phénomène de basses eaux avec des niveaux bas records sur septembre et surtout octobre.

Les effets de rétention d'eau en hiver liés au froid sont moins sensibles, ce qui permet de retrouver des niveaux satisfaisants dès le mois de décembre.

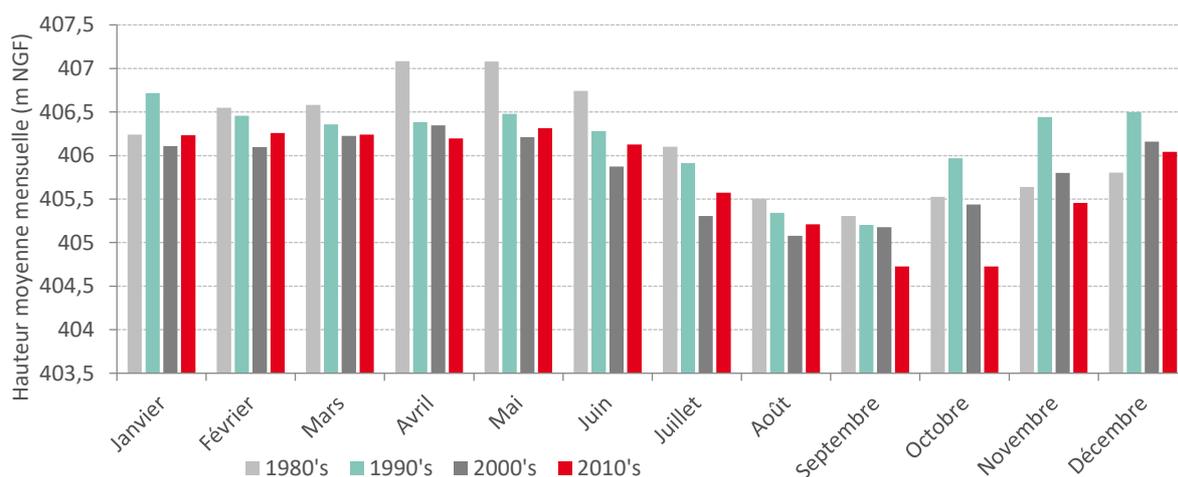


Figure 63 : Hauteur moyenne mensuelle et par décennie de la nappe du Guiers à Saint-Joseph-de-Rivière (410 m - 38) entre 1982 et 2020 (Crédits : DREAL-BRGM – Traitement : CD73).

À retenir sur les aquifères en nappe en Savoie

Les évolutions de la nappe du Guiers (massif de la Chartreuse) se caractérisent entre 1982 et 2020 par :

- une baisse de - **1 m sur les niveaux d'étéages annuels** (- 60 cm sur les niveaux moyens annuels),
- des niveaux historiquement bas ces 5 dernières années avec un **étéage record** enregistré **en 2018**,
- l'allongement des périodes de basses eaux de 1 mois supplémentaire avec des étéages de plus en plus tardifs (octobre, voire novembre).

3.3.3 Les sources gravitaires

Contrairement aux eaux superficielles et aux nappes, aucun réseau de suivi quantitatif des sources gravitaires n'existe à l'échelle nationale, ni à celle du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Seuls des acteurs locaux (gestionnaires d'eau potable, syndicats de bassin versant...) ont pu décider d'engager un suivi de leurs ressources en eau par des jaugeages réguliers ou des suivis en continu.

En Savoie, le Département et certaines collectivités impliquées dans un Plan de Gestion de la Ressource en Eau (Grand Chambéry et Grand Lac) ont ainsi depuis une dizaine d'années commencé à automatiser des stations de mesures sur des sources (en 2009, création par le Département du réseau de Télésurveillance des Eaux Souterraines de Savoie -TESS- portant sur 15 points de mesures).

Toutefois, ces quelques réseaux de mesures disposent d'un recul d'à peine plus d'une décennie qui n'est pas suffisant pour appréhender l'évolution réelle des ressources en eau et conclure à des tendances à long terme face au changement climatique. En revanche, ces réseaux permettent d'ores et déjà une gestion de crise face aux épisodes de sécheresse.

En fait, le seul réseau de suivi recensé sur la Savoie et présentant un recul suffisant est celui de la société TELT (Tunnel Euralpin Lyon-Turin) qui dispose de jaugeages de débits de sources depuis plus de 25 ans (environ 180 points).

3.3.3.1 Méthodologie de l'analyse des données TELT

Dans le cadre de la réalisation du tunnel transfrontalier du Lyon-Turin dans la vallée de la Maurienne, un suivi des ressources en eaux a été mis en place avant la phase de travaux : 122 sources et 61 forages font ainsi l'objet d'une mesure manuelle et mensuelle de leur débit ou niveau depuis le milieu des années 1990 jusqu'à aujourd'hui dans le but de suivre et d'analyser les impacts potentiels du projet de tunnel sur les ressources.

L'ensemble des données de suivi a été partagé par la société TELT et a permis dans le cadre de cette étude d'avoir accès à une information précieuse permettant d'évaluer l'évolution des ressources en eau en secteur de montagne.

Dans un objectif de suivi patrimonial des ressources, une sélection a été faite pour ne retenir que les stations de mesures avec les chroniques de données longues et continues, stations aussi jugées hors zone de toute influence anthropique.

Au final, 25 sources ont été sélectionnées, situées entre Saint-Julien-Montdenis (Moyenne Maurienne) et Bramans (Haute Maurienne) et s'étagent entre 800 m et près de 2400 m d'altitude (Figure 64). Les forages n'ont pas été étudiés car trop de paramètres influencent l'exploitation des données et ne permettent pas de renseigner correctement l'influence du changement climatique sur la ressource (contexte géologique fissuré, nappe en relation avec l'Arc anthropisé...).

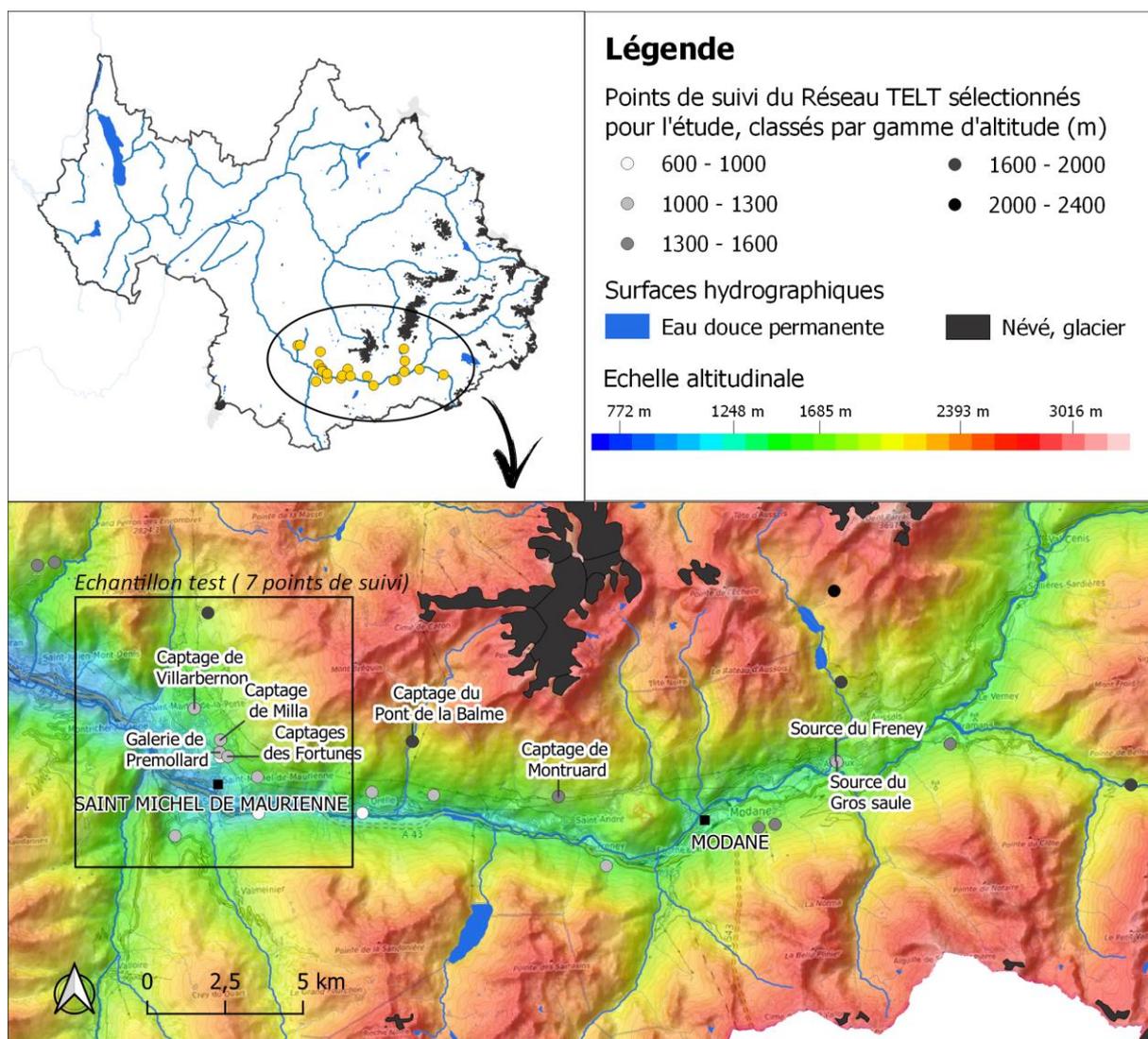


Figure 64 : Localisation des 25 sources suivies par TELT en Moyenne et Haute Maurienne et retenues pour analyser l'évolution de leurs débits entre 1994 et 2020 dans un contexte de changement climatique (790 m - 2385 m) (Crédits : fr-fr.topographic-map.com ; TELT - Traitement : CD73).

