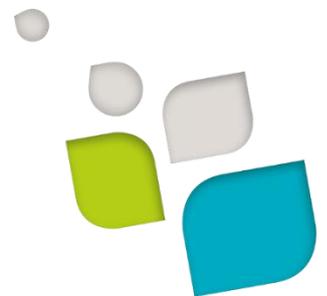


ÉTUDE DE L'HYDROLOGIE DU FLEUVE RHONE SOUS CHANGEMENT CLIMATIQUE

**Mission 1 : Diagnostic actualisé de la situation
hydrologique du fleuve**

Synthèse





BRL ingénierie

1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001
30001 NIMES CEDEX 5

Date du document	Mai 2021
Contact	Sébastien Chazot sebastien.chazot@brl.fr + 33 (0)4 66 87 50 20

Titre du document	Rapport complet de mission 1
Référence du document :	A00820
Indice :	V3

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
Mai 2022	V1	Synthèse	Marion Mahé	Sébastien Chazot
Juin 2022	V2	Prise en compte des commentaires sur la V1		
Janvier 2023	V3	Version finale		

POUR CITER CE DOCUMENT :

BRLi, 2023, *Etude de l'hydrologie du fleuve Rhône sous changement climatique – Mission 1 : Diagnostic actualisé de la situation hydrologique du fleuve - Synthèse*

ÉTUDE DE L'HYDROLOGIE DU FLEUVE RHONE SOUS CHANGEMENT CLIMATIQUE

Diagnostic actualisé de la situation hydrologique du fleuve

PRÉAMBULE	1
1 CONTEXTE ET TERRITOIRE D'ETUDE.....	2
2 LES INFLUENCES ANTHROPIQUES SUR LE FLEUVE	2
2.1 LES USAGES DE L'EAU DU FLEUVE	2
2.2 VISION D'ENSEMBLE ET BILAN DES PRELEVEMENTS	6
3 EVOLUTIONS PASSES ET FUTURES DU CLIMAT SUR LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE	11
3.1 QUELLES EVOLUTIONS DU CLIMAT DEPUIS 1960 ?	11
3.2 CLIMAT FUTUR : QUELLES PERSPECTIVES A COURT ET MOYEN TERME ?	14
4 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DU FLEUVE	20
4.1 EVOLUTIONS DES DEBITS AU COURS DES DERNIERES DECENNIES	20
4.2 EVOLUTIONS POSSIBLES DES DEBITS DU FLEUVE	21
5 INCERTITUDES	27

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Bilan des influences mensuelles des barrages sur le bassin français du Rhône (moyenne 1980 – 2015)	5
Figure 2 : Influences nettes mensuelles sur la partie française du bassin versant du Rhône	8
Figure 3 : Principaux préleveurs nets du bassin versant	9
Figure 4. Précipitations moyennes annuelles sur le bassin du Rhône pour la période 1960-2020 et diagrammes ombrothermiques des différents secteurs analysés.	12
Figure 5 : Évolution de la précipitation solide annuelle moyenne (en mm) sur la période 1960-2020 à l'échelle du bassin du Rhône	14
Figure 6 : Évolution de la température annuelle moyenne sur le bassin du Rhône (1950-2100). Les projections 2005 à 2100 sont issues des 10 projections climatiques retenus pour cette étude	15
Figure 7 : Évolution de la précipitation annuelle moyenne sur le bassin du Rhône (1950-2100). Les projections 2005 à 2100 sont issues des 10 projections climatiques retenus pour cette étude	16
Figure 8. (a) Bilan de masse annuel et (b) Bilan de masse cumulé des glaciers alpins français (661) pour la période 1967 – 2015. (c) Distribution et fonction de densité de probabilité de la masse cumulée sur la période 1967-2015 sur les 661 glaciers du jeu de données.	17
Figure 8. Evolution du volume de glace des glaciers intégrés dans le bassin versant du Rhône (d'après les données fournies dans Zekollari et al., 2019).	18
Figure 10. Bilan de masse et géométrie à l'échelle des glaciers au 21e siècle des glaciers des Alpes françaises. a Bilan de masse annuel des glacier, b Volume de glace, c Surface englacée.	19
Figure 9 : Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers d'une période historique et d'une période récente	20
Figure 10. Débits moyens journaliers interannuels projetés du Rhône à Beaucaire à l'horizon 2055 (2041-2070) pour les scénarios de GES RCP 4.5 et RCP 8.5.	22
Figure 11 : Source d'incertitude et précision des estimations de débit au niveau tu Rhône à Beaucaire.	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Prélèvements nets par usage sur le bassin du Rhône français	7
Tableau 2 : Evolution des températures de l'air moyennes par saison et par secteur (tendance linéaire entre 1960 et 2020)	13
Tableau 3 : Résumé des évolutions (significatives ou non du test de Mann-Kendall avec un seuil de significativité à 5 sur la période complète%) aux stations nodales du Rhône et pour quelques stations de référence des principaux affluents du Rhône.	21
Tableau 4. Evolution en pourcentage par rapport à la période de référence des débits moyens saisonniers des affluents du Rhône (valeur médiane inter-modèle) à l'horizon 2055 (2041-2070) pour le scénario RCP 8.5.	23



PREAMBULE

L'étude de l'hydrologie du Rhône sous changement climatique fait suite à « l'étude de gestion quantitative et des débits d'étiages du Rhône en période de basses eaux » (BRLi, 2014) (également dites « étude des étiages du Rhône »), pilotée par l'Agence de l'eau RMC et la DREAL de bassin entre 2012 et 2014.

Depuis cette période, de **nombreux projets de prélèvement impactant le débit du Rhône ont émergé**, pour réduire la pression sur des affluents ou nappes en déséquilibre quantitatif mais également pour développer de nouveaux usages.

Par ailleurs, au cours des dernières années, **le niveau de connaissance et la façon dont sont appréhendés les impacts du changement climatique ont largement évolué**. Plusieurs projets ont étudié dans le détail l'impact possible du changement climatique sur l'hydrologie et les ressources en eau. Les données disponibles sur les modifications climatiques possiblement attendues sur le territoire français sont également accessibles suite aux travaux de Météo-France et la mise en place du portail dédié à la mise à disposition de ces données (portail DRIAS). Si les niveaux d'incertitudes restent élevés, le bilan des connaissances réalisé par l'Agence de l'eau en 2016 révèle que des tendances lourdes se dessinent sur le bassin versant du Rhône, particulièrement à l'étiage. **L'impact du changement climatique avait été identifié dans l'étude de 2014 comme un facteur sensible**, qu'il est désormais nécessaire de prendre en compte plus précisément au vu de l'avancée des connaissances et des tendances des années récentes.

Enfin, un nouvel outil de modélisation hydrologique (J2000-Rhône) a été mis au point par INRAE ces dernières années. Spécialement développé pour le contexte rhodanien, cet outil offre la possibilité de réaliser des projections d'évolution des débits à différents horizons et selon différents scénarios d'évolution du climat.

Avec l'étude de l'hydrologie du Rhône sous changement climatique l'Agence de l'eau et la DREAL de bassin ont souhaité intégrer ces nouvelles connaissances et approfondir les réflexions menées en 2014 en intégrant davantage les problématiques liées au changement climatique et à ses impacts sur les ressources.

L'étude vise ainsi à actualiser le diagnostic réalisé en 2014 sur les besoins (actuels et projetés), la ressource en eau et son évolution possible sous l'effet du changement climatique (mission 1). Elle doit permettre d'évaluer la vulnérabilité au changement climatique des différents tronçons définis sur le Rhône vis-à-vis de différents enjeux clés et procéder à une analyse de criticité (mission 2). Ces éléments doivent nourrir la dernière étape de l'étude (mission 3) qui vise à « tester et évaluer une capacité de prélèvements supplémentaires par tronçon, de façon durable » c'est-à-dire sans remettre en cause les enjeux identifiés précédemment.

Le présent document est une synthèse des résultats obtenus dans le cadre de la mission 1.



1 CONTEXTE ET TERRITOIRE D'ETUDE

Le Rhône fait partie des grands fleuves européens avec une longueur de **810 km** et un bassin versant d'une superficie de **98 400 km²**. Par son module interannuel (débit moyen de l'ordre de **1 700 m³/s à l'embouchure¹**), le Rhône est le fleuve français métropolitain le plus puissant.

Il prend sa source en Suisse, où son bassin couvre 6 700 km² avant de se jeter dans le lac Léman qui représente la plus grande masse d'eau douce d'Europe avec un volume de 89 km³ et une surface de 582 km². Il poursuit son cours sur le territoire français et reçoit de nombreux affluents, avant de rejoindre la Mer Méditerranée.

Le périmètre objet de l'étude inclut le nouveau Rhône et sa nappe, du Léman jusqu'à la mer, ainsi que les affluents principaux et leurs nappes d'accompagnement. Sont notamment exclus du domaine d'étude les tronçons court-circuités du Rhône (vieux Rhône).

Le diagnostic des prélèvements, la définition des enjeux et l'analyse de la vulnérabilité du fleuve n'est donc pas détaillée sur le Rhône suisse. En revanche, les apports en provenance de la partie suisse du bassin, dont l'impact sur les débits disponibles en aval est déterminant, sont bien sûr pris en compte ainsi que leur évolution sous l'effet du changement climatique.

2 LES INFLUENCES ANTHROPIQUES SUR LE FLEUVE

2

Les paragraphes ci-dessous présentent les différentes influences anthropiques sur le bassin versant du Rhône, dans sa partie française. Après une description succincte de chaque usage au paragraphe 2.1 (superficies irriguées, population desservie, fonctionnement des systèmes de production électrique...), un bilan des prélèvements est présenté au paragraphe 2.2. Ce bilan présente les volumes associés à chaque usage et leur répartition dans le temps et l'espace.

2.1 LES USAGES DE L'EAU DU FLEUVE

IRRIGATION

Le bassin versant du Rhône compte une surface agricole utile d'environ 3 millions d'hectares, pour 235 000 à 240 000 ha irrigués à partir de l'eau du bassin², soit une hausse de l'ordre de 8% en comparaison des superficies de 2010.

Les prélèvements pour l'alimentation de surfaces irriguées sont présents sur l'ensemble du bassin mais se concentrent dans sa moitié sud. Soulignons que l'eau du Rhône est utilisée pour alimenter des surfaces extérieures au bassin en PACA et Occitanie, via les réseaux SCP, BRL et les périmètres des canaux de la Durance aval.

¹ Module de 1665 m³/s à Beaucaire calculé à partir des mesures de débits influencés sur la période 1986-2015

² Cette estimation sera à mettre en parallèle des données du RA2020, non disponibles au moment des analyses réalisées pour la mission 1 de l'étude.



La hausse des superficies irriguées par le fleuve au cours de la dernière décennie est essentiellement portée par l'augmentation des surfaces irriguées de vignobles. Même si les surfaces concernées sont plus modestes, on constate également une nette augmentation des cultures maraichères. En parallèle on assiste à une baisse des superficies irriguées en maïs, au profit d'autres grandes cultures (blé dur, soja, semences). On constate par ailleurs une baisse marquée (-31% entre 2010 et 2019) des surfaces rizicoles, qui impacte le delta du Rhône où la culture du riz est actuellement pratiquée sur 14 000 ha.

Le prélèvement brut pour l'usage irrigation est estimé à 2,3 milliards de m³/an. Il est en légère baisse en comparaison de l'étude réalisée sur le fleuve en 2014.

Avec un prélèvement net annuel de l'ordre de 1500 Mm³/an l'irrigation est à l'origine de près de 48% des prélèvements nets annuels sur la partie française du bassin du fleuve. Ces prélèvements sont globalement stables depuis 10 ans (les évolutions constatées sont inférieures à l'incertitude dont est entachée l'estimation des prélèvements nets).

Les projets d'hydraulique agricole mis en œuvre ces dernières années (que ce soit pour la réalisation d'économies d'eau ou l'équipement de nouvelles surfaces) ont été recensés. Ils aboutissent à une hausse de prélèvement de l'ordre de 6 Mm³/an sur l'amont de Viviers (2 Mm³ d'économies d'eau, et des extensions ou créations de périmètres irrigués requérant des volumes cumulés de l'ordre de 8 Mm³). Sur la partie du bassin versant en aval de Viviers, on estime les hausses de prélèvements associées à des extensions à 9 à 14 Mm³/an (9100 à 14 100 ha). En parallèle, des travaux de modernisation de réseaux ont permis des économies importantes. Ces travaux concernent tout particulièrement les canaux de la Durance aval et représentent des économies sur les prélèvements bruts de l'ordre de 53 Mm³/an. A l'échelle du bassin dans son ensemble, l'équipement de nouveaux périmètres au cours des 10 dernières années implique un prélèvement additionnel de 17 à 22 Mm³ et les économies d'eau associées aux projets de modernisation mis en œuvre représentent un volume de -55 Mm³.

