



HAL
open science

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

Eric Sauquet, Laurent Strohmenger, Guillaume Thirel, Matthieu Le Lay

► **To cite this version:**

Eric Sauquet, Laurent Strohmenger, Guillaume Thirel, Matthieu Le Lay. Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale?. INRAE; EDF. 2024. hal-04618159

HAL Id: hal-04618159

<https://hal.inrae.fr/hal-04618159>

Submitted on 20 Jun 2024

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

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



QUELLES ÉVOLUTIONS DES RÉGIMES HYDROLOGIQUES EN FRANCE HEXAGONALE ?

Éric SAUQUET, INRAE
Laurent STROHMENGER, INRAE
Guillaume THIREL, INRAE
Matthieu LE LAY, EDF

20/06/2024

Avec le soutien financier de :



Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070.

Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir de publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

| | |
|--|--|
| Nom du projet | Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France |
| Nom du rapport | Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ? |
| Auteur(s) | Éric Sauquet, INRAE Laurent Strohmenger, INRAE Guillaume Thirel, INRAE Matthieu Le Lay, EDF |
| Numéro de version | 1 |
| Date contractuelle de remise du livrable | 01/07/2024 |
| Date effective de remise du livrable | 26/06/2024 |
| Statut du document | Version provisoire |
| Accès en ligne | Libre |
| Mots-clés (5 maximum) | Modélisation hydrologique, débits mensuels, régime hydrologique, classification de Pardé |

Table des matières

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 11 |
| 2 | Rappels méthodologiques | 12 |
| 2.1 | La chaîne de modélisation | 12 |
| 2.2 | Modèles et points de simulation | 12 |
| 3 | Evolution du régime hydrologique | 16 |
| 3.1 | Mise en place de la classification | 16 |
| 3.2 | Une classification en régimes hydrologiques actualisée | 16 |
| 3.3 | Reconstitution des régimes hydrologiques en temps présent | 18 |
| 3.4 | Altération des régimes hydrologiques | 20 |
| 3.5 | Des bassins au régime sensible aux évolutions climatiques | 29 |
| 3.6 | Vers de nouveaux régimes hydrologiques en France hexagonale ? | 32 |
| 3.7 | Quel avenir pour les régimes glaciaires ? | 35 |
| 4 | Evolution des débits annuels et saisonniers | 40 |
| 4.1 | Analyse sur l'ensemble des projections | 41 |
| 4.2 | Analyse conditionnelle aux quatre narratifs | 50 |
| 5 | Conclusions | 59 |
| 6 | Annexe 1 : Cartographie des régimes en temps présent | 60 |
| 7 | Annexe 2 : Présentation des modèles hydrologiques | 61 |
| 7.1 | CTRIP | 61 |
| 7.2 | EROS | 61 |
| 7.3 | GRSD | 64 |
| 7.4 | J2000 | 65 |
| 7.5 | MORDOR | 68 |
| 7.6 | ORCHIDEE | 70 |
| 7.7 | SIM2 | 71 |
| 7.8 | SMASH | 73 |
| 8 | Annexe 3 : Changements médians en fin de siècle | 76 |
| 9 | Remerciements | 87 |
| 10 | Références | 88 |

Résumé

Ce rapport est une des synthèses des résultats obtenus pour l'hydrologie de surface. Il fait suite aux rapport sur l'évolution du climat (MARSON *et al.*, 2024) et sur la recharge potentielle des aquifères (LANINI *et al.*, 2024), et est centré sur les variables descriptives du régime hydrologique, c'est-à-dire sur la répartition au cours de l'année des débits et sur le débit annuel. Ce rapport vient compléter les deux rapports qui examinent les débits futurs : celui dédié à l'analyse des événements extrêmes (TRAMBLAY *et al.*, 2024) et celui qui examine les incertitudes présentes dans les projections qu'elles soient climatiques ou hydrologiques (EVIN *et al.*, 2024). Des renvois à ces deux rapports ont été signalés autant que nécessaire dans les sections qui suivent.

Les évolutions du fonctionnement hydrologique des bassins versants induites par le changement climatique sont d'autant plus importantes que le scénario d'évolution en GES est émetteur. Le changement climatique affecte de manière différenciée le territoire, en fonction de l'évolution du climat régional et des processus naturels en cours actuellement sur le bassin.

Globalement, les régimes hydrologiques à dominante pluviale seront plus contrastés. Les bassins à régime mixte (alliant contributions nivale et pluviale) devraient glisser vers des régimes pluviaux. Les bassins en plus haute altitude conservent leur caractère nival mais présenteront des régimes moins contrastés avec potentiellement des étiages hivernaux moins sévères et pour les bassins influencés par les glaciers, leur emprise diminuant, les débits d'août devraient diminuer.

L'analyse sur l'ensemble des projections suggère :

- un gradient nord-sud pour les deux saisons hiver et printemps : des hausses sont suggérées sur la partie nord-est tandis que des diminutions sont suggérées dans le sud de la France.
- une baisse quasi généralisée des débits d'été et d'automne sur l'ensemble de la France hexagonale, qui témoigne d'une sévérité et d'une durée accrue des étiages.

Notons que la convergence est faible dans le nord de la France du fait de comportements différenciés. Les plaines de la Garonne et de l'Adour, ainsi que les petits fleuves côtiers méditerranéens, apparaissent comme des hot-spots avec une baisse des débits saisonniers quasi généralisée.

La réponse hydrologique aux quatre narratifs a été examinée. Les narratifs induisent des nuances surtout en hiver. Le nord de la France bénéficie de précipitations plus abondante, ce qui entraîne des débits plus importants pour les narratifs globalement « humides ». Un scénario de baisse généralisée des débits en toute saison est possible : il est porté par le narratif **orange**.

Acronymes

| Acronyme | Description |
|----------|--|
| CDF-t | Cumulative Distribution Function - Transform |
| QA | Débit (Q) annuel (A) |
| RCP | Representative Concentration Pathway |

Table des figures

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Schéma générique d'une étude d'impact en hydrologie. | 13 |
| 2 | Chaîne de modélisation retenue pour le projet Explore2. | 13 |
| 3 | Disponibilité des modèles hydrologiques sur l'ensemble des points de simulation. | 15 |
| 4 | Regroupements obtenus en utilisant les débits observés des 611 stations de référence par régime hydrologique et carte associée. Chaque trait horizontal représente les coefficients de Pardé de chaque station de référence. | 17 |
| 5 | Cartographie des régimes hydrologiques dominants selon les neuf modèles hydrologiques forcés par la réanalyse SAFRAN aux 611 stations hydrométriques de référence. | 19 |
| 6 | Carte des régimes hydrologiques tous modèles hydrologiques confondus selon SAFRAN (a), selon les projections corrigées par ADAMONT tous RCPs confondus (b) et par CDF-t tous RCPs confondus (c) sur la période de référence 1976-2005. | 20 |
| 7 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux horizons H0 (a), H2 (b) et H3 (c) selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP2.6, tous modèles hydrologiques confondus. | 21 |
| 8 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux horizons H0 (a), H2 (b) et H3 (c) selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP4.5, tous modèles hydrologiques confondus. | 22 |
| 9 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP8.5, tous modèles hydrologiques confondus. | 23 |
| 10 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP2.6, tous modèles hydrologiques confondus. | 24 |
| 11 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP4.5, tous modèles hydrologiques confondus. | 25 |
| 12 | Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP8.5, tous modèles hydrologiques confondus. | 26 |
| 13 | Répartition des points de simulation dans les classes aux différents horizons par méthode de correction, tous modèles hydrologiques confondus. | 28 |
| 14 | Localisation des points avec une modification significative de régimes hydrologiques dominants obtenus avec ADAMONT sous RCP8.5 entre la période de référence et la fin de siècle. | 30 |
| 15 | Localisation des points avec une modification significative de régimes hydrologiques dominants obtenus avec CDF-t sous RCP8.5 entre la période de référence et la fin de siècle. | 31 |
| 16 | Médianes des coefficients de Pardé calculés sur les observations des stations de référence (segment noir, a) et sur les projections hydrologiques pour les différents horizons sous RCP8.5, par méthode de correction de biais (segment gris, b, c), tous modèles hydrologiques confondus et pour la classe nivale. | 33 |
| 17 | Médianes des coefficients de Pardé calculés sur les observations des stations de référence (segment noir, a) et sur les projections hydrologiques pour les différents horizons sous RCP8.5, par méthode de correction de biais (segment gris, b, c), tous modèles hydrologiques confondus et pour la classe pluviale très contrastée. | 34 |
| 18 | Relation surface-volume identifiée à partir de (FARINOTTI <i>et al.</i> , 2019), sur la base de 3927 glaciers des Alpes européennes. | 36 |
| 19 | Evolution des superficies, des bilans de masse, des contributions glaciaires et des débits sur le bassin du Doron de Bozel à la Perrière, pour la période 1976-2100. Les observations (ou reconstructions dans le cas des <i>SMB</i>) sont représentées en noir. Les simulations historiques, forcées par les données SAFRAN, sont figurées en gris. Les projections sont représentées en bleu (RCP4.5) et rouge (RCP8.5). Les projections médianes sont représentées par des traits épais. | 37 |