Dans le cadre de la présente étude, une première série d'analyses a été développée sur un échantillon de 7 stations, toutes situées autour de Saint-Michel-de-Maurienne (zoom présenté sur la Figure 64).

Plusieurs indicateurs et calculs statistiques ont ainsi pu être testés sur ces jeux de données, à savoir :

- le débit moyen : annuel, mensuel et par décennie (en valeurs absolue et relative),
- le débit et la date d'étiage annuel.

Les premières analyses montrent que les valeurs de débits moyens annuels sont trop influencées par le nombre réel de mesures par an (fluctuant fortement suivant les années et les sites suivis^[1]), ainsi que par les hautes eaux, dont la fiabilité des mesures est régulièrement

^[1] Suivant l'accès des sites (neige et avalanches en hiver notamment), la disponibilité des agents communaux et la fiabilité de la mesure en hautes eaux, le nombre de données annuelles par site suivi n'est pas toujours équivalent aux 12 mois de l'année.

incertaine dans un contexte de sources de montagne. La configuration de captage des sources suivies rend en effet difficile le jaugeage de l'intégralité des pics de hautes eaux avec de surcroît un bon niveau de précision.

Le manque de continuité dans les mesures de débit sur certains mois, dû à des fréquences de mesures différentes en fonction de l'avancée et la teneur des travaux du chantier Lyon-Turin, induit aussi trop d'incertitudes dans la date réelle de l'étiage annuel pour qu'une analyse fine et solide de son évolution soit menée dans le cadre de cette étude visant la connaissance patrimoniale des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.

L'analyse de ces chroniques montre que le niveau d'étiage annuel s'avère être l'indicateur le plus fiable et le plus pertinent pour étudier l'évolution de ces ressources.

De plus, une étude plus globale reste possible en se focalisant sur les tendances mensuelles à l'échelle de la chronique et par décennie.

Ces indicateurs ont ensuite été mis en relation avec des données climatologiques représentatives du secteur d'étude sur la période étudiée (1994-2020), à savoir :

- Pluviométrie : comme pour l'étude des eaux superficielles, les données modélisées de pluviométrie du ECMWF (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme) sur des surfaces de 20 x 30 km ont été utilisées. La zone étudiée est couverte par 2 mailles (Annexe 1). L'une des mailles (WS2952), centrée approximativement sur Saint-Michel-de-Maurienne, sert à l'étude de la corrélation « Pluies/Débit » sur les 16 stations les plus à l'ouest tandis que celle située sur le secteur d'Aussois (WS2953) est utilisée pour les 9 autres sources.
- Pluies efficaces (ou bilan hydrique) : le seul jeu de données disponible et fiable concernant les pluies efficaces est celui de Météo-France à Bourg-Saint-Maurice, dont les données ont été estimées cohérentes avec le secteur étudié.
- Neige : pour les 9 stations les plus à l'est, la station de référence pour les données de cumul de neige a été celle de Météo-France à Bessans, caractéristique de la Haute Maurienne et de l'influence des retours d'est. Pour les 16 autres points analysés, il a été choisi de prendre les valeurs intégratrices de la Savoie (moyenne de 3 stations dont celle de Bessans – cf. Figure 15), qui correspondent davantage à la climatologie observée sur le secteur de Saint-Michel-de-Maurienne.

3.3.3.2 Premières tendances : des étiages globalement à la baisse

Sur les 25 sources analysées, les débits d'étiage annuels mesurés sur les 25 dernières années environ présentent dans plus de 70 % des cas (18/25) une tendance à la baisse entre le début des chroniques (1994-1996) et les mesures les plus récentes à disposition, datant de 2019-2020 (Figure 65 et un exemple de sources dont les étiages sont à la baisse en Figure 66).

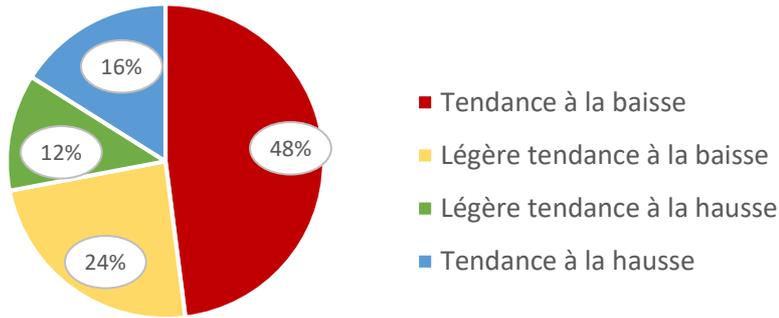


Figure 65 : Evolution des débits d'été de 25 sources (1994-2020) situées en Moyenne et Haute-Maurienne (790 m – 2385 m) (Crédits : TELT - Traitement : CD73).

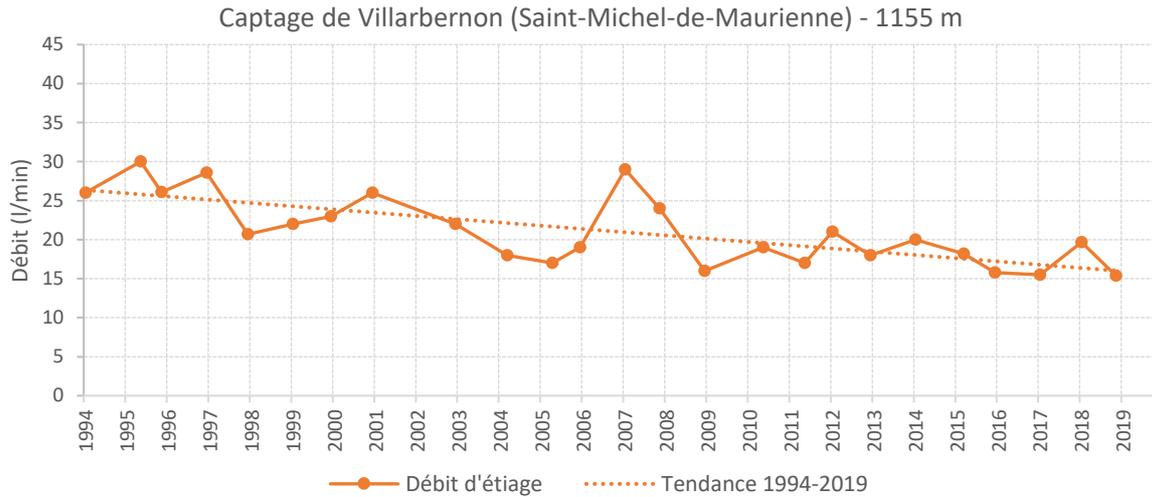
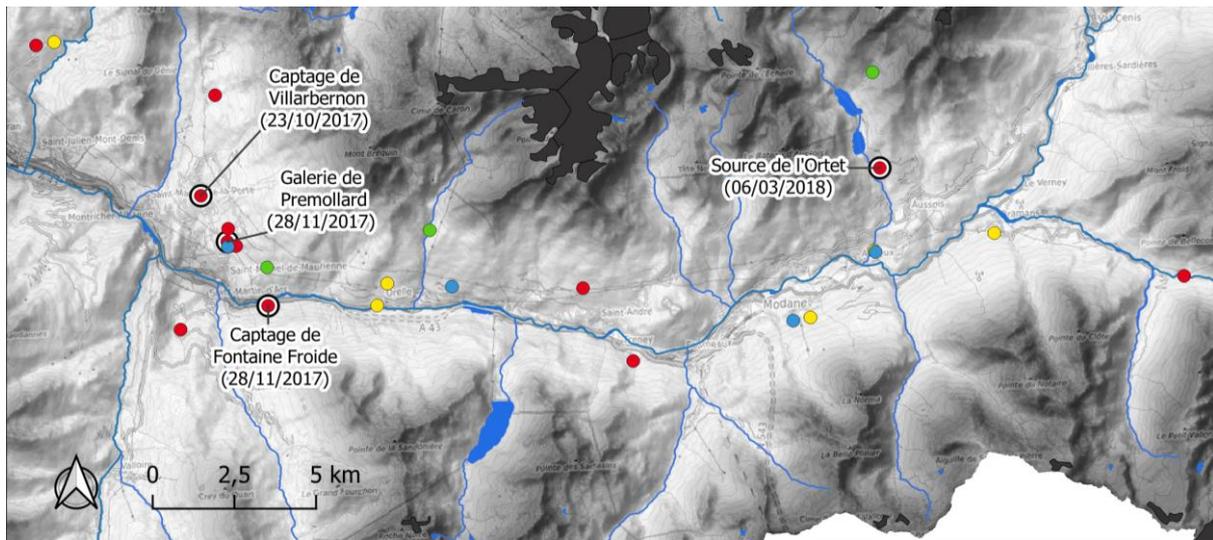


