



HAL
open science

Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits : Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône

Flora Branger, Jérémie Bonneau, Nathan Pellerin, Jérôme Le Coz

► To cite this version:

Flora Branger, Jérémie Bonneau, Nathan Pellerin, Jérôme Le Coz. Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits : Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône : OSR6 | Axe D - Action D2 | Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] INRAE. 2023. hal-04228411

HAL Id: hal-04228411

<https://hal.science/hal-04228411>

Submitted on 4 Oct 2023

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

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



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

An aerial photograph of a river valley, likely the Rhône, showing a wide river winding through a landscape of agricultural fields, some green and some brown, and a town or village in the distance. The image is overlaid with a large, semi-transparent, light blue graphic element that frames the text.

Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits. Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône

Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits :

Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône

Rapport scientifique final

Version du 28 juin 2023

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe D – Prévoir les changements pour anticiper les impacts

Action D2 – Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits

Personnes impliquées

Flora Branger (INRAE, Riverly), Jérémie Bonneau (INRAE RIVERLY), Nathan Pellerin (INRAE RIVERLY), Jérôme Le Coz (INRAE RIVERLY)

Pour citer ce rapport

Flora Branger, Jérémie Bonneau, Nathan Pellerin, Jérôme Le Coz (2023). Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits : Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. 31 pp.

L'OSR est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter

Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Résumé

Ce travail vise à proposer des éléments de prospective sur les débits sur le bassin versant du Rhône, à l'horizon 2100, en abordant deux des facteurs de changement identifiés comme les plus importants : le changement climatique, et la gestion des grandes retenues hydroélectriques. La méthodologie s'est appuyée sur le modèle hydrologique distribué J2000-Rhône. Des simulations ont été réalisées pour 6 scénarios climatiques sélectionnés dans le cadre du projet Explore2, et pour 3 scénarios de gestion des barrages. Les résultats montrent une évolution significative des débits, notamment au niveau des variations saisonnières, ainsi qu'un fort contraste spatial. Les affluents alpins apparaissent très impactés, avec la disparition des régimes hydrologiques purement nivaux ou nivo-glaciaires connus actuellement. La gestion des retenues hydro-électriques semble aussi influente sur les débits. Ces changements sont susceptibles de générer à leur tour des changements dans les sources de MES sur le bassin versant, et donc de modifier les flux attendus au Rhône à l'horizon 2100.

Mots-clés

Observatoire, Sédiments, Rhône, OSR, Bassin du Rhône, modélisation hydrologique, projections climatiques, gestion des retenues hydro-électrique, débits

Table des matières

1 Introduction et objectifs	7
2 Rappels sur le modèle J2000-Rhône	7
2.1 Principes généraux de J2000-Rhône.....	7
2.2 Module barrage – dérivations et paramétrisation sur le bassin du Rhône	10
3 Choix et construction des scénarios.....	12
3.1 Projections climatiques	12
3.2 Gestion des grands barrages hydro-électriques.....	15
3.2.1 Scénario 1 : Pas de changement.....	15
3.2.2 Scénario 2 : Décalage temporel des consignes.....	15
3.2.3 Scénario 3 : Maintien des débits estivaux.....	17
3.3 Réalisation des simulations	18
4 Résultats	19
4.1 Effet du climat seul (scénario 1)	20
4.1.1 Débit moyen annuel.....	20
4.1.2 Débits moyens saisonniers.....	20
4.1.3 Quantiles 10 % et 90 %	22
4.2 Effets conjugués du climat et de la gestion des ouvrages hydro-électriques (scénarios 2 et 3).....	23
4.2.1 Débits moyens annuels	23
4.2.2 Débits moyens saisonniers.....	24
4.2.3 Quantiles 10 % et 90 % et débits journaliers interannuels	26
4.3 Discussion : implications pour les transferts sédimentaires	28
5 Conclusions et perspectives	29
6 Références bibliographiques	30

Index des figures

Figure 1 : Principaux processus représentés sur une maille du modèle hydrologique J2000.	8
Figure 2 : Maillage et principaux usages représentés dans le modèle J2000-Rhône.....	9
Figure 3 : Principe de fonctionnement des Fonctions Objectifs.	10
Figure 4 : Fonctions Objectifs pour les barrages pris en compte dans J2000-Rhône (version 2023). ..	12
Figure 5 : Fonctions Objectifs pour les dérivations prises en compte dans J2000-Rhône (version 2023).	12
Figure 6 : Scénarios RCP présentant l'évolution du forçage radiatif, DRIAS (source : Soubeyroux et al., 2020).....	13
Figure 7 : Diagramme $\Delta T/\Delta P$ d'un ensemble de couples GCM/RCM de la sélection DRIAS-2020 pour la période estivale (source Soubeyroux et al., 2020).....	14
Figure 8 : Écart des températures moyennes de 5 projections climatiques de notre ensemble (HadGEM2-ES / HadREM3-GA7 non présent), source : Soubeyroux et al., 2020.	15
Figure 9 : Écart relatif (%) des précipitations moyennes de 5 projections climatiques de notre ensemble (HadGEM2-ES / HadREM3-GA7 non présent), source : Soubeyroux et al., 2020.....	15
Figure 10 : Régimes hydrologiques de l'Isère à Bourg-Saint-Maurice en climat présent et futur (RCP 8.5) – résultats du projet EXPLORE2, modèle J2000.	16
Figure 11 : Régimes hydrologiques de la Loire à Goudet en climat présent et futur (RCP 8.5) – résultats du projet EXPLORE2, modèle J2000.	17
Figure 12 : Régimes hydrologiques de tronçons de cours d'eau influencés par les barrages en climat présent et futur (simulations J2000-Rhône issues du scénario 1).	17
Figure 13 : Fonctions Objectif des retenues pour les 3 scénarios de gestion des barrages.	18
Figure 14 : Fonctions Objectif des dérivations pour les 3 scénarios de gestion des barrages.....	18
Figure 15 : Schéma des périodes de simulation.....	19
Figure 16 : Schéma des périodes d'application des scénarios de gestion des ouvrages hydroélectriques.	19
Figure 17 : Variations relatives des débits moyens annuels entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	20
Figure 18 : Variations relatives des débits moyens de la saison décembre – janvier - février entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	21
Figure 19 : Variations relatives des débits moyens de la saison mars-avril-mai entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).....	21
Figure 20 : Variations relatives des débits moyens de la saison juin-juillet-août entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).....	22

Figure 21 : Variations relatives des débits moyens de la saison septembre-octobre-novembre entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	22
Figure 22 : Variations relatives des hauts débits (quantile 10%) entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	23
Figure 23 : Variations relatives des bas débits (quantile 90%) entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	23
Figure 24 : Variations relatives des débits moyens annuels entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	24
Figure 25 : Variations relatives des débits moyens de la saison décembre – janvier - février entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	25
Figure 26 : Variations relatives des débits moyens de la saison mars – avril – mai entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne)...	25
Figure 27 : Variations relatives des débits moyens de la saison juin – juillet - août entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne)...	26
Figure 28 : Variations relatives des débits moyens de la saison septembre-octobre-novembre entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	26
Figure 29 : Variations relatives des hauts débits (quantile 10%) entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	27
Figure 30 : Variations relatives des bas débits (quantile 90%) entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).	27
Figure 31 : Évolution des régimes hydrologiques (débits journaliers interannuels) des principaux affluents pour les 3 scénarios.....	28

1 Introduction et objectifs

Dans le cadre de l'axe D de l'OSR6 qui vise à travailler des scénarios prospectifs permettant d'anticiper les changements qui pourraient affecter, à moyen terme, le transfert de sédiments et contaminants associés sur le Rhône, l'objectif de cette action D2 était plus spécifiquement de travailler sur la modélisation prospective des débits. Le couplage avec un modèle de transfert sédimentaire en vue de prospective est réalisé dans l'action D3.

La modélisation des débits dans cette action est réalisée à l'échelle du bassin versant du Rhône, ce qui permet d'obtenir une vision spatialisée pouvant intégrer le comportement des sous bassins et d'identifier les impacts sur le fleuve Rhône de changements plus globaux. L'outil utilisé est le modèle hydrologique distribué J2000-Rhône (Branger et al., 2016), développé par INRAE RiverLy (équipe Hydrologie des Bassins versants).

A la suite du séminaire scientifique de l'action D1 de l'OSR 6 : « Identification des scénarios du changement », de nombreux scénarios prospectifs impactant les transferts de MES sur le bassin du Rhône ont été identifiés (Radakovitch et al., 2022). Dans le cadre de cette action, compte-tenu du temps disponible et de l'état de développement de J2000, il a été décidé de se focaliser sur deux facteurs de changement principaux : le climat et la gestion des grands barrages hydro-électriques. Des scénarios de projection ont donc été sélectionnés et/ou construits pour chacun de ces facteurs.

Cette action s'est appuyée sur deux autres projets qui se déroulent en parallèle : le projet Explore2, financé par le MTES et l'OFB, qui vise à mettre à jour les projections climatiques et de débits à l'échelle du territoire national, ainsi que le projet ContinuumMES, financé par l'Agence de l'Eau RM&C, qui a pour objectif de construire un chaînage terre-fleuve-mer entre modélisation hydrologique du bassin versant, modélisation hydrodynamique du fleuve Rhône, et modélisation hydrodynamique côtière du Golfe du Lion.

Les résultats présentés ici sont issus du travail de stage de Nathan Pellerin (Pellerin, 2023), réalisé entre septembre 2022 et février 2023.

2 Rappels sur le modèle J2000-Rhône

2.1 Principes généraux de J2000-Rhône

J2000 est un modèle hydrologique distribué qui a pour objectif de représenter les principaux compartiments hydrologiques et processus à l'échelle de bassins versants de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers de km² (Krause et al., 2006). Il utilise un découpage spatial en mailles irrégulières appelées HRUs (Hydrological Response Units, Flügel et al., 1995) qui sont construites à l'aide de données cartographiques (topographie, géologie, pédologie, occupation des sols). Sur chacune de ces mailles, le modèle simule les principaux processus hydrologiques à partir d'entrées météorologiques spatialisées (précipitation, température et évapotranspiration) (voir Figure 1). Les flux d'eau générés sont ensuite routés de maille en maille selon une topologie déterminée par la topographie (suivi de la ligne de plus grande pente), jusqu'au cours d'eau le plus proche. Le réseau hydrographique

est représenté explicitement et déterminé à partir de la topographie. Le routage dans le réseau permet de simuler les débits dans chaque brin de rivière, des têtes de bassin jusqu'à l'exutoire. Le pas de temps de calcul le plus fréquemment utilisé est le pas de temps journalier. Les temps de calcul sont rapides, ce qui fait de J2000 un modèle intéressant pour aborder la problématique des projections climatiques, qui demandent en général des simulations continues de 100 ans ou plus.



Figure 1 : Principaux processus représentés sur une maille du modèle hydrologique J2000.

Le modèle J2000 a été mis en place sur le bassin versant du Rhône lors du projet MDR financé par l'Agence de l'Eau RM&C et la CNR (Branger et al., 2016) et mis à jour en 2020 (Branger et al., 2021). Sur les 1 000 000 km² du bassin versant total (partie Suisse et partie Française), le maillage est constitué de 31 400 HRUs d'une surface moyenne de 3 km². Le modèle est alimenté par des données journalières spatialisées de précipitation, température et évapotranspiration de référence issues de la réanalyse SAFRAN de Météo - France (Vidal et al., 2010 ; Le Moigne et al., 2020). La particularité de J2000-Rhône est qu'il intègre, outre l'hydrologie dite naturelle, une représentation des principaux usages de l'eau (prélèvements pour l'eau potable, pour l'irrigation et gestion des principales retenues hydro-électriques). Le maillage de J2000-Rhône et les usages pris en compte sont représentés sur la Figure 2. Le modèle a été validé sur les séries de débits journaliers de 234 stations de contrôle sur plusieurs périodes, en particulier 1987-2012 et 1980-2010.