| | | |
|----|---|----|
| 20 | Evolution des superficies, des bilans de masse, des contributions glaciaires et des débits sur le bassin du Vénéon à Plan du Lac pour la période 1976-2100. Les observations (ou reconstructions dans le cas des <i>SMB</i>) sont représentées en noir. Les simulations historiques, forcées par les données SAFRAN, sont figurées en gris. Les projections sont représentées en bleu (RCP4.5) et rouge (RCP8.5). Les projections médianes sont représentées par des traits épais. | 38 |
| 21 | Médianes des coefficients de Pardé sur la période de référence, en milieu de siècle et en fin de siècle obtenues avec MORDOR-SD pour le Doron de Bozel à la Perrière (a) et le Vénéon à Plan du Lac (b) sous RCP8.5, toutes méthodes de correction confondues. Chaque trait horizontal représente les coefficients de Pardé de MORDOR-SD alimenté par une projection climatique. | 39 |
| 22 | Indice d'accord multi-modèle <i>MIA</i> pour les débits saisonniers pour le RCP2.6 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 43 |
| 23 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP2.6, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 44 |
| 24 | Indice d'accord multi-modèle <i>MIA</i> pour les débits saisonniers pour le RCP4.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 45 |
| 25 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP4.5, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 46 |
| 26 | Indice d'accord multi-modèle <i>MIA</i> pour les débits saisonniers pour le RCP8.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 47 |
| 27 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP8.5, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 48 |
| 28 | Indice d'accord multi-modèle <i>MIA</i> pour le débit annuel par RCP (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 49 |
| 29 | Changements relatifs médians (%) des débits annuels par RCP, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). | 50 |
| 30 | Changements en température et en précipitations sur la France selon les 34 simulations sous RCP8.5 avec identification des quatre narratifs sur les saisons hiver et été, comparés aux quantiles 5 % et 95 % (Q5 et Q95) de l'ensemble CMIP6 (« CMIP6 ») et CMIP6 contraint (« CMIP6 cont. ») par les observations pour les températures. | 52 |
| 31 | Changements relatifs médians (%) des débits d'hiver (DJF) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus. | 54 |
| 32 | Changements relatifs médians (%) des débits de printemps (MAM) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus. | 55 |
| 33 | Changements relatifs médians (%) des débits d'été (JJA) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus. | 56 |
| 34 | Changements relatifs médians (%) des débits d'automne (SON) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus. | 57 |
| 35 | Changements relatifs médians (%) par des débits annuels par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus. | 58 |
| 36 | Carte des régimes hydrologiques par modèle hydrologique forcé par SAFRAN sur la période 1976-2005. | 60 |
| 37 | Représentation schématique du modèle couplé ISBA-CTRIP. | 62 |
| 38 | Représentation du réseau hydrographique de CTRIP à la résolution de 1/12° sur la France hexagonale. | 62 |
| 39 | Schéma de principe du modèle GARDENIA. Cette configuration utilise un seul réservoir souterrain à deux orifices de vidange permettant de simuler un effet de débordement ou une fracture. | 63 |
| 40 | Points de restitution du modèle EROS-Bretagne (débit et niveau piézométrique) (a) et du modèle EROS-Loire (débit) (b). | 64 |
| 41 | Schéma de fonctionnement du modèle GR4J (source : PERRIN et al. (2003)). | 66 |
| 42 | Schéma conceptuel du modèle hydrologique J2000 dans chaque maille du modèle. | 67 |

| | | |
|----|---|----|
| 43 | Schéma conceptuel du routage des flux hydrologiques entre HRU puis dans le réseau hydrographique. | 68 |
| 44 | Schéma de principe du modèle MORDOR. | 69 |
| 45 | Schématisation des principaux processus hydrologiques (hors évapotranspiration et neige) dans une maille ORCHIDEE. | 71 |
| 46 | Diagramme de fonctionnement de la chaîne SIM2. | 72 |
| 47 | Diagramme de fonctionnement de SAFRAN adapté de (QUINTANA SEGUÍ, 2008). Les variables météorologiques sont les précipitations quotidiennes (P), les lames d'eau (R), la précipitation neigeuse (S), la température de l'air (T), la vitesse du vent (W), l'humidité relative (RH), l'humidité spécifique (SH), le rayonnement solaire incident (SR), le rayonnement infra rouge incident (IR) et la nébulosité (N). | 73 |
| 48 | Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de surface Isba, d'après (QUINTANA SEGUÍ, 2008). Les flèches montrent les principaux flux d'eau. | 74 |
| 49 | Schéma de principe de Modcou : l'eau est transférée vers la rivière, puis propagée le long du réseau hydrographique de surface avec un pas de temps de 3 heures. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière. | 74 |
| 50 | Représentation du modèle hydrologique distribué SMASH avec $P(x,t)$ le champ pluie, $E(x,t)$ le champ d'évapotranspiration potentielle, $\theta(x)$ le champ de paramètre, $h(x,t)$ le champ d'état et $Q(x,t)$ le débit routé. | 75 |
| 51 | Régions hydrographiques en France hexagonale. | 77 |

Liste des tableaux

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Quelques caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2. | 14 |
| 2 | Médianes des coefficients de Pardé de la classe du régime nival N avec les projections climatiques corrigées par ADAMONT pour le RCP8.5. | 32 |
| 3 | Médianes des coefficients de Pardé de la classe du régime nival N avec les projections climatiques corrigées par CDF-t pour le RCP8.5. | 33 |
| 4 | Caractéristiques médianes de la classe du régime pluvial très contrasté PTC avec les projections climatiques corrigées par ADAMONT pour le RCP8.5. | 34 |
| 5 | Caractéristiques médianes de la classe du régime pluvial très contrasté PTC avec les projections climatiques corrigées par CDF-t pour le RCP8.5. | 35 |
| 6 | Echantillon de bassins avec une modélisation des glaciers. | 36 |
| 7 | Statistiques sur les signes des tendances projetées sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus, par RCP. | 41 |
| 8 | Statistiques sur les signes des tendances projetées sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus par narratif. | 53 |
| 9 | Quelques caractéristiques du modèle hydrologique J2000 | 68 |
| 10 | Dénomination et description des régions hydrographiques | 76 |
| 11 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP2.6 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur <i>MIA</i> suggère un consensus. | 78 |
| 12 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP4.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur <i>MIA</i> suggère un consensus. | 79 |
| 13 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP8.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur <i>MIA</i> suggère un consensus. | 80 |
| 14 | Changements relatifs médians (%) des débits annuels par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) par RCP (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur <i>MIA</i> suggère un consensus. | 81 |
| 15 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif vert. | 82 |
| 16 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif jaune. | 83 |
| 17 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif violet. | 84 |
| 18 | Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif orange. | 85 |
| 19 | Changements relatifs médians (%) des débits annuels par narratif et par région hydrographique (médiane, minimum, maximum). | 86 |

1 Introduction

Le projet **Explore2**, porté par INRAE et l'Office International de l'Eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070. Officiellement lancé en juillet 2021, cofinancé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet **Explore2** a l'ambition, d'ici 2024, de mettre à jour les connaissances de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie, et de faciliter l'appropriation des données produites, des incertitudes inhérentes à l'exercice et des résultats par les acteurs de l'eau.