Figure 66 : Evolution du débit d'été annuel (l/min) du captage de Villarbernon à Saint-Michel-de-Maurienne (1155 m) entre 1994 et 2019 (Crédits : TELT – Traitement : CD73).
La ligne en pointillé correspond à la tendance linéaire entre 1994-2019.

Sur les 12 points à baisse marquée (48 % des points analysés), des niveaux d'été sévères se retrouvent très fréquemment au cours des 6 dernières années (2014-2020), montrant pour cette moitié de points que la ressource a tendance à se réduire de façon claire et continue. 4 sources (les captages de Villarbernon et Fontaine Froide, la galerie de Prémollard et la source de l'Ortet) ont même enregistré leur été historique, à la fin de l'année 2017 ou au début de 2018.



Légende

Evolution des débits d'étiage des 25 sources retenues pour l'analyse

- Tendence à la baisse
- Légère tendance à la baisse
- Légère tendance à la hausse
- Tendence à la hausse

○ Source pour laquelle l'étiage historique est récent (depuis 2017)
La date de l'étiage est spécifiée entre parenthèse

- Eau douce permanente
- Névé, glacier

Sources : fr-fr.topographic-map.com ; TELT ; BDTOPAGE.

Figure 67 : Synthèse cartographique des évolutions des débits annuels d'étiage des 25 sources analysées sur la période 1994-2020, dont 4 ayant enregistré leur étiage historique récemment (depuis 2017) (Crédits : fr-fr.topographic-map.com ; TELT - Traitement : CD73).

L'analyse de l'autre moitié du panel étudié (sites présentant des tendances légères à la baisse, à la hausse ou nettement à la hausse) montre des similitudes dans l'évolution temporelle de leurs débits d'étiage annuels.

Sur la très grande majorité de ces points (11/13), une baisse des débits d'étiage est observable à partir de 2003. Sur une période d'environ 10 ans (2003-2012), les débits d'étiage sur ces 11 points atteignent des niveaux très bas à 2 reprises, comme l'illustre la Figure 68 ci-dessous. Les valeurs d'étiage record se retrouvent ainsi sur cette période pour 10 de ces sources (4 sur 2005-2006 et 6 sur 2008-2012 - exemple du captage des Lorrains à Bramans)

La suite de la décennie 2010 montre une remontée des débits d'étiage annuels plus ou moins importante suivant les points (exemples en Annexe 35 et en Annexe 36), avec par conséquent des étiages moins sévères sur les dernières années de suivi pour ce deuxième panel.

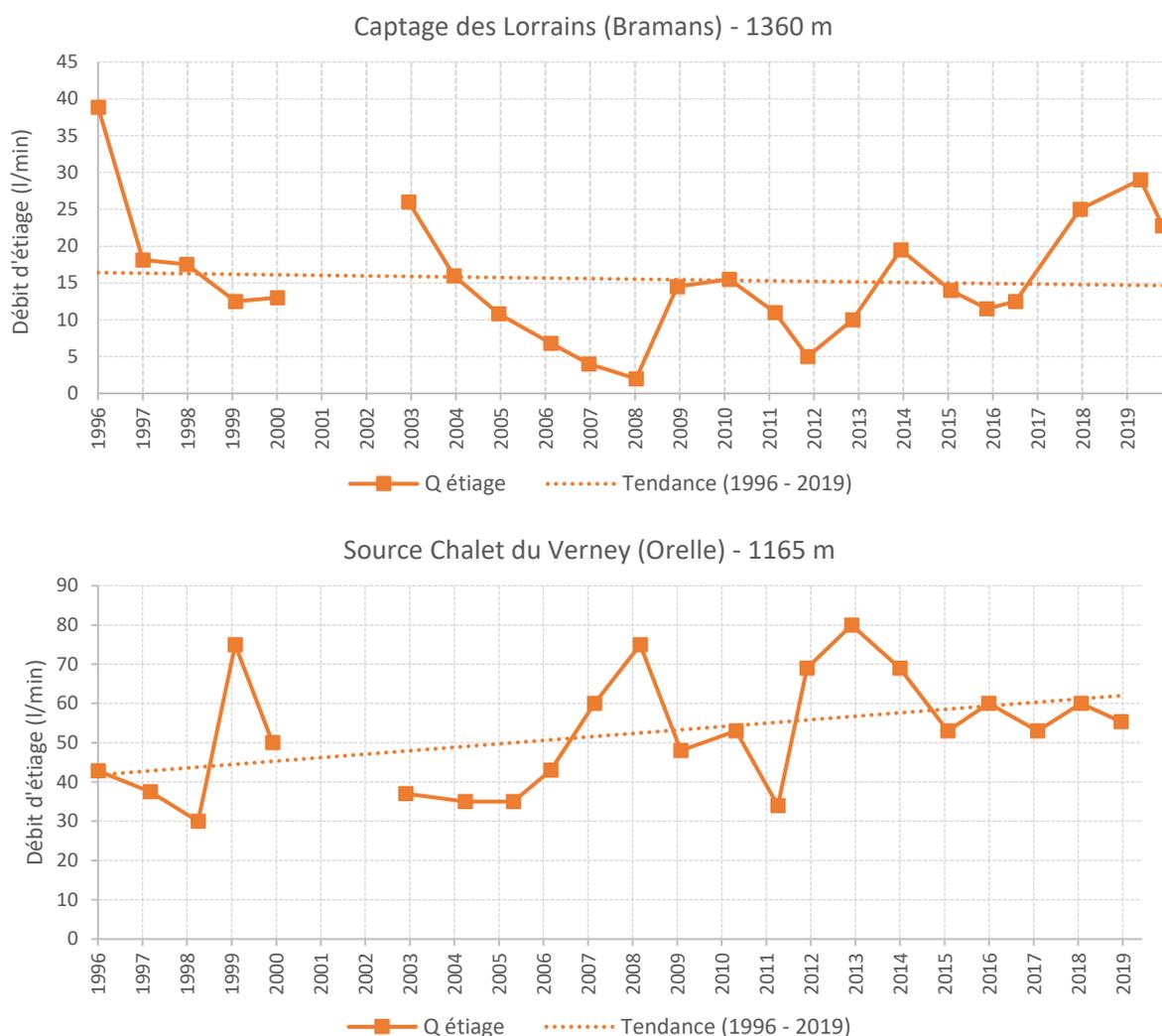


Figure 68 : Débits d'étiage (l/min) du captage des Lorrains (Bramans – 1360 m, en haut) et de la source Chalet du Verney (Orelle – 1165 m, en bas) entre 1994 et 2020 (Crédits : TELT - Traitement : CD73). La ligne en pointillé correspond à la tendance linéaire sur la période 1994-2020.

Aujourd'hui, l'analyse des caractéristiques des sources (Annexe 37) présentant des évolutions d'étiage similaires (baisse forte, légère baisse ou hausse et en hausse marquée) ne fait pas ressortir en l'état de corrélation particulièrement visible vis-à-vis de certains critères, tels que :

- l'altitude de la source : tant sur l'évolution des étiages que sur la date de l'étiage historique des sources (Annexe 38),
- le contexte géologique,
- et le positionnement des sources vis-à-vis de l'Arc (rive droite/gauche).