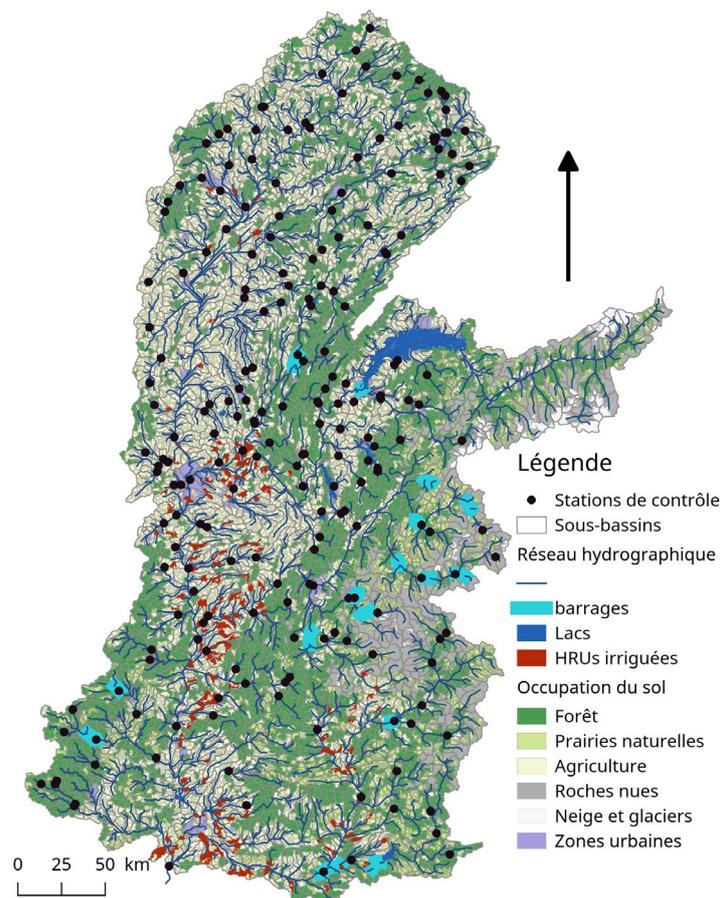


Figure 2 : Maillage et principaux usages représentés dans le modèle J2000-Rhône.

Il existe à l'heure actuelle plusieurs versions de J2000-Rhône :

- la version dite de référence en hydrologie naturelle (c'est-à-dire sans les usages), qui est en particulier celle utilisée dans le cadre du projet Explore2 ;

- la version dite « avec usages », dont une version améliorée sera prochainement finalisée dans le cadre du projet MDR-Usages financé par l'Agence de l'Eau RM&C ;
- la version dite « glaciers » qui prend en compte l'évolution des surfaces glaciaires dans les Alpes et est en cours de développement (projet MDR-Glaciers, financé par l'Agence de l'Eau RM&C et la CNR) ;
- la version dite « avec MAGE » qui permet de coupler les sorties du modèle hydrologique avec le modèle hydrodynamique et de transport de sédiments 1D MAGE-ADIS-TS mis en place sur le linéaire du fleuve Rhône. Cette version a été développée dans le cadre du projet ContinuumMES financé par l'Agence de l'Eau RM&C.

La version de J2000-Rhône utilisée dans cette action est la version « avec MAGE » à laquelle ont été ajoutées les principales retenues et dérivations hydro-électriques (voir Pellerin, 2023 pour le détail de l'implémentation), car elles ont une influence potentielle importante sur le transport sédimentaire à l'échelle du bassin versant. Le module barrage-dérivation et sa paramétrisation sont décrits plus en détails dans la section suivante.

2.2 Module barrage – dérivations et paramétrisation sur le bassin du Rhône

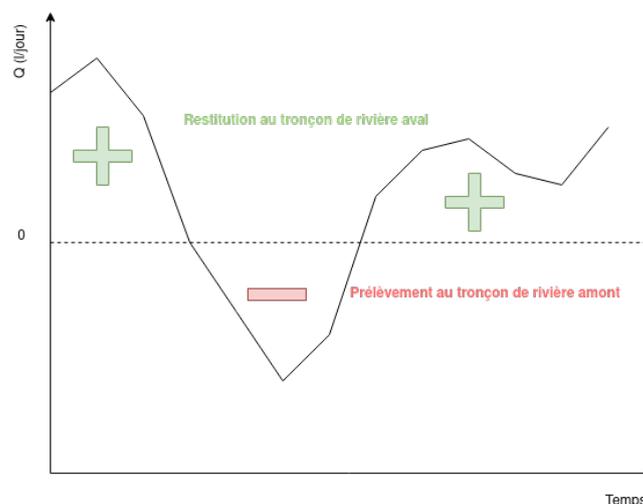


Figure 3 : Principe de fonctionnement des Fonctions Objectifs.

Le principe du modèle barrage-dérivations est de reproduire l'influence d'une retenue ou d'une dérivation sur un tronçon de cours d'eau en termes de rétention d'eau (eau présente dans le tronçon amont mais retenue par le barrage et non routée vers l'aval), ou de restitution (lâcher d'une quantité d'eau supplémentaire par rapport à ce qui arrive de l'amont). Des retenues virtuelles sont localisées sur les brins en question et servent à stocker l'eau retenue. Le problème-clef est de déterminer les volumes retenus et restitués, leur variation saisonnière ainsi que leur variation d'une année sur l'autre. L'approche qui a été retenue est de définir comme variables d'entrée du module des volumes objectifs (dits fonctions objectif), qui varient de façon saisonnière sur une année-type, pour chaque retenue. A chaque pas de temps, le module essaie de s'approcher de l'objectif du jour et

calcule le volume effectivement retenu ou restitué selon la quantité d'eau disponible dans le tronçon amont (consigne de rétention) ou la quantité d'eau présente dans la retenue (consigne de restitution). La Figure 3 illustre le principe de la fonction objectif pour une retenue typique d'un usage hydroélectrique dans les Alpes, avec prélèvement d'eau pendant la période de fonte au printemps et en début d'été (qui correspond dans notre formalisme à une valeur de fonction objectif négative), et restitution de l'eau en hiver (valeur de fonction objectif positive).

Tableau 1 : Retenues et dérivations prises en compte dans le modèle J2000-Rhône et caractéristiques principales.

Nom	Capacité maximale (Mm ³)	Volume initial (Mm ³)	Ordre de grandeur de l'influence journalière sur le débit (m ³ /s)
Vouglans	600	483,3	± 30
Léman	89000	88970,9	± 50
Tignes	230	143,7	± 25
Roselend	210	131,2	± 25
Mont-Cenis	330	263,1	± 15
Bissorte	50	35,2	± 3
Chambon	50	28,1	± 4
Grd Maison	140	100,6	± 7
Monteynard	440	316,1	± 25
Serre Ponçon	1040	561,0	± 100
Chassezac	58	7,8	± 7
Sainte-Croix	760	760	± 15
Isère-Arc	–	–	60

Arc-Isère	–	–	40
Verdon-Canaux	–	–	20
Durance-Canaux	–	–	140
Loire-Ardèche	–	–	8

Le Tableau 1 répertorie les retenues et dérivations prises en compte dans le modèle J2000-Rhône. Ces retenues ont été sélectionnées comme étant les plus importantes en termes d'influence sur le bassin versant (Branger et al., 2016). Certaines ont été groupées (par exemple la retenue Monteynard regroupe les influences de l'ensemble des ouvrages situés sur le Drac). Les fonctions objectif pour chaque retenue sont issues d'une étude menée pour l'OFB sur la reconstitution de l'influence des ouvrages sur le débit des cours d'eau (Cipriani et Sauquet, 2014) et sont présentées Figure 4 et Figure 5. Les fonctions objectif pour les barrages de Vouglans, du Chassezac et la dérivation Loire-Ardèche ont été mises à jour en 2023 lors du stage de Nathan Pellerin.

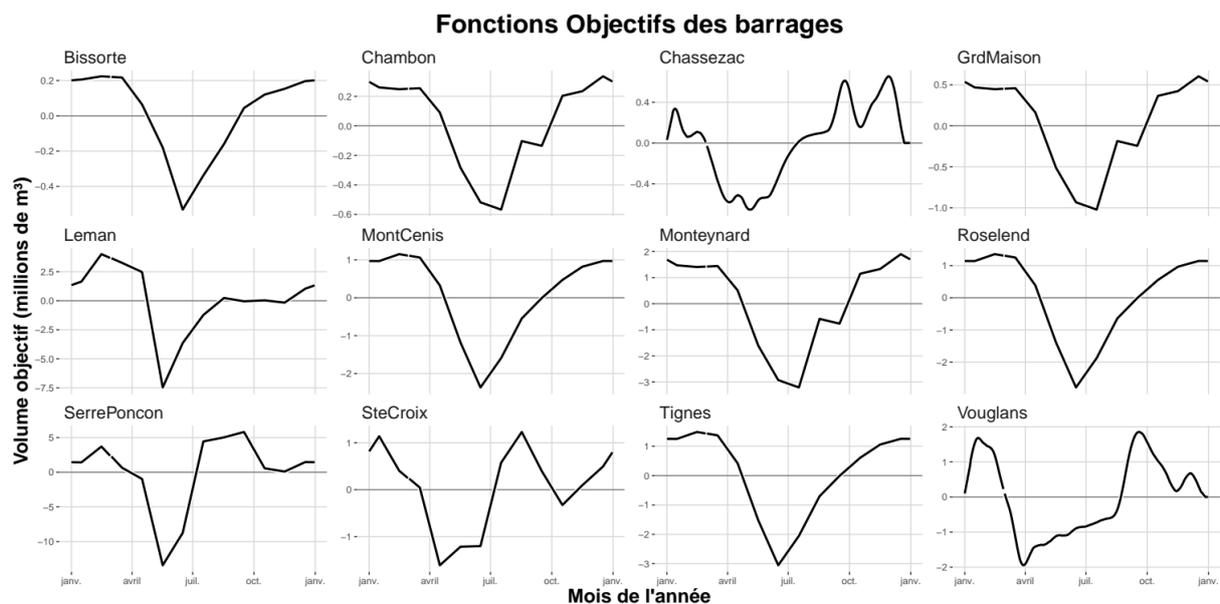


Figure 4 : Fonctions Objectifs pour les barrages pris en compte dans J2000-Rhône (version 2023).

Fonctions Objectifs des dériviations

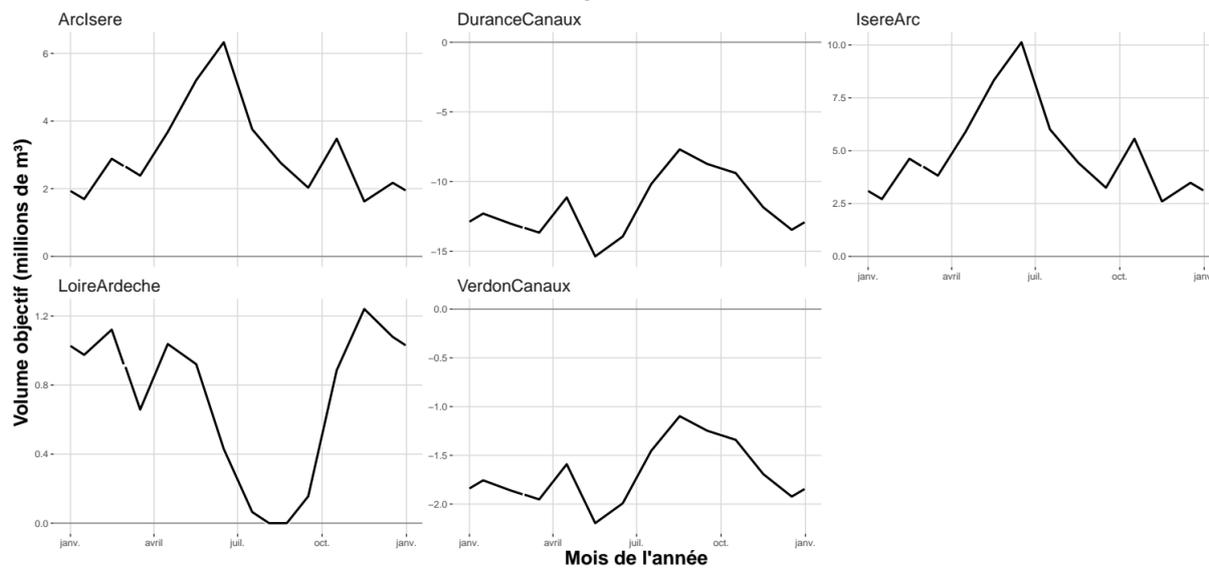


Figure 5 : Fonctions Objectifs pour les dériviations prises en compte dans J2000-Rhône (version 2023).