L'évolution des prélèvements n'a pas fait l'objet d'analyse prospective poussée. Deux éléments ont cependant été pris en compte pour évaluer l'évolution possible des prélèvements agricoles :

- La hausse des besoins en eau des superficies déjà irriguées actuellement sous l'effet d'une hausse d'ETP.
Suivant les hypothèses de hausse d'ETP retenues, les besoins pourraient augmenter de 70 à 140 Mm³/an d'ici 2050.
- Les évolutions de prélèvements sous l'effet de projets court ou moyen termes (extension ou économies d'eau). Les projets d'extension identifiés pourraient être à l'origine d'une hausse des prélèvements de 70 Mm³. L'inventaire des projets de modernisation à moyen terme pourraient générer des économies de l'ordre de 110 Mm³ sur les prélèvements bruts s'ils se réalisent.

AEP

On estime à environ 11,5 millions d'habitants la population totale alimentée à partir des ressources du bassin versant du Rhône (hors période estivale) dont :

- 10,4 millions d'habitants de communes du bassin versant du fleuve (recensement INSEE 2018). Ces habitants sont concentrés principalement dans les grandes villes et métropoles comme Dijon, Besançon, Annecy, Lyon, Grenoble, Valence, etc.
- Un peu plus d'un millions d'habitants de communes extérieures au bassin et desservies principalement par les réseaux de la Métropole d'Aix Marseille Provence, de BRL et de la SCP. Bien que minoritaire en nombre d'habitants desservis, les prélèvements pour l'alimentation de ces communes représentent pour le fleuve Rhône des volumes nets importants car ils ne sont associés à aucun retour (leurs rejets d'assainissement se font hors bassin versant).



L'usage AEP est à l'origine d'un prélèvement brut de 1,06 Mm³/an dont une grande partie est restituée au bassin via l'assainissement.

Les prélèvements nets en eau potable sont de l'ordre de 520 Mm³/an, soit un peu moins de 17% du prélèvement net annuel total sur le bassin versant du fleuve. Ils sont stables depuis 10 ans.

Différents facteurs pourraient influencer l'évolution des prélèvements AEP à l'avenir :

- La croissance de population : suivant les hypothèses démographiques considérées les besoins supplémentaires pourraient être de 36 à 126 Mm³/an d'ici 2050.
- Les efforts pour l'amélioration des rendements des réseaux et la baisse de la consommation unitaire (en m³/hab/an). Un gain de rendement de l'ordre de 5% à l'échelle du bassin versant représenterait des économies d'eau de l'ordre de 22 Mm³/an.
- Les évolutions touchant la desserte de communes extérieures au bassin, que ce soit pour se raccorder à la ressource Rhône ou au contraire s'en affranchir pour diversifier leurs alimentations avec des ressources locales. Les projets identifiés à ce jour représentent .pour le Rhône un prélèvement supplémentaire de l'ordre de 20 Mm³/an.

OUVRAGES DE STOCKAGE ET TRANSFERTS HYDROELECTRIQUES

L'eau du bassin du Rhône permet une production hydroélectrique d'environ 41 TWH/an, soit 60% de la production hydroélectrique française. Les ouvrages à l'origine de cette production sont

- Des usines et les barrages associés positionnés sur le Rhône lui-même.
Ces ouvrages turbinent l'eau du fleuve au fil de l'eau et ont essentiellement une influence sur les variations infra-journalières de débit. Ils n'ont pas été pris en compte dans le cadre de cette étude pour l'estimation des influences.
- Des ouvrages de stockage.
Les influences des ouvrages présents sur la partie française du bassin du Rhône ont été étudiées en détail (voir paragraphe ci-dessous). En plus de ces ouvrages, le Rhône est également influencé par des ouvrages sur la partie suisse du bassin, dont le volume utile cumulé est de l'ordre de 1 200 Mm³, et par la régulation opérée par le lac Lemman (barrage du Seujet). Ce lac, plus grand lac d'Europe, a un volume total de 89 000 Mm³ mais un volume de régulation de 500 Mm³.
- Des transferts destinés à la production d'hydroélectricité.

Les influences de ces deux derniers types d'aménagements sont présentées ci-dessous.

Ouvrages de stockage sur la partie française du bassin du Rhône

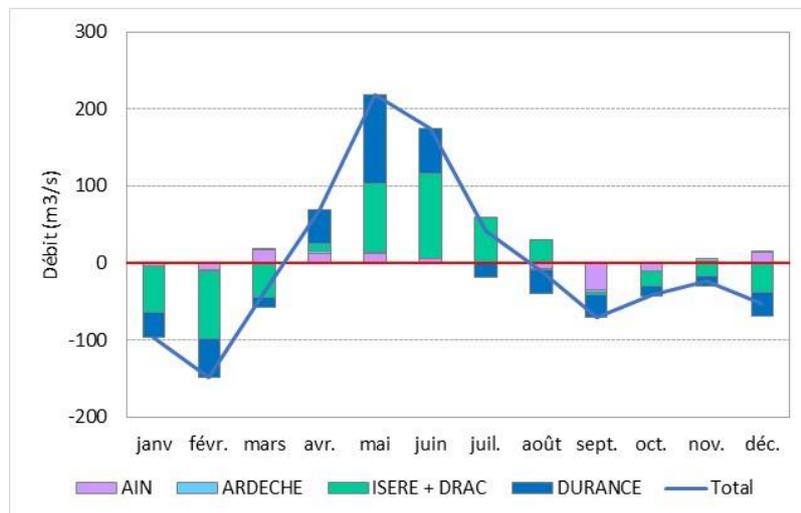
Les principaux ouvrages de stockage sur la partie française du bassin versant du Rhône et ayant un impact sur l'hydrologie du fleuve à pas de temps mensuel sont localisés sur les affluents du Rhône et non sur le fleuve Rhône, notamment sur les bassins de l'Ain (Vouglan), de l'Isère (Mont Cenis, Monteynard, Tignes...) et de la Durance (Serre-Ponçon, Sainte Croix...). Ces ouvrages totalisent un volume de stockage d'environ 4 300 Mm³ pour un volume de stockage utile estimé à 3 200 Mm³. Ils sont utilisés pour la production hydroélectrique et pour certains d'entre eux (notamment les ouvrages sur la Durance) pour le soutien d'étiage, l'irrigation et l'alimentation en eau potable.

A l'échelle du bassin du Rhône, la somme des influences des ouvrages de stockages français aboutit à des influences moyennes de signe positif (stockage prépondérant) d'avril à juillet, avec un stockage moyen maximal en mai de 220 m³/s. Pour le reste de l'année, le déstockage est prépondérant avec une valeur maximale en février de 148 m³/s.



La figure ci-dessous présente les influences moyennes mensuelles en débit fictif continu (en m³/s) des grands ouvrages de stockage sur la partie française du bassin du Rhône. Elle met en avant l'impact majeur à l'échelle du Rhône des influences des ouvrages de stockage de la Durance et de l'Isère, l'impact restreint des influences de l'Ain (excepté en septembre) et l'impact très limité des influences de l'Ardèche.

Figure 1. Bilan des influences mensuelles des barrages sur le bassin français du Rhône (moyenne 1980 – 2015)



Transferts hydroélectriques

Différents transferts d'eau ont lieu sur le bassin versant du Rhône pour la production d'hydroélectricité. Parmi ces transferts, deux entraînent des échanges (apports ou pertes) avec l'extérieur du bassin :

- Un transfert d'eau du bassin de la Loire vers celui du Rhône via l'Ardèche (centrale de Montpezat) qui entraîne l'apport de 176 Mm³/an en moyenne sur la période 2011-2020.
- Un transfert d'eau du bassin du Rhône vers la Méditerranée via l'étang de Berre (centrale de Saint-Chamas) qui entraîne la perte de 1030 Mm³/an en moyenne sur la période 2011-2020.

Bien que ces transferts continuent sur la période estivale, les mois de septembre à avril sont ceux où se concentrent les influences les plus importantes (voir Figure 2).

INDUSTRIE (HORS CENTRALES NUCLEAIRES DE PRODUCTION D'ENERGIE)

Les usages industriels sur le bassin correspondent soit à du refroidissement (dans ce cas la totalité de l'eau prélevée est restituée au milieu après usage), soit à d'autres usages économiques (secteur de la chimie notamment).

Sur les 613 Mm³ prélevés chaque année (prélèvement brut), une grande partie est restituée au fleuve. Les prélèvements nets liés aux usages industriels représentent 150 Mm³/an. Ils sont principalement localisés sur le Rhône en aval de Lyon et sur la Durance (volumes pour l'alimentation du Grand Port de Marseille notamment).

Les prélèvements industriels ont connu une baisse continue depuis la fin des années 80. Ces 10 dernières années, cette baisse se poursuit à un rythme de 2% à 3% par an. Les évolutions à venir des prélèvements industriels sont cependant difficiles à établir et pourraient faire l'objet de ruptures en fonction (entre autres) des stratégies nationales (ré-industrialisation ? etc).

REFROIDISSEMENT DES CENTRALES NUCLEAIRES DE PRODUCTION D'ENERGIE

Quatre centrales nucléaires de production d'énergie prélèvent de l'eau du Rhône pour alimenter leurs circuits de refroidissement, ce sont les centrales de Bugey, Saint Alban, Cruas et Tricastin.



Le refroidissement des CNPE implique le prélèvement de 11,6 milliards de m³/an (données EDF, 2019). Une très large partie de ce volume est restituée au fleuve. En effet, deux technologies sont utilisées pour le refroidissement³ :

- le circuit ouvert qui sollicite de forts débits pour un échange direct avec le fleuve. L'eau du fleuve est prélevée pour assurer le refroidissement des équipements. Une fois l'opération effectuée, l'eau est intégralement restituée au fleuve, à une température plus élevée.
- le circuit fermé qui utilise un plus faible volume. Le refroidissement de l'eau chaude issue du condenseur se fait par échange avec de l'air froid dans une grande tour réfrigérante atmosphérique appelée « aéroréfrigérant ». Une partie de l'eau est évaporée (et de l'eau est prélevée sur le fleuve pour la remplacer), le reste retourne dans le condenseur.

Le prélèvement net des centrales nucléaires est principalement lié au refroidissement en circuit fermé. Cela concerne la centrale de Bugey (deux tranches en circuit fermé), et la centrale de Cruas (quatre tranches en circuit fermé). On considère que les tranches en circuit ouvert ne consomment pas d'eau. Ainsi, si Tricastin et Saint Alban sont les plus gros préleveurs bruts, leur consommation effective est considérée comme nulle. En revanche, les circuits fermés de Bugey et Cruas consomment de l'eau par évaporation. Leurs prélèvements cumulés s'élèvent à 78 Mm³ en 2019 soit seulement 0,7% du volume brut prélevé.

CANAUX DE NAVIGATION

Les prélèvements des canaux de navigation servent pour compenser l'eau perdue en raison de l'évaporation sur la surface des canaux, de fuites et pour permettre le fonctionnement des écluses (l'eau dans ce cas est restituée en aval).

Le prélèvement brut total attribué aux canaux de navigation est de 550 Mm³/an (source : base de données Agence de l'eau). Ce prélèvement est localisé à 99 % dans le sous-bassin de la Saône, avec notamment le canal de Bourgogne, le canal du Rhône au Rhin et le canal du Centre.

Il existe peu de données permettant de quantifier précisément le prélèvement net des canaux. Les estimations faites sont donc des ordres de grandeur et aboutissent à un prélèvement net pour cet usage de 140 Mm³, soit un débit fictif continu d'environ 4 m³/s.

AUTRES USAGES

Des prélèvements existent sur le bassin pour d'autres usages : exploitation de sel, géothermie, drainage de sites industriels ou encore la réalimentation de milieux.

Le prélèvement brut associé à l'ensemble de ces prélèvements est proche de 200 Mm³ sur les années récentes. Leur prélèvement net est peu conséquent : 25 Mm³. Cela s'explique par un très fort taux de retour au milieu. Le principal impact est lié à l'export de volumes importants pour la réalimentation de milieux à l'extérieur du bassin versant (réalimentation du Lez via le canal BRL (réseau hydraulique régional Occitanie), canal de Marseille).

2.2 VISION D'ENSEMBLE ET BILAN DES PRELEVEMENTS

DES DIFFERENCES IMPORTANTES ENTRE PRELEVEMENTS BRUTS ET PRELEVEMENTS NETS

Si on exclut les prélèvements liés au refroidissement des centrales nucléaires de production d'énergie (CNPE) et le remplissage des ouvrages de stockage, **les prélèvements bruts sur la partie française du bassin versant du Rhône représentent un volume de l'ordre de 5,2 milliards de m³**. A cela s'ajoute 11,2 milliards de m³ pour le refroidissement des CNPE et 2,9 milliards de m³ stockés dans les barrages, **soit un prélèvement brut total de plus de 19 milliards de m³**.

³ Informations issues de la note d'EDF « Utilisation de l'eau dans les centrales nucléaires » de mars 2013.



Une part importante de ce prélèvement est restituée au milieu. En effet, près de 85% du prélèvement brut retourne finalement au fleuve (environ 40% si on exclut les prélèvements des CNPE et des ouvrages de stockage).