3.3.3.3 Des débits influencés par les pluies efficaces et les cumuls de neige

L'analyse de la pluviométrie du territoire montre un gradient ouest/est avec des précipitations plus conséquentes sur le secteur de Saint-Michel-de-Maurienne que sur celui d'Aussois. Les évolutions de la pluviométrie sur chacun de ces territoires sont néanmoins très similaires entre elles et avec les mesures relevées sur toute la Savoie, à savoir des années

globalement pluvieuses sur 1993-2002 (exceptées 1996-1997) et 2016-2020 alors que les périodes les plus sèches se retrouvent entre 2003 et 2011.

Par ailleurs, le territoire de Saint-Michel-de-Maurienne semble lui connaître sur la période d'étude (1993-2020) des précipitations avec une tendance légère à la baisse, contrairement au secteur d'Aussois qui enregistre une certaine stabilité dans les cumuls de pluies observés (Figure 69).

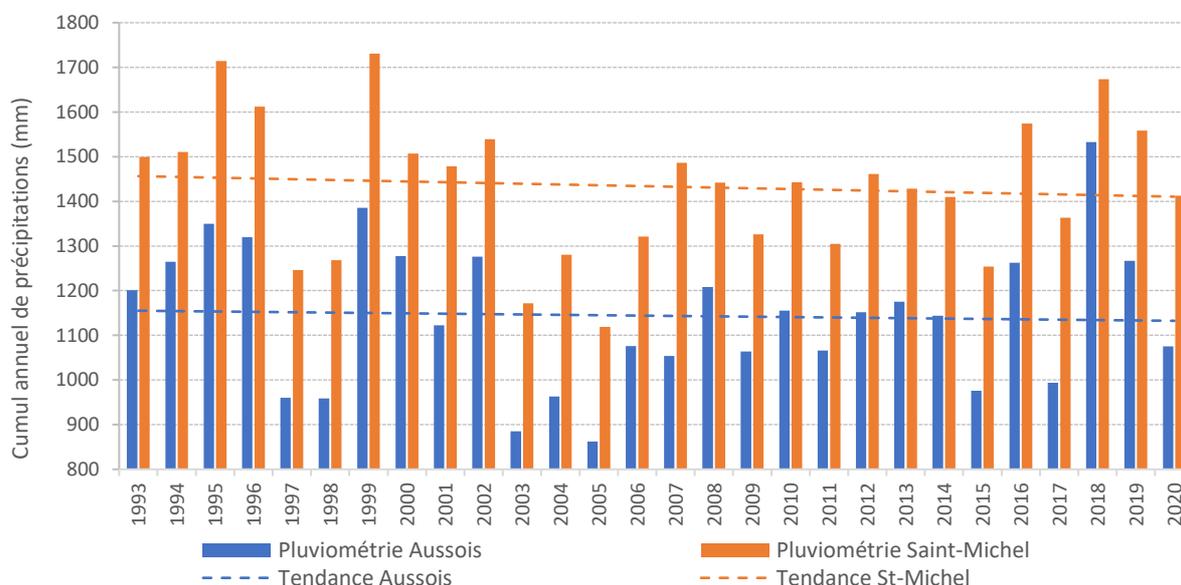


Figure 69 : Cumuls annuels de précipitations (mm) entre 1993 et 2020 sur les secteurs de Saint-Michel-de-Maurienne et d'Aussois (Crédits : ECMWF - Traitement : CD73).

Les lignes en pointillé correspondent aux tendances linéaires sur la période 1993-2020.

En couplant les débits d'étiage mesurés sur les 25 sources étudiées avec les données climatologiques à disposition (pluviométrie, neige et pluies efficaces), certaines corrélations apparaissent et donnent quelques éléments de compréhension sur les évolutions constatées des débits de sources en Maurienne.

La pluviométrie annuelle enregistrée sur les secteurs de Saint-Michel-de-Maurienne et d'Aussois montre une certaine cohérence avec les évolutions générales des débits d'étiage, comme le montre les données du captage des Fortunes (Figure 70).

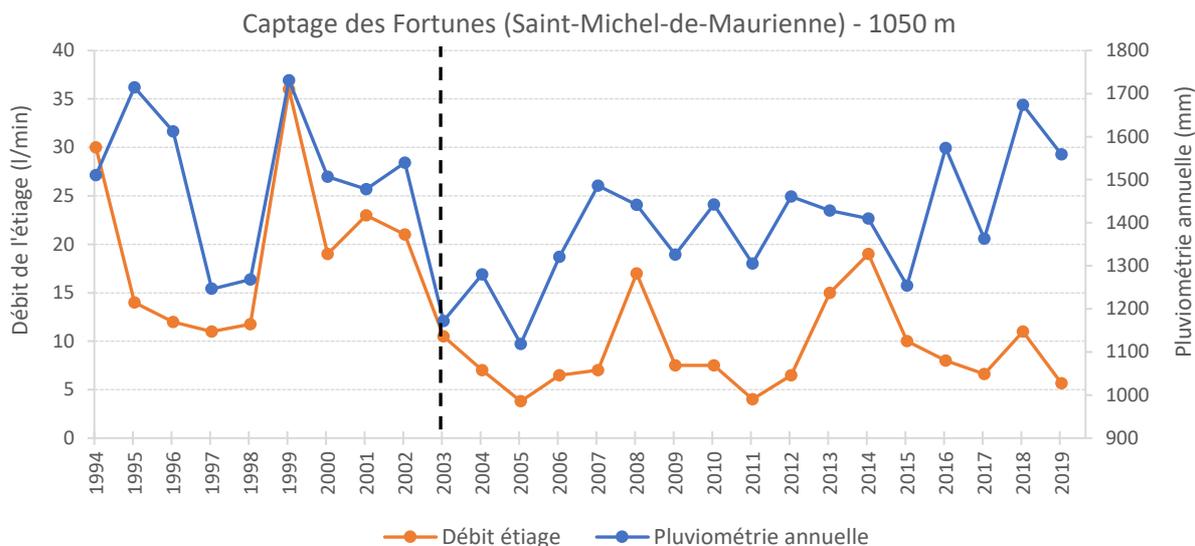


Figure 70 : Débits d'étiage (l/min) et pluviométrie (mm) annuels au niveau du captage des Fortunes à Saint-Michel-de-Maurienne (1050 m) (Crédits : TELT – Traitement : CD73).

Les valeurs hautes de débit durant la première décennie de mesures (1993-2002) sont corrélées avec les données de pluies mesurées. De même, les étiages sévères des années 2003-2012, mesurés sur la quasi-totalité des sources analysées (23/25), sont en cohérence avec les faibles précipitations durant toute cette période.

Néanmoins, depuis 2003, même si les tendances restent similaires entre elles, un certain décalage s'opère avec des valeurs de débit qui ne remontent plus autant que celles de la pluviométrie. Les développements qui suivent montrent que c'est la hausse marquée des températures ces 20 dernières années qui, là encore, va jouer un rôle majeur dans la baisse de la recharge en favorisant, en plus de l'évapotranspiration, la sécheresse des sols et réduisant la capacité de ces derniers à emmagasiner les précipitations.

En effet, le seul facteur « précipitations » ne peut pas expliquer les débits d'étiage bas retrouvés au cours de la dernière décennie sur 60 % des sources analysées (15/25), puisque que la pluviométrie enregistrée sur cette période est fréquemment dans la moyenne, voire bien au-dessus.

C'est en comparant les débits d'étiage avec les valeurs de pluies efficaces que les corrélations les plus fortes apparaissent. Ces deux paramètres présentent une tendance générale à la baisse pour les sources du secteur de Saint-Michel-de-Maurienne (exemple avec le captage de Milla - Figure 71).

