

➤ **Étude Hydrologie, Milieux, Usages et Climat sur l'axe Loire**

Volet Climat

Blaise Calmel, Jean-Philippe Vidal

INRAE, Unité de Recherche RiverLy

09/10/2025

Table des matières

1 Introduction	4
1.1 Contexte et objectifs de l'étude	4
1.2 Périmètre de l'étude	5
2 Données mobilisées	8
2.1 Données Climatiques	8
Longues séries Homogénéisées	8
Projections climatiques Explore2	8
2.2 Données hydrologiques	9
Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages	9
Projections hydrologiques Explore2	10
Synthèse - Données hydroclimatiques	11
3 Définition de narratifs hydroclimatiques	12
3.1 Les narratifs climatiques Explore2	12
3.2 Narratifs hydroclimatiques	13
Méthode de définition des narratifs hydroclimatiques	13
Narratifs sous TRACC	17
Synthèse - L'approche narrative	19
4 Analyse rétrospective	20
4.1 Climat	20
4.2 Hydrologie	22
Synthèse - Le bassin de la Loire hier et aujourd'hui	25
5 Les futurs de la Loire au long du xxI^e siècle	26
5.1 Climat	26
5.2 Hydrologie naturelle	31
Débit moyen	31
Régime mensuel	35
Bas débits	37
Hauts débits	51
Synthèse - Le bassin de la Loire au fil du siècle	59
6 Les futurs de la Loire selon la TRACC	60
6.1 Climat	60
6.2 Hydrologie dans une France à +2,7 °C	65
Débits moyens	65
Bas débits	68
Hauts débits	78
Synthèse - Le bassin de la Loire dans une France à +2,7 °C	82
6.3 Hydrologie dans une France à +4,0 °C	83
Débits moyens	83
Bas débits	86
Hauts débits	95
Synthèse - Le bassin de la Loire dans une France à +4,0 °C	99

7 Conclusions	100
Références	101
Annexes	103
A QMN5 - Débits normalisés saisonniers	103
B Q10 - Cartes de variations	105

Ce document contient des figures, graphiques ou tableaux sans description alternative. Pour obtenir une description, contactez dep@eau-loire-bretagne.fr

1 Introduction

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Le volet climat de l'étude HMUC Axe Loire s'inscrit dans le cadre d'une convention de Recherche et Développement entre l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et INRAE (*Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement*). Cette convention, appelée **EHCL0** pour *Exploration HydroClimatique de la Loire*, vise à « développer un outil opérationnel permettant de définir des narratifs hydroclimatiques pour un territoire français donné, en cohérence avec les résultats du projet Explore2 et la TRACC »¹.

Cette convention s'inscrit donc dans la continuité de plusieurs actions de recherche et d'appui aux politiques publiques :

- Le projet **Explore2**² (2021-2026) coordonné par INRAE qui vise à mettre à jour les projections hydrologiques sous changement climatique sur la France hexagonale et la Corse, grâce à l'implication d'une grande partie de la communauté de recherche française en climatologie et hydrologie;
- Le projet **LIFE Eau&Climat**³ (2021-2025) coordonné par l'Office International de l'Eau et regroupant des partenaires scientifiques et des gestionnaires de l'eau. Le projet LIFE Eau&Climat visait notamment à développer des outils permettant de prendre en compte les projections hydrologiques dans les stratégies territoriales d'adaptation au changement climatique. Cette convention s'inscrit plus spécifiquement dans la droite ligne de l'action *Renforcer les échanges entre gestionnaires et chercheurs* animée par INRAE. Cette action a principalement produit deux outils : (1) le portail MEANDRE (<https://meandre.explore2.inrae.fr/>) permettant de visualiser de manière interactive les principaux messages sur les futurs de l'eau en France issus du projet Explore2, et (2) le guide méthodologique / Livre dont Vous êtes héros intitulé *Mener une étude rétrospective et prospective sur la ressource en eau* (<https://livreec.inrae.fr/>).

Cette convention s'inscrit par ailleurs dans le contexte du lancement de la **Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC)**⁴ (SOUBEYROUX et al., 2024; SOUBEYROUX et al., 2025) et du **3^e Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC3)**⁵ (PNACC3 2025). Ces deux initiatives imposent donc d'avoir un regard nouveau sur l'ensemble des projections hydrologiques développées dans Explore2⁶ sous l'angle des degrés de réchauffement imposés dans la TRACC.

Le présent rapport constitue le Volet Climat de l'étude HMUC Axe Loire. Au-delà des projections hydrologiques sur l'Axe Loire, il vise à proposer in fine et de manière inédite une méthodologie pour définir des projections hydrologiques contrastées – appelées narratifs – à partir des projections Explore2 comme dans les récentes études HMUC, mais aussi compatibles avec la TRACC.

Le rapport s'articule autour de 6 sections, après une définition du périmètre de l'étude. La **Section 2** présente l'ensemble des données climatiques et hydrologiques mobilisées sur le bassin. La **Section 3** introduit l'approche par narratifs, tout d'abord via les narratifs climatiques Explore2, puis en décrivant la procédure d'identification de narratifs hydroclimatiques applicables à un horizon temporel, dans le cadre de scénarios d'émissions, ou à un degré de réchauffement, dans le cadre de la TRACC. La **Section 4** présent l'analyse de tendance de variables climatiques et hydrologiques sur les dernières décennies sur le bassin de la Loire. Les deux dernières sections s'intéressent enfin aux futurs climatiques et hydrologiques de la Loire au long du xxie siècle (**Section 5**) et selon les degrés de réchauffement de la TRACC (**Section 6**). Chacune des sections ci-dessus se termine par une synthèse d'une page sur les messages principaux de la section. Enfin, la **Section 7** conclut l'étude.

1. TRACC : Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique

2. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

3. <https://www.gesteau.fr/life-eau-climat>

4. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/trajectoire-rechauffement-reference-ladaptation-changement-climatique-tracc>

5. <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/gouvernement-lance-nouveau-plan-national-dadaptation-changement-climatique>

6. Projections disponibles sur recherche.data.gouv.fr : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>

À noter que ce rapport s'intéresse à l'évolution du climat sur le bassin et à la « ressource » en eau passée et future, c'est-à-dire aux **débits naturels soumis seulement à l'évolution de ce climat**. En particulier, les évolutions passées et futures des débits soumis aux diverses influences humaines sur le bassin versant ne sont pas considérées.

1.2 Périmètre de l'étude

Les axes Allier et Loire présentent depuis plusieurs années des conditions d'étiages qui sont sources de tensions croissantes avec les usagers et les consommateurs dépendants de ces milieux. Malgré la présence des ouvrages de Naussac et Villerest, permettant d'apporter du soutien d'étiage, les années 2022 et 2023 ont été particulièrement critiques. En réponse à ces limites, différentes études climatiques prospectives ont été réalisées répondant à un besoin de connaissances sur ces cours d'eau afin de gérer durablement la ressource en eau et préserver les milieux aquatiques.

Ce Volet Climat se concentre sur les stations hydrométriques présentes sur l'axe Loire, sur l'axe Allier ainsi que sur le Chapeauroux permettant, entre autres, de s'intéresser aux enjeux stratégiques que sont les barrages de Naussac et de Villerest tout en étant représentatif de l'ensemble du linéaire du fleuve. Au total, **66 stations hydrométriques** seront analysées dans cette étude :

- 44 stations sur la Loire;
- 24 stations sur l'Allier;
- 2 stations sur le Chapeauroux.

Les stations utilisées sont simulées par **plus de 4 modèles hydrologiques (HM)** (voir [Section 2.2](#)) afin d'éviter de limiter des biais dans l'analyse liés à une trop faible diversité de simulations. Seule la station de Nantes est simulée par moins de 4 modèles, l'aval du bassin ayant été sujet d'un nombre moins important de modélisations que l'amont ([Figure 1](#)).

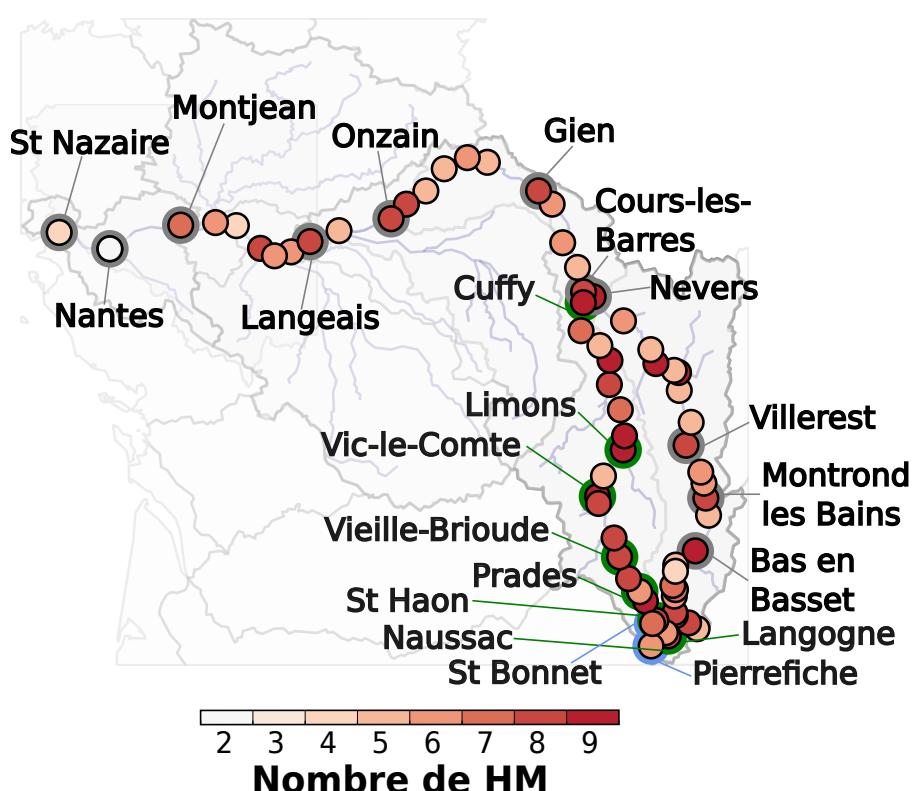


FIGURE 1. Carte de l'ensemble des stations étudiées dont les stations cibles entourées en couleur (en gris les 11 stations cibles sur la Loire, en vert les 8 stations cibles sur l'Allier et en bleu les 2 stations cibles sur le Chapeauroux) et le nombre de modèles hydrologiques disponibles par station.

Par ailleurs, l'axe Loire est divisé en 6 unités de gestion (UG), de l'amont vers l'aval (Figure 2) :

- UG5 : de la source à Nevers;
- UG4 : de Nevers à Giens;
- UG3 : de Giens à Onzain;
- UG2 : de Onzain à Langeais;
- UG1 : de Langeais à Montjean-sur-Loire;
- UG0 : de Montjean-sur-Loire à la mer.

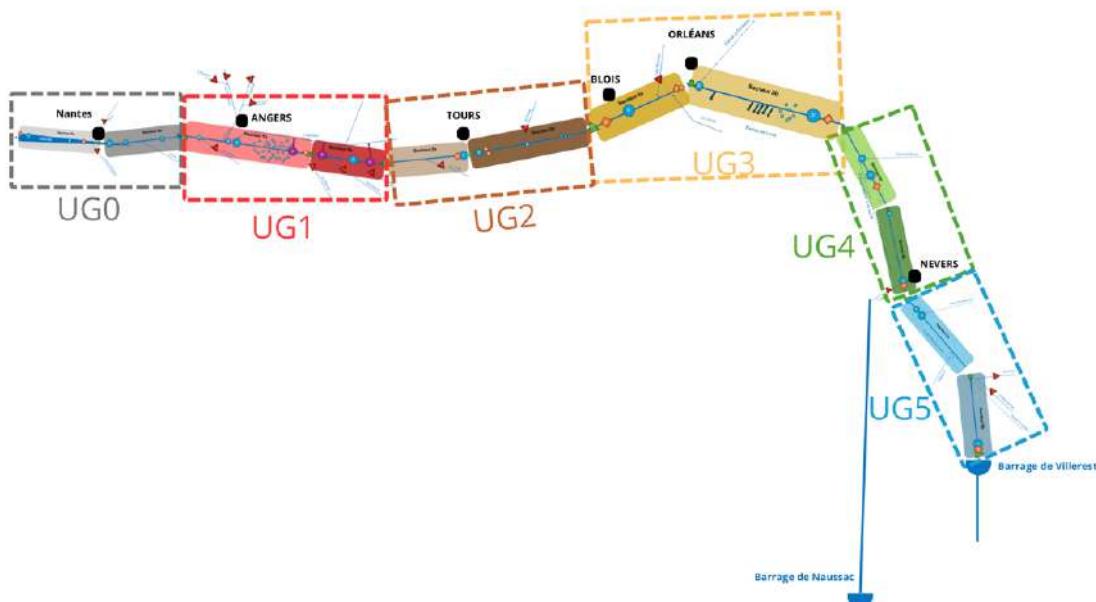


FIGURE 2. Représentation schématique des différentes UG et sous-UG de l'axe Loire (source : Agence de l'Eau Loire-Bretagne).

Enfin, afin de pouvoir s'intéresser plus en détails aux séries temporelles des données, une vingtaine de stations ont été sélectionnées en tant que stations cibles (stations entourées en Figure 1). Ces stations s'inscrivent d'une part dans les enjeux entourant les infrastructures stratégiques sur ces rivières et permettent d'autre part d'avoir une bonne couverture spatiale sur le territoire. La station à l'aval de chaque UG est intégrée aux stations cibles.

Concernant la rivière Allier, celle-ci est couverte par deux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) : le SAGE du Haut-Allier et Allier aval (Figure 3). Ces deux SAGE fixent les enjeux sur la gestion quantitative des ressources en eau. D'une part avec un objectif d'amélioration de la gestion quantitative. D'autre part un objectif de satisfaction des besoins des milieux à long terme. Sur la zone aval du bassin de l'Allier, un PTGE (Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau) est en cours d'élaboration. Une étude socio-économique est également programmée et sera réalisée sous condition d'obtenir des financements en 2025.

Afin de répondre à l'ensemble de ces objectifs et de définir une stratégie, les Commissions Locales de l'Eau se sont engagées, avec le portage de l'étude par l'Etablissement Public (EP) Loire (structure porteuse des deux SAGE), à réaliser une analyse HMUC Allier qui est en cours depuis 2019. Les valeurs des débits cibles et des volumes prélevables seront validées respectivement dans le cadre de l'élaboration de la stratégie en 2025 sur l'ensemble des affluents de l'Allier et sur l'Allier amont, mais pas sur l'axe Allier réalimenté.

Les autorités de bassin (CLE du Haut-Allier, CLE Allier-aval et l'EP Loire) ont identifié comme influence majeure le rôle de l'Allier dans l'hydrologie de la Loire, tout particulièrement pour la réalimentation du barrage de Naussac. L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, dans le cadre de la réalisation de l'étude HMUC Axe

Loire, a souhaité répondre aux attentes des autorités de bassin via en étendant les méthodes appliquées sur l'axe Loire à l'Allier.

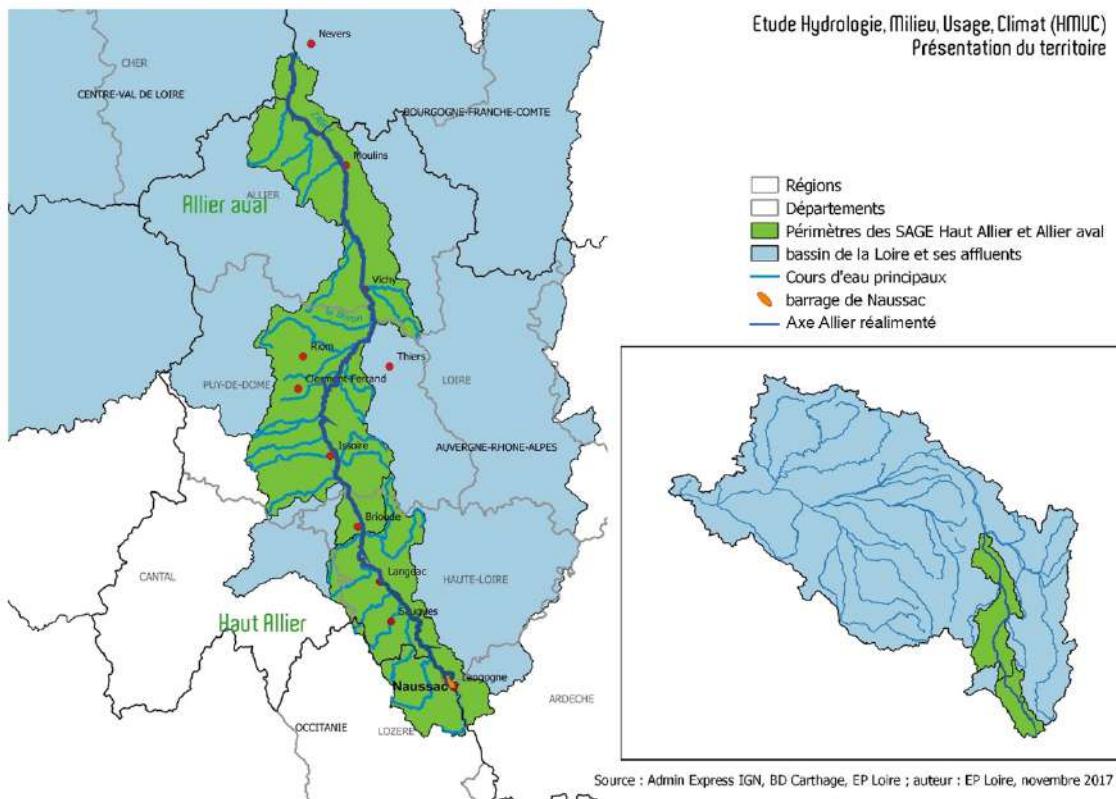


FIGURE 3. Carte de l'axe Allier, des périmètres des SAGE Haut Allier et Allier aval et des principaux sites stratégiques.

2 Données mobilisées

2.1 Données Climatiques

Longues séries Homogénéisées

Les Longues Séries Homogénéisées (LSH) font partie des *Données de référence pour le changement climatique* proposées par Météo-France. Les LSH sont ainsi le jeu de données de référence pour explorer les tendances climatiques sur la France au cours des dernières décennies : <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/6569b2c4f1937611d4c8b1a3>. Ces séries sont homogénéisées entre elles dans le temps et l'espace pour détecter et corriger des homogénéités dans les mesures, liées à des changements de capteurs ou encore à des changements de l'environnement local de chaque station (MOISSELIN et SCHNEIDER, 2002 ; GIBELIN et al., 2014).

Sur le bassin de la Loire sont disponibles 324 séries de précipitation, 49 séries de température minimale et 57 séries de température maximale. L'analyse des tendances se fait ici sur la période 1968-2024, pour être en cohérence avec la disponibilité des séries de débits (voir section 2.2). À noter que les LSH sont homogénéisées **au pas de temps mensuel**. En conséquence, uniquement une analyse des tendances sur les moyennes saisonnières est effectuée ici, donnant accès aux évolutions majeures des précipitations et des températures sur le bassin.

Projections climatiques Explore2

Le projet **Explore2**, piloté par INRAE en collaboration avec l'Office International de l'Eau (OIEau), s'est inscrit dans la continuité de l'étude **Explore 2070 (2010-2012)**. Ce dernier avait permis aux acteurs de la recherche, sous la tutelle du Ministère de l'Énergie, d'élaborer des scénarios prospectifs sur l'évolution des ressources en eau à l'échelle nationale (CARROGET et al., 2017). Lancé en juillet 2021, Explore2 fut co-financé par ses partenaires, ainsi que par le Ministère de la Transition écologique (MTE) et l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Explore2 avait pour objectif de mettre à jour les connaissances des effets du changement climatique sur l'hydrologie en s'appuyant sur les dernières publications du GIEC. Dans ce but, le projet s'est doté d'un Volet Climat. Celui-ci correspond à une **sélection de projections climatique à haute résolution**, corrigées de leurs biais, qui couvrent la France métropolitaine de 1976 à 2100 (MARSON et al., 2024).

Les modèles climatiques nécessitent en entrée des scénarios d'émission de gaz à effet de serre appelés *Representative Concentration Pathway* (RCP). Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons le RCP 8.5 qui correspond au prolongement de la croissance du point de vue socio économique. Cela se traduit par un forçage radiatif de l'ordre de 8,5 W.m⁻² et une concentration supérieure à 1370 eq. CO₂ en fin de siècle. Ce scénario a été privilégié car il est le seul qui permet de simuler un niveau de réchauffement +4,0 °C suivant les prérogatives de la TRACC (voir Section 6).

L'ensemble de simulations climatiques EURO-CORDEX regroupe plus d'une centaine de projections couvrant l'Europe avec une résolution de 12 km. Ces projections sont issues de modèles régionaux (RCM) contraints par divers modèles climatiques globaux (GCM) du projet CMIP5, utilisés notamment dans le **cinquième rapport du GIEC (2013)** (GIEC, 2013). Parmi ces projections, douze couples GCM/RCM ont été sélectionnés et corrigés à l'aide de la méthode ADAMONT pour constituer le jeu de données DRIAS-2020.

Explore2 a permis, par la suite, d'enrichir le jeu de données avec 7 nouveaux couples GCM/RCM permettant d'obtenir des simulations d'une part issues des études les plus récentes avec les **forçages aéro-sols évolutifs** (nécessaires pour simuler l'évolution future du rayonnement) et d'autre part d'effectuer une **analyse des incertitudes**. Les résultats des projections ont été comparés aux simulations issues de CMIP6 sur la France notamment en termes de variations saisonnières. Après ces différentes étapes de sélection, le projet Explore2 a ainsi retenu 17 couples GCM/RCM distincts issus de 6 GCMs CMIP5 et 9 RCMs (Table 1).

Modèles de circulation générale (GCM)	Modèles climatiques régionaux (RCM)	Date de début de la chronique historique
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	01/08/1951
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	01/08/1952
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	01/08/1950
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	01/08/1970
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	01/08/1952
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	01/08/1950
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	01/08/1950
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	01/08/1971
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	01/08/1952
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	01/08/1951
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	01/08/1970
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	01/08/1950
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	01/08/1970
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	01/08/1950
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	01/08/1951
NCC-NorESM1-M	GERICS-REMO2015	01/08/1950
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	01/08/1951

TABLE 1. Tableau des 17 modèles de circulation générale, modèles climatiques régionaux et dates de début des chroniques historiques sélectionnés dans le cadre du projet Explore2.

Ces simulations climatiques ont été corrigées de leur biais à l'aide de la réanalyse SAFRAN (VIDAL et al., 2010; LE MOIGNE et al., 2020) couplée aux méthodes de correction de biais ADAMONT et CDF-t. Dans le cadre de ce volet Climat de l'étude HMUC Axe Loire, nous utiliserons les données climatiques issues du jeu de données Explore2 avec la correction ADAMONT sous RCP 8.5. ADAMONT a été préféré à CDF-t car cette dernière présente peu de différences avec ADAMONT et n'est pas disponible pour plusieurs simulations hydrologiques, car CDF-t n'est pas adaptée pour des modèles hydrologiques à pas de temps horaire. De plus, la TRACC a été construite à partir des projections corrigées avec ADAMONT (SOUBEYROUX et al., 2024). L'ensemble de ces données est disponible en ligne librement ce qui garantit la réplicabilité complète de ces travaux. Par ailleurs, l'approche a été pensée de telle sorte à pouvoir être reproduite sur d'autres territoires ou des horizons temporels différents notamment, en utilisant l'ensemble des modèles hydrologiques et la correction de biais ADAMONT.

2.2 Données hydrologiques

Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages

Le **Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages** (RRSE GIUNTOLI et al., 2013) est un ensemble de stations hydrométriques sélectionnées sur la base de trois critères :

- une profondeur historique de plusieurs dizaines d'années de mesures;
- un bassin versant jaugé peu influencé par les activités humaines;
- une bonne qualité de mesures à la fois en hauts débits et en bas débits.

Le RRSE, développé dans l'Unité de Recherche RiverLy avec le soutien de l'ONEMA (à présent Office Français pour la Biodiversité) constitue la référence de toute étude de tendances passées pour étudier l'effet du changement climatique sur les dernières décennies (<https://professionnels.ofb.fr/index.php/fr/node/43>). Il est ainsi utilisé dans le portail **Makahō** (<https://makaho.sk8.inrae.fr/>) développé lui aussi dans l'Unité de Recherche RiverLy, et dont les analyses seront utilisés dans la [Section 4](#).

Projections hydrologiques Explore2

En plus de son Volet Climat ([Section 2.1](#)), le projet Explore2 avait également pour objectif de regrouper l'ensemble des connaissances autour de l'**impact du changement climatique sur les ressources en eau** en France métropolitaine tout au long du xxi^e siècle. Cette mise à jour repose sur le calcul de projections hydrologiques permettant de générer des indicateurs hydrologiques représentatifs des évolutions à venir et de faire des choix éclairés sur la sélection des chaînes de simulations.

Un diagnostic a été effectué sur les différents modèles afin de garantir leur capacité à reproduire l'hydrologie passée. Ce diagnostic repose sur la comparaison entre des débits ou des niveaux piézométriques de référence et les valeurs simulées par les modèles. Neuf modèles d'hydrologie de surface ont été retenus :

Nom	Organisme	Type	Région(s) simulée(s)	N
CTRIP	Météo-France	base physique	France	37
EROS	BRGM	conceptuel	Bretagne et Loire	39
GRSD	INRAE	conceptuel	France	64
J2000	INRAE	base physique	Loire et Rhône	64
MORDOR-SD	EDF	conceptuel	France	19
MORDOR-TS	EDF	conceptuel	Loire	61
ORCHIDEE	IPSL	base physique	France	65
SIM2	Météo-France	base physique	France	31
SMASH	INRAE	conceptuel	France	65

TABLE 2. Caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2 (N : nombre de points simulés sur les 66 stations hydrométriques de l'étude) (<https://www.drias-eau.fr/accompagnement/sections/304>)

Synthèse - Données hydroclimatiques

Jusqu'à 153 futurs hydroclimatiques simulés...

En rouge : les modèles utilisés dans cette étude

1 scénario d'émission de gaz à effet de serre sélectionné

RCP 2.5

RCP 4.5

RCP 8.5

× 17 couples GCM-RCM sélectionnés

6 modèles de circulation générale (GCM)

CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
ICHEC-EC-EARTH
MOHC-HadGEM2-ES
IPSL-IPSL-CM5A-MR
MPI-M-MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M

10 modèles climatiques régionaux (RCM)

CLMcom-CCLM4-8-17
CNRM-ALADIN63
DMI-HIRHAM5
GERICS-REMO2015
ICTP-RegCM4-6
IPSL-WRF381P
KNMI-RACMO22E
MOHC-HadREM3-GA7-05
MPI-CSC-REMO2009
SMHI-RCA4

× 1 méthode de correction de biais

AdaMont CDF-t

× 9 modèles hydrologiques sélectionnés

C-TRIP EROS GRSD
J2000 MORDOR-SD MORDOR-TS
ORCHIDEE SIM2 SMASH

...sur 66 stations hydrométriques

× 66 stations hydrométriques

	Loire	Allier	Chapeauroux
Stations	44	20	2
dont stations cibles	11	8	2

3 Définition de narratifs hydroclimatiques

Dans le cadre des **études prospectives** d'évolutions de régimes hydroclimatiques, les résultats sont dépendants de l'ensemble des simulations disponibles ainsi que des hypothèses adoptées. Une analyse des évolutions hydroclimatiques futures qui se limiterait uniquement à la médiane de l'ensemble des projections serait insuffisante. Il est ainsi indispensable de synthétiser l'information relative à la **dispersion des simulations**. L'approche "statistique" présente l'inconvénient de regrouper, par exemple à travers une valeur médiane ou d'un quantile, des résultats provenant de simulations différentes ce qui est source d'incohérences spatiales.

Afin de décrire de manière physiquement cohérente des évènements futurs, l'approche par narratif a été développée (SHEPHERD et al., 2018). Celle-ci cherche à proposer des futurs descriptifs parmi l'ensemble des simulations permettant d'explorer la diversité des évolutions envisageables.

L'approche par narratif sur le jeu de données Explore2 est d'ores et déjà utilisée dans différentes études climatiques (EPTB RANCE-FRÉMUR, 2023, EPTB LOIRE, 2024). De plus, cette approche fait partie des préconisations dans le cadre de la **TRACC** (SOUBEYROUX et al., 2024 et SOUBEYROUX et al., 2025). La notion de continuité spatiale est d'autant plus importante quand il est question de ressources en eau afin de garantir la cohérence amont-aval.

3.1 Les narratifs climatiques Explore2

Dans l'ensemble de ces 17 projections climatiques analysées, quatre ont été sélectionnées suivant l'expertise de scientifiques afin d'illustrer les futurs possibles de l'évolution du climat en France métropolitaine. Ces simulations climatiques, appelés « narratifs Explore2 », reflètent des trajectoires contrastées du changement climatique et permettent de capturer la variabilité des projections utilisées.

Les quatre narratifs climatiques Explore2 permettent de balayer un panel contrasté de climats futur :

- **VERT** : Réchauffement marqué et augmentation des précipitations [rcp8.5 HadGEM2-ES ALADIN63 ADAMONT];
- **JAUNE** : Changements futurs relativement peu marqués [rcp8.5 CNRM-CM5 ALADIN63 ADAMONT];
- **ORANGE** : Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) [rcp8.5 EC-EARTH HadREM3-GA7 ADAMONT];
- **VIOLET** : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations [rcp8.5 HadGEM2-ES CCLM4-8-17 ADAMONT].

En parallèle de leurs comportements contrastés, ces narratifs soulignent tous un réchauffement particulièrement marqué en été entraînant une augmentation de l'évapotranspiration potentielle et une diminution du bilan hydrique. De manière plus détaillée, les résultats suivant les principaux indicateurs climatiques à l'échelle de la France sont résumés en [Table 3](#).

Ces narratifs permettent, du point de vue climatique, de couvrir l'ensemble des simulations sur la France hexagonale et la Corse. En revanche, ce n'est pas suffisant du point de vue de l'hydrologie. D'une part le fait d'utiliser des narratifs climatiques multiplie les résultats par le nombre de modèles hydrologiques disponibles, ne permettant pas de se référer à une unique chaîne de simulation.

D'autre part, les narratifs climatiques identifiés à l'échelle de la France ne couvrent pas l'ensemble des possibles localement, mais ne tiennent pas compte non plus de la dispersion des simulations hydrologiques, avec des disparités pouvant être localement prononcées notamment pour les cours d'eau de montagne. Il a donc fallu penser une méthodologie prenant davantage en compte les spécificités hydrologiques des territoires tout en répondant aux problématiques énoncées précédemment.

	Narratif orange	Narratif jaune	Narratif violet	Narratif vert
Température moyenne annuelle	+4,6 ° à +5,0 °	+3,7 °	+4,6 ° à +5,0 °	+4,6 ° à +5,0 °
Température moyenne saisonnière	Variations saisonnières similaires	Variations saisonnières similaires	Variations saisonnières similaires	Variations saisonnières similaires
Précipitations annuelles	En baisse	En hausse	En baisse	En hausse
Précipitations saisonnières	Été plus sec	Hiver plus humide	Hiver plus humide et été plus sec	Hiver plus humide
Évapotranspiration	En hausse	Similaire à la référence	En hausse	En hausse
Bilan hydrique	Forte baisse	Baisse modérée	Forte baisse atténuée par la hausse des précipitations hivernales	Légère baisse atténuée par la hausse des précipitations hivernales

TABLE 3. Tableau des principales évolutions entre 1976-2005 et 2100 pour chaque narratif climatique Explore2 (MARSON et al., 2024).

3.2 Narratifs hydroclimatiques

L'objectif des narratifs est ainsi de présenter des projections contrastées et donc de balayer au mieux l'ensemble des simulations mais nous nous placerons ici au niveau hydrologique. De manière analogue aux travaux antérieurs, il a été choisi de se limiter à **quatre narratifs** permettant d'une part de bien couvrir la diversité des projections tout en facilitant l'interprétation des résultats. La méthode présentée ici a été détaillée et généralisée à l'ensemble du territoire (CALMEL et al., 2025).

Méthode de définition des narratifs hydroclimatiques

Dans un premier temps, il faut logiquement définir spatialement et temporellement une zone d'étude. Les narratifs sont définis à l'échelle d'une **région hydrographique** (SANDRE, 2002) ou d'un groupe de régions hydrographiques aux influences similaires afin de garantir une bonne cohérence climatique et hydrologique (Figure 4).

Une échelle plus large ne permet pas de prendre correctement en compte les disparités du territoire et une échelle plus réduite tend à limiter l'identification de comportements contrastés entre les simulations. Il faut également définir un **horizon** qui peut être temporel (par exemple 2070-2099) ou correspondant à un niveau de réchauffement (+4 °C en fin de siècle suivant la TRACC). Dans cette étude, les narratifs hydroclimatiques seront uniquement définis dans le cadre de la TRACC.

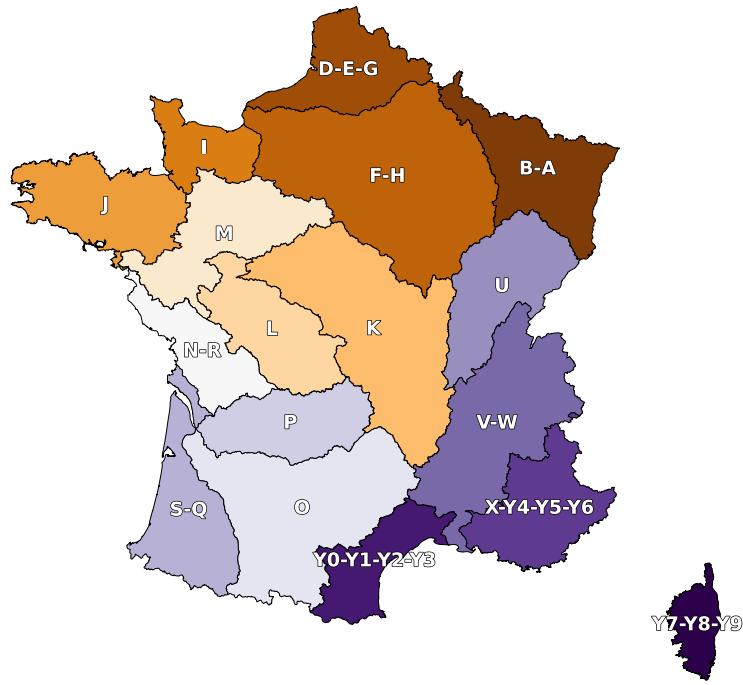


FIGURE 4. Carte des régions et groupement de régions hydrographiques aux influences hydroclimatiques similaires.

1. Une fois le périmètre d'étude défini, il s'agit de sélectionner les indicateurs permettant de retrancrire la variabilité hydrologique des cours d'eau. Les changements en **QA** (débit moyen annuel), **QJXA** (débit journalier maximum annuel) et **VCN10** (débit minimal annuel moyenné sur 10 jours) sont des indicateurs permettant d'illustrer l'évolution respectivement en moyens, hauts et bas débits. La médiane par chaîne de simulation est calculée sur l'ensemble des points de simulation du territoire pour l'horizon choisi (Figure 5).

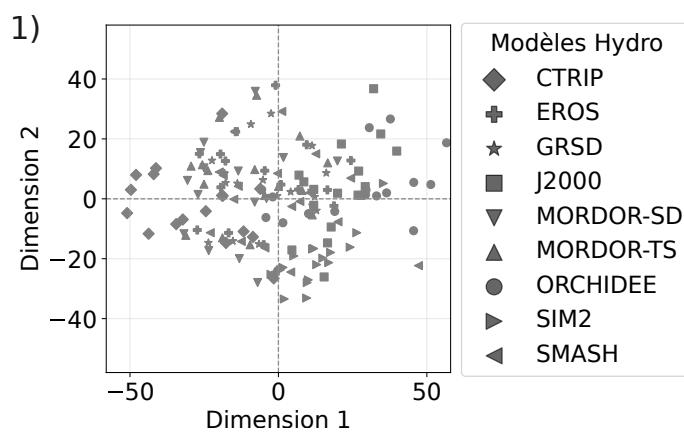


FIGURE 5. Représentation en 2 dimensions (par Analyse en Composantes Principales) des valeurs médiennes des changements en QA, QJXA et VCN10 pour le territoire et l'horizon choisi pour chacune des 153 chaînes de simulations.

2. Sur cet espace, une méthode d'optimisation combinatoire est appliquée afin de déterminer la partition permettant de minimiser la variance à l'intérieur de chacun des groupes. Cette méthode de regroupement est un partitionnement suivant l'algorithme de Lloyd appelé **clustering K-Means**. Quatre groupes présentant des futurs hydrologiques contrastés sont ainsi générés (Figure 6).

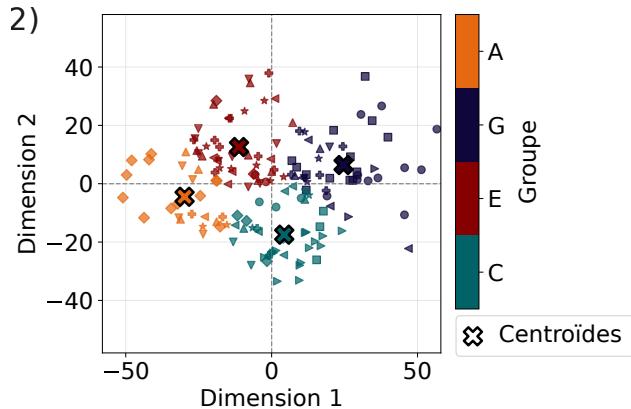


FIGURE 6. Représentation en 2 dimensions des groupes de comportement similaire suivant un regroupement K-Means, les croix colorées correspondent au barycentre (centroïde) de chaque groupe.

3. Une fois ce regroupement effectué, l'objectif est alors d'identifier le narratif propre à chaque groupe, autrement dit la chaîne de simulation hydro-climatique qui permet d'illustrer les comportements hydrologiques de ce groupe. Deux étapes de filtrage sont effectuées en amont afin de garder les modèles avec des performances robustes sur la zone d'étude et cohérentes au sein du groupe.

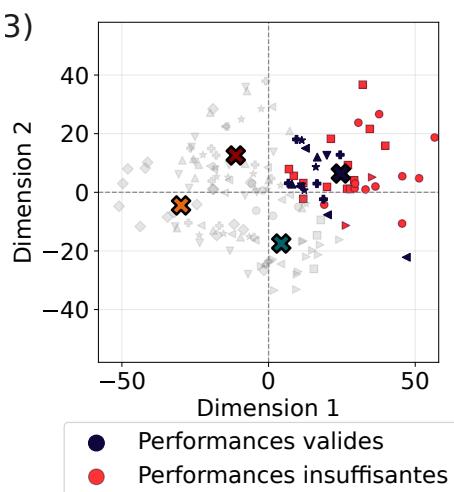


FIGURE 7. Représentation en 2 dimensions du filtrage des simulations suivant leurs performances, exemple avec le groupe G. En gris, les projections appartenant aux autres groupes, non prises en compte ici.

Pour chacun des 9 modèles hydrologiques, les performances en biais, Q10 et Q90 sont étudiées sur les stations de référence de la région considérée. Les stations de référence – environ 600 en France – sont des stations où sont mesurés des débits faiblement influencés (pour plus de détails, voir SAUQUET et al., 2022; SAUQUET et al., 2023; STROHMEIER et al., 2023) Sur le territoire choisi, on regarde si, au droit de ces stations, les performances de chaque modèle sont supérieures en valeur absolue aux seuils 0,2 pour le biais et le Q10, et 0,8 pour le Q90 sur les stations disponibles pour chaque modèle hydrologique. Ce seuils correspondent à la définition des zones blanches jugées comme acceptables dans les fiches diagnostic à la station mises à disposition par Explore2 (HÉRAUT et SAUQUET, 2024). La lecture de ces fiches est détaillée dans une notice dédiée (SAUQUET et HÉRAUT, 2024). Un critère de 0,2 sur le biais par exemple conduit à retenir uniquement les modèles possédant un biais inférieur à 20% en valeur absolue sur le débit moyen interannuel. Le raisonnement est le même pour les quantiles de haut débit (Q10) et bas débit (Q90).

Ensuite, pour chaque critère de performance, la médiane du nombre de stations valides sur la région

considérée est calculée, permettant ainsi d'avoir un critère sur la représentativité spatiale des modèles. Les modèles hydrologiques retenus doivent avoir un nombre de stations « valides » supérieur ou égal à ces valeurs médianes sur chacun des 3 critères (Table 4 et Figure 7).

Modèles Hydro	n	Biais stations valides	Q10 stations valides	Q90 stations valides	Modèle valide
CTRIP	86	52	52	76	X
EROS	84	83	76	85	✓
GRSD	92	92	89	88	✓
J2000	88	68	65	69	X
MORDOR-SD	92	92	91	90	✓
MORDOR-TS	92	87	85	85	✓
ORCHIDEE	82	55	59	64	X
SIM2	28	23	27	1	X
SMASH	89	89	82	83	✓
Médianes	-	84	82	83	-

TABLE 4. Validation des modèles hydrologiques suivant leurs performances en biais, Q10 et Q90 sur le territoire K,. Dans cet exemple, 92 station hydrométriques sont disponibles, les valeurs médianes obtenus pour chacun des 3 critères sont respectivement 84, 82 et 83 stations. La colonne n correspond au nombre de stations disponibles pour le modèle hydrologique correspondant. Les nombres en rouge sont inférieurs à la médiane, en vert supérieurs ou égaux à celle-ci. Les modèles hydrologiques retenus comme potentiels narratifs sont ceux dont les 3 critères de performances sont supérieurs ou égaux à leur médiane respective.

4. Pour également s'assurer de la cohérence des simulations au sein de chaque groupe, seules les simulations qui sont dans la sphère de rayon correspondant à la médiane des distances avec le centroïde (point central du groupe) plus 2 écarts-types sont conservées. Cette étape est relativement peu contraignante mais permet d'éviter de conserver des simulations qui seraient fortement éloignées des autres points (Figure 8).

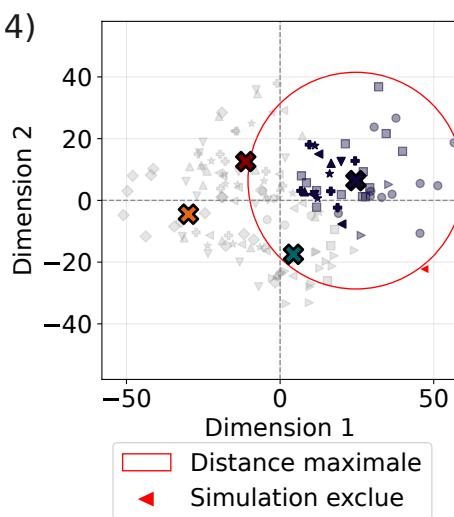


FIGURE 8. Représentation en 2 dimensions du filtrage des simulations suivant leur distance avec le centroïde du groupe, le cercle rouge correspond à la distance maximale tolérée (médiane des distances plus 2 écarts-types).

5. La dernière étape consiste à sélectionner une chaîne qui présente des contrastes avec les autres groupes. Pour cela, une approche dite "MinMax" est utilisée. La chaîne de simulation retenue comme narratif est celle qui présente le maximum de la plus petite distance à un autre centroïde. Elle est donc la simulation qui, parmi les simulations de son groupe, est la plus éloignée du centroïde le plus proche ([Figure 9](#)).

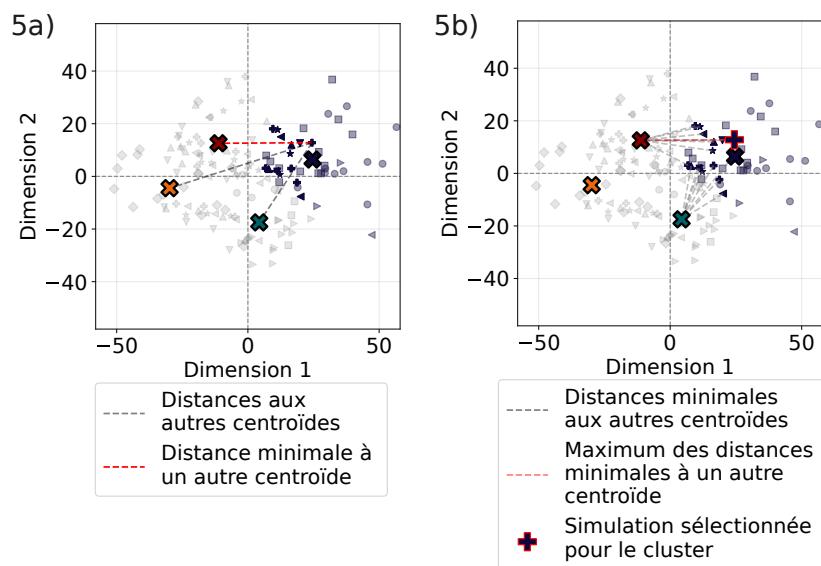


FIGURE 9. Représentation en 2 dimensions du processus de sélection du narratif hydroclimatique au sein d'un groupe, les simulations précédemment exclues sont en bleu pâle. 5a) Calcul de la distance d'une simulation à chacun des 3 autres centroïdes (en gris) et identification de la plus faible (en rouge). 5b) Après identification de l'ensemble des distances minimales aux autres centroïdes (en gris), identification de la plus grande d'entre elles correspondant au narratif du groupe (en rouge).

Narratifs sous TRACC

Dans le cadre de cette étude, la sélection des narratifs a été effectuée dans les conditions de la TRACC pour des degrés de réchauffement +2,7 et +4,0 °C. La région hydrographique utilisée ici est **la région K** qui couvre la Loire amont et l'Allier, en raison des changements marqués survenant sur ce territoire ainsi que des différentes infrastructures stratégiques pour l'Axe Loire véritablement ([Figure 10](#)).

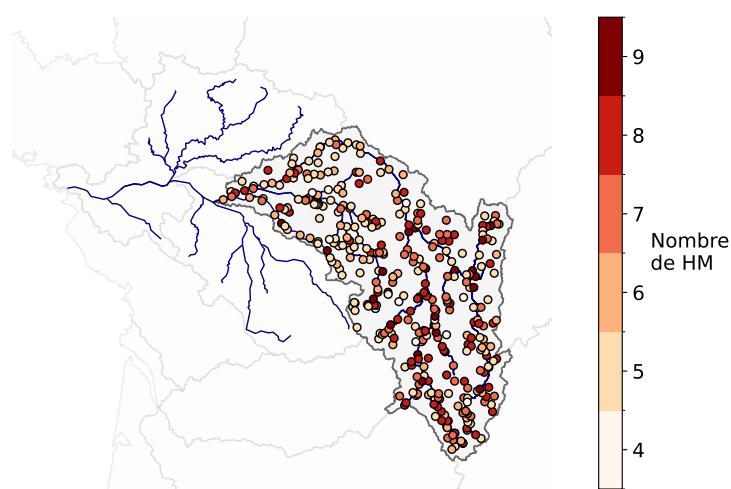


FIGURE 10. Carte des points de simulation sur la région hydrographique K avec le nombre de modèles hydrologiques disponibles.

Quatre chaînes de simulations par horizons ont ainsi été sélectionnées, permettant d'illustrer la diversité des quatre groupes identifiés :

- **Argousier (A) : étiages sévères**
- **Genévrier (G) : débits annuels en légère hausse et crues plus intenses**
- **Erable (E) : intensification des extrêmes**
- **Cèdre (C) : évolutions modérées**

Dans une France à +2,7 °C, quatre narratifs sont ainsi sélectionnés **à partir de la région K et applicables pour l'ensemble du bassin de la Loire** :

- **A** : IPSL-CM5A-MR RCA4 ADAMONT MORDOR-SD
- **G** : NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH
- **E** : EC-EARTH HadREM3-GA7 ADAMONT EROS
- **C** : NorESM1-M REMO ADAMONT EROS

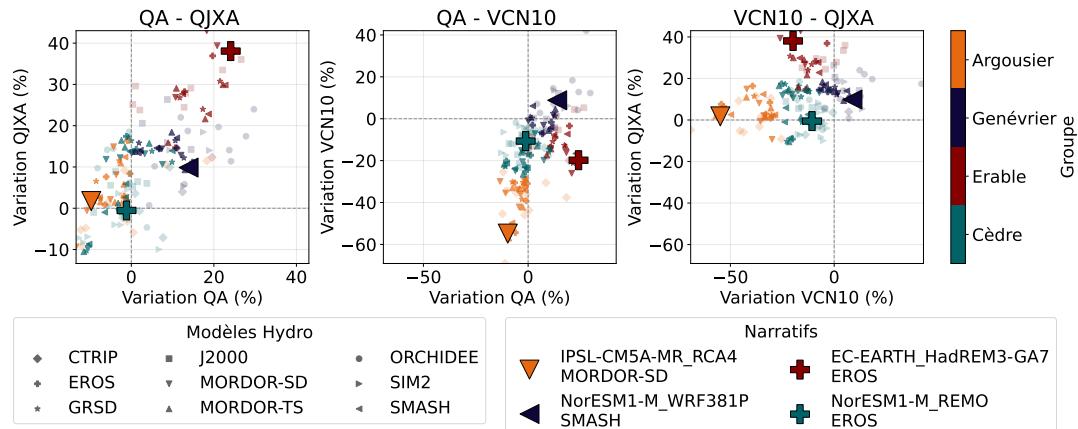


FIGURE 11. Sélection des narratifs pour un niveau de réchauffement +2,7 °C, changements médians du QA, QJXA et VCN10 pour les 153 chaînes de simulation sur la région hydrographique K.

De la même façon, quatre narratifs distincts sont sélectionnés pour un niveau de réchauffement +4,0 °C, **toujours à partir de la région K et applicables pour l'ensemble du bassin de la Loire** :

- **A** : HadGEM2-ES CCLM4-7-17 ADAMONT MORDOR-TS
- **G** : CNRM-CM5 ALADIN63 ADAMONT EROS
- **E** : IPSL-CM5A-MR HIRHAM5 ADAMONT MORDOR-TS
- **C** : NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH

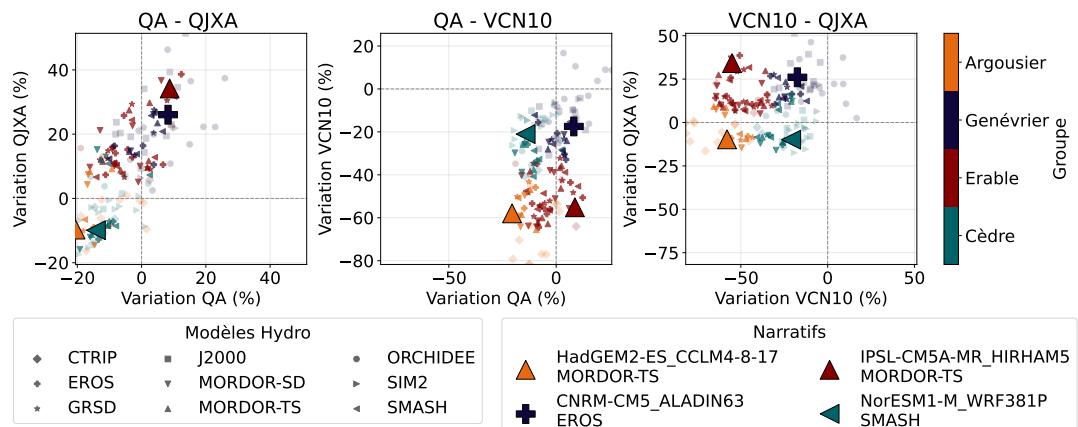


FIGURE 12. Sélection des narratifs pour un niveau de réchauffement +4,0 °C, changements médians du QA, QJXA et VCN10 pour les 153 chaînes de simulation sur la région hydrographique K

Synthèse - L'approche narrative

L'approche narrative consiste à **sélectionner des projections** parmi l'ensemble des simulations disponibles afin de traduire **différents futurs possibles et contrastés**.

Une approche similaire aux narratifs climatiques Explore2 – définis sur l'ensemble de la France et à partir de changements sur le climat uniquement – a été développée afin de définir des **narratifs hydroclimatiques** pour un territoire et un horizon donnés.

Définition des narratifs hydroclimatiques		
Étape	Description	Commentaire
[0a]	Sélection d'une région hydrographique	L'échelle de la région hydrographique permet de garder une bonne cohérence climatique et hydrologique
[0b]	Sélection d'un horizon	L'horizon peut être une fenêtre temporelle ou correspondre à un degré de réchauffement fixé
[1]	Calcul de la médiane en changement sur QA, QJXA et VCN10 sur les stations de la région par chaîne hydroclimatique	Ces 3 indicateurs permettent de couvrir les principaux comportements hydrologiques
[2]	Définition des groupes de comportement par Clustering K-means	Le "clustering" (regroupement) permet de composer N groupes (ici 4) de comportement similaire
[3]	Filtrage des modèles hydrologiques via les critères de performances et de couverture spatiale	Performances en biais, Q10 et Q90 devant respectivement être supérieur en valeur absolue à 0,2, 0,2 et 0,8. Chaque modèle hydrologique doit être au dessus des performances medianes sur l'ensemble des stations de la région pour chacun des critères
[4]	Filtrage des simulations via la cohérence au sein du groupe	Les simulations doivent rester dans une sphère de rayon correspondant à la médiane des distances au centroïde plus 2 écarts-types
[5]	Sélection du narratif par une approche MinMax	Le narratif choisi est la simulation dont la distance au plus proche centroïde (autre que celui du groupe) est maximale afin de garantir des contrastes entre les différents narratifs.

Dans le cadre de cette étude, 4 familles ont été identifiées sur **la région hydrographique K** (Loire amont et Allier) pour les niveaux de réchauffement +2,7 et +4,0 °C :

- **Argousier (A) : étages sévères**
- **Genévrier (G) : débits annuels en légère hausse et crues plus intenses**
- **Eable (E) : intensification des extrêmes**
- **Cèdre (C) : évolutions modérées**

4 Analyse rétrospective

Cette section s'attache à donner les **principales tendances climatiques et hydrologiques observées** sur les dernières décennies, et plus précisément sur la période 1968-2024, période sur laquelle nous disposons d'observations à la fois climatiques (Longues Séries Homogénéisées, cf. Section 2.1) et hydrologiques (Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages, cf. Section 2.2).

Ces données sont classiquement analysées avec le test non paramétrique de Mann-Kendall (MANN, 1945; HAMED et RAO, 1998) qui permet de détecter une tendance significative à la baisse ou la hausse dans une série temporelle. Le niveau de confiance est là aussi classiquement fixé à **90%**. Ce test est accompagné d'une estimation robuste de la pente de la tendance – statistiquement significative ou non – donnée par la pente de SEN (1968). Cette approche a notamment été utilisé par INRAE dans des études scientifiques de tendances hydrologiques sur la France (GIUNTOLI et al., 2013) et l'Europe de l'Ouest (VICENTE-SERRANO et al., 2019). La mise en œuvre a été réalisée avec le paquet R EXstat développé par INRAE (HERAUT et al., 2024).

4.1 Climat

Les séries de variables climatiques sélectionnées ici sont les moyennes saisonnières de température minimale et maximale journalière, ainsi que les cumuls de précipitation saisonniers, toutes extraites des LSH sur le bassin. En plus des valeurs des tendances sur ces séries sont présentées ici les significativités statistiques de ces tendances au niveau de confiance 90%. À noter que les conclusions restent les mêmes au niveau de confiance 95%.

La Figure 13 montre pour les températures minimales journalières des tendances significatives à la hausse sur l'ensemble du bassin et nettement plus prononcées en été. Les valeurs peuvent ainsi atteindre 0,4 °C par décennie.