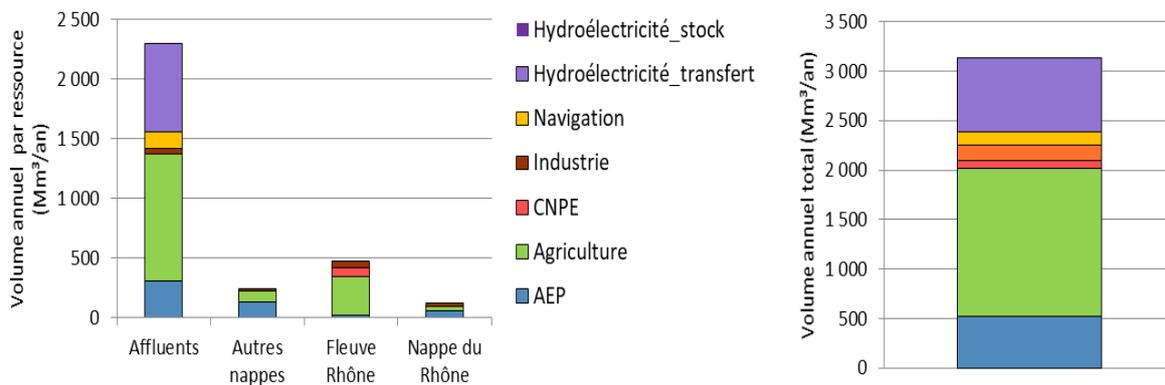
PRELEVEMENTS NETS POUR LES DIFFERENTS USAGES

Les prélèvements nets sur la partie française du bassin versant du Rhône tous usages confondus sont estimés à 3,1 milliards de m³/an. **Seuls 20% de ces prélèvements sont réalisés directement sur le fleuve, 80% se font sur les affluents du fleuve ou leurs nappes.**

L'agriculture (48% du prélèvement net annuel) et les transferts liés à la production hydroélectrique (24% du prélèvement net annuel) sont les deux usages qui mobilisent les volumes les plus importants. Le tableau et les graphiques ci-dessous présentent les prélèvements nets associés aux différents usages.

Tableau 1 : Prélèvements nets par usage sur le bassin du Rhône français

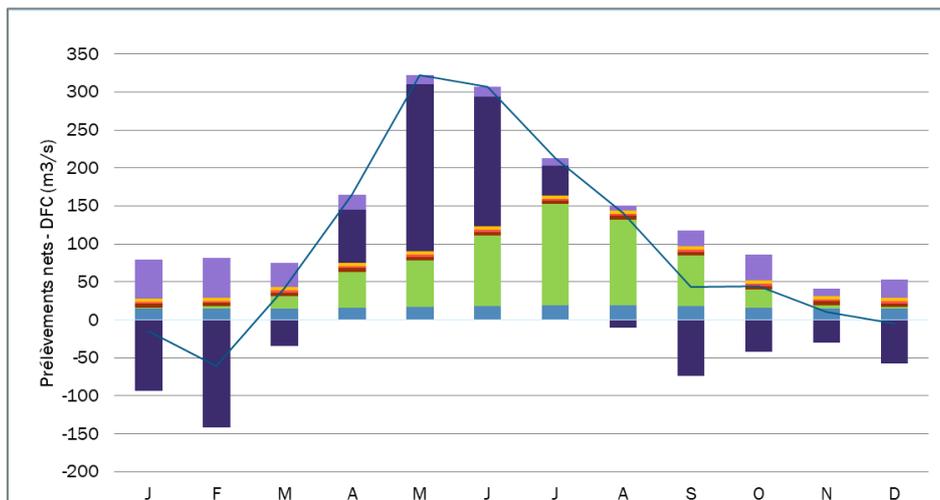
Mm3/an	Affluents	Autres nappes	Fleuve Rhône	Nappe du Rhône	Total général
AEP	310	130	20	60	520
Agriculture	1 060	90	320	30	1 500
CNPE	0	0	80	0	80
Industrie	50	20	50	30	150
Navigation	140	0	0	0	140
Hydroélectricité_stock	0	0	0	0	0
Hydroélectricité_transfert	740	0	0	0	740
Total général	2 300	240	470	120	3 130



La répartition des influences et l'importance relative des différents usages varient fortement au cours de l'année. Ainsi, le mois de mai est celui où l'on retrouve une influence anthropique maximale : de l'ordre de 323 m³/s, dont 220 m³/s sont liés au remplissage des ouvrages de stockage. Le mois de juillet est marqué par de forts prélèvements agricoles, qui représentent l'équivalent d'un débit de 133 m³/s.



Figure 2 : Influences nettes mensuelles sur la partie française du bassin versant du Rhône



DES PRELEVEMENTS PRINCIPALEMENT CONCENTRES SUR L'AVAL DU BASSIN

La Figure 3 spatialise les **prélèvements des usagers réalisant les principaux prélèvements à l'échelle du bassin du Rhône (partie française)**, soit :

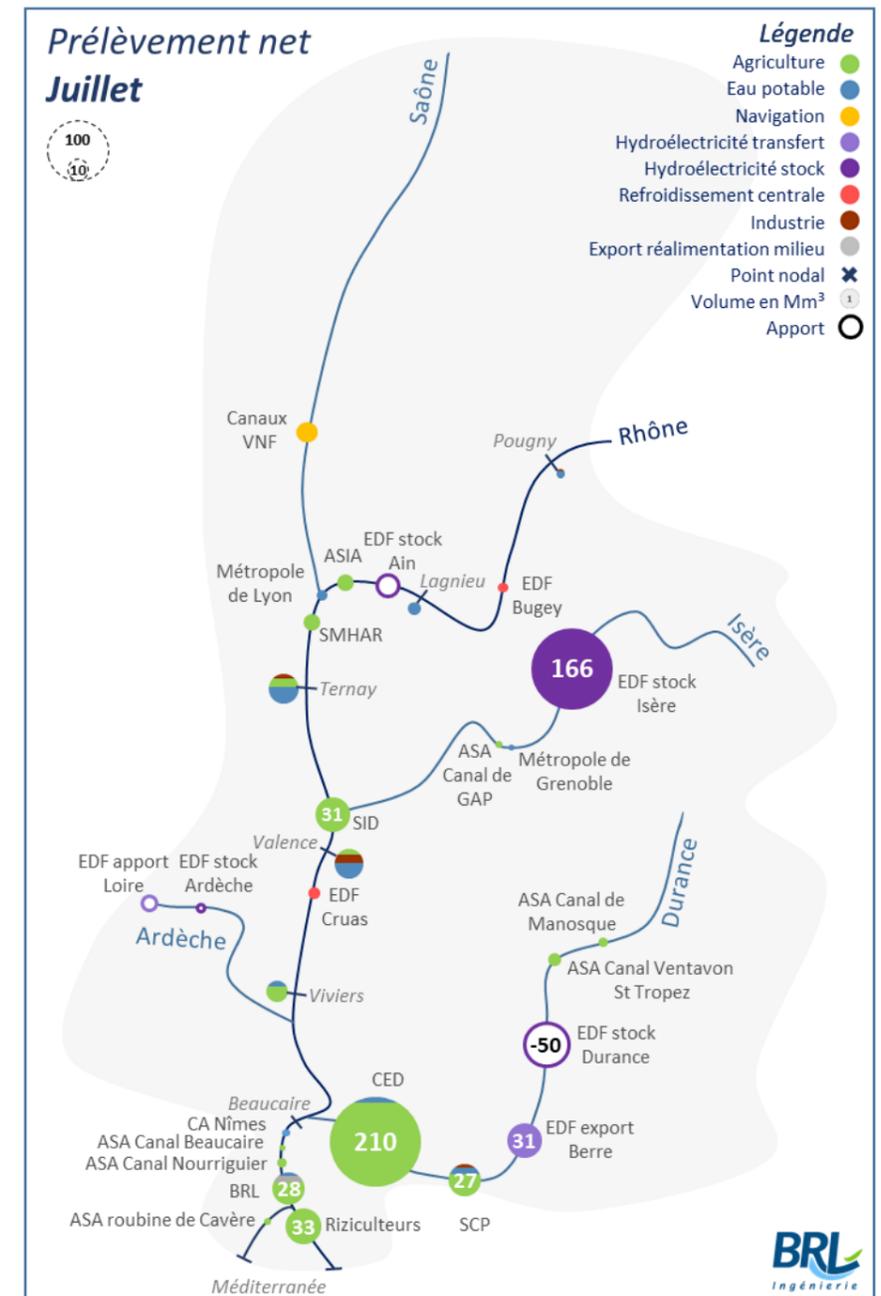
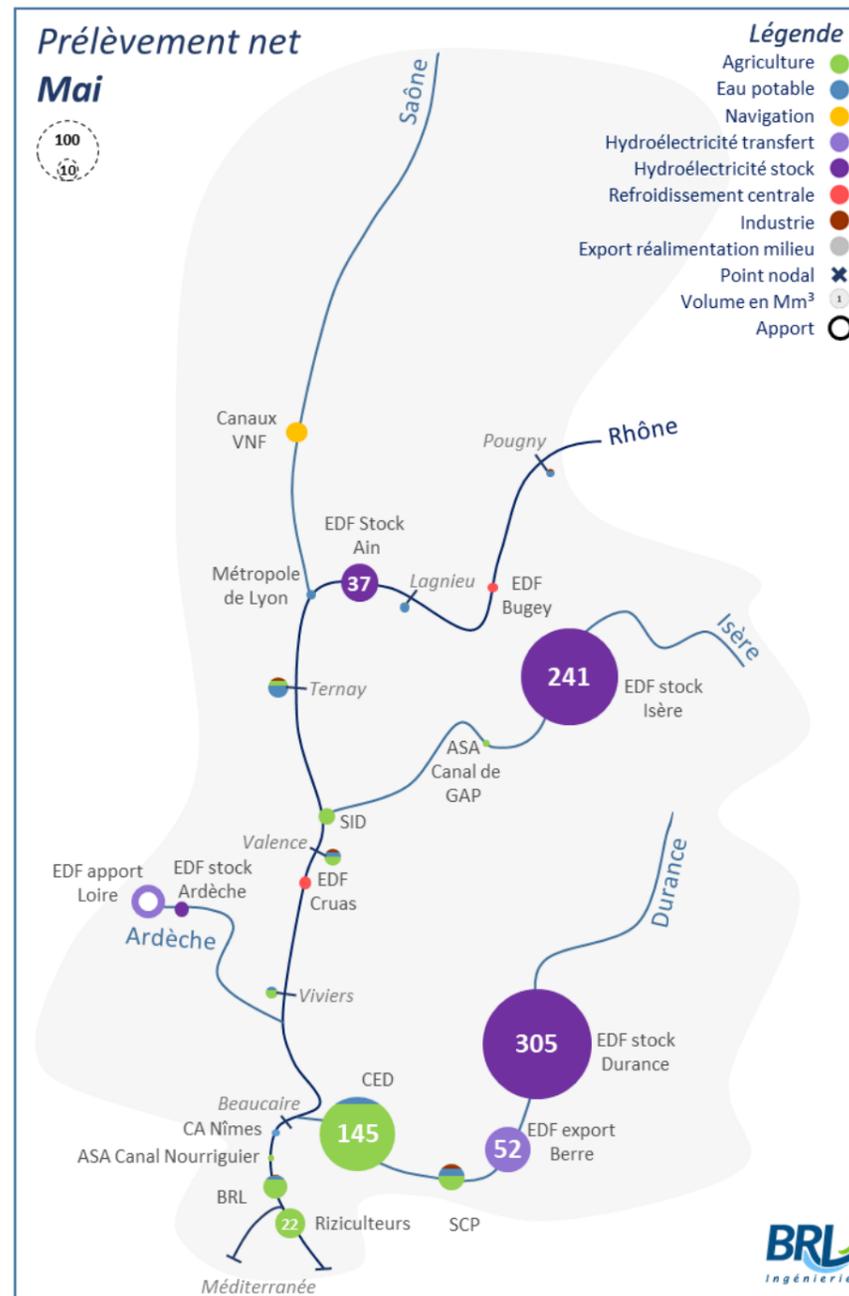
- Les 18 usagers ayant des prélèvements nets supérieurs à 10 Mm³ annuellement. Pour les prélèvements supérieurs à 50 Mm³, la valeur est précisée sur la figure.
- Les 18 usagers ayant des prélèvements nets supérieurs à 1 Mm³ lors du mois de plus fort prélèvement (mai). Pour les prélèvements supérieurs à 20 Mm³, la valeur est précisée sur la figure.
- Les 25 usagers ayant des prélèvements nets supérieurs à 1 Mm³ lors du mois de plus fort prélèvement agricole (juillet). Pour les prélèvements supérieurs à 20 Mm³, la valeur est précisée sur la figure.

Le prélèvement réalisé par les autres usagers est calculé à l'échelle des sous tronçons séparant les points nodaux du bassin versant du Rhône et représenté par un figuré unique à l'aval de chaque tronçon.

Ces figures montrent que les principaux préleveurs du bassin du Rhône concentrent près de 90% du prélèvement net sur le bassin versant et que la majorité d'entre eux se situe à l'aval du bassin versant, notamment sur la Durance. Mensuellement, l'influence des ouvrages hydro-électriques est également conséquente. Certains usagers agricoles n'apparaissent parmi les principaux préleveurs que dans les mois de fort prélèvement.

NB : L'échelle utilisée d'une part pour les prélèvements annuels et d'autre part pour les prélèvements des mois de mai et juillet est différente.