Ce rapport a pour objectif de résumer les évolutions du régime hydrologique aux points de simulation. L'analyse est centrée sur les moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles des débits.

La première section [Rappels méthodologiques](#) (page 12) expose les grands principes des chaînes de modélisation utilisées dans le cadre d'Explore2 pour produire les projections hydrologiques.

La seconde section [Evolution du régime hydrologique](#) (page 16) se concentre sur la réponse des bassins versants au changement climatique au travers de l'analyse du régime hydrologique. Le régime hydrologique tel qu'il est appréhendé ici est la synthèse, via une classification, des variations des débits mensuels moyens. Un focus concerne le régime glaciaire sur la base de bassins dont on a explicitement modélisé les évolutions des surfaces en glace et les contributions des glaciers aux débits.

La dernière section [Evolution des débits annuels et saisonniers](#) (page 40) apporte un éclairage sur le signe et l'intensité des changements sur les débits saisonniers et annuels. Les résultats obtenus avec les quatre narratifs (MARSON *et al.*, 2024) viennent illustrer la dispersion des changements possibles.

Les Annexes font état des régimes hydrologiques actuels ([Annexe 1 : Cartographie des régimes en temps présent](#), page 60), décrivent de manière succincte les modèles hydrologiques de surface ([Annexe 2 : Présentation des modèles hydrologiques](#), page 61) et chiffrent l'intensité des changements par région hydrographique ([Annexe 3 : Changements médians en fin de siècle](#), page 76).

Ce rapport vient compléter les deux rapports qui examinent les débits futurs : celui dédié à l'analyse des événements extrêmes (TRAMBLAY *et al.*, 2024) et celui qui examine les incertitudes présentes dans les projections (EVIN *et al.*, 2024). Des renvois à ces deux rapports seront signalés autant que nécessaire dans les sections qui suivent.

2 Rappels méthodologiques

2.1 La chaîne de modélisation

La chaîne de modélisation mobilisée dans **Explore2** reprend la structure classique d'une modélisation numérique de l'impact du changement climatique en hydrologie (Figure 1). Elle s'inscrit dans une démarche multi-modèles et multi-scénarios : nous exploitons ainsi les résultats de plusieurs modèles pour apprécier au mieux la dispersion des futurs. C'est également une approche « emboîtée » avec, en première entrée, une vision à l'échelle globale du climat. La chaîne de modélisation prend en charge le changement d'échelles pour aboutir finalement au climat local et aux échelles de gestion des hydrosystèmes.

Pour mémoire, en amont de cette chaîne, des scénarios d'émission définissent l'évolution de la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre et en aérosols au cours du XXI^e siècle. Ces scénarios sont ensuite traduits en projections climatiques d'abord réalisées à l'échelle globale par des modèles de circulation générale simulant le climat de la Terre entière à une résolution de 100 à 200 km.

Dans le cadre du projet **Explore2**, des modèles climatiques régionaux (RCMs) pilotés par les modèles globaux, simulent le climat à haute résolution sur des zones restreintes. Ici c'est un ensemble EURO-CORDEX qui a été mobilisé. Il contient plus d'une centaine de projections climatiques qui couvrent l'Europe à la résolution de 12 km. Les projections EURO-CORDEX déclinent à haute résolution sur l'Europe les projections globales de l'exercice de simulation CMIP5, à la base du 5^e rapport du GIEC. Enfin, des ajustements statistiques visent à corriger certains défauts des simulations climatiques en affinant la résolution spatiale et en corrigeant leurs biais par rapport à un jeu de données de référence. Ici, deux méthodes de correction de biais ont été appliquées. Il s'agit de deux variantes de la méthode « quantile-mapping » (ROBIN *et al.*, 2023, MARSON *et al.*, 2024). Dans sa forme la plus simple, la méthode de correction « quantile-mapping » cherche à reproduire à l'identique la distribution statistique des variables sur la période de référence.

La dernière composante de la chaîne de modélisation est constituée des modèles d'impact. Quand on traite de manière exhaustive la question du devenir de la gestion de l'eau, deux types de modèles sont considérés :

- les modèles de représentation du cycle naturel de l'eau. Ils décrivent le futur des différentes composantes du cycle naturel de l'eau. Ces représentations fournissent ce que nous avons appelé « hydrologie de référence »,
- des modèles d'usage de l'eau : c'est-à-dire les actions de prélèvements, de stockage, et de rejets des eaux dans les milieux, les règles de gestion et la réglementation (par exemple, limitations ou restrictions des prélèvements).

Le projet fournit une « hydrologie de référence » sur laquelle bâtir des exercices prospectifs, c'est-à-dire simuler les actions anthropiques sur la gestion de l'eau et sur le bassin versant. La Figure 2 présente les principales caractéristiques de la chaîne de modélisation d'Explore2. Seule la ressource naturelle a été simulée. Les différents modèles viennent traduire les projections climatiques en projections hydrologiques descriptives de la ressource en eau : débits en rivière, recharge potentielle et niveaux piézométriques.

Dans ce rapport, nous nous intéresserons uniquement aux simulations de débits naturels.

L'Annexe 2 : Présentation des modèles hydrologiques (Section 7, page 61) propose une brève description des modèles hydrologiques de surface à l'origine de ces débits. Pour plus de détails, le lecteur se reportera à l'Annexe du rapport dédié au diagnostic des modèles hydrologiques (SAUQUET *et al.*, 2023). Les supports et les points des simulations hydrologiques ont été présentés par SAUQUET *et al.* (2022).

2.2 Modèles et points de simulation

Les projections de débits ont été obtenues par application de neuf modèles (SAUQUET *et al.*, 2023) qui ont ainsi pu fournir des résultats sur l'ensemble de la France hexagonale ou sur des grands bassins versants (Tableau 1). Le rapport sur les points et supports de simulation des projections hydrologiques (SAUQUET

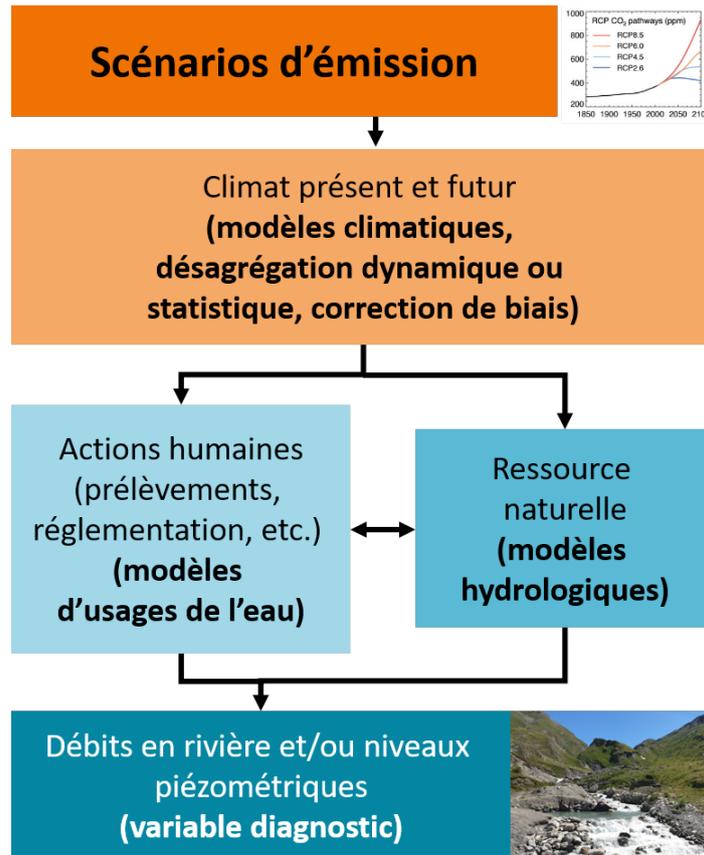


FIGURE 1 : Schéma générique d'une étude d'impact en hydrologie.