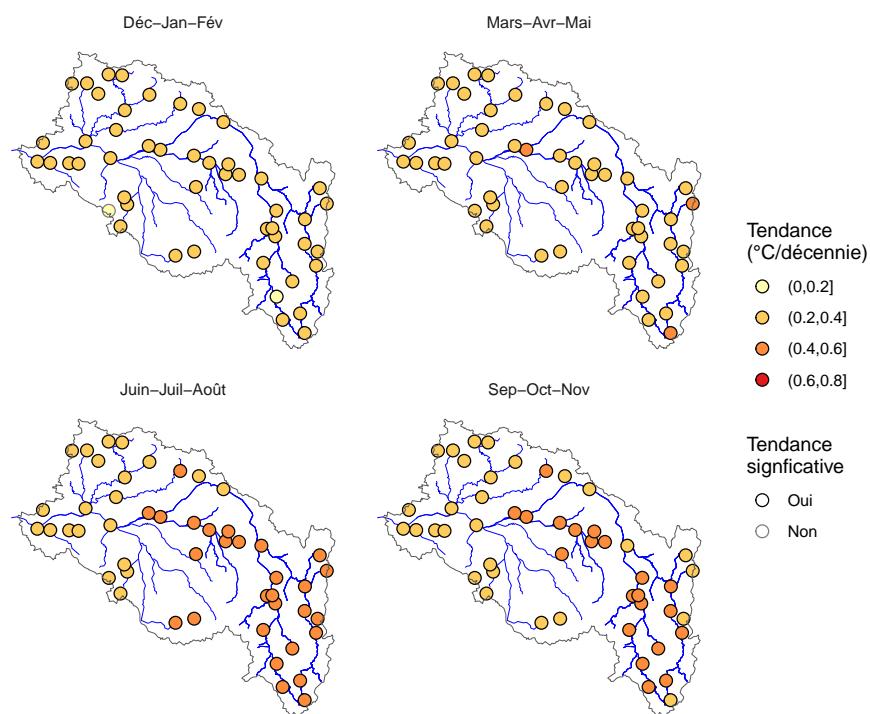


FIGURE 13. Tendances sur les températures minimales journalières moyennes par saison sur le bassin de la Loire sur la période 1968-2024.

La Figure 14 montre des tendances à la hausse – bien évidemment là aussi statistiquement significatives – pour les températures maximales journalières sur l’ensemble du bassin, avec des valeurs pouvant dépasser 0,5 °C par décennie au printemps et en été.

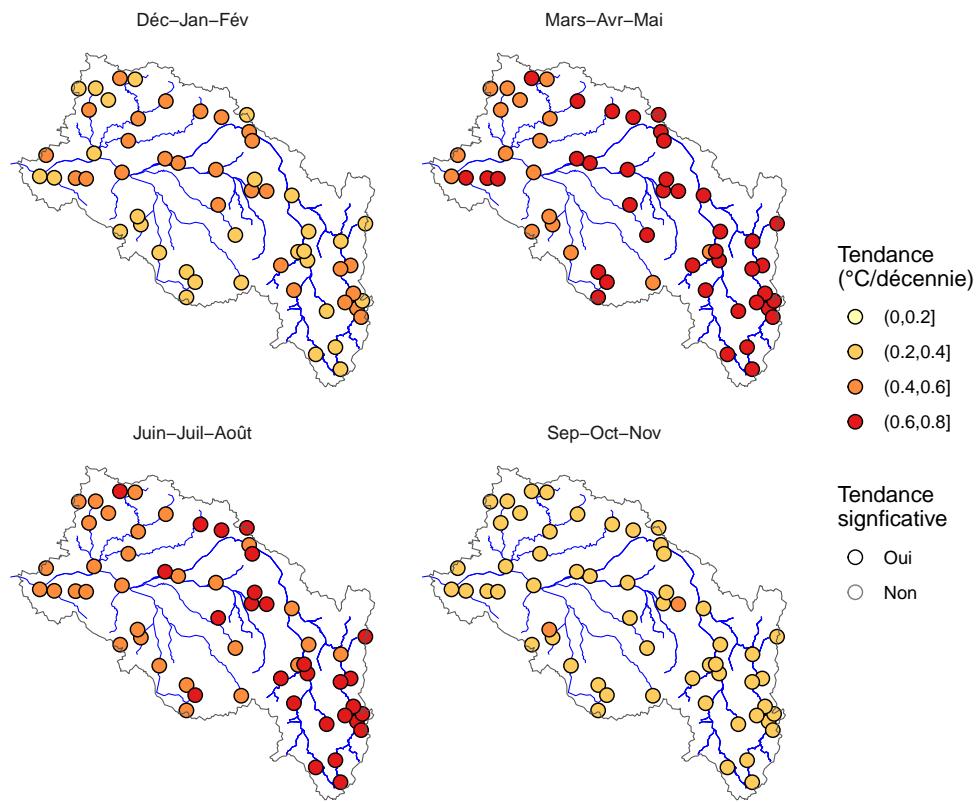


FIGURE 14. Tendances sur les températures maximales journalières moyennes par saison sur le bassin de la Loire sur la période 1968-2024.

Enfin, la Figure 15 présente des tendances largement non statistiquement significatives sur les précipitations saisonnières, excepté en hiver dans l'extrême sud du bassin où quelques séries s'accordent sur des baisses significatives de l'ordre de 10 à 20 mm par décennie.

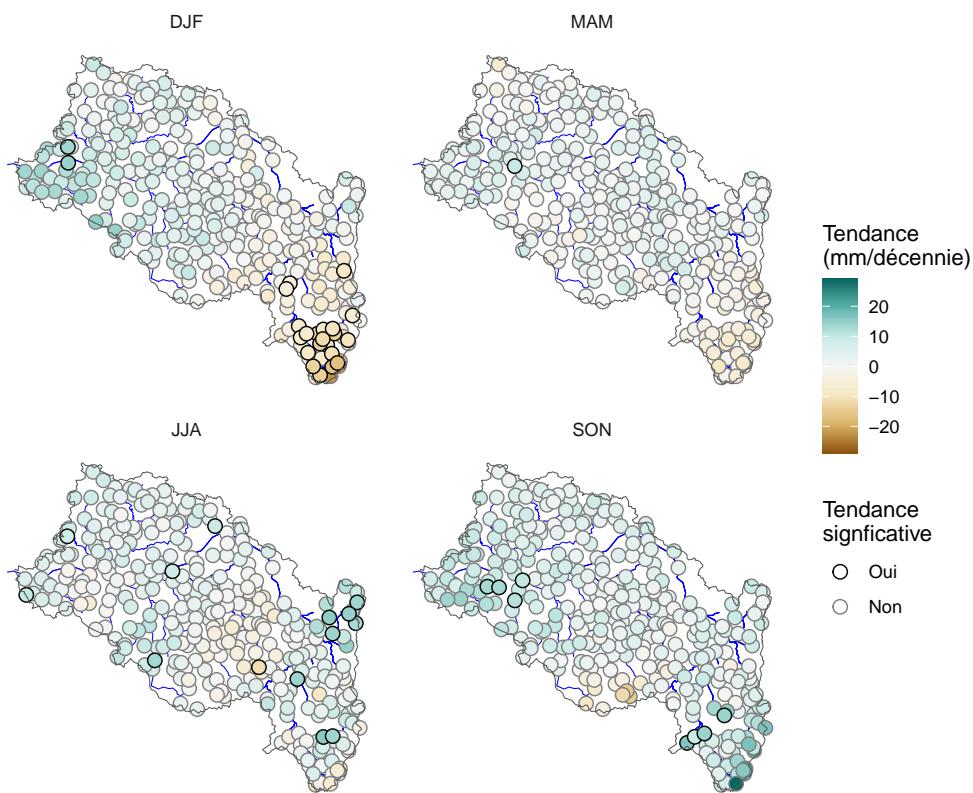


FIGURE 15. Tendances sur les précipitations cumulées par saison sur le bassin de la Loire sur la période 1968-2024.

4.2 Hydrologie

L'outil **MAKAHO**⁷ (<https://makaho.sk8.inrae.fr/>) est utilisé ici pour représenter les évolutions d'indicateurs hydrologiques sur les stations du Réseau de référence pour la Surveillance des Étiages (RRSE, voir Section 2.2) du bassin de la Loire. MAKAH0 a aussi récemment été utilisé par d'autres études HMUC du bassin Loire-Bretagne (EPTB RANCE-FRÉMUR, 2023). Les tendances sur les trois indicateurs QA, VCN10 et QJXA sont ici extraits avec MAKAH0 sur le bassin de la Loire. L'analyse proposée dans MAKAH0 s'appuie là aussi sur le paquet R EXstat (HERAUT et al., 2024). Là aussi ne sont présentées que les significativités des tendances au niveau de confiance 90%, mais les cartes correspondantes au niveau de confiance 95% par exemple peuvent être très facilement générées en ligne avec MAKAH0.

Débit moyen

La Figure 16 montre des tendances significatives à la baisse du débit moyen sur la moitié sud du bassin, dans le contexte d'un gradient observé entre le nord de la France – où aucun signal de tendance n'est détecté – et le sud du pays, où les baisses sont très marquées. Les valeurs des tendances peuvent dépasser -0,9% par an. **Sur les stations du Massif Central, la baisse du débit moyen est de l'ordre de -30% sur la période 1968-2024.**

7. MAKAH0 a été lauréat du prix Science ouverte des données de la recherche 2024 du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche dans la catégorie *Créer les conditions de la réutilisation* : <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/remise-des-prix-science-ouverte-des-donnees-de-la-recherche-2024-98045>.

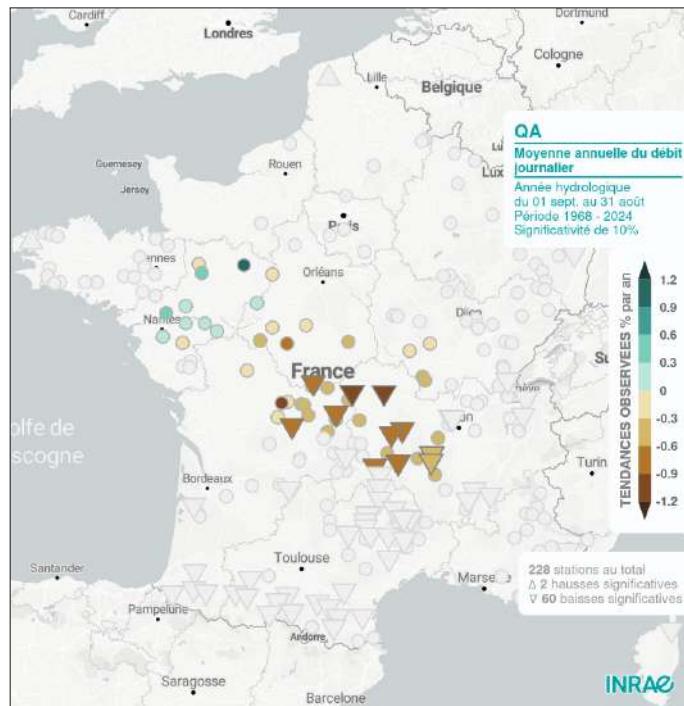


FIGURE 16. Tendances sur le QA sur la période 1968-2024, et degré de confiance à 90%.

Bas débits

La Figure 17 montre une carte similaire à celle des tendances sur le débit moyen annuel, avec une région de tendances à la baisse qui s'étend vers l'aval du bassin. Les valeurs des tendances sont elles aussi plus élevées. **L'ordre de grandeur des tendances sur les bas débits est ainsi de l'ordre de -50% sur la période 1968-2024, et ce sur une grande partie du bassin.**

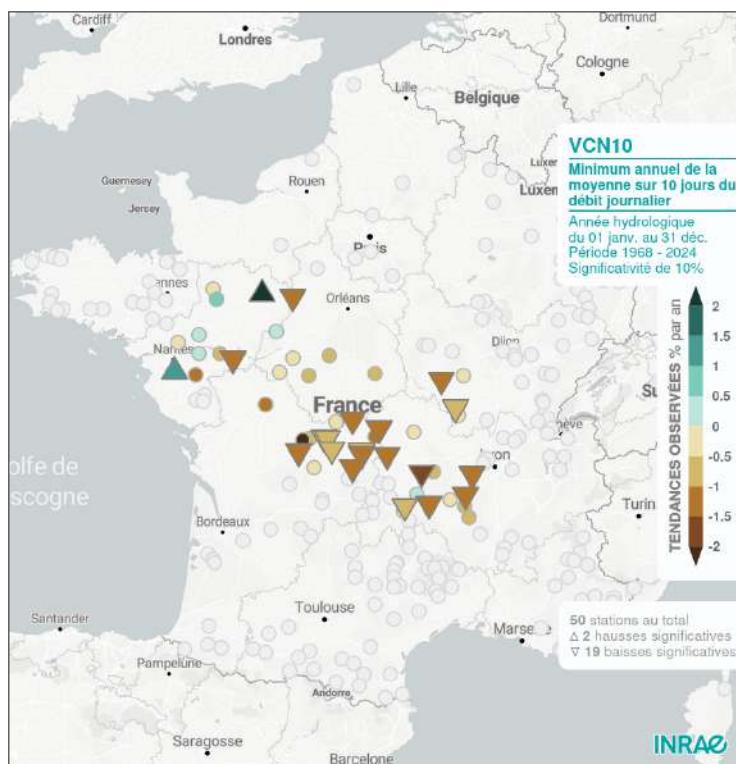


FIGURE 17. Tendances sur le VCN10 sur la période 1968-2024, et degré de confiance à 90%.

Hauts débits

Le signal sur les tendances sur le débit journalier maximum annuel présentées sur la [Figure 18](#) est en revanche beaucoup moins net, avec peu de tendances significatives et une variabilité régionale importante sur le signe même du changement. **Aucune tendance significative sur les hauts débits n'est détectée sur le bassin de la Loire, ceux-ci étant très dépendants de la variabilité naturelle du climat.**

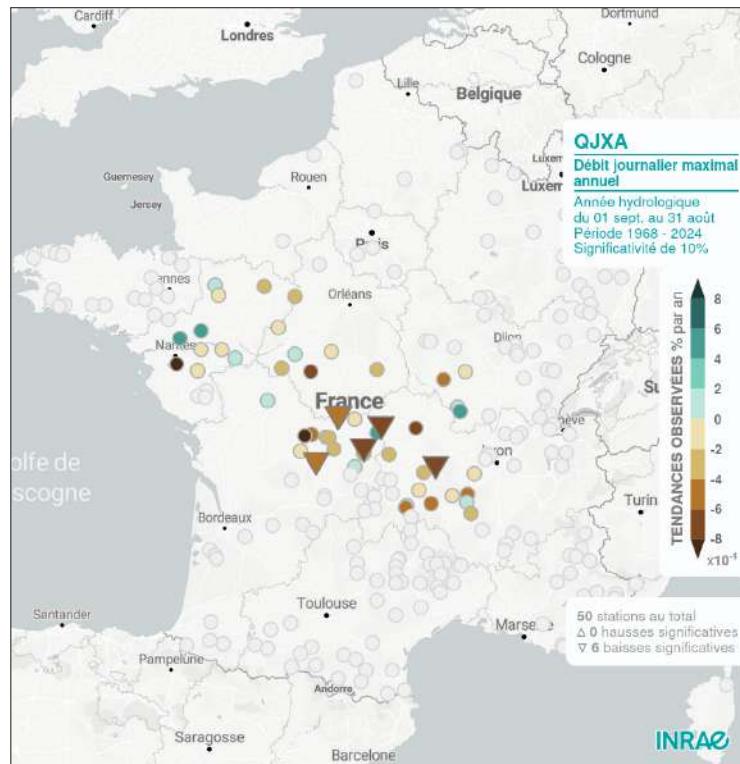


FIGURE 18. Tendances sur le QJXA sur la période 1968-2024, et degré de confiance à 90%.

Synthèse - Le bassin de la Loire hier et aujourd'hui

Climat

Tendances observées sur la période 1968-2024

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Températures minimales	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗
Températures maximales	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗
Précipitations	↘	~	~	~

Hydrologie

Tendances observées liées au climat sur la période 1968-2024.

	Amont	Aval
Débits moyens	↗↗	~
Bas débits	↘↘	~
Hauts débits	↘	~

(Débits moyens : QA, Hauts débits : QJXA, Bas débits : VCN10)

5 Les futurs de la Loire au long du XXI^e siècle

Dans un premier temps nous présentons ici les résultats sous forme d'horizons temporels au long du XXI^e siècle **sous scénario d'émissions RCP 8.5**. Les trois horizons de 30 années choisis dans le cadre du projet Explore2 sont ici réemployés afin de présenter les changements au fil du siècle :

- Horizon 1 : 2021-2050
- Horizon 2 : 2041-2070
- Horizon 3 : 2070-2099

Tous les résultats sont présentés comme les changements simulés par rapport à la **période de référence 1991-2020**. Cette période de référence a été préférée à la période 1976-2005, couramment utilisée dans des travaux antérieurs. Les périodes de références sont régulièrement actualisées pour que les phénomènes hydrométéorologiques soient encore présents en mémoire, et dans les connaissances quantifiées du fonctionnement naturel et anthropisé des bassins versants. Par ailleurs, chacune des comparaisons est effectuée au sein d'une même chaîne de simulation hydro-climatique afin de ne pas comparer des données regroupant des biais différents.

5.1 Climat

Pour toutes les cartes climatiques ci-dessous, les hachures signifient que moins de 80 % des projections s'accordent sur le signe du changement. Une absence de hachures dénote donc un fort accord des projections.

Température moyenne

Par rapport à la période de référence 1991-2020, les projections climatiques s'accordent unanimement sur une hausse généralisée des températures sur l'ensemble de la France. Le bassin de la Loire ne fait pas exception à ces conclusions avec une augmentation particulièrement marquée sur la Loire amont et l'Allier (Figure 19). Les disparités entre Loire amont et Loire aval s'accentuent dès l'horizon 2 (2041-2070) et continuent de s'accroître en fin de siècle. La partie ouest du territoire voit sa température moyenne monter d'environ +3,3 °C là où le sud-est gagnera près de +4 °C.

À titre informatif, les simulations des températures moyennes sur la période de référence 1991-2020 sont plus élevées de +0,2 °C en moyenne par rapport à la période 1976-2005.

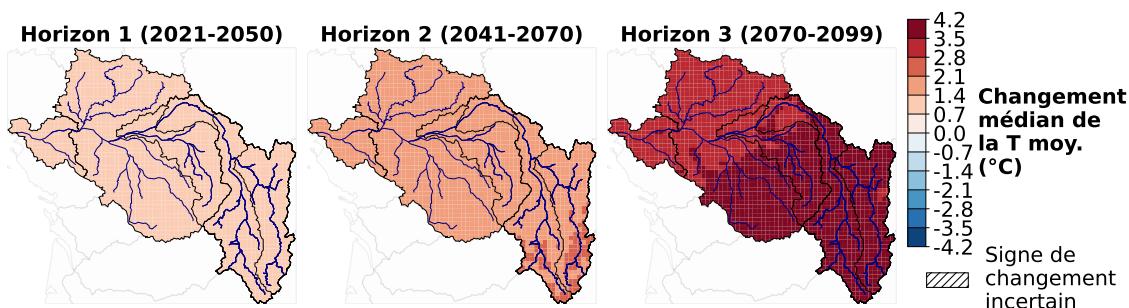


FIGURE 19. Cartes des changements médians multimodèles de la température moyenne par horizon temporel par rapport à la période de référence 1991-2020.

Température moyenne saisonnière

Si la tendance à la hausse sur l'année est très nette, les variations sur l'année ne sont pas uniformes. L'hiver et le printemps voient leur température grimper progressivement de +0,5 °C à +2,5 °C au fil du siècle. En revanche, les températures estivales augmentent davantage et risquent de gagner jusqu'à +5 °C en fin de siècle selon la zone du territoire. L'automne voit également ses températures augmenter assez fortement, traduisant en réalité des étés qui tendent à se prolonger. Après une hausse de la

température moyenne de l'ordre de +1,5 °C en horizon proche, l'automne prend près de 4 °C supplémentaires à horizon 2070-2099 (Figure 20).

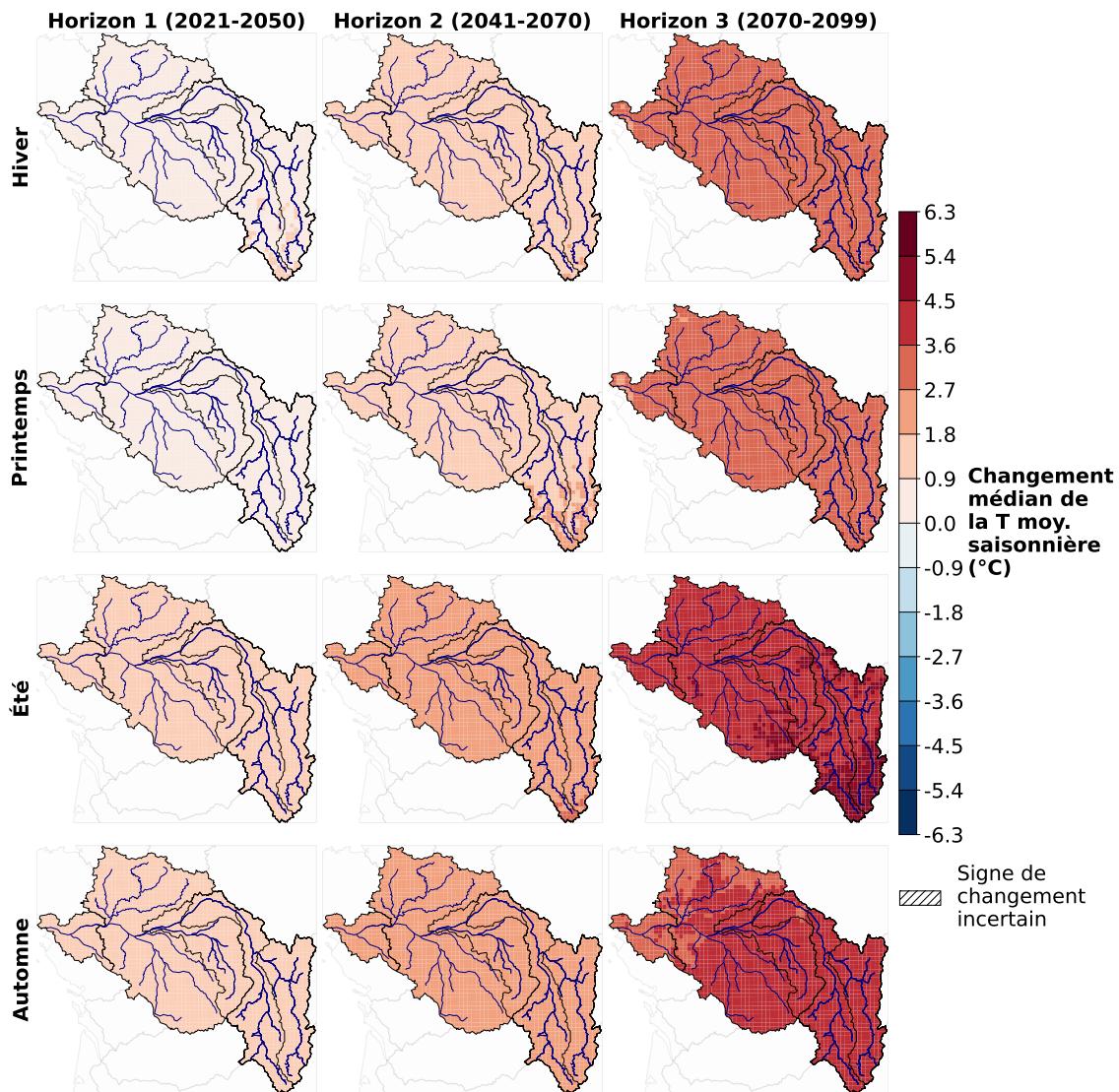


FIGURE 20. Cartes des changements médians multimodèles de la température moyenne par horizon temporel et par saison par rapport à la période de référence 1991-2020.

Jours très froids

Même si les changements hivernaux semblent moindres, ils sont suffisants pour faire considérablement diminuer le nombre de jours où la température moyenne journalière est négative. En fin de siècle, les valeurs négatives sont plus rares. Le Massif Central notamment perd plus de 40 jours de températures moyennes négatives par an par rapport à la période 1991-2020 (Figure 21).

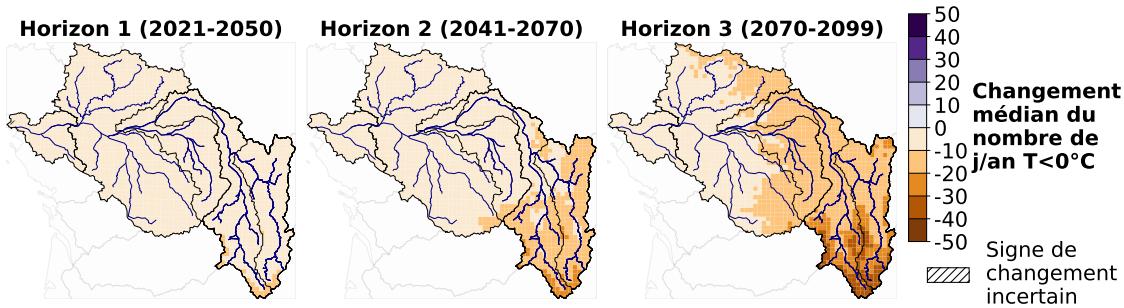


FIGURE 21. Cartes des changements médians multimodèles du nombre de jours avec une température moyenne inférieure à 0 °C par horizon temporel par rapport à la période de référence 1991-2020.

Jours très chauds

En revanche, cette zone restera relativement préservée des journées avec des températures moyennes excédant les 30 °C. Le reste du territoire devra composer avec ces journées très chaudes près de 8 jours supplémentaires par an en fin de siècle (Figure 22).

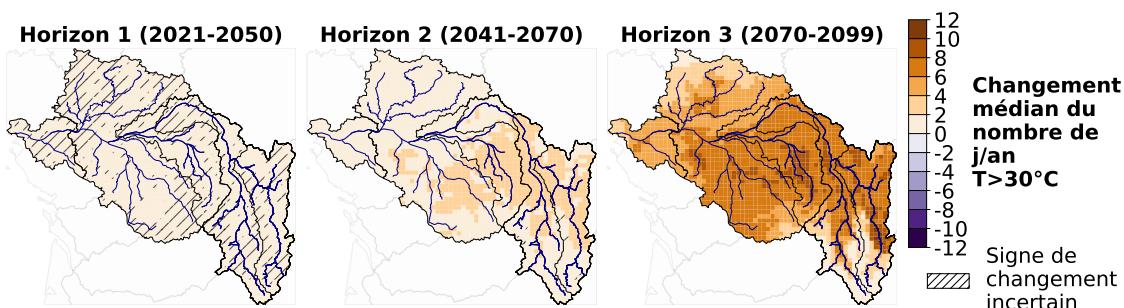


FIGURE 22. Cartes des changements médians multimodèles du nombre de jours avec une température moyenne supérieure à 30 °C par horizon temporel par rapport à la période de référence 1991-2020.

Précipitations annuelles

Concernant les projections de précipitations annuelles, les tendances sont plus incertaines. L'accord entre les modèles sur les projections annuelles ne permet pas de porter un signal clair, avec notamment des effets saisonniers qui se compensent. Les deux premiers horizons tendent néanmoins à indiquer une légère diminution sur la zone aval et une légère hausse sur l'amont. Pour la fin de siècle, la tendance est plutôt à la baisse avec notamment le sud du territoire qui verra ses précipitations annuelles baisser de l'ordre de -5% (Figure 23).

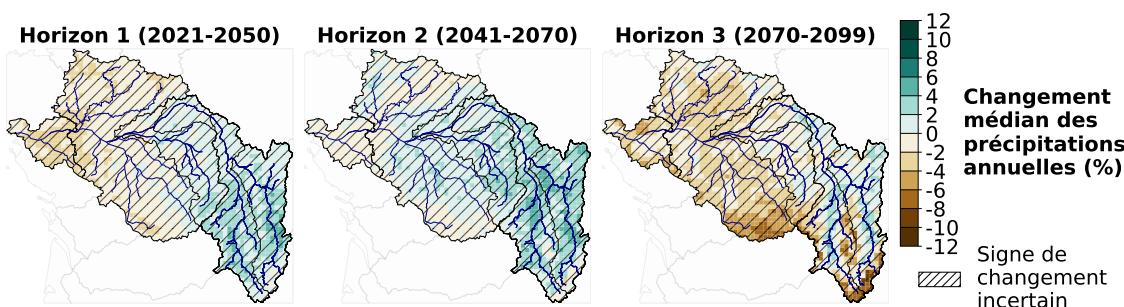


FIGURE 23. Cartes des changements médians multimodèles des volumes de précipitations moyennes par horizon temporel par rapport à la période de référence 1991-2020.

Précipitations saisonnières

Du point de vue des précipitations saisonnières, les signaux sont plus robustes notamment concernant les précipitations hivernales et estivales en fin de siècle (plus de 80% d'accord entre les modèles). En hiver, les précipitations s'accentuent progressivement et tendent vers une hausse de +17% en fin de siècle de manière assez homogène sur le territoire. L'été, un contraste apparaît entre l'est et l'ouest du territoire. Le premier voit ses précipitations diminuer de l'ordre de -18% là où le second avoisine les -25%. Pour ce qui est du printemps et de l'automne, l'accord et les signaux sont assez flous, laissant place à une forte incertitude sur les résultats. Néanmoins, cela ne signifie pas l'absence de changements. Ces périodes de transition seront globalement plus courtes et verront des événements dits hivernaux et estivaux survenir plus fréquemment (Figure 24).

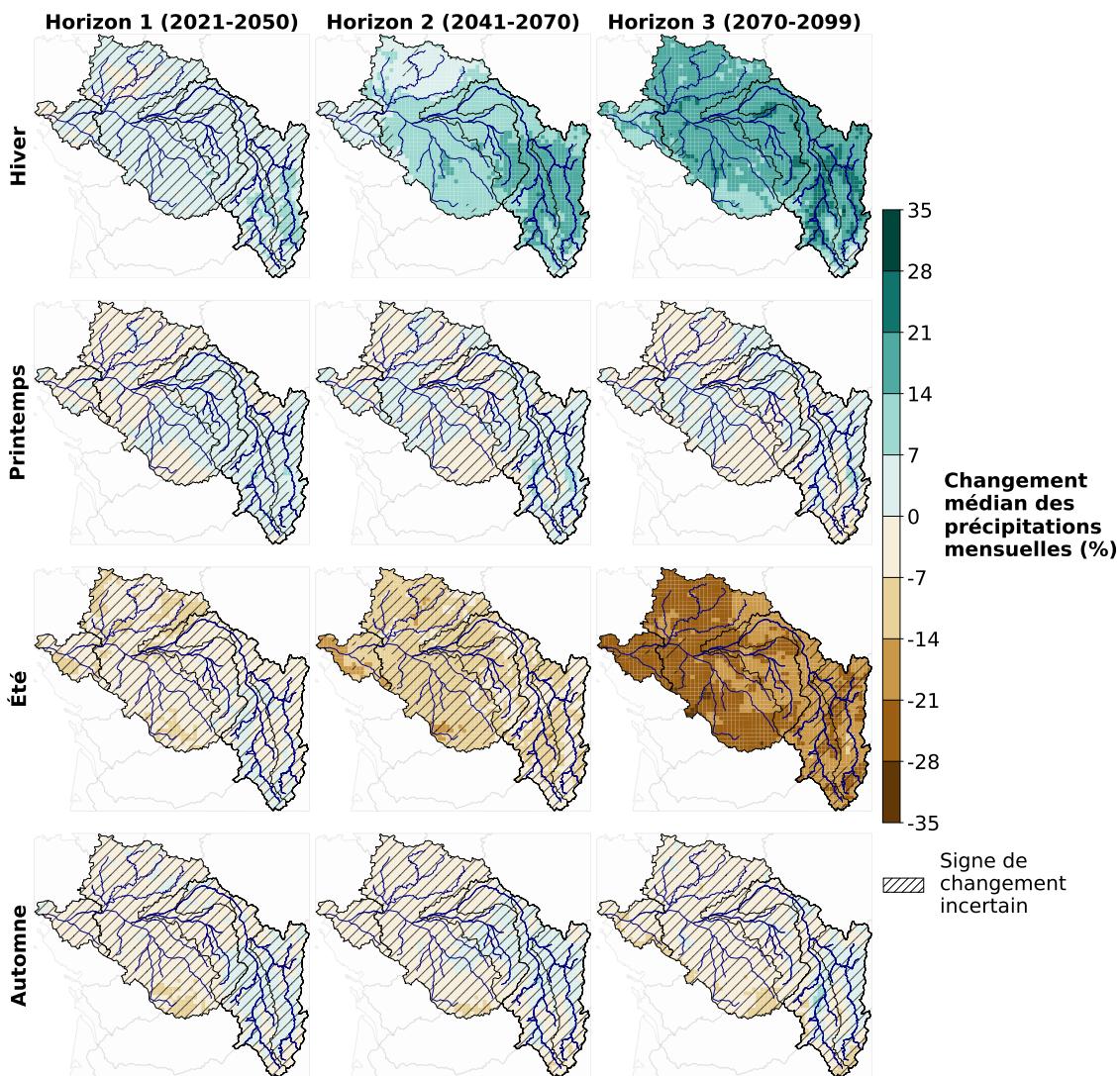


FIGURE 24. Cartes des changements médians multimodèles des volumes de précipitations moyennes saisonnières par horizon temporel par rapport à la période de référence 1991-2020.

Évapotranspiration

De manière analogue aux températures, l'évapotranspiration de référence – calculée par la méthode de Penman-Monteith avec des coefficients définis par la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (ALLEN et al., 1998) et l'extrapolation Hargreaves pour le rayonnement ($H=0,175$) – augmente globalement sur l'ensemble du territoire (Figure 25).

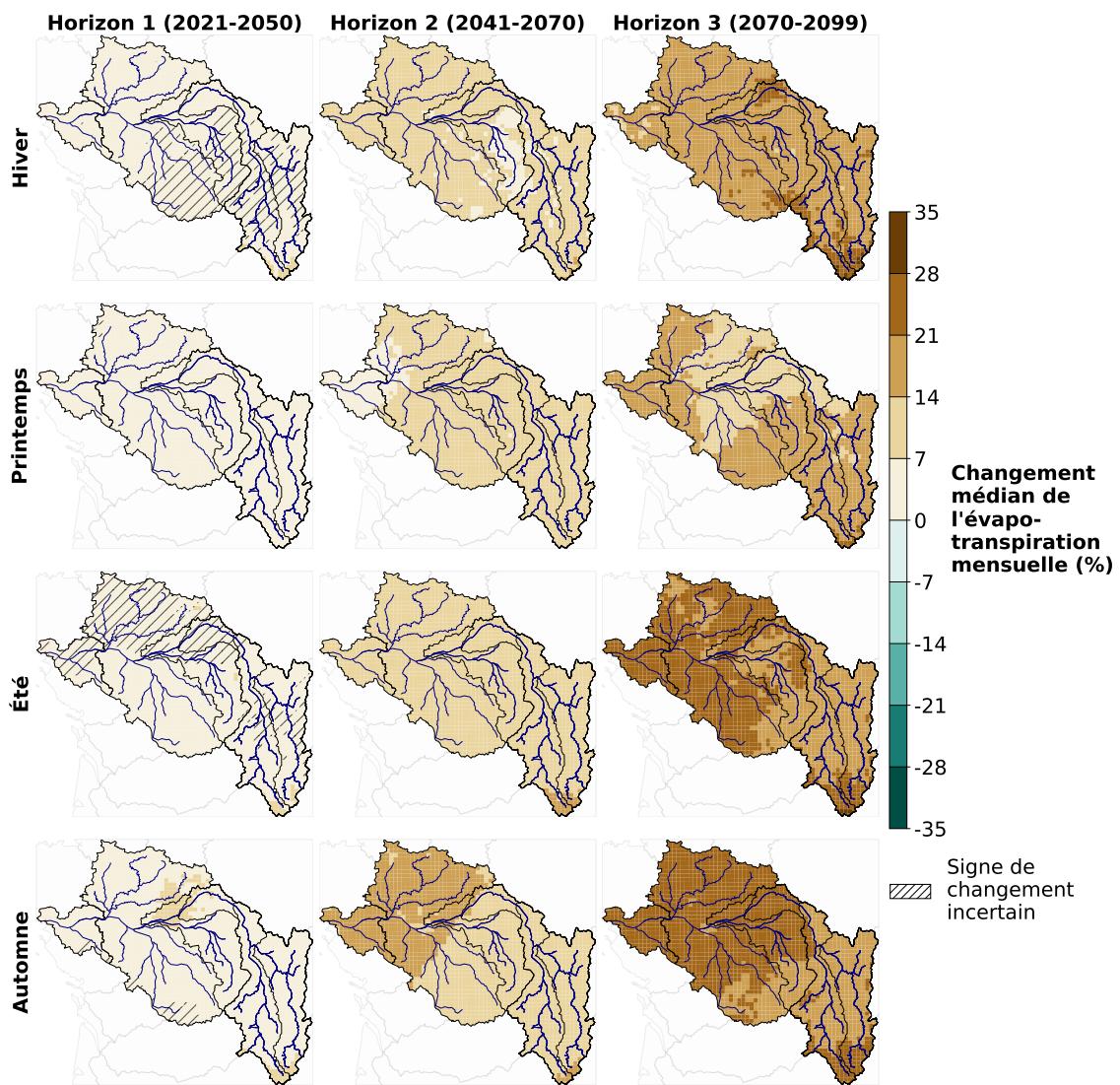


FIGURE 25. Cartes des changements médians multimodèles de l'évapotranspiration de référence par horizon temporel et par saison par rapport à la période de référence 1991-2020.

5.2 Hydrologie naturelle

Les projections en hydrologie naturelle s'intéressent aux variations de la ressource en eau en contexte non influencé. Autrement dit, elles permettent d'estimer le sens et les ordres de grandeur de l'évolution de la disponibilité en eau sur le territoire. Les résultats sont ici présentés tout d'abord sous forme de cartes de changements médians multimodèles climatiques par modèle hydrologique puis sont détaillés dans une analyse de l'ensemble des futurs possibles sur les stations cibles.

Débit moyen

Aperçu des évolutions médianes

Les modèles hydrologiques soulignent une diminution progressive du débit moyen annuel au fil du siècle. Si sur l'aval les signaux sont mixtes, les modèles s'accordent sur une baisse marquée sur le périmètre amont de la Loire et de l'Allier. À terme, huit des neuf modèles détectent une diminution généralisée de la ressource en eau sur l'ensemble du bassin versant en fin de siècle. Ce déficit est plus accentué sur l'Allier amont et la Loire amont avec une baisse pouvant atteindre les -30% suivant les simulations. À l'aval de la confluence avec l'Allier, la diminution médiane du débit moyen annuel se stabilise aux alentours de -5% (Figure 26, Figure 27 et Figure 28). Les légendes des cartes entre les différents horizons ne sont pas communes afin de visualiser les changements en horizon proche ainsi qu'identifier les contrastes amont - aval, les ordres de grandeur variant considérablement d'un horizon temporel à l'autre.

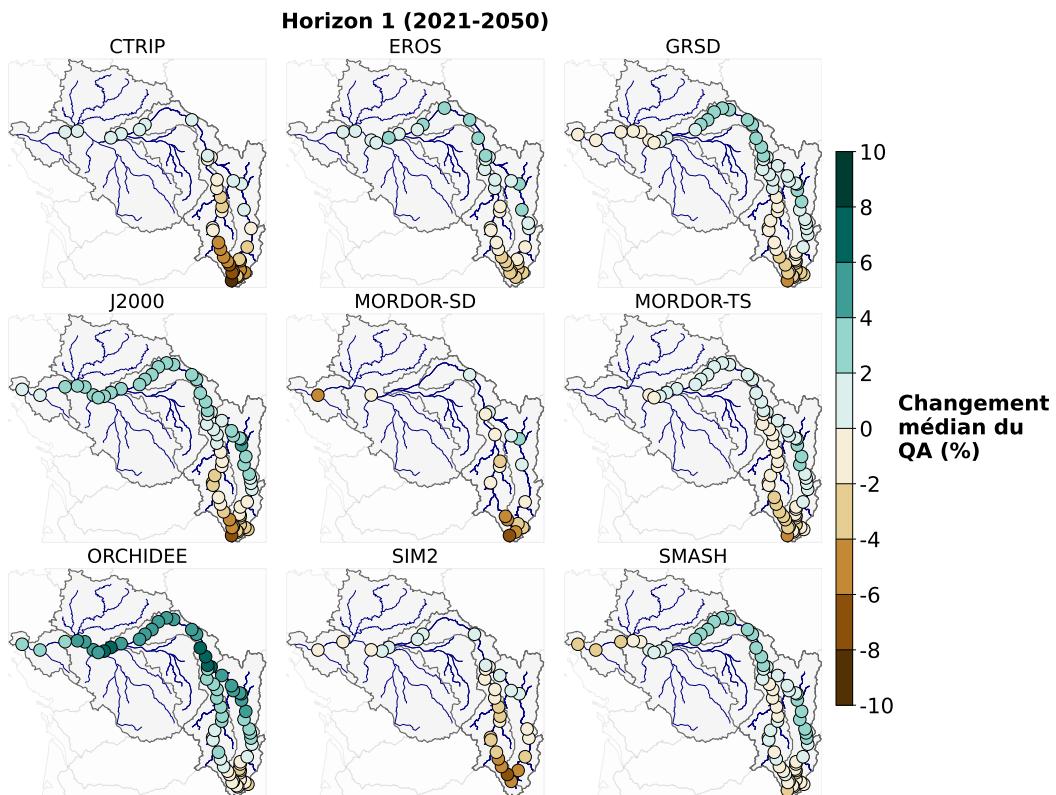


FIGURE 26. Cartes des changements médians du débit moyen annuel (QA) par modèle hydrologique pour l'horizon 1 (2021-2050) par rapport à la période de référence 1991-2020.

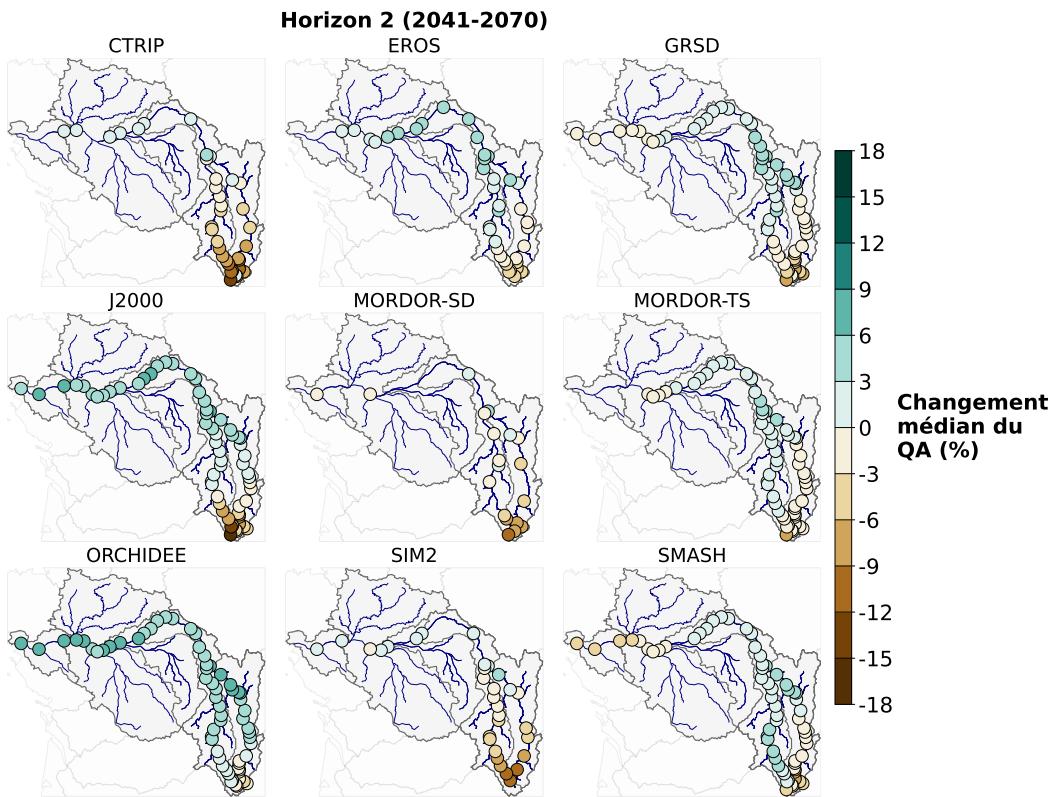


FIGURE 27. Cartes des changements médians du débit moyen annuel (QA) par modèle hydrologique pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

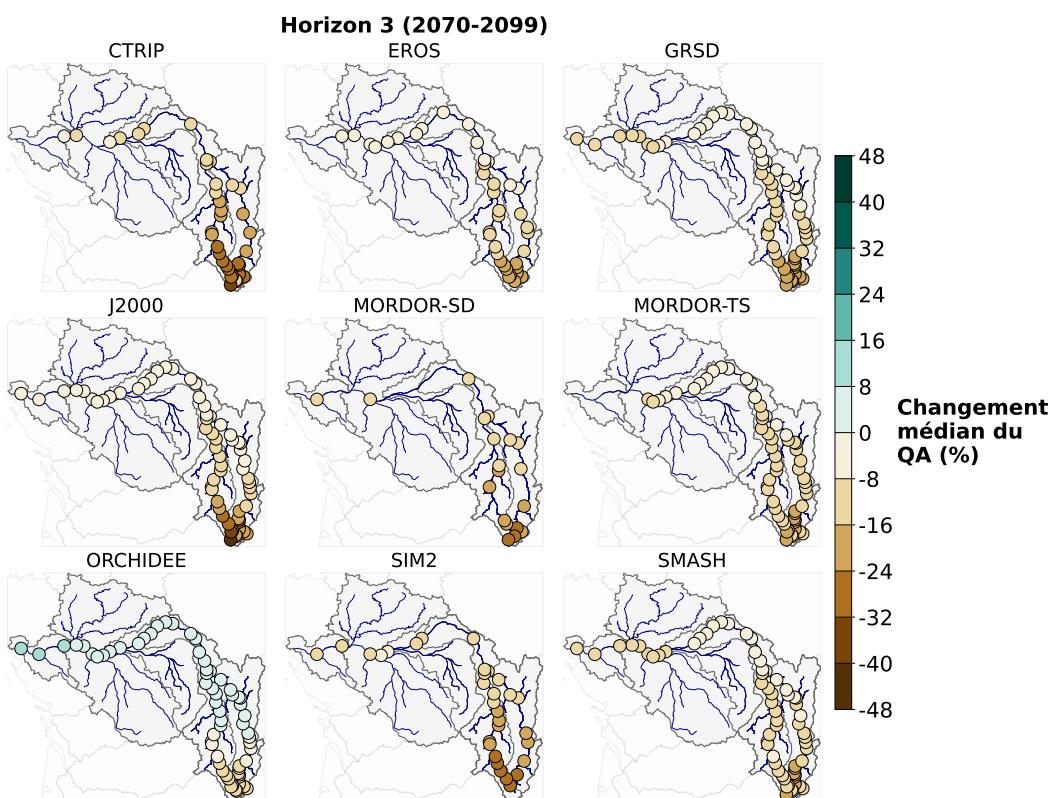


FIGURE 28. Cartes des changements médians du débit moyen annuel (QA) par modèle hydrologique pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Analyse individuelle des futurs possibles

Pour mieux visualiser les impacts le long du linéaire de la Loire, il est utile de s'intéresser à l'ensemble des 153 simulations hydrologiques. Cette représentation permet de mieux percevoir l'ensemble des futurs possibles et d'identifier différentes trajectoires. Nous nous intéresserons ici aux stations cibles sur l'Axe Loire, l'Allier ainsi que sur le Chapeauroux en raison de son apport stratégique pour le lac de Nausac.

Pour visualiser les variations le long du linéaire de l'Axe Loire, nous présentons en [Figure 29](#) les changements médians du QA en fonction du point kilométrique (PK) tout le long du fleuve. Cette représentation permet de mettre en évidence des fortes disparités entre l'amont et l'aval liées à des influences différentes. Cela permet ainsi de visualiser les évolutions progressives le long du linéaire de la Loire tout en exprimant la dispersion de l'ensemble des simulations.

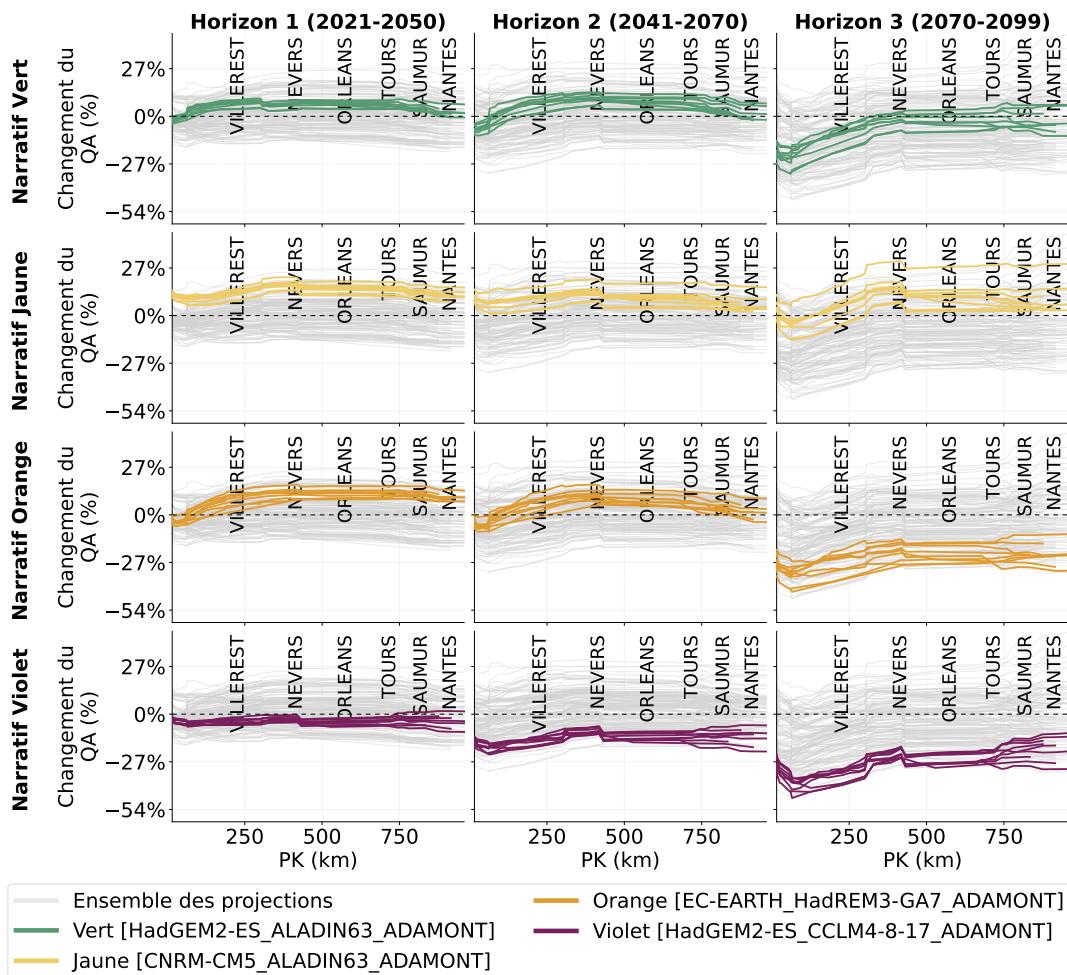


FIGURE 29. Changements médians du débit moyen annuel (QA) de la Loire en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Afin d'aider à l'interprétation de ces résultats, les narratifs climatiques Explore2 ([Section 2.1](#)) sont indiqués par la couleur correspondante. Il y a ainsi les neuf simulations hydrologiques qui sont représentées pour chaque narratif et chaque horizon, et donc à travers 9 courbes pour chaque narratif. Il est important de rappeler que ces narratifs climatiques Explore2 ont été choisis uniquement pour l'horizon fin de siècle selon des critères de changements de précipitations et de températures moyennes sur l'ensemble de la France.

Le **narratif Jaune** (changements futurs peu marqués) est le plus optimiste avec une hausse des dé-

bits annuels d'environ +10% tout le long de la Loire avec une stagnation sur l'amont en fin de siècle. Le **narratif Vert** (réchauffement marqué et augmentation des précipitations) est plus mitigé avec une légère hausse en milieu de siècle puis, en horizon 3, une forte chute sur la Loire amont et peu d'évolution à l'aval du Bec d'Allier. Un comportement similaire est observé pour le **narratif Orange** avec en revanche un déficit largement plus marqué en fin de siècle. Celui-ci tend vers les -35% sur la Loire amont puis se stabilise aux alentours de -20%. Enfin, le **narratif Violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations) indique une chute progressive du débit moyen annuel au fil du siècle avec une nouvelle fois des effets plus marqués sur l'amont. Ces différents narratifs climatiques représentent bien la diversité des simulations hydrologiques du point de vue du débit moyen annuel.

À l'aval, cela se traduit par une hausse de l'ordre de 10% pour le narratif **Jaune**, des valeurs comprises entre -10 et +5% pour le narratif **Vert** et une baisse avoisinant les -30% pour les narratifs **Orange** et **Violet**.

Pour l'Allier et le Chapeauroux, nous utiliserons une représentation en colonnes – par boîtes à moustache ou ensemble de traits horizontaux – par horizon et narratif afin de s'intéresser davantage aux variations propres à chacune des stations cibles. L'axe des abscisses correspond aux différents horizons et chaque horizon comporte cinq colonnes. La première (boîte à moustaches en gris) correspond à l'ensemble des projections hydroclimatiques disponibles sur la station. Les quatre boîtes suivantes correspondent aux simulations hydrologiques issues des quatre narratifs climatiques Explore2 correspondants.

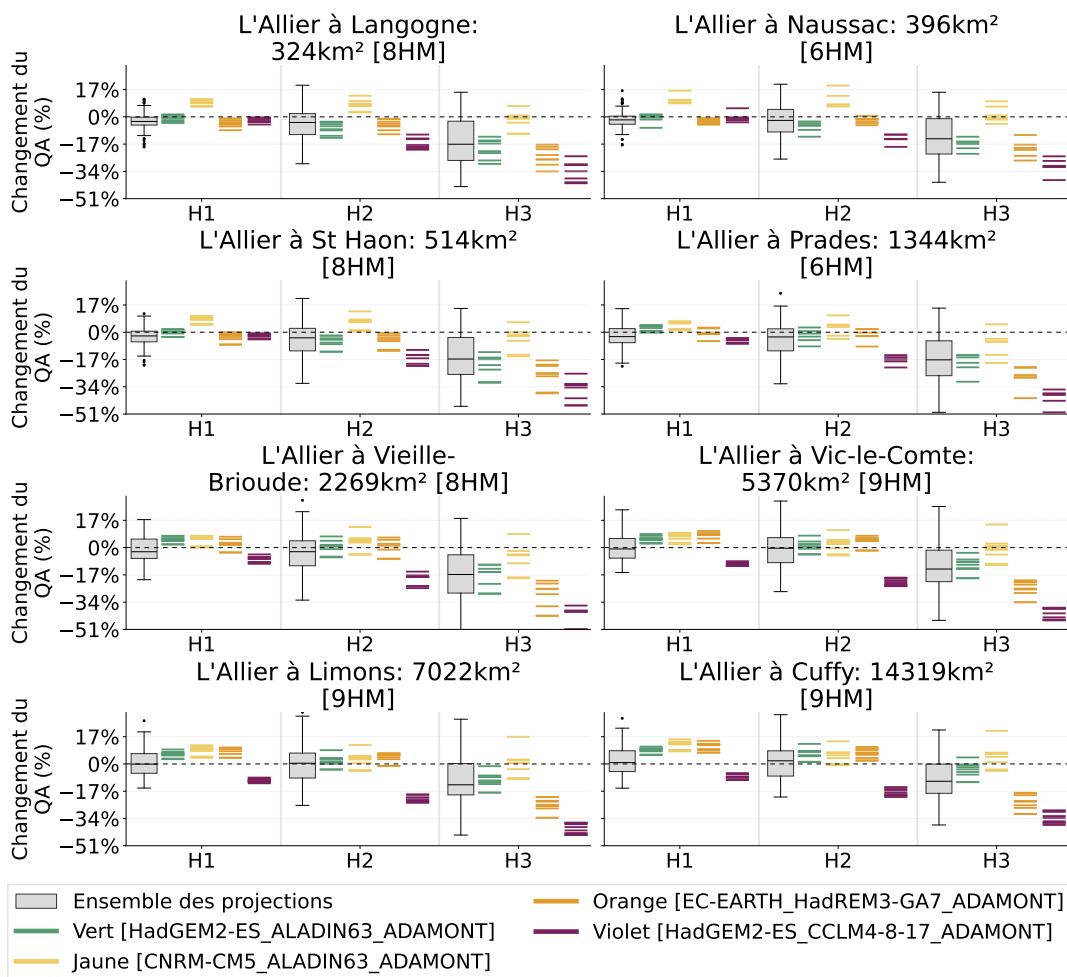


FIGURE 30. Diagramme en boîte des changements du débit moyen annuel (QA) pour les stations cibles sur l'Allier (de l'amont vers l'aval) par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020. La surface correspond à la taille du bassin versant de la station et le nombre de HM correspond au nombre de modèles hydrologiques disponibles sur la station.