Figure 3 : Principaux préleveurs nets du bassin versant





3 EVOLUTIONS PASSEES ET FUTURES DU CLIMAT SUR LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE

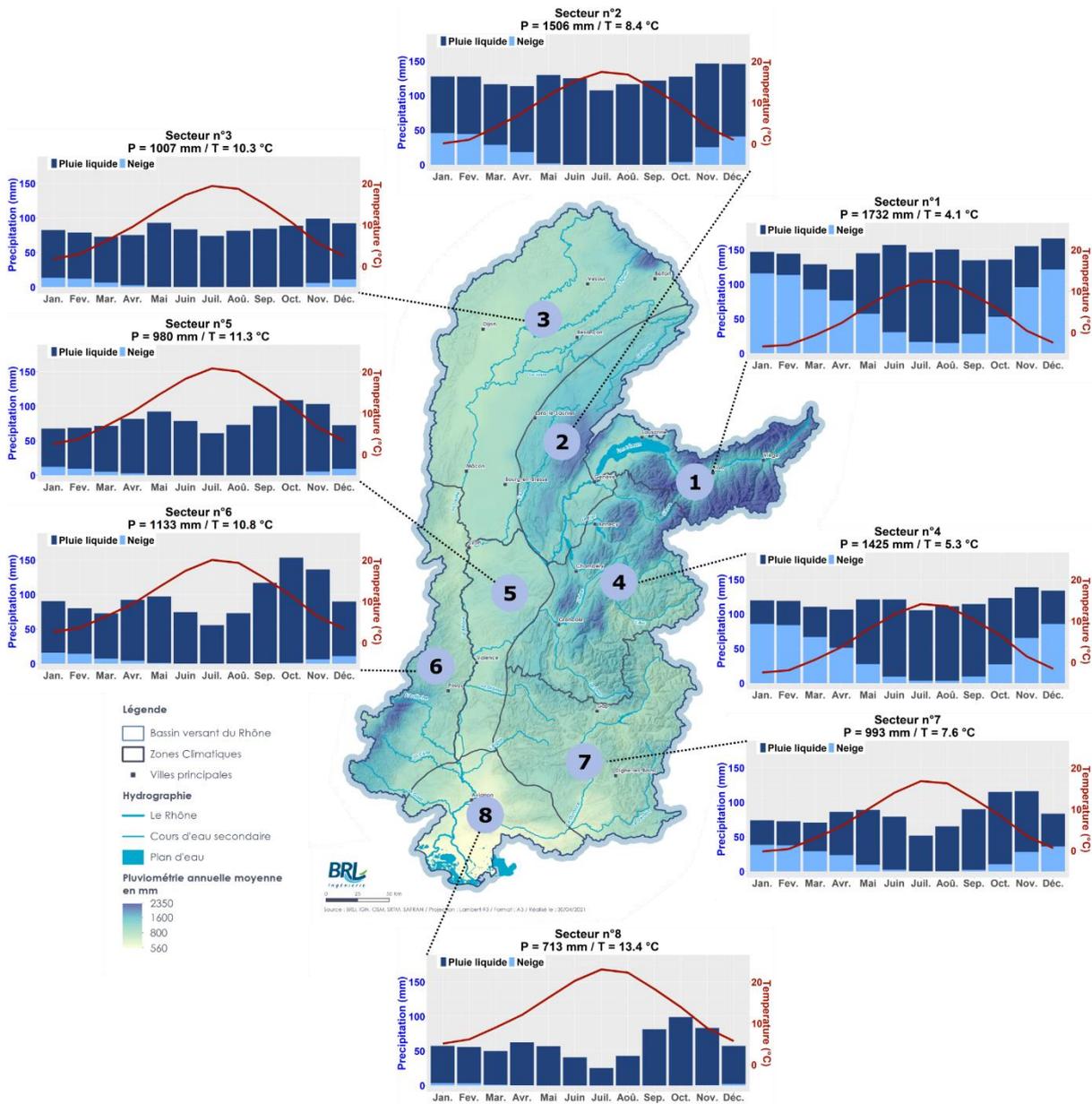
3.1 QUELLES EVOLUTIONS DU CLIMAT DEPUIS 1960 ?

La superficie importante du bassin du Rhône et sa complexité orographique aboutissent à de fortes hétérogénéités spatiales de ses caractéristiques climatiques (précipitations, températures, évapotranspiration potentielles).

La vallée du Rhône et le delta du Rhône font face à des températures moyennes annuelles élevées (caractéristiques du climat méditerranéen) qui s'accompagnent de précipitations moyennes annuelles plus faibles (750 à 1000 mm/an) que sur le reste du bassin. La partie cévenole du bassin du Rhône et les massifs du Jura et des Nord-Alpes sont soumis à des précipitations moyennes annuelles plus marquées que la moyenne du bassin (entre 1500 et 2000 mm/an). Pour ces secteurs, la répartition des précipitations dans l'année et la forme de ces précipitations (liquides ou solides) varient considérablement. Les massifs et notamment le massif alpin est soumis à des températures moyennes plus faibles que la moyenne du bassin avec des précipitations neigeuses marquées. Les cartes ci-dessous présentent les températures et les précipitations annuelles (moyenne 1960-2021) et illustrent l'hétérogénéité des variables climatiques sur le bassin versant du fleuve.



Figure 4. Précipitations moyennes annuelles sur le bassin du Rhône pour la période 1960-2020 et diagrammes ombrothermiques des différents secteurs analysés.



DES TEMPERATURES DE L'AIR EN HAUSSE

L'analyse des données disponibles pour différentes variables climatiques met en évidence les évolutions déjà visibles des différents paramètres climatiques au cours des décennies passées.

On constate en effet **une augmentation généralisée des températures de l'air**, particulièrement marquée depuis le début des années 1980. A l'échelle du bassin, cette augmentation équivaut à une hausse de la température moyenne annuelle de 0,3°C par décennie (soit +1,8 °C sur la période 1960-2020).

L'été est la période de l'année durant laquelle l'augmentation constatée est la plus forte (+ 2,7°C sur la période 1960-2020).



Certaines parties du bassin sont plus fortement touchées par cette hausse. On note notamment sur la moyenne vallée du Rhône (entre Lyon et Valence) et en rive droite du Rhône, à l'aval de la confluence avec la Saône des augmentations de températures supérieures à 2,5°C. L'extrême nord-est du secteur « Vallée de la Saône et contreforts des Vosges et du Jura (secteur 3) est également concerné par des augmentations de températures particulièrement importantes.

A l'inverse, les augmentations sur certains territoires (sud des Alpes, massif du Jura) semblent moins marquées, avec des augmentations inférieures à 1°C.

Tableau 2 : Evolution des températures de l'air moyennes par saison et par secteur (tendance linéaire entre 1960 et 2020)

EVOLUTION EN °C SUR LA PERIODE 1960-2020	PRINTEMPS	ETE	AUTOMNE	HIVER	ANNEE
SECTEUR 1 : BASSIN DU LAC LEMAN	1,8	2,4	1,0	1,0	1,7
SECTEUR 2 : JURA ET HAUTE VALLEE DU RHONE	1,4	2,2	0,3	0,3	1,3
SECTEUR 3 : VALLEE DE LA SAONE ET CONTREFORTS VOSGES ET JURA	1,8	2,6	1,0	1,0	1,8
SECTEUR 4 : NORD-ALPES (HORS BV DU LEMAN) ET NORD-CONTREFORTS DES ALPES	2,0	2,5	1,2	1,2	1,8
SECTEUR 5 : MOYENNE VALLEE DU RHONE	2,5	3,2	1,8	1,8	2,4
SECTEUR 6 : INFLUENCE CEVENOLE ET RIVE DROITE DU RHONE EN AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC LA SAONE	2,9	3,6	1,9	1,9	2,6
SECTEUR 7 : SUD-CONTREFORTS DES ALPES, ALPES CENTRALES ET SUD-ALPES	1,9	2,6	1,3	0,7	1,5
SECTEUR 8 : BASSE VALLEE DU RHONE ET DELTA DU RHONE	1,7	2,7	1,3	1,3	1,7
BASSIN VERSANT DU RHONE	2,0	2,7	1,1	1,1	1,8

Conséquence direct de la hausse des températures, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a également nettement augmenté (+23% sur la période 1960-2020).

La température de l'eau du fleuve, en grande partie conditionnée par la température de l'air, a également crû de façon significative au cours des dernières décennies. Sous l'effet combiné du réchauffement climatique et de l'implantation des centrales nucléaires le réchauffement moyen de l'eau du fleuve depuis la fin des années 1970 est estimé de +2,2°C à +4,5 °C en fonction des stations de mesure.

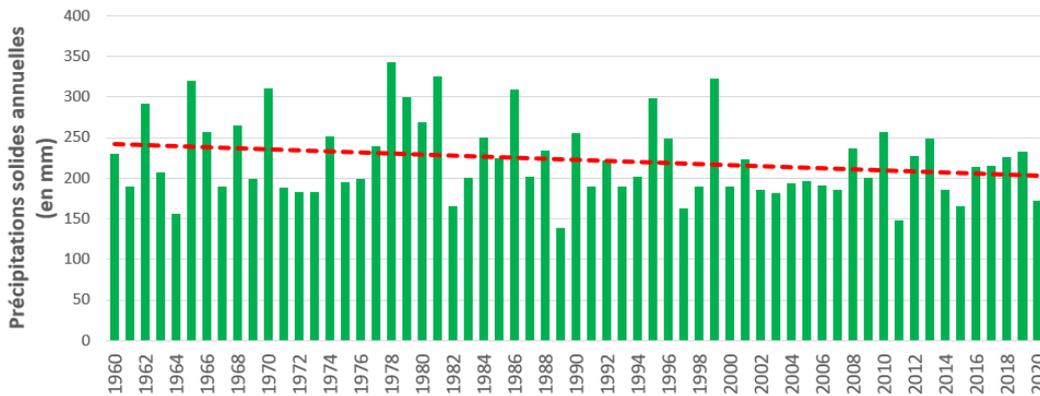
UNE EVOLUTION DES PRECIPITATIONS PRINCIPALEMENT MARQUEE PAR UN CHANGEMENT DE LA REPARTITION PLUIE-NEIGE

Les analyses réalisées sur les précipitations totales (solides + liquides) **ne mettent pas en évidence d'évolution significative des précipitations totales annuelles ni saisonnières**, quel que soit le secteur considéré.

On constate en revanche une évolution de la forme des précipitations : à précipitations totales inchangées le bassin reçoit de moins en moins de précipitations solides au profit des précipitations liquides.



Figure 5 : Évolution de la précipitation solide annuelle moyenne (en mm) sur la période 1960-2020 à l'échelle du bassin du Rhône



Source : graphique BRLi à partir des données SAFRAN de Météo France

D'un point de vue hydrologique ces modifications sont importantes puisque les stockages d'eau sous forme de manteau neigeux se réduisent alors que les précipitations sous forme liquide en hiver risquent d'être plus importantes et de contribuer davantage aux écoulements durant cette période.

3.2 CLIMAT FUTUR : QUELLES PERSPECTIVES A COURT ET MOYEN TERME ?

Les projections de climats futurs reposent sur différentes hypothèses et choix méthodologiques : construction de scénarios d'émission de gaz à effet de serre, simulations climatiques à échelle globale, régionalisation des projections et correction des biais constatés à l'échelle locale.

Les projections climatiques utilisées correspondent au jeu de données DRIAS-2020, mis à disposition par Météo-France. Elles sont issues des projections CMIP5, régionalisées via des modèles de climat régionaux et débiaisés statistiquement sur la France, pour les scénarios d'émission RCP4.5 (stabilisation des émissions à horizon 2100) et RCP8.5 (augmentation des émissions en l'absence de politique climatique). Ces projections sont pour en grande partie communes avec l'ensemble de projections du projet Explore2 dans lequel leur positionnement relatif par rapport aux modélisations plus récentes CMIP6, les hypothèses sous-jacentes aux simulations du climat, etc. sont discutés.

TOUS LES MODELES PROJETTENT UNE AUGMENTATION DES TEMPERATURES DE L'AIR

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la température annuelle moyenne sur le bassin versant du Rhône jusqu'à 2100 selon les deux scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre retenus (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les panaches intègrent pour chaque année l'ensemble des valeurs des modèles climatiques (10 valeurs par années). Les valeurs médianes des résultats des projections sont représentées sous la forme d'une courbe issue d'une moyenne glissante des médianes sur 20 années afin de mettre en évidence l'évolution à long terme de la température. Les données SAFRAN sur la période 1960 – 2020 sont également représentées sur cette figure. Les boîtes à moustaches sur la partie droite de la figure représentent la variabilité inter-modèle des valeurs moyennes des températures pour les trois horizons.