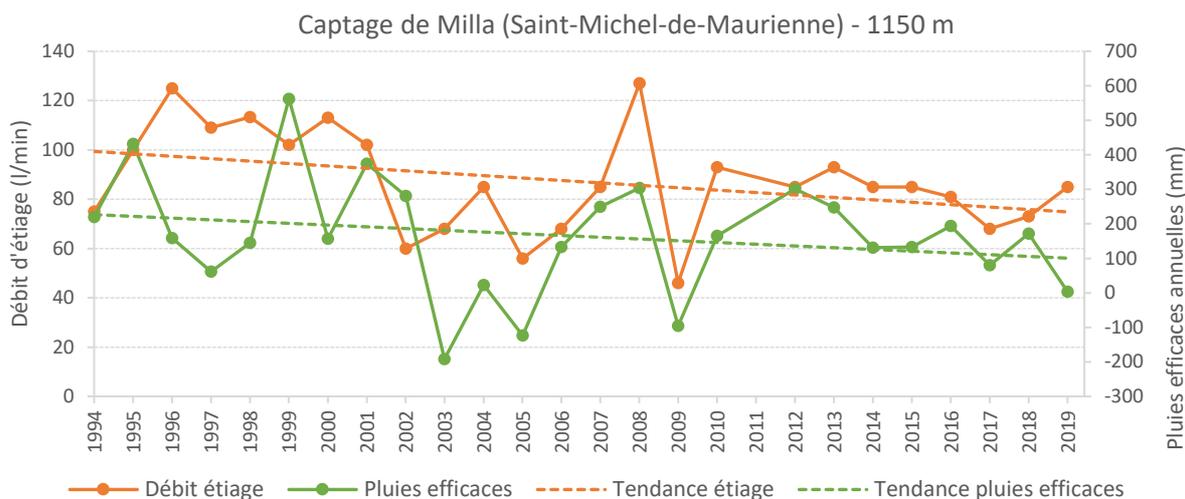


Figure 71 : Débit d'étéage (l/min) du captage de Milla (Saint-Michel-de-Maurienne – 1150 m) et pluies efficaces (mm) sur Bourg-Saint-Maurice (865 m) entre 1994 et 2019 (Crédits : TELT (débit) ; Météo-France (pluies efficaces) – Traitement : CD73).

Les lignes en pointillé correspondent aux tendances linéaires entre 1994-2019.

Les tendances marquées à la baisse des débits d'étéage observées sur la moitié du panel de sources s'expliquent facilement par cette diminution des pluies efficaces constatée depuis plus de 20 ans. La hausse des températures, particulièrement marquée ces dernières années, limite les recharges des eaux souterraines, conduisant vers des niveaux d'étéage plus sévères pour la moitié des sources étudiées.

De plus, la hausse des températures a aussi une forte incidence sur les cumuls de neige en-dessous de 1500 m (cf. partie climatologique - 2.5.1). Or, l'alimentation principale en eau des sources en secteur de montagne provient de la fonte de ce stock nival. En effet, au-dessus de 1000 m, la majorité de la recharge de ces sources se fait au printemps (ou en début d'été pour les sources de haute altitude), grâce à une infiltration lente et efficace des eaux de fonte du manteau neigeux accumulé durant l'hiver.

Les débits d'étéage sur plusieurs sources étudiées (galerie de Prémollard, source Chalet du Verney, captages des Fortunes, des Acacias et des Lorrains), montrent sur un territoire de montagne sous 1500 m d'altitude un lien fort entre débits d'étéage et cumuls de neige de l'hiver précédent (exemple en Figure 72).

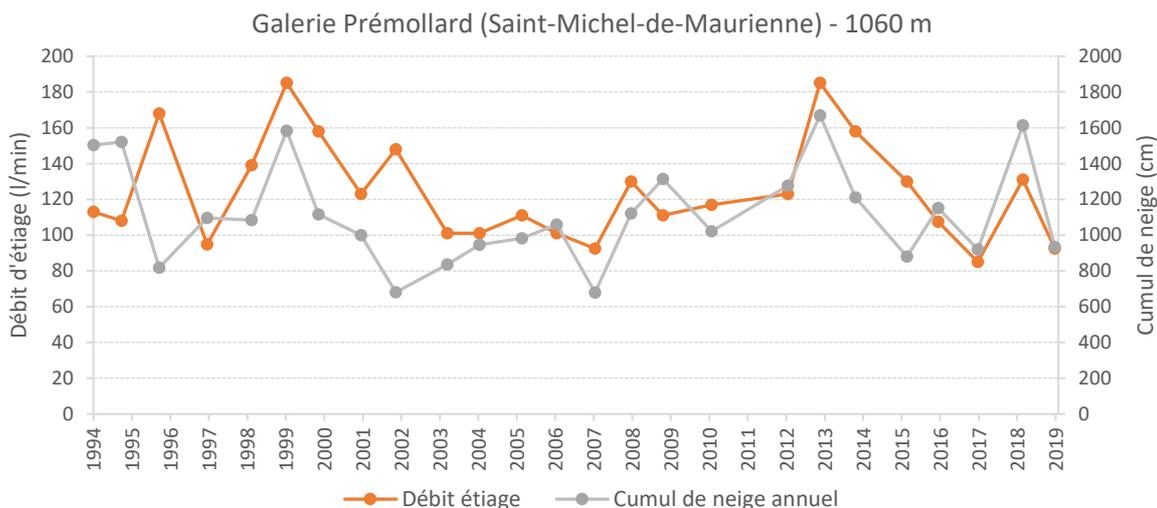


Figure 72 : Débit d'étéage (l/min) de la galerie Prémollard (Saint-Michel-de-Maurienne – 1060 m) et cumul de neige (cm) sur la Savoie (moyenne de 3 stations entre 1080 m et 1715 m d'altitude) entre 1994 et 2019 (Crédits : TELT (débit) ; Météo-France (neige) – Traitement : CD73).

Avec la diminution observée des cumuls de neige depuis maintenant 60 ans (cf. 2.5.1.1), l'évolution des débits des sources au-dessus de 1000 m devrait ainsi continuer de subir une tendance à la baisse.

3.3.3.4 Des recharges moins fréquentes et des basses eaux qui durent plus longtemps

Comme évoqué précédemment, l'alimentation principale des sources d'altitude se fait majoritairement par la fonte printanière ou estivale du stock de neige accumulé au cours des mois précédents. Une seconde phase de recharge peut survenir aussi au cours de l'automne avant la prise en gel des sols et quand la végétation débute son repos végétatif. De moindre ampleur, cette recharge secondaire permet souvent une recharge intermédiaire des aquifères avant l'étéage hivernal.

L'analyse par décennie des débits mensuels des 25 sources montre un raccourcissement au cours du temps de la durée totale de recharge. En effet, la période de hautes eaux secondaires à l'automne (septembre-novembre) a tendance à être sur 18 sources de moins en moins marquée, voire à ne plus apparaître.

De plus, une avancée du pic printanier des hautes eaux commence à se dessiner sur plusieurs points d'eau étudiés (captages de la Fontaine aux oiseaux, des Lorrains, de Champieu, source de l'Ortet, galerie de Prémollard, fontaine de Thyl Dessous).

La Figure 73 avec les données de la galerie de Prémollard (Saint-Michel-de-Maurienne – 1060 m) illustre bien ces 2 constats : raccourcissement de la durée total de recharge et avancée du pic printanier des hautes eaux.

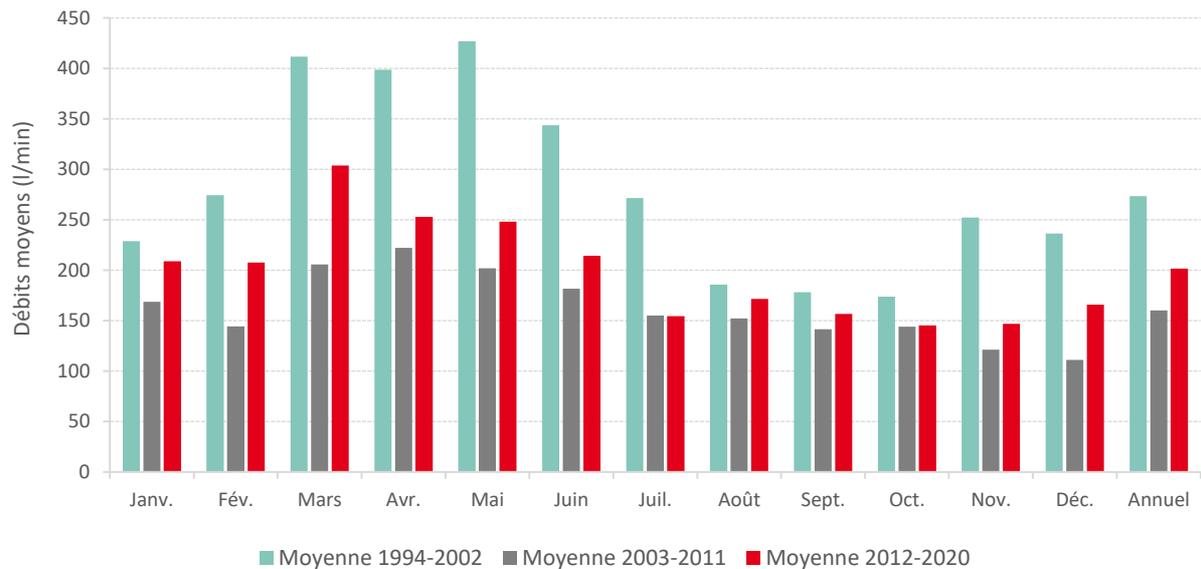


Figure 73 : Débits moyens mensuels (l/min) par décennie de la galerie de Prémollard à Saint-Michel-de-Maurienne (1060 m - 73) entre 1994 et 2020 (Crédits : TELT - Traitement : CD73).