Sur l'Allier, un comportement similaire est observé à celui de la Loire. Les narratifs **Vert**, **Orange** et **Violet** détectent un très fort déficit en fin de siècle sur l'amont, notamment du côté de Naussac, avec des valeurs comprises entre -20 et -40% là où le **narratif Jaune** est plus neutre. En s'approchant de l'aval, ce déficit s'atténue progressivement pour le narratif **Vert**. En revanche, les narratifs **Orange** et **Violet** restent très secs (Figure 30).

Ce phénomène est bien retranscrit à la confluence avec la Loire, au niveau de Nevers, avec le décrochage brutal de la variation de débit moyen annuel (Figure 29). Les effets viennent se cumuler et pourraient venir accentuer les évènements extrêmes.

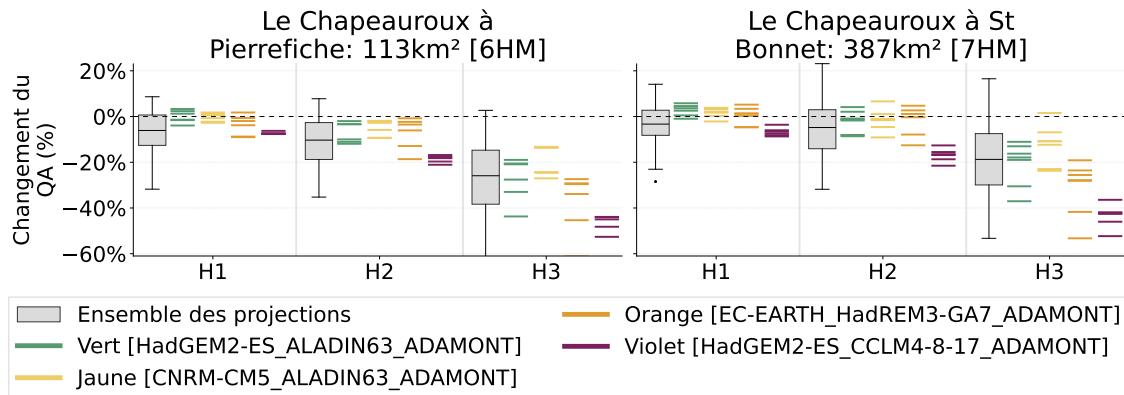


FIGURE 31. Diagramme en boîte des changements médians du débit moyen annuel (QA) pour les stations cibles sur le Chapeauroux (de l'amont vers l'aval) par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Sur le Chapeauroux, l'ensemble des narratifs indiquent une forte diminution du débit moyen annuel avec une baisse allant de -10 à -40% à horizon 2070-2099. Cette rivière, de taille bien plus modeste que la Loire ou même l'Allier, est davantage vulnérable aux aléas du changement climatique de par sa localisation mais également de par la taille de son bassin versant qui ne permet pas d'avoir des effets venant compenser ces baisses (Figure 31).

Régime mensuel

Le débit moyen annuel est un indicateur qui permet de se faire une idée générale de l'évolution des quantités d'eau de surface. Cependant, à travers cette moyenne annuelle, de nombreux effets se compensent, ce qui ne permet pas d'illustrer toute la variabilité possible des phénomènes. Ces perturbations sont très différentes selon la période de l'année. En se penchant sur les débits moyens mensuels de la Loire à travers les différents horizons, un contraste prononcé entre l'hiver et l'été apparaît. Sur la Figure 32, le débit est normalisé par le débit moyen annuel de chaque chaîne de simulation au niveau de chaque station pour la période de référence 1991-2020. Cette représentation permet d'avoir une vue d'ensemble homogène des stations tout en gardant la variabilité saisonnière.

Sur l'ensemble des stations, le changement entre la période de référence et la fin de siècle indique une hausse du débit en janvier et février. Celle-ci décroît en mars puis en avril une relative stagnation est observée avant de chuter jusqu'à la période estivale. Il est à relever que le secteur amont verra ce changement de saisonnalité apparaître plus tôt avec une baisse marquée dès avril.

Si les débits minimum seront toujours atteints en août, le mois de septembre en fin de siècle sera hydrologiquement proche des mois d'août actuels là où les mois d'octobre seront hydrologiquement proche des mois de septembre actuels. La période estivale sera plus intense, commencera plus tôt et se prolongera plus longtemps dans l'année. La période hivernale, en revanche, sera certes en moyenne plus intense mais elle sera également plus courte ce qui laisse entrevoir des difficultés à recharger les sols. Ces grandes tendances se retrouvent également sur l'Allier et le Chapeauroux (Figure 33 et Figure 34).

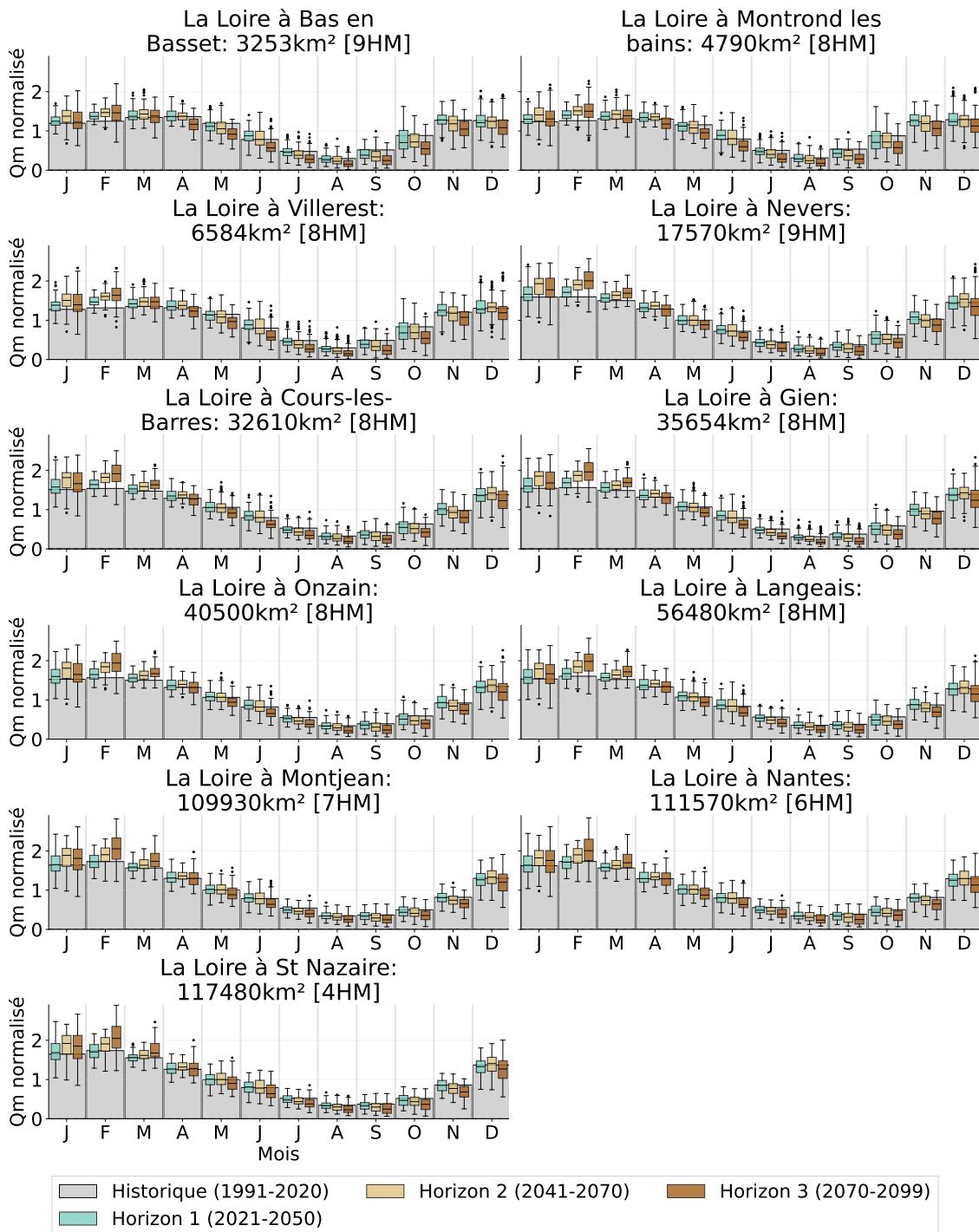


FIGURE 32. Diagramme en boîte du débit moyen mensuel normalisé par le débit moyen annuel de la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur la Loire (de l'amont vers l'aval). Les barres grises en arrière plan correspondent aux débits moyens mensuels sur la période historique normalisés par le débit moyen annuel.

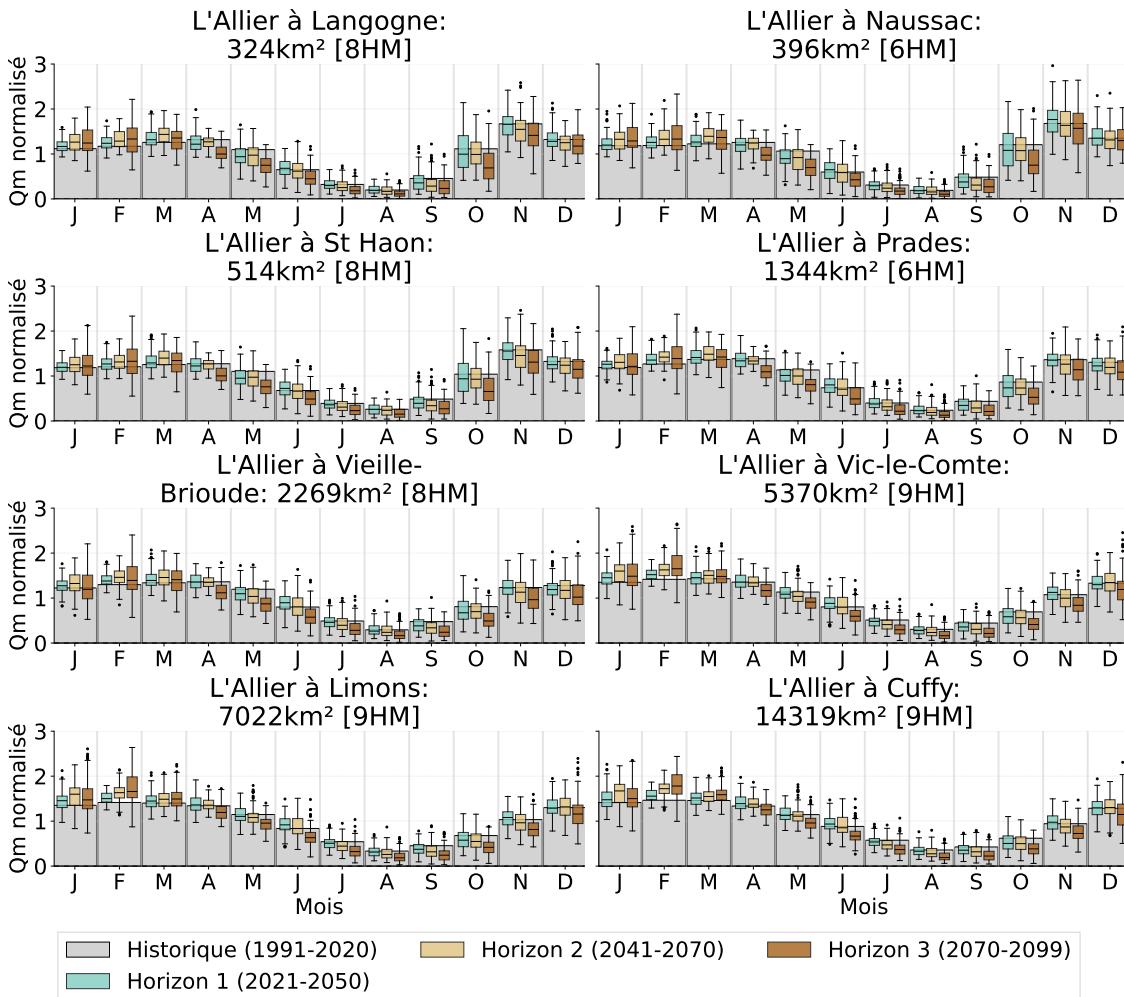


FIGURE 33. Diagramme en boîte du débit moyen mensuel normalisé par le débit moyen annuel de la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur l'Allier (de l'amont vers l'aval).

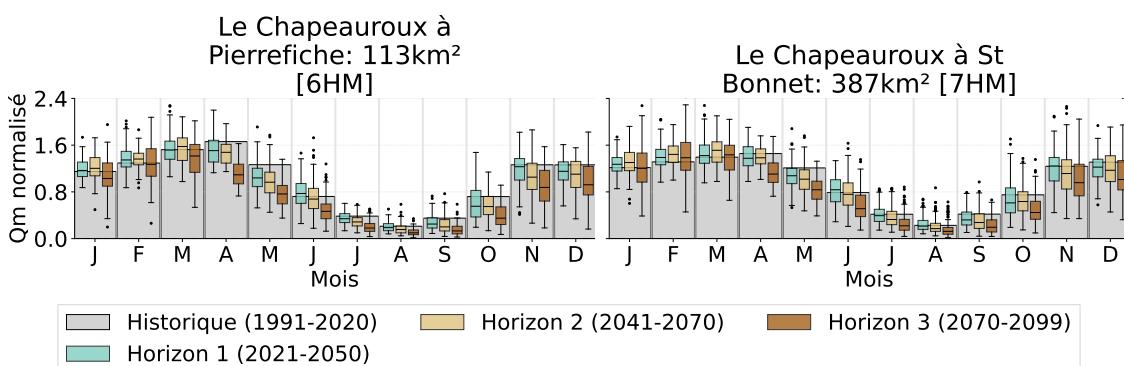


FIGURE 34. Diagramme en boîte du débit moyen mensuel normalisé par le débit moyen annuel de la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur le Chapeauroux (de l'amont vers l'aval).

Bas débits

Débit dépassé 90% du temps (Q90)

Le débit dépassé 90% du temps (Q90) illustre le comportement du cours d'eau en période de bas débits et permet d'estimer les débits d'étiage. Comme souligné précédemment, les périodes de bas débits s'intensifient au fil du siècle. Sur la période proche, le Q90 risque d'ores et déjà diminuer de -10 à -15%

sur l'ensemble du bassin de la Loire (Figure 35). Cette tendance à la baisse se prolonge et tend vers les -30% d'ici 2050 (Figure 36) pour finalement voir le Q90 chuter de -50% en fin de siècle (Figure 37). En d'autres termes, en 2100 le quantile 90 correspondra à la moitié du Q90 actuel. Les bas débits seront donc d'autant plus intenses. Il convient d'anticiper ces changements et de s'adapter à cette diminution drastique des ressources en eau.

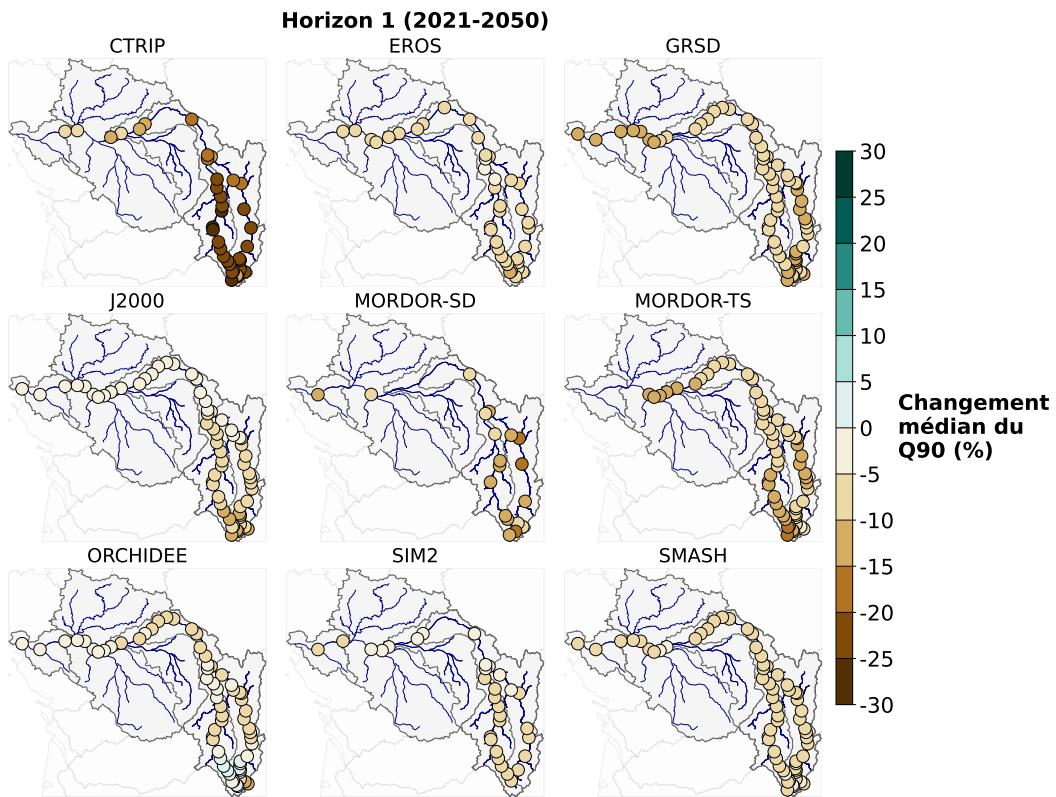


FIGURE 35. Cartes des changements médians du Q90 par modèle hydrologique pour l'horizon 1 (2021-2040) par rapport à la période de référence 1991-2020.

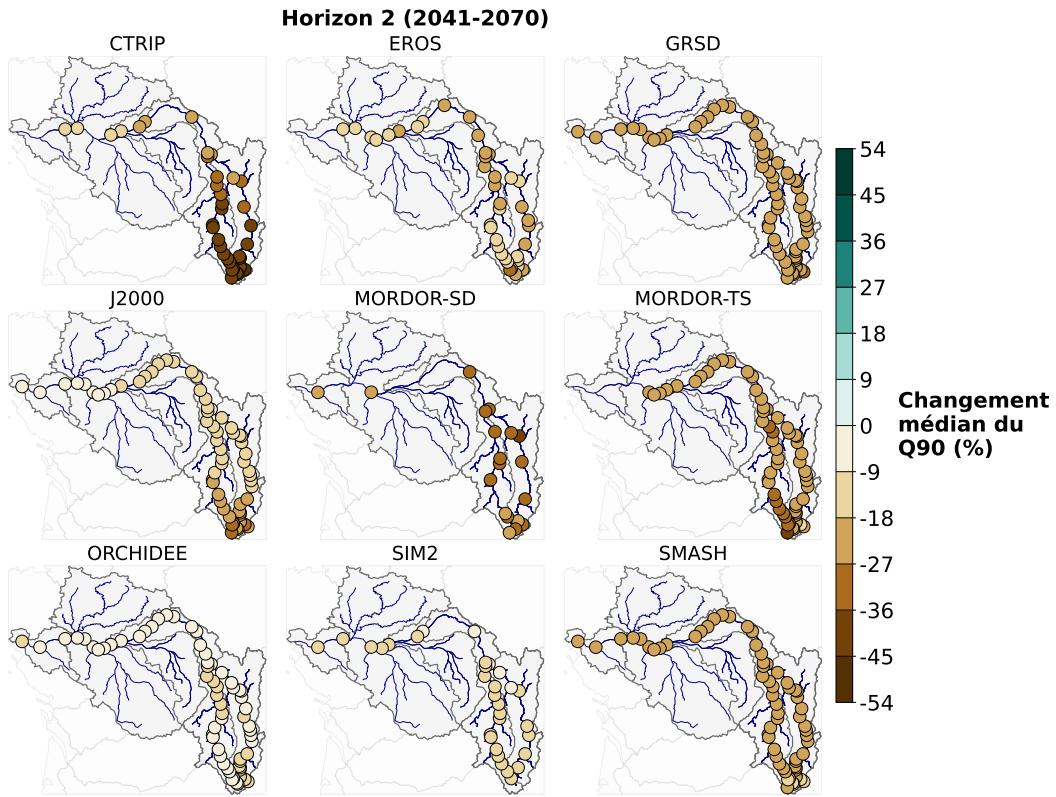


FIGURE 36. Cartes des changements médians du Q90 par modèle hydrologique pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

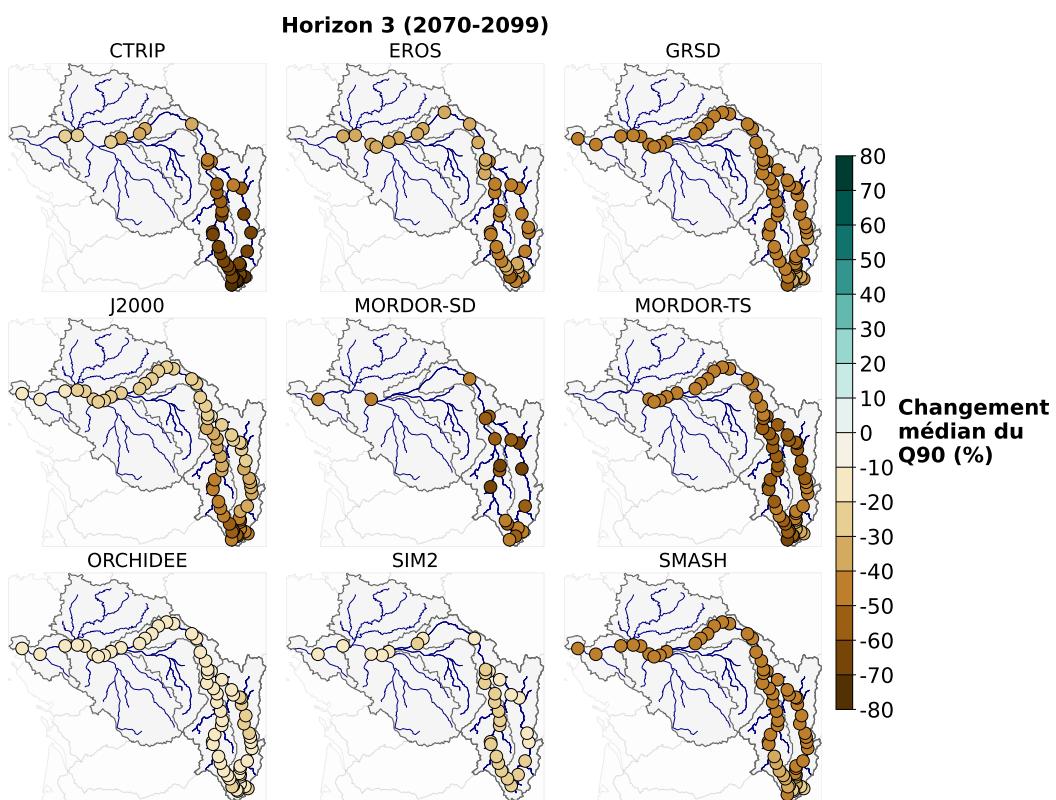


FIGURE 37. Cartes des changements médians du Q90 par modèle hydrologique pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Ces diminutions sont globalement constantes sur l'ensemble du linéaire de la Loire avec malgré tout une sévérité légèrement plus forte en tête de bassin. Le narratif **Jaune** est le plus optimiste avec une baisse du Q90 en fin de siècle de l'ordre de -25%, le narratif **Vert** est plus proche des -50% là où les narratifs **Orange** et **Violet** sont autour des -60% (Figure 38). Ces résultats se retrouvent dans des ordres de grandeurs similaires sur l'Allier et le Chapeauroux (Figure 39 et Figure 40).

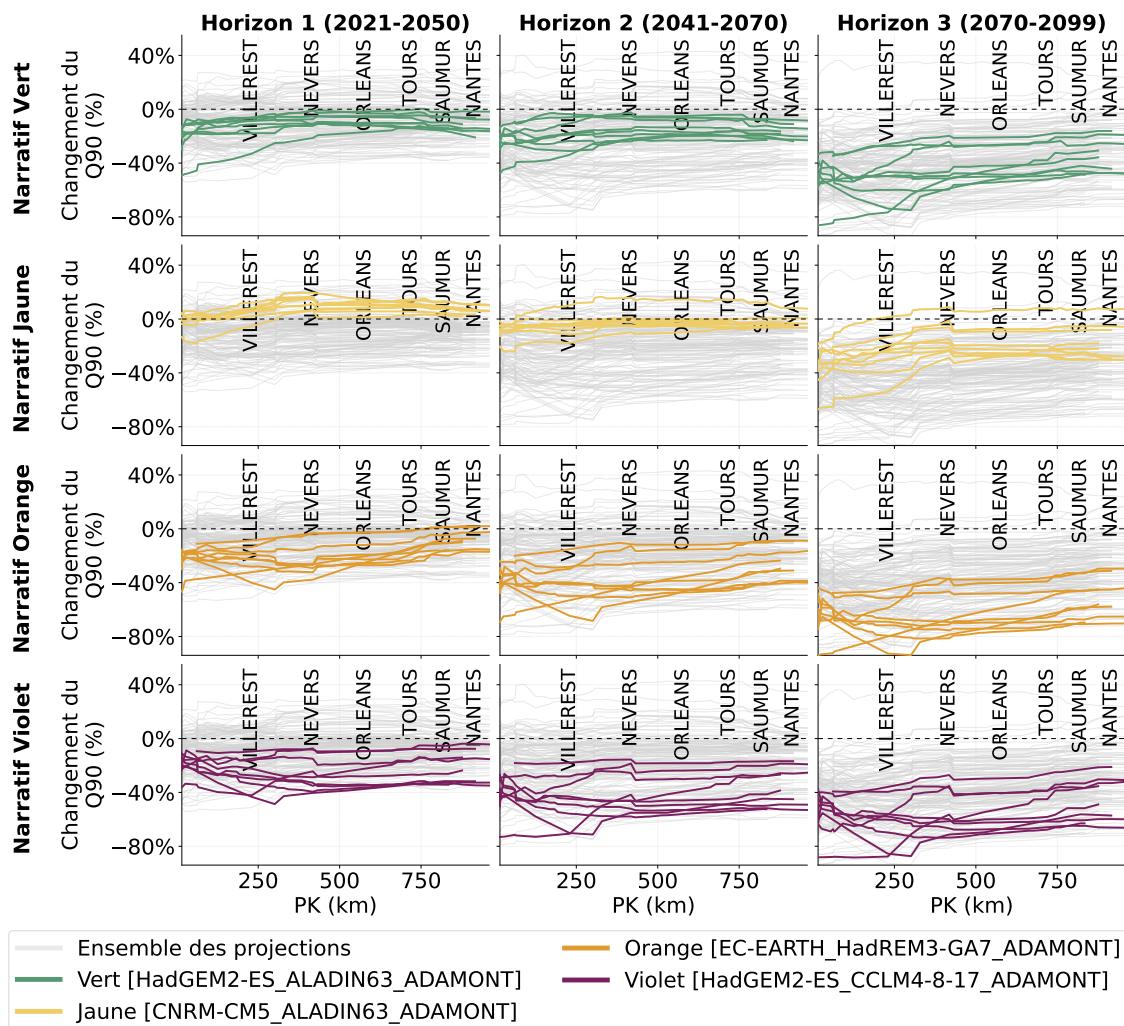


FIGURE 38. Changements médians du Q90 de la Loire en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

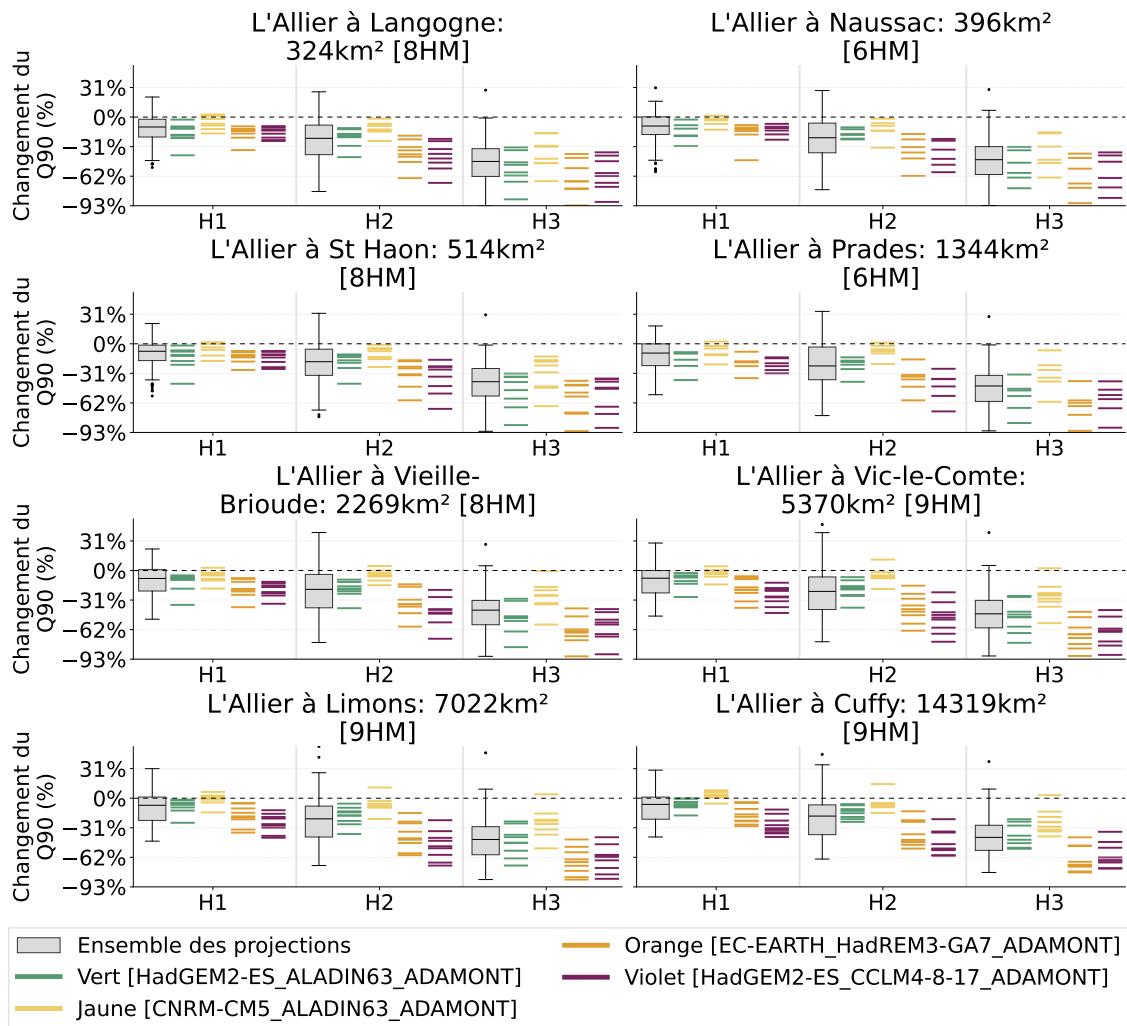


FIGURE 39. Diagramme en boîte des changements médians du Q90 sur l'Allier pour une sélection de stations cibles par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

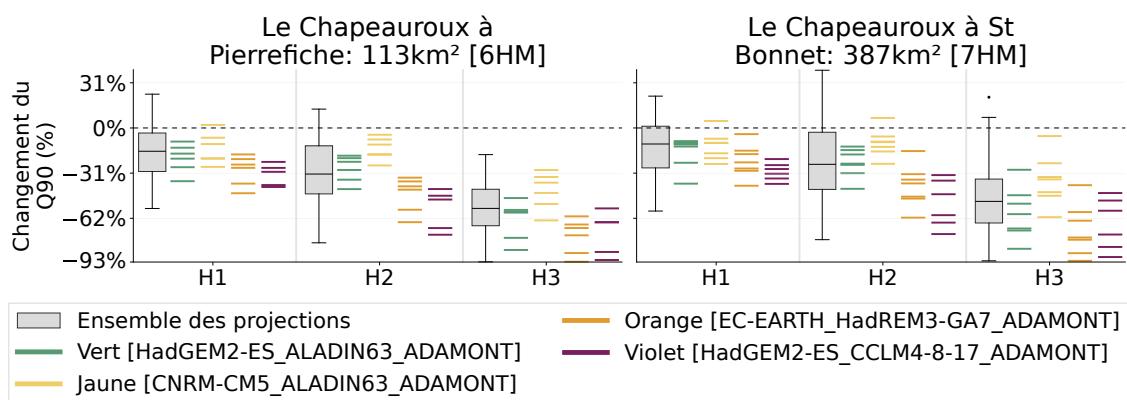


FIGURE 40. Diagramme en boîte des changements médians du Q90 sur le Chapeauroux pour une sélection de stations cibles par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Débit moyen mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5)

Un indicateur complémentaire qui permet de caractériser les bas débits est le débit moyen mensuel minimal quinquennal (QMNA5), autrement dit le débit mensuel minimum qui a une chance sur cinq chaque année de ne pas être dépassé. Dans le cas des horizons temporels de 30 ans présentés ici, cela correspond aux 6 années avec les débits mensuels les plus faibles.

Le QMNA5 est un indicateur tout particulièrement pertinent quand il est question des étiages. Les signaux montrent tout au long du siècle une diminution globale du QMNA5 avec un bon accord entre les modèles à l'exception d'ORCHIDEE. Une démarcation nette apparaît entre l'amont et l'aval. En tête de bassin, l'indicateur décroît de -30 à -50% quand la diminution tend à être comprise entre 0 et -10% passée la confluence avec l'Allier (Figure 41, Figure 42 et Figure 43).

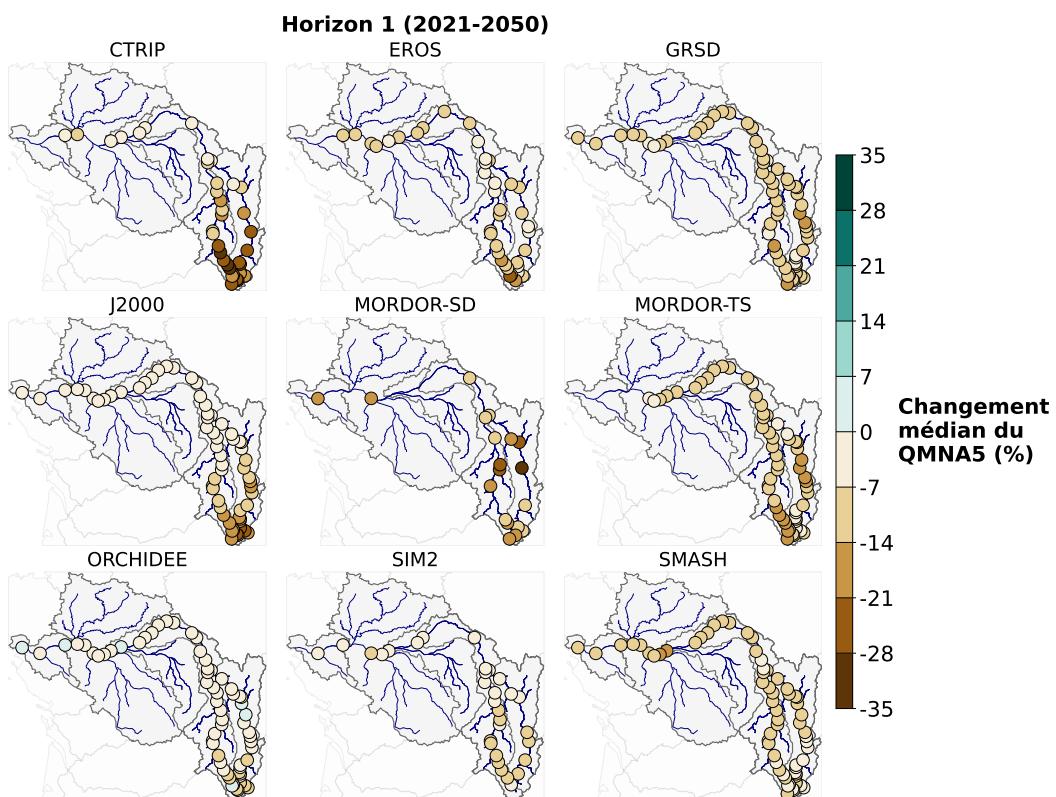


FIGURE 41. Cartes des changements médians du QMNA5 pour l'horizon 1 (2021-2040) par rapport à la période de référence 1991-2020.

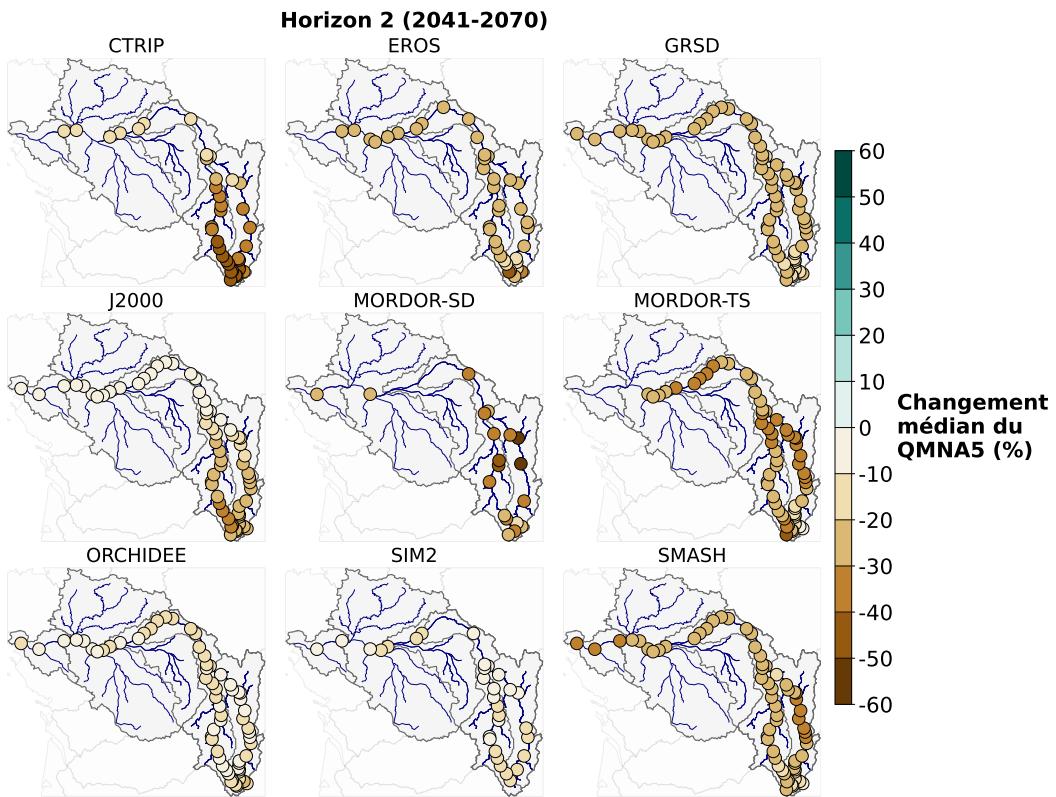


FIGURE 42. Cartes des changements médians du QMNA5 pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

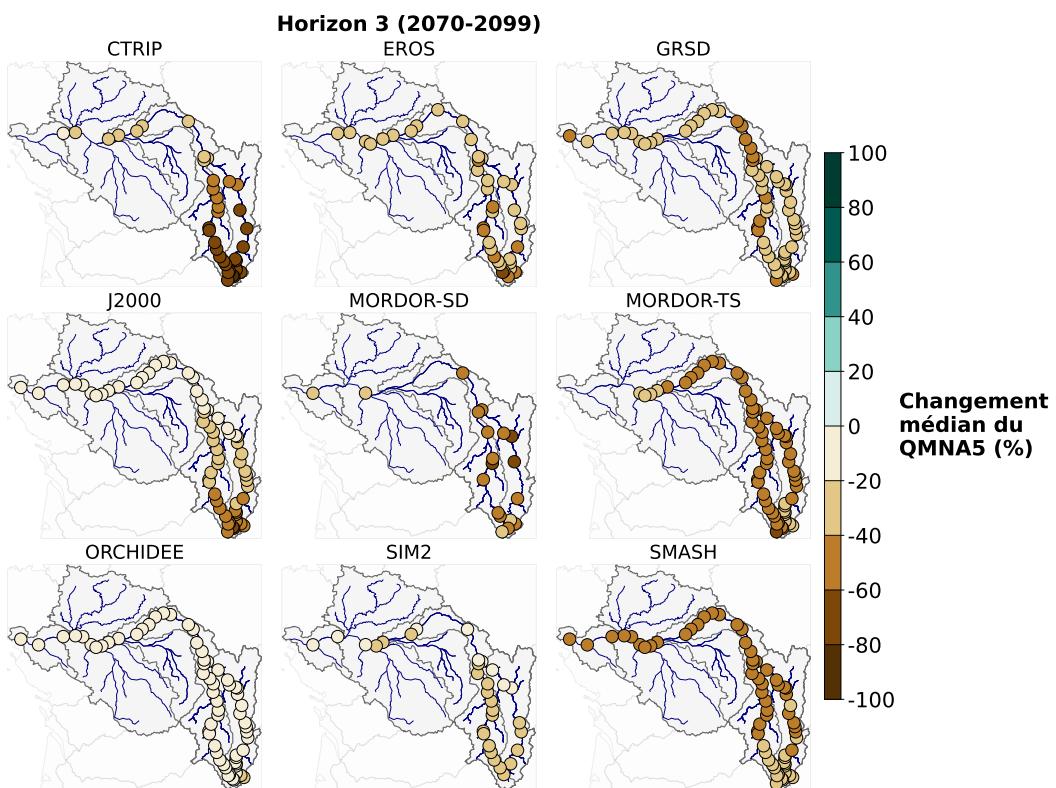


FIGURE 43. Cartes des changements médians du QMNA5 pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Débit moyen mensuel de période de retour 5 ans (QMN5)

Là où le QMNA5 permet de comparer les mois les plus secs sur une période donnée, le débit mensuel quinquennal sec (QMN5) a l'avantage de garder la variabilité intra annuelle. Il correspond au débit mensuel minimum de période de retour 5 ans, il a donc une chance sur cinq d'être atteint chaque année pour un mois donné.

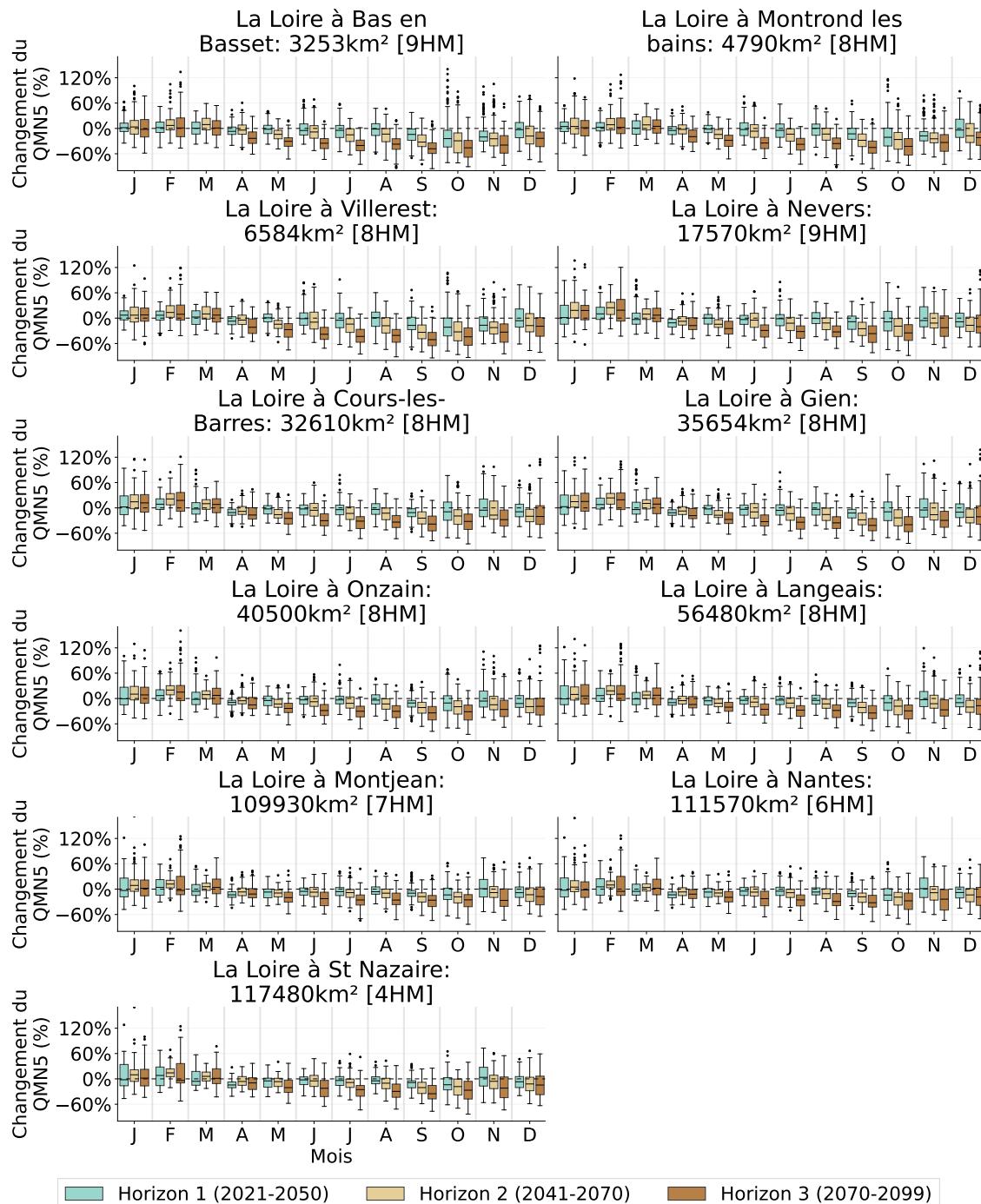


FIGURE 44. Diagramme en boîte des changements médians du QMN5 par rapport à la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur la Loire.

Sur la Loire, celui-ci est relativement stable de janvier à mars puis décroît fortement jusqu'à septembre - octobre. Les mois les plus secs voient leur QMN5 chuter de l'ordre de -30% en horizon fin de siècle. Les mois estivaux sont particulièrement touchés et la baisse du débit se prolonge fortement sur

le mois d'octobre qui subit une perte avoisinant les -50% en amont de Villerest (Figure 44).

De manière plus explicite, cela signifie que les 6 mois d'octobre les plus secs des 30 dernières années du siècle voient leurs débits au moins divisés par deux par rapport aux 6 mois d'octobre les plus secs de la période de référence. Les résultats des valeurs brutes normalisées sont présentés en Annexe A.

Il en est de même sur l'Allier et le Chapeauroux où en septembre et en octobre le QMN5 verra sa valeur être divisée par deux en fin de siècle. Au-delà de cette forte diminution sur la seconde moitié de l'été, il ne faut pas négliger le phénomène global de cette baisse qui débute en avril (d'au moins -15% et dépassant les -25% à l'amont) et qui se prolonge jusqu'à novembre (Figure 45 et Figure 46).

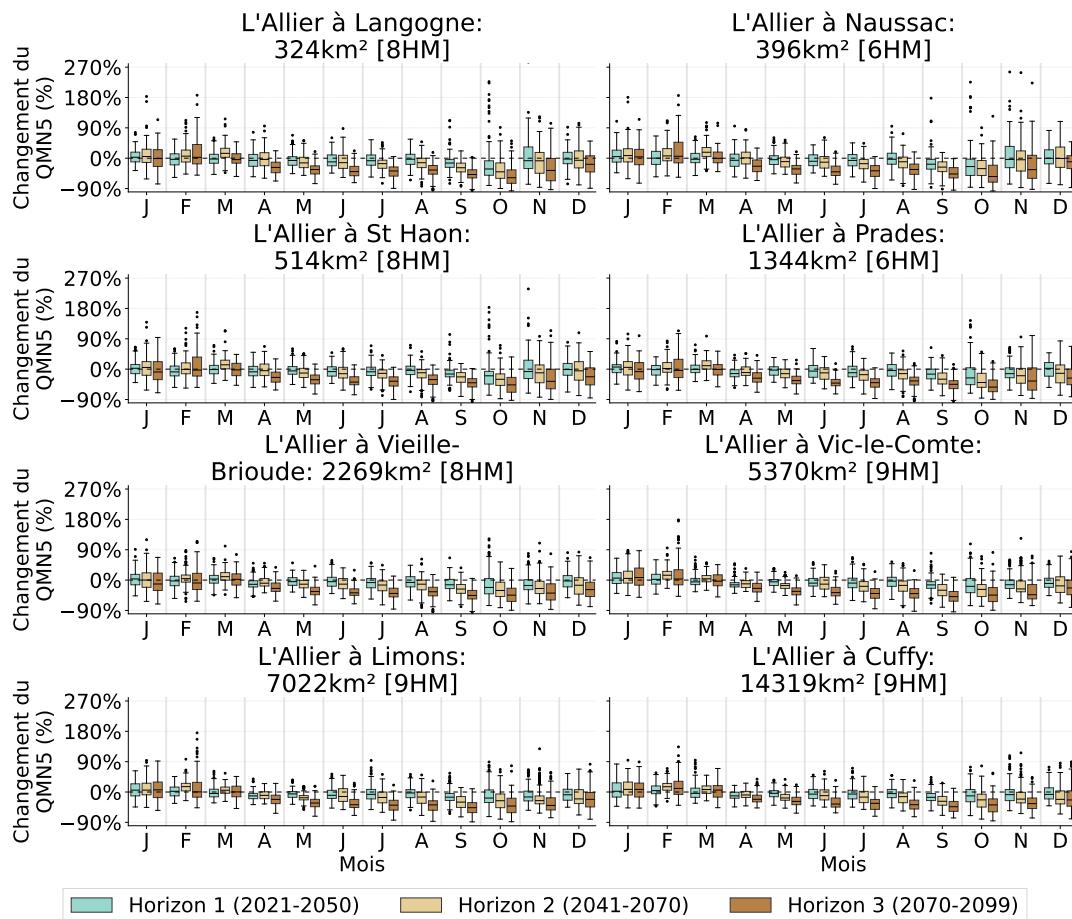


FIGURE 45. Diagramme en boîte des changements médians du QMN5 par rapport à la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur l'Allier.

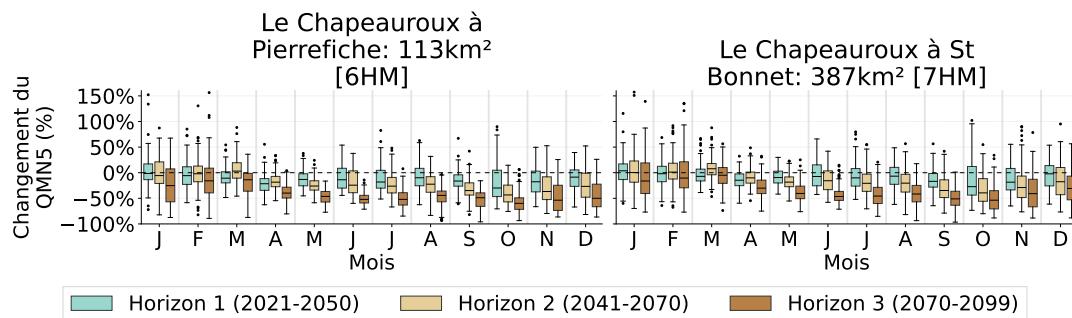


FIGURE 46. Diagramme en boîte des changements médians du QMN5 par rapport à la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles sur le Chapeauroux.

Débit minimum moyen sur 10 jours (VCN10)

Pour aller encore plus loin sur les estimations des étiages estivaux, il faut se pencher davantage sur la notion d'événement. Les étiages sont des phénomènes qui s'étendent dans la durée et dont les conséquences peuvent être particulièrement violentes en cas de déficit déjà présent sur le territoire. Le débit moyen minimum sur 10 jours glissants (VCN10) permet de caractériser l'intensité des bas débits. Il est ici calculé sur les mois de mai à novembre.

Le sens d'évolution au fil des décennies est très net avec des événements de plus en plus marqués. Avec tout d'abord une diminution de l'ordre de -5 à -15% sur l'horizon proche, elle tend par la suite vers les -20% en étant plus marquée en tête de bassin pour dépasser les -40% en fin de siècle ([Figure 47](#), [Figure 48](#) et [Figure 49](#)).

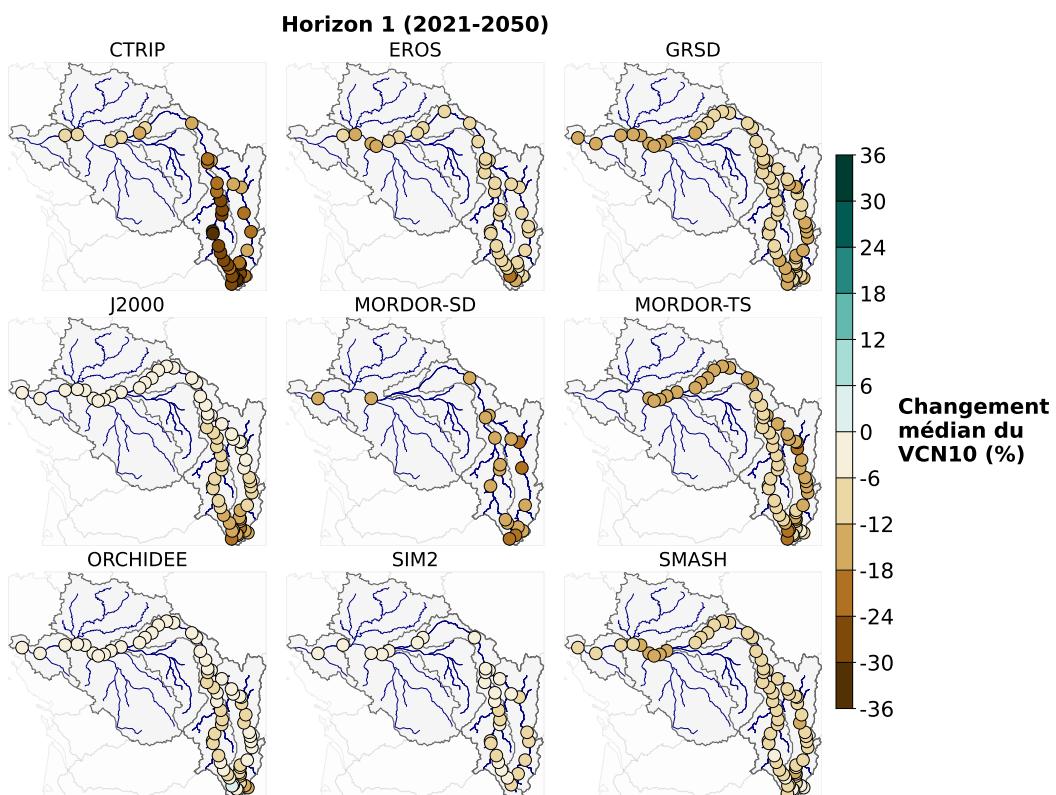


FIGURE 47. Cartes des changements médians du VCN10 pour l'horizon 1 (2021-2040) par rapport à la période de référence 1991-2020.