3 Choix et construction des scénarios

3.1 Projections climatiques

Le climat est simulé à l'échelle mondiale à partir de modèles numériques appelés modèles atmosphériques de circulation générale (GCM pour General Circulation Model), fonctionnant avec une résolution de l'ordre de 200 km. Afin d'éviter les dérives des modèles, ceux-ci sont forcés par des valeurs ou tendances climatologiques. Dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison des modèles climatiques CMIP5, quatre scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif dû aux émissions de gaz à effet de serre, appelés RCP (Representative Concentration Pathways) ont été définis. Ils sont représentés sur la Figure 6. Le RCP 8.5, le plus pessimiste, correspond à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre sans limitations par rapport à la période historique. C'est ce scénario qui a été retenu dans cette action car il permet d'estimer les bornes hautes d'évolution des débits et potentiellement des transferts de MES.

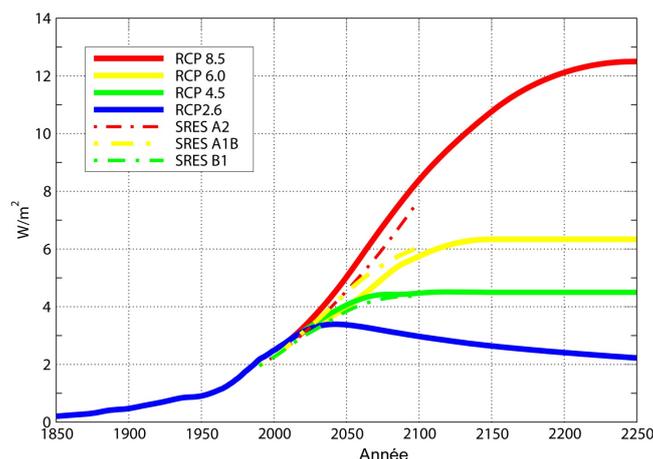


Figure 6 : Scénarios RCP présentant l'évolution du forçage radiatif, DRIAS (source : Soubeyrou et al., 2020).

Afin d'obtenir une meilleure représentation du climat local (reliefs, contrastes terre-mer, traits de côte complexes), une descente d'échelle (méthode de régionalisation) est réalisée grâce aux modèles de climat régionaux (RCM) permettant une haute résolution spatiale (de 10 à 20 km). Une correction de biais est ensuite effectuée afin d'optimiser les résultats sur la période passée grâce aux données d'observations. Les données climatiques ainsi obtenues peuvent être utilisées comme forçages de modèles hydrologiques régionaux pour obtenir des projections de l'évolution des débits ou d'autres variables hydrologiques.

Le projet Explore2 en cours, financé conjointement par le MTE et l'OFB, vise à donner à voir le climat et l'hydrologie naturelle futurs, à horizon 2100, à partir des résultats de l'intercomparaison CMIP5 et en utilisant une approche multi-modèles et multi-scénarios pour assurer la robustesse scientifique de l'exercice et pouvoir associer des incertitudes aux simulations calculées. Dans ce cadre, une sélection de 19 couples de projections climatiques

(GCM/RCM) a été réalisée (Robin et al., 2023). Dans cette action, nous avons sous-échantillonné dans cette sélection 6 couples RCM / GCM représentatifs de la dispersion des projections Explore2 (Tableau 2). Il s'agit de 5 couples issus de la sélection DRIAS-2020 (Soubeyroux et al., 2020), auxquelles a été ajouté le couple MOHC-HadGEM2-E/HadREM3-GA7-05.

Tableau 2 : Couples GCM / RCM retenus pour l'exercice de projections climatiques de l'action.

GCM	RCM
CNRM-CM5	ALADIN63
EC-EARTH	RACMO22E
HadGEM2	CCLM4-8-17
IPSL-CM5A	WRF381P
MPI-ESM	CCLM4-8-17
MOHC-HadGEM2-ES	HadREM3-GA7-05

Cette dispersion est illustrée, pour les couples de la sélection DRIAS-2020, par la Figure 7, qui montre les écarts en termes de précipitations et de température sur la période estivale pour chaque modèle par rapport à la médiane de l'ensemble. Notre échantillon permet de balayer l'ensemble de la variabilité, y compris les extrêmes (modèles très chauds et très secs, modèles peu chauds et très pluvieux).

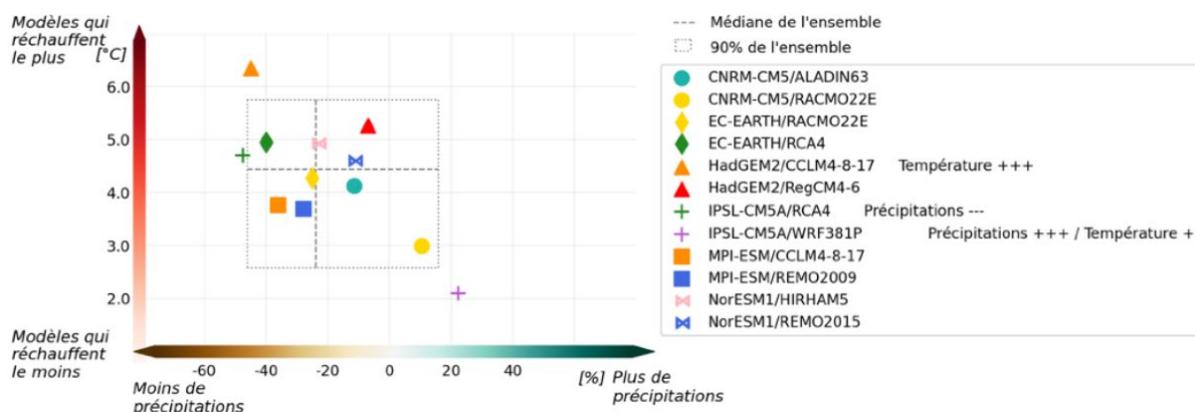


Figure 7 : Diagramme $\Delta T/\Delta P$ d'un ensemble de couples GCM/RCM de la sélection DRIAS-2020 pour la période estivale (source Soubeyroux et al., 2020).

Les Figures 8 et 9 représentent, à l'échelle de la France, l'écart des températures moyennes et des précipitations annuelles moyennes entre l'horizon 2100 et la période de référence pour les 5 couples issus de la sélection DRIAS-2020. Pour le territoire correspondant au bassin versant du Rhône, on obtient une augmentation de la température de l'ordre de 4°C, et supérieure dans les Alpes du Sud. Au niveau des précipitations, on obtient des cumuls plus importants dans le nord, et notamment sur le bassin versant de la Saône et en opposition, une baisse des précipitations dans le sud et dans le massif des Alpes.

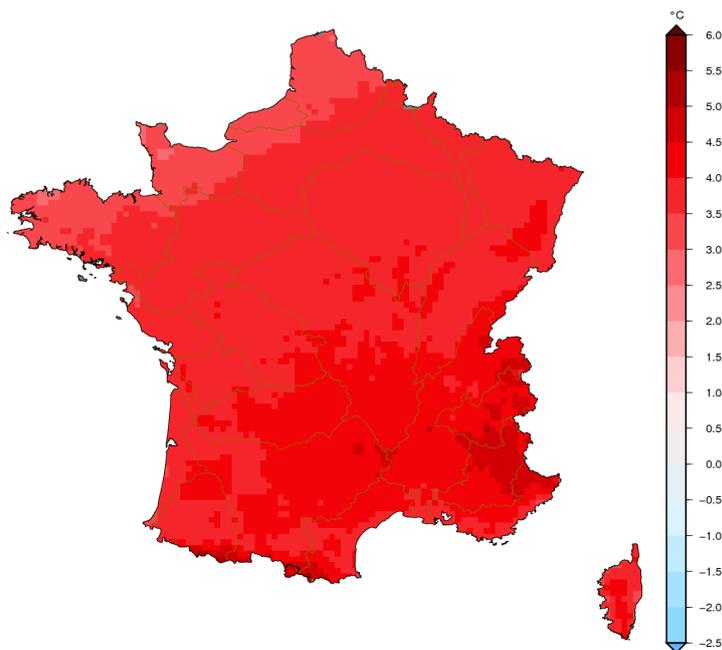


Figure 8 : Écart des températures moyennes de 5 projections climatiques de notre ensemble (HadGEM2-ES / HadREM3-GA7 non présent), source : Soubeyroux et al., 2020.

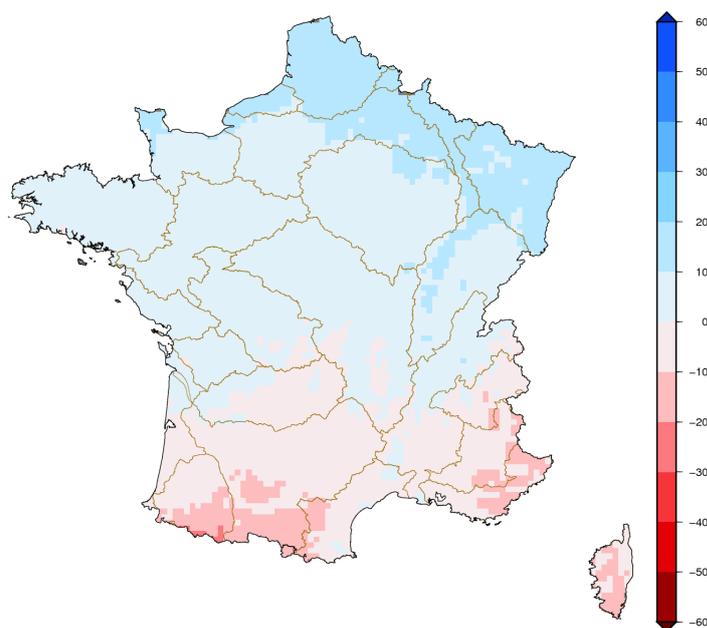


Figure 9 : Écart relatif (%) des précipitations moyennes de 5 projections climatiques de notre ensemble (HadGEM2-ES / HadREM3-GA7 non présent), source : Soubeyroux et al., 2020.

3.2 Gestion des grands barrages hydro-électriques

Trois scénarios de gestion des barrages et dérivations ont été développés pour explorer leur impact sur les débits sur le fleuve Rhône et ses principaux affluents. Ces scénarios sont basés sur l'évolution de l'hydrologie naturelle future des cours d'eau alpins obtenue dans les

résultats préliminaires du projet Explore2. Il est important de noter qu'ils ne prennent pas en compte une évolution ou une modélisation des usages futurs de l'eau.

3.2.1 Scénario 1 : Pas de changement

Dans le premier scénario, les règles actuelles de gestion des barrages et dérivations sont conservées en climat futur.

3.2.2 Scénario 2 : Décalage temporel des consignes

Les premiers résultats issus d'Explore2 montrent qu'en hydrologie naturelle, les cours d'eau alpins subissent une modification importante de leur hydrologie en fin de siècle (2070-2100) sous le scénario RCP8.5. En particulier, on constate un décalage temporel significatif de l'onde de fonte qui devient plus précoce et moins intense (Figure 10).

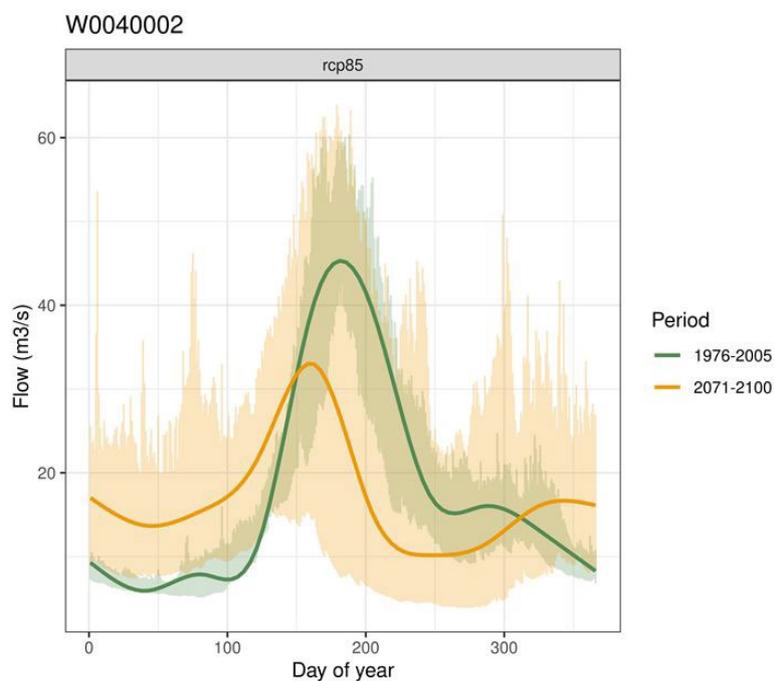


Figure 10 : Régimes hydrologiques de l'Isère à Bourg-Saint-Maurice en climat présent et futur (RCP 8.5) – résultats du projet EXPLORE2, modèle J2000.