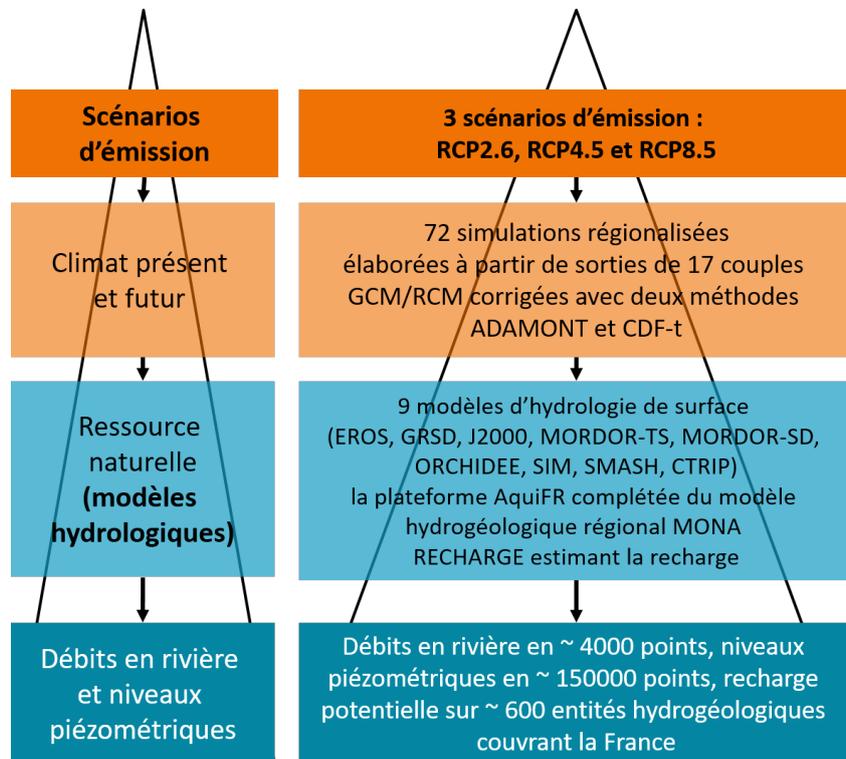


FIGURE 2 : Chaîne de modélisation retenue pour le projet Explore2.

et al., 2022b) affichait l'ambition de fournir des débits journaliers en 4369 points répartis uniformément sur le territoire métropolitain. Aucun modèle ne peut fournir des simulations sur l'intégralité de ces points, y compris ceux qui ont une application nationale (Tableau 1, dernière colonne). La raison principale tient à la difficulté, dans certains cas, de positionner les points de simulation sur la représentation du réseau hydrographique utilisée par chaque modèle. Rappelons aussi que les modèles **CTRIP**, **SIM2** et **ORCHIDEE** n'ont pas pu valoriser les projections corrigées par CDF-t (nécessité d'utiliser en entrée des données horaires, disponibles uniquement avec la méthode de correction ADAMONT).

Finalement, une majorité de points dispose de simulations de trois ou quatre modèles hydrologiques et près de 4000 points sont renseignés par au moins un modèle hydrologique. C'est dans le bassin de la Loire (du fait des domaines d'application de **MORDOR-TS**, **EROS** et **J2000**) que les simulations de débits sont les plus nombreuses. Sous RCP8.5, aux points de simulation, le nombre de simulations est un multiple de 17 (ce qui correspond au nombre de projections climatiques disponibles), évoluant entre 17 (pour 54 points de simulation) et 255 (pour 31 points de simulation).

L'analyse réalisée ici se concentre plus particulièrement sur un sous-ensemble de 2500 points de simulation pour lesquels au moins quatre modèles hydrologiques ont fourni des simulations de débits (Figure 3). Ainsi, nous intégrons les incertitudes portées par les modèles hydrologiques et limitons le risque de faire apparaître dans les statistiques calculées des comportements atypiques liés aux résultats d'un seul modèle hydrologique. Ce sous-échantillonnage des résultats permet malgré tout d'avoir relativement une bonne couverture du territoire métropolitain, avec cependant une densité un peu plus faible en Nouvelle-Aquitaine et dans les Hauts-de-France. L'ensemble des résultats pour tous les points de simulation est disponible sur le portail DRIAS-Eau et synthétisé sur des fiches de synthèse (HERAUT et SAUQUET, 2024).

| Nom | Organisme | Région(s) simulée(s) | Nombre de points de simulation |
|------------------|--------------|----------------------|--------------------------------|
| CTRIP | Météo-France | France | 2018 |
| EROS | BRGM | Bretagne Loire | 387 |
| GRSD | INRAE | France | 3712 |
| J2000 | INRAE | Loire Rhône | 1291 |
| MORDOR-SD | EDF | France | 611 |
| MORDOR-TS | EDF | Loire | 535 |
| ORCHIDEE | IPSL | France | 3587 |
| SIM2 | Météo-France | France | 649 |
| SMASH | INRAE | France | 3821 |

TABLEAU 1 : Quelques caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2.

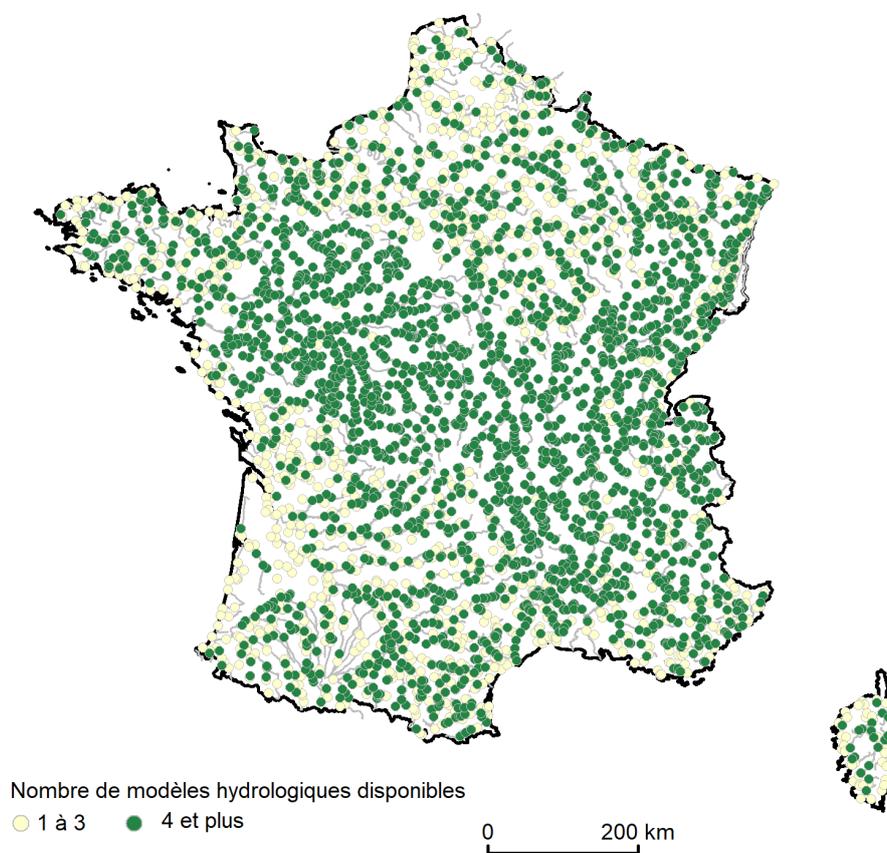


FIGURE 3 : Disponibilité des modèles hydrologiques sur l'ensemble des points de simulation.