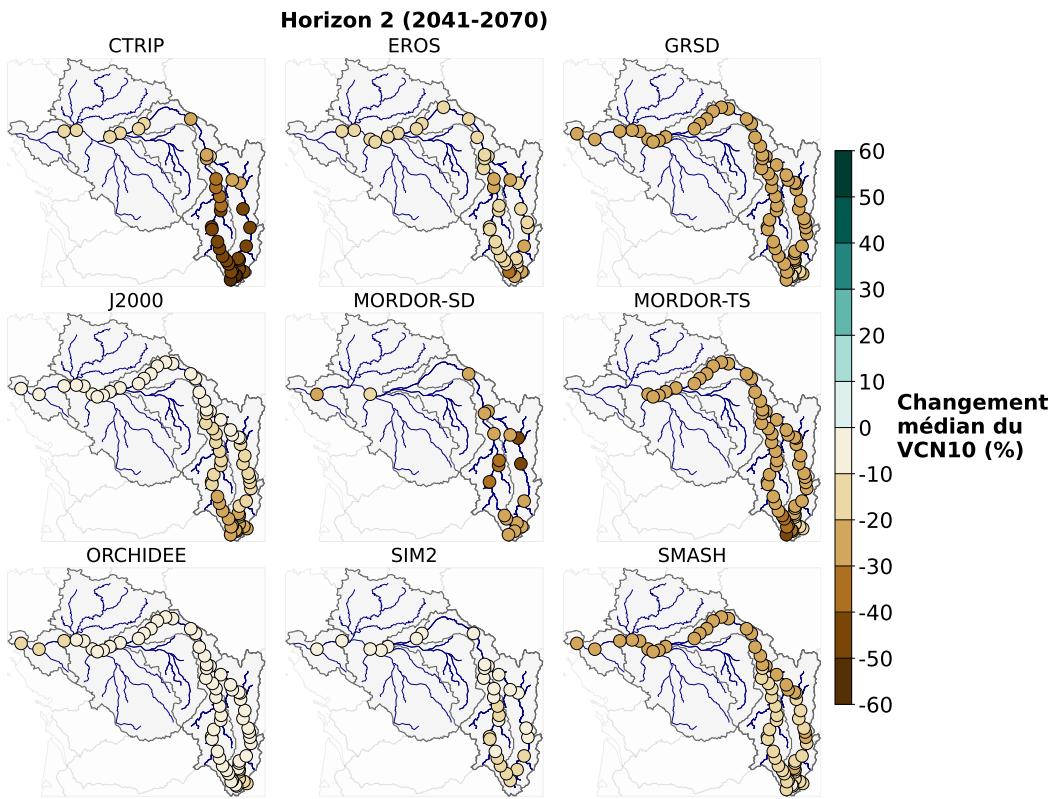


FIGURE 48. Cartes des changements médians du VCN10 pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

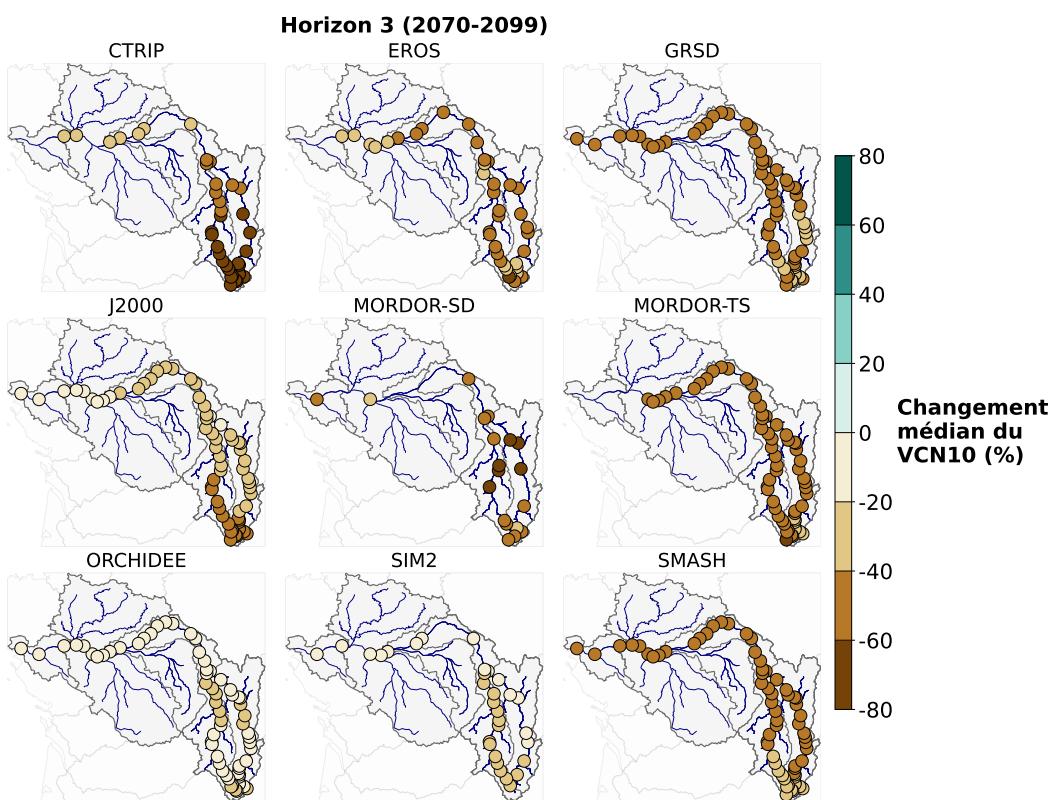


FIGURE 49. Cartes des changements médians du VCN10 pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Durée et saisonnalité des étiages

Les étiages seront d'une part plus intenses mais également plus longs. Ici, afin de définir un seuil similaire pour tous les horizons, nous nous intéressons à la plus longue période de chaque année durant laquelle le débit moyen est inférieur au VCN10 maximum de la période 1975-2100.

En se plaçant du point de vue des narratifs, le narratif **Jaune** est le plus optimiste avec des bas débits légèrement plus longs, d'une à deux semaines, que ceux de la période 1991-2020. Le narratif **Vert** présente un comportement similaire pour l'avenir proche avant de tendre vers une quarantaine de jours supplémentaires par an en horizon 3. Enfin, les narratifs **Violet** et **Orange** sont représentatifs des simulations extrêmes maximum avec respectivement près de deux mois et deux mois et demi de bas débits supplémentaires, cela s'approche du double de la durée médiane des bas débits sur la période 1991-2020 (Figure 50).

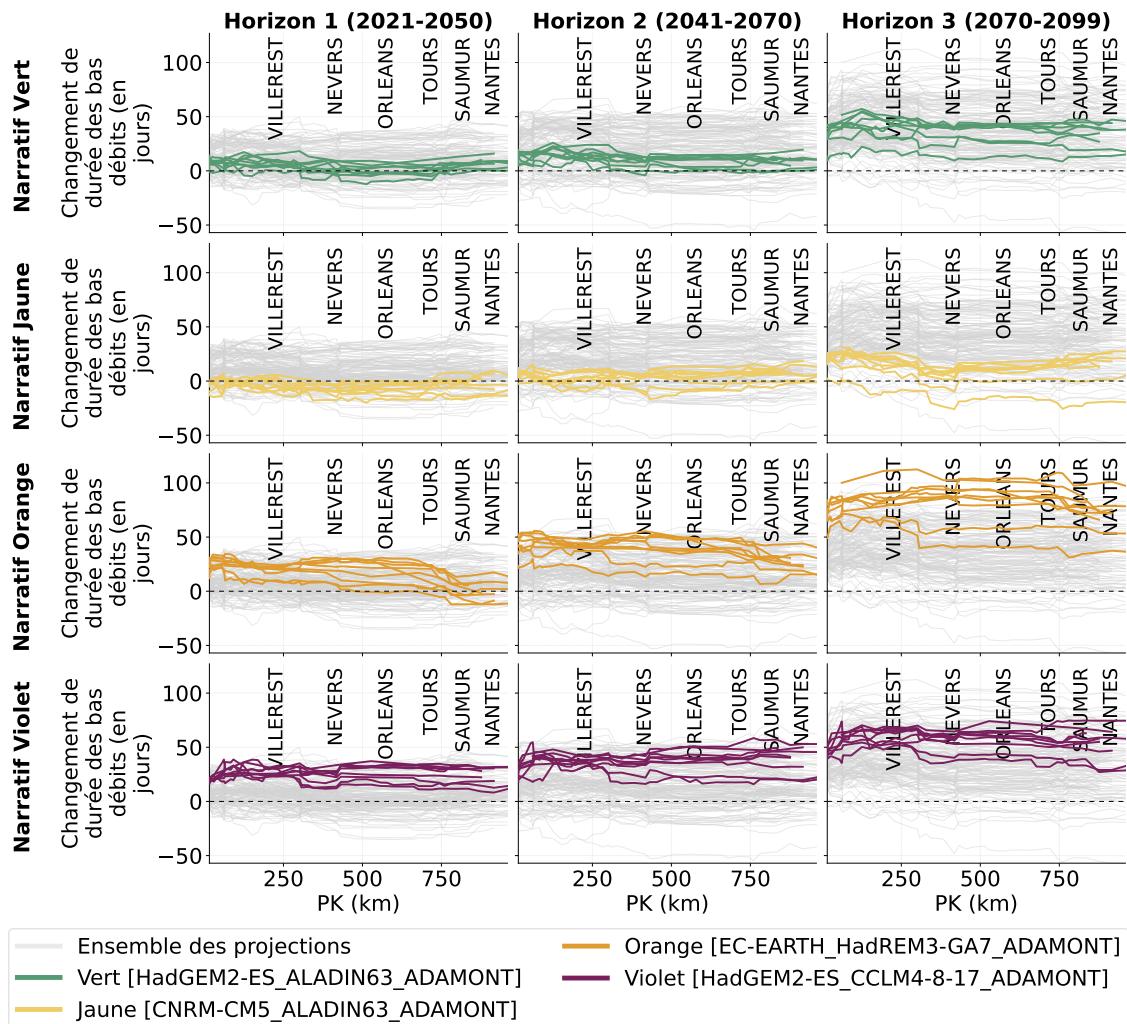


FIGURE 50. Changements médians des durées des bas débits sur la Loire (en nombre de jours) en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Les tendances sont assez proches du côté de l'Allier et du Chapeauroux avec un prolongement gradué des périodes de bas débits pour des ordres de grandeurs qui tendent de 1 à 2 mois supplémentaires en fin de siècle (Figure 51 et Figure 52).

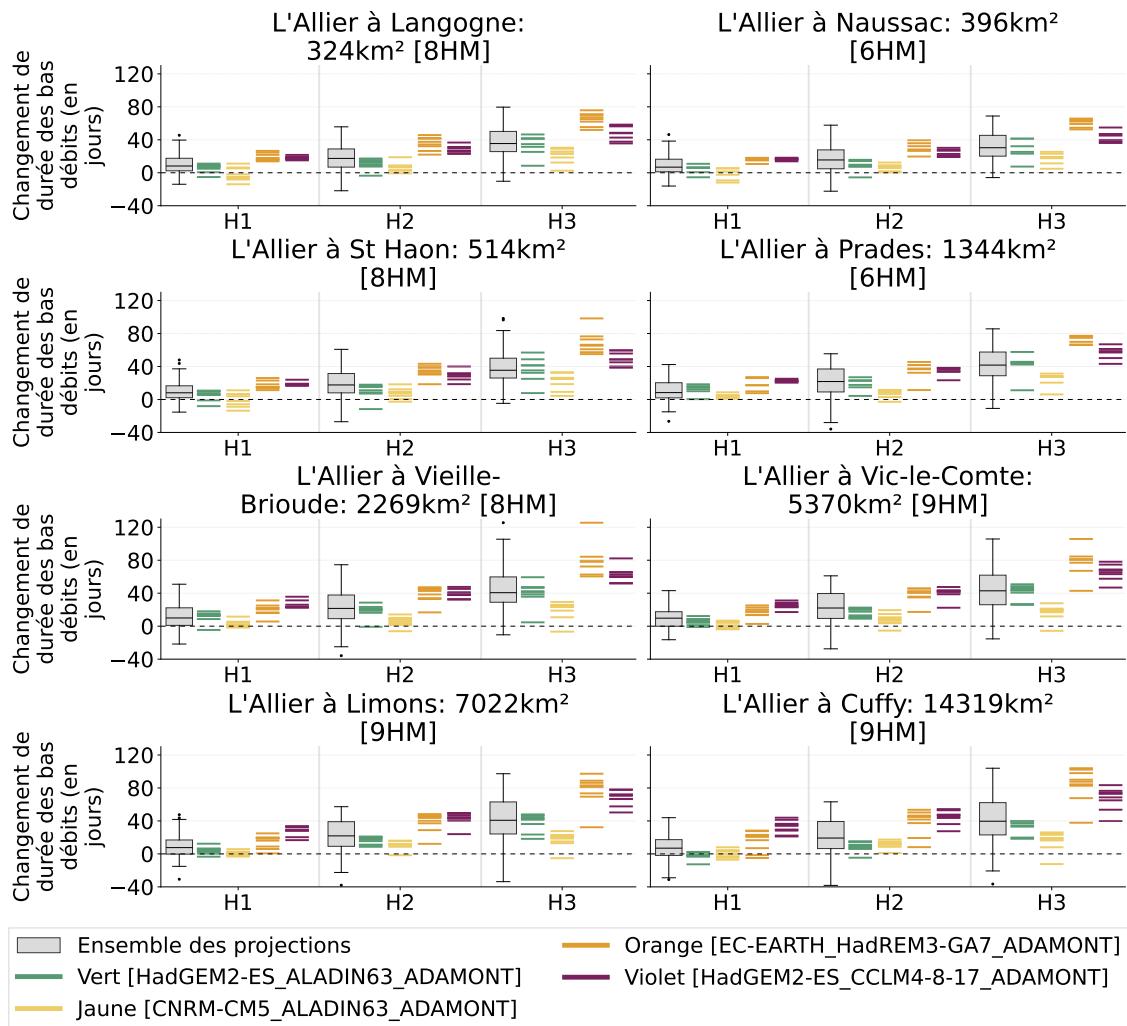


FIGURE 51. Diagramme en boîte de la différence des durées des bas débits sur les stations cibles de l'Allier (en nombre de jours) par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

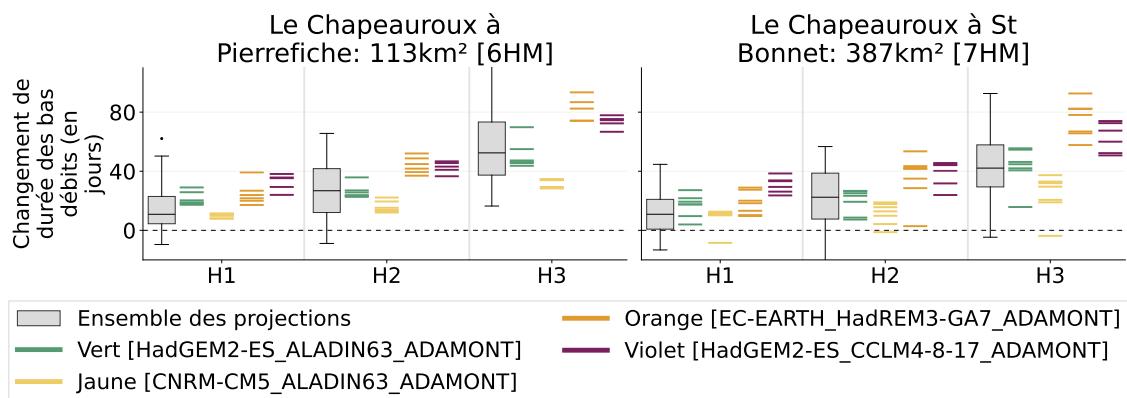


FIGURE 52. Diagramme en boîte de la différence des durées des bas débits sur les stations cibles du Chapeauroux (en nombre de jours) par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Les bas débits se prolongent et ils commencent de plus en plus tôt. Les résultats entre l'amont et l'aval sont relativement stables. Il y a d'une part les narratifs **Jaune** et **Vert** qui tendent vers une date

moyenne de début des bas débits une à deux semaines plus tôt. Les narratifs **Violet** et **Orange** sont bien plus sévères en identifiant des dates de début des bas débits un mois à un mois et demi plus tôt (Figure 53).

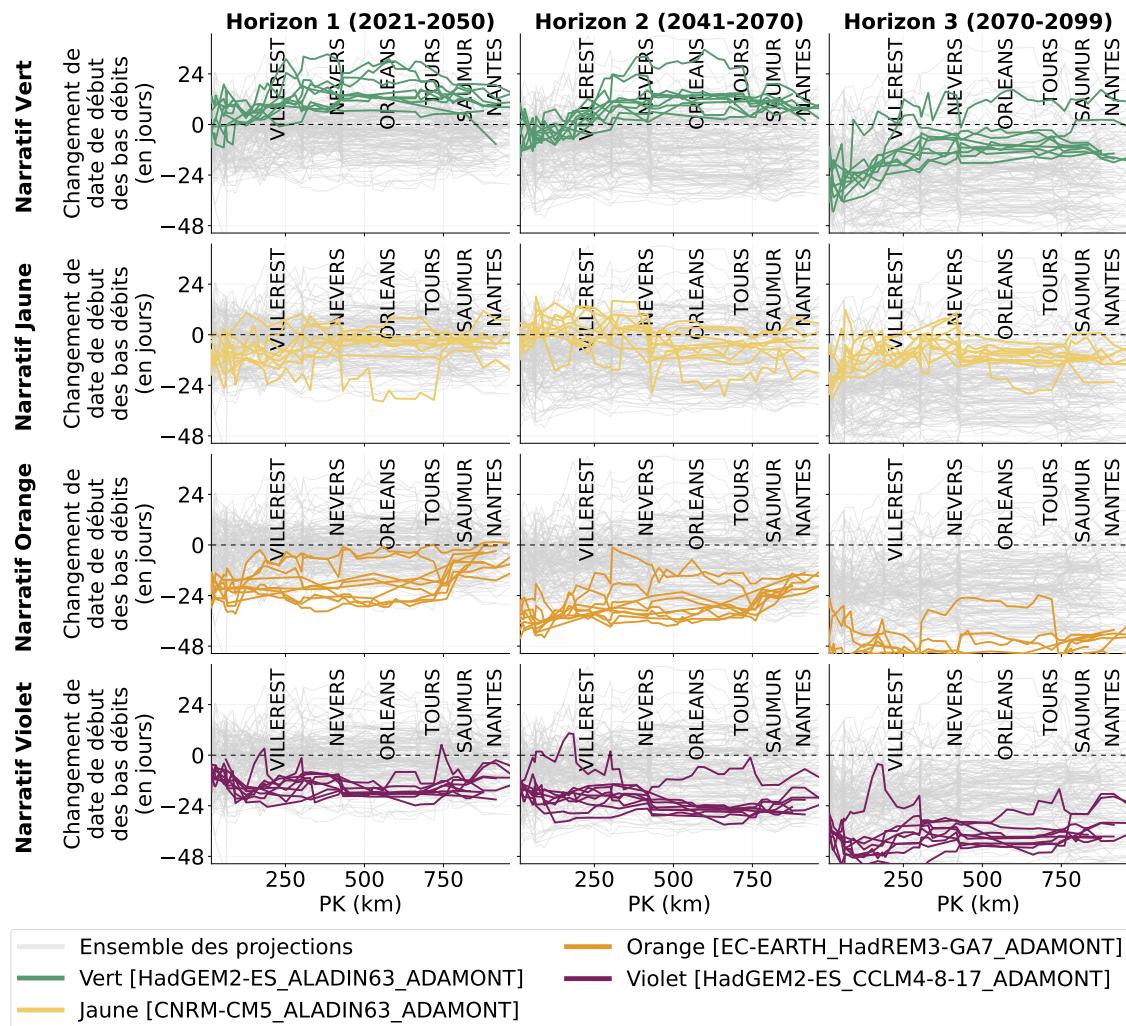


FIGURE 53. Changements médians de la date du début des bas débits (en nombre de jours) en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Enfin, si pour le **narratif Jaune**, la date de fin des bas débits est assez proche de la référence, pour les narratifs **Vert** et **Violet** elle est repoussée de 3 semaines supplémentaires. Le **narratif Orange** détecte un prolongement des bas débits encore un peu plus marqué avec une fin un mois plus tardive (Figure 54).

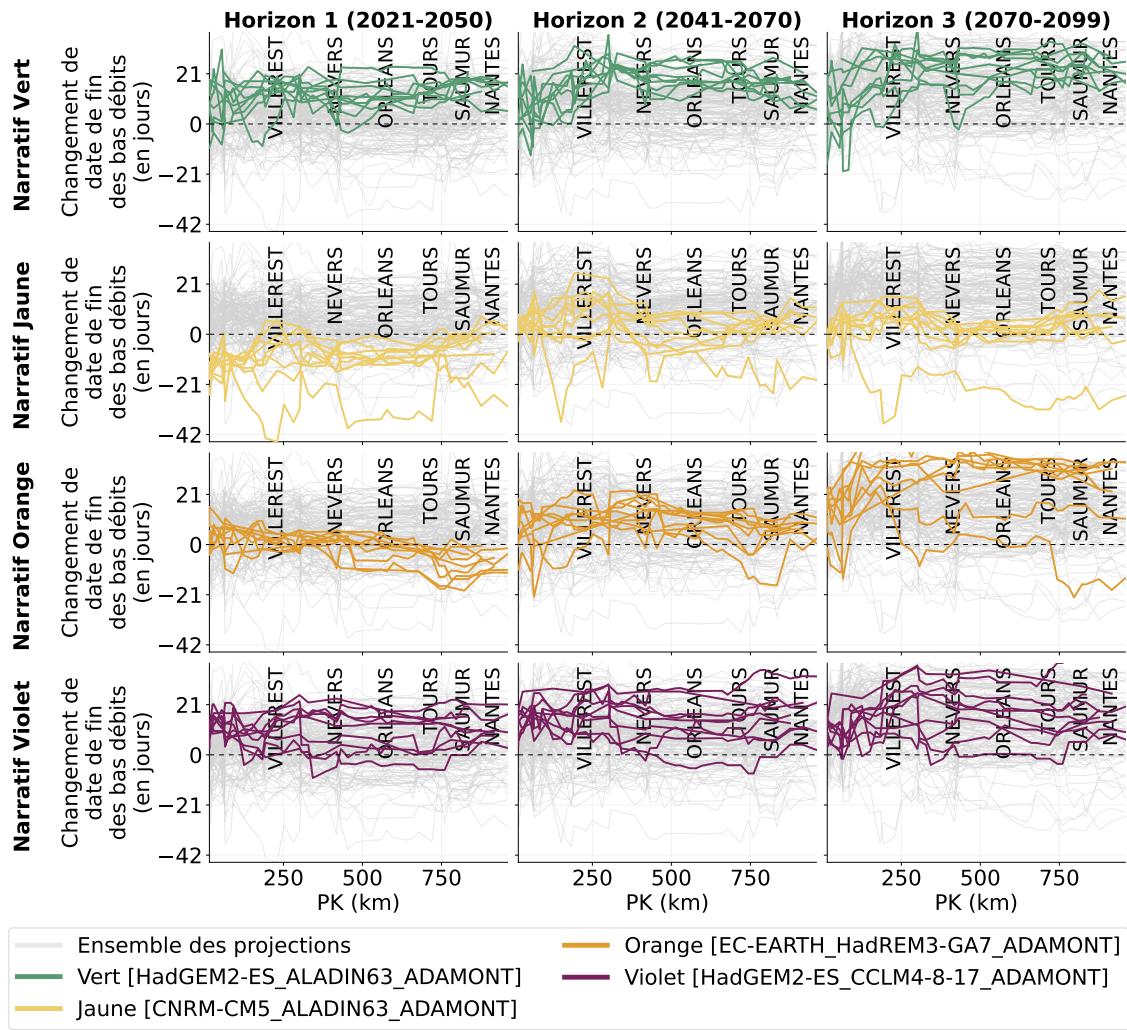


FIGURE 54. Changements médians de la date de fin des bas débits (en nombre de jours) en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Hauts débits

Débit dépassé 2% du temps

Pour les hauts débits, les signaux sont moins évidents avec notamment des résultats assez variables sur l'amont. Dans le cas du Q2 (débit dépassé 2% du temps soit en moyenne 7 jours par an), il y a en horizon proche une relative stabilité sur l'amont et une hausse de l'ordre de +5 à +10% sur l'aval (Figure 55). Entre les horizons 2041-2070 et 2070-2099, les résultats sont assez proches avec d'une part un signal brouillé sur l'amont (variations comprises entre -10 et +10%) mais davantage de cohérence est observée entre les modèles sur l'aval avec une augmentation post confluence avec l'Allier de l'ordre de +10 à +15% (Figure 56 et Figure 57). Le Q10 connaît des variations très similaires que ce soit en termes de profil ou d'intensité (Annexe B).

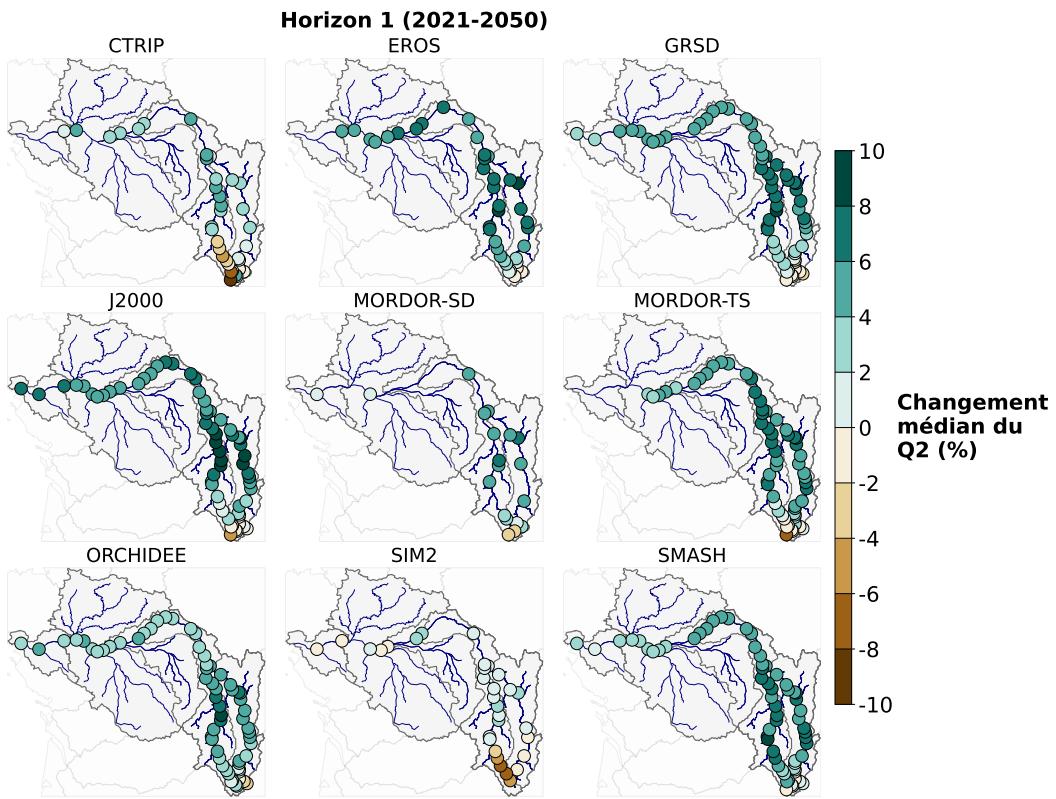


FIGURE 55. Cartes des changements médians du Q2 pour l'horizon 1 (2021-2040) par rapport à la période de référence 1991-2020.

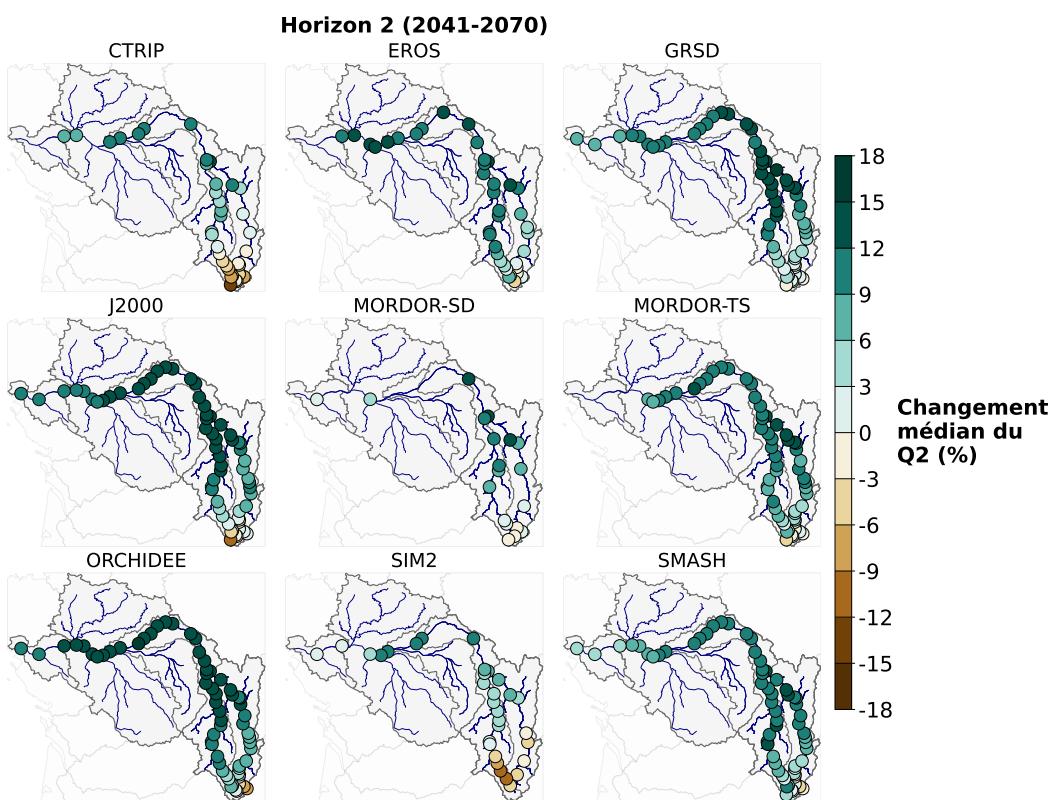


FIGURE 56. Cartes des changements médians du Q2 pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

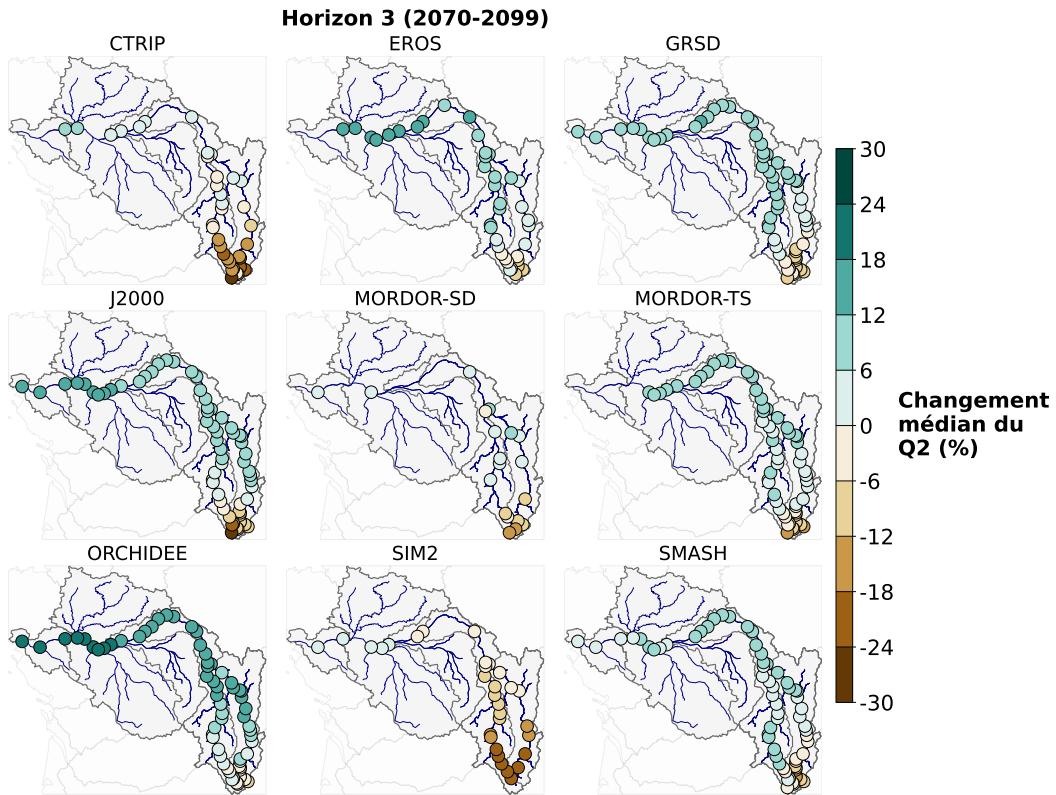


FIGURE 57. Cartes des changements médians du Q2 pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Les narratifs climatiques Explore2 représentent bien cette difficulté à dégager un signe sur les changements du Q2 en fin de siècle. Si les narratifs sont contrastés sur le signe, ils indiquent néanmoins des changements. Par ailleurs, pour les narratifs climatiques sélectionnés, les modèles hydrologiques obtiennent des réponses cohérentes entre elles.

Le **narratif Violet** est celui qui identifie les plus fortes variations au fil du siècle. Après une certaine stabilité du Q2 sur l'horizon proche, celui-ci chute fortement tout particulièrement sur l'amont pour tendre vers une baisse de l'ordre de -25%. Les 3 autres narratifs présentent des résultats assez similaires sur les horizons 2021-2050 et 2041-2070 avec une hausse du Q2 en moyenne entre +15 et +25%.

En horizon milieu de siècle les périodes de hauts débits demeurent assez prononcées avec notamment quelques années très humides là où après 2080 les débits sont à un niveau plus bas, rendant ainsi les périodes de hauts débits moins marquées. Cette hausse en milieu de siècle est concordante avec le profil des précipitations qui est plus marqué sur cette période (Figure 23).

En fin de siècle, les résultats sont ainsi un peu plus contrastés. Le **narratif Orange** passe de -20% sur l'amont à des ordres de grandeur similaires à la référence à l'aval de Villerest. Ce contraste amont-aval apparaît également pour le **narratif Vert** avec une relative stabilité sur l'amont là où l'aval tend vers une hausse du Q2 de +15%. Le **narratif Jaune** quant à lui identifie une hausse comprise entre +15 et +25% sur l'ensemble du fleuve (Figure 58).

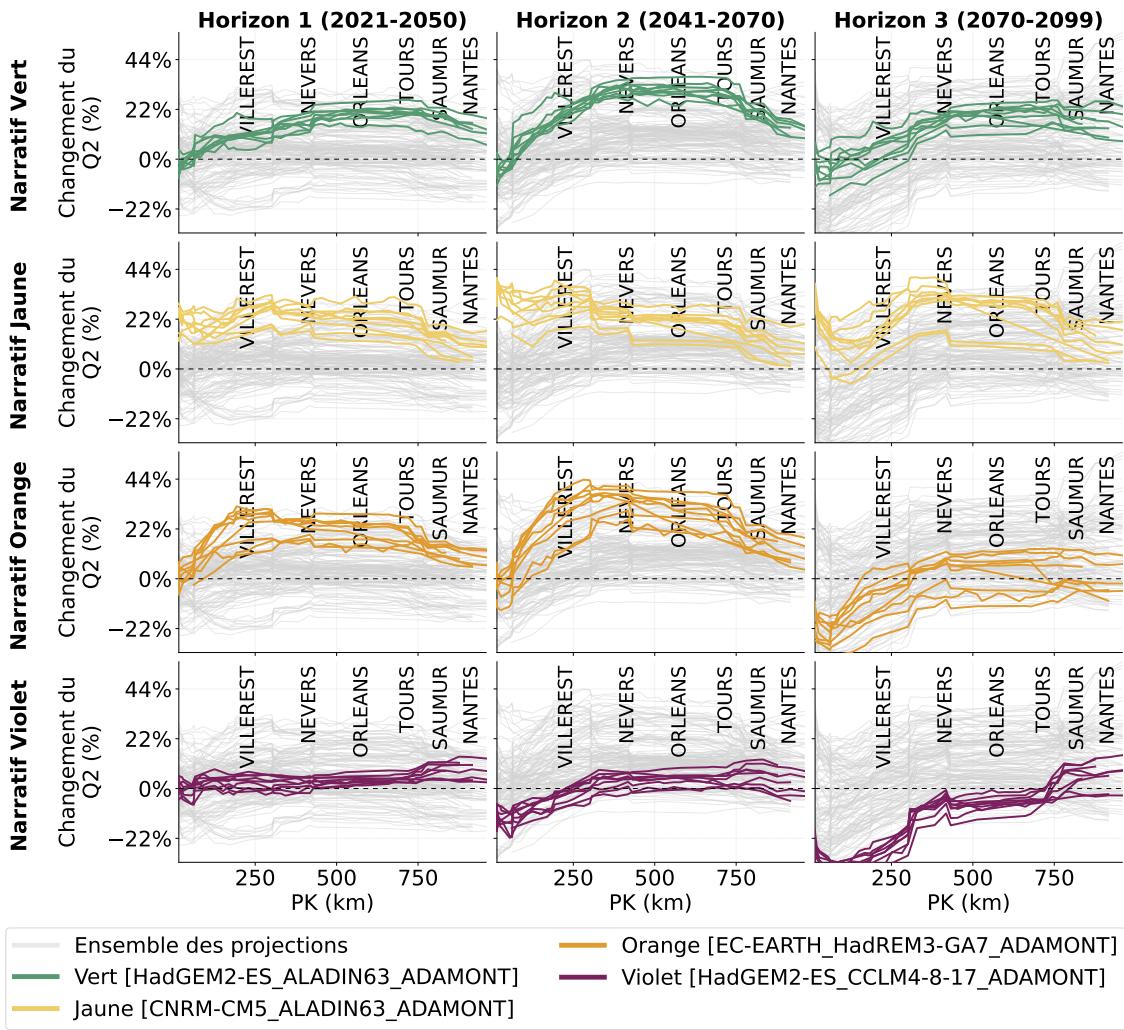


FIGURE 58. Changements médians du Q2 en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Débit journalier maximum annuel (QJXA)

Le débit maximum journalier (QJXA) suit des évolutions similaires à celles du Q2 avec d'une part une bonne cohérence entre les modèles sur la hausse dans la zone aval et des signaux de changement plus incertains en amont (Figure 59, Figure 60 et Figure 61).

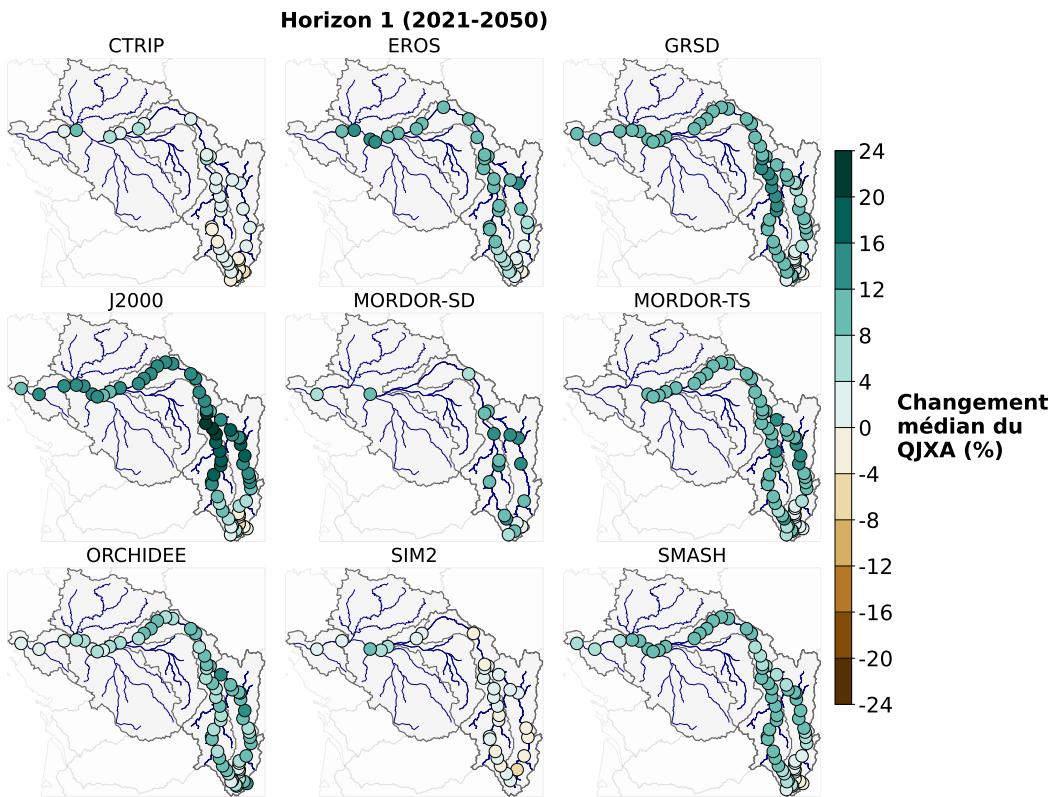


FIGURE 59. Cartes des changements médians du QJXA pour l'horizon 1 (2021-2050) par rapport à la période de référence 1991-2020.

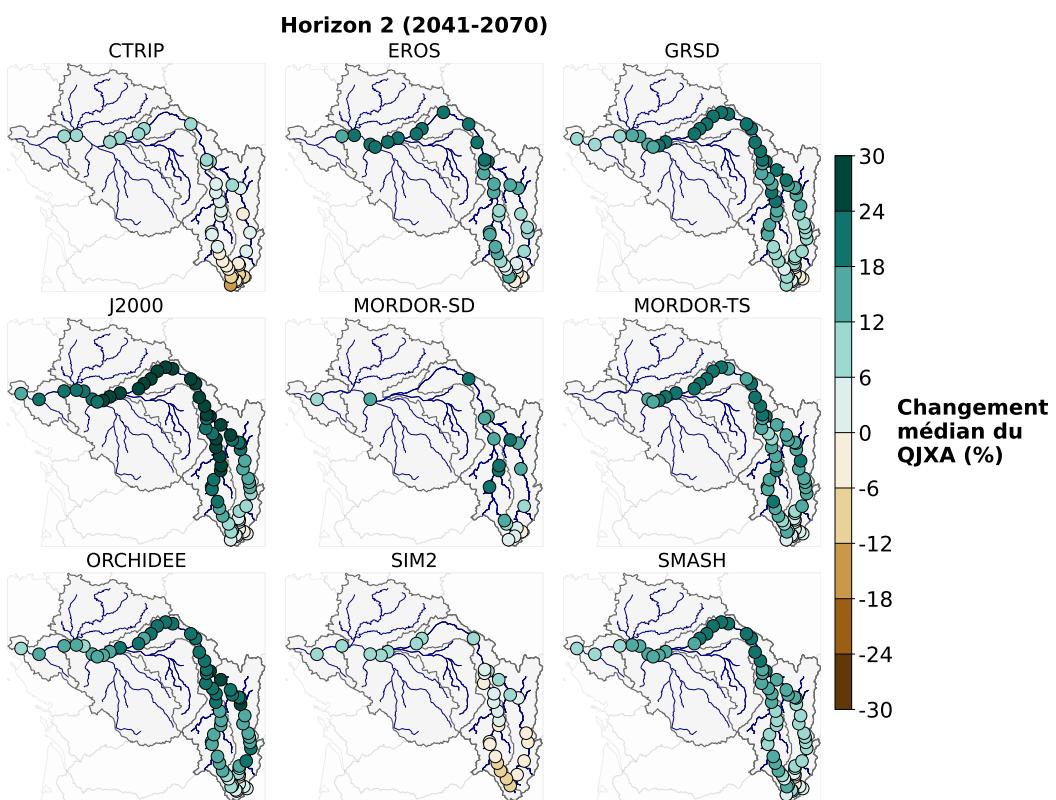


FIGURE 60. Cartes des changements médians du QJXA pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

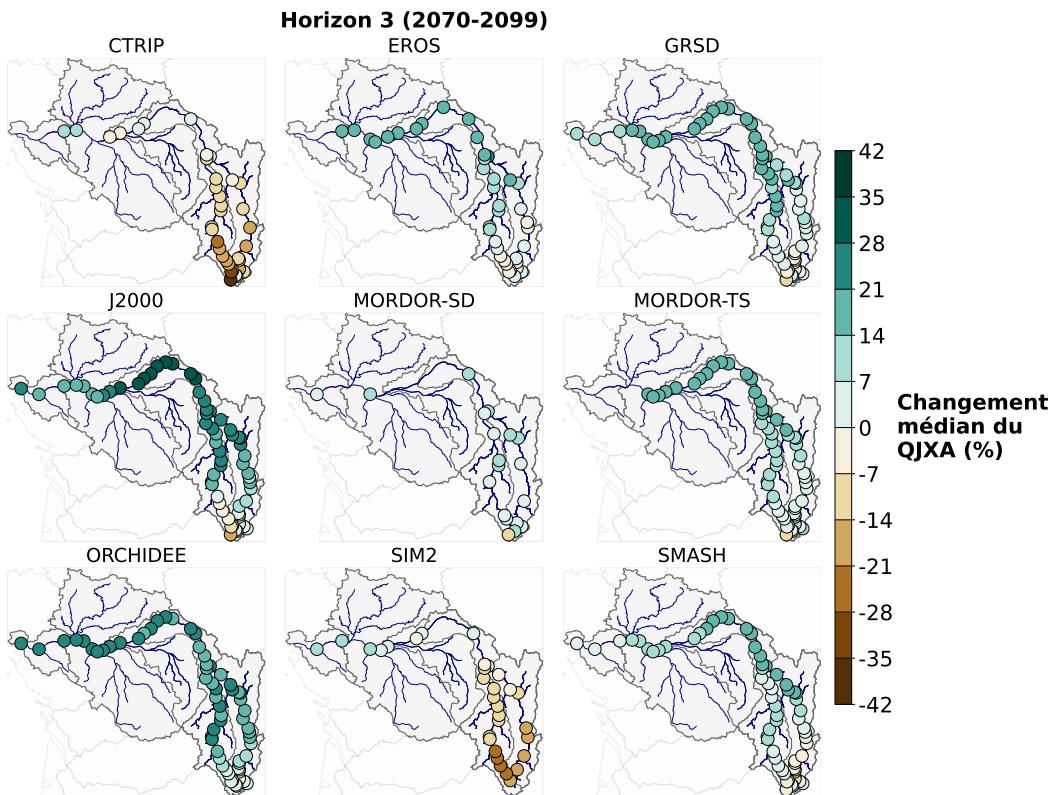


FIGURE 61. Cartes des changements médians du QJXA pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.

Sur la Loire amont, les narratifs présentent des disparités assez fortes. Le **narratif Vert** est assez constant que ce soit spatialement ou temporellement avec une hausse du QJXA de l'ordre d'une vingtaine de pourcent.

Le **narratif Jaune** détecte une augmentation un peu plus forte du débit journalier maximum avec une augmentation autour des +30% sur l'aval. Sur l'amont, une augmentation avoisinant les +45% est détectée en horizon milieu de siècle avant de fortement diminuer en fin de siècle.

Le **narratif Orange** détecte également une tendance à la hausse notamment en horizon 2041-2070 avec une augmentation progressive du QJXA pour atteindre les +50% au niveau de Villerest. En fin de siècle, le QJXA est en légère baisse sur l'amont puis se stabilise autour d'une hausse autour de +15%.

Enfin, le **narratif Violet** est le seul à identifier une tendance progressive à la baisse qui s'accentue au fil du xxi^e siècle. En fin de siècle, cela se traduit par une baisse de -30% autour de Villerest avant de tendre vers des niveaux similaires à 1991-2020 jusqu'à Tours puis une hausse autour des +15% passée la confluence avec la Vienne (Figure 62).

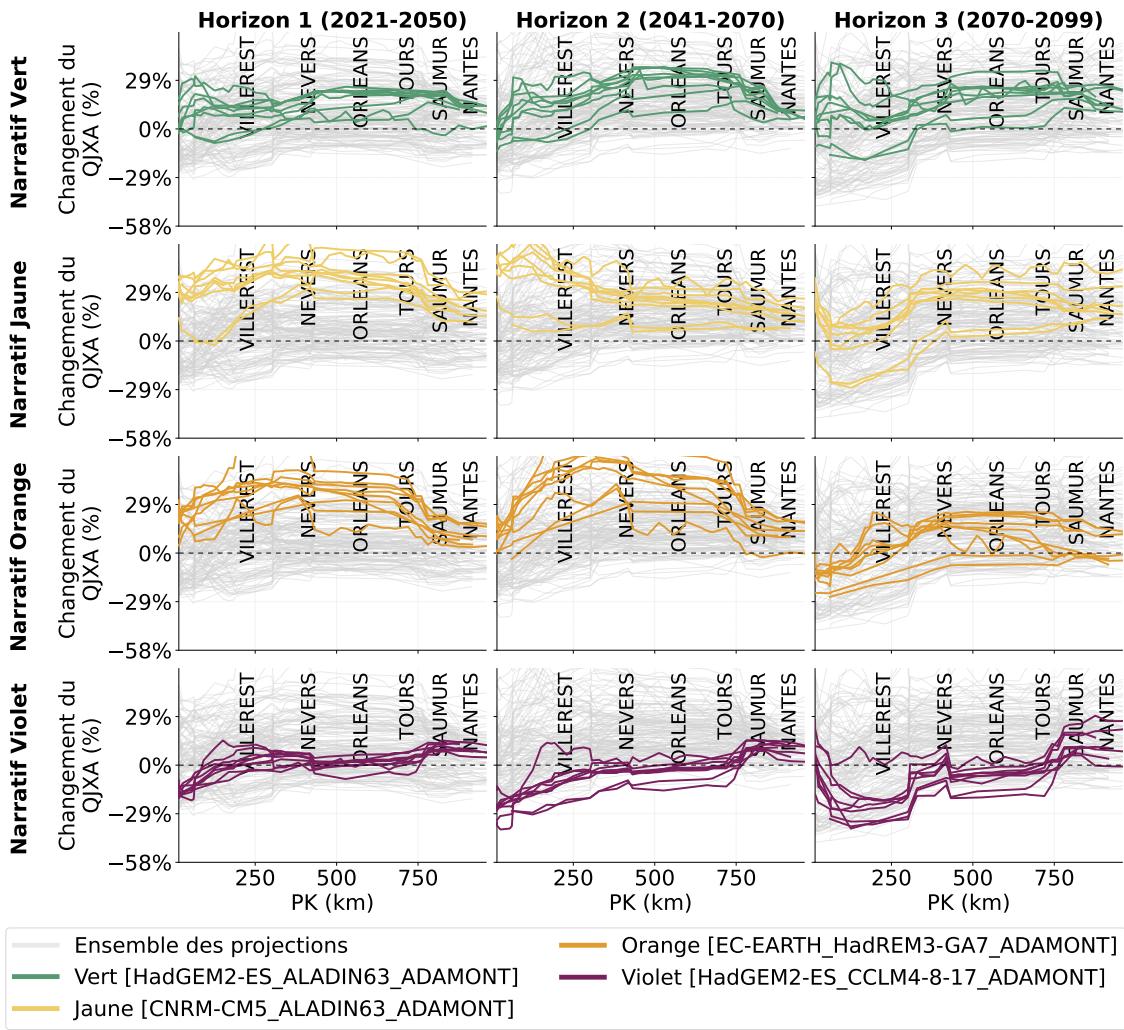


FIGURE 62. Changements médians du QJXA en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Sur l’Allier et Chapeauroux, le **narratif Violet** détecte également une tendance à la baisse relativement constante de l’amont vers l’aval et au fil du siècle avec une diminution du QJXA de l’ordre de -15 à -30%.

Le **narratif Orange** indique une tendance décroissante au fil du siècle passant de +20% en horizon proche à -5% en fin de siècle avec de légères fluctuations entre l’amont et l’aval.

Comme pour la Loire, le **narratif Jaune** identifie une forte augmentation du QJXA sur l’Allier amont en milieu de siècle atteignant les +40% à Langogne et à Naussac. En revanche cela ne se traduit pas sur le Chapeauroux. En fin de siècle, sur ce dernier la tendance est plutôt à la baisse du QJXA là où sur l’Allier elle est plutôt autour d’une hausse de l’ordre de +10%.

Pour le **narratif Vert** l’évolution est assez uniformément à la hausse que ce soit au fil du siècle ou sur les différentes stations avec une augmentation du QJXA de autour des +30% (Figure 63 et Figure 64).