Le principe du second scénario est donc de s'adapter à ce décalage temporel pour optimiser le stockage de l'onde de fonte pour les retenues des Alpes (Bissorte, Chambon, Grand-Maison, Mont-Cenis, Monteynard, Roselend, Serre-Ponçon, Sainte-Croix et Tignes). Les consignes des volumes de stockage/déstockage journaliers (fonctions objectif) sont modifiées avec un décalage temporel correspondant au décalage de l'onde de fonte constaté à horizon 2100 en hydrologie naturelle pour les cours d'eau correspondants (environ 30 jours).

Pour les autres retenues et dérivations :

- les débits sur la Loire diminuant à l'horizon 2100 (Figure 11), nous faisons l'hypothèse que moins d'eau sera disponible pour alimenter l'Ardèche, ce qui conduit à diminuer

la consigne de volume restitué dans la fonction objectif de la dérivation Loire-Ardèche ;

- les signaux étant beaucoup moins clairs pour les retenues de Vouglans, du Chassezac et ne disposant pas d'éléments sur les autres dérivations (internes au bassin Isère-Arc et Arc-Isère et dérivations sortantes Durance Canaux) et Verdon Canaux), les fonctions objectif correspondantes n'ont pas été modifiées ;
- de la même façon, la fonction objectif du lac Léman n'a pas été modifiée.

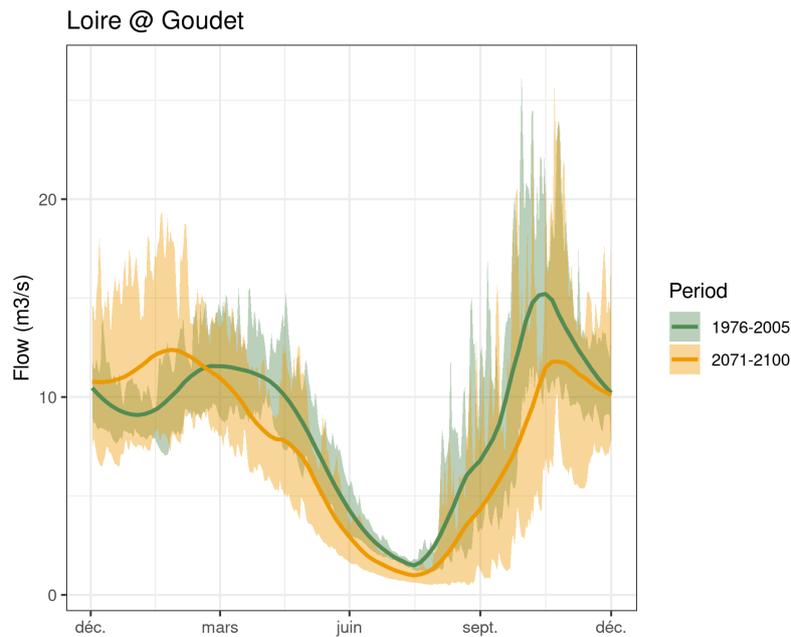


Figure 11 : Régimes hydrologiques de la Loire à Goudet en climat présent et futur (RCP 8.5) – résultats du projet EXPLORE2, modèle J2000.

3.2.3 Scénario 3 : Maintien des débits estivaux

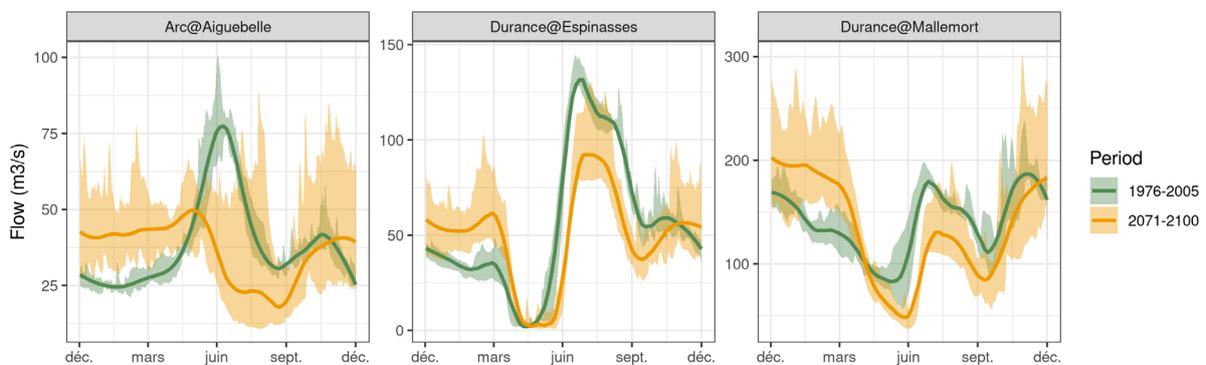


Figure 12 : Régimes hydrologiques de tronçons de cours d'eau influencés par les barrages en climat présent et futur (simulations J2000-Rhône issues du scénario 1).

Les simulations du scénario 1 montrent une baisse importante en hydrologie naturelle des débits d'étiage sur juillet, août et septembre au niveau des tronçons de rivière correspondant aux barrages (Figure 12). Le principe du scénario 3 est d'essayer d'assurer des débits estivaux proches des débits estivaux historiques, de manière par exemple à permettre un niveau d'usage de l'eau identique (irrigation notamment). Les consignes de stockage/restitution pour les mois de juin-juillet-août-septembre sont donc modifiées pour compenser les baisses de débit qui se produiraient en hydrologie naturelle. Concrètement, le déficit de débit projeté en hydrologie naturelle est converti en volume à fournir et les demandes de restitution sont augmentées (ou la demande de stockage diminuée) sur ces mois. Cela a aussi un impact sur les valeurs des fonctions objectif en hiver, pour maintenir l'équilibre annuel entre prélèvement et restitution. D'une manière générale, cela revient à diminuer les volumes restitués de novembre à mars. La diminution des volumes restitués en hiver (décembre-janvier-février) a été plafonnée à 50% des volumes actuels dans l'idée de maintenir un minima de production hydroélectrique.

Les Figures 13 et 14 représentent les fonctions objectif obtenues pour les 3 scénarios et pour chaque retenue ou dérivation.

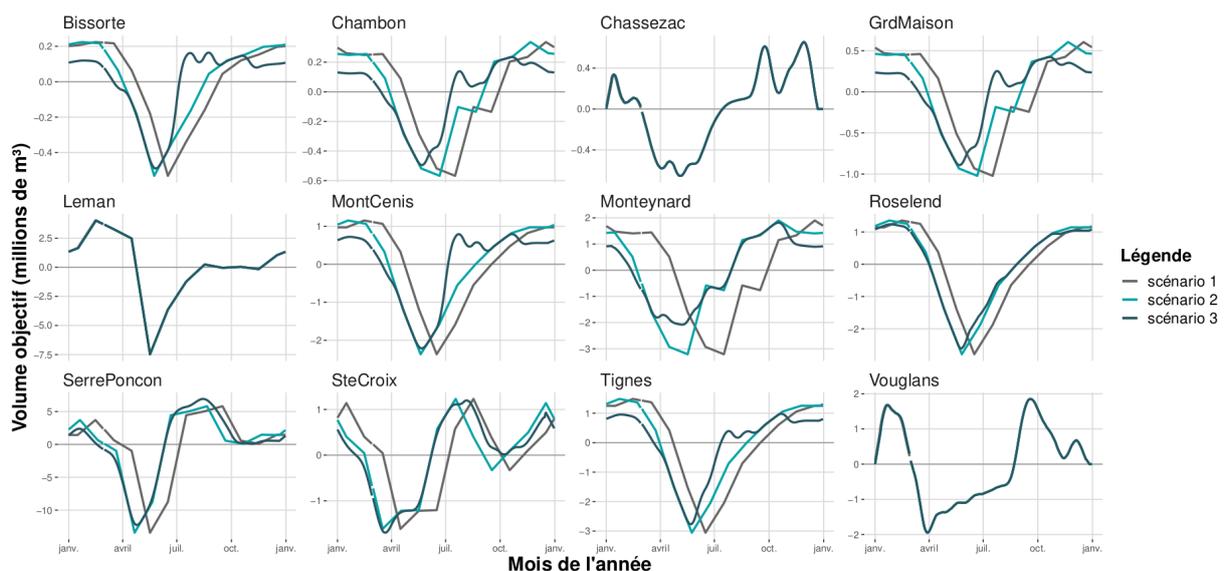


Figure 13 : Fonctions Objectif des retenues pour les 3 scénarios de gestion des barrages.

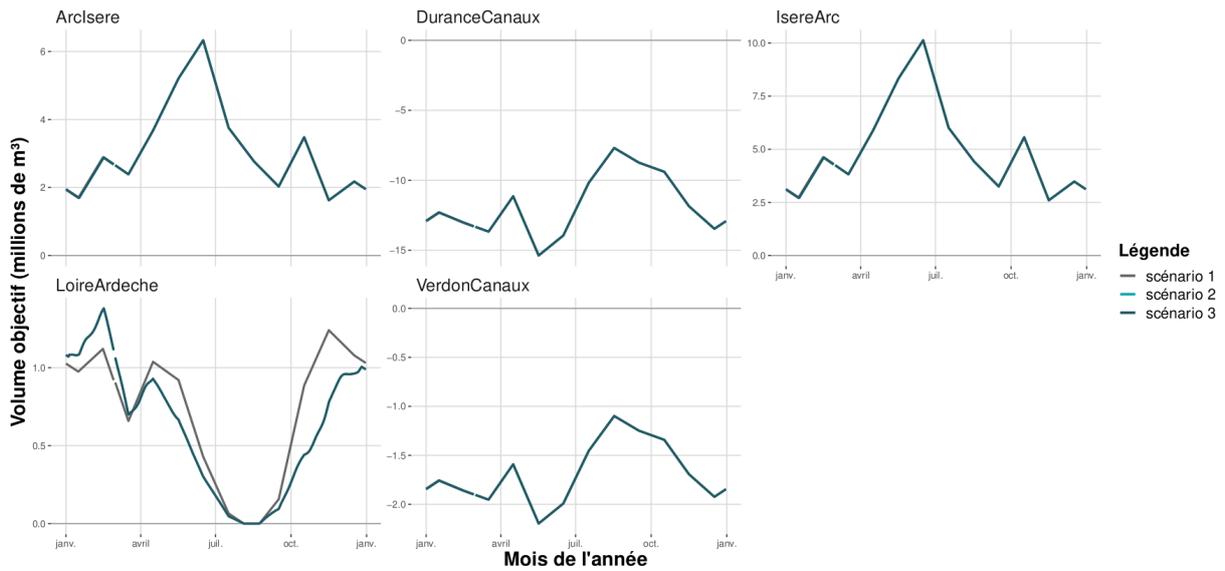


Figure 14 : Fonctions Objectif des dérivations pour les 3 scénarios de gestion des barrages.

3.3 Réalisation des simulations

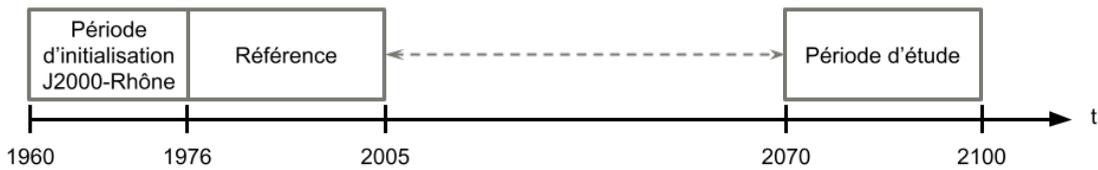


Figure 15 : Schéma des périodes de simulation.