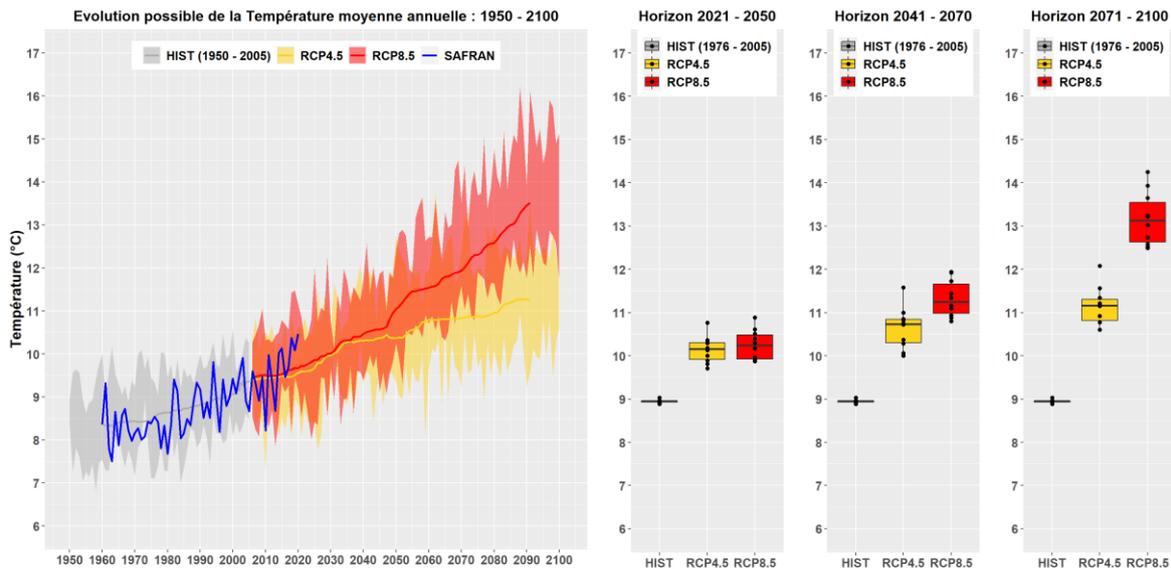
Entre 2005 et 2040, les résultats varient relativement peu entre les deux scénarios, les températures dépendent essentiellement des émissions de gaz à effet de serre déjà réalisées.



Les stratégies d'atténuation qui pourraient être mises en place aujourd'hui auraient un impact notoire sur les températures à partir de 2050, date à laquelle on relève un décrochage notable entre les deux courbes. **A l'horizon 2055 (2041 – 2070), les résultats suivants ressortent à l'échelle du bassin du Rhône :**

- **Dans le cas d'un scénario 4.5 : Une augmentation de + 1.8°C** (de + 1,10°C à + 2,6°C selon les projections) par rapport à la période de référence 1976 – 2005 ;
- **Dans le cas d'un scénario 8.5 : Une augmentation de + 2.3°C** (1,90°C à 3,0°C selon les projections) par rapport à la période de référence 1976 – 2005.

Figure 6 : Évolution de la température annuelle moyenne sur le bassin du Rhône (1950-2100). Les projections 2005 à 2100 sont issues des 10 projections climatiques retenus pour cette étude



Sources : graphes BRLi à partir des données DRIAS 2020

Quel que soit le mois de l'année, tous les modèles convergent vers une augmentation des températures entre la période de référence et les deux horizons étudiés. **La médiane inter-projection laisse envisager un réchauffement plus important les mois d'été avec cependant une forte variabilité inter-projection.**

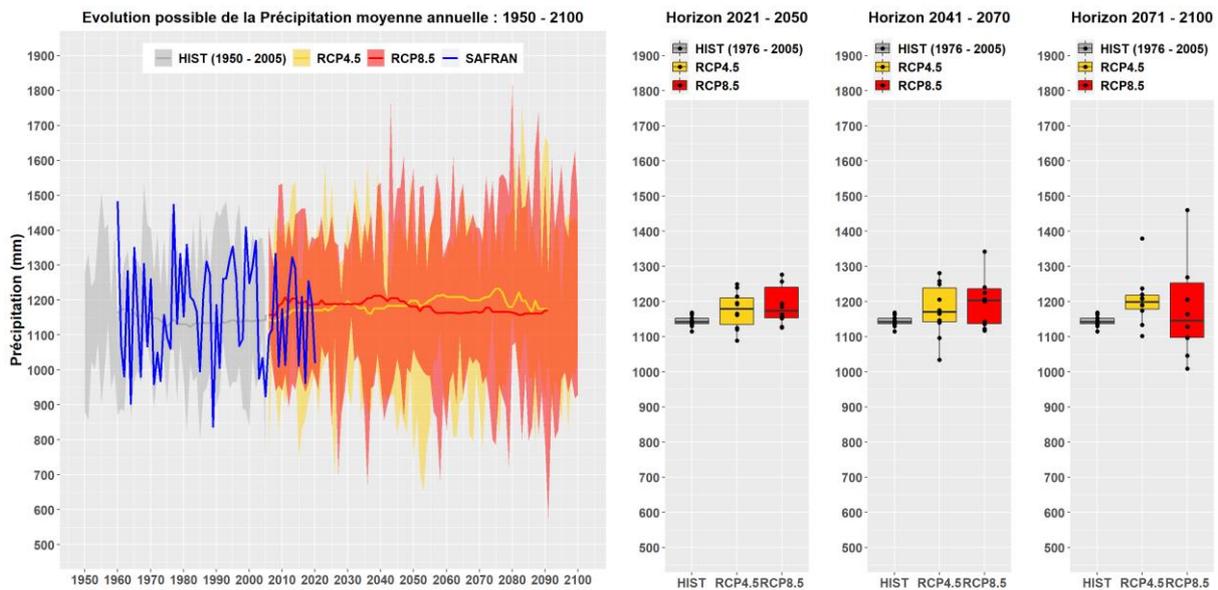
Les augmentations de températures tendent à être plus importantes sur le massif alpin que sur le reste du bassin du Rhône. Les différences restent néanmoins très faibles (de l'ordre de 0,5°C au maximum) mais peuvent être d'une grande importance dans l'impact du cycle hydrologique sur cette région dont le fonctionnement est à dominance à nivale. Ces hausses de températures entraînent une chute du nombre de jours de gel (diminution de 30 à 50 jours par an pour le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2055) et une remontée de l'isotherme 0°C en altitude. Ces modifications impliqueront inévitablement un avancement dans la saison du début et de fin de la fonte du manteau neigeux en zone montagneuse.

DIVERGENCE DES PROJECTIONS QUANT A L'EVOLUTION DES PRECIPITATIONS

Les projections climatiques pour les précipitations sont beaucoup moins tranchées. La figure ci-dessous représente l'évolution possible des précipitations totales futures sur la période 2021-2100 à l'échelle du bassin du fleuve, selon les différentes projections climatiques issues du DRIAS-2020. Elle intègre également les simulations des modèles climatiques sur la période de référence (1950-2005) ainsi que les données observées à partir de produit SAFRAN (1960-2020).



Figure 7 : Évolution de la précipitation annuelle moyenne sur le bassin du Rhône (1950-2100). Les projections 2005 à 2100 sont issues des 10 projections climatiques retenus pour cette étude.



Source : graphes BRLi à partir des données DRIAS 2020

A l'échelle annuelle, il n'y a pas, dans les informations des simulations climatiques, de tendance à l'augmentation ou à la diminution des précipitations moyennes et ce, jusqu'à l'horizon 2100 pour le bassin du Rhône. En effet, les différentes projections divergent, et ce, pour tous les horizons et pour tous les scénarios. Ce constat se retrouve également pour la majorité des secteurs climatiques distingués sur le bassin, à l'exception de la haute vallée du Rhône (secteur 2) et de la vallée de la Saône (secteur 3). Sur ces deux secteurs, pour le scénario RCP8.5, l'ensemble des projections climatiques étudiées concluent à une hausse des précipitations annuelles (+6% à +8% en médiane) à l'horizon 2041-2070.

A l'échelle mensuelle, on retrouve également cette divergence des projections.

- Pour un horizon proche (2021-2050) et pour les deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5), il n'y a pas de tendance claire à l'augmentation ou la diminution des précipitations puisque les évolutions des différentes projections divergent.
- Pour un horizon à moyen terme (2041-2070), les projections semblent s'accorder sur des hausses de précipitations en hiver. Les médianes des projections en juillet et août tendent à une baisse des précipitations mais certaines projections divergent.

Si l'évolution des précipitations totales reste incertaine, les tendances constatées au cours des dernières décennies sur l'équilibre entre précipitations solides et précipitations liquides se confirment. Les projections climatiques anticipent une baisse des précipitations solides (neige) au profit des précipitations liquides. Cette baisse des précipitations solides annuelles est très importante et est directement liée à la hausse des températures. Pour les quatre secteurs à dominante montagneuse, la baisse des précipitations solides annuelles varierait entre - 16 % (secteur n°1) et - 29 % (secteur n°2) dans le cadre d'un scénario RCP 4.5 et entre - 21 % (secteur n°1) et - 40 % (secteur n°2) dans le cadre d'un scénario RCP 8.5.



IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FONTE DES GLACIERS

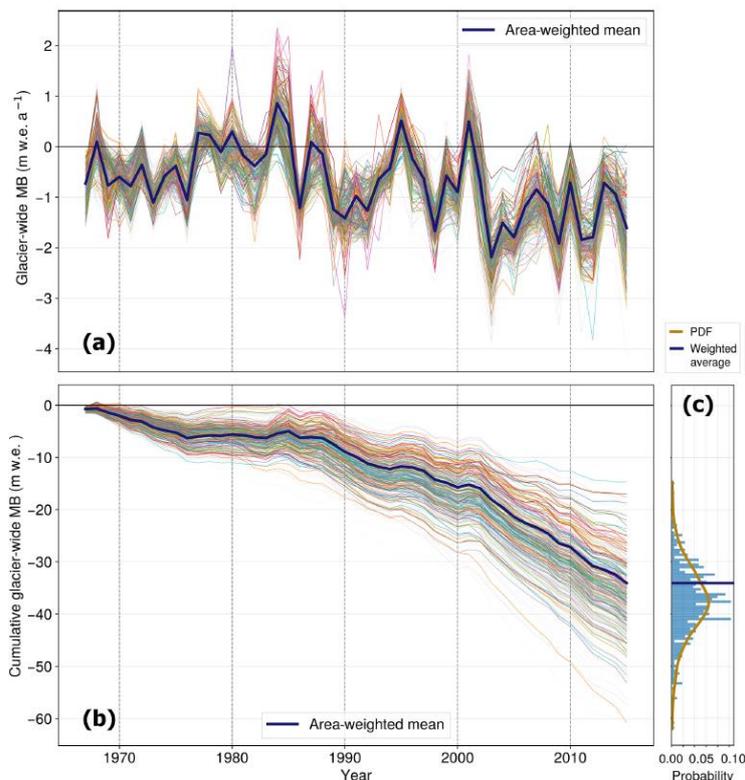
Le processus de fonte des glaciers sur le bassin du Rhône est déjà à l'œuvre depuis plusieurs décennies. Cette fonte du stock glaciaire occasionne de façon transitoire une augmentation des débits aux cours d'eau. La bibliographie indique cependant que pour la majorité des glaciers du bassin versant du Rhône, **la période de contribution maximale de la fonte des glaciers au débit est déjà dépassée ou est en train de l'être.**

Différents travaux récents ont permis d'estimer l'évolution des masses glaciaires, que ce soit à l'échelle du globe (Hugonnet, 2022 ; Hugonnet, 2023 sur la période 2000 - 2020) où à l'échelle des Alpes française (Bolibar (2020) sur la période 1967 – 2015).

Les travaux de Bolibar (2020) traitant 661 glaciers des Alpes françaises aboutissent à une évolution moyenne régionale pondérée en fonction de la superficie de la masse des glaciers de $-0.69 \pm 0,21$ m.w.e.a⁻¹⁴, soit sur la période une perte de masse moyenne estimée de 33 m.w.e, correspondant donc à une perte d'épaisseur de 33 mètres équivalent en eau sur la période. Cette évolution est légèrement négative dans les années 1970, moins marquée dans les années 1980 mais devient très fortement négative pour les décennies les plus récentes. Bolibar (2020) met en avant un changement brutal en 2003, correspondant à la vague de chaleur remarquable ayant touchée l'Europe cette année là.

La figure ci-dessous (Bolibar, 2020) présente la perte de masse glaciaire (par année et cumulée sur la période 1967 – 2015) pour les 661 glaciers des Alpes françaises étudiés.

Figure 8. (a) Bilan de masse annuel et (b) Bilan de masse cumulé des glaciers alpins français (661) pour la période 1967 – 2015. (c) Distribution et fonction de densité de probabilité de la masse cumulée sur la période 1967-2015 sur les 661 glaciers du jeu de données.



⁴ m.w.e.a-1 : Unité, en entier le "mètre d'équivalent en eau par an", utilisée pour décrire l'évolution annuelle de la masse d'un glacier par l'épaisseur d'une masse égale ayant la densité de l'eau. 1 kg d'eau liquide a une étendue verticale de 1 mm lorsqu'elle est répartie uniformément sur une surface horizontale de 1 m²



Les massifs les plus affectés par ses pertes glaciaires sont les massifs de l'Ubaye, Champsaur, Chablais et de la Haute-Maurienne, avec des évolutions cumulées de pertes de masse de l'ordre de 41 à 46 m.w.e pour sur la période 1967 – 2015. Ces massifs présentent les glaciers situés aux altitudes les plus basses (Chablais, Champsaur) où sont localisés dans les parties les plus au sud (Ubaye).