Les 2 dernières décennies montrent donc une absence de recharge dite secondaire franche sur les $\frac{3}{4}$ des sources analysées (18/25).

De même, sur les sources situées au-dessus de 1500 m, apparaît une décharge de la nappe allant d'avril (ou juin suivant les altitudes) jusqu'au mois de novembre voire décembre (exemples en Annexe 39). Contrairement aux années 1990, il n'apparaît plus de période de hautes eaux secondaires à l'automne, allongeant de fait les périodes où les débits sont dans une phase de diminution.

Les sources de montagne ont ainsi tendance à avoir un fonctionnement hydrogéologique différent, avec une période de recharge quasiment unique au printemps. Quelques pics peuvent apparaître néanmoins à des périodes inhabituelles, en début d'hiver ou en été (orages). La période de baisse des débits des sources s'en retrouve donc allongée, favorisant l'apparition d'étiages plus sévères.

Au final, l'influence de la hausse des températures de ces 15 dernières années se fait ainsi sentir clairement sur les sources de montagne, en limitant les pluies efficaces de l'automne, en modifiant le fonctionnement hydrogéologique des ressources, voire parfois en avançant le début de la décrue des débits des sources.

3.3.4 Evolution de la température de l'eau des sources de Moyenne et Haute Maurienne

Un suivi mensuel de la température de l'eau a été réalisé sur de nombreuses sources, étagées entre 990 m et 2385 m en Moyenne et Haute Maurienne, entre 1993 et 2020. Sur les 25 sources à disposition, 17 points de suivi de la température ont été sélectionnés pour la continuité de leurs chroniques (Annexe 40). Ces données ont permis d'estimer une évolution moyenne de la température des eaux souterraines (Figure 74) d'environ + 0,6°C sur les 27 années étudiées (1993-2020), soit en moyenne plus de 0,2°C de hausse par décennie. Ces valeurs sont cohérentes avec celles de l'air enregistrées sur la même période, à savoir + 0,9°C.

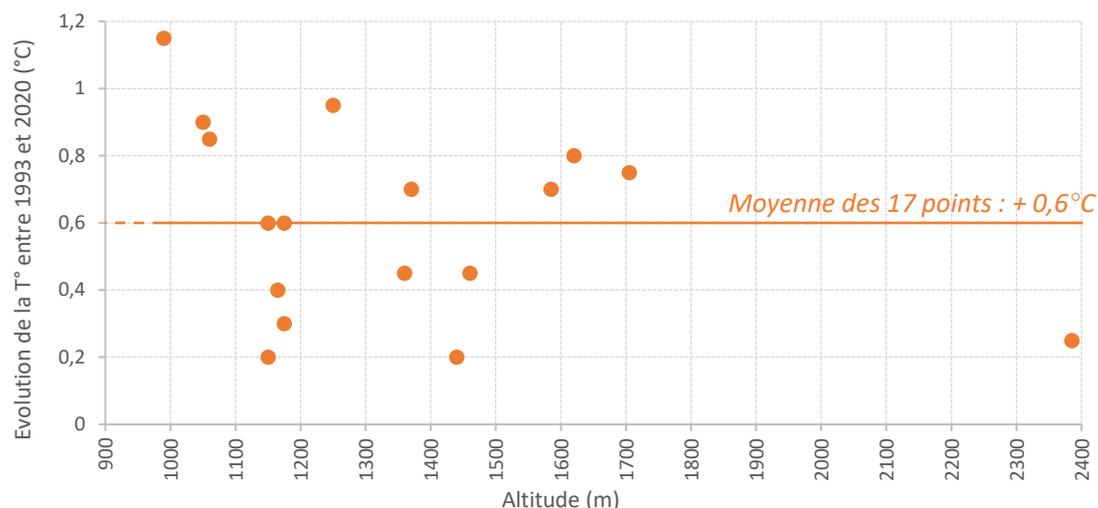


Figure 74 : Evolution sur la période 1993-2020 de la température de l'eau des sources en Maurienne en fonction de leur altitude (Crédits : TELT – Traitement : CD 73).

La droite en pointillés définit la moyenne des 18 points sur la période 1993-2020.

Néanmoins, une forte hétérogénéité de l'évolution de la température des eaux se retrouve sur les 17 points retenus, avec une fourchette d'évolution de la température sur la période 1993-2020 comprise entre + 0,2°C et + 1,15°C.

Aucune corrélation entre l'altitude, la géologie ou l'exposition ne semble se dégager pour expliquer le réchauffement plus important de certaines sources par rapport aux autres.

Par contre en zoomant sur les pics de température de l'eau (2003, 2006 et 2019) qui ont pu être mesurés (mesures occasionnelles ne permettant pas forcément d'enregistrer tous les extrêmes), il apparait que les années marquées par de fortes températures de l'air, souvent couplées à de longues périodes, influencent clairement la température des sources comme le montre la Figure 75 et la Figure 76. Ceci témoigne de la présence ici d'aquifères de faible profondeur, directement influencés par les conditions météorologiques.

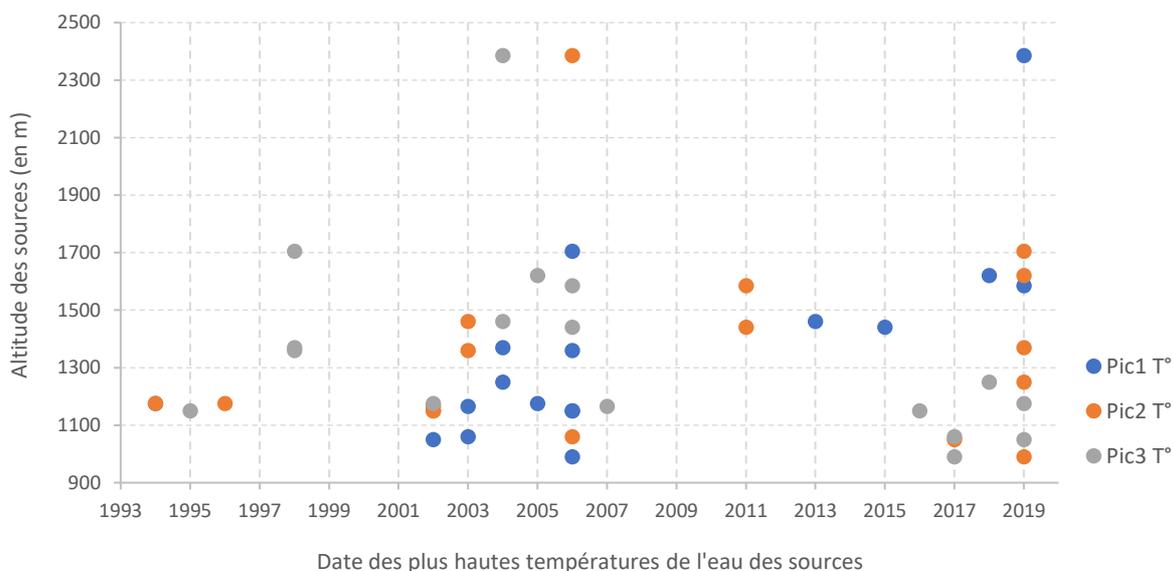


Figure 75 : Dates des 3 plus fortes mesures de température de chaque source analysée (en bleu, orange et gris : respectivement la plus élevée, la 2^{ème} et la 3^{ème} plus élevée) en fonction de leur altitude (Crédits : TELT – Traitement : CD73).