Les simulations sont réalisées sur la période 1960-2100, avec une période d'initialisation de 16 ans. L'analyse des résultats se fait en comparant deux périodes de 30 ans : la période de référence 1976-2005 et la période future 2070-2100 (Figure 15). Le changement de scénario des fonctions objectif pour la gestion des barrages et dérivations s'effectue le 1er janvier 2040. Les consignes actuelles sont appliquées sur la période 1960-2040 quel que soit le scénario. A partir du 1^{er} janvier 2040, on applique les consignes actuelles pour le scénario 1, et les consignes spécifiques de chaque scénario pour les scénarios 2 et 3 (Figure 16).

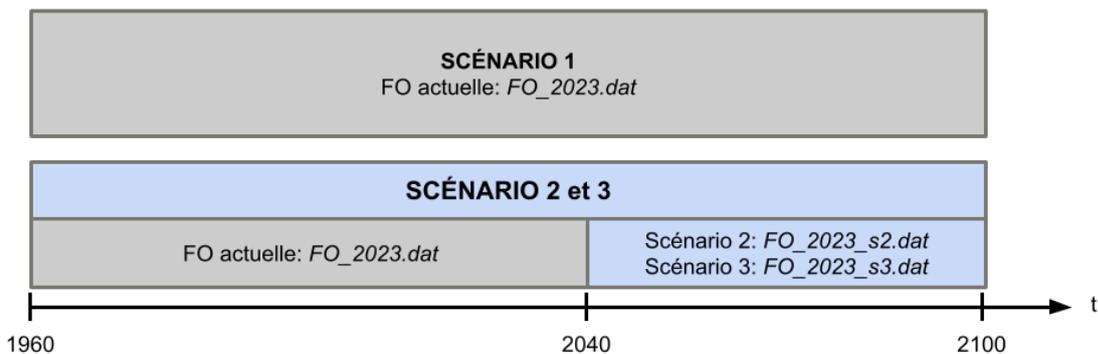


Figure 16 : Schéma des périodes d'application des scénarios de gestion des ouvrages hydroélectriques.

4 Résultats

Les résultats sont présentés pour 7 stations d'intérêt pour l'OSR, qui correspondent au Rhône à l'amont de Lyon, au Rhône à Beaucaire (exutoire du bassin) et à l'exutoire de 5 des principaux affluents du fleuve entre Lyon et l'exutoire : la Saône, le Gier, l'Isère, l'Ardèche et la Durance.

Plusieurs indicateurs hydrologiques ont été calculés de manière à représenter divers aspects du régime hydrologique :

- débit moyen annuel et débits moyens saisonniers (calculés sur les périodes décembre-janvier-février pour l'hiver, mars-avril-mai pour le printemps, juin-juillet-août pour l'été et septembre-octobre-novembre pour l'automne)
- quantiles 10 % (valeur de débit dépassée 10 % du temps) et 90 % (valeur de débit dépassée 90 % du temps), représentatifs respectivement des hauts débits et des bas débits ;
- débits journaliers interannuels, illustratifs de l'ensemble du régime hydrologique.

Ces indicateurs (sauf les débits journaliers interannuels) sont calculés sous la forme de variation relative entre période future et période de référence, et présentés sous la forme de boxplot (ligne centrale = médiane, bords des boîtes = quantiles 25 % et 75 %), doublées d'un point qui représente la moyenne.

4.1 Effet du climat seul (scénario 1)

4.1.1 Débit moyen annuel

La Figure 17 présente les variations relatives des débits moyens annuels. L'écart visible entre les valeurs médiane et moyenne s'explique par l'effet d'une projection climatique particulière (IPSL-CM5A/WRF381P), qui tire les moyennes vers le haut. Le reste de l'analyse s'appuiera donc plutôt sur les valeurs médianes. Le débit moyen annuel à l'exutoire du bassin augmente légèrement, mais on peut voir une forte variabilité dans les contributions des affluents. Notamment, les affluents de la partie Nord du bassin (Rhône amont et Saône) ont une augmentation assez forte, qui compense la diminution des débits des affluents alpins (Isère et Durance). Ceci est cohérent avec l'évolution des précipitations projetée sur le bassin et présentée sur la Figure 9.

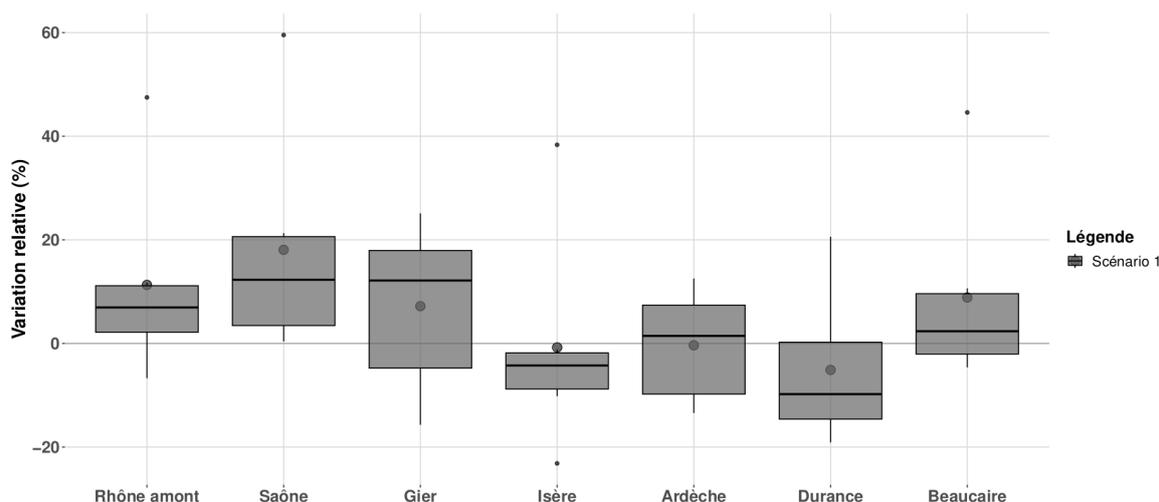


Figure 17 : Variations relatives des débits moyens annuels entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

4.1.2 Débits moyens saisonniers

Les Figures 18 à 21 présentent les variations relatives des débits moyens saisonniers et montrent que le contraste spatial se double d'un fort contraste temporel. En hiver (Figure 18), les débits augmentent de façon très importante sur le Rhône amont, l'Isère et la Saône, ce qui se traduit par un accroissement de près de 25% du débit à Beaucaire. Cela s'explique par des hivers plus chauds, impliquant en montagne moins de stockage de précipitation sous forme de neige, et par conséquent des débits plus importants sur cette période là. La tendance de la saison hivernale s'observe de manière réduite sur la saison printanière (Figure 19), surtout sur les rivières alpines (Rhône amont, Isère, Durance), ce qui s'explique par une fonte du manteau neigeux précoce, due à l'augmentation globale de la température. En été (Figure 20), les baisses de débit touchent l'ensemble des stations, et notamment les rivières alpines avec des variations de près de 50% sur l'Isère par exemple. Cette forte diminution est la conséquence de la fonte précoce de la neige, car la majeure partie du manteau neigeux a disparu durant les mois de mars à mai. Enfin, la tendance est aussi à la baisse en automne (Figure 21), et les plus gros contributeurs au débit total du Rhône (Saône et Rhône amont) voient leurs débits réduits de plus de 25%. Au final, ce sont les rivières alpines qui semblent les plus impactées, à la fois par la diminution des précipitations (surtout dans les Alpes du Sud – sur la Durance), et par l'augmentation des températures.

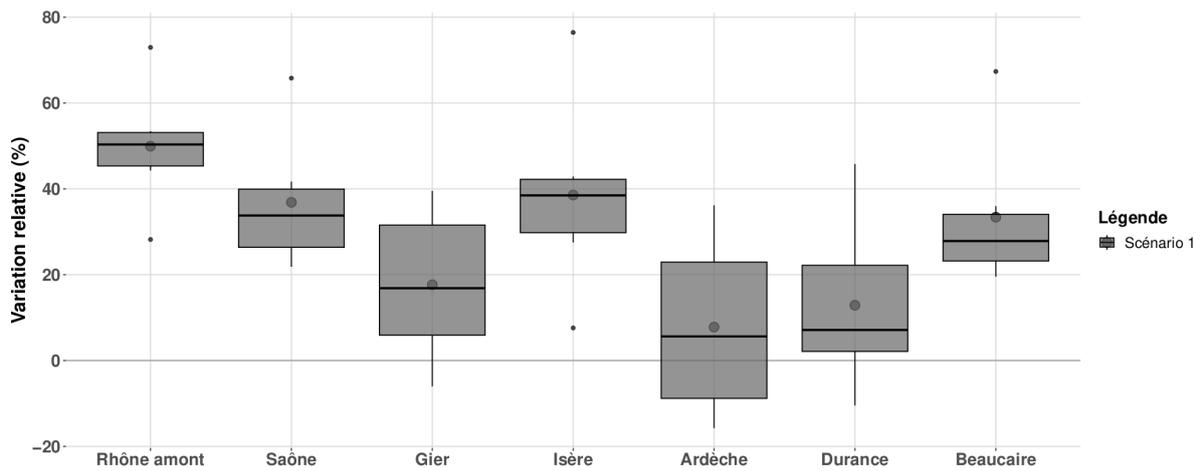


Figure 18 : Variations relatives des débits moyens de la saison décembre – janvier - février entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

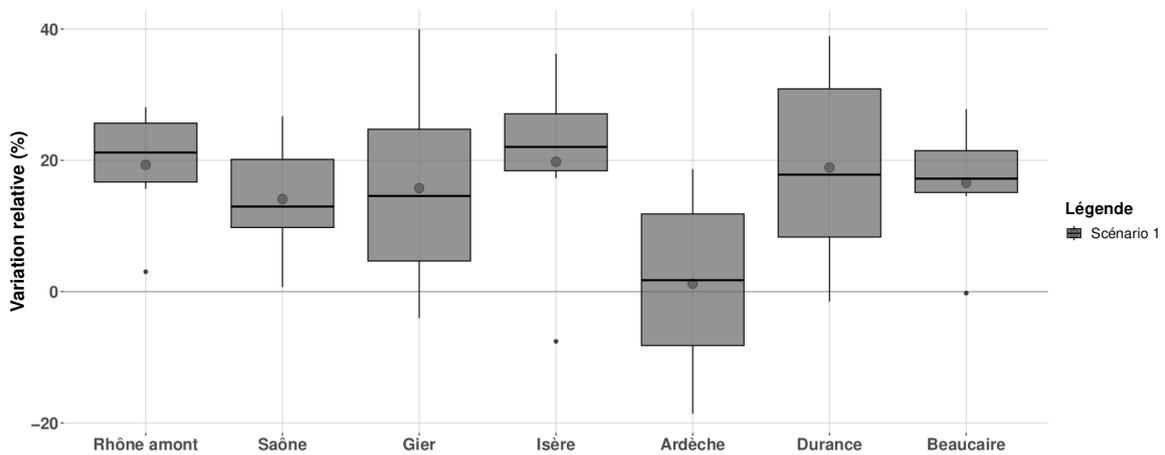


Figure 19 : Variations relatives des débits moyens de la saison mars-avril-mai entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

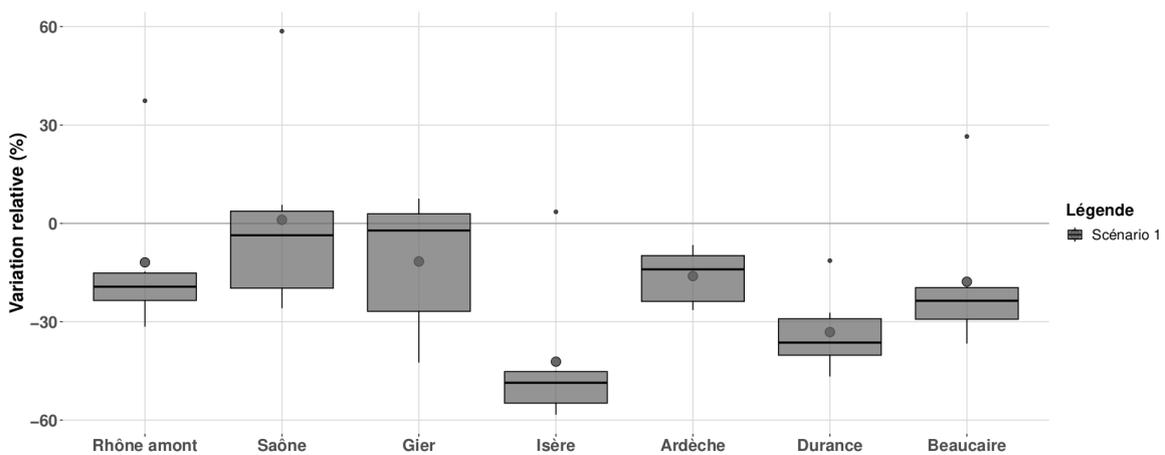


Figure 20 : Variations relatives des débits moyens de la saison juin-juillet-août entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