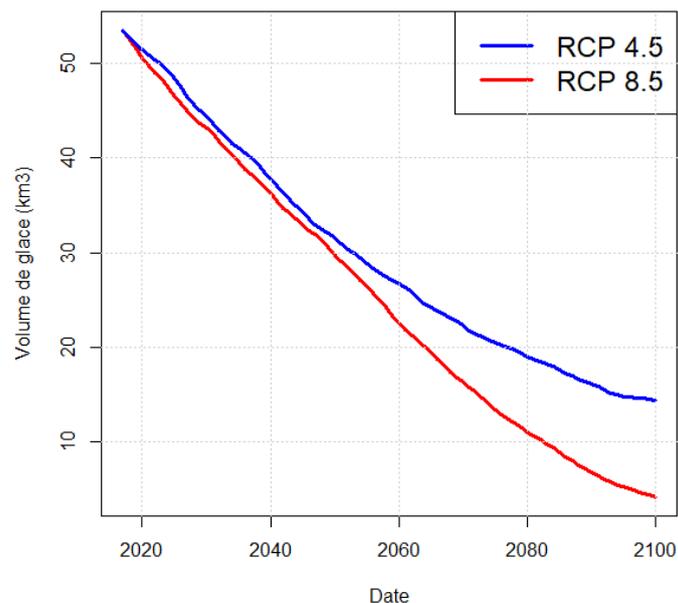
De façon générale, les glaciers des Alpes françaises présentent des pertes de masses plus importantes que les glaciers suisses ou autrichiens, du fait de leur position plus méridionale et de l'influence climatique méditerranéenne (Bolibar, 2020).

Les travaux d'Hugonnet (2022) proposent une méthodologie nouvelle pour l'estimation des masses glaciaires, basée sur une meilleure estimation de la vitesse d'écoulement des glaciers (variable importante dans l'estimation de l'évolution des masses de glaciers). Ces travaux ont été menés sur l'ensemble des glaciers mondiaux sur la période 2000 – 2020 grâce aux nombreuses images satellitaires désormais disponibles (Sentinel 1, Sentinel 2, Landsat-8, Landsat-9, etc.). Les résultats de ces travaux mettent en avant un recul important de la masse des glaciers européens sur la période 2000 – 2020, avec une perte de l'ordre de 30% de la masse des glaciers sur cette période. Avec l'Asie du Nord et la zone intertropical, il s'agit des pourcentages de perte de masse les plus élevés.

La fonte glacière est amenée à se poursuivre au cours des décennies à venir. Les scénarios climatiques couplés à de la modélisation hydrologique représentant les processus glaciaires montrent qu'une grande partie de la masse de glace des Alpes suisses aura disparu d'ici la fin du siècle selon un scénario de type RCP 8.5 (disparition de 95% des volumes de glace présents en 2017) (Hydro-CH, 2018).

Les travaux de Zekollari et al. (2019), fournissent une estimation des masses glaciaires sur l'ensemble des Alpes. Les données correspondant aux glaciers du bassin du Rhône ont été extraites dans le cadre de l'étude. Nous présentons ci-dessous une estimation de l'évolution des masses glaciaires sur le bassin versant du Rhône pour les scénarios d'émission de GES RCP 4.5 et RCP 8.5.

Figure 9. Evolution du volume de glace des glaciers intégrés dans le bassin versant du Rhône (d'après les données fournies dans Zekollari et al., 2019).

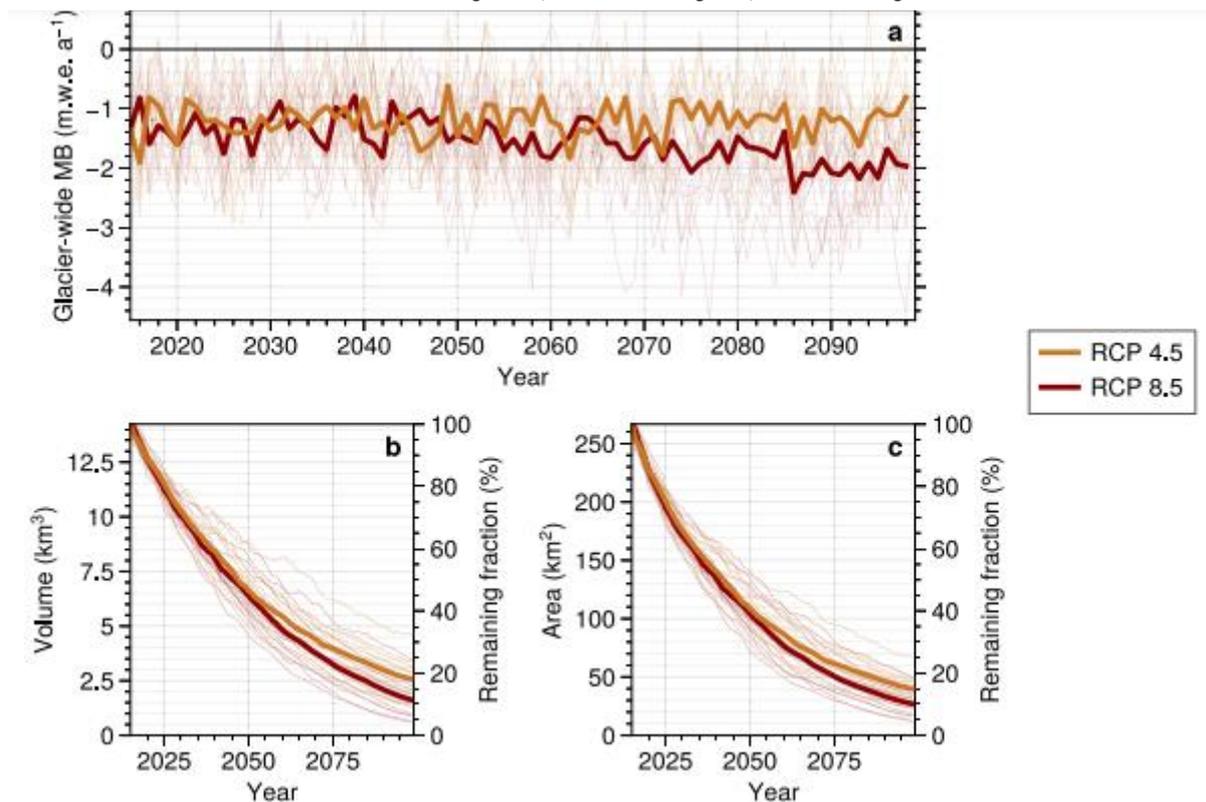




Les résultats de ces travaux sont en cohérence avec les résultats des travaux de Bolibar (2020), qui indique que la plupart des volumes de glace des Alpes européennes sera perdue d'ici la fin du XXI^e siècle, indépendamment des scénarios climatiques futurs. Bolibar (2020) estime des pertes moyennes de volume des glaciers de 80% et 88% dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Ce retrait glaciaire à l'échelle des Alpes françaises, se traduit en évolution de superficie d'emprise, d'une situation initiale (2015) correspondant à 250 km² de surface englacée à 30 km² à 40 km² à l'horizon 2100 suivant les scénarios (respectivement RCP 4.5 et RCP 8.5)

D'ici la fin du XXI^e siècle, les Alpes françaises pourraient être en grande partie libres de glace, avec des glaciers ne subsistant que dans les massifs du Mont-Blanc et du Pelvoux.

Figure 10. Bilan de masse et géométrie à l'échelle des glaciers au 21^e siècle des glaciers des Alpes françaises. a Bilan de masse annuel des glacier, b Volume de glace, c Surface englacée.



Source: Nonlinear sensitivity of glacier mass balance to future climate change unveiled by deep learning, Bolivar 2022



4 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DU FLEUVE

4.1 EVOLUTIONS DES DEBITS AU COURS DES DERNIERES DECENNIES

L'évolution des débits des cours d'eau du bassin versant du Rhône a été étudiée à deux niveaux :

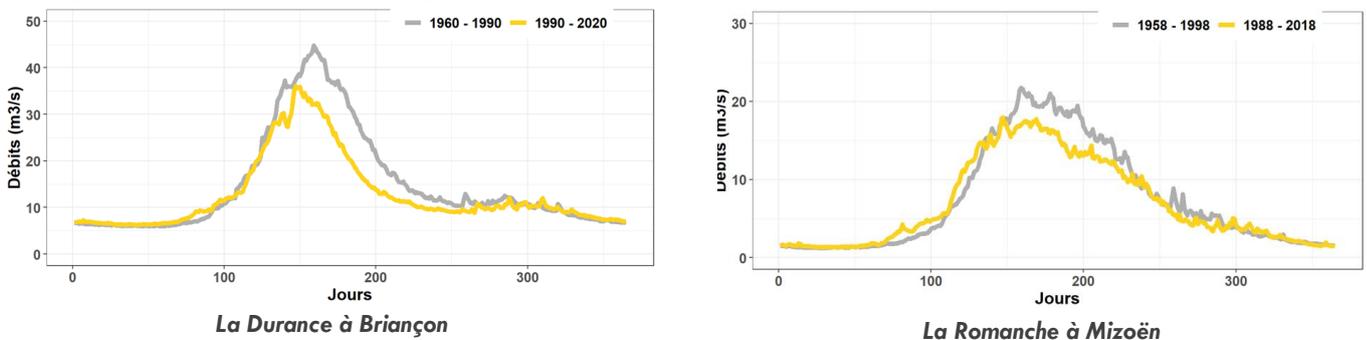
- A l'échelle de petits sous-bassins (bassins méso-échelle, de 100 à 1000 km²) peu ou pas influencés. Vingt-cinq bassins versants ont été sélectionnés et ont été répartis en trois classes (bassins de plaine, bassins alpins, bassins pré-alpins) en fonction de leurs régimes hydrologiques.
- Au niveau des points de référence sur le fleuve et sur ses principaux affluents (Ain, Saône, Isère, Durance...).

Globalement, l'analyse des bassins versants méso-échelle met en avant une diminution des débits estivaux sur ces têtes de bassin ainsi qu'une avancée du pic de fonte nivale. En hiver, les précipitations tendent à davantage prendre la forme de précipitations liquides, entraînant une augmentation des écoulements hivernaux en rivière.

Pour les bassins alpins intégrant des surfaces glaciaires, le pic de fonte estival semble être plus réduit sur la période récente. Une des hypothèses peut être le recul glaciaire important et le dépassement du «pic water» (la contribution de la fonte glaciaire dans l'écoulement en rivière tendrait à diminuer) (voir Figure 11).

20

Figure 11 : Comparaison des hydrogrammes moyens journaliers d'une période historique et d'une période récente



Le phénomène de diminution des débits estivaux à l'échelle des bassins versants de méso-échelle, s'observe également à l'échelle des affluents majeurs du Rhône, avec une diminution des débits estivaux de 18 % pour l'Isère et 23 % pour la Durance (en hydrologie désinfluencée).

Le Tableau 3 présente les évolutions calculées au niveau des stations nodales du Rhône ainsi que sur les principaux affluents entre deux périodes et la significativité des tendances (test de Mann-Kendall avec un seuil de significativité à 5%) calculées sur la période complète.



Tableau 3 : Résumé des évolutions (significatives ou non du test de Mann-Kendall avec un seuil de significativité à 5 sur la période complète%) aux stations nodales du Rhône et pour quelques stations de référence des principaux affluents du Rhône.

	Période d'analyse		Q Annuel	QMNA	VCN10	Q Hiver	Q Printemps	Q Été	Q Automne
	Arve à Arthaz	1961	2020	-11%	-11%	-6%	-4%	-8%	-19%
Bourbre à Tignieu	1964	2020	-1%	-8%	-14%	11%	-13%	-12%	8%
Ain à Chazey	1960	2020	-5%	-16%	0%	3%	-17%	-14%	4%
Saône à Couzon au Mtd_Or	1960	2020	-5%	-13%	-15%	-2%	-13%	-14%	5%
Isère à Beaumont	1960	2020	-6%	-5%	-4%	6%	-7%	-15%	-2%
Durance à Cadarache	1970	2016	-5%	-14%	-22%	2%	-8%	-16%	5%
Rhône à Pougny	1960	2020	-1%	4%	-8%	7%	-2%	-7%	0%
Rhône à Lagnieu	1960	2020	-2%	-5%	-5%	7%	-6%	-7%	2%
Rhône à Ternay	1960	2020	-5%	-3%	-2%	0%	-12%	-11%	2%
Rhône à Valence	1960	2020	-6%	-8%	-9%	1%	-13%	-14%	1%
Rhône à Viviers	1960	2020	-5%	-6%	-7%	2%	-11%	-12%	2%
Rhône à Beaucaire	1960	2020	-4%	-5%	-3%	2%	-12%	-13%	6%

Tendance positive significative

Tendance négative significative

X% : écart entre les périodes 1960-1990 et 1990-2020

Même si seules quelques tendances significatives ont été mises en avant dans les tests statistiques, l'ensemble des affluents (en hydrologie influencée) est caractérisé par une diminution des métriques d'étiage (QMNA, VCN10) entre la période ancienne et la période récente (- 5 % à - 14 % pour le QMNA ; jusqu'à -22 % pour le VCN10).