3 Evolution du régime hydrologique

Le fonctionnement d'un bassin versant peut être approché par une représentation détaillée de tous les processus d'évapotranspiration, de transferts de l'eau intervenant, en surface et en souterrain. Une autre approche exploite la notion de régime hydrologique (PARDÉ, 1933) qui résume le comportement du cours d'eau par un nombre réduit de statistiques de débit. Nous avons repris, ici, la définition historique du régime hydrologique décrit par les douze coefficients de Pardé CM_i , $i = 1, \dots, 12$. Ce coefficient adimensionnel CM est défini comme le ratio du débit mensuel moyen interannuel considéré, divisé par le module (débit annuel moyen interannuel). Cette définition permet de visualiser les variations saisonnières des écoulements et de comparer les bassins indépendamment de leur taille. Les coefficients exprimés en % quantifient la répartition du volume annuel dans l'année et est usuellement adossée à une classification en régimes-types. Des bassins versants aux valeurs de CM similaires peuvent ainsi être rassemblés et les regroupements peuvent être interprétés en termes de processus dominants à l'origine des écoulements et renseigner la variabilité temporelle des flux (alternance des saisons des hautes et basses eaux dans l'année).

Les différentes étapes engagées sont les suivantes :

- mise en place d'une classification en régimes-types représentative de l'hydrologie actuelle sur la base des débits aux 611 stations hydrométriques de référence (SAUQUET *et al.*, 2022a),
- examen de la capacité des modèles hydrologiques à reproduire les régimes hydrologiques actuels sur la période de référence 1976-2005,
- analyse des basculements d'une classe de régime à une autre aux différents horizons sur un sous-ensemble de points de simulation,
- caractérisation des nouveaux régimes hydrologiques,
- analyse spécifique d'un régime-type : les bassins versants influencés par la présence de glaciers.

3.1 Mise en place de la classification

L'identification des régimes-types est assistée par des outils de classification automatique, à l'image de la classification proposée par SAUQUET *et al.* (2008). L'objectif est d'établir des groupes d'individus « similaires ». Ce principe simple de similitude peut se décliner numériquement de différentes manières (panel étendu de méthodes, de mesure de dissimilarité et de critères optimaux de regroupement). La stratégie de regroupement choisie s'appuie sur la méthode de Ward qui minimise les distances à l'intérieur des classes constituées et maximise les distances entre les classes. A la première étape, chaque individu définit sa propre classe. Ensuite, les deux classes les plus proches sont fusionnées et forment un noeud. Ce processus se poursuit à l'identique jusqu'au regroupement de l'ensemble des individus. Le choix du nombre de classes à conserver relève d'une expertise.

L'application concerne le jeu de 611 séries de débits aux stations de référence. Les coefficients de Pardé sont calculés sur la période de disponibilité validée par le consortium. Le degré de similitude entre deux séries composées des douze coefficients de Pardé CM_i , $i = 1, \dots, 12$ est mesuré par la racine carrée de la somme des écarts quadratiques (distance euclidienne).

3.2 Une classification en régimes hydrologiques actualisée

Comme évoqué précédemment, le nombre de classes est le résultat d'un choix. Il est partiellement objectif en examinant le graphique représentant l'indice de dissimilarité en fonction du niveau d'agrégation (qui mesure en quoi scinder une classe permet de gagner en homogénéité à l'intérieur des nouvelles classes). Aux sauts les plus importants correspondent des réductions d'hétérogénéité significatives. Le choix a également reposé sur la nécessité de faire émerger une classe sous-représentée dans l'échantillon de stations de référence, celle des cours d'eau au régime nival. Finalement, sept classes ont été identifiées faisant sens pour l'hydrologie.

La Figure 4-a décrit les hydrogrammes formés des douze coefficients de Pardé des stations de référence

contribuant aux sept regroupements. Les allures des hydrogrammes ont été interprétées et leur nom fait référence au mode d'alimentation principal et au caractère contrasté des variations saisonnières. Notons que la classe **PN** contient également des régimes hydrologiques marqués par des épisodes méditerranéens (ce qui explique par la suite leur positionnement sur les cartes de France).

La Figure 4-b représente la répartition spatiale des régimes hydrologiques observés en France hexagonale. Sans surprise, les régimes aux contributions nivales pures ou atténuées (**N**, **NP**, **PN**) se situent dans les zones à relief. Le régime pluvial modérément contrasté (**PMC**) se rencontre dans le Bassin parisien (effet régulateur naturel des nappes). Les différents régimes pluviaux (**PTC**, **PC**, **P**, **PMC**) se rencontrent partout en France et se distinguent par le contraste entre hiver et été : les représentants du régime **PMC** affichent peu de variations des $CM_i, i = 1, \dots, 12$ autour de $1/12$; à l'opposé, se situent les représentants du régime pluvial très contrasté (**PTC**) avec des rapports de 1 à 4 entre les coefficients mensuels de août-septembre $CM_i, i = 8, 9$ et ceux de janvier-février $CM_i, i = 1, 2$.

Sans surprise, sur le territoire métropolitain, les régimes pluviaux (**PTC**, **PC**, **P**, **PMC**) sont majoritaires (504 sur les 611 stations de référence) et les régimes nivaux (**N**, **NP**, **PN**) minoritaires (107 sur les 611 stations de référence).