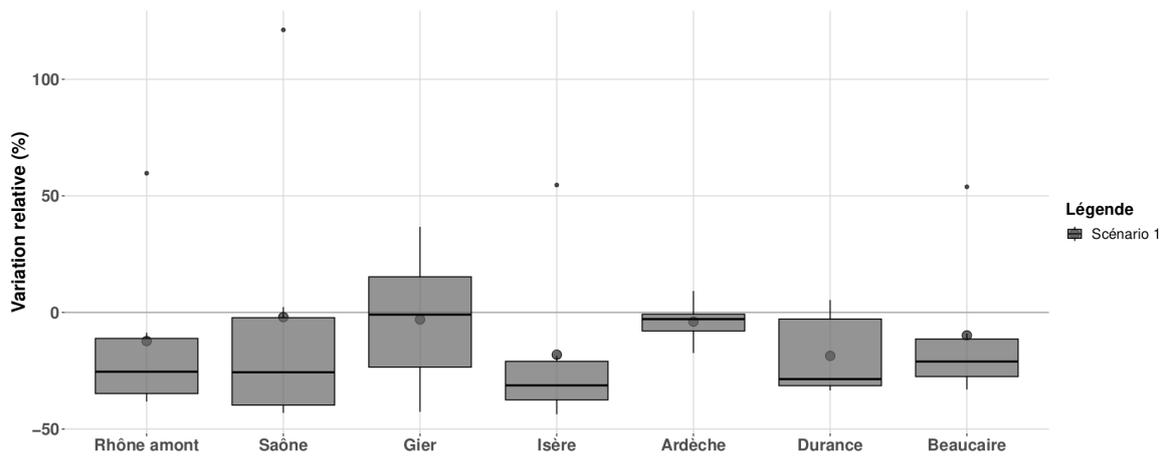


Figure 21 : Variations relatives des débits moyens de la saison septembre-octobre-novembre entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

4.1.3 Quantiles 10 % et 90 %

Les Figures 22 et 23 présentent les variations relatives des quantiles 10 % (hauts débits) et 90 % (bas débits). Le quantile 10 % (hauts débits) augmente pour l'ensemble des cours d'eau considérés, et en particulier de plus de 20 % pour le Rhône et la Saône, en lien avec l'évolution projetée des précipitations. A contrario le quantile 90 % (bas débits) diminue de façon très nette pour l'ensemble des cours d'eau également, en particulier pour l'Isère, avec un effet très visible sur le Rhône à Beaucaire également. Cela va dans le sens d'un régime hydrologique plus contrasté, avec des hauts débits plus importants, donc potentiellement plus de crues, et des étiages plus sévères et plus fréquents.

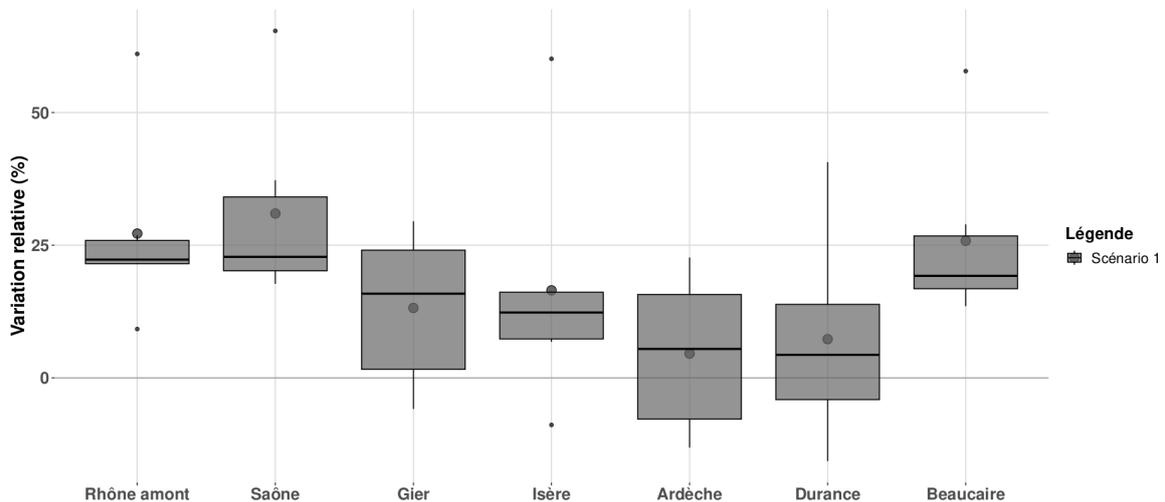


Figure 22 : Variations relatives des hauts débits (quantile 10%) entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

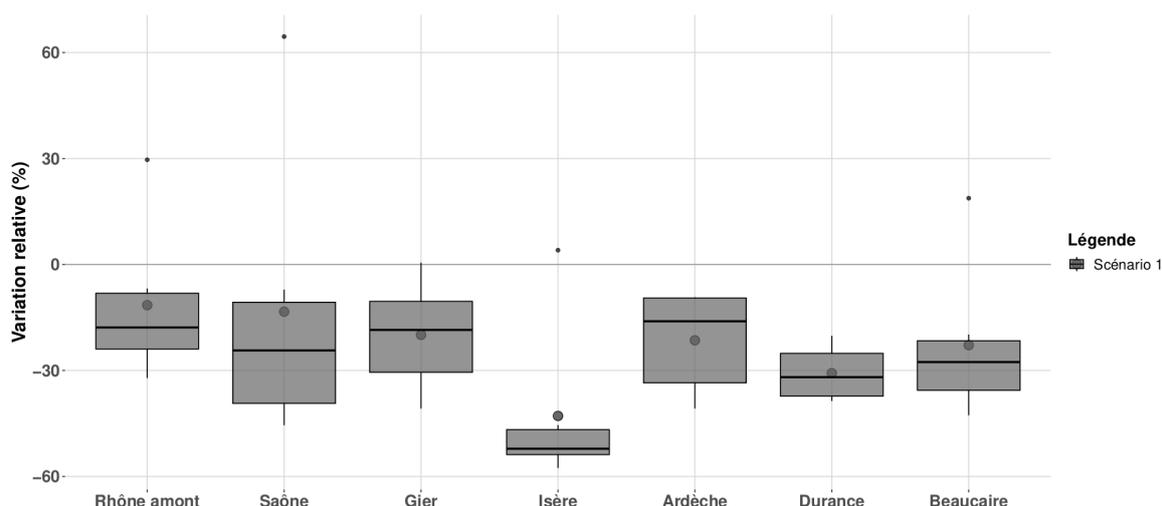


Figure 23 : Variations relatives des bas débits (quantile 90%) entre les périodes historique et future pour le scénario 1 (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

4.2 Effets conjugués du climat et de la gestion des ouvrages hydro-électriques (scénarios 2 et 3)

4.2.1 Débits moyens annuels

Les variations relatives des débits moyens annuels sont présentées sur la Figure 24. Les résultats concernant le climat sont identiques à ceux présentés précédemment. Les fonctions objectif de gestion des retenues étant équilibrées sur l'année (le volume de prélèvement est égal au volume de restitution) quel que soit le scénario, l'effet du scénario de gestion sur les débits moyens annuels est nul, sauf pour l'Ardèche. Cela s'explique par le fait que le volume apporté à l'Ardèche par la dérivation Loire-Ardèche est diminué dans les scénarios 2 et 3, pour prendre en considération la réduction du débit de la Loire en climat futur.

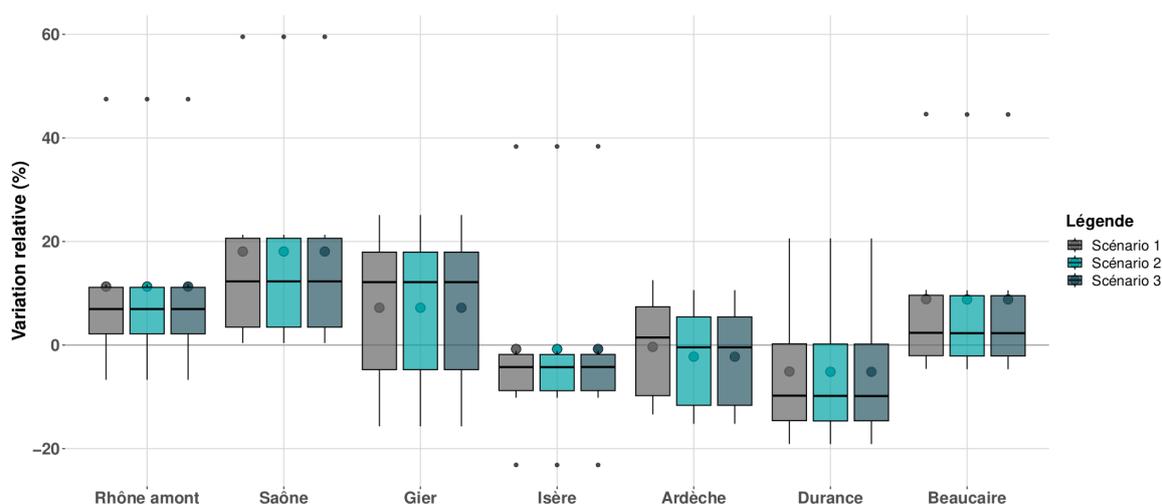


Figure 24 : Variations relatives des débits moyens annuels entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

4.2.2 Débits moyens saisonniers

Les évolutions des débits moyens saisonniers sont représentées sur les Figures 25 à 28. Il n'y a pas de différence entre les scénarios de gestion des ouvrages pour le Rhône amont, la Saône et le Gier. Cela s'explique soit par l'absence d'ouvrages pris en compte dans le modèle sur ces parties du bassin (Saône et Gier), soit par des fonctions objectif identiques pour tous les scénarios sur les ouvrages du sous-bassin (pour le Rhône amont, Léman et Vouglans). Les résultats des scénarios 2 et 3 sont identiques sur l'Ardèche comme attendu.

Les changements obtenus sur l'Ardèche sont en lien direct avec la modification de la consigne d'apport à l'Ardèche depuis la Loire pour les scénarios 2 et 3, avec une légère augmentation des débits dérivés en hiver et une diminution le reste du temps. Les changements sont plus visibles sur l'Isère et la Durance, et se répercutent de façon amortie sur le Rhône à Beaucaire.

En hiver, les débits diminuent légèrement avec le scénario 2, et encore plus avec le scénario 3, conséquence d'une consigne de volumes restitués plus faibles. Au printemps les débits diminuent fortement pour le scénario 2 par rapport au scénario 1 du fait d'une consigne de stockage plus importante pour suivre le décalage temporel de l'onde de fonte. Cela ne permet pas toutefois de retrouver le débit de la période de référence, en particulier pour l'Isère. Les effets du scénario 3 sont contrastés : sur l'Isère, les débits réaugmentent, alors qu'ils diminuent encore sur la Durance. Ceci est à relier à la diminution de la consigne de stockage du scénario 3 par rapport au scénario 2 sur les barrages de l'Isère. Sur la Durance, la consigne est quasiment identique au printemps entre les scénarios 2 et 3, mais les réserves d'eau plus faibles dans les réservoirs du fait de la fourniture d'eau en été pour le scénario 3 ne permettent pas de respecter cette consigne.

En été, l'effet des scénarios de gestion est aussi très visible. Les débits augmentent sur Isère et Durance, arrivant même au niveau des débits de la période de référence sur la Durance pour le scénario 3. Cela est dû, pour le scénario 2, à une diminution de la consigne de stockage, et pour le scénario 3, à la transformation de cette consigne de stockage en consigne de lâcher pour les ouvrages de l'Isère (et augmentation de la consigne de lâcher pour les ouvrages de la Durance).