Vagues de chaleur observées en France 1947 à 2022 : 45 épisodes identifiés

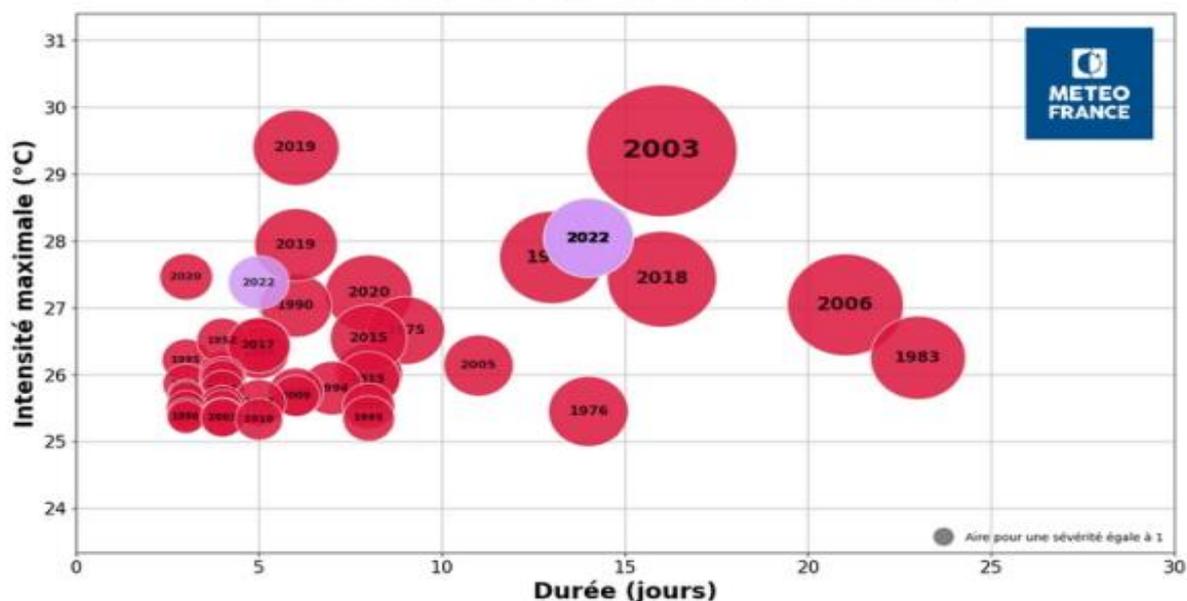


Figure 76 : Recensement des 45 vagues de chaleurs observées en France de 1947 à 2022 en fonction de leur intensité maximale (en °C) et de leur durée (en jours) (Crédits : Météo-France).

À retenir sur les sources gravitaires

L'analyse des **débits de 25 sources sur le territoire de Maurienne allant de Saint-Michel-de-Maurienne à Bramans** montre entre 1993 et 2020 :

- des débits d'étiage globalement à la baisse sur les 25 dernières années : près de la moitié des sources présentent des niveaux d'étiage sévères sur la dernière décennie,
- une période de recharge qui se raccourcit avec disparition de la **recharge secondaire en automne** au cours des 15 dernières années,
- une recharge en baisse du fait d'une moindre efficacité de la fonte nivale (stock de neige à la baisse) mais aussi de l'augmentation des températures qui induit une diminution des pluies efficaces.

L'analyse de **la température de l'eau** à partir de 17 points de mesures sur la période 1993-2020 a mis en évidence :

- une évolution moyenne à la hausse d'environ + 0,6°C, soit plus de + 0,2°C par décennie,
- un impact fort des épisodes de canicule sur la température de l'eau pouvant témoigner d'aquifères peu profonds et donc fragiles.

SYNTHESE de l'évolution des ressources en eau en Savoie

Le changement climatique et la hausse spectaculaire des températures associée influencent et contraignent l'évolution des ressources en eau de l'échelle mondiale jusqu'au niveau local. En Savoie, les précipitations annuelles restent pour le moment stables dans le temps mais le réchauffement observé tend à réduire les stocks neigeux et de glace tout comme les pluies efficaces. Tous ces apports en eau participent activement à l'alimentation et la recharge des ressources. Il est donc important et nécessaire d'analyser comment se répercutent ces évolutions climatiques sur les eaux superficielles et souterraines.

A l'échelle annuelle, un des premiers constats est une baisse généralisée depuis 40 ans des débits moyens annuels des cours d'eau et des niveaux moyens de nappe en lien avec la hausse des températures de l'air. Cette baisse tend à être particulièrement sévère pour les cours d'eau sous influence pluviale et nivale (- 10 % par décennie depuis les années 1980). Par exemple, pour obtenir un même débit dans le Chéran, il faudrait 12 % de plus de précipitations sur la période récente (1980-2019) que par le passé (1950-1980).

Les impacts climatiques se ressentent plus fortement sur les ressources en eau au cours de la période estivale, en particulier sur celles sous influence pluviale et nivale. Les étiages estivaux des cours d'eau et des nappes sont plus sévères mais aussi plus longs de 1 à 2 mois, se prolongeant régulièrement jusqu'au mois d'octobre. En effet, la hausse des températures de l'air limite les périodes de recharge dans le temps par une diminution des pluies efficaces ainsi que par la réduction du stock de neige, qui de plus, a tendance à fondre plus rapidement. La dernière décennie est marquée par des records de valeur d'étiage estival (2018 détient la première place). Par exemple, depuis 1980, les rivières de l'ouest du département ont perdu 30 % à 50 % de leur débit sur la période juin-septembre. Au niveau des eaux souterraines, la nappe du Guiers enregistre actuellement des niveaux d'étiage extrêmes qui sont plus profonds de 1 m par rapport à ceux mesurés il y a 40 ans. La moitié du panel des sources étudiées en Maurienne montre une tendance franche à la baisse au cours de la période d'étiage (qu'elle soit estivale ou hivernale). Cette chute sur les ressources souterraines depuis les deux dernières décennies s'explique en partie par des recharges secondaires à l'automne de moins en moins abondantes.

Pour les ressources d'altitude dont le fonctionnement est étroitement lié avec le stock de neige et la fonte des glaciers, l'été est synonyme de hautes eaux. Avec les températures de l'air en hausse constante ces dernières années, le fonctionnement hydrologique de ces ressources tend à être modifié. Les cours d'eau sous influence glaciaire enregistrent un pic de fonte plus précoce d'environ 1 mois et une période de hautes eaux réduite par rapport à la période pré-1980. Les lacs d'altitude, qui sont des systèmes fragiles, voient leur période d'englacement raccourcie. Certains accusent même une rupture d'alimentation d'eau de fonte glaciaire, qui implique un réchauffement conséquent de la température de l'eau de surface (par exemple + 6°C en été 2019 pour le lac d'Arpont, à cause du fort recul du glacier de l'Arpont modifiant les connexions entre eux).

Sur la période hivernale, les évolutions climatiques se ressentent essentiellement sur les ressources sous influence nivale. Leurs étiages hivernaux sont moins marqués en lien avec la hausse de la température de l'air et l'élévation de la limite pluie/neige. Cette évolution sur la

période de basses eaux hivernales implique un glissement petit à petit des régimes niveaux vers des régimes pluviaux.

Ces évolutions quantitatives et ces mutations de fonctionnement hydrologique ont des conséquences sur la thermie de l'eau qui est une variable explicative importante pour le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. De manière globale, la température de l'eau (de surface) de la grande majorité des ressources en eau de Savoie suit la même tendance à la hausse que celle de l'air. Cette augmentation mesurée par décennie varie entre 0,2°C en moyenne pour les sources de Maurienne et 0,4°C en surface pour le lac du Bourget par exemple. Elle atteint même 0,5°C en moyenne annuelle sur la dernière décennie (2010-2019) pour les cours d'eau savoyards alors qu'en période estivale une hausse de 1°C est observée sur la température moyenne au cours des 30 jours les plus chauds de l'année.

La baisse généralisée des débits, notamment lors de l'étiage estival, couplée à la hausse de la température de l'eau de surface, engendrent des conditions de plus en plus contraignantes pour la vie aquatique et ce, sur des périodes qui ont tendance à s'allonger. Ces mutations sur les paramètres physiques des milieux aquatiques ont des conséquences directes sur l'équilibre et le fonctionnement de ces écosystèmes aquatiques et des communautés biologiques.

De façon globale, l'évolution des ressources en eau en Savoie est impactée par le changement climatique sous diverses formes :



Des débits de cours d'eau en baisse continue depuis 40 ans (jusqu'à - 10 % du module par décennie pour les cours d'eau sous influence pluviale et nivale). À cause de la hausse des températures, davantage de précipitations seraient nécessaires pour retrouver un même débit dans une rivière (+12 % en 35 ans sur le Chéran).



Des étiages plus longs et plus sévères observés sur tous les types de ressources étudiés :

- un allongement de la période de basses eaux estivales de 1 à 2 mois, avec des étiages globalement plus tardifs (en automne au lieu de l'été pour les ressources à double alimentation « pluie – neige »),
- une intensité des étiages plus marquée : - 1 m sur la nappe du Guiers en 40 ans, - 30 % à - 50 % de débits estivaux en 30 ans sur les cours d'eau de type pluvial/nival, des sources en Maurienne avec des niveaux historiquement bas ces 5 dernières années.



Des fonctionnements hydrologiques des ressources en mutation avec des recharges à l'automne et des étiages hivernaux moins présents ou par exemple un pic de hautes eaux plus précoce sur les cours d'eau d'influence glaciaire.



La température des eaux qui augmente en lien avec celle de l'air et la baisse des débits, avec une hausse moyenne par décennie comprise entre 0,25°C et 0,5°C observée sur les sources, les lacs et les cours d'eau. La hausse est même plus importante sur le mois le plus chaud (+ 1°C en 10 ans en cours d'eau).