Pour le Rhône à Pougny et à Lagnieu, on retrouve les mêmes phénomènes que ceux observés sur les bassins de méso-échelles alpines et préalpines. Les débits estivaux tendent à être plus faibles (- 7%) et les débits hivernaux plus forts (+ 7%). Il faut préciser que les analyses sur les stations du Rhône intègrent l'ensemble des influences anthropiques.

Pour l'ensemble des six points nodaux, les tendances à la baisse des débits estivaux sont significatives, on conclut à une diminution comprise entre 7% (Pougny et Lagnieu) et 14% (Rhône à Valence) des débits estivaux entre la période ancienne et la période récente.

Comme pour les affluents majeurs, seules quelques tendances significatives ont été mises en avant dans les tests statistiques, cependant pour cinq des six points nodaux (excepté Pougny), on note une diminution des métriques d'étiage (QMNA, VCN10) entre la période ancienne et la période récente (- 3 % à - 8 % pour le QMNA ; -2 à -8 % pour le VCN10).

Les tendances observées et présentées restent localement sujettes à caution, du fait de l'homogénéité parfois discutable des données hydrométriques de certaines stations (évolution de l'exploitation des stations).

4.2 EVOLUTIONS POSSIBLES DES DEBITS DU FLEUVE

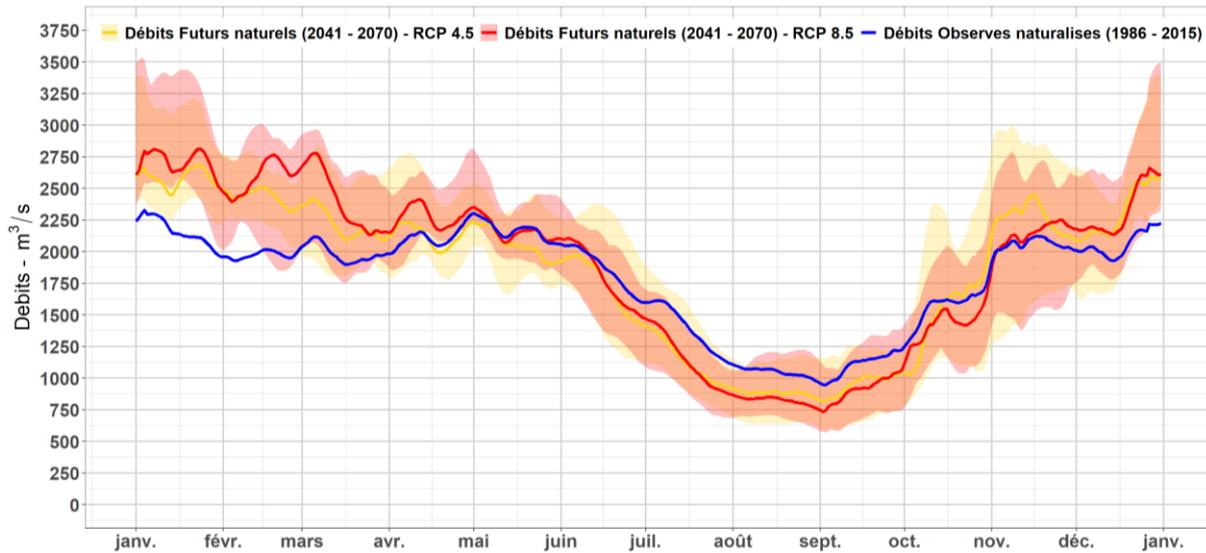
Les simulations climatiques issues du croisement des 2 scénarios de gaz à effet de serre et des 10 projections climatiques retenues ont été intégrées en entrée du modèle hydrologique J2000-Rhône⁵ (10 x 2 simulations), utilisé dans sa version « non influencé ». L'évolution des débits sous l'effet des changements climatiques a été évaluée pour un horizon proche (2021-2050) et un horizon plus lointain (2041-2070) en comparaison de la période de référence 1986-2015.

Le graphique ci-dessous donne un exemple de résultats obtenus sur le Rhône à Beaucaire. Il compare les débits sur la période de référence aux débits futurs à l'horizon 2055 (2041-2070) pour le scénario d'émission RCP 4.5 (en jaune) et RCP 8.5 (en rouge). Pour chacun de ces deux scénarios, la médiane inter-simulations est représentée en trait plein et le panache associé représente la dispersion des résultats des 10 modèles climatiques.

⁵ J2000-Rhône est un modèle hydrologique semi-distribué développé par INRAE sur le bassin du fleuve, fonctionnant au pas de temps journalier



Figure 12. Débits moyens journaliers interannuels projetés du Rhône à Beaucaire à l'horizon 2055 (2041-2070) pour les scénarios de GES RCP 4.5 et RCP 8.5.



Comme on peut le voir sur ce graphique, à l'horizon 2055 les débits projetés dépendent relativement peu du scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré. Comme déjà évoqué au paragraphe 3.2, les évolutions climatiques d'ici à 2050 sont conditionnées par les niveaux d'émission actuels et varient peu d'un scénario à l'autre. Les stratégies d'atténuation qui pourraient être mises en place aujourd'hui et qui différencient les différents scénarios d'émission auraient un impact à partir de 2050.

Compte tenu de cette proximité et pour des raisons de clarté et de concision, les résultats présentés dans cette synthèse sont principalement ceux obtenus pour le scénario RCP 8.5.

A l'échelle du fleuve et de ses différents affluents, les résultats obtenus mettent en évidence :

- **A l'échelle annuelle : quel que soit le scénario d'émission et l'horizon considéré, les résultats issus des projections climatiques divergent, certains prédisent une hausse quand d'autre indiquent un baisse des débits moyens interannuels (modules).** La médiane des différentes projections climatiques indiquent une faible évolution (+5% à +7% sur le Rhône, -1% à -8% sur les affluents à l'horizon 2041-2070 pour le scénario RCP 8.5) avec cependant une forte dispersion des résultats (on a par exemple sur le Rhône à Viviers une évolution médiane de +6% mais allant de -4% à +27% suivant le modèle considéré).
- **A l'échelle saisonnière ou mensuelle : une accentuation des contrastes inter-saisonniers est probable,** avec une augmentation des débits hivernaux (pour la plupart des points étudiés les modèles convergent) et une accentuation des étiages estivaux particulièrement robuste sur certains affluents tels que l'Isère, la Drome, la Durance (convergence des projections sur ces trois points uniquement).

Les résultats obtenus pour le scénario RCP 8.5 sont synthétisés dans le Tableau 4. Ce tableau présente les évolutions relatives de débits (en %) obtenues au niveau des points de référence sur le fleuve ainsi que sur ses principaux affluents, pour la médiane ainsi que les valeurs minimales et maximales des 10 projections climatiques considérées pour l'étude.



4. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DU FLEUVE

Tableau 4. Evolution en pourcentage par rapport à la période de référence des débits moyens saisonniers des affluents du Rhône (valeur médiane inter-modèle) à l'horizon 2055 (2041-2070) pour le scénario RCP 8.5.

		Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuelle
Arve à Arthaz	Mediane	+40%	+45%	+27%	+8%	-4%	-15%	-21%	-22%	-20%	-13%	+9%	+21%	-1%
	[min ; max]	[+28 ; +61]	[+24 ; +63]	[+8 ; +55]	[-7 ; +36]	[-17 ; +16]	[-33 ; +13]	[-39 ; +5]	[-37 ; +32]	[-43 ; +25]	[-29 ; +26]	[-22 ; +31]	[-4 ; +44]	[-13 ; +24]
Ain à Chazey	Mediane	+32%	+39%	+5%	-8%	-12%	-12%	-24%	-26%	-31%	-25%	+12%	+19%	+5%
	[min ; max]	[+17 ; +59]	[+3 ; +50]	[-17 ; +28]	[-21 ; +9]	[-24 ; +11]	[-30 ; +16]	[-45 ; +15]	[-45 ; +52]	[-67 ; +120]	[-68 ; +78]	[-39 ; +37]	[-2 ; +45]	[-9 ; +33]
Saône à Couzon-au-Mt-D'Or	Mediane	+21%	+24%	+15%	+5%	-2%	+2%	-4%	-6%	-12%	-10%	+8%	+12%	+8%
	[min ; max]	[+14 ; +56]	[+6 ; +37]	[-11 ; +36]	[-7 ; +22]	[-19 ; +16]	[-19 ; +29]	[-31 ; +18]	[-29 ; +48]	[-46 ; +89]	[-51 ; +80]	[-41 ; +48]	[-6 ; +52]	[-1 ; +39]
Isère à Beaumont	Mediane	+28%	+36%	+30%	+12%	+1%	-12%	-38%	-42%	-31%	-18%	+4%	+10%	-1%
	[min ; max]	[+21 ; +57]	[+18 ; +53]	[+6 ; +44]	[-5 ; +34]	[-11 ; +29]	[-36 ; +8]	[-53 ; -15]	[-52 ; -5]	[-43 ; +11]	[-39 ; +17]	[-37 ; +22]	[-1 ; +38]	[-20 ; +16]
Drôme à Saillans	Mediane	+18%	+29%	+20%	-4%	-18%	-17%	-25%	-31%	-10%	+10%	-9%	+5%	+6%
	[min ; max]	[-2 ; +53]	[-8 ; +52]	[-12 ; +41]	[-16 ; +33]	[-36 ; +23]	[-47 ; +5]	[-57 ; -1]	[-55 ; 0]	[-63 ; +122]	[-38 ; +59]	[-59 ; +60]	[-26 ; +48]	[-14 ; +21]
Durance à Cadarache	Mediane	+19%	+30%	+22%	+20%	-4%	-18%	-26%	-30%	-20%	-2%	-4%	+3%	+3%
	[min ; max]	[-11 ; +43]	[-17 ; +52]	[-10 ; +47]	[-11 ; +35]	[-13 ; +27]	[-38 ; +4]	[-53 ; -20]	[-46 ; -12]	[-37 ; -12]	[-28 ; +33]	[-46 ; +57]	[-20 ; +23]	[-21 ; +17]
Rhône à Pougny	Mediane	+37%	+43%	+34%	+17%	+11%	+10%	-10%	-19%	-19%	-10%	+11%	+21%	+7%
	[min ; max]	[+28 ; +58]	[+29 ; +58]	[+15 ; +50]	[+4 ; +31]	[-4 ; +26]	[-13 ; +26]	[-32 ; +13]	[-34 ; +20]	[-41 ; +14]	[-24 ; +23]	[-21 ; +25]	[-2 ; +43]	[-3 ; +26]
Rhône à Lagnieu	Mediane	+35%	+38%	+28%	+11%	+4%	+7%	-9%	-19%	-18%	-13%	+7%	+16%	+7%
	[min ; max]	[+27 ; +59]	[+26 ; +50]	[+11 ; +40]	[-2 ; +25]	[-7 ; +16]	[-15 ; +20]	[-32 ; +14]	[-34 ; -18]	[-38 ; -17]	[-27 ; +28]	[-25 ; +25]	[-1 ; +45]	[-3 ; +27]
Rhône à Ternay	Mediane	+26%	+30%	+18%	+4%	+3%	+2%	-10%	-15%	-16%	-11%	+7%	+16%	+7%
	[min ; max]	[+20 ; +58]	[+12 ; +41]	[-4 ; +35]	[-4 ; +21]	[-10 ; +16]	[-15 ; +19]	[-31 ; +10]	[-31 ; +23]	[-38 ; +17]	[-37 ; +48]	[-35 ; +32]	[-3 ; +48]	[-1 ; +31]
Rhône à Valence	Mediane	+26%	+31%	+20%	+6%	+2%	-1%	-17%	-20%	-19%	-11%	+6%	+15%	+5%
	[min ; max]	[+21 ; +58]	[+13 ; +43]	[-2 ; +37]	[-3 ; +22]	[-9 ; +15]	[-21 ; +15]	[-36 ; +3]	[-35 ; +16]	[-37 ; +27]	[-36 ; +37]	[-34 ; +29]	[-2 ; +46]	[-4 ; +28]
Rhône à Viviers	Mediane	+26%	+32%	+20%	+6%	+2%	-1%	-17%	-20%	-19%	-10%	+5%	+15%	+6%
	[min ; max]	[+20 ; +57]	[+12 ; +43]	[-2 ; +37]	[-2 ; +22]	[-8 ; +15]	[-21 ; +15]	[-36 ; +3]	[-35 ; +15]	[-38 ; +25]	[-34 ; +33]	[-33 ; +26]	[-2 ; +45]	[-4 ; +27]
Rhône à Beaucaire	Mediane	+24%	+29%	+22%	+7%	+1%	-3%	-17%	-21%	-17%	-8%	+3%	+14%	+6%
	[min ; max]	[+14 ; +51]	[+5 ; +44]	[-3 ; +37]	[+0 ; +22]	[-8 ; +14]	[-23 ; +10]	[-37 ; 0]	[-35 ; +12]	[-38 ; +12]	[-26 ; +18]	[-26 ; +25]	[-4 ; +37]	[-7 ; +22]

Dans le tableau ci-dessus, la couleur de la police fait référence à la convergence/divergence des projections.