Enfin à l'automne les modifications sont moins fortes. Sur l'Isère, les scénarios 2 et 3 augmentent les débits par rapport au scénario 1, mais plus fortement pour le scénario 2, ce qui correspond directement aux consignes données par les fonctions objectif. Sur la Durance, les débits sont diminués par rapport au scénario 1 de façon identique pour les scénarios 2 et 3. C'était attendu pour le scénario 2 car la consigne de lâcher diminue à cette période pour les barrages de la Durance. Par contre cette consigne est plus élevée pour le scénario 3 que le scénario 2 sans que cela se retrouve dans les débits. L'explication est à chercher dans le faible niveau de remplissage des réservoirs à cette période, qui ne permet pas de réaliser les objectifs.

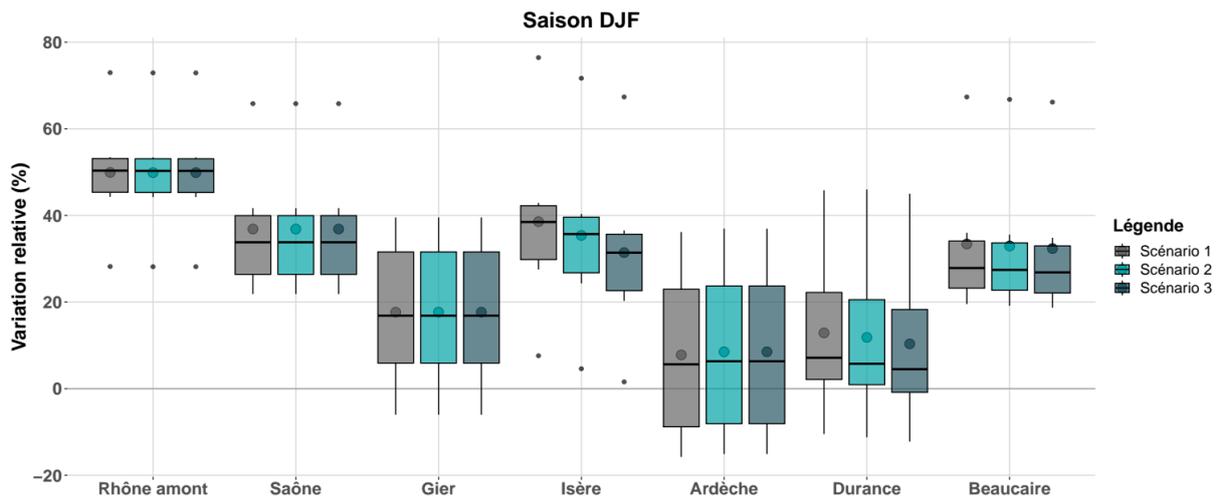


Figure 25 : Variations relatives des débits moyens de la saison décembre – janvier – février entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

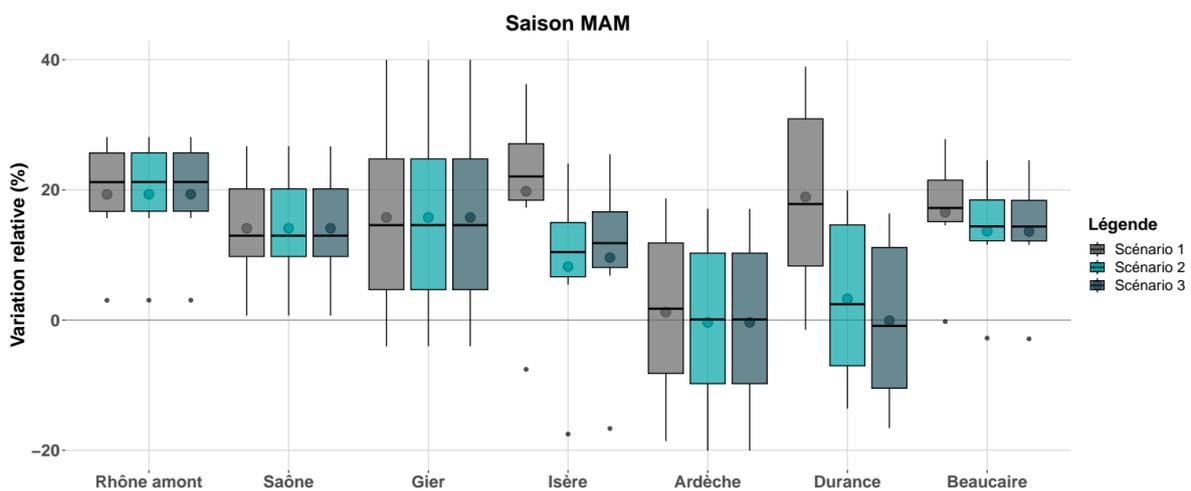


Figure 26 : Variations relatives des débits moyens de la saison mars – avril – mai entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

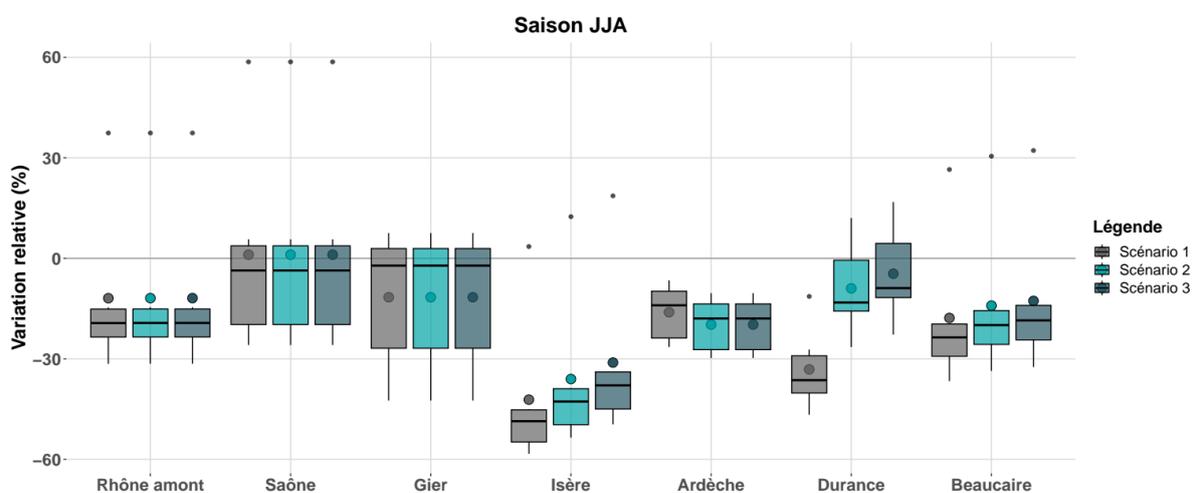


Figure 27 : Variations relatives des débits moyens de la saison juin – juillet - août entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

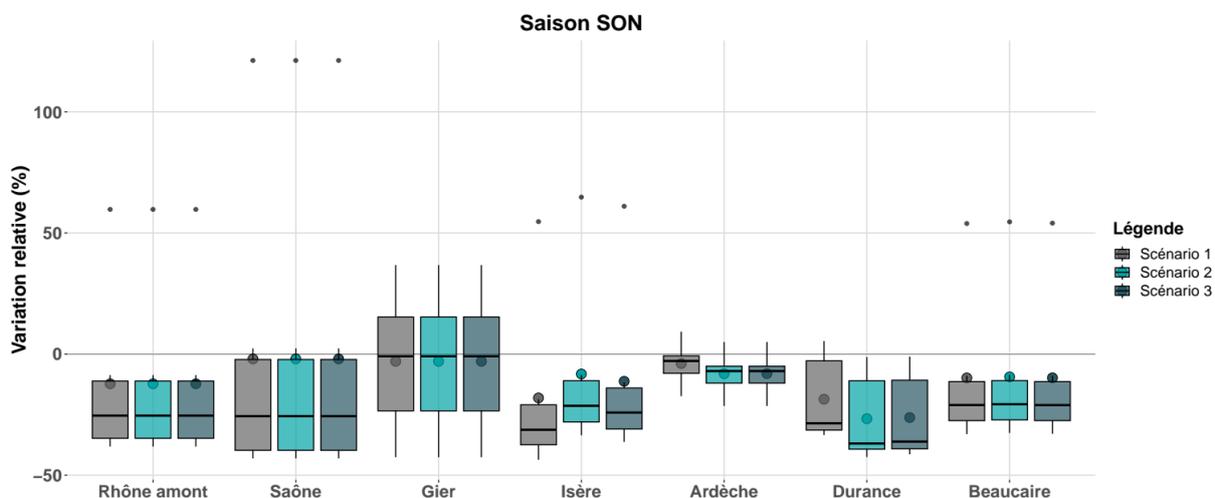


Figure 28 : Variations relatives des débits moyens de la saison septembre-octobre-novembre entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

4.2.3 Quantiles 10 % et 90 % et débits journaliers interannuels

L'évolution des quantiles 10 % et 90 % pour les différents scénarios est présentée sur les Figures 29 et 30 respectivement. Par rapport au scénario 1, les scénarios 2 et 3 limitent légèrement l'augmentation des valeurs du quantile 10 % (hauts débits) par rapport à la période de référence, sur toutes les stations influencées par les ouvrages, et en particulier pour l'Isère et la Durance. La diminution des débits d'étiage du scénario 1 est aussi partiellement compensée par les scénarios de gestion des ouvrages 2 et 3, en particulier sur l'Isère.

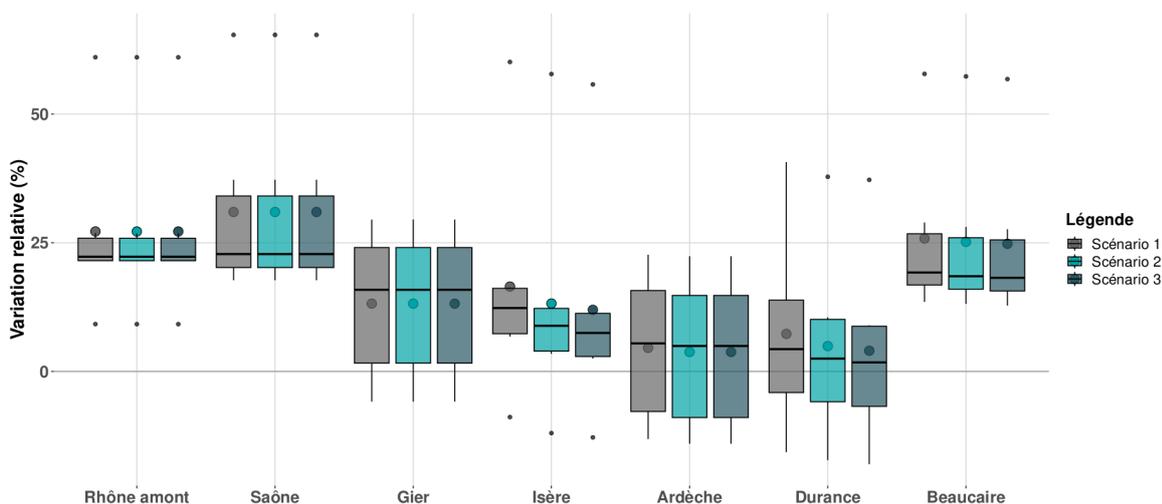


Figure 29 : Variations relatives des hauts débits (quantile 10%) entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

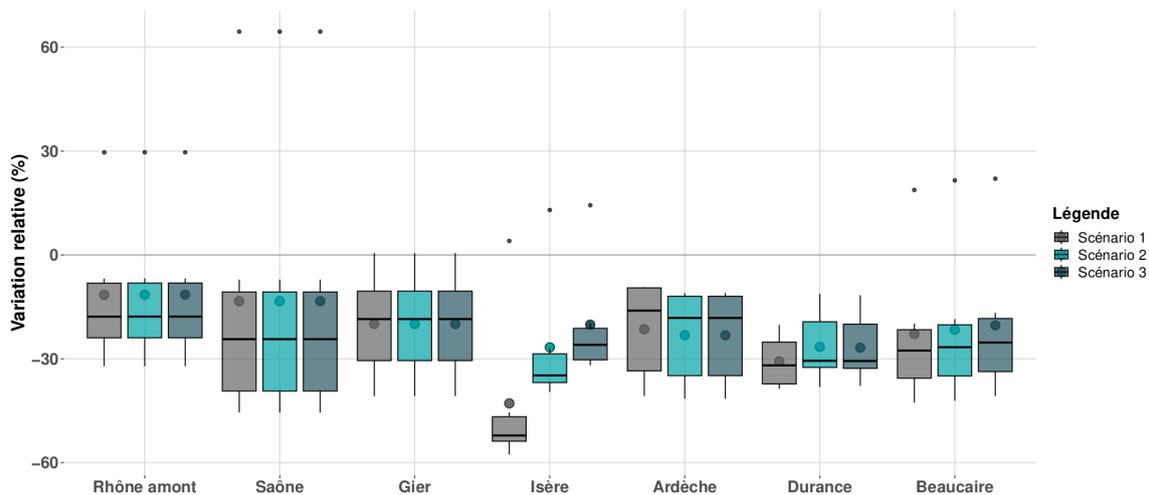


Figure 30 : Variations relatives des bas débits (quantile 90%) entre les périodes historique et future pour les 3 scénarios (ligne centrale des boxplot : médiane ; point : moyenne).