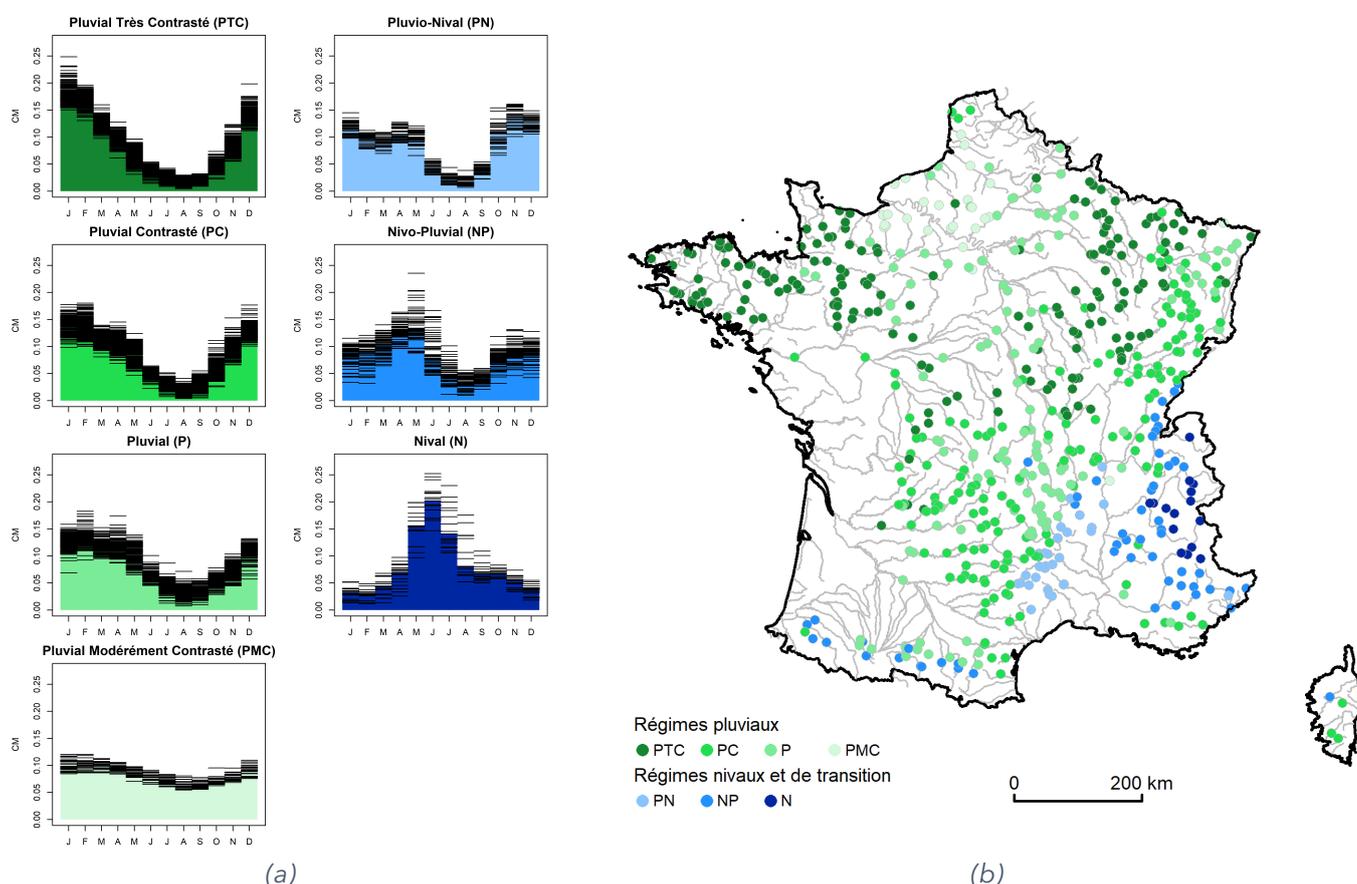


FIGURE 4 : Regroupements obtenus en utilisant les débits observés des 611 stations de référence par régime hydrologique et carte associée. Chaque trait horizontal représente les coefficients de Pardé de chaque station de référence.

Dans la suite de l'analyse, l'affectation d'un point de simulation à une des sept classes s'effectuera selon le même critère de distance euclidienne que celui considéré dans la procédure de classification. L'algorithme va rechercher parmi les 611 stations de référence, celle qui est la plus proche. Finalement, la classe attribuée est celle de la station de référence pour laquelle la distance est minimale. Ce processus permet d'affecter une classe à chaque projection et chaque point de simulation (quoiqu'il arrive, le régime le plus proche existe toujours et il n'y a pas d'orphelin) à un horizon donné. Dans le cadre d'une estimation sur un ensemble de N projections hydrologiques, nous retiendrons la classe dominante parmi les N attribuées.

individuellement pour chaque projection au point de simulation.

3.3 Reconstitution des régimes hydrologiques en temps présent

Les modèles hydrologiques ont fait l'objet d'un diagnostic sur la base d'indicateurs numériques (SAUQUET *et al.*, 2023). Aucun n'a pris en compte la reconstitution du régime hydrologique. Un diagnostic complémentaire a été engagé ici. L'objectif est d'examiner si la chaîne de modélisation, qu'elle soit alimentée par la réanalyse SAFRAN ou par les runs historiques, conduit aux régimes observés aux 611 points de référence. La qualité de reconstitution est mesurée classiquement par la matrice de confusion (qui établit la répartition entre types de régime observés et simulés) et résumée par le taux de bassins versants bien classés.

La cartographie des régimes simulés par les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN (Figure 5) correspond largement aux régimes observés (Figure 4-b). Les douze coefficients de Pardé simulés avec en entrée SAFRAN sont calculés sur la période 1976-2005. Au point considéré, la classe la plus représentée définit le régime hydrologique.

Les cartes présentant les régimes attribués sur la base des simulations avec SAFRAN en entrée des modèles hydrologiques sont intégrées dans l'Annexe 1 : Cartographie des régimes en temps présent (Section 6, page 60). Nous retrouvons une dichotomie entre les modèles dont les paramètres sont ajustés par optimisation numérique (EROS, GRSD, MORDOR-SD, SMASH) avec des taux entre 72 % (EROS) et 88 % (MORDOR-SD) et les autres modèles dont le taux de bon classement oscillent entre 45 % (CTRIP) et 62 % (J2000). Retenons que :

- le modèle CTRIP est pénalisé par une mauvaise reconstitution des régimes hydrologiques en haute montagne (incapacité à reproduire les régime de la classe N) et dans les secteurs aux échanges nappes-rivière actifs (incapacité à reproduire les régimes de la classe PMC dans le nord de la France),
- le modèle SIM2 présente les mêmes difficultés en montagne que CTRIP,
- le modèle ORCHIDEE partage les mêmes difficultés que CTRIP dans le nord de la France : aucun bassin modélisé parmi les 611 ne rejoint la classe PMC.

Ces éléments sont cohérents avec le diagnostic porté sur les modèles hydrologiques (SAUQUET *et al.*, 2023). Globalement, les modèles montrent une bonne aptitude à distinguer les régimes aux contributions nivales pures ou atténuées (N, NP, PN) des régimes à dominante pluviale (PTC, PC, P, PMC). Ainsi, plus de 92% des bassins sont bien positionnés dans les classes, si on s'en tient à deux regroupements distincts (N, NP, PN) et (PTC, PC, P, PMC).

La même analyse a été réalisée sur les sorties des modèles hydrologiques alimentés par les projections climatiques sur la période de référence 1976-2005 (H0), afin d'examiner si une dégradation des performances de reconstitution des régimes était perceptible. L'attribution a été effectuée sur le principe du régime dominant (i.e. le plus fréquemment simulé parmi toutes les projections disponibles au point considéré). L'analyse concerne les 2500 points disposant de plus de quatre modèles hydrologiques (en vert sur la Figure 3). Les modélisations exploitant les projections climatiques corrigées avec ADAMONT et celles corrigées avec CDF-t sont examinées séparément.

En toute logique, les taux de bon classement évalué sur les 611 stations de référence chutent : ils sont inférieurs à ceux obtenus avec SAFRAN du fait d'une reconstitution du climat imparfaite mais sont sensiblement équivalents. En outre, pour les modèles valorisant les projections obtenues avec la méthode de correction de biais CDF-t, il n'y a pas de forts écarts de performance comparativement à celles constatées avec les projections corrigées par ADAMONT. Les qualités et défauts des modèles évoqués plus haut sur les résultats des modèles obtenus avec SAFRAN demeurent.

Les cartes de la Figure 6 montrent les régimes hydrologiques reconstitués avec les différents forçages pour la période de référence 1976-2005. La répartition spatiale des régimes en Figure 6-a associée aux simulations obtenues avec SAFRAN est cohérente avec celle perceptible sur un ensemble de points moins dense (Figure 5) et avec celle déduite des sorties des modèles de climat en période historique (Figure 6-b et -c). Il convient d'ajouter que certaines erreurs de classification apparente peuvent en fait indiquer une position quasiment à mi-chemin entre deux classes distinctes (i.e. des valeurs de distance euclidienne en fait très