- En gris : les projections divergent
- En bleu : les 10 projections convergent vers une hausse des débits
- En rouge : les 10 projections convergent vers une baisse des débits



La figure suivante présente l'évolution des régimes des principales aires contributrices aux débits du fleuve et compare, pour chacune, les débits sur la période de référence et les débits futurs (médiane inter-projections, scénario RCP 8.5, horizon 2055). Seules les médianes inter-projections sont représentées.

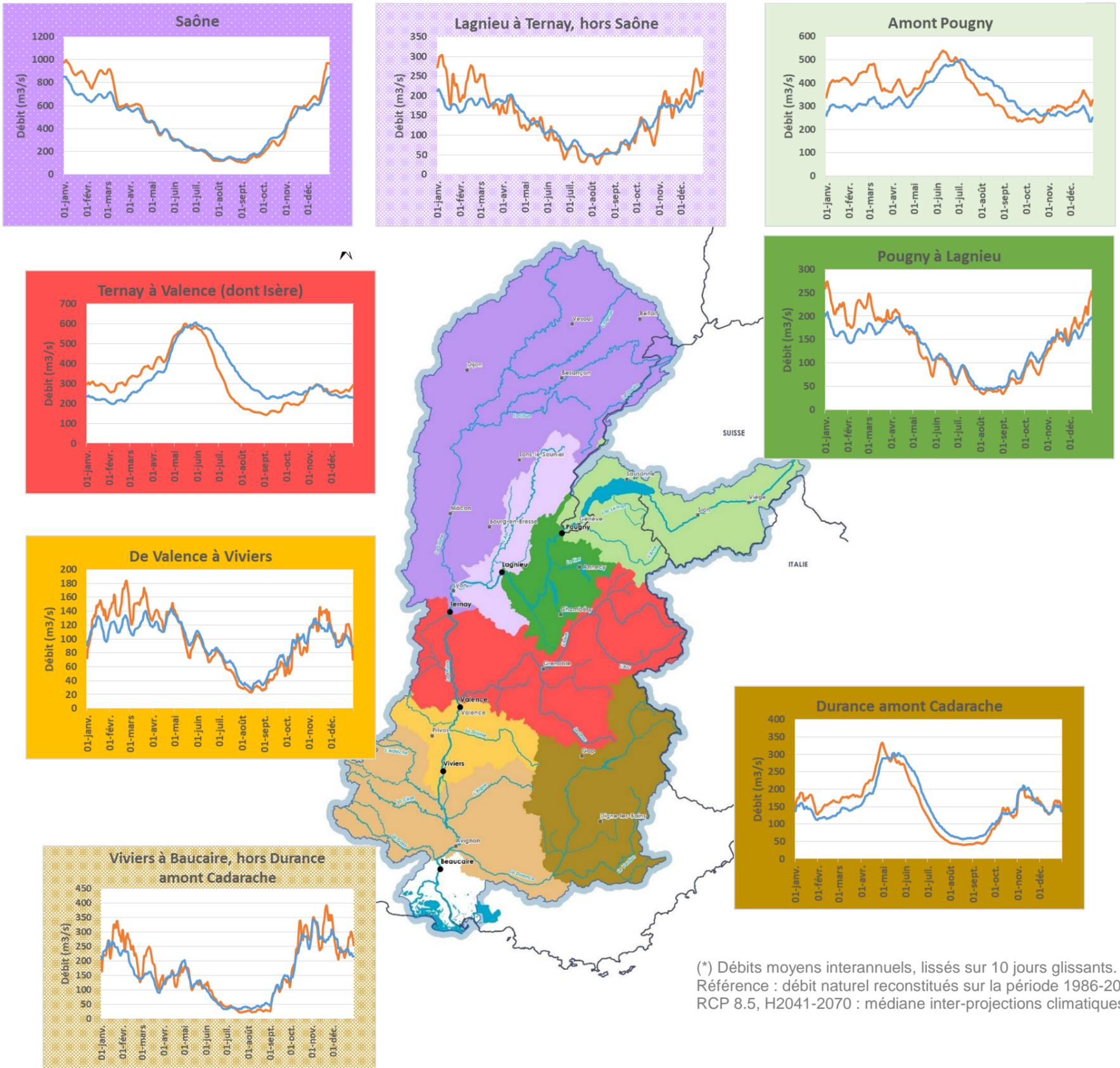
Les parties alpines du bassin (amont Pougny, Isère, Durance amont Cadarache) ont en commun **une avancée du pic de fonte hivernale**. On pourrait y retrouver également **une forte baisse des débits estivaux et des hausses marquées des débits hivernaux**. En cumulé, ces trois secteurs représentaient 70% et 71% des débits du Rhône à Beaucaire respectivement aux mois de juillet et d'août sur la période de référence. Leur contribution reste importante en 2055 mais pourrait descendre à 66% et 65% pour ces mêmes mois.

Sur les secteurs à régime fluvial (secteurs de Pougny à Ternay, dont la Saône), on constate une **hausse marquée des débits hivernaux**. **La baisse des débits estivaux sur ces secteurs est remarquablement faible** (valeur médiane) avec toutefois une très forte dispersion des résultats des différentes projections (voir Tableau 4).

La hausse des débits hivernaux sur le Rhône à Beaucaire en 2055 s'explique notamment par les hausses des débits de la Saône (~ +100 à +200 m³/s) et sur l'amont de Pougny (~ +50 à +100 m³/s).

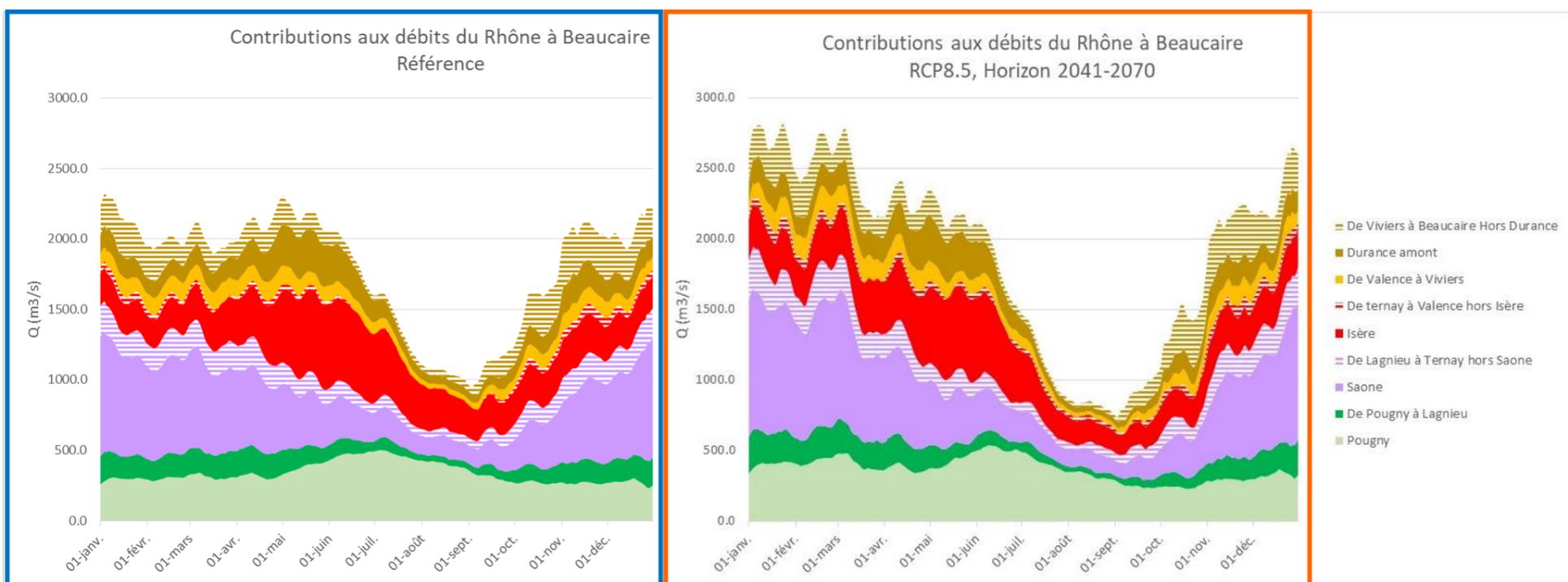
Les secteurs à régime méditerranéens (aval de Valence hors Durance et Durance aval) pourraient être soumis à une **hausse hivernale modérée des débits et à une baisse estivale qui, si elle apparaît modeste en débit absolu du fait de la faiblesse des débits estivaux sur les cours d'eau méditerranéens, peut représenter une baisse relative importante**.

Évolution des régimes hydrologiques (*) sur le bassin versant du Rhône (scénario RCP 8.5, horizon 2041-2070)



(*) Débits moyens interannuels, lissés sur 10 jours glissants. Référence : débit naturel reconstitués sur la période 1986-2015 RCP 8.5, H2041-2070 : médiane inter-projections climatiques

— RCP 8.5, H2041-2070 — Référence

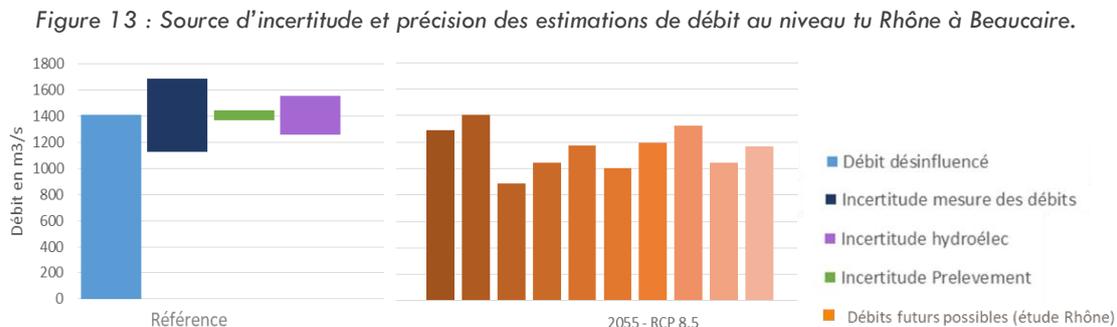


5 INCERTITUDES

Une réflexion a également été menée pour prendre du recul sur les estimations faites et les sources d'incertitudes. On a ainsi évalué

- les incertitudes liées à la connaissance des débits en temps présent : fiabilité des données hydrométriques, connaissances des prélèvements et des influences des ouvrages.
- Les incertitudes sur les débits futurs liées à la variabilité des projections climatiques utilisées. NB : L'utilisation d'un unique modèle hydrologique pour réaliser les simulations de la présente étude et le fait que les données de projections climatiques sur le portail DRIAS ne soient qu'un échantillon des projections possibles occultent également une part de l'incertitude associée aux simulations hydrologiques sous changement climatique.

La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus au niveau du Rhône à Beaucaire. Les valeurs de débit présentées correspondent aux débits désinfluencés d'un mois de juillet moyen (mois de pointe du prélèvement hors hydroélectricité et stockage), sur la période de référence (1986-2015) ou à horizon 2055 (période 2041-2070).



A ces incertitudes s'ajoutent par ailleurs les incertitudes liées à la modélisation hydrologique et aux biais potentiels, entre autres dans la prise en compte des apports glaciaires (absence de module glaciaire dans la version de J2000-Rhône utilisée).

On retiendra de cette analyse que :

- La précision des mesures de débit est une des principales sources d'incertitude sur la connaissance des débits actuels, avec peu de marges d'amélioration (la plupart des stations sur le fleuve (sauf Beaucaire) ont une précision estimée⁶ à 10% ce qui est considéré comme très satisfaisant.
- Le fait de ne pas disposer de données journalière des influences hydroélectriques sur certaines vallées, notamment l'Isère est également une source d'incertitude majeure à partir de Valence dès lors que l'on considère le pas de temps journalier. Ainsi, il conviendra pour les missions 2 et 3 de privilégier des raisonnements et analyses partir de débits mensuels ou de débits journaliers lissés sur plusieurs jours.
- La variabilité des résultats des simulations hydro-climatiques en climat futur est forte et les résultats de la présente étude ne représentent qu'une partie de cette variabilité et des débits futurs possibles.

⁶ La précision des stations hydrométriques sur le fleuve a fait l'objet d'analyses et de discussion avec les gestionnaires de stations (CNR notamment) dans le cadre de l'étude des étiages du Rhône de 2014. Les ordres de grandeur retenus dans cette étude sont repris ici (10% pour la plupart des stations hydrométriques sur le Rhône, à l'exception de Beaucaire où la précision sur les débits d'étiages mensuels est de l'ordre de 20%).



NB : Les incertitudes liées à la connaissance des débits actuels ne remettent pas en cause les tendances d'évolutions constatées sur les débits lors des différentes analyses réalisées (prospective et rétrospective). Indépendamment de la valeur absolue des débits (connue en temps présent avec une marge d'incertitude), les évolutions de débits détectées restent des tendances robustes et confirmées par des tests statistiques (analyse rétrospective).



BRL
Ingénierie



www.brl.fr/brli

Société anonyme au capital de 3 183 349 euros
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19

1105, avenue Pierre Mendès-France
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5
FRANCE
Tél. : +33 (0) 4 66 84 81 11
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09
e-mail : brli@brl.fr