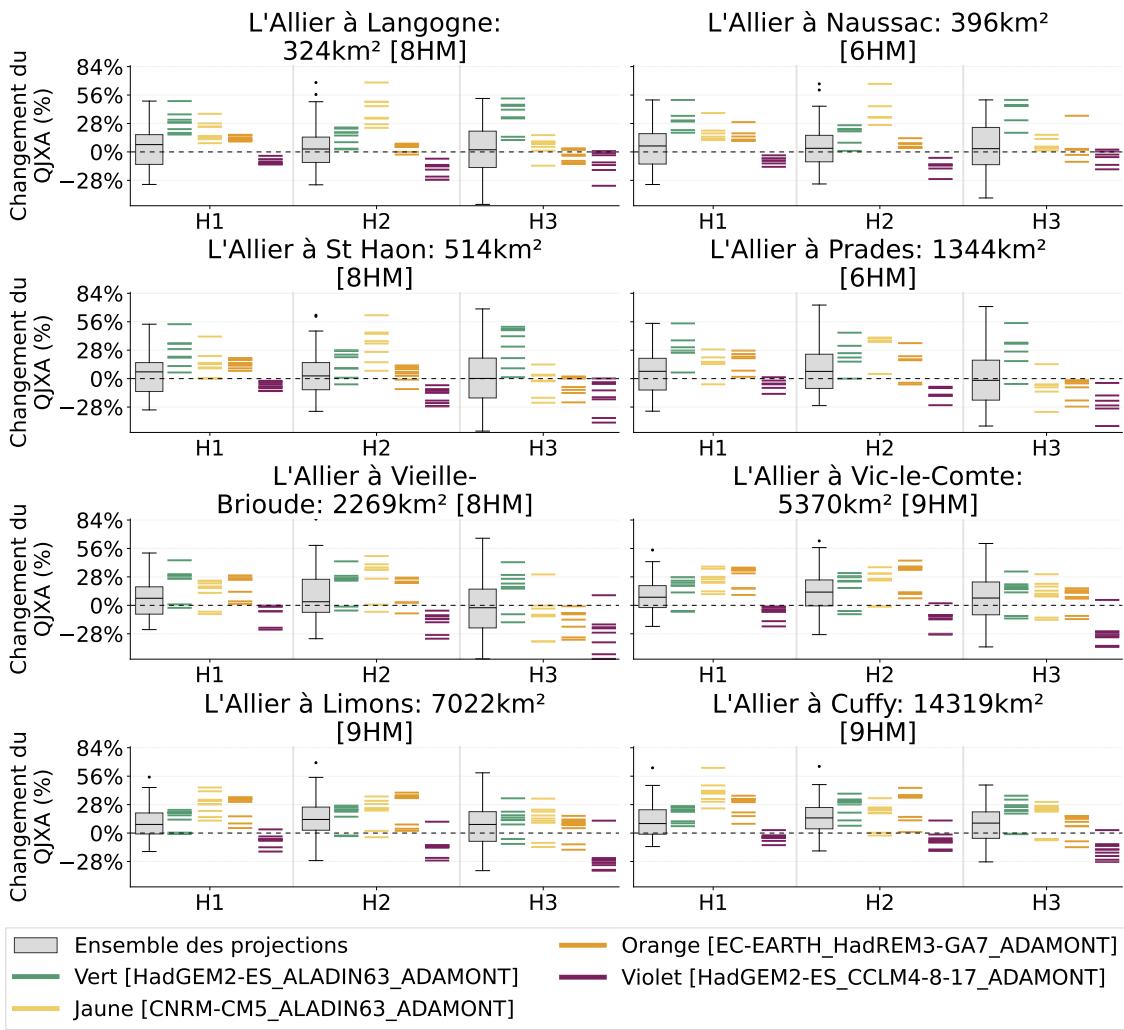


FIGURE 63. Diagramme en boîte de la variation du QJXA des stations cibles de l'Allier par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

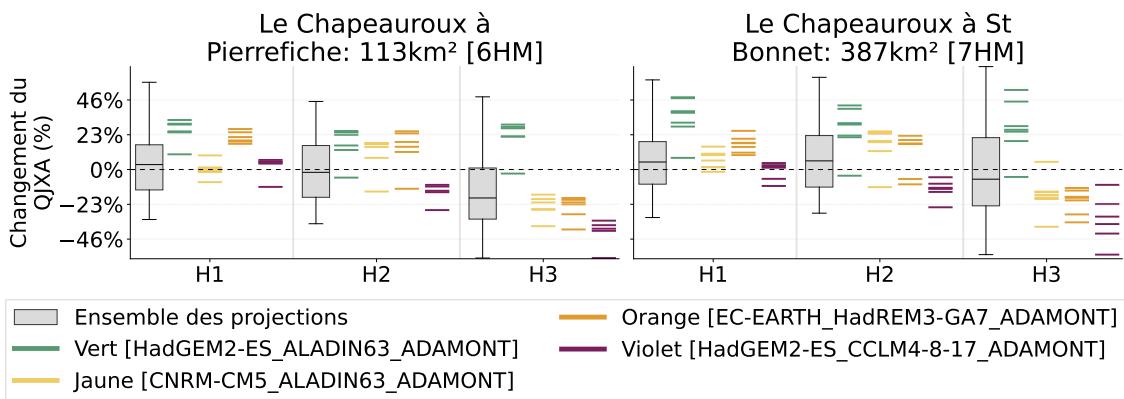


FIGURE 64. Diagramme en boîte de la variation du QJXA des stations cibles du Chapeauroux par narratif climatique Explore2 et par horizon par rapport à la période de référence 1991-2020.

Synthèse - Le bassin de la Loire au fil du siècle

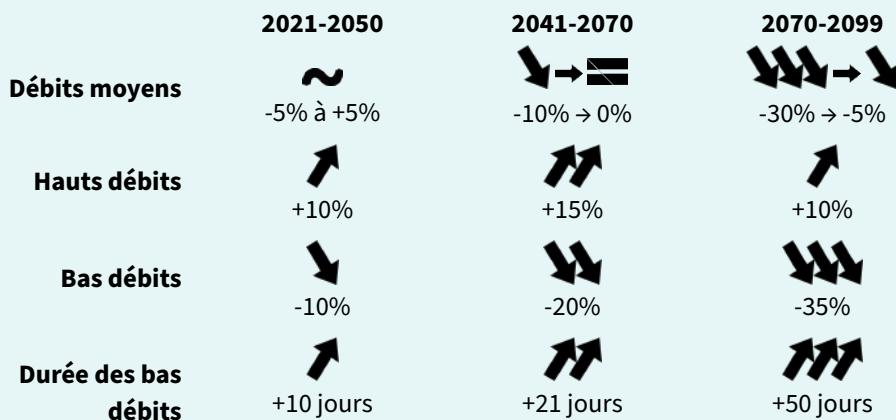
Climat

Changements du climat suivant les différents horizons temporels sur le bassin ligérien par rapport à la période 1991-2020.

	2021-2050	2041-2070	2070-2099
Températures moyennes	+1,0 °C	+1,6 °C	+3,5 °C
Températures saisonnières	+0,2 °C l'hiver, +1,0 °C l'été	+1,1 °C l'hiver, +2,0 °C l'été	+2,8 °C l'hiver, +5,3 °C l'été
Précipitations moyennes	0%	+2%	-4%
Précipitations saisonnières	+5% l'hiver, -5% l'été	+10% l'hiver, -10% l'été	+15% l'hiver, -25% l'été

Hydrologie

Quelques ordres de grandeurs de changements par rapport à la période de référence pour quantifier les principaux changements sur la Loire au fil du siècle.



(Débits moyens : QA, Hauts débits : QJXA, Bas débits : VCN10, les changements indiqués par une flèche horizontale → indique des écarts importants entre l'amont et l'aval)

6 Les futurs de la Loire selon la TRACC

Qu'est ce que la TRACC et quels changements par rapport aux horizons présentés précédemment? La **Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)** est une approche qui ne repose non plus sur des horizons temporels mais sur des horizons par degrés de réchauffement. Plutôt que de prendre une période commune sur l'ensemble des simulations, l'horizon est défini suivant une variation de la température moyenne donnée à l'échelle de la France.

Ainsi, Météo France a défini 3 horizons par degré de réchauffement : +2,0 °C, +2,7 °C et +4,0 °C par rapport à l'époque pré-industrielle 1850-1900. Une fenêtre de 20 ans autour de l'année de dépassement est alors sélectionnée. Une date d'adaptation est définie pour chacun des degrés de réchauffement. Pour une France à +2,0 °C, l'adaptation est prévue pour un horizon proche (2030). En milieu de siècle (2050) pour +2,7 °C et en fin de siècle (2100) pour +4,0 °C. Les horizons par degré de réchauffement dépendent donc de la chaîne de simulation climatique (Figure 65). Cette approche permet d'homogénéiser les projections du point de vue de la température moyenne.

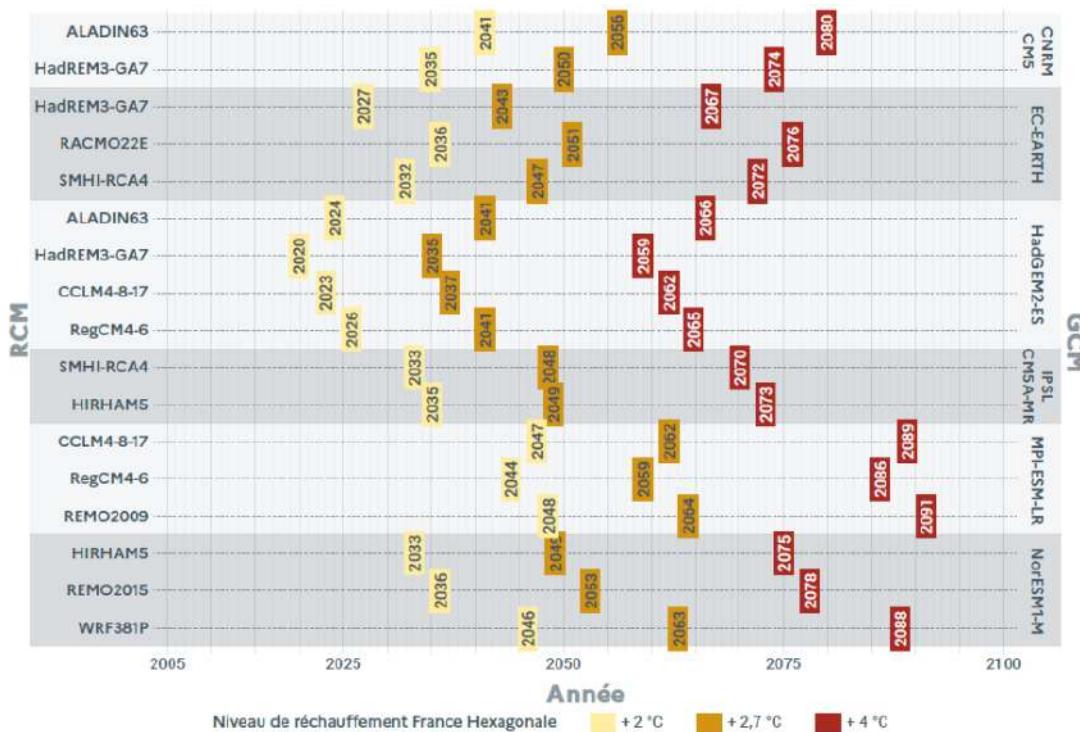


FIGURE 65. Année à laquelle les niveaux de réchauffement en France +2,0 °C, +2,7 °C et +4,0 °C sont atteints dans chacune des projections Explore2 sous RCP8.5. Chaque simulation est rattachée à un modèle climatique global (à droite) et un modèle climatique régional (à gauche) (SOUBEYROUX et al. (2024)).

6.1 Climat

Température moyenne

Quel climat sur le bassin de la Loire dans une France à +4 °C? La France ne se réchauffe pas de manière uniforme sur le territoire, le bassin de la Loire est légèrement en dessous des variations moyennes du territoire. Pour rappel, nous utilisons ici la période de référence 1991-2020 qui est +0,2 °C plus chaude que la période 1976-2005. Ainsi, dans une France dite à "+2,0 °C" par rapport à l'époque pré-industrielle, le bassin de la Loire se réchauffe de l'ordre de +0,9 °C par rapport à 1991-2020 (soit +1,1 °C par rapport à 1976-2005). De même, pour une France à +2,7 °C et à +4 °C, la région se réchauffe en moyenne respectivement de l'ordre de +1,6 °C et +2,9 °C par rapport à 1991-2020 (Figure 66).

Ces variations sont inférieures à celles précédemment observées en fin de siècle pour un horizon

temporel 2070-2099 (Figure 19). En effet, pour la majorité des chaînes de simulation l'horizon 2070-2099 sous RCP 8.5 correspond à un réchauffement supérieur à un horizon TRACC +4,0 °C.

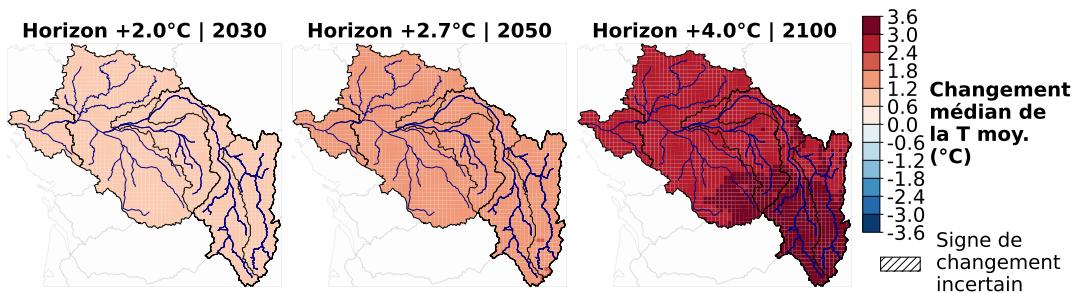


FIGURE 66. Cartes des changements médians multimodèles de la température moyenne par horizon par degré de réchauffement par rapport à la période de référence 1991-2020.

Température moyenne saisonnière

Par ailleurs, d'importants contrastes sont observés selon la période de l'année. Pour un niveau de réchauffement à +4,0 °C, l'hiver et le printemps voient la température augmenter de +2,4 °C là où l'automne prend +3,2 °C supplémentaire. Pour la période estivale, un écart non négligeable apparaît entre l'amont et l'aval. Le premier gagnant +3,9 °C quand le second avoisine les +3,0 °C supplémentaires (Figure 67).

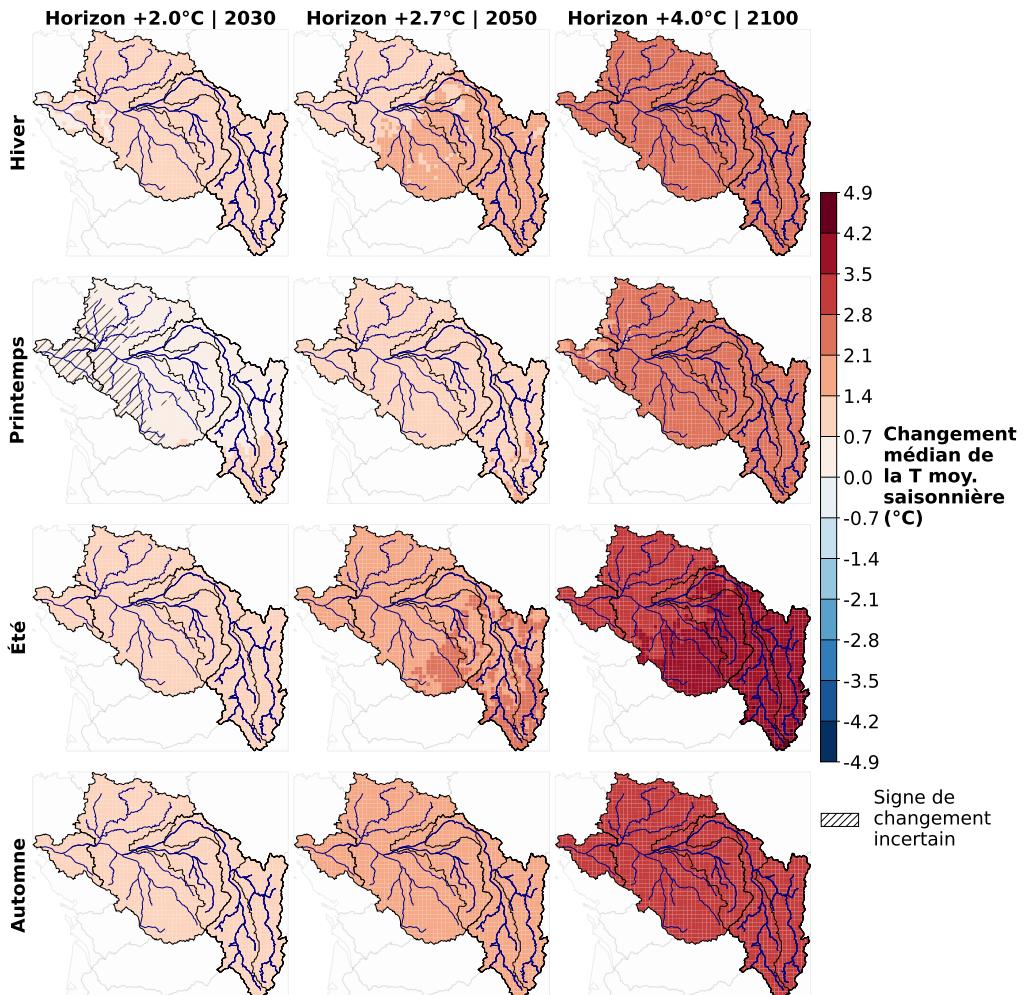


FIGURE 67. Cartes des changements médians multimodèles de la température moyenne par horizon par degré de réchauffement et par saison par rapport à la période de référence 1991-2020.

Jours très froids

Ces changements de température saisonniers se traduisent concrètement par une baisse drastique des journées avec une température moyenne inférieure à 0 °C. La baisse du nombre de jours de grand froid est en moyenne de 4 jours pour une France à +2,0 °C, une semaine à +2,7 °C et enfin d'une dizaine de jours pour un niveau de réchauffement à +4,0 °C avec des écarts importants entre amont et aval. Cet effet est tout particulièrement marqué au niveau du Massif Central qui perd plus d'un mois de jours aux températures moyennes négatives (Figure 68).

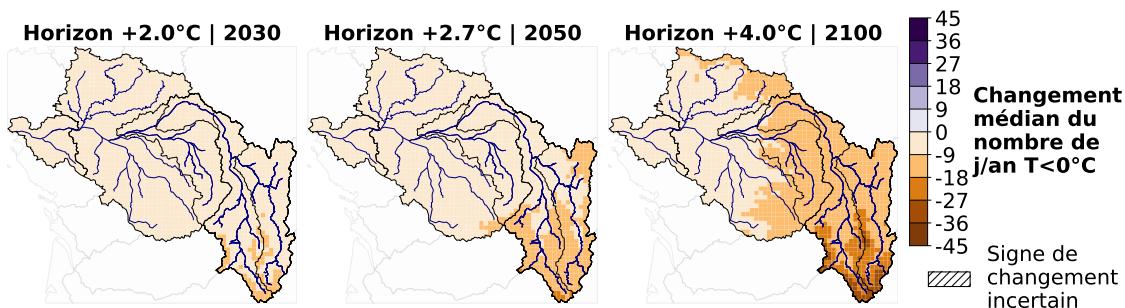


FIGURE 68. Cartes des changements médians multimodèles du nombre de jour avec une température moyenne inférieure à 0 °C par horizon par degré de réchauffement par rapport à la période de référence 1991-2020.

Jours très chauds

À l'inverse, le nombre de journées très chaudes (avec une température moyenne supérieure à 30 °C) risque d'augmenter. Le signal est flou en horizon +2 °C ne permettant pas de trancher sur le sens d'évolution. Pour l'horizon +2,7 °C, les simulations sont unanimes sur une légère augmentation du nombre de jours excédant les 30 °C en moyenne, de 1 à 2 jours supplémentaires. En revanche, pour un horizon à +4 °C, 4 à 7 jours supplémentaires de très fortes chaleurs sont à attendre (Figure 69).

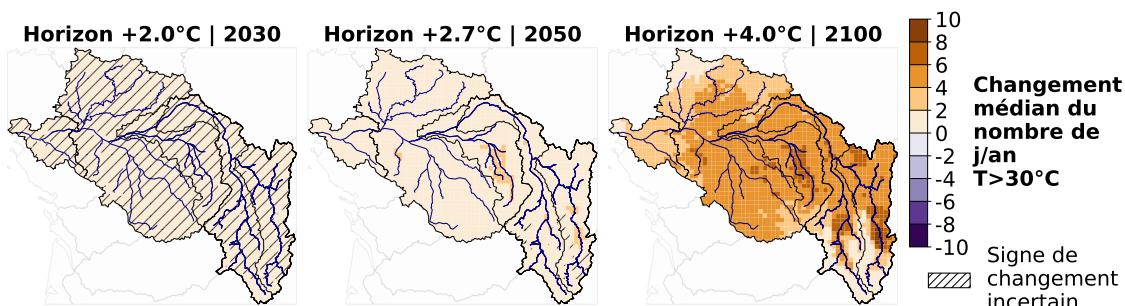


FIGURE 69. Cartes des changements médians multimodèles du nombre de jour avec une température moyenne supérieur à 30 °C par horizon par degré de réchauffement par rapport à la période de référence 1991-2020.

Précipitations annuelles

Le signal sur les précipitations annuelles n'est pas évident. En horizon +2,0 °C une légère tendance à la hausse est observée, tout comme pour l'horizon +2,7 °C avec une augmentation des précipitations annuelles de l'ordre de +2%. En horizon +4,0 °C, une tendance à la baisse apparaît notamment sur le sud du bassin avec une diminution des précipitations annuelles de l'ordre de -5% mais toujours avec des signaux très incertains (Figure 70).

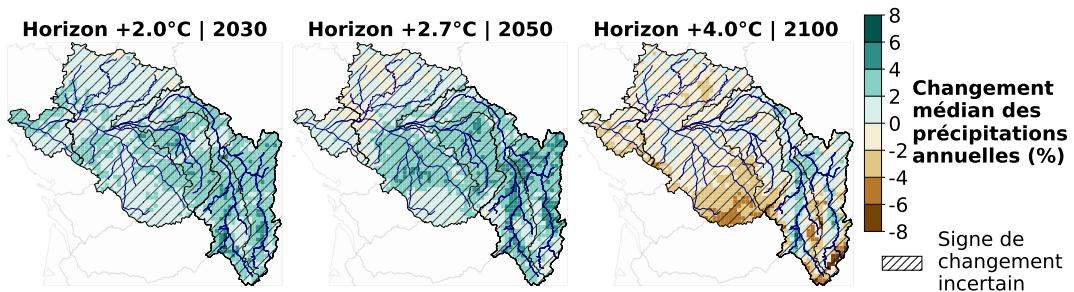


FIGURE 70. Cartes des changements médians multimodèles du volume annuel de précipitations par horizon par degré de réchauffement par rapport à la période de référence 1991-2020.

Précipitations saisonnières

Les signaux sont plus distincts sur les précipitations saisonnières. L'hiver les précipitations augmentent avec une hausse de +13% en horizon +2,7 °C et +10% en horizon +4,0 °C. Des signaux mixtes se dégagent concernant les précipitations printanières ne permettant pas de conclure sur le véritable sens d'évolution (Figure 71).

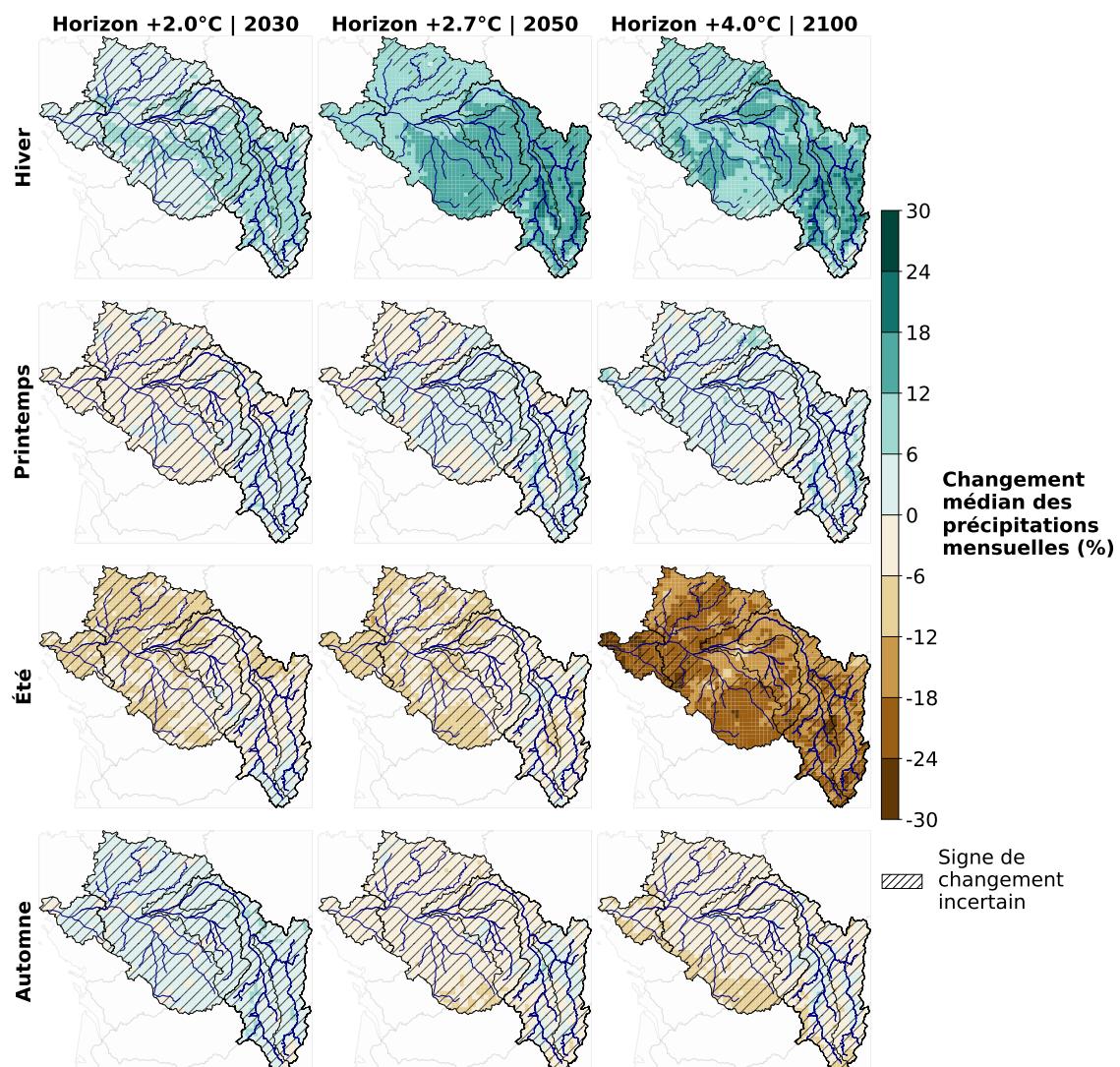


FIGURE 71. Cartes des changements médians multimodèles des volumes de précipitations moyennes saisonnières par horizon par degré de réchauffement par rapport à la période de référence 1991-2020.

En revanche, une forte diminution des précipitations estivales est attendue avec une chute de l'ordre de -5% en horizon +2,0 °C et +2,7 °C, et jusqu'à -20% en horizon +4,0 °C. De même que pour le printemps, les signaux sur l'automne tendent à se compenser avec néanmoins une légère tendance à la baisse, de l'ordre de -3%, notamment en raison d'été se prolongeant plus tard dans l'année.

Évapotranspiration

L'évapotranspiration est en hausse significative sur l'ensemble du territoire et pour tous les degrés de réchauffement. L'hiver, l'évapotranspiration croît jusqu'à +14% pour l'horizon +4,0 °C. La hausse est légèrement moins marquée au printemps mais reste dans des ordres de grandeurs similaires. En revanche, elle explose en été et en automne où elle tend vers une hausse de +20% (Figure 72).

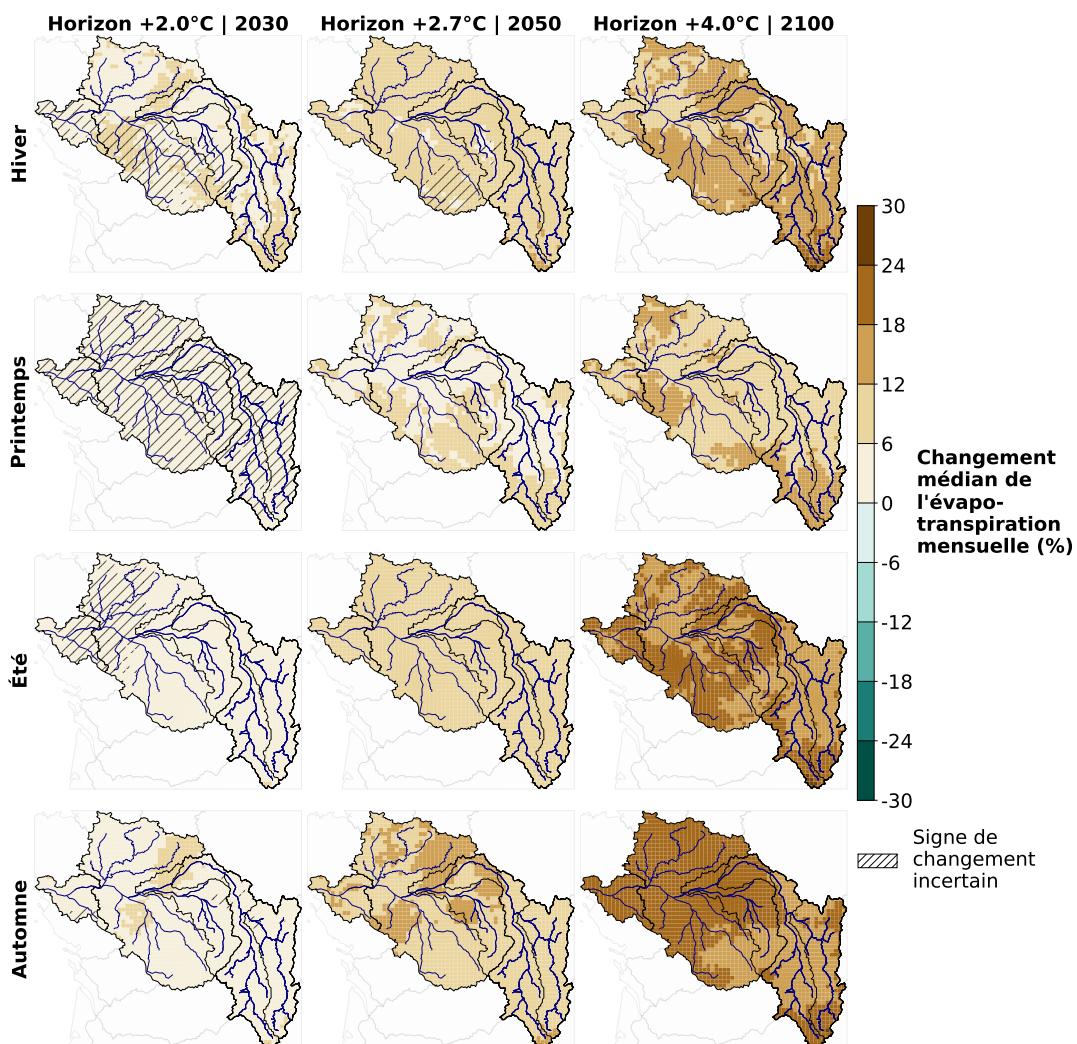


FIGURE 72. Cartes des changements médians multimodèles de l'évapotranspiration de référence par horizon par degré de réchauffement et par saison par rapport à la période de référence 1991-2020.

6.2 Hydrologie dans une France à +2,7 °C

Quels débits dans une France à +2,7 °C? Nous privilégions ici l'approche par narratifs hydroclimatiques décrits en [Section 3.2](#) permettant de présenter des futurs contrastés. Les narratifs définis pour une France à +2,7 °C en [Section 3.2](#) correspondent à :

- **Narratif A** : IPSL-CM5A-MR RCA4 ADAMONT MORDOR-SD (étiages sévères)
- **Narratif G** : NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH (débits annuels en légère hausse et crues plus intenses)
- **Narratif E** : EC-EARTH HadREM3-GA7 ADAMONT EROS (intensification des extrêmes)
- **Narratif C** : NorESM1-M REMO ADAMONT EROS (évolutions modérées)

Pour rappel, la France a pour objectif de s'adapter à un niveau de réchauffement +2,7 °C d'ici à 2050, nous présentons dans cette partie les principaux résultats hydrologiques pour ce niveau de réchauffement. Les résultats pour un niveau de réchauffement +4,0 °C sont présentés en [Section 6.3](#).

Débits moyens

Débit moyens annuels (QA)

Sur le débit moyen annuel, le **narratif G** indique une hausse de +15% de manière assez uniforme sur l'ensemble du territoire ligérien. Le **narratif E** détecte également une tendance à la hausse du QA de l'ordre +25% à l'aval de Villerest ce qui contraste avec l'amont puisque peu de changements sont attendus sur le QA en tête de bassin.

Ce contraste amont-aval se retrouve sur le **narratif C** avec une baisse d'environ -15% sur l'amont puis celle-ci s'atténue progressivement jusqu'à tendre vers des niveaux similaires à partir de Nevers.

Enfin, le **narratif A** indique un déficit généralisé sur le bassin de -5 à -15% avec encore une fois une hausse progressive des débits annuels de l'amont jusqu'à Nevers. En revanche, cette fois une nouvelle diminution est observée après Nevers jusqu'à Nantes ([Figure 73](#) et [Figure 74](#)).

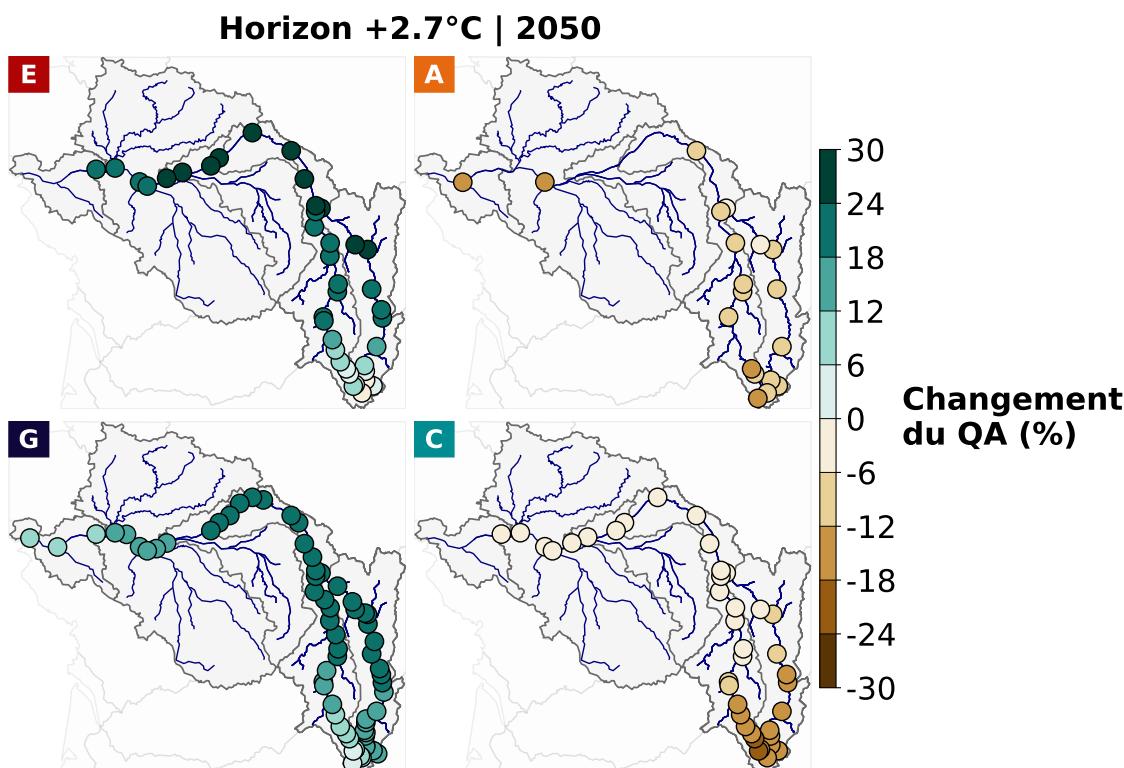


FIGURE 73. Cartes des changements médians du débit moyen annuel (QA) par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

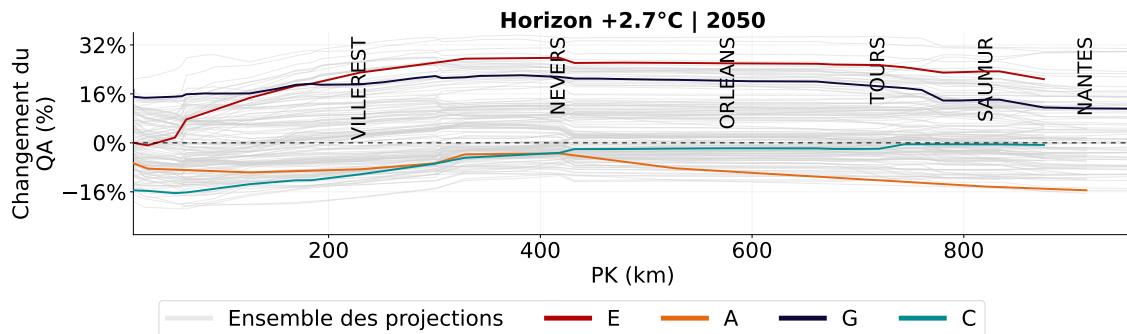


FIGURE 74. Changements médians du QA en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Débit moyen mensuel (Qm)

En se penchant sur les variations mensuelles du débit sur la Loire, il apparaît que les cycles saisonniers sont sujets à d'importantes évolutions. Le **narratif C** présente des débits mensuels sensiblement inférieurs à ceux de la période de référence avec notamment des débits estivaux qui se prolongent en septembre-octobre et tendent à revenir à des niveaux hivernaux à partir de novembre-décembre. La période de transition est considérablement réduite.

Le **narratif E** est dans les mêmes ordres de grandeurs que la référence avec une fin d'été plus sèche et des automnes plus humides tout particulièrement sur l'amont.

Les narratifs **A** et **G** sont ceux dont le comportement change le plus. Le premier présente des débits hivernaux plus intenses, des débits estivaux plus faibles et des périodes de transition considérablement réduites. Dès juin, des niveaux similaires aux débits d'août de la période de référence sont atteints et continuent de décroître jusqu'en septembre. Quant au **narratif G**, la tendance est globalement à la hausse notamment à la fin du printemps sur l'amont avec des épisodes pluvieux pouvant être assez longs et intenses (Figure 75).

Les narratifs hydroclimatiques ne sont pas présents sur l'ensemble des stations du territoire. Pour rappel, les narratifs sont ici définis sur la région hydrographique K puis étendus à l'ensemble des stations de l'étude. Les modèles hydrologiques ne tournent pas tous sur les mêmes territoires ce qui est expliqué une partie des divergences. D'autre part, lors de l'analyse multi-modèle d'Explore2, des chaînes de modélisation pour certains points de simulations sont apparues comme aberrantes et ont été écartées du jeu de données (HÉRAUT et al., 2025).

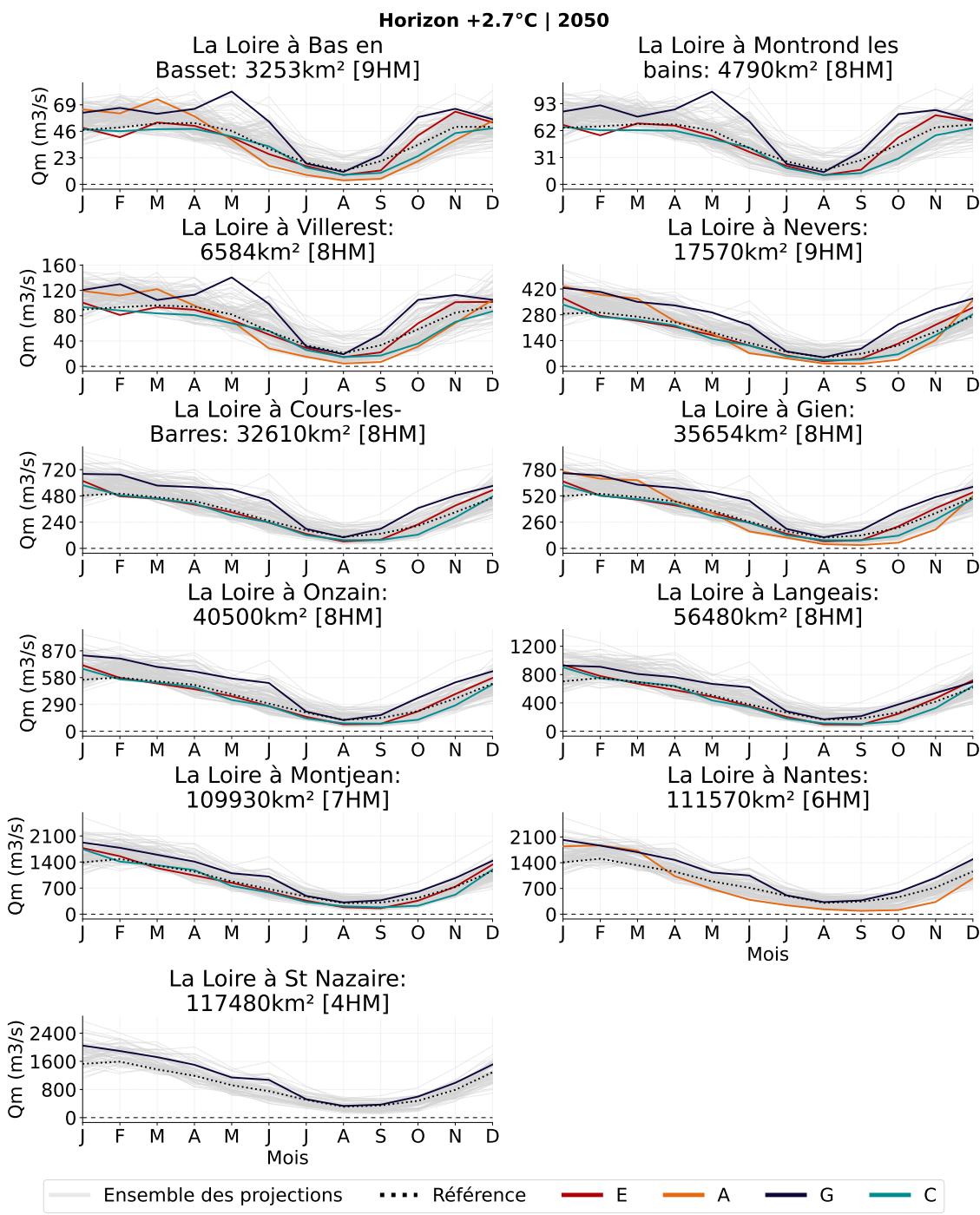


FIGURE 75. Changements médians du débit moyen mensuel (Q_m) sur les stations cibles de la Loire en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C. La médiane de la période de référence est tracée à titre indicatif en pointillés.

Sur l'Allier et le Chapeauroux, les tendances sont relativement similaires à celles de la Loire amont. Les narratifs **E** et **C** sont assez peu contrastés avec la référence là où le narratif **A** détecte des hivers plus humides et des étés plus longs et plus sévères. Ces effets tendent à s'atténuer en s'approchant de la confluence avec la Loire. Le narratif **G** indique une hausse globale des débits sur l'année à l'exception de l'été où les niveaux sont similaires à la référence (Figure 76 et Figure 77).

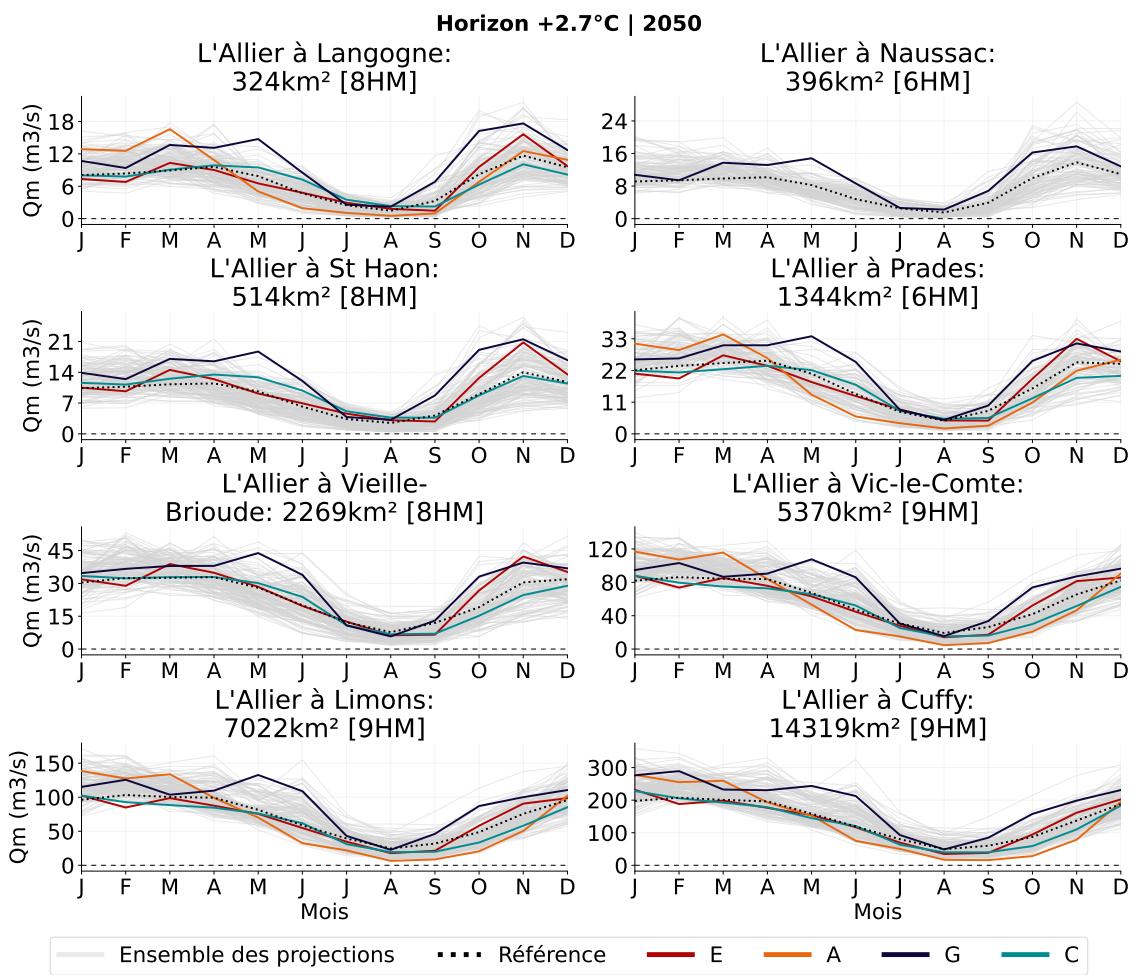


FIGURE 76. Changements médians du Q_m sur les stations cibles de l'Allier en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

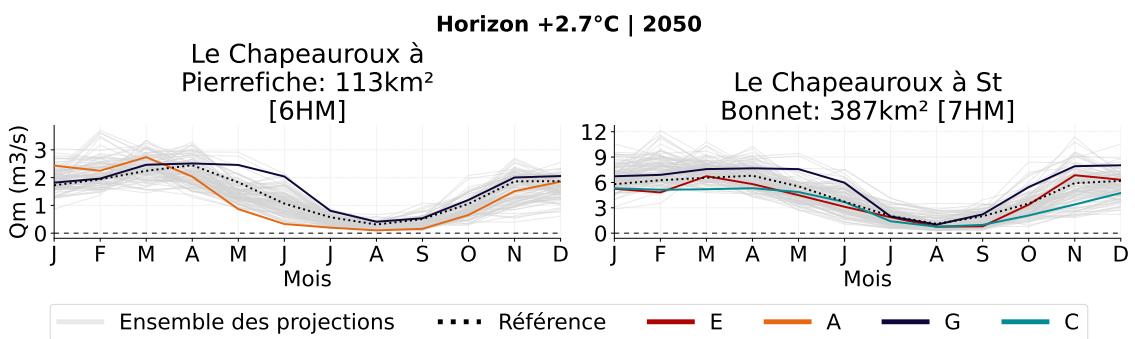


FIGURE 77. Changements médians du Q_m sur les stations cibles du Chapeauroux en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Bas débits

Débit dépassé 90% du temps (Q90)

Du côté des bas débits, seul le narratif **narratif G** identifie une tendance à la hausse du Q90 d'environ +15% sur l'ensemble de la Loire. Le **narratif C** illustre une très légère baisse de l'ordre de -5 à -10%. Le **narratif E** révèle une diminution plus forte, avec une chute du Q90 de -25% et jusqu'à -30% sur l'amont.

Enfin, le **narratif A** qui a pour objectif de présenter un futur particulièrement sévère en bas débit, détecte une baisse du Q90 avoisinant les -60% ([Figure 78](#) et [Figure 79](#)).

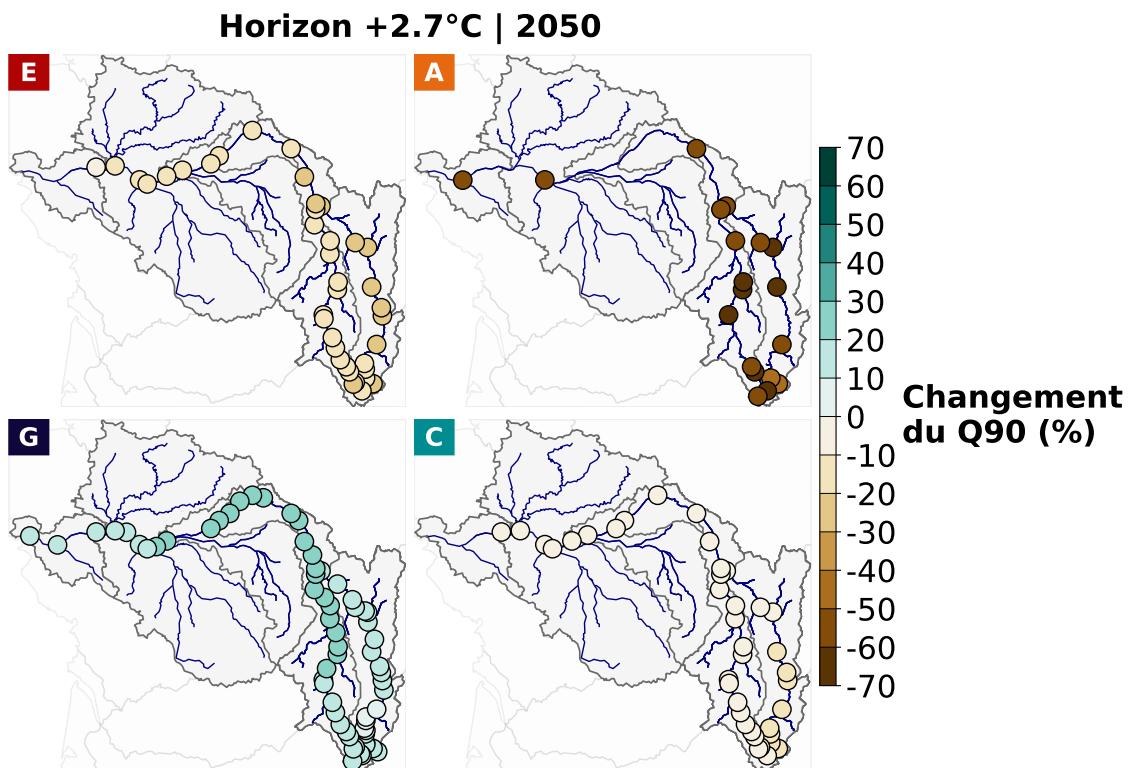


FIGURE 78. Cartes des changements médians du Q90 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

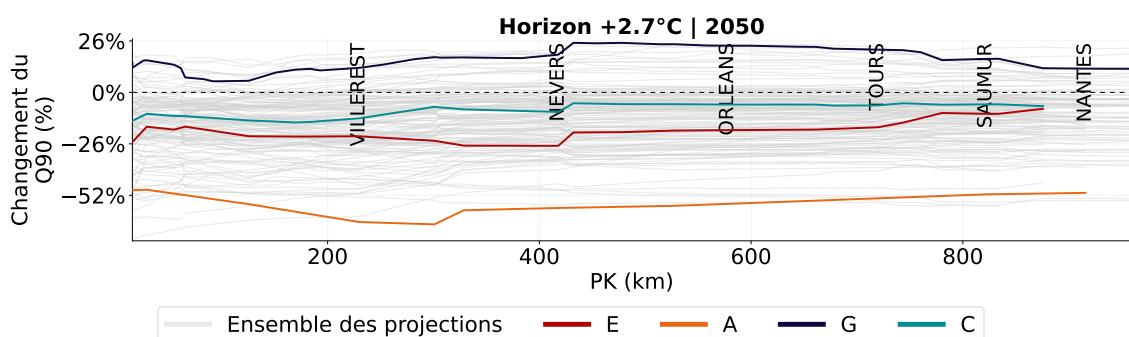


FIGURE 79. Changements médians du Q90 en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Débit moyen mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5)

Une vigilance toute particulière est à avoir concernant le QMNA5 et le QMNS, ces indicateurs sont calculés pour des périodes de retour de 5 ans déterminées ici sur 20 ans (suivant les prérogatives de la TRACC). Cela correspond donc aux 4 années/mois les plus extrêmes sur la fenêtre temporelle correspondante.

Le **narratif G** est encore une fois le seul qui identifie une hausse du QMNA5 avec une augmentation assez stable de +15 à +20%. Les narratifs **C** et **E** sont un peu plus sévères en indiquant une diminution des 4 années aux mois les plus secs de l'ordre -20%.

Le **narratif A** est le plus sévère avec une baisse du QMNA5 comprise entre -40 et -60% sur l'ensemble du territoire ligérien. Autrement dit, il y a un facteur 2 entre les 4 mois les plus secs des 1991-2020 et ceux pour un niveau de réchauffement +2,7 °C (Figure 80 et Figure 81).

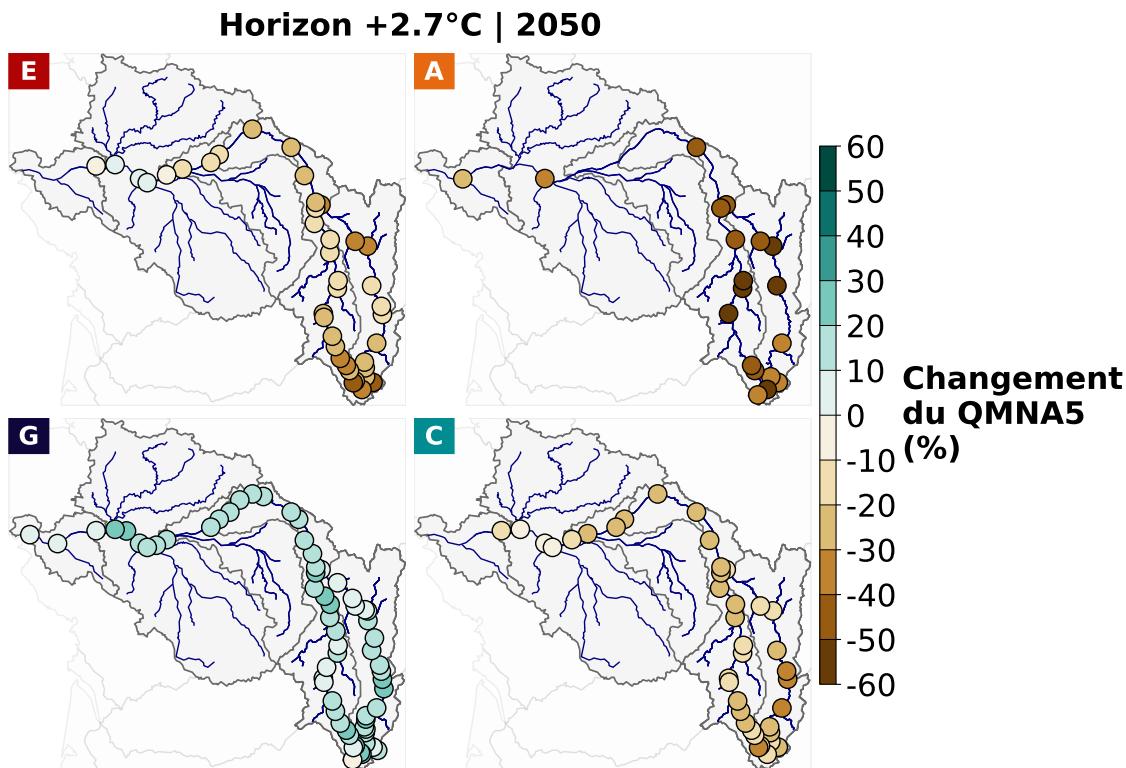


FIGURE 80. Cartes des changements médians du QMNA5 par narratif hydroclimatique pour un degré de réchauffement +2,7 °C par rapport à la période de référence 1991-2020.