Conséquences de plus en plus fortes tant sur les milieux aquatiques ou les différents usages de l'eau (alimentation en eau potable, agriculture, tourisme, ...)

4 Conclusion

Avec un recul de dix années supplémentaires, toutes les tendances et les projections mises en évidence dans le Livre blanc du Climat de 2010, et dans la Synthèse départementale des ressources et usages de l'eau en Savoie réalisée en 2012, se trouvent aujourd'hui confirmées.

En tant que territoire de montagne, la Savoie est plus particulièrement impactée par les conséquences du changement climatique. Ces impacts, et notamment ceux portant sur l'état des ressources en eau, sont perceptibles sur l'ensemble du département, même s'ils se déclinent avec des variations locales.

Les évolutions des ressources en eau sur le département sont largement perceptibles alors même que les données ne mettent pas en évidence de tendance globale à la réduction des quantités annuelles de pluies. La hausse des températures est LE facteur essentiel qui imprime aujourd'hui cette tendance à la réduction des ressources en eau disponible.

Sur les 40 dernières années, les températures en Savoie ont globalement augmenté de 1,8°C (+ 1,6°C en France). En conséquence, les stocks de neige et l'épaisseur des glaciers ont chuté tandis que les pluies efficaces, c'est-à-dire la part de la pluie qui alimente effectivement les cours d'eau et les aquifères souterrains, se sont fortement réduites (- 40 % sur les 60 dernières années). Les indicateurs récents montrent que le réchauffement climatique ne s'est pas ralenti au cours de la dernière décennie, au contraire. De nombreux records de températures ont par exemple été battus ces dernières années.

Il en résulte que les cours d'eau de Savoie voient leurs débits moyens annuels baisser depuis 40 ans, et ceci jusqu'à - 10 % par décennie.

L'évolution est également flagrante sur les étiages estivaux qui ont tendance à s'allonger de 1 à 2 mois et à devenir plus sévères, tant sur les eaux superficielles que souterraines.

En plus de perturber et modifier le fonctionnement des ressources superficielles et souterraines, la hausse sensible de la température de l'air se répercute sur la température de l'eau, ce qui accroît encore la fragilité des milieux aquatiques.

Il faut s'attendre à ce que des conséquences plus sévères du changement climatique sur les ressources en eau interviennent de façon différée dans le temps, avec des effets de seuils liés à la disparation de certains glaciers à moyen terme (sous-bassin versant de l'Isère).

Sur l'ensemble de la Savoie, et au regard des études prospectives finalisées en début d'année 2023 par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, la réduction des ressources en eau telle qu'observée ces dernières décennies est appelée à se poursuivre.

5 Bibliographie

- Bard, A., Renard, B., & Lang, M. (2011). The AdaptAlp Dataset: Description, guidance and analyses (*Doctoral dissertation*, IRSTEA).
- Bard, A., Renard, B., & Lang, M. (2012). Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin. *La Houille Blanche*, (1), 38-43.
- Boé, J., & Habets, F. (2014). Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 691-708.
- Bonnet, R. (2018). Variations du cycle hydrologique continental en France des années 1850 à aujourd'hui (*Doctoral dissertation*, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- BonPote, Bres, A., Marc, C., & Doussin J.-F. (2022) Tout comprendre (ou presque) sur le climat. CNRS éditions. Livre, 135 p.
- Caballero, Y., Lanini, S., Zerouali, L., & Bailly-Comte, V. (2016) Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. *Rapport final*. BRGM/RP-65807-FR, 188 p.
- Carroget, A., Perrin, C., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Chazot, S., Chauveau, M., Rouchy, N. (2017). Explore 2070 : quelle utilisation d'un exercice prospectif sur les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale pour définir des stratégies d'adaptation ? *Revue Ressources, territoires et changement climatique*, 2017, no. 22, p. 4-11.
- Chaix, C., Mugnier, R., Jacques-le-Seigneur, V., & Delannoy J.-J. (2010) Le Livre Blanc du climat en Savoie. Conseil Général de la Savoie. Livre, 137 p.
- Dumoutier, Q., Vigier, L., & Caudron, A. (2010). Macro Excel d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles. Rapport, 29 p.
- Duvert, C., Langlais, S., Oriol, E., Poirel, A., & Perret, C. (2014). Etude Thermique du Rhône - Phase IV Lot 5 - Relations entre hydrologie et thermie du Rhône. Rapport EDF N° D4161/RAP/2012-0009-B.
- EDF REH Alpes Nord (1972). Influences de l'aménagement hydro-électrique Arc-Isère sur le régime des eaux. Chapitre I : Débits moyens mensuels de l'Arc et de l'Isère. Rapport de 49p., 6-17.
- Edouard, J. L. (1994). Les lacs d'altitude dans les Alpes françaises : contribution à la connaissance des lacs d'altitude et à l'histoire des milieux montagnards depuis la fin du Tardiglaciaire (*Doctoral dissertation*, Université Joseph Fourier (Grenoble)).
- Giuntoli, I., & Renard, B. (2009, December). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages. In *Convention ONEMA-Cemagref* (Vol. 2009, p. 86p).
- Giuntoli, I., & Renard, B. (2010). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages (*Doctoral dissertation*, Irstea).
- Giuntoli, I., Renard, B., & Vidal, J. P. (2012). Rôle de la variabilité climatique dans l'évolution temporelle des régimes d'étiage en France (*Doctoral dissertation*, Irstea).

- Jacquemin, C. (2019). Vulnérabilité des lacs de haute altitude au changement climatique (*Doctoral dissertation*, Aix-Marseille).
- Jacquet, S., Cachera, S., Crépin, L., Goulon, C., Guillard, J., Hamelet, V., Hustache, J.C., Laine, L., Perney, P., Quétin, P., Raphy, J., Rasconi, S., Rautureau, C., Rimet, F., & Tran-Khac, V. (2021). Suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2020. Rapport INRAE-CISALB, 193 p.
- Martinot, J.P, Mansoux, H., Béranger, P. (2020). Les lacs de Savoie, du Bourget aux lacs nouveaux-nés. *Les Pytalériens*, 192 p.
- Météo-France Climat HD (2022). <https://meteofrance.com/climathd> ; consulté en 2022.
- Soubeyroux, J.-M., Sébastien Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R. & Flore Tocquer (2021) . Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Météo-France, Ministère de la Transition écologique. Rapport, 98 p.
- Michel, A., Epting, J., Schaepli, B., Lehning, M., & Huwald, H. (2021). Changement climatique et température des rivières. *Aqua & Gas*, 101(ARTICLE), 70-77.
- OPCC (2022) <https://www.opcc-ctp.org/fr/sector/ecosystemes-sensibles-haute-montagne> ; consulté le 31 mai 2022.
- OCCAN (2020) <https://agate-territoires.fr/domaines-d'intervention/environnement-developpement-durable-transition-ecologique/changement-climatique-observatoire/>
- O'Reilly, C. M., Sharma, S., Gray, D. K., Hampton, S. E., Read, J. S., Rowley, R. J., ... & Zhang, G. (2015). Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, 42(24), 10-773.
- Paccard, P., Mourembles, C., Sergent, N. & Lascours, S. (2012) Synthèse départementale des ressources et des usages en Savoie, dans un contexte d'évolutions climatiques. Conseil Général de la Savoie. Rapport, 161 p.
- Parc National de la Vanoise - PNV (2019). <http://www.vanoise-parcnational.fr/fr/actualites/le-lac-de-larpont-aujourd'hui-deconnecte-du-glacier> ; consulté le 31 mai 2022.
- Proner, D. & Mevel, E. (2020). Plan Départemental de Protection du milieu aquatique et de Gestion piscicole de Savoie (PDPG 73) – FSPPMA, 1060 p.
- Réseau Lacs Sentinelles (2021) Fiche 18 : Les lacs de montagne se réchauffent-ils avec le changement climatique ? (disponible sur <https://www.lacs-sentinelles.org/>).
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., ... & Soubeyroux, J. M. (2018). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate dynamics*, 52(1), 1095-1114.
- Sutton, R. T., & Dong, B. (2012). Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. *Nature Geoscience*, 5(11), 788-792.
- Verneaux, J (1973). Cours d'eau de Franche-Comté (massif du Jura), Recherches écologiques sur le réseau hydrographique du Doubs, Essai de biotypologie. *Thèse Ann., Sci, Univ, Besançon*, 3 (9), 260p.
- Verneaux, J (1976). Biotypologie de l'écosystème « eaux courantes », La structure biotypologique, Note, CR Acad., Sc., Paris, t 283, série D1663, 5 p.