Ces résultats sont confirmés par l'étude visuelle des débits journaliers interannuels (Figure 31) sur le Rhône amont et les 5 affluents principaux du Rhône. On voit bien la hausse des débits hivernaux causée par l'augmentation des précipitations et des températures sur le Rhône amont, la Saône et le Gier. Sur le Rhône amont où l'influence nivale est importante, on voit aussi un avancement de l'onde de fonte au printemps. Sur l'Isère, on voit également une forte augmentation des débits en hiver à l'horizon 2100, un pic de fonte beaucoup plus précoce, et une forte diminution des débits en été. Les scénarios 2 et 3 de gestion des ouvrages permettent de compenser partiellement cette diminution estivale. Pour la Durance, les scénarios de gestion 2 et 3 permettent de s'approcher des débits de la période de référence en été malgré les effets du changement climatique, mais le déficit hydrique général sur le bassin ne permet pas d'assurer ce soutien d'étiage dans la durée, et ces mêmes scénarios provoquent une chute supplémentaire des débits à l'automne.

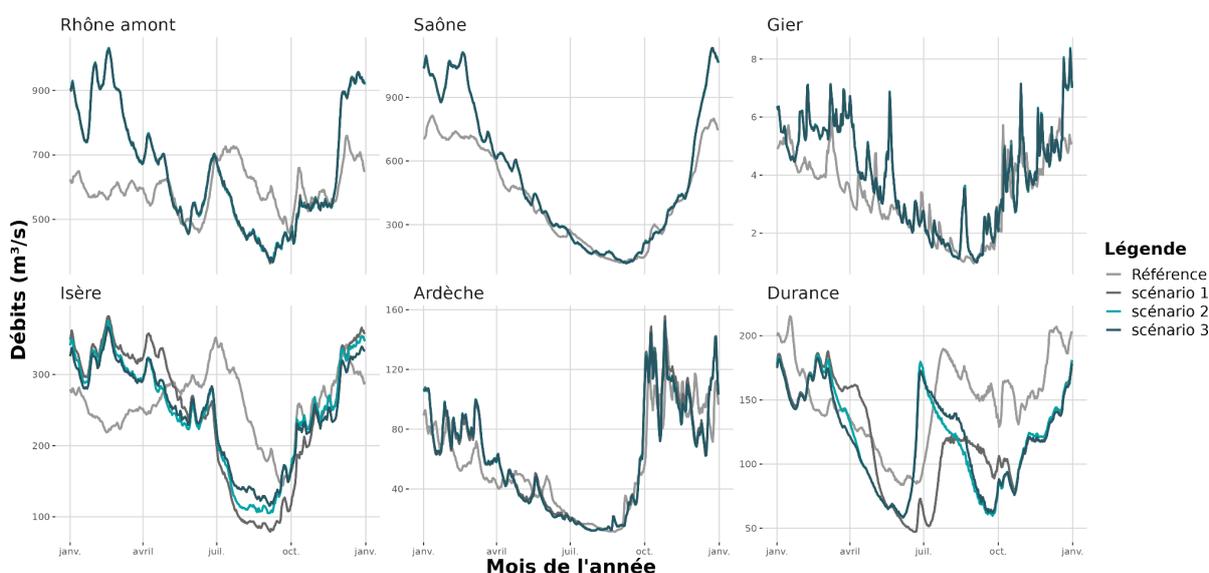


Figure 31 : Évolution des régimes hydrologiques (débits journaliers interannuels) des principaux affluents pour les 3 scénarios.

D'une manière générale il semble bien que les scénarios de gestion des ouvrages peuvent avoir un impact pour modifier, compenser ou adapter les changements des régimes hydrologiques dues au changement climatique.

4.3 Discussion : implications pour les transferts sédimentaires

Ces résultats prospectifs d'évolution des débits montrent une évolution marquée, surtout en zone de montagne. La dynamique saisonnière profondément modifiée des réactions hydrologiques et des débits peut avoir potentiellement un impact fort sur les transferts de MES. En premier lieu, avec des précipitations hivernales plutôt liquides que neigeuses, une baisse de la couverture neigeuse, et une augmentation des débits hivernaux, on peut s'attendre à des flux de MES plus importants qu'actuellement en hiver. De même, les flux de MES habituellement liés à la fonte des neiges au printemps et en été seront décalés dans le temps et plus précoces. Les modifications de gestion des retenues hydroélectriques peuvent aussi avoir potentiellement un impact, même s'il reste limité par rapport à celui du changement climatique : plus de stockage l'hiver dans les retenues (pour permettre notamment de soutenir plus fortement les étiages en été), peut avoir des conséquences en termes de piégeage des sédiments dans les retenues, et ainsi des effets sur l'apport de sédiments au Rhône.

Il n'est pas possible de quantifier ces effets potentiels à ce stade. Le lien entre débits et flux de MES dans les bassins versants dépend de plusieurs facteurs et nécessite la construction d'une modélisation spécifique, qui est traitée, pour les aspects de long-terme (échelle annuelle), dans l'action D.3. Au niveau des exutoires des affluents, il existe des relations débit-concentration déjà mises en place. Mais il n'est pas pertinent de les utiliser dans un contexte de changement global, car elles seront justement susceptibles d'évoluer significativement avec les changements de nature des écoulements induits par le changement climatique.

Il faut d'ailleurs bien garder à l'esprit que les effets événementiels n'ont pas été abordés ici. Ni le pas de temps du modèle J2000-Rhône (journalier), ni la nature des projections climatiques disponibles actuellement (également au pas de temps journalier, et obtenues à partir de modèles climatiques n'incluant pas les phénomènes de convection), ne permettent d'aborder le devenir des événements extrêmes. Par exemple, les projections montrent qu'il y aura plus de précipitations hivernales sous forme de pluie en montagne, mais on ne sait pas si ces précipitations seront plus ou moins intenses, et donc plus ou moins susceptibles de générer plus d'érosion. On sait par ailleurs que les événements de crue sont les plus importants dans le transfert de MES à l'échelle du bassin versant du Rhône (Ollivier et al., 2010, Launay et al., 2019), donc cela limite malheureusement encore la portée de nos résultats.

Les débits obtenus dans le cadre de cette action, pour les différents scénarios de climat et de gestion des retenues, ont été fournis et seront utilisés pour construire des projections de transfert sédimentaire sur le bassin, à l'échelle annuelle, dans le cadre de la modélisation mise en place dans l'action D.3.

5 Conclusions et perspectives

Le travail réalisé dans cette action D2 de l'OSR6 a permis de mettre en œuvre le modèle hydrologique distribué J2000-Rhône sous scénarios de changement climatique et de scénarios de gestion des retenues hydro-électriques. Les scénarios de climat ont été sélectionnés à partir du projet Explore2, et les scénarios de gestion des retenues ont été construits dans le cadre de cette action et du projet ContinuumMES.

Les résultats montrent une évolution significative des débits à l'horizon 2100, notamment au niveau des contrastes saisonniers, avec des étiages plus sévères et des hauts débits plus élevés. Par ailleurs, un fort contraste spatial est aussi mis en évidence dans les évolutions de l'hydrologie des affluents du Rhône. Les affluents alpins (Isère et Durance) apparaissent très impactés, avec la disparition du régime hydrologique purement nival ou nivo-glaciaire connu actuellement. Les scénarios de gestion des retenues hydro-électriques apparaissent aussi comme influents sur les débits. Le changement de régime hydrologique des affluents alpins est susceptible de générer des changements dans les sources de MES sur le bassin versant, et donc de modifier les flux attendus au Rhône à l'horizon 2100. L'état de développement des outils de modélisation, ainsi que les capacités actuelles des modèles produisant les projections climatiques, ne permettent malheureusement pas, à ce stade, d'aller au-delà des appréciations qualitatives.

En première perspective de ce travail, les projections de débits réalisées pour les différents scénarios seront utilisées dans le couplage avec le modèle sédimentaire CASCADE-Rhône pour produire des scénarios de transfert sédimentaire (action D3), au pas de temps annuel.

Les autres perspectives sont de travailler sur les autres facteurs de changement qui ont été identifiés dans l'OSR6 mais n'ont pas pu être traités. En premier lieu, la prise en compte de l'évolution des glaciers, qui est en cours de développement dans J2000-Rhône, pourrait être réalisée. L'évolution de l'occupation des sols de façon plus générale pourrait aussi être prise en compte. Enfin, il serait également intéressant de coupler plus directement la production sédimentaire à l'échelle de la HRU aux flux hydrologiques produits au pas de temps journalier pour continuer à avancer sur la quantification du lien entre changement global et transferts sédimentaires au Rhône.

6 Références bibliographiques

Branger, F., Gouttevin, I., Tilmant, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., Sauquet, E. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône: rapport final. IRSTEA, Agence de l'Eau RM&C, CNR, 2016, 110 pp. [\(hal-02605058\)](#)

Branger, F., Marçais ; J., Horner, I., Braud, I. Amélioration de la représentation des eaux souterraines dans la Modélisation hydrologique du Rhône J2000, pour une meilleure connaissance de la ressource en eau en contexte de changement global. INRAE, 2021, 49 pp. [\(hal-03993797\)](#)

Cipriani, T., Sauquet, E. Altération de l'hydrologie des cours d'eau par des ouvrages hydrauliques. IRSTEA, 2014, 200 pp. [\(hal-02600698\)](#)

CMIP5 (2011). CLIVAR Exchanges - Special Issue : WCRP Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5 -CMIP5. Project Report 56.

Flügel, W.-A., 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany, *Hydrological Processes* **9**(3-4), 423-436.

Krause, P., Base, F., Bende-Michl, U., Fink, M., Flugel, W., Pfenning, B., 2006. Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment, *Advances in Geosciences* **9**, 53-61.

Launay, M., Dugué, V., Faure, J.-B., Coquery, M., Camenen, B., Le Coz, J., 2019. Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network, *Science of the Total Environment* **665**, 591-605, <https://hal.science/OSR/hal-02553064>

Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F., 2020. The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France, *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>

Ollivier, P., Hamelin, B., Radakovitch, O., 2010. Seasonal variations of physical and chemical erosion: A three-year survey of the Rhone River (France), *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**(3), 907-927, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.10.037>

Pellerin, N. Modélisation intégrée des flux d'eau et de MES dans le continuum terre - fleuve - mer Bassin du Rhône – Fleuve Rhône – Golfe du Lion : Validation modèle temps présent et simulation sous projections climatiques et scénarios de gestion des principaux ouvrages. *Sciences de l'environnement*, 2023, [\(dumas-04128748\)](#)

Radakovitch, O., Fressard, M., Coquery, M., Morandi, B., Boyer, P. et al. Synthèse du séminaire du 27 Janvier 2022. « Identifier les scénarios du changement pour anticiper les impacts sur le transfert sédimentaire dans le Rhône ». OSR6 | Axe D - Action D1 | Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] IRSN; CNRS; INRAE; GRAIE, 2022, <https://hal.science/OSR/hal-03750544>

Robin, Y., Corre, L., Marson, P., Bernus, S., Vrac, M., Thao, S. Explore2: projections climatiques régionalisées: correction de biais et changements futurs. *Projet Explore2*, 2023, 62 pp. <https://doi.org/10.57745/99X4CD>.

Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubouisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., Tocquer, F., Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS-2020 pour la Métropole. *Météo-France*, 2020, 98 pp. <https://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. and Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.*, **30**: 1627-1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers



Cofinancé par
l'Union européenne