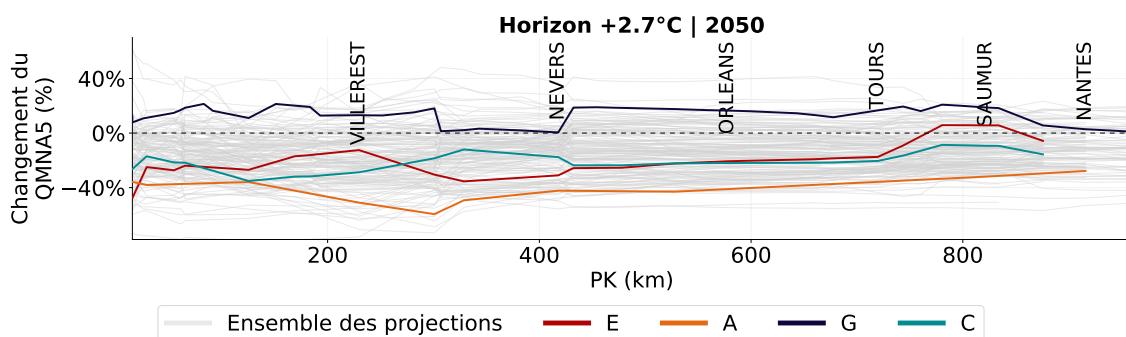


FIGURE 81. Changements médians du QMNA5 en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Débit moyen mensuel de période de retour 5 ans (QMNS5)

Sur les débits mensuels de période de retour 5 ans de la Loire, le **narratif G** détecte une hausse globale du QMNS5 sur l'année et des niveaux similaires en période estivale. Le **narratif C** suit les tendances de la référence avec des mois secs estivaux dans un futur à +2,7 °C fortement similaires aux mois secs de 1991-2020.

Le **narratif E** illustre une baisse marquée du QMNS5 sur l'ensemble de l'année en dehors de la période hivernale. Cette baisse généralisée est particulièrement plus sévère sur l'amont et en été avec des baisses

atteignant les -40%.

Le **narratif A** identifie également une baisse drastiques des débits lors des mois les plus secs avec une diminution allant jusqu'à -60% à Villerest sur les mois de juin à octobre. Cette baisse des débits des mois les plus secs s'étend d'avril à décembre indiquant des étiages qui tendent à se prolonger ([Figure 82](#)).

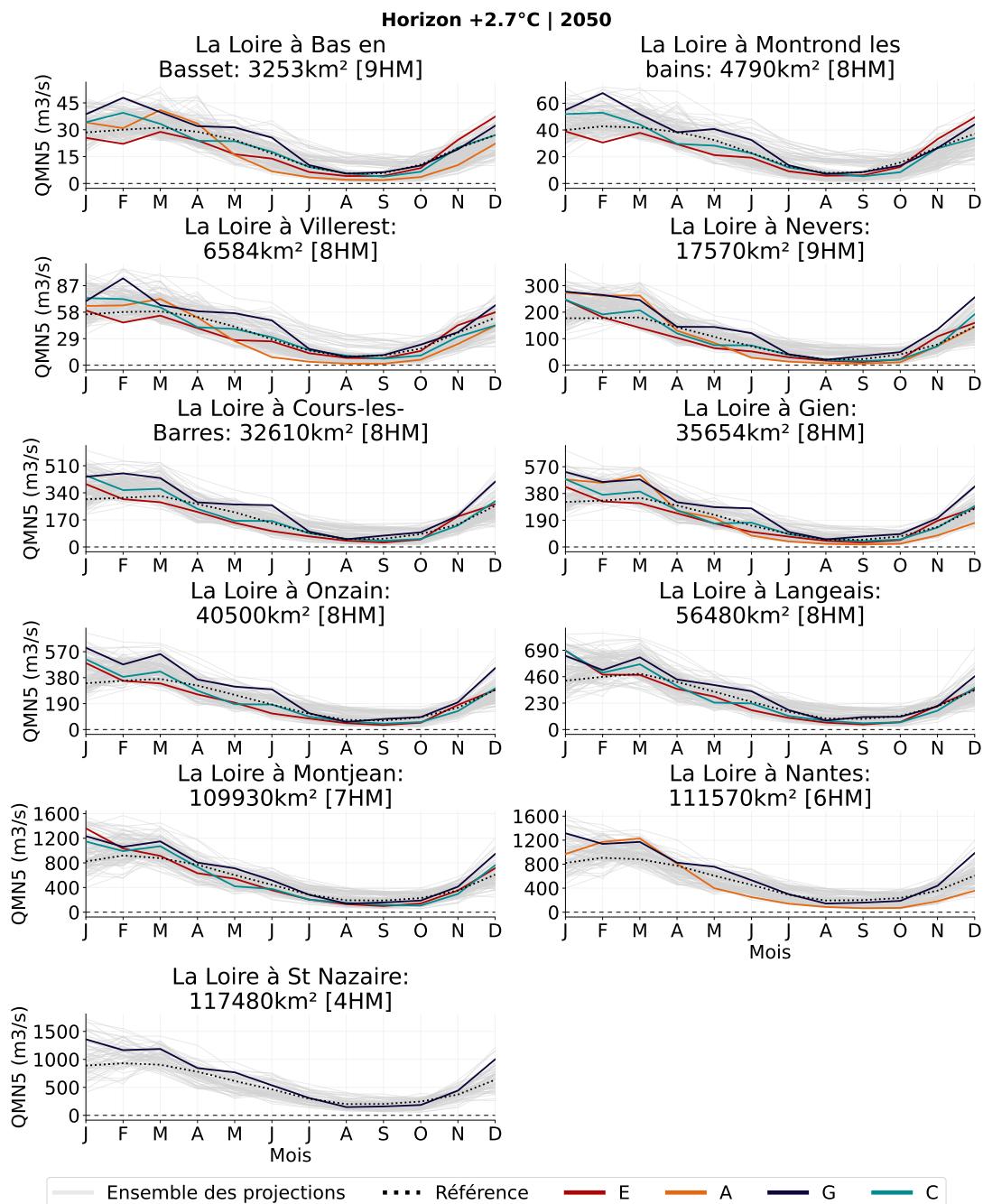


FIGURE 82. Changements médians du QMN5 sur les stations cibles de la Loire en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Sur l'Allier et le Chapeauroux, on retrouve cette tendance sévère pour le **narratif A** avec des QMN5 très faibles sur l'amont en été, avec une baisse de l'ordre de -40%. Ces débits très faibles tendent également à être plus présents avec une baisse du QMN5 atteignant les -80% en octobre-novembre.

Le **narratif E** détecte également une baisse du QMN5 l'été sur le Chapeauroux et l'aval de l'Allier.

Le **narratif C** indique une hausse conséquente du QMN5 sur l'amont qui s'atténue progressivement en s'approchant de l'aval pour revenir à des niveaux similaires à la médiane des projections sur 1991-2020. Toujours sur les tendances du QMN5 à la hausse, le **narratif G** va également dans ce sens avec néanmoins des débits estivaux similaires à ceux de la référence mais une hausse significative les autres mois de l'année (Figure 83 et Figure 84).

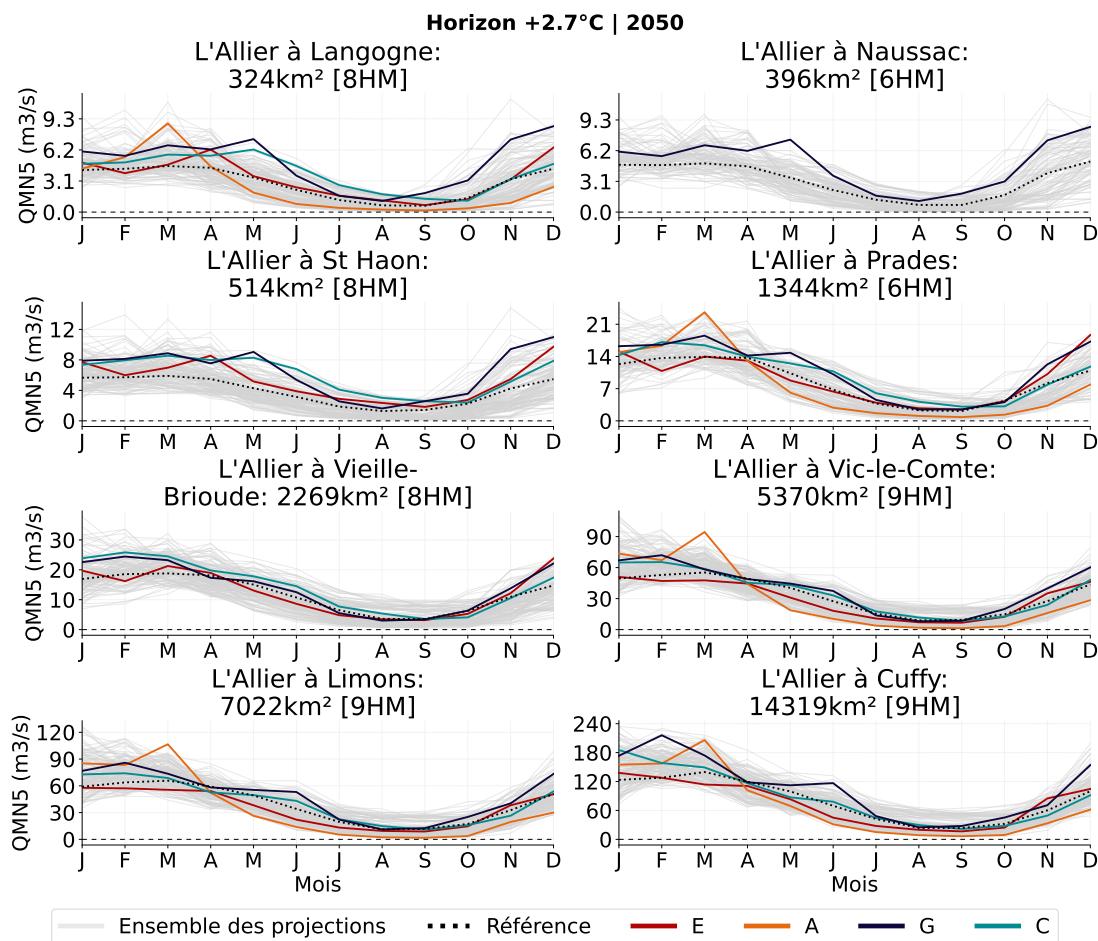


FIGURE 83. Changements médians du QMN5 sur les stations cibles de l'Allier en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

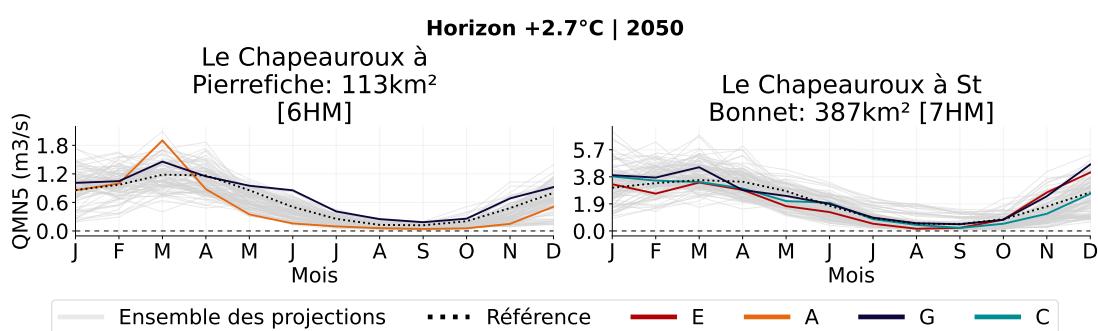


FIGURE 84. Changements médians du QMN5 sur les stations cibles du Chapeauroux en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Débit minimum moyen sur 10 jours (VCN10)

Pour caractériser la sévérité des bas débits, il faut s'intéresser au débit moyen minimum sur 10 jours glissants (VCN10). Il apparaît alors que seul le **narratif G** (narratif d'une hausse globale des débits) détecte encore une fois une légère tendance à la hausse.

À l'inverse, les narratifs **C**, **E** et **A** illustrent des futurs où le VCN10 chuterait respectivement de -15, -20 et -60% de manière assez uniforme sur le territoire ligérien ([Figure 85](#) et [Figure 86](#)).

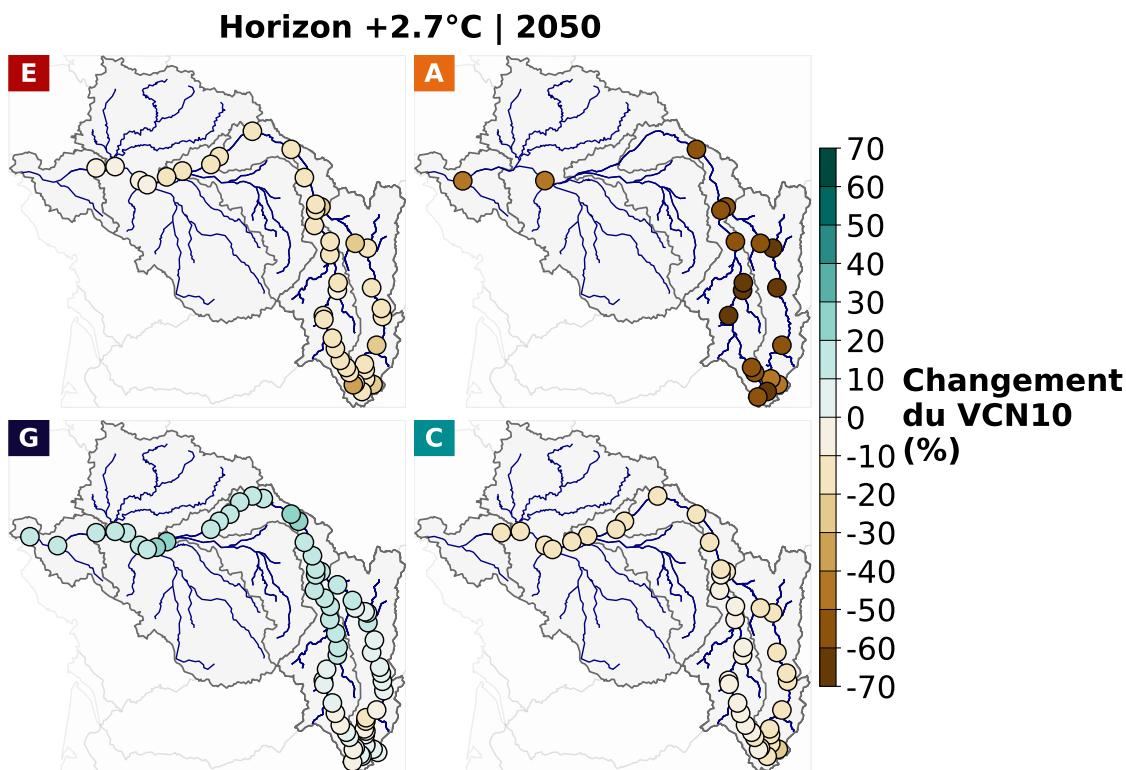


FIGURE 85. Cartes des changements médians du VCN10 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

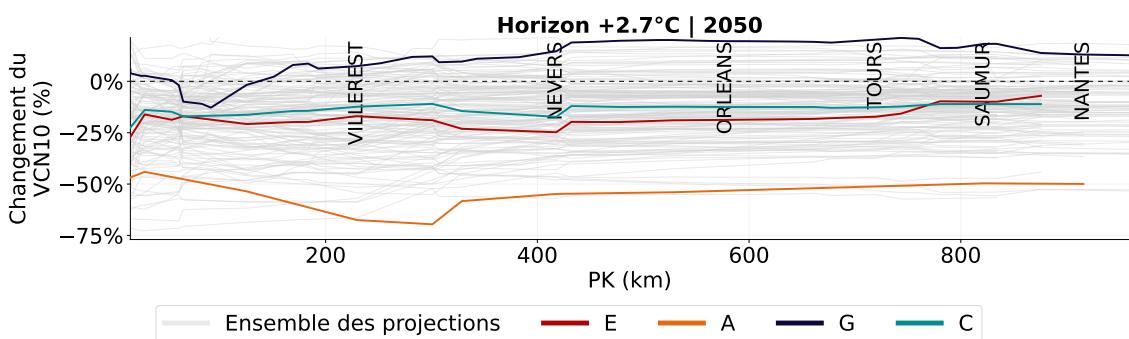


FIGURE 86. Changements médians du VCN10 en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Les étiages étant particulièrement sensibles à des années sèches successives, il est intéressant de se pencher sur les chroniques. En regardant l'évolution des narratifs sur les 20 années pour un niveau de réchauffement +2,7 °C, il apparaît que le **narratif A** présente une baisse du VCN10 gravitant autour de -60%. À l'inverse des autres narratifs, ces années sèches n'alternent pas avec des changements positifs

de VCN10, ce qui traduit un stress hydrique pouvant se renforcer au fil des années.

Les narratifs **E**, **C** et **G** présentent une alternance entre des années sèches, avec des valeurs de VCN10 en baisse de l'ordre de -30%, et des années où le changement en VCN10 augmente jusqu'à +120%, autrement dit des périodes de bas débits bien moins sévères.

Si en valeurs médianes le **narratif G** est le moins sévère sur la Loire, il y a néanmoins 5 années consécutives avec un VCN10 en baisse de près de -60%, indiquant qu'il peut y avoir de fortes variabilités inter annuelles même sur un scénario dit "optimiste" (Figure 87, Figure 88 et Figure 89).

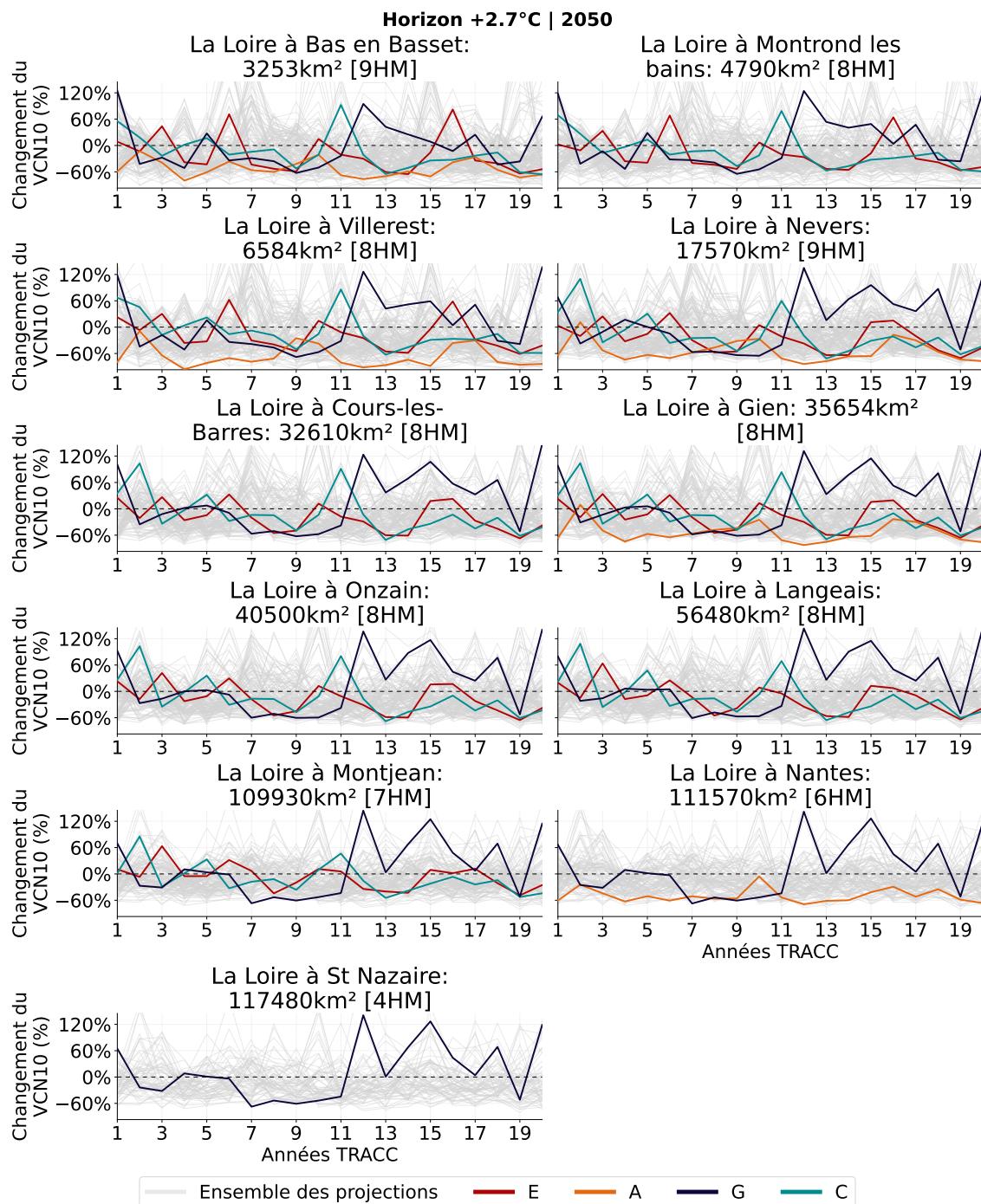


FIGURE 87. Chroniques de changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur la Loire par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

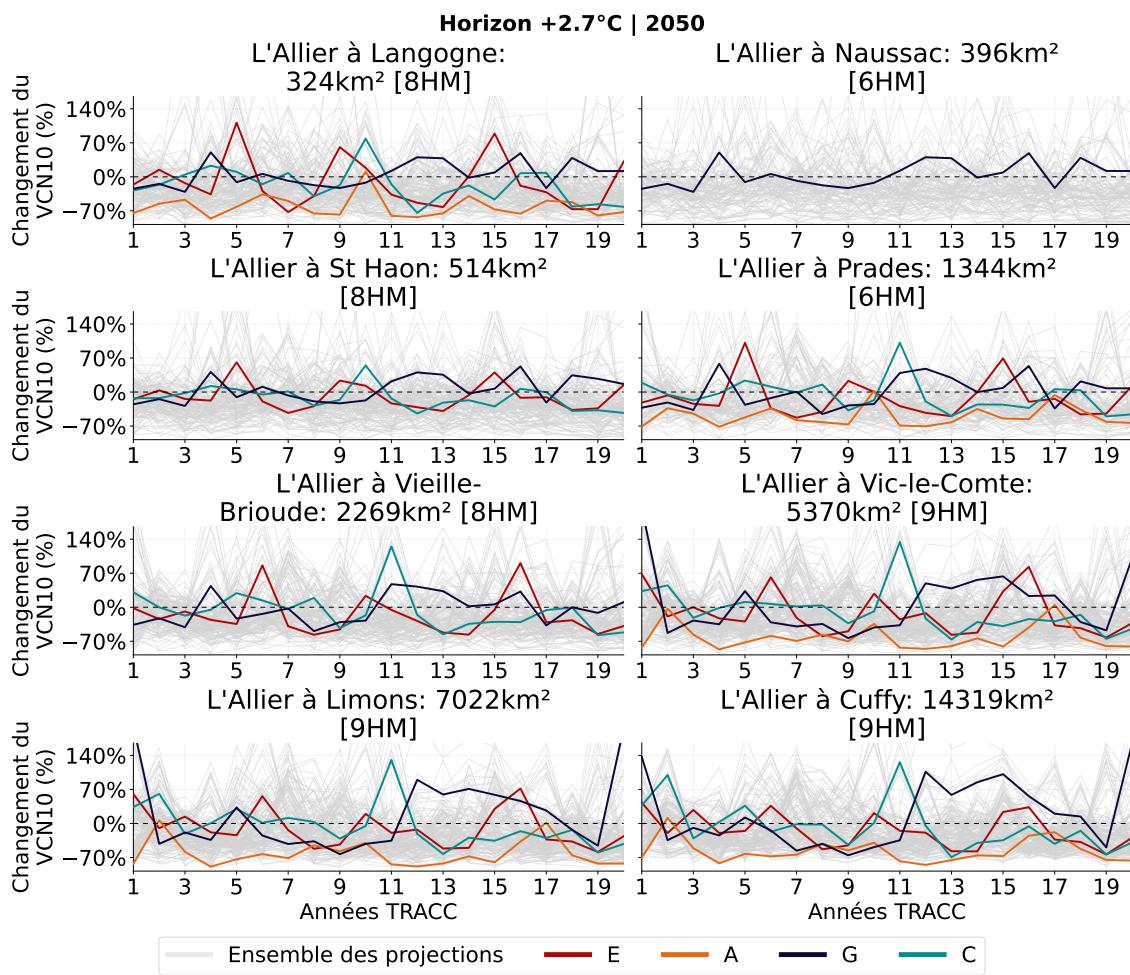


FIGURE 88. Chroniques de changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur l'Allier par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

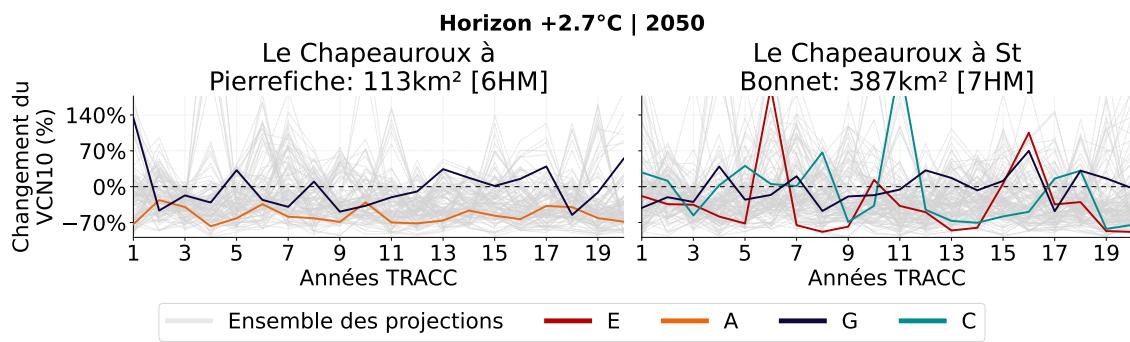


FIGURE 89. Chroniques de changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur le Chapeauroux par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Durée et saisonnalité des étiages

L'intensité des périodes de bas débit tend donc à augmenter mais également leur durée. Les narratifs **E** et **C** indiquent des périodes de bas débit sur presque un mois supplémentaire là où le **narratif A** indique le double. Ces résultats sont globalement linéaires tout le long de la Loire. Seul le **narratif G** détecte des périodes de bas débits plus courtes avec une quinzaine de jours de moins (Figure 90 et Figure 91).

Horizon +2.7°C | 2050

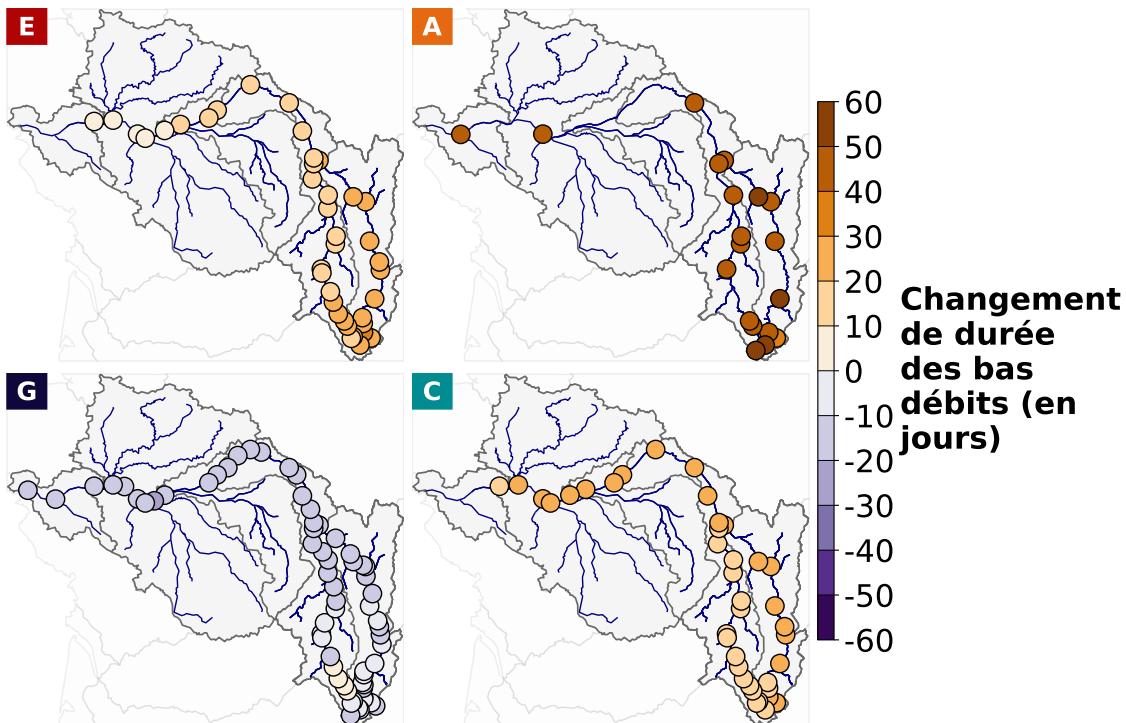


FIGURE 90. Cartes des changements médians de la durée des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

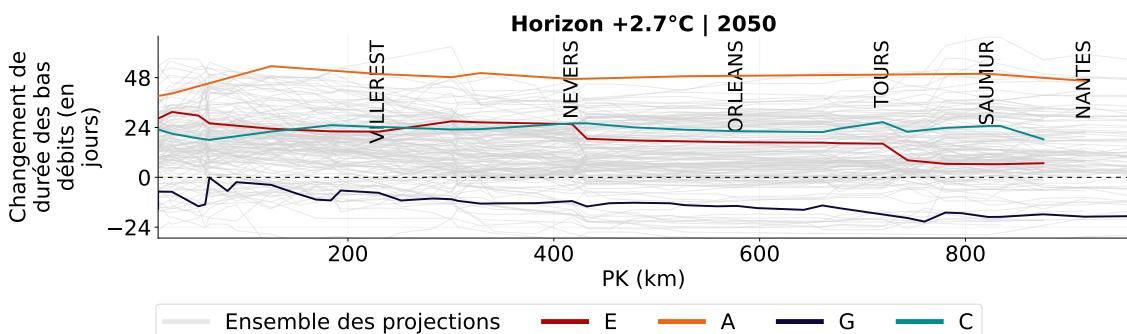


FIGURE 91. Changements médians de la durée des bas débits en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Ces changements sur la durée des bas débits est bien dû à des dates de début plus précoces et des dates de fin plus tardives. Pour le **narratif A**, les périodes de bas débit commencerait près d'un mois plus tôt et finirait un mois plus tard. Cette symétrie se retrouve sur le **narratif C** avec des dates de début en avance de 12 jours et des dates de fin retardées de la même durée.

En revanche pour le **narratif E**, les dates de fin des bas débits sont relativement similaires et les dates de début sont en avance de plus de 3 semaines. De la même façon, pour le **narratif G** on observe un décalage de la période des bas débits. La date de fin serait plus tôt dans l'année mais une variabilité importante apparaît sur les dates de début. Sur l'amont ainsi que sur la Loire entre Nevers et Orléans, les bas débits sont en avance d'environ 2 semaines là où ils sont légèrement plus tardifs sur le reste du territoire (Figure 92 et Figure 93).

Horizon +2.7°C | 2050

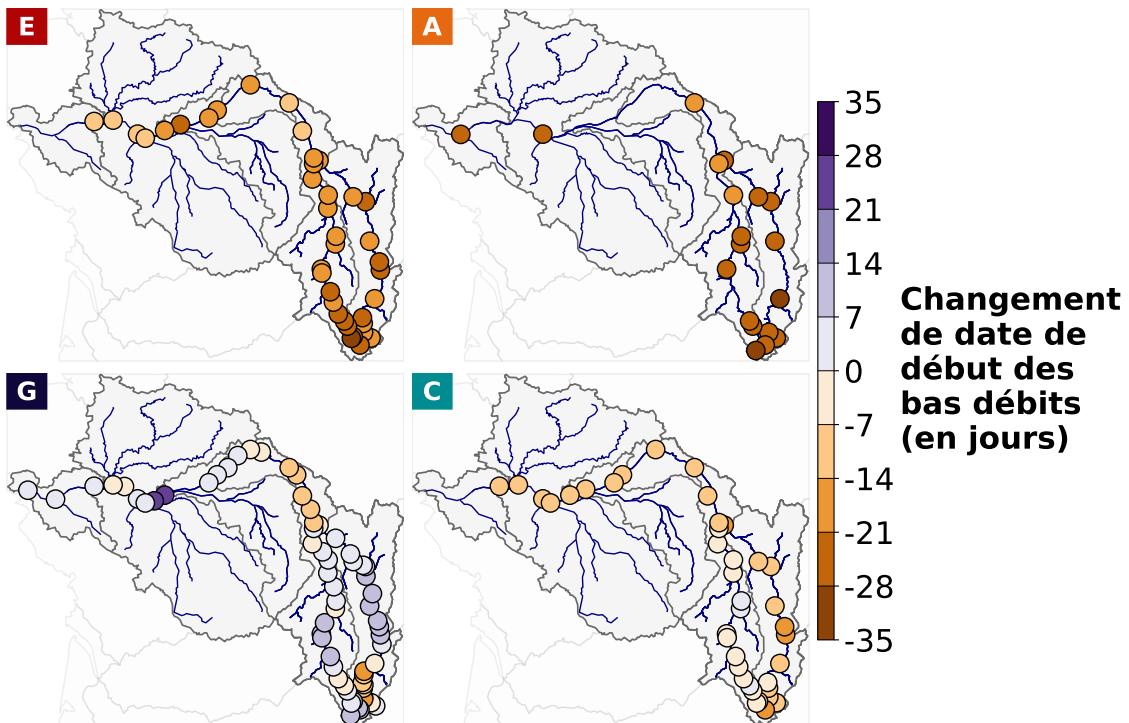


FIGURE 92. Cartes des changements médians de la date de début des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Horizon +2.7°C | 2050

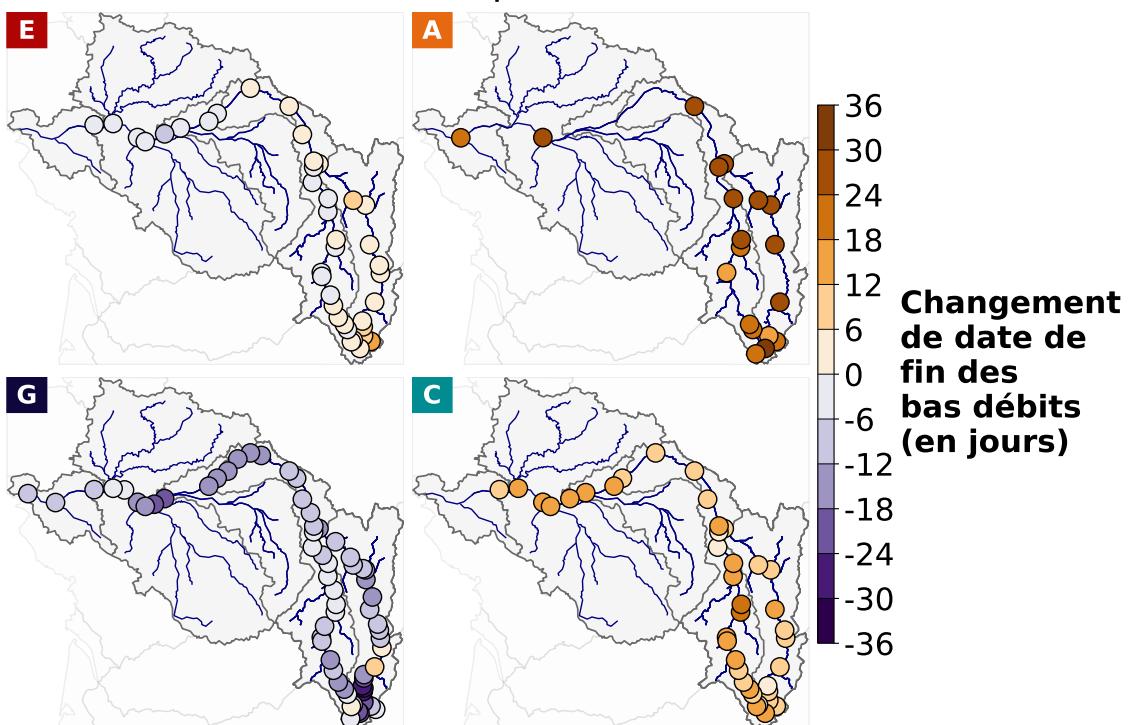


FIGURE 93. Cartes des changements médians de la date de fin des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Hauts débits

Débit dépassé 2% du temps (Q2)

Du côté des hauts débits, des comportements assez contrastés apparaissent. Par exemple, le Q2 (quantile dépassé 2% du temps), un indicateur assez générique pour caractériser la période de hauts débits, est globalement compris entre +45 et -20%.

Le **narratif E** illustre bien la tendance à la hausse avec une hausse du Q2 de l'ordre de +20 à +40% avec néanmoins un phénomène moins marqué en amont de Villerest. Le **narratif G** indique également une hausse du Q2 mais de l'ordre de +20% et de manière stable sur l'ensemble du territoire.

Le **narratif A** est un peu moins tranché, avec des résultats sur la Loire gravitant autour de la référence avec notamment une légère baisse sur les affluents et sur l'amont. Enfin, pour le **narratif C**, une croissance progressive du Q2 est observé avec une baisse d'environ -20% sur l'amont pour tendre vers les +10% à l'aval (Figure 94 et Figure 95).

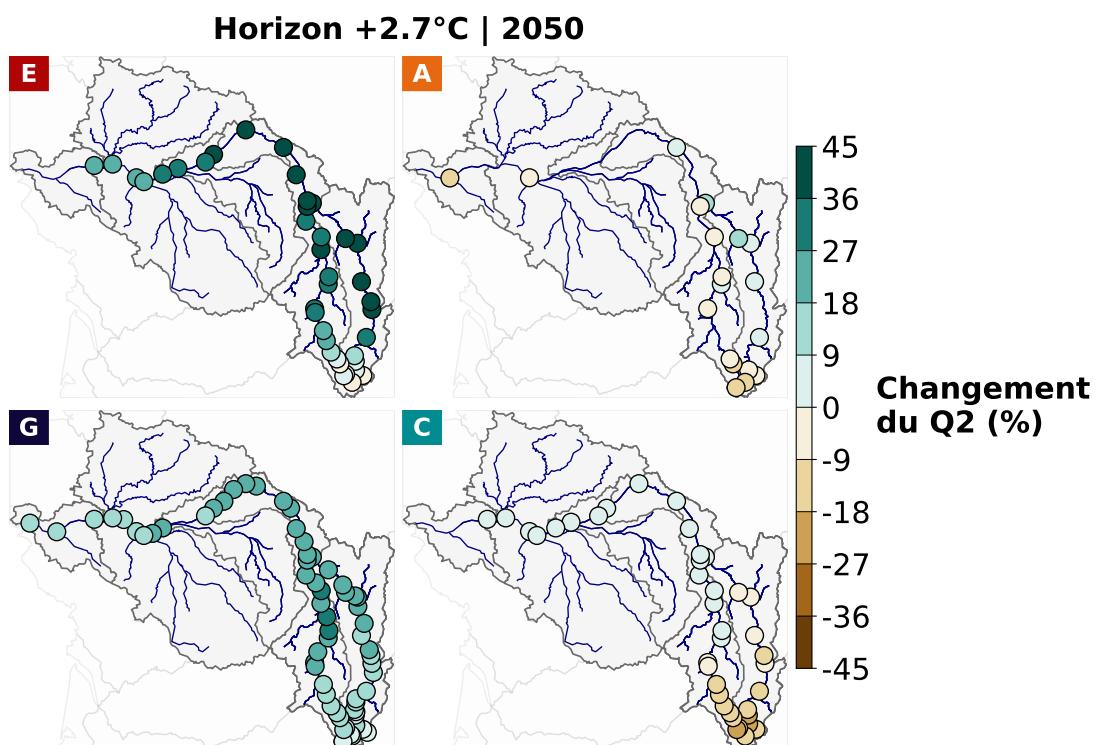


FIGURE 94. Cartes des changements médians du Q2 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

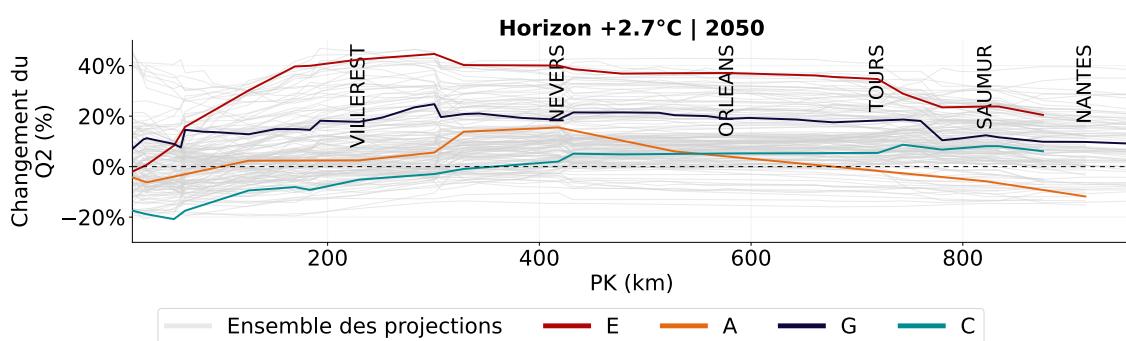


FIGURE 95. Changements médians du Q2 en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Débit journalier maximum annuel (QJXA)

Pour caractériser les crues, il est plus pertinent d'utiliser le QJXA (débit maximal journalier). Pour ce niveau de réchauffement, le **narratif E**, fort sur les extrêmes, identifie une hausse globale du QJXA dépassant les +60% en aval de Villerest.

Le **narratif G** identifie également une tendance à la hausse de l'ordre de +20% en amont de la confluence avec l'Arroux puis une diminution progressive jusqu'à Saumur où il se stabilise autour de la référence. Le **narratif A** reste sensiblement dans les ordres de grandeur de la période de référence. Le **narratif C** reste également proche des niveaux de références avec néanmoins une baisse de -25% sur l'amont (Figure 96 et Figure 97).

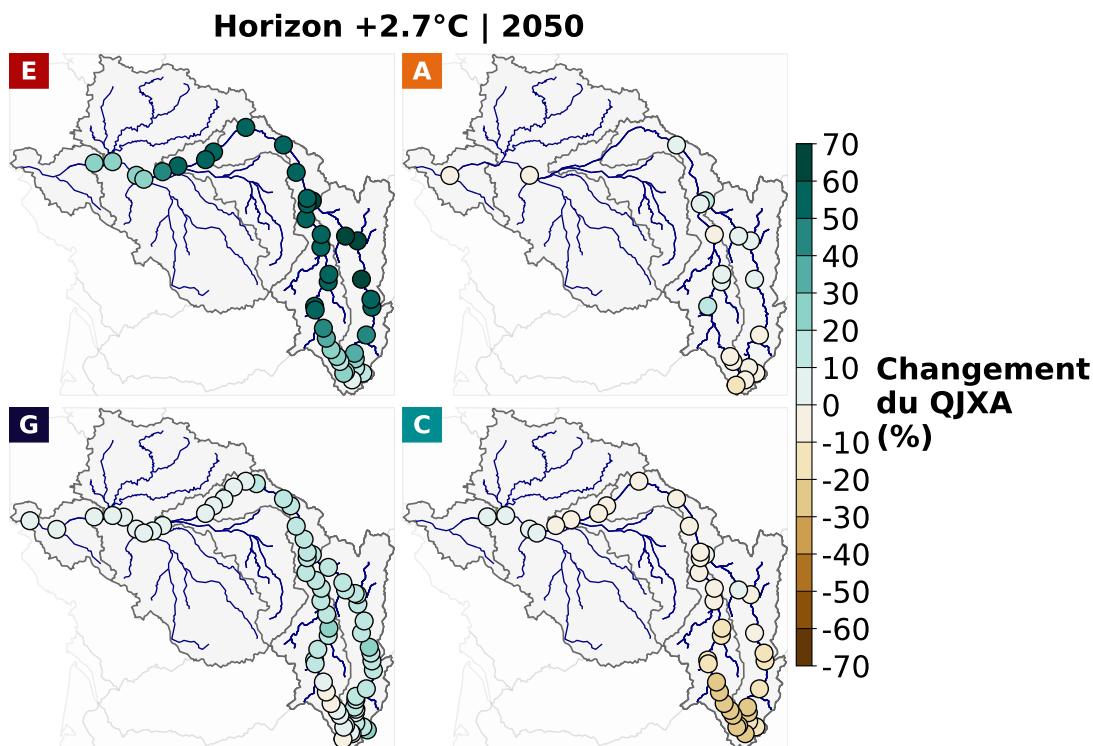


FIGURE 96. Cartes des changements médians du QJXA par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

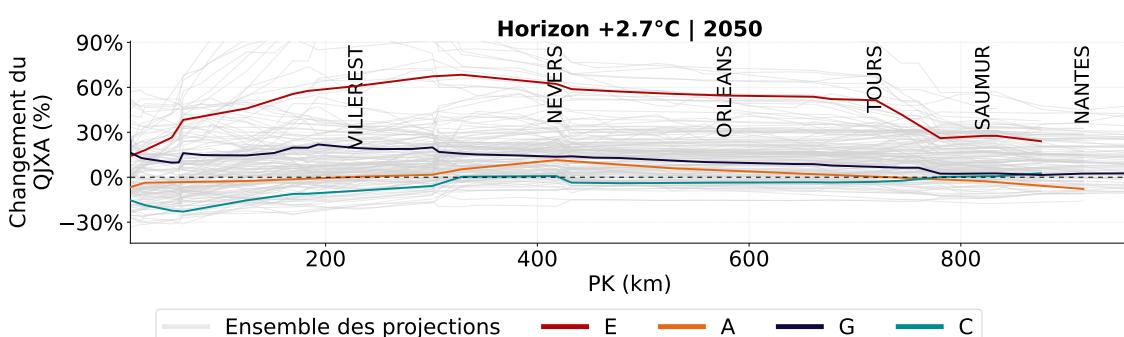


FIGURE 97. Changements médians du QJXA en fonction du point kilométrique (PK) sur la Loire par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Du point de vue événementiel, le comportement des crues est assez variable d'une année à l'autre. Pour un niveau de réchauffement +2,7 °C, l'ensemble des narratifs identifient des années avec des débits

journaliers maximum annuels très importants avec une hausse pouvant excéder les +80% sur l'amont. En descendant vers l'aval, l'intensité des crues diminue notamment une fois passée la confluence avec l'Allier (Figure 98, Figure 99 et Figure 100).

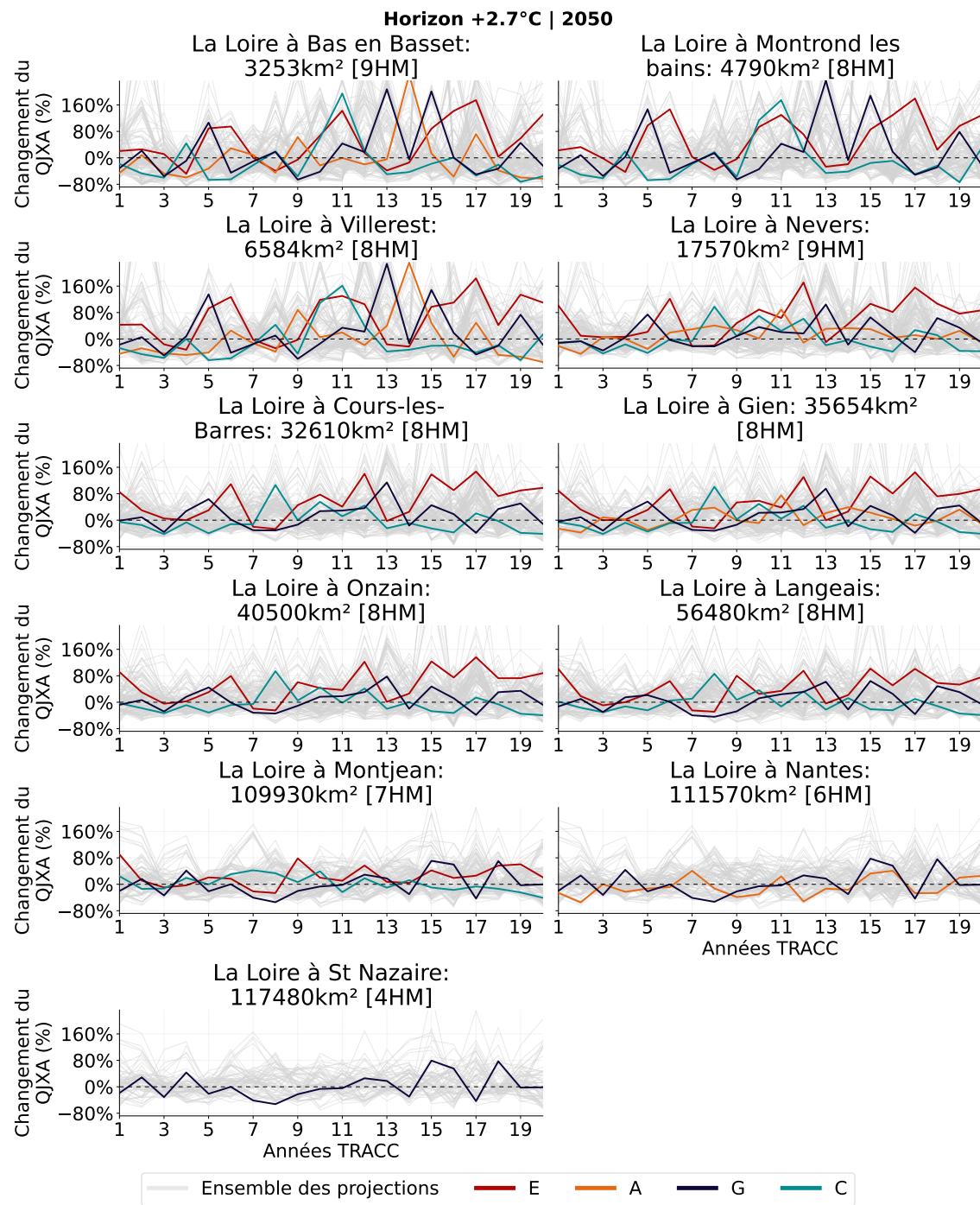


FIGURE 98. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur la Loire par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

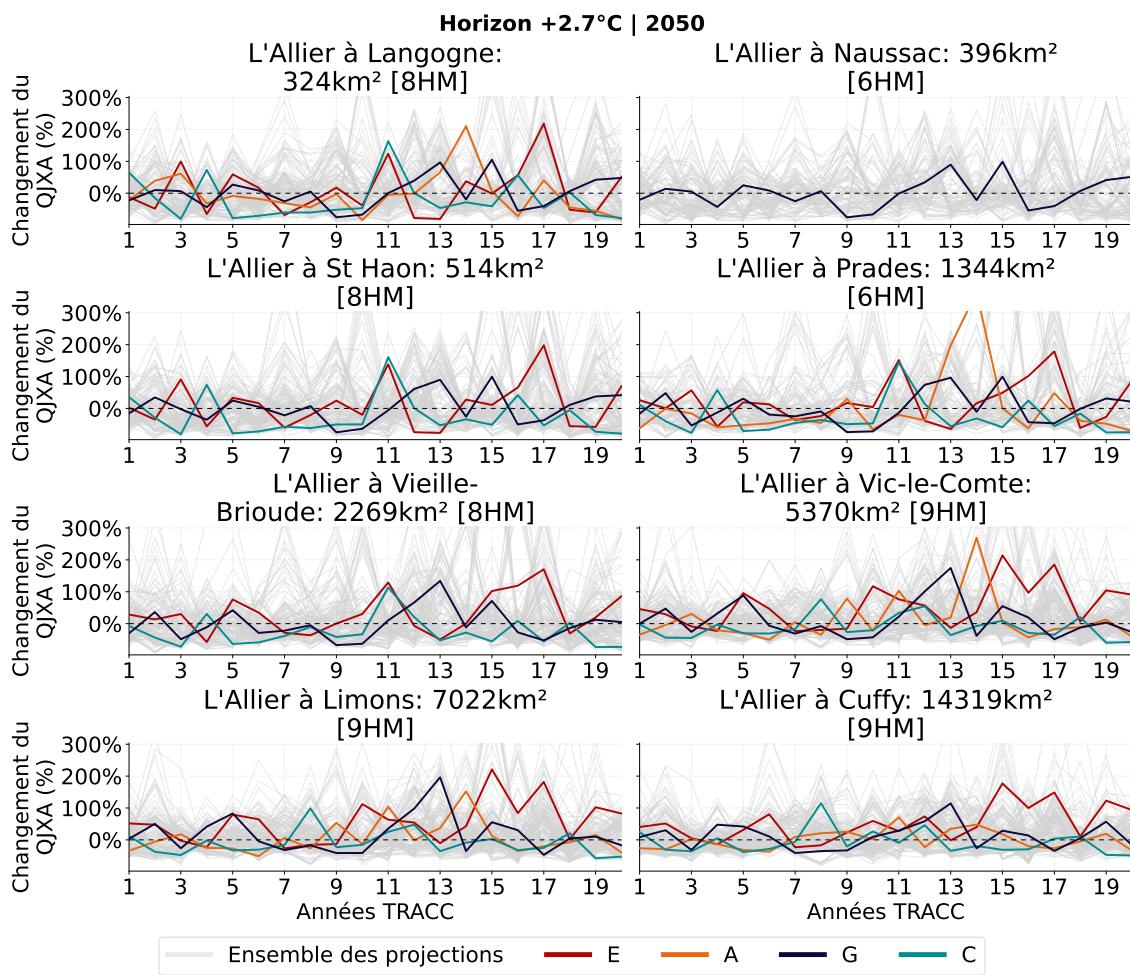


FIGURE 99. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur l'Allier par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

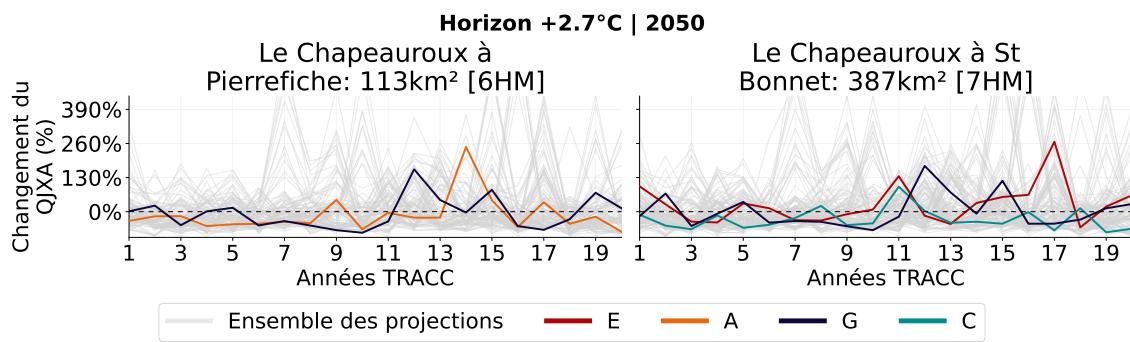


FIGURE 100. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur le Chapeauroux par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +2,7 °C.

Synthèse - Le bassin de la Loire dans une France à +2,7 °C

Climat

Changements du climat par rapport à la période 1991-2020

Températures moyennes +1,6 °C

Températures saisonnières +1,4 °C l'hiver, +2,0 °C l'été

Précipitations moyennes +2%

Précipitations saisonnières +13% l'hiver, -5% l'été

Hydrologie

Quatre narratifs hydroclimatiques pour illustrer des futurs contrastés de la Loire dans une France à +2,7 °C.