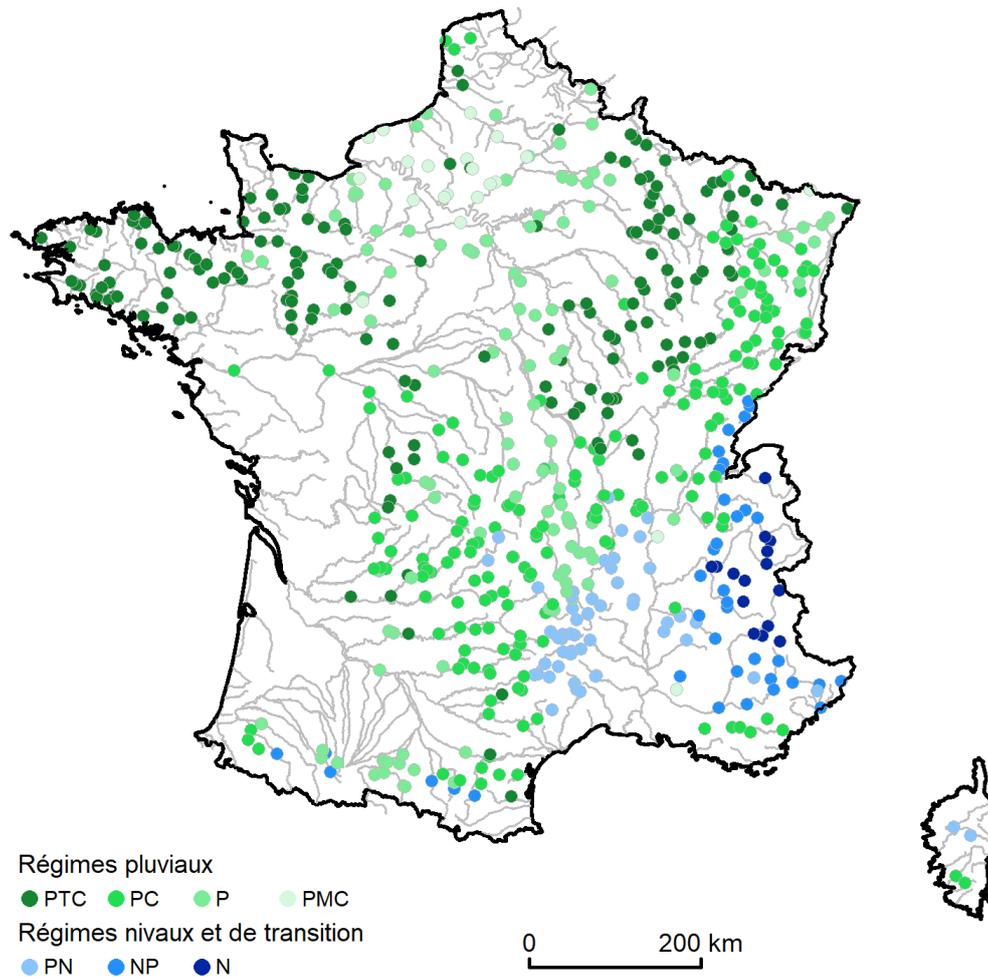


FIGURE 5 : Cartographie des régimes hydrologiques dominants selon les neuf modèles hydrologiques forcés par la réanalyse SAFRAN aux 611 stations hydrométriques de référence.

proches, ou une dominance faible d'un régime-type parmi les sept proposés).

En conclusion, **la reconstitution des régimes hydrologiques par les différents modèles semble acceptable et fiable**. Dans la suite du document, les analyses, y compris les illustrations, vont concerner l'échantillon de 2500 points disposant d'un ensemble de projections issues d'au moins quatre modèles hydrologiques distincts.

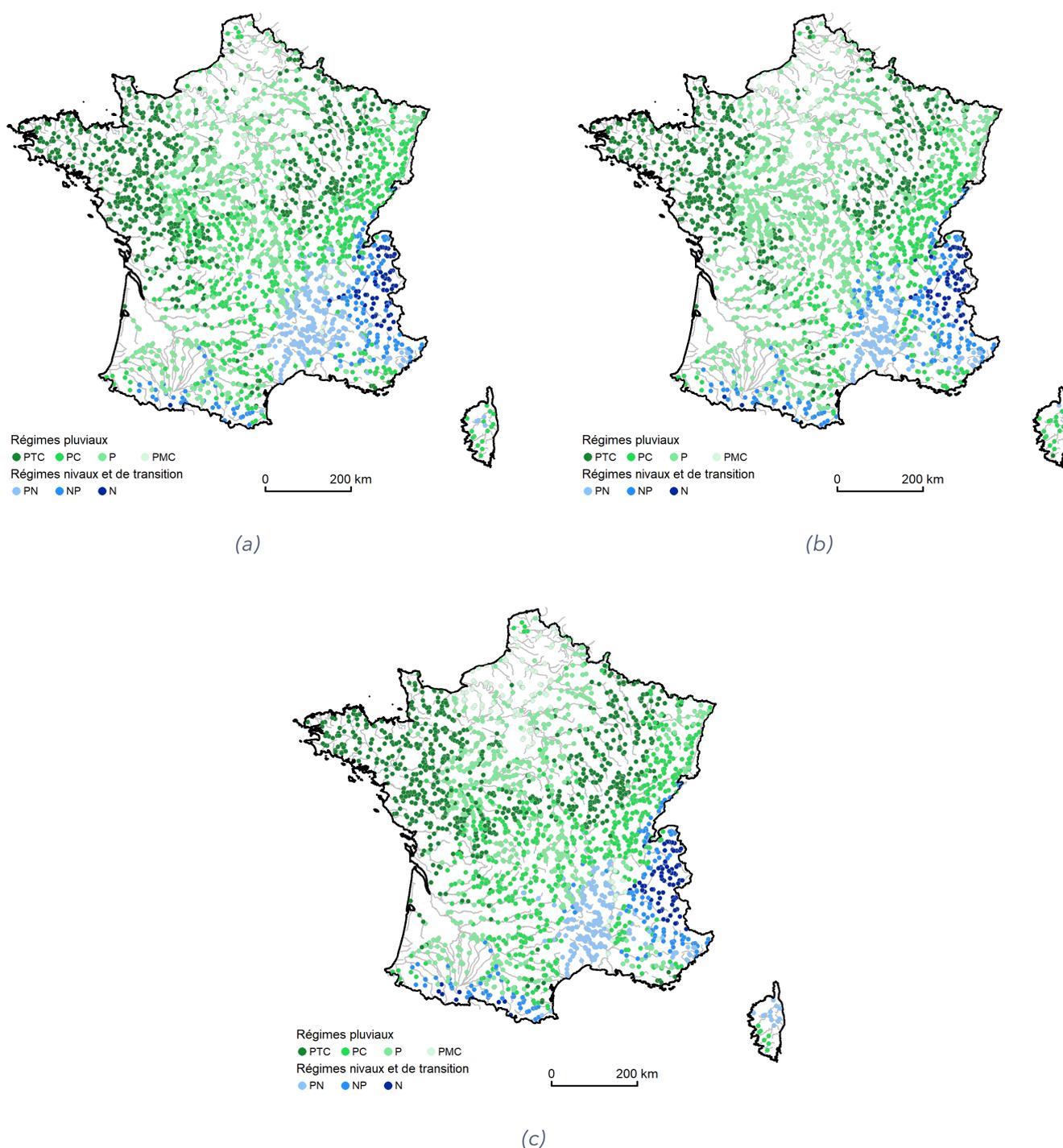


FIGURE 6 : Carte des régimes hydrologiques tous modèles hydrologiques confondus selon SAFRAN (a), selon les projections corrigées par ADAMONT tous RCPs confondus (b) et par CDF-t tous RCPs confondus (c) sur la période de référence 1976-2005.

3.4 Altération des régimes hydrologiques

Un régime a pu être attribué pour chaque point de simulation, et chaque RCP aux différents horizons. Nous nous arrêterons spécifiquement aux horizons milieu de siècle H2 (2041-2070) et fin de siècle H3 (2070-2099).

Les cartes de la Figure 7 obtenues avec les projections climatiques corrigées par la méthode ADAMONT

concernent les résultats obtenus avec le RCP2.6. Les changements de régime semblent contenus avec une présence affirmée des régimes nivaux et de transition présents dans les reliefs. L'inverse est perceptible sur les cartes relatives au RCP4.5 (Figure 8) et RCP8.5 (Figure 9). Les évolutions semblent plus nombreuses, et progressivement, les régimes nivaux évoluent vers des régimes à dominante pluviale au fil du XXI^e siècle. Ces évolutions sont partagées par les ensembles de projections corrigées par ADAMONT et CDF-t (Figure 10, Figure 11, Figure 12).