Narratif A - Étiages sévères

Débits moyens



-10%

Hauts débits



-5/+5%

Bas débits



-60%

Durée des bas débits



+50 jours

Saisonnalité

JFM

AM

JJASO

ND



Narratif G - Débits en hausse

Débits moyens



+15%

Hauts débits



+20% → 0%

Bas débits



+15%

Durée des bas débits



-15 jours

Saisonnalité

JFMAMJ

JA

SOND



Narratif E - Extrêmes plus intenses

Débits moyens



0% → +25/30%

Hauts débits



+25 à +60%

Bas débits



-20%

Durée des bas débits



+30 → +5 jours

Saisonnalité

FMAMJ

JAS

ONDJ



Narratif C - Changements modérés

Débits moyens



-15% → 0%

Hauts débits



-25% → 0%

Bas débits



-15%

Durée des bas débits



+25 jours

Saisonnalité

JFMAMJ

JASO

ND



(Débits moyens : QA, hauts débits : QJXA, bas débits : VCN10, saisonnalité : Qm; les changements indiqués par une flèche horizontale → indique des écarts importants de l'amont vers l'aval).

6.3 Hydrologie dans une France à +4,0 °C

Quels débits dans une France à +4,0 °C? Nous privilégions ici l'approche par narratifs hydroclimatiques décrits en [Section 3.2](#) permettant de présenter des futurs contrastés. Les narratifs définis pour une France à +4.0 °C en [Section 3.2](#) correspondent à :

- **Narratif A** : HadGEM2-ES CCLM4-7-17 ADAMONT MORDOR-TS (étiages sévères)
- **Narratif G** : CNRM-CM5 ALADIN63 ADAMONT EROS (débits annuels en légère hausse et crues plus intenses)
- **Narratif E** : IPSL-CM5A-MR HIRHAM5 ADAMONT MORDOR-TS (intensification des extrêmes)
- **Narratif C** : NorESM1-M WRF381P ADAMONT SMASH (évolutions modérées avec néanmoins une baisse globale des débits)

Débits moyens

Débit moyen annuel (QA)

Selon les directives de la TRACC, l'objectif est de s'adapter d'ici à 2100 à un niveau de réchauffement +4,0 °C. Les quatre narratifs hydroclimatiques permettent d'illustrer différents futurs possibles représentatifs de la dispersion de l'ensemble des simulations ([Figure 101](#) et [Figure 102](#)).

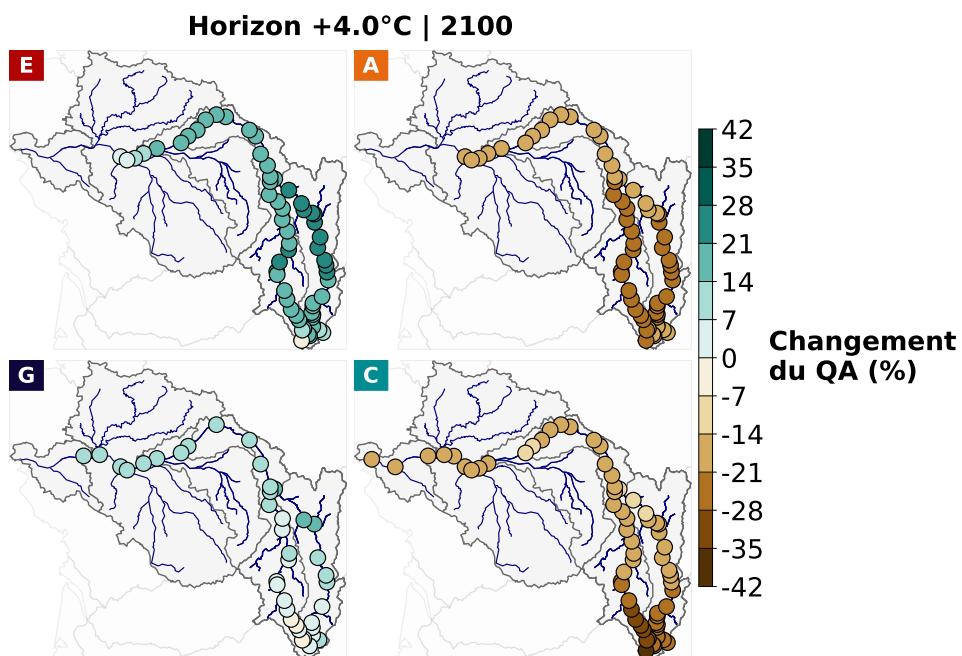


FIGURE 101. Cartes des changements médians du QA par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

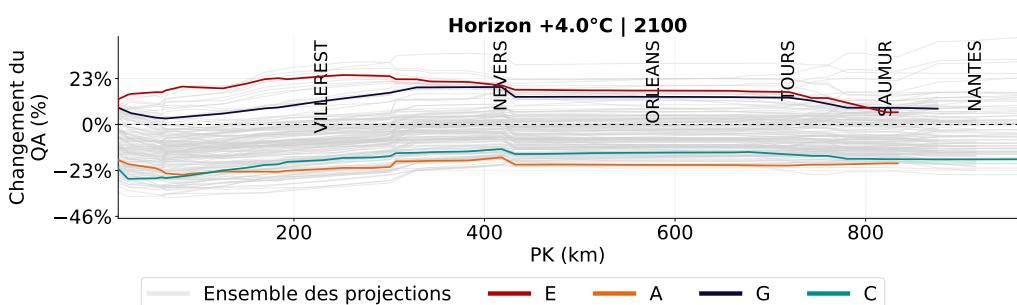


FIGURE 102. Changements médians du QA par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0°C.

Sur les débits moyens annuels, il y a d'une part les tendances à la hausse avec les narratifs **E** et **G** qui indiquent une hausse de +15 à +20% avec néanmoins un phénomène moins marqué sur l'amont pour le **narratif G**. D'autre part, il y a les tendances à la baisse avec les narratifs **narratif A** et **narratif C** avec une diminution de l'ordre de -15 à -20%.

Débit moyen mensuel (Qm)

La saisonnalité des débits est également sujette à des évolutions. Le **narratif A** indique d'une part une hausse des débits mensuels (Qm) en mars-avril mais également des niveaux estivaux plus bas et qui se prolongent en septembre-octobre. Le **narratif E** se caractérise par l'amplitude entre les périodes de hauts et bas débits. Les débits mensuels de janvier-février augmentent de près de +50% là où l'été les débits sont divisés par deux, d'autant plus que ces niveaux sont atteints dès juin (Figure 103).

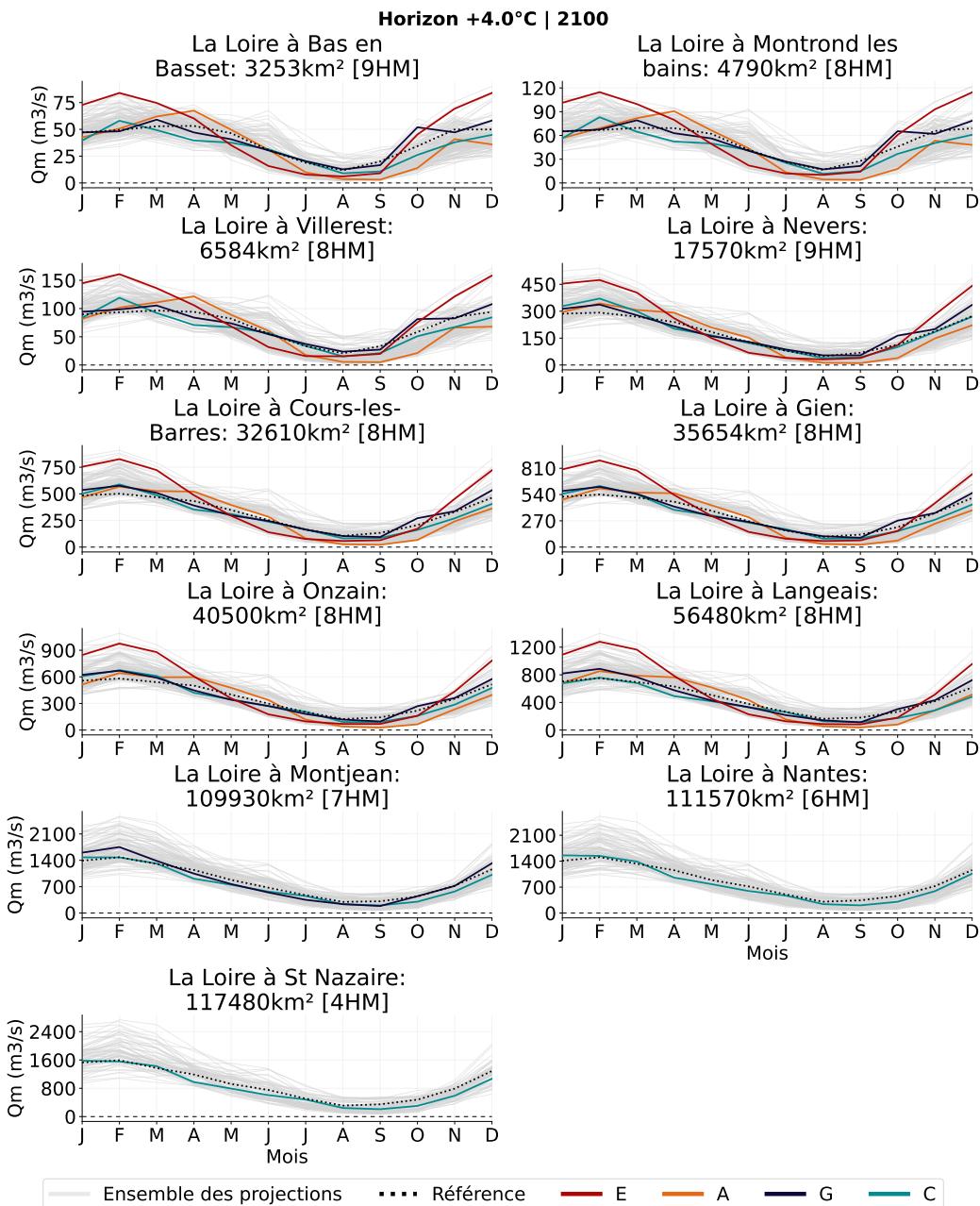


FIGURE 103. Qm médian sur les stations cibles de la Loire en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Le **narratif C** (narratif peu contrasté) indique une baisse globale des débits tout en gardant une tendance similaire à la période de référence. Enfin, le **narratif G** a un comportement assez similaire à la référence mais avec une hausse non négligeable des débits en octobre sur l'amont.

Sur l'Allier et le Chapeauroux, les mêmes grandes tendances sont présentes avec un **narratif A** soulignant la prolongation des bas débits ou encore le **narratif E** qui présente une amplitude importante entre les hauts et les bas débits (Figure 104 et Figure 105).

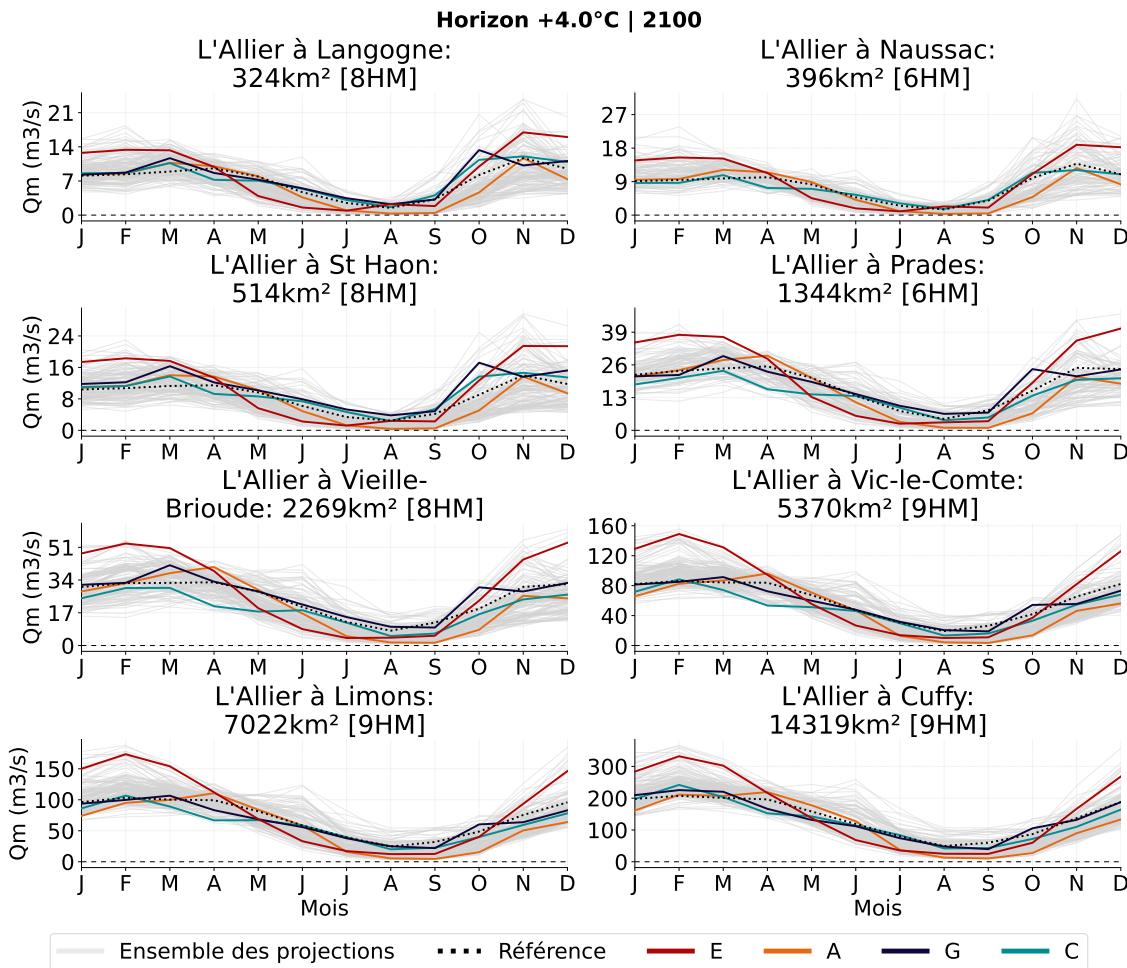


FIGURE 104. Qm médian sur les stations cibles de l'Allier en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

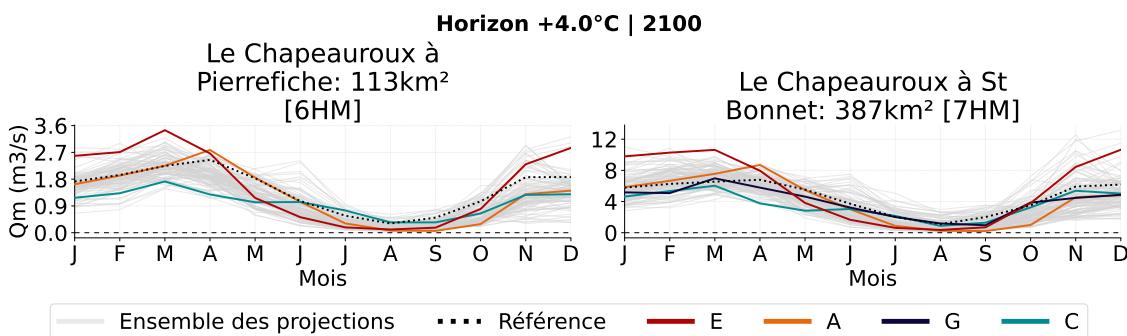


FIGURE 105. Qm médian sur les stations cibles du Chapeauroux en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Bas débits

Débit dépassé 90% du temps (Q90)

Contrairement au degré de réchauffement +2,7 °C, ici les narratifs sont unanimes sur le sens du changement pour les bas débits. L'ensemble des narratifs indiquent une baisse du Q90 (débit dépassé 90% du temps), y compris le **narratif G** qui indique une diminution de l'ordre de -5 à -10%. Les autres narratifs sont plus pessimistes avec une baisse de -20% pour le **narratif C**, -50% pour le **narratif E** et jusqu'à -60% pour le **narratif A**. Les variations sont ici globalement assez stables sur le territoire (Figure 106 et Figure 107).

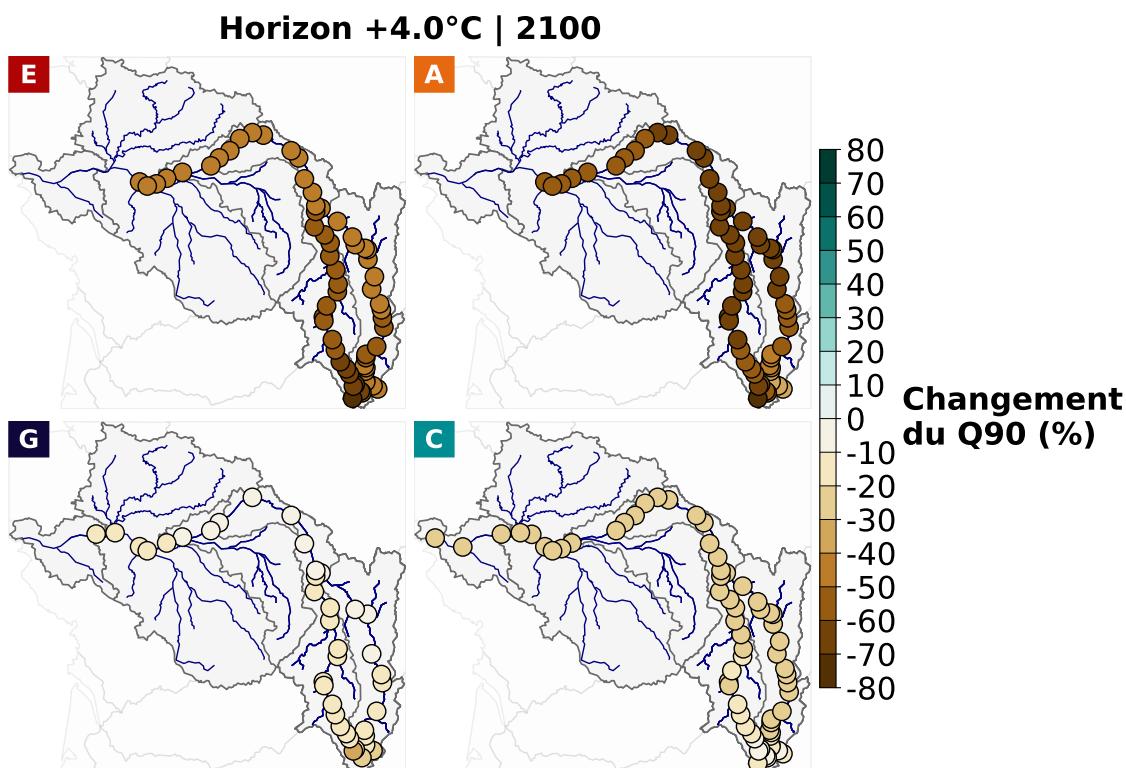


FIGURE 106. Cartes des changements médians du Q90 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

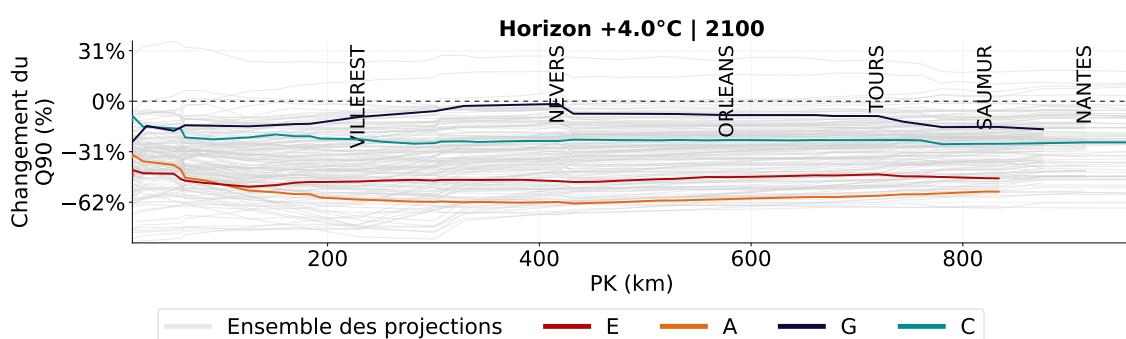


FIGURE 107. Changements médians du Q90 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Débit moyen mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5)

Les tendances du Q90 se retrouvent sur le QMNA5. Seul le **narratif G** identifie une relative stagnation sur les années aux mois les plus secs. Les narratifs **A** et **C** identifient une diminution du QMNA5 qui s'in-

tensifie entre l'amont et l'aval. Le premier passant de -15% sur la Loire amont à -40%; le second passant de -10% sur l'amont et diminue jusqu'à -30% à partir de Nevers.

Le **narratif E** présente une amplitude plus large. Sur l'amont, le QMNA5 est en baisse de -40% et descend jusqu'à -65% à Villerest puis se stabilise autour d'une baisse de l'ordre de -30% passée la confluence avec l'Allier (Figure 108 et Figure 109).

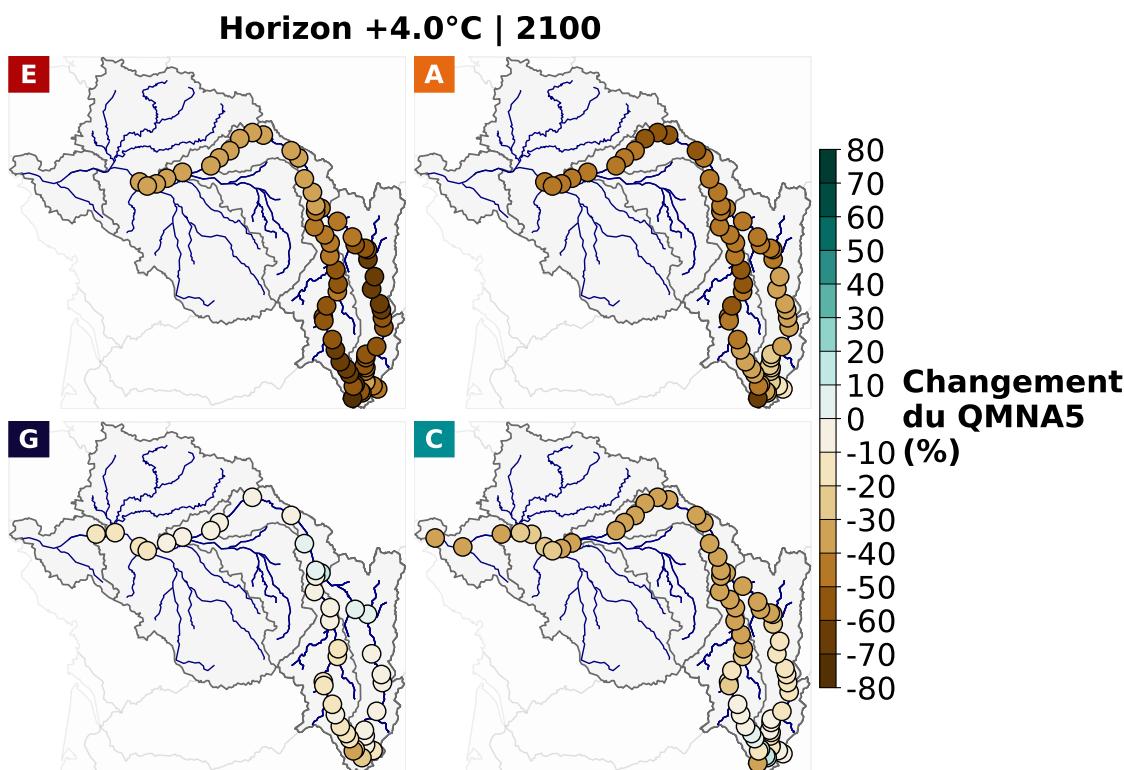


FIGURE 108. Cartes des changements médians du QMNA5 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

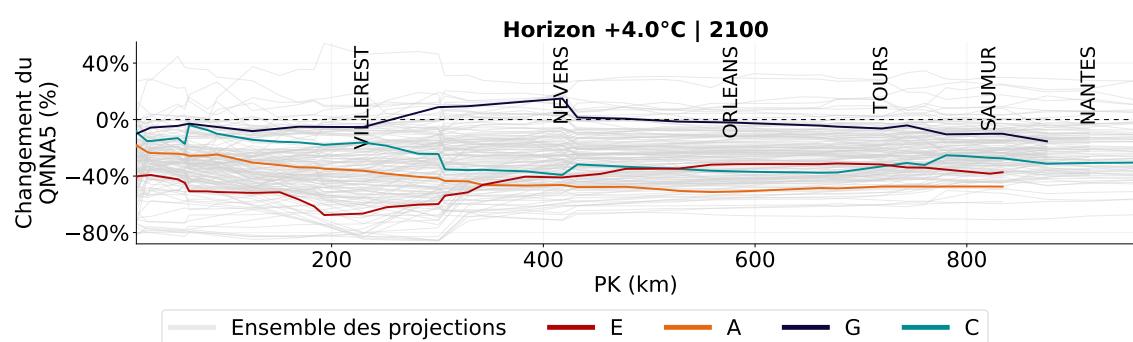


FIGURE 109. Changements médians du QMNA5 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Débit moyen mensuel de période de retour 5 ans (QMN5)

Les variations intra-annuelles pouvant être importantes, il convient encore une fois de se pencher plus en détail sur les variations saisonnières.

Le **narratif E** (fort sur les extrêmes) indique d'une part une hausse du QMN5 durant les hauts débits mais également une baisse conséquente avoisinant les -40% dès le mois de juin. Le QMN5 de juin à octobre en horizon +4,0 °C est inférieur au QMN5 médian d'août de la période 1991-2020.

Les narratifs **A** et **C** révèlent également des mois secs estivaux plus sévères. Les débits mensuels secs diminuent à partir de mai de l'ordre de -30% et ce phénomène se prolonge jusqu'à novembre-décembre.

Le **narratif G** gravite autour de la médiane de la période de référence avec des QMN5 estivaux en hausse sur l'amont puis une décroissance progressive au fil de la Loire avec une légère baisse des débits des mois secs en fin de printemps (Figure 110).

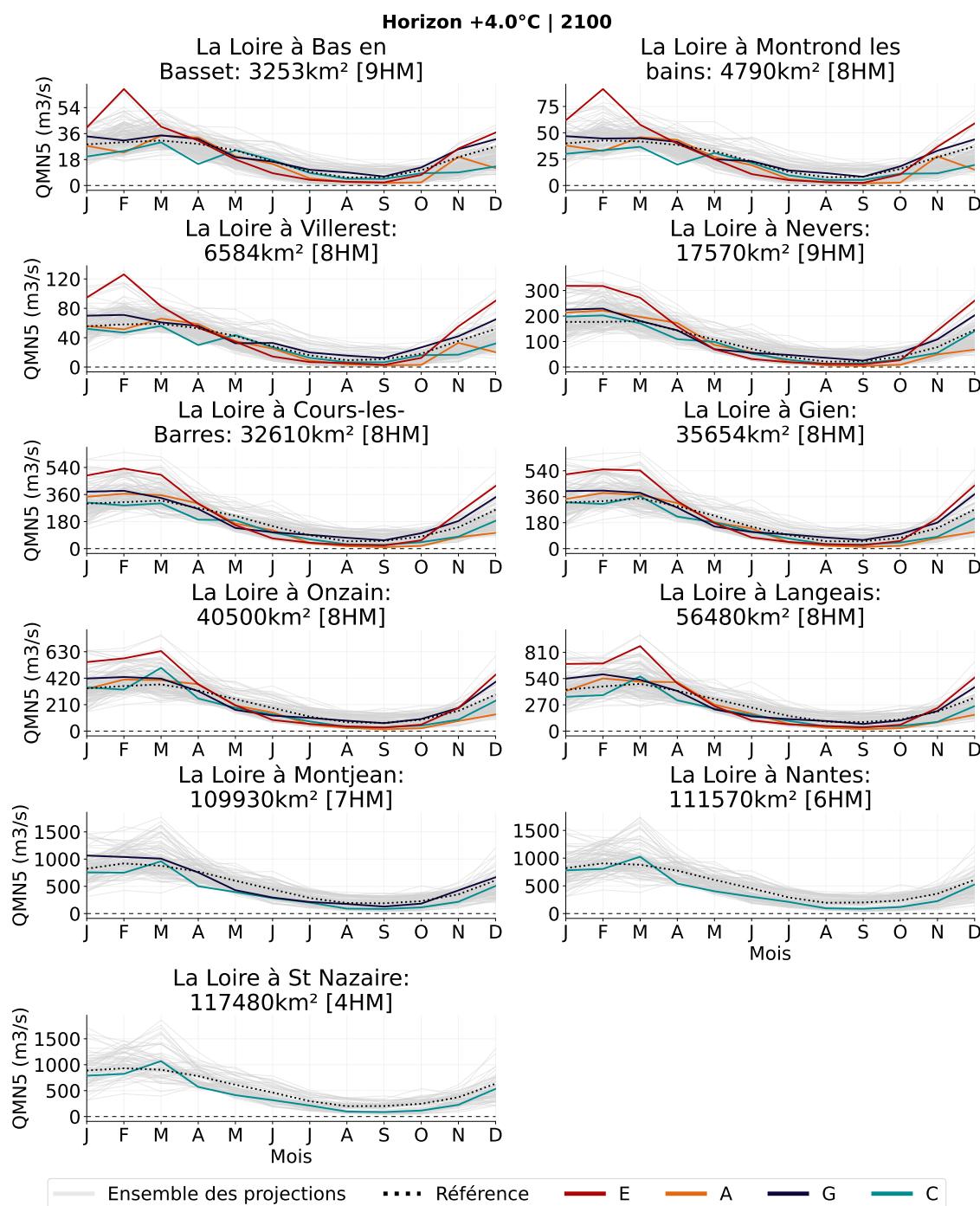


FIGURE 110. QMN5 médian sur les stations cibles de la Loire en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Sur l'Allier et le Chapeauroux, le **narratif A** détecte une baisse drastique des QMN5 notamment l'été qui tend à se prolonger et à s'intensifier. De mai à octobre les débits des mois secs diminuent de près de -40% pouvant descendre jusqu'à -70% sur les mois de juillet-août sur le Chapeauroux à Pierrefiche. Le

narratif E identifie un comportement assez similaire sur l'été et l'automne avec néanmoins une hausse du QMN5 sur la période hivernale.

Si le **narratif C** est assez proche de la référence sur l'amont, les mois secs s'intensifient lorsque l'on s'approche de l'aval. Les variations saisonnières sont particulièrement faibles en tête de bassin. Enfin, le **narratif G** indique une tendance à la hausse du QMN5 sur l'amont puis tend vers la référence sur l'aval (Figure 111 et Figure 112).

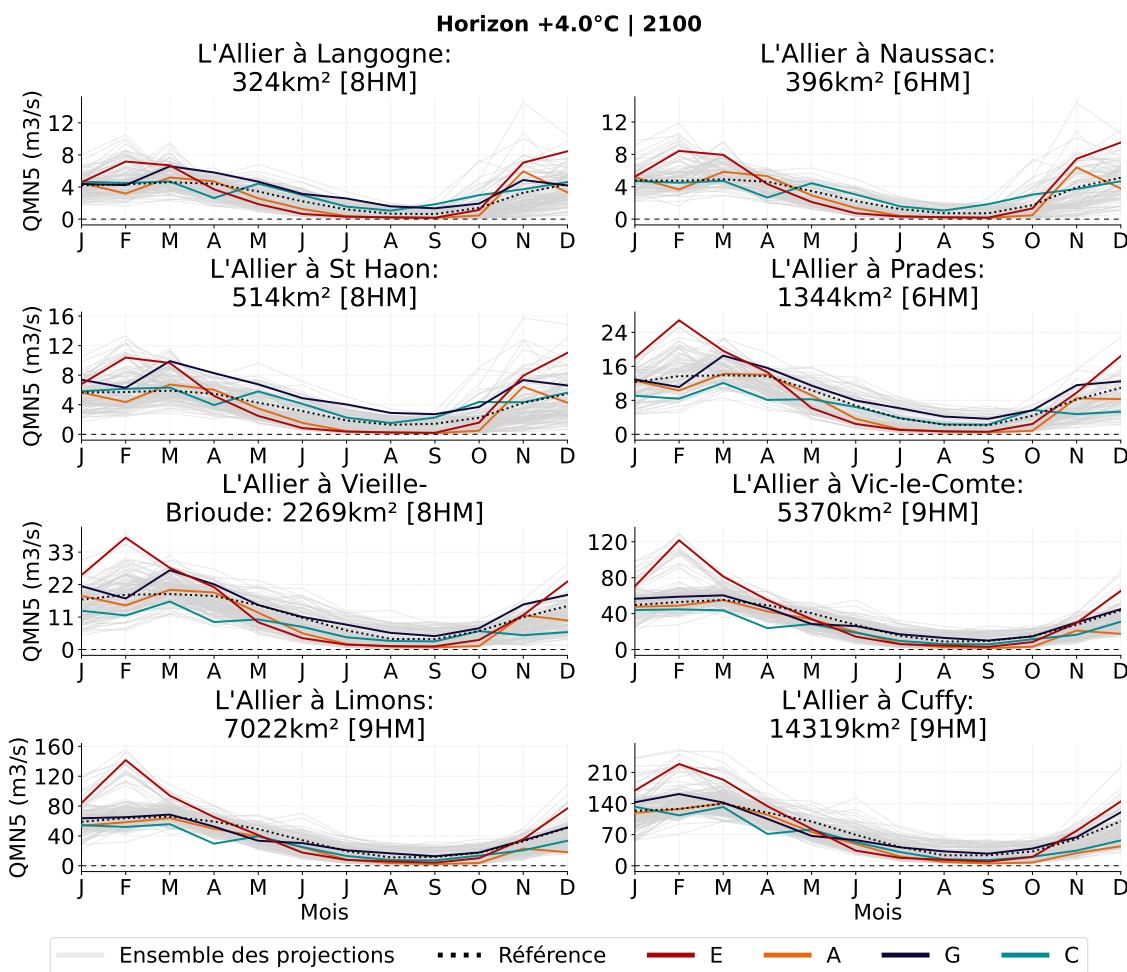


FIGURE 111. QMN5 médian sur les stations cibles de l'Allier en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

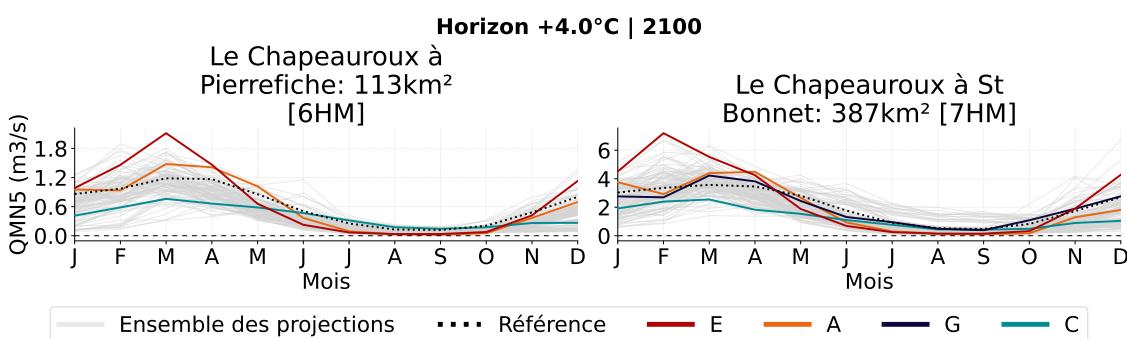


FIGURE 112. QMN5 médian sur les stations cibles du Chapeauroux en fonction du mois par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Débit minimum moyen sur 10 jours (VCN10)

Cette forte tendance à la baisse se retrouve également sur l'intensité des périodes de bas débits. Le **narratif G** détecte en moyenne une baisse du VCN10 allant de -5 à -20%. Pour le **narratif C**, la baisse est légèrement plus marquée avec une diminution des débits des 10 jours les plus secs autour de -20%.

En revanche, les narratifs **A** et **E** indiquent une baisse bien plus drastique du VCN10 avec une chute autour des -60% (Figure 113 et Figure 114).

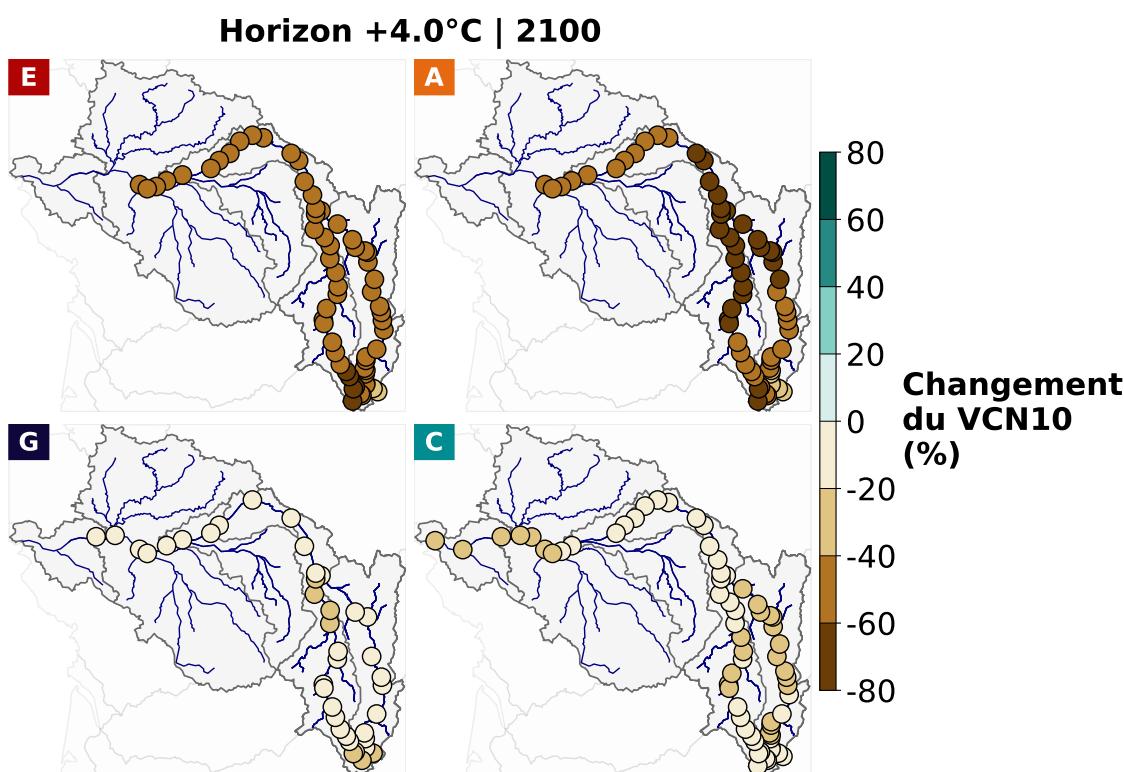


FIGURE 113. Cartes des changements médians du VCN10 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

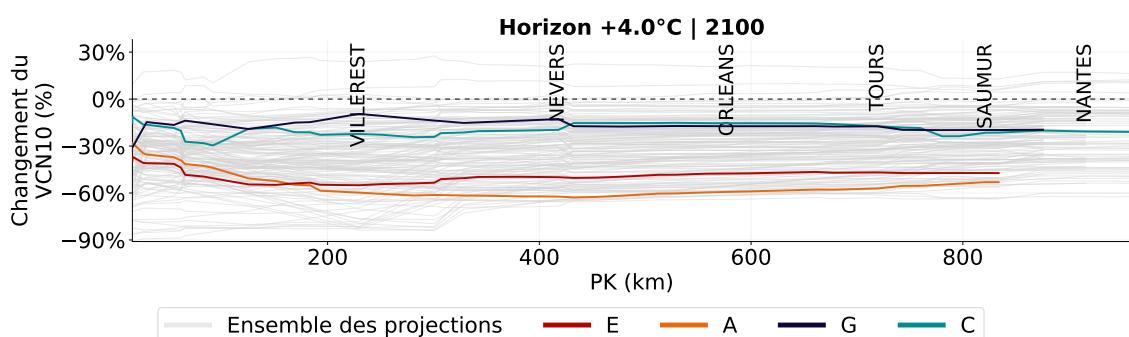


FIGURE 114. Changements médians du VCN10 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

En se penchant sur les chroniques de changements du VCN10, d'importantes disparités peuvent survenir d'une année à l'autre. Par exemple, pour le **narratif C** sur la Loire, près de 6 années consécutives voient leur VCN10 chuter de -40% par rapport à la référence, alors que ce narratif n'est, en moyenne, pourtant pas particulièrement sévère sur les bas débits.

Différence notable entre le **narratif A** et le **narratif E**, qui sont pour le coup assez sévères, le premier

tend à être assez constant autour d'une baisse de -50% sur les 20 années TRACC, là où le second voit moins d'années très sèches se succéder (Figure 115).

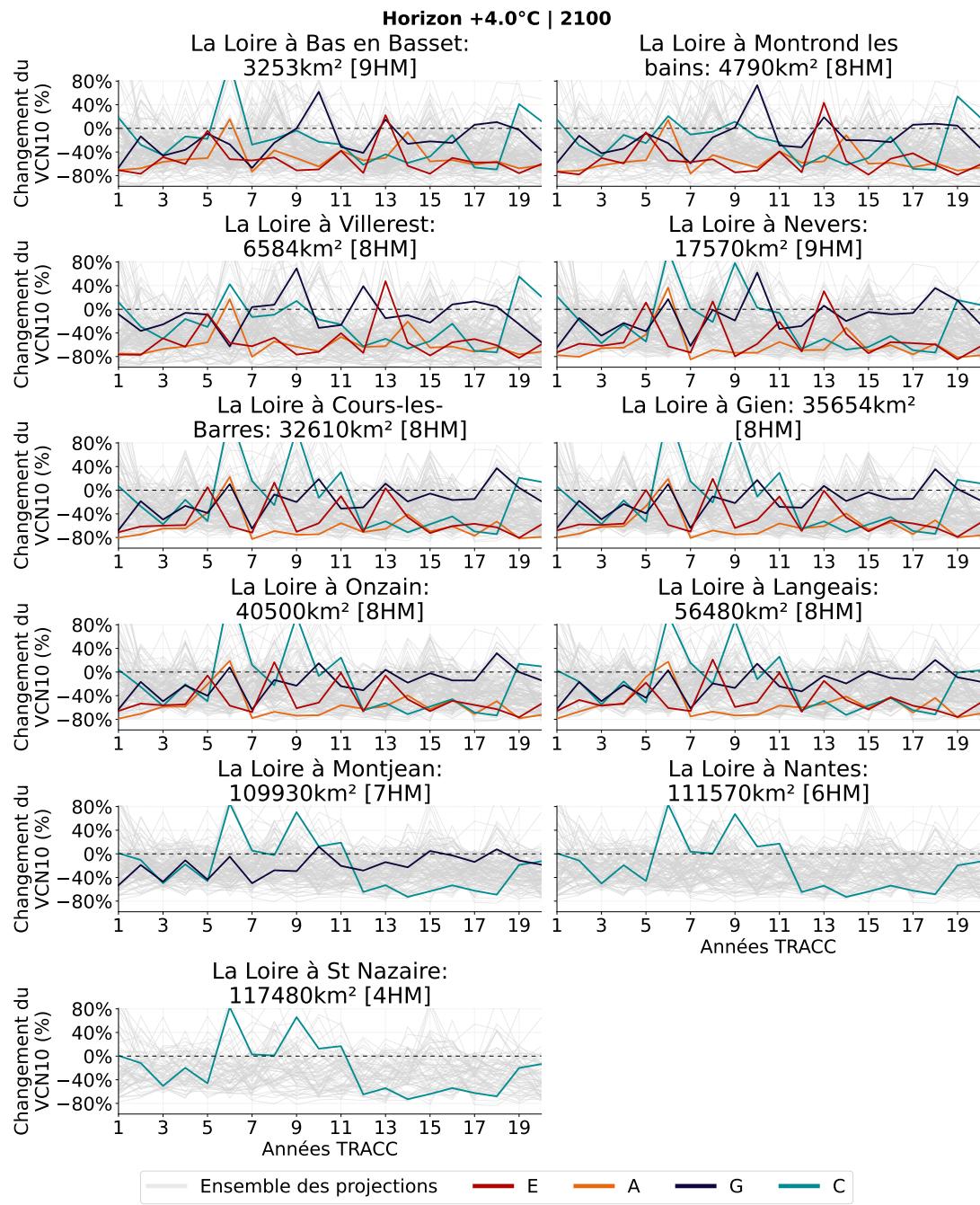


FIGURE 115. Chroniques des changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur la Loire par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Sur l'Allier et le Chapeauroux, en tête de bassin les narratifs **C** et **G** sont assez proches de la référence. Sur l'aval de l'Allier, le **narratif C** exprime le même phénomène de succession d'années aux épisodes de bas débits intenses que la Loire.

Les narratifs **A** et **E** ont des tendances sur l'Allier et le Chapeauroux assez proches de celles de la Loire (Figure 116 et Figure 117).

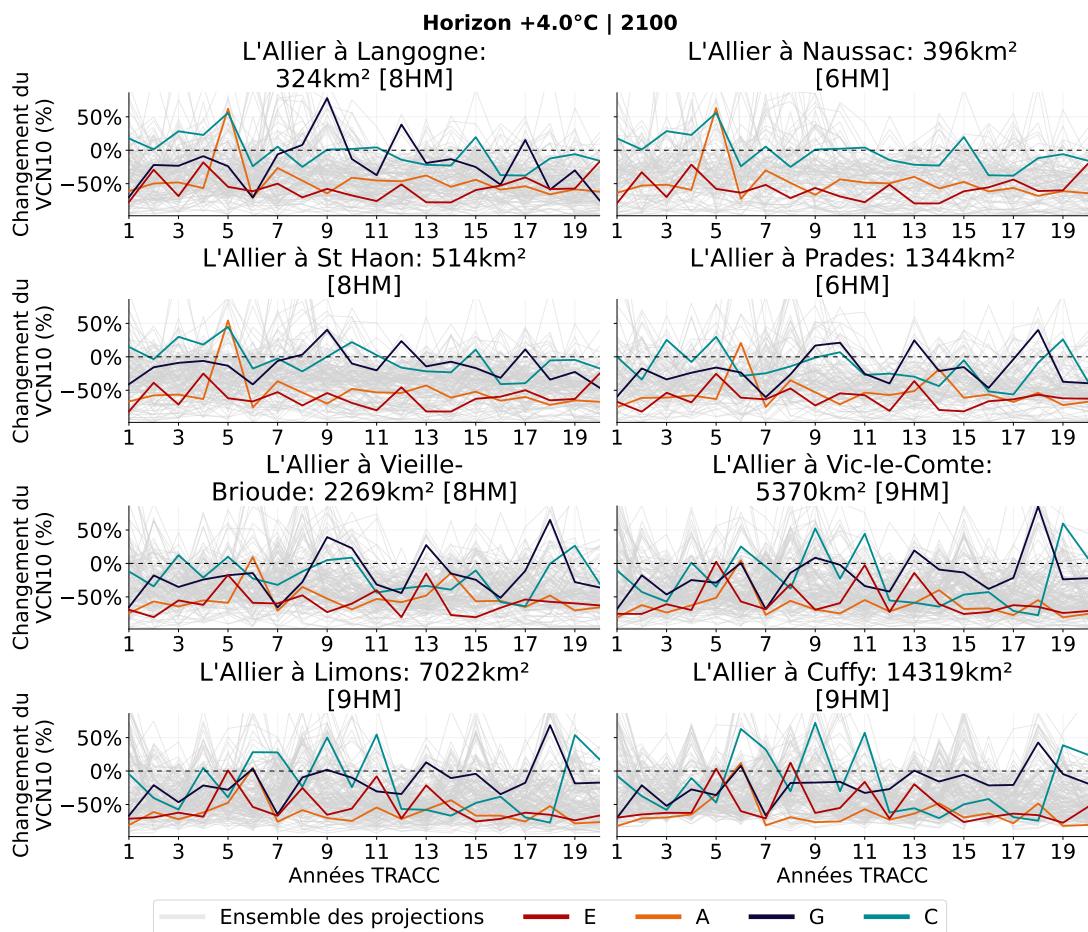


FIGURE 116. Chroniques des changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur l'Allier par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

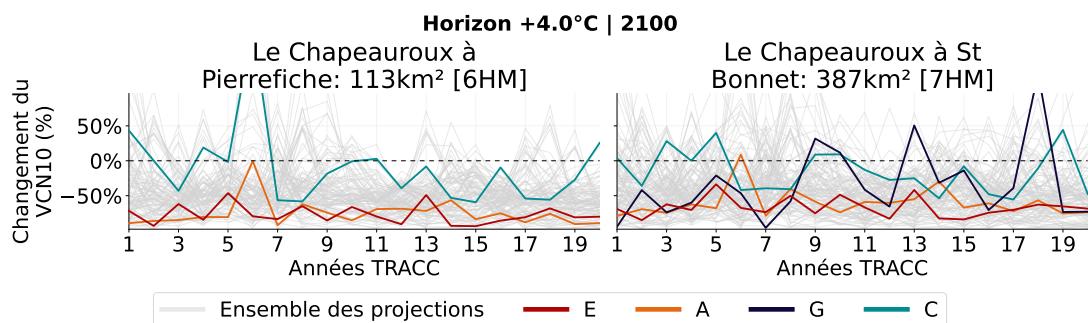


FIGURE 117. Chroniques des changements du VCN10 par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur le Chapeauroux par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Durée et saisonnalité des étiages

Les étiages sont globalement plus longs de manière assez uniforme sur le territoire avec notamment un mois et demi supplémentaire pour le **narratif A**, 30 à 40 jours supplémentaires pour le **narratif E** ou encore un mois supplémentaire pour le **narratif C**.

En revanche, le **narratif G** se démarque des autres narratifs en restant à des niveaux similaires à la référence avec malgré tout une quinzaine de jours d'étiage additionnels sur les extrémités du bassin (Figure 118 et Figure 119).

Horizon +4.0°C | 2100

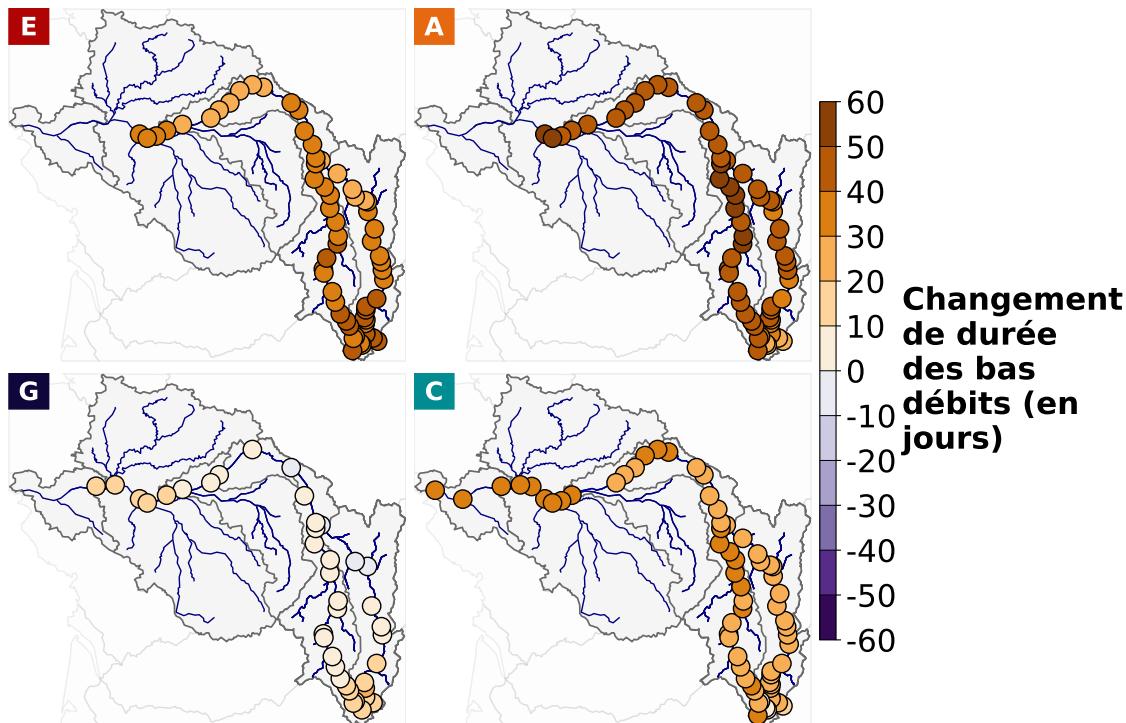


FIGURE 118. Cartes des changements médians de la durée des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

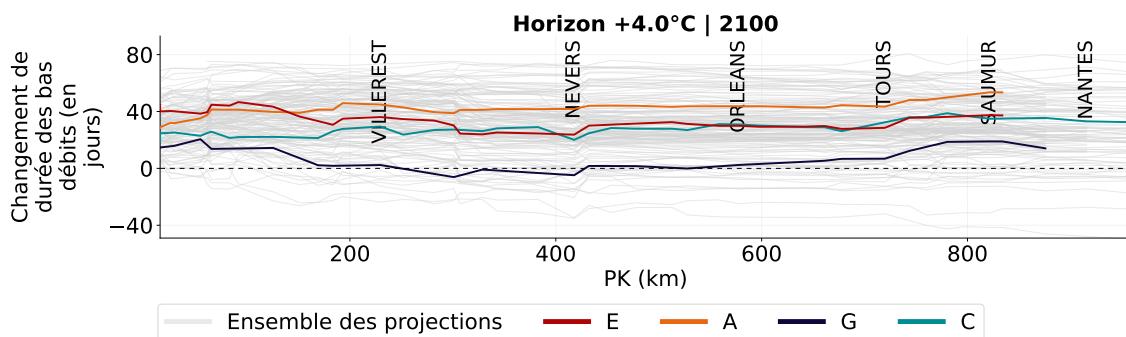


FIGURE 119. Changements médians de la durée des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Ces changements de durées se traduisent par des changements de saisonnalité des débits des cours d'eau. Si le **narratif A** indique des étiages qui durent près d'une soixantaine de jours supplémentaires, ceux-ci sont issus de bas débits débutant 40 jours plus tôt et se prolongeant d'une vingtaine de jours. Le **narratif E** présente un comportement similaire avec des débits estivaux qui commencent 30 jours plus tôt et qui se prolongent 5 à 10 jours supplémentaires.

Le **narratif C** présente un décalage moindre entre les dates de début et de fin des bas débits avec environ 2 semaines de décalage de part et d'autre autour de la saison estivale. Concernant le **narratif G**, les périodes de bas débits arrivent 5 à 10 jours plus tôt. Si sur les extrémités du bassin ces périodes se prolongent également de 5 à 10 jours, entre Villerest et Tours elles se terminent environ une semaine plus tôt (Figure 120 et Figure 121).