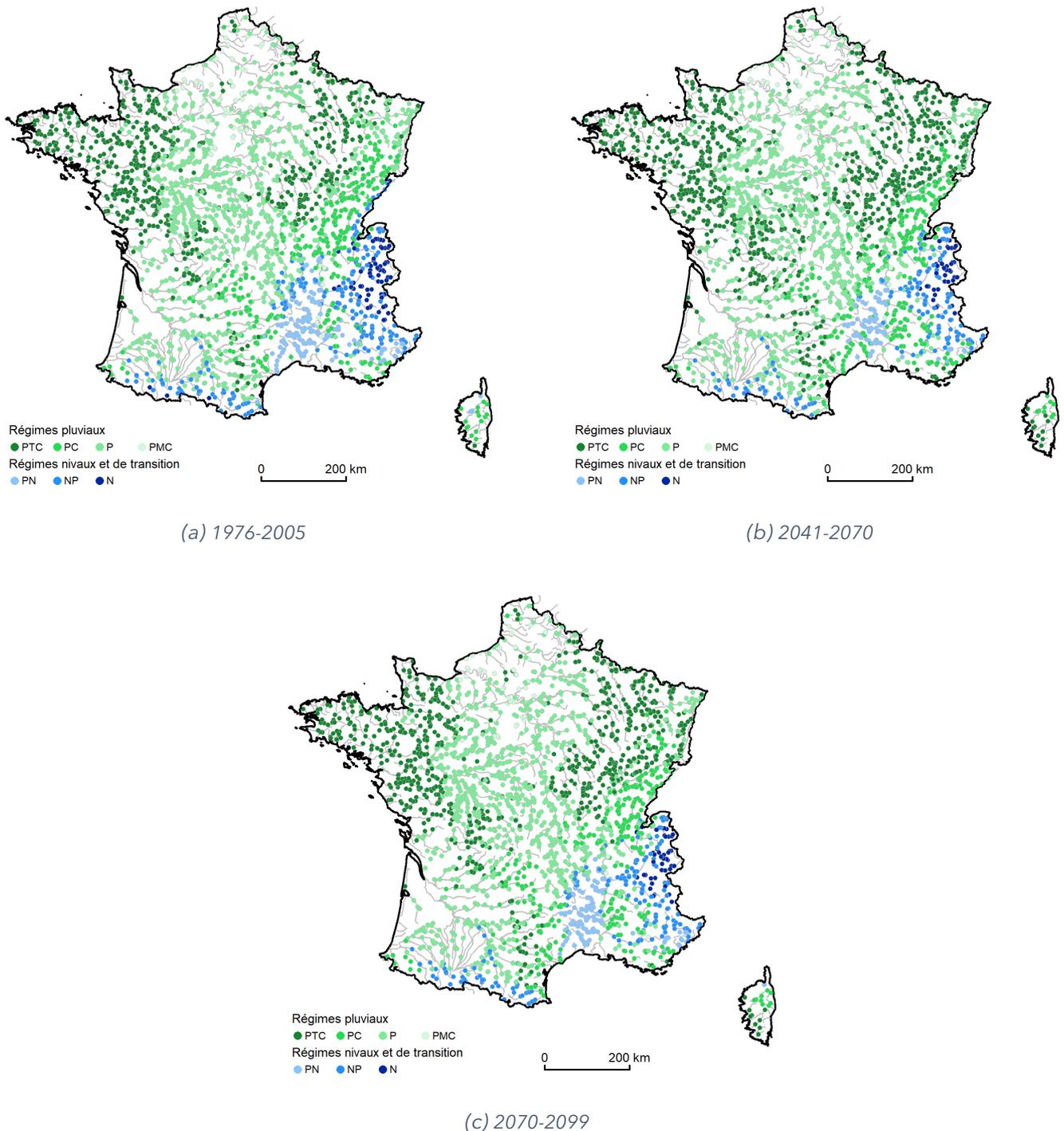


FIGURE 7 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux horizons H0 (a), H2 (b) et H3 (c) selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP2.6, tous modèles hydrologiques confondus.

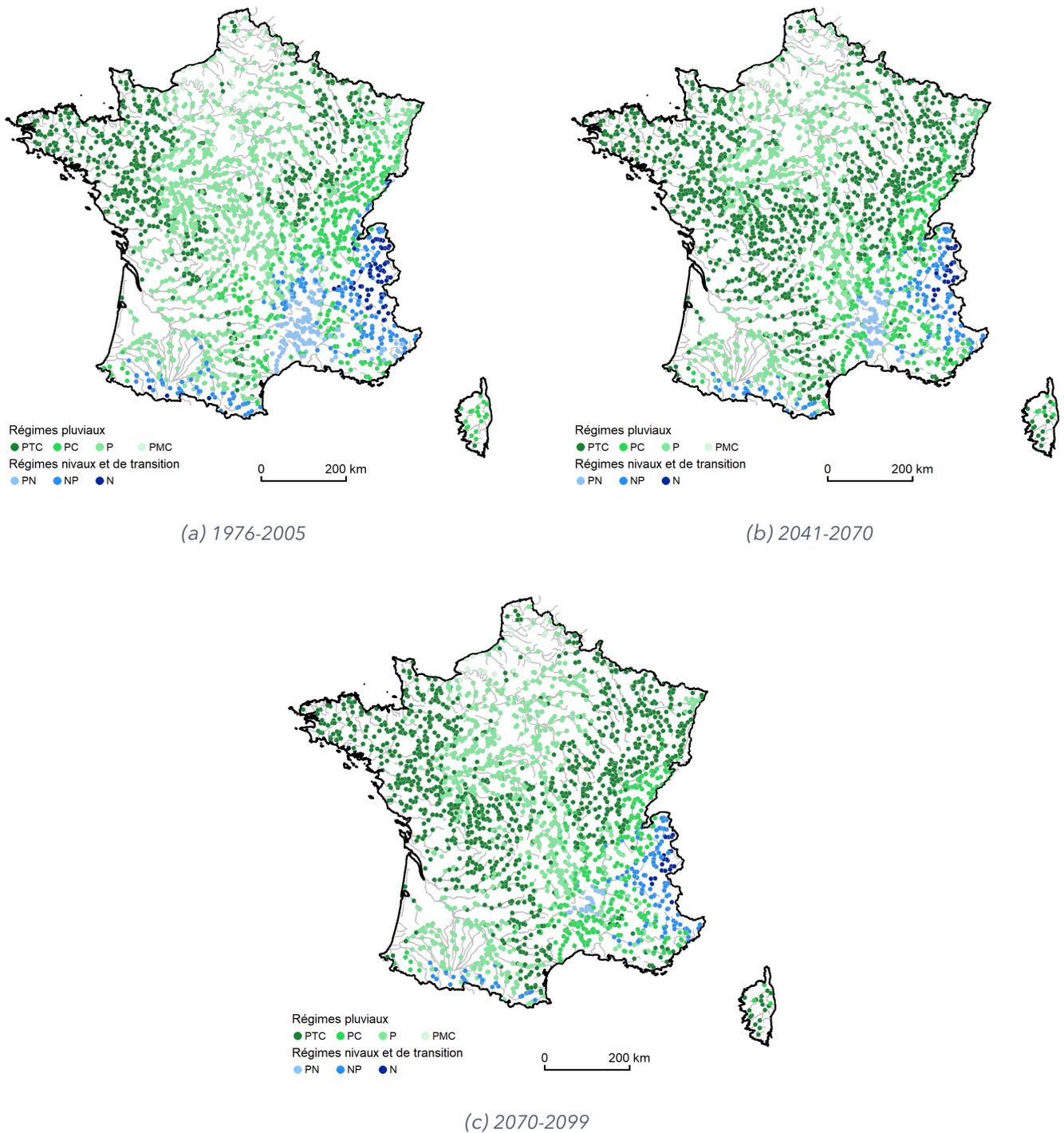


FIGURE 8 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux horizons H0 (a), H2 (b) et H3 (c) selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP4.5, tous modèles hydrologiques confondus.