Horizon +4.0°C | 2100

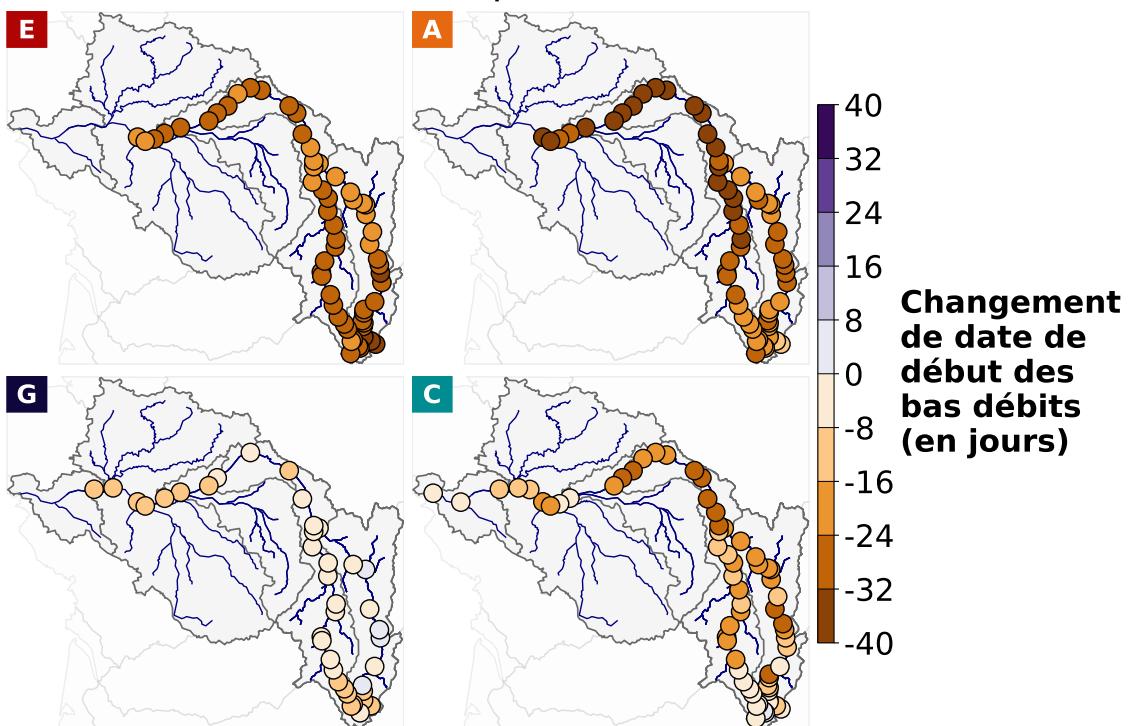


FIGURE 120. Cartes des changements médians de la date de début des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Horizon +4.0°C | 2100

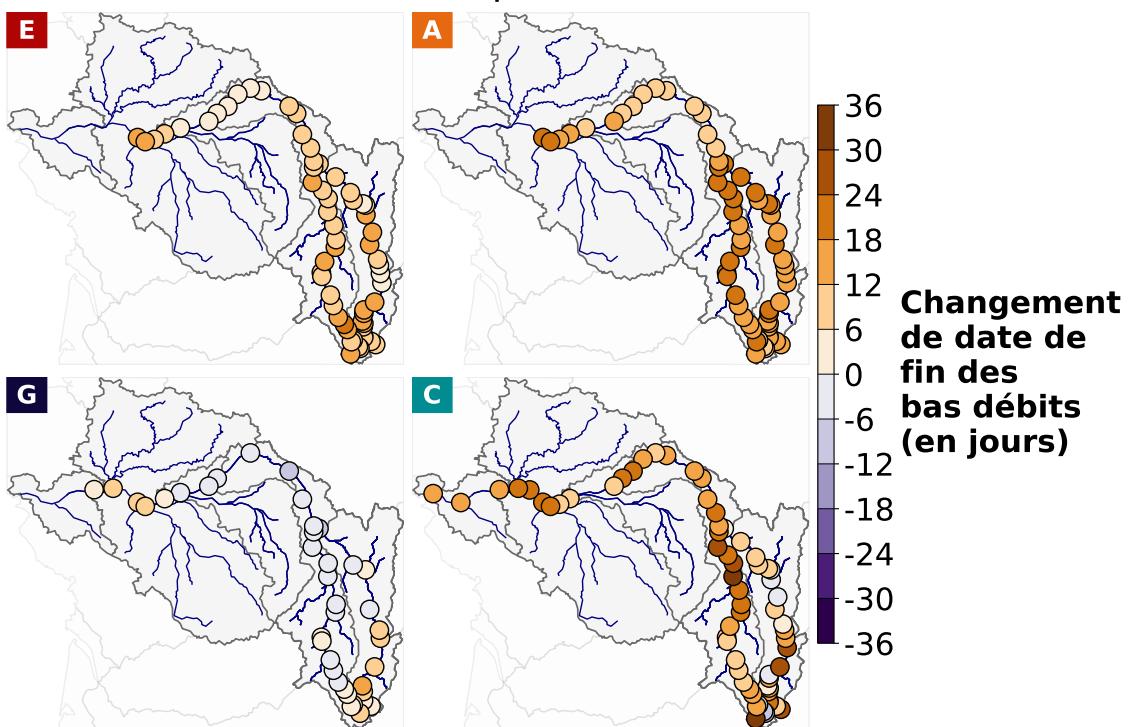


FIGURE 121. Cartes des changements médians de la date de fin des bas débits par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Hauts débits

Débit dépassé 2% du temps (Q2)

De l'autre côté du spectre des débits, les narratifs se divisent en deux catégories sur le comportement des hauts débits. Les narratifs **A** et **C** identifient une baisse sur l'ensemble du bassin avec un fort contraste amont-aval. En tête de bassin, ils détectent tous deux une baisse de l'ordre de -25% mais le **narratif A** tend vers les niveaux de référence à partir de Nevers là où le **narratif C** tend vers une baisse -10%.

À l'inverse, les narratifs **narratif G** et **narratif E** indiquent une hausse des Q2 sur l'ensemble du bassin ligérien de l'ordre +25 à +35% avec malgré tout une légère décroissance passée la confluence avec le Cher (Figure 122 et Figure 123).

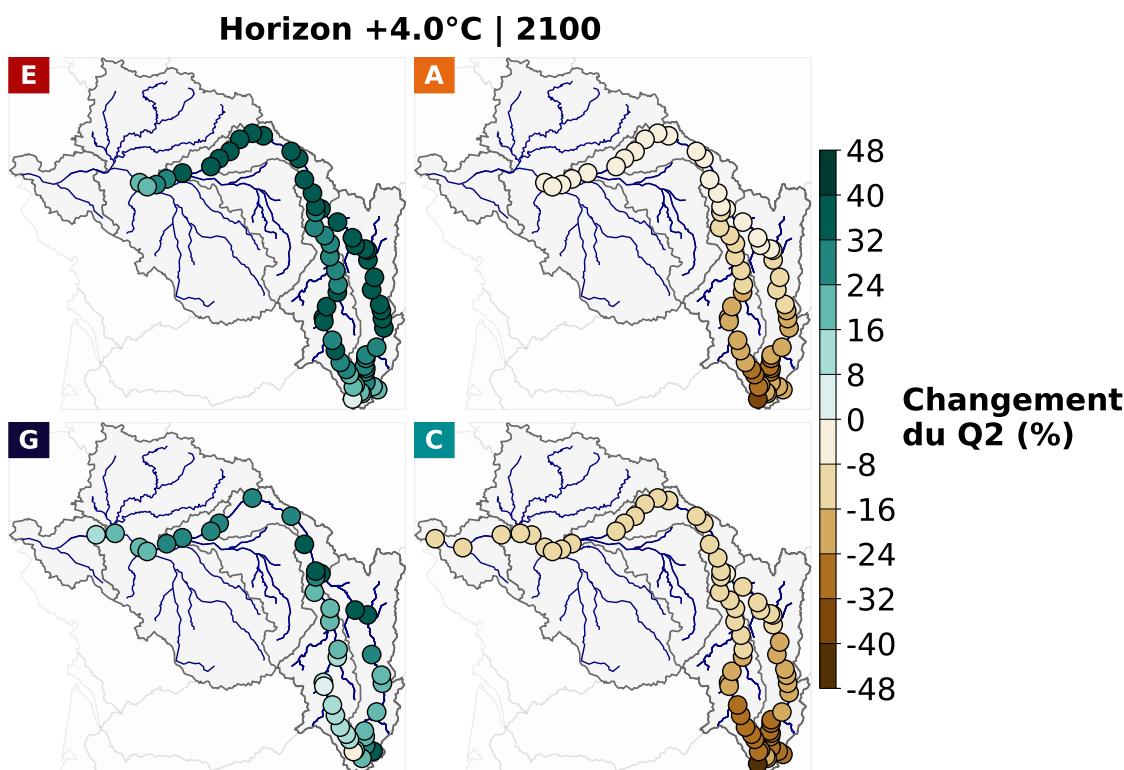


FIGURE 122. Cartes des changements médians du Q2 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

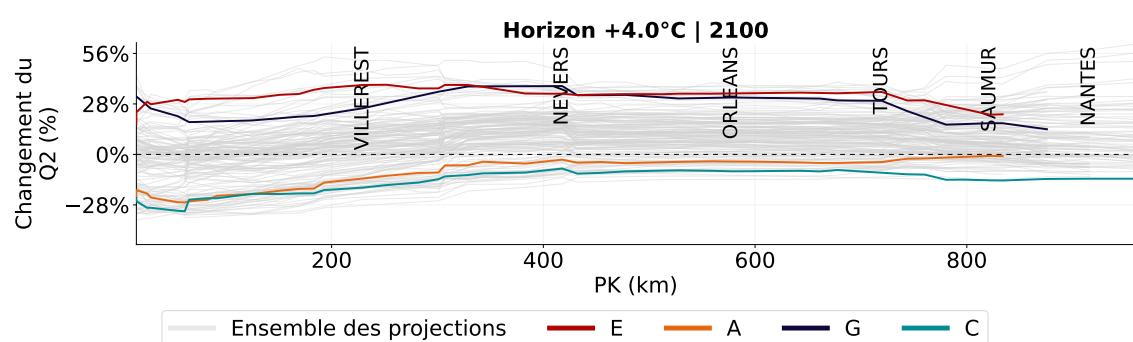


FIGURE 123. Changements médians du Q2 par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Débit journalier maximum annuel (QJXA)

Les tendances sont assez proches concernant les crues mais quelques différences persistent. Les narratifs **narratif A** et **narratif C** identifient sans surprise une diminution du QJXA de l'ordre de -15% avec un contraste amont-aval prononcé.

Le **narratif G** indique une augmentation de 25 à 30% du débit journalier maximum annuel à partir de la confluence avec l'Allier. Le narratif le plus extrême est le **narratif E** passant d'une hausse du QJXA de +5% à l'amont à +55% à partir de Cuffy jusqu'à Tours marquant des crues particulièrement intenses (Figure 124 et Figure 125).

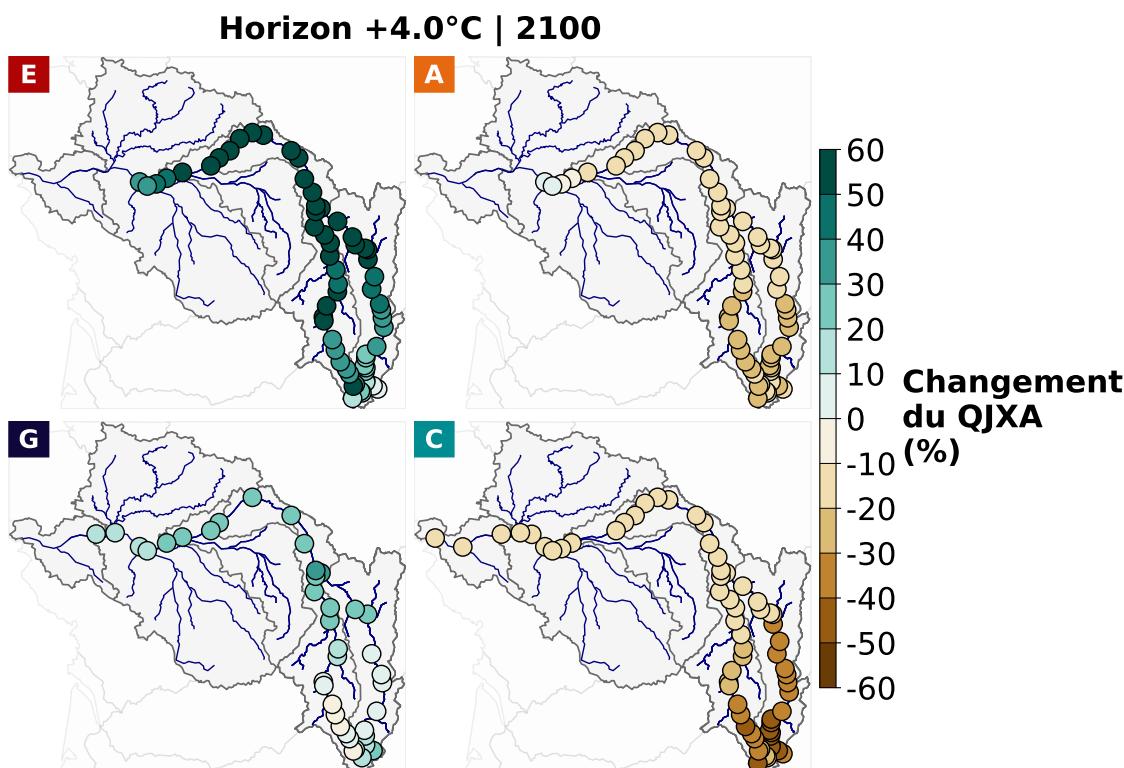


FIGURE 124. Cartes des changements médians du QJXA par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

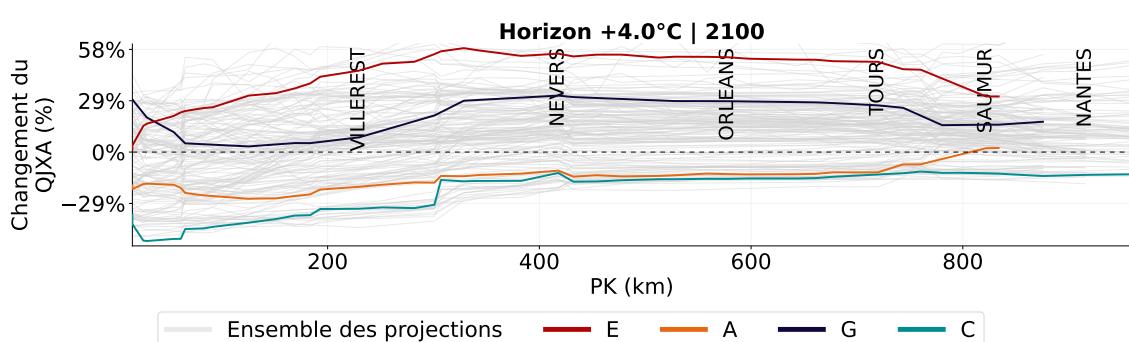


FIGURE 125. Changements médians du QJXA par narratif hydroclimatique par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Du point de vue des crues sur ces 20 années TRACC +4,0 °C, des événements extrêmes se dégagent. En tout particulier le narratif **narratif E** qui identifie sur l'amont un évènement excédant le triple du QJXA moyen sur la période de référence. Des intensités similaires apparaissent sur différentes années pour un

grand nombre de simulations, transcrivant l'incertitude sur les précipitations mais indiquant néanmoins un signal. Par ailleurs, au-delà de l'intensité de cette crue, une tendance globale à la hausse du QJXA se dégage avec près de 8 années dont l'augmentation est supérieure à +70%.

Pour le **narratif G** cette tendance à la hausse apparaît également. Avant Nevers les évènements tendent à être plus intenses et moins fréquents puis cet effet s'inverse avec de nombreuses années dont le QJXA excèdent les +50% par rapport à la référence.

Pour les narratifs **A** et **C**, les résultats sont sensiblement similaires à la référence avec une légère tendance du QJXA à la baisse ([Figure 126](#)).

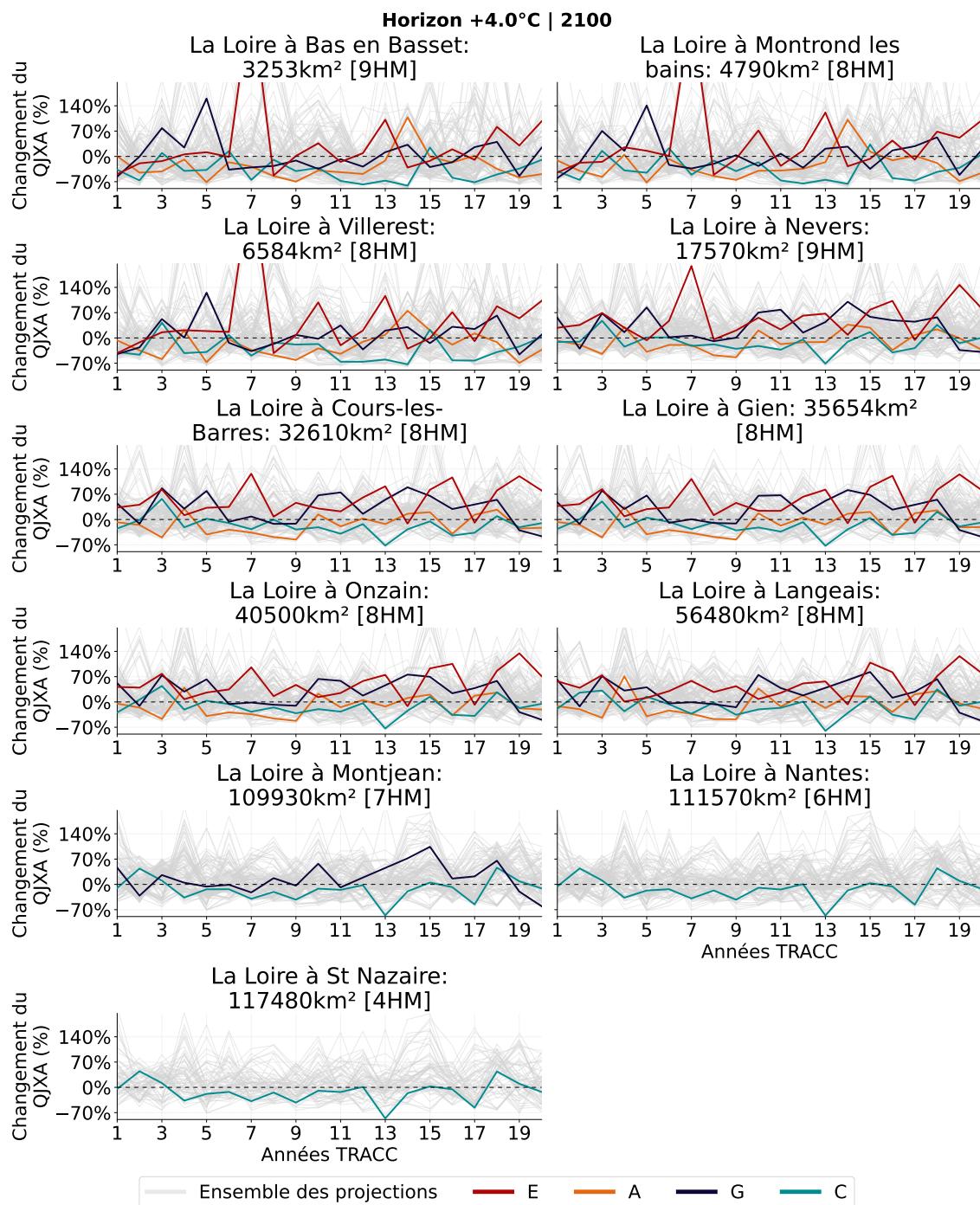


FIGURE 126. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur la Loire par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Sur l'Allier, deux évènements particulièrement intenses sont détectés par le **narratif E** avec un QJXA multiplié par 2,5 sur l'amont, phénomène qui s'atténue en descendant vers l'aval en même temps que la fréquence des QJXA supérieurs à la référence augmente. Pour le **narratif G**, les résultats sont davantage homogènes le long de l'Allier avec néanmoins des évènements moins extrêmes que pour le précédent narratif (Figure 127).

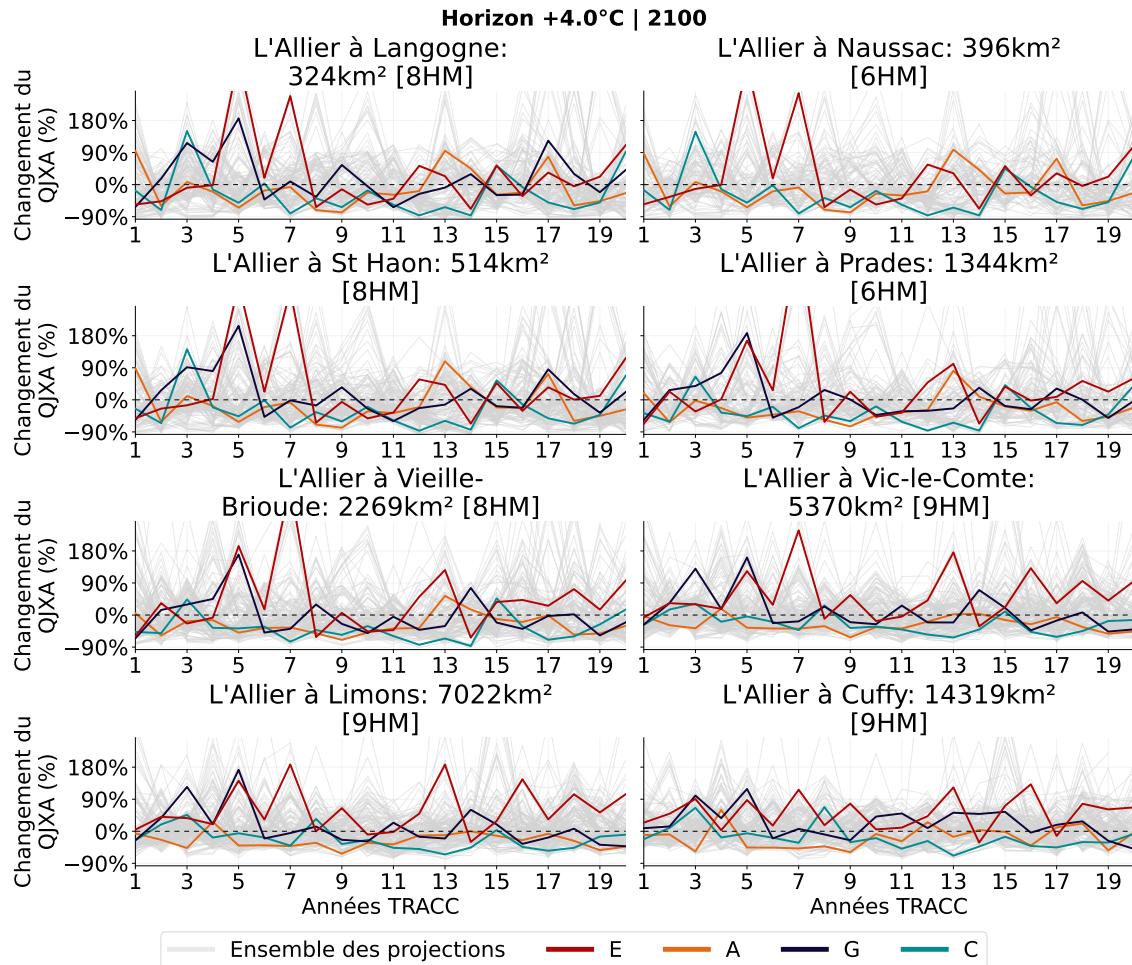


FIGURE 127. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur l'Allier par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Le Chapeauroux se rapproche des tendances observées en Loire amont avec quelques évènements très intenses pour les narratifs **narratif E** et **narratif G** (Figure 128).

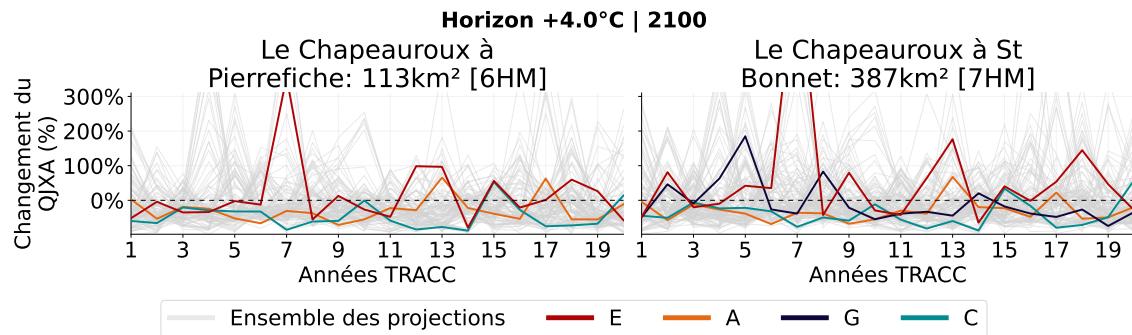


FIGURE 128. Changements du QJXA par année TRACC suivant les narratifs hydroclimatiques sur le Chapeauroux par rapport à la période de référence 1991-2020 pour un degré de réchauffement +4,0 °C.

Synthèse - Le bassin de la Loire dans une France à +4,0 °C

Climat

Changements du climat par rapport à la période 1991-2020

Températures moyennes +2,9 °C

Températures saisonnières +2,4 °C l'hiver, +3,5 °C l'été

Précipitations moyennes -5%/+5%

Précipitations saisonnières +10% l'hiver, -20% l'été

Hydrologie

Quatre narratifs hydroclimatiques pour illustrer des futurs contrastés de la Loire dans une France à +4,0 °C.

Narratif A - Étiages sévères

Débits moyens



-20%

Hauts débits



-25% → 0%

Bas débits



-30% → -60%

Durée des bas débits



+50 jours

Saisonnalité

FMAMJ



JASO



NDJ

Narratif G - Débits en hausse

Débits moyens



+15%

Hauts débits



+25%

Bas débits



-15%

Durée des bas débits



0 à +10 jours

Saisonnalité

JFM



AMJJA



S



OND

Narratif E - Extrêmes plus intenses

Débits moyens



+20%

Hauts débits



0% → +60%

Bas débits



-35% → -55%

Durée des bas débits



+40 jours

Saisonnalité

JFMA



MJJAS



O



ND

Narratif C - Changements modérés

Débits moyens



-15%

Hauts débits



-40% → -15%

Bas débits



-15%

Durée des bas débits



+30 jours

Saisonnalité

JFM



AMJJ



ASOND

(Débits moyens : QA, hauts débits : QJXA, bas débits : VCN10, saisonnalité : Qm; les changements indiqués par une flèche horizontale → indique des écarts importants de l'amont vers l'aval).

7 Conclusions

Le présent Volet Climat de l'étude HMUC sur l'Axe Loire - Allier est une synthèse des connaissances actuelles autour des enjeux climatiques et hydrologiques du territoire.

L'**analyse rétrospective** ([Section 4](#)) effectuée à l'aide des Longue Séries Homogénéisées sur la période 1968-2024 révèle d'ores et déjà des changements. L'ensemble des températures saisonnières sont en hausse avec une variation particulièrement intense l'été. En revanche, les signaux sont plus flous du point de vue des précipitations. Du point de vue hydrologique, cela se traduit par une baisse des débits sur l'amont avec notamment des épisodes estivaux sévères sur l'amont. Les signaux sont là encore flous sur l'aval du bassin ligérien.

Deux analyses prospectives ont été mises en place dans cette étude. La première est **une analyse par horizons temporels** d'ici à la fin du siècle afin de faciliter la mise en cohérence de l'étude avec des travaux antérieurs ([Section 5](#)). La seconde repose sur la **Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)** suivant les prérogatives de l'État pour les niveaux de réchauffement +2,7 °C et +4,0 °C (respectivement [Section 6.2](#) et [Section 6.3](#)). Ces différentes approches reposent sur des données issues du projet **Explore2** regroupant ainsi 153 chaînes de simulations pour 66 stations étudiées sur la Loire, l'Allier et le Chapeauroux.

Ces différentes analyses ont été couplées à une **approche narrative** qui consiste à sélectionner des simulations aux futurs contrastés parmi l'ensemble des projections climatiques ou hydrologiques disponibles. Les narratifs permettent d'illustrer les différentes trajectoires possibles tout en évitant de regrouper des données issues de l'ensemble des simulations qui peuvent présenter des approches physiques et numériques variées ([Section 3](#)).

À travers les analyses temporelles et par degrés de réchauffement, des grandes tendances se dégagent :

- Une hausse des températures, avec un phénomène accentué l'été;
- Des signaux contrastés sur les précipitations avec malgré tout des tendances à la hausse l'hiver et à la baisse l'été;
- Des signaux contrastés sur les changements de débits moyens annuels (QA);
- Des signaux contrastés sur les changements d'intensité des hauts débits;
- Des bas débits plus longs et plus intenses avec une période estivale qui commence plus tôt et se prolonge plus tard dans l'année.

Des signaux contrastés ne signifient pas l'absence de changements mais que différents futurs sont possibles avec des signes de changements variables, ce qu'illustrent précisément les narratifs. S'adapter signifie donc de composer avec des signaux certains mais également avec ces signaux contrastés nécessitant de quantifier la réticence aux risques selon les adaptations envisagées. Choisir un plan d'adaptation qui ne répondrait qu'à un unique narratif ou à une valeur moyenne est certain de ne pas être correctement dimensionné.

Références

- ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES et M. SMITH (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.* T. 56.
- CALMEL, B., J.-P. VIDAL, L. HÉRAUT, E. SAUQUET et A. TORREMOCHA (2025). *Définition de narratifs hydroclimatiques dans le cadre la TRACC (narratracc).* Rapport du projet Explore2. INRAE. 23 p. DOI : [10.57745/FE356V](https://doi.org/10.57745/FE356V).
- CARROGET, A., C. PERRIN, E. SAUQUET, J.-P. VIDAL, S. CHAZOT, M. CHAUVEAU et N. ROUCHY (2017). "Explore 2070 : quelle utilisation d'un exercice prospectif sur les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale pour définir des stratégies d'adaptation ?" In : *Sciences Eaux & Territoires* 22, p. 4-11. DOI : [10.3917/set.022.0004](https://doi.org/10.3917/set.022.0004).
- EPTB LOIRE (2024). *Analyse prospective du climat sur le bassin du Cher.* Rapport HMUC. EPTB Loire. 55 p.
- EPTB RANCE-FRÉMUR (2023). *Partage durable de la ressource en eau de la Rance et du Frémur. Volet 1 :L'hydrologie et l'hydrogéologie.* Rapport HMUC. EPTB Rance-Frémur baie de Beauvais. 268 p.
- GIBELIN, A.-L., B. DUBUISSON, L. CORRE, N. DEAUX, S. JOURDAIN, L. LAVAL, J.-M. PIQUEMAL, O. MESTRE, D. DENNETIÈRE, S. DESMIDT et A. TAMBURINI (2014). "Evolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence". In : *La Météorologie* 87, p. 45-53. DOI : [10.4267/2042/54336](https://doi.org/10.4267/2042/54336).
- GIEC (2013). *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.* Rapport technique. 34 p. URL : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf.
- GIUNTOLI, I., B. RENARD, J.-P. VIDAL et A. BARD (2013). "Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices". In : *Journal of Hydrology* 482, p. 105-118. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2012.12.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038).
- HAMED, K. H. et A. R. RAO (1998). "A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data". In : *Journal of Hydrology* 204.1-4 (trends), p. 182-196. DOI : [10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).
- HERAUT, L., B. RENARD et V. MANSANAREZ (sept. 2024). EXstat. Version 2.4.0. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-04837630>.
- HERAUT, L., E. SAUQUET et J.-P. VIDAL (13 fév. 2025). *Couples de chaînes de modélisation et de points de simulation aberrants dans l'approche multimodèles.* Jeu de données du projet Explore2. INRAE. DOI : [10.57745/YZNENQ](https://doi.org/10.57745/YZNENQ).
- HERAUT, Louis et Éric SAUQUET (2024). *Fiches de diagnostic régional des modèles hydrologiques de surface du projet Explore2.* Version V2. DOI : [10.57745/LNTOKL](https://doi.org/10.57745/LNTOKL). URL : <https://doi.org/10.57745/LNTOKL>.
- LE MOIGNE, P., F. BESSON, E. MARTIN, J. BOË, A. BOONE, B. DECHARME, P. ETCHEVERS, S. FAROUX, F. HABETS, M. LAFAYSE, D. LEROUX et F. ROUSSET-REGIMBEAU (2020). "The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France". In : *Geoscientific Model Development* 13.9, p. 3925-3946. DOI : [10.5194/gmd-13-3925-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020).
- MANN, H. B. (1945). "Nonparametric tests against trend". In : *Econometrica* 13.3, p. 245-259. DOI : [10.2307/1907187](https://doi.org/10.2307/1907187).
- MARSON, P., L. CORRE, J.-M. SOUBEYROUX, E. SAUQUET, Y. ROBIN, M. VRAC et C. DUBOIS (2024). *Synthèse sur les projections climatiques régionalisées.* Rapport technique. 134 p. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-04443633>.
- MOISSELIN, J.-M. et M. SCHNEIDER (2002). "Homogénéisation des séries françaises de précipitations couvrant le 20e siècle". In : *Houille Blanche-revue Internationale De L'Eau* 6-7, p. 126-130. DOI : [10.1051/lhb/2002096](https://doi.org/10.1051/lhb/2002096).
- PNACC3 (2025). Document de présentation. Gouvernement. 388 p. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/PNACC3.pdf>.
- SANDRE (2002). *Référentiel hydrographique.* Rapport technique. 49 p. URL : https://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/eth/2002-1/sandre_dictionnaire_ETH_2002-1.pdf.

- SAUQUET, E. et L. HÉRAUT (2024). *Notice de lecture des fiches « diagnostic » des modèles hydrologiques*. Version V1. DOI : [10.57745/MDHSOD](https://doi.org/10.57745/MDHSOD). URL : <https://doi.org/10.57745/MDHSOD>.
- SAUQUET, E., L. HÉRAUT, J. BONNEAU, A. REVERDY, L. STROHMENGER et J.-P. VIDAL (8 nov. 2023). *Diagnostic des modèles hydrologiques : des données aux résultats*. Rapport du projet Explore2. INRAE & IGE. 130 p. DOI : [10.57745/S6PQXD](https://doi.org/10.57745/S6PQXD).
- SAUQUET, E., J.P; VERGNES, G. THIREL et L. STROHMENGER (2022). *Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques*. Rapport du projet Explore2. INRAE & BRGM. 32 p. DOI : [10.57745/DE9SPE](https://doi.org/10.57745/DE9SPE).
- SEN, P. K. (1968). "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau". In : *Journal of the American Statistical Association* 63.324, p. 1379-1389. DOI : [10.1080/01621459.1968.10480934](https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934).
- SHEPHERD, T. G., E. BOYD, R. A. CALE, S. C. CHAPMAN, S. DESSAI, I. M. DIMA-WEST, H. J. FOWLER, R. JAMES, D. MARAUN, O. MARTIUS, C. A. SENIOR, A. H. SOBEL, D. A. STAINFORTH, S. F. B. TETT, K. E. TRENBERTH, B. J. J. M. Van den HURK, N. W. WATKINS, R. L. WILBY et D. A. ZENGHELIS (2018). "Storylines : an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change". In : *Climatic Change* 151, p. 555-571. DOI : [10.1007/s10584-018-2317-9](https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9).
- SOUBEYROUX, J.-M., S. BERNUS, B. DUBUISSON, A. DROUIN, T. MADEC, F. ROUSSET, R. SAMACOÏTS, M. SCHNEIDER, M. TARDY et F. TOCQUER (2025). *À quel Climat s'adapter en France selon la TRACC? - partie 2*. Rapport technique. 47 p. URL : <https://hal.science/hal-04991790v1>.
- SOUBEYROUX, J.-M., B. DUBUISSON, S. BERNUS, R. SAMACOÏTS, F. ROUSSET, M. SCHNEIDER, A. DROUIN, T. MADEC, M. TARDY et L. CORRE (2024). *À quel Climat s'adapter en France selon la TRACC? - partie 1*. Rapport technique. 20 p. URL : <https://hal.science/hal-04797481>.
- STROHMENGER, L., E. SAUQUET, C. BERNARD, J. BONNEAU, F. BRANGER, A. BRESSON, P. BRIGODE, R. BUZIER, O. DELAIGUE, A. DEVERS, G. EVIN, M. FOURNIER, S.-C. HSU, S. LANINI, A. de LAVENNE, T. LEMAITRE-BASSET, C. MAGAND, G. MENDOZA GUIMARÃES, M. MENTHA, S. MUNIER, C. PERRIN, T. PODECHARD, L. ROUCHY, M. SADKI, M. SOUTIF-BELLINGER, F. TILMANT, Y. TRAMBLAY, A.-L. VÉRON, J.-P. VIDAL et G. THIREL (2023). "On the visual detection of non-natural records in streamflow time series : challenges and impacts". In : *Hydrology and Earth System Sciences* 27.18, p. 3375-3391. DOI : [10.5194/hess-27-3375-2023](https://doi.org/10.5194/hess-27-3375-2023). URL : <https://hess.copernicus.org/articles/27/3375/2023/>.
- VICENTE-SERRANO, S., J. HANNAFORD, C. MURPHY, M. Peña GALLARDO, J. LORENZO-LACRUZ, F. DOMÍNGUEZ-CASTRO, J. I. LÓPEZ MORENO, S. BEGUERÍA, I. NOGUEAR, S. HARRIGAN et J.-P. VIDAL (2019). "Climate, irrigation, and land-cover change explain streamflow trends in countries bordering the Northeast Atlantic". In : *Geophysical Research Letters* 46.19, p. 10821-10833. DOI : [10.1029/2019GL084084](https://doi.org/10.1029/2019GL084084).
- VIDAL, J.-P., E. MARTIN, L. FRANCHISTÉGUY, M. BAILLON et J.-M. SOUBEYROUX (2010). "A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system". In : *International Journal of Climatology* 30.11, p. 1627-1644. DOI : [10.1002/joc.2003](https://doi.org/10.1002/joc.2003).

Annexes

A QMN5 - Débits normalisés saisonniers

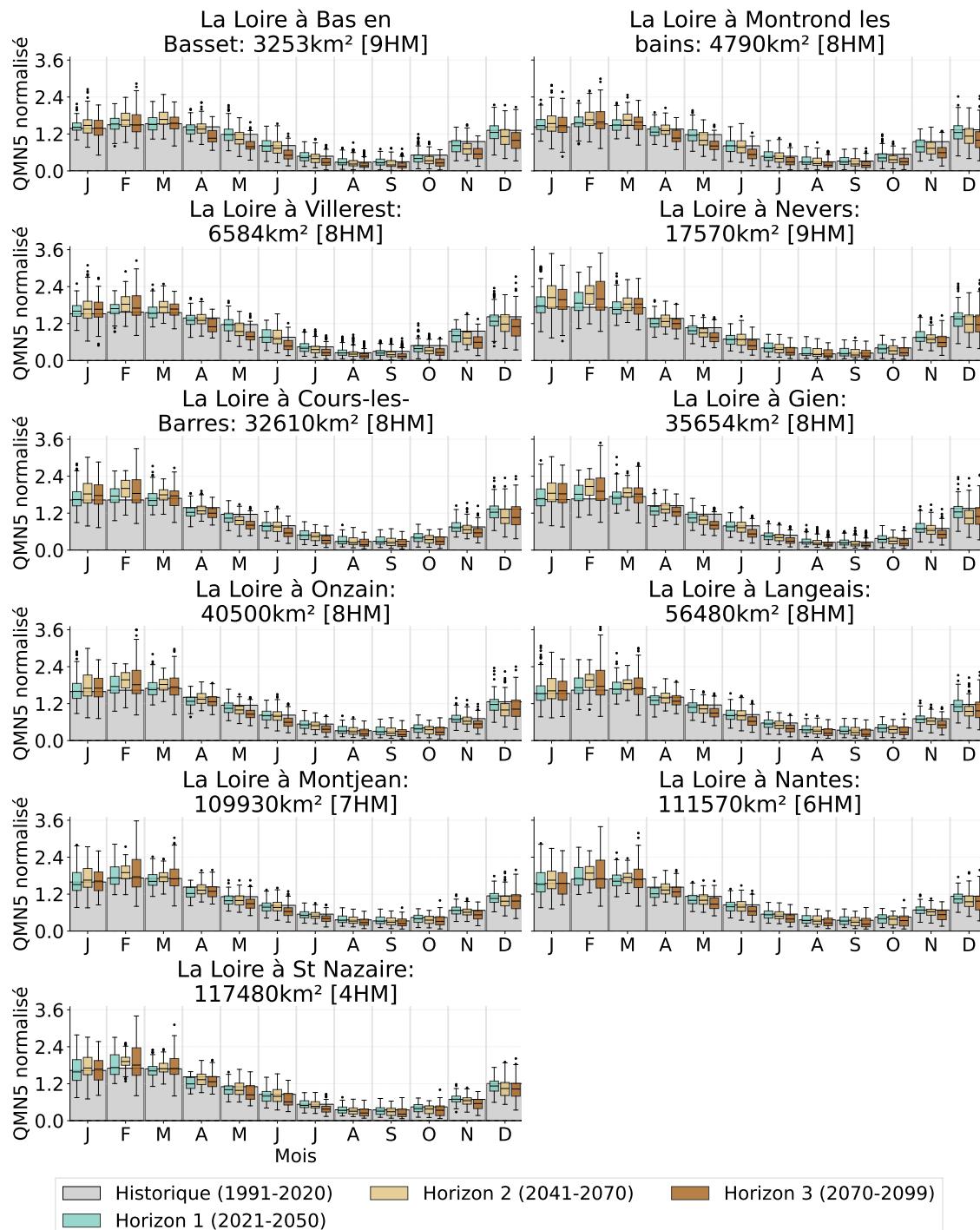


FIGURE 129. Diagramme en boîte du QMN5 normalisé par le QMN5 sur la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles de la Loire.

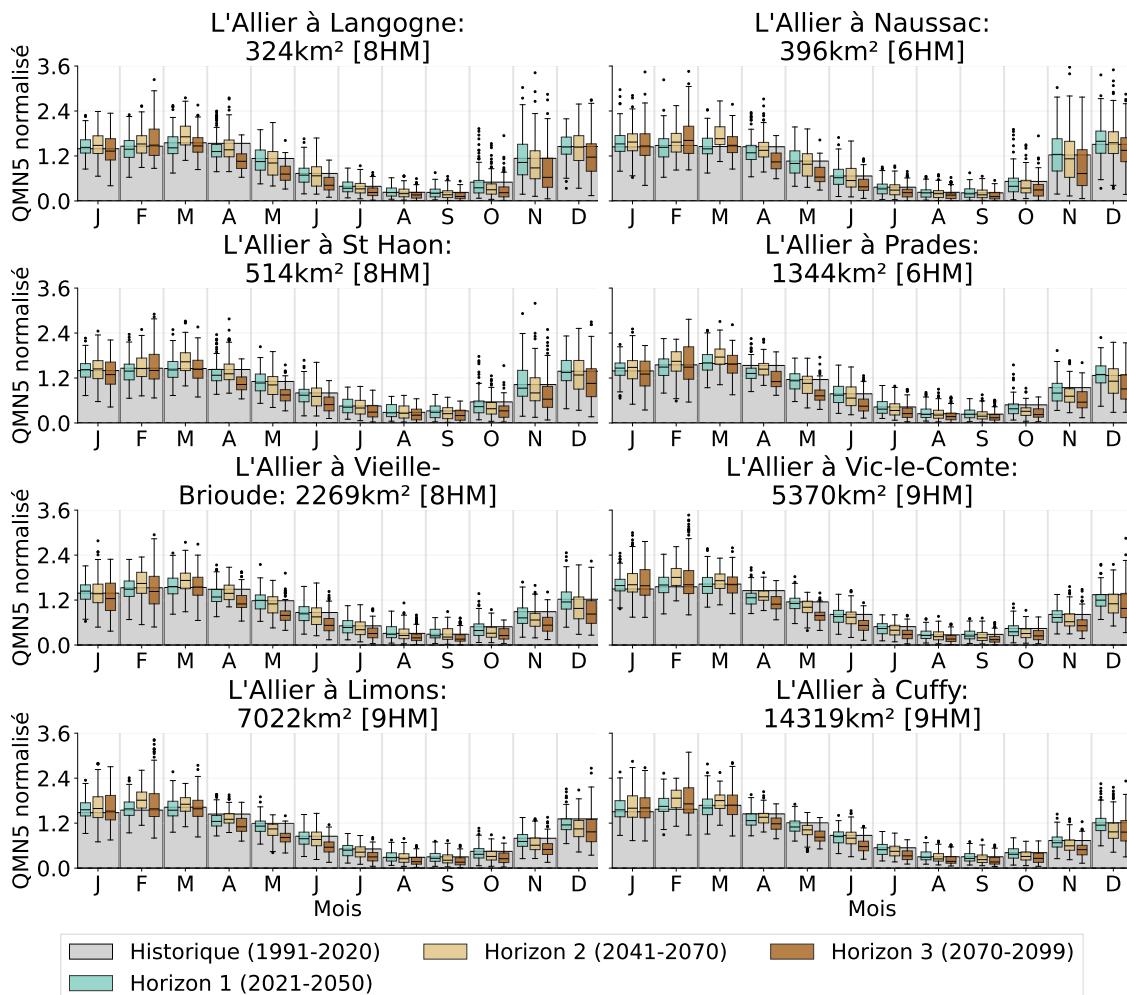


FIGURE 130. Diagramme en boîte du QMN5 normalisé par le QMN5 sur la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles de l'Allier.

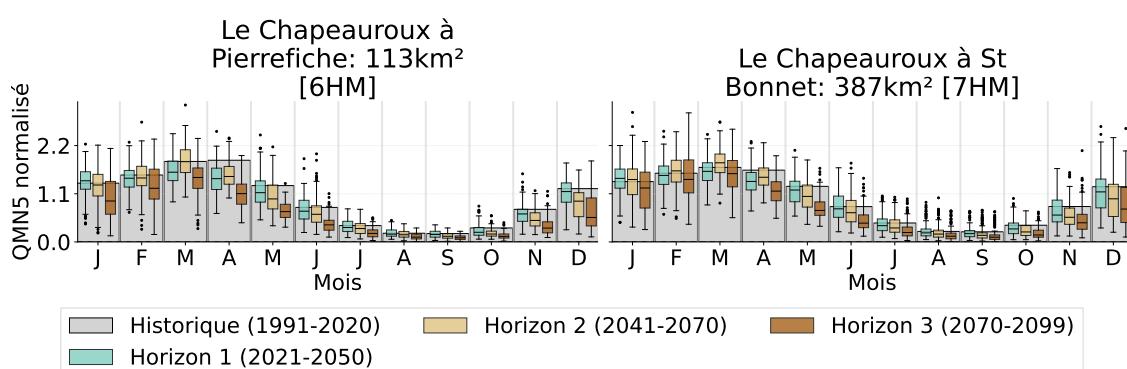


FIGURE 131. Diagramme en boîte du QMN5 normalisé par le QMN5 sur la période de référence 1991-2020 pour les stations cibles du Chapeauroux.

B Q10 - Cartes de variations

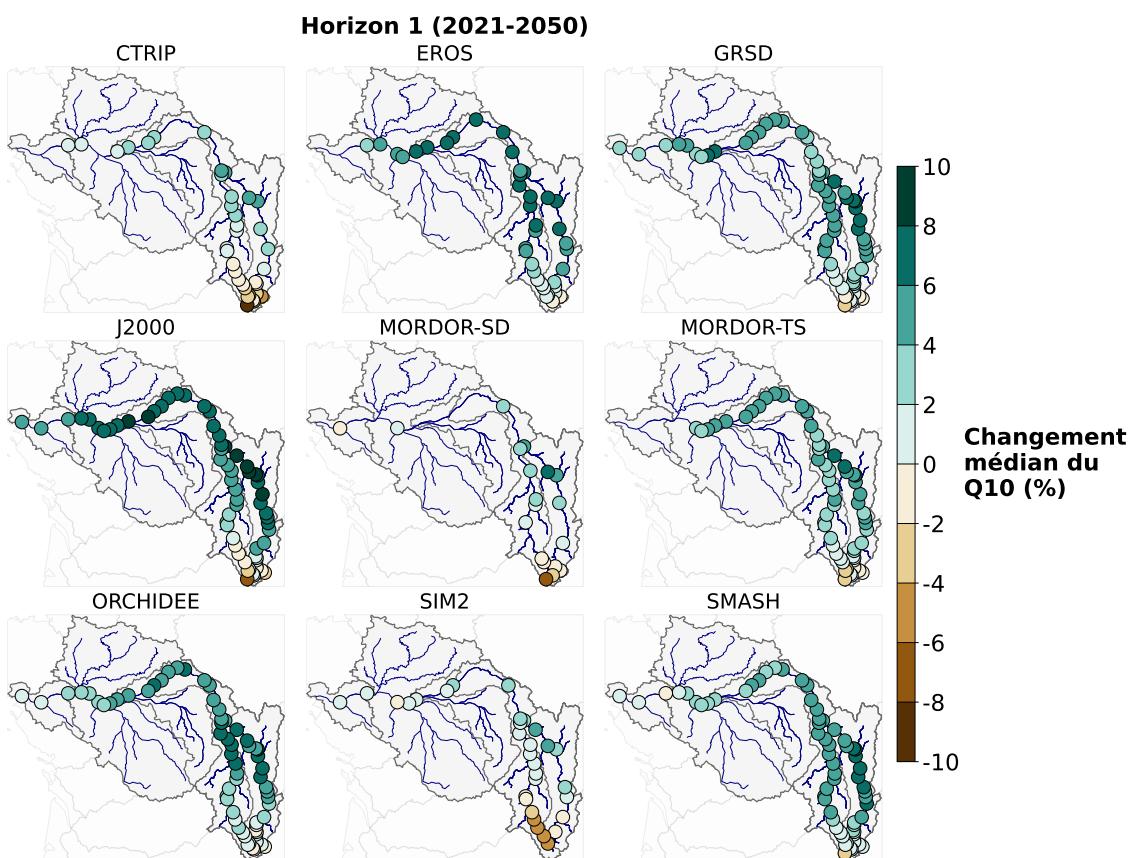


FIGURE 132. Cartes des changements médians du Q10 pour l'horizon 1 (2021-2040) par rapport à la période de référence 1991-2020.

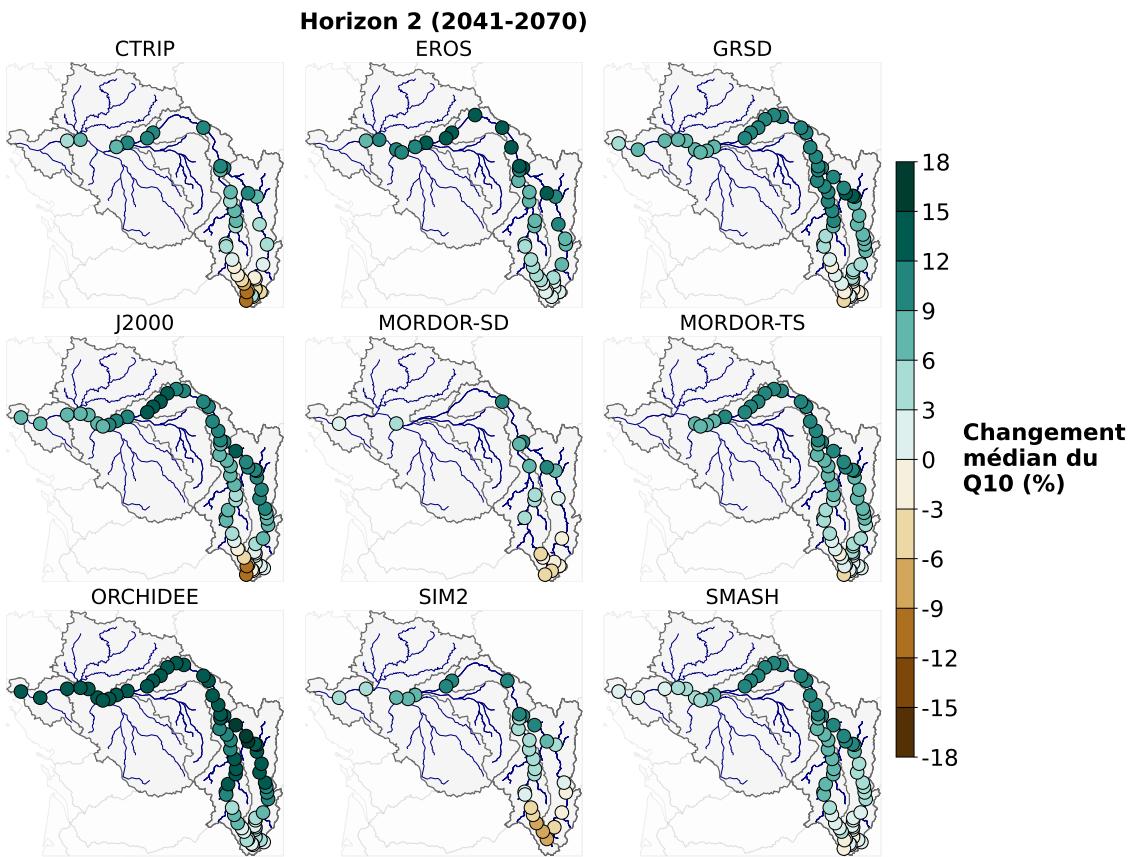


FIGURE 133. Cartes des changements médians du Q10 pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence 1991-2020.

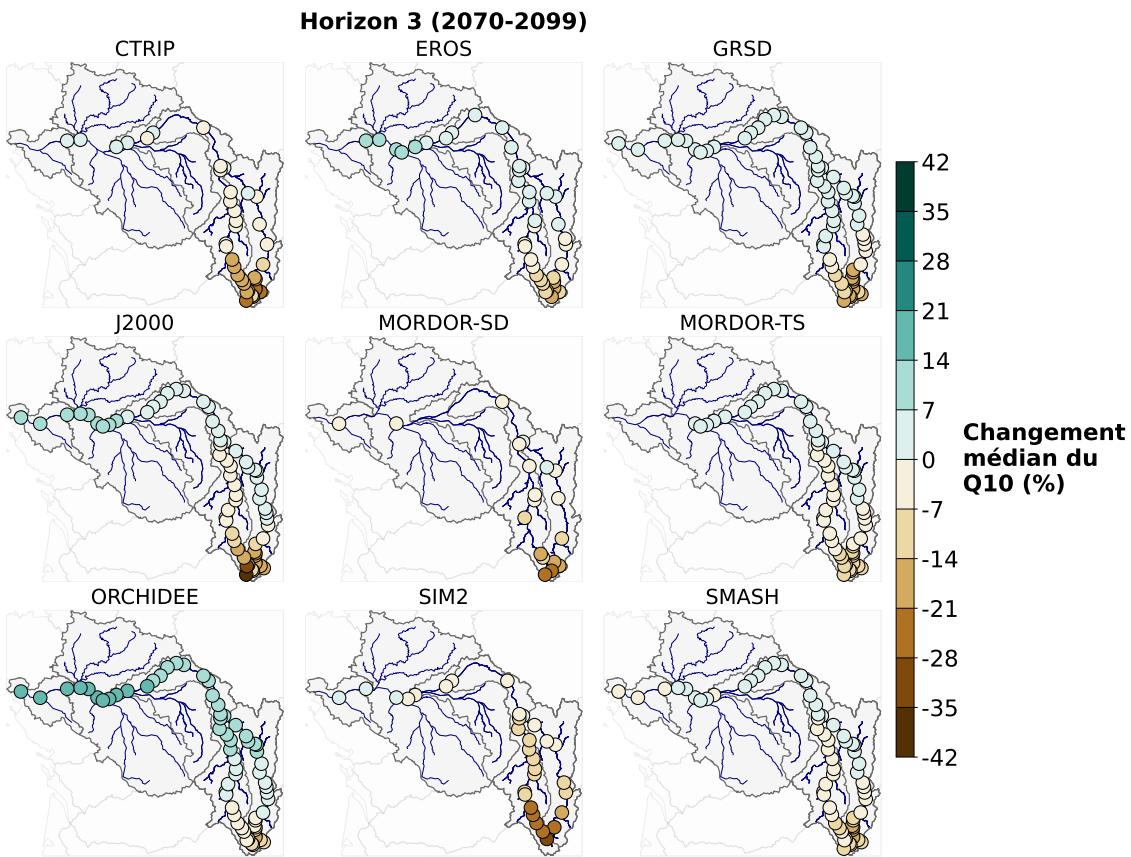


FIGURE 134. Cartes des changements médians du Q10 pour l'horizon 3 (2070-2099) par rapport à la période de référence 1991-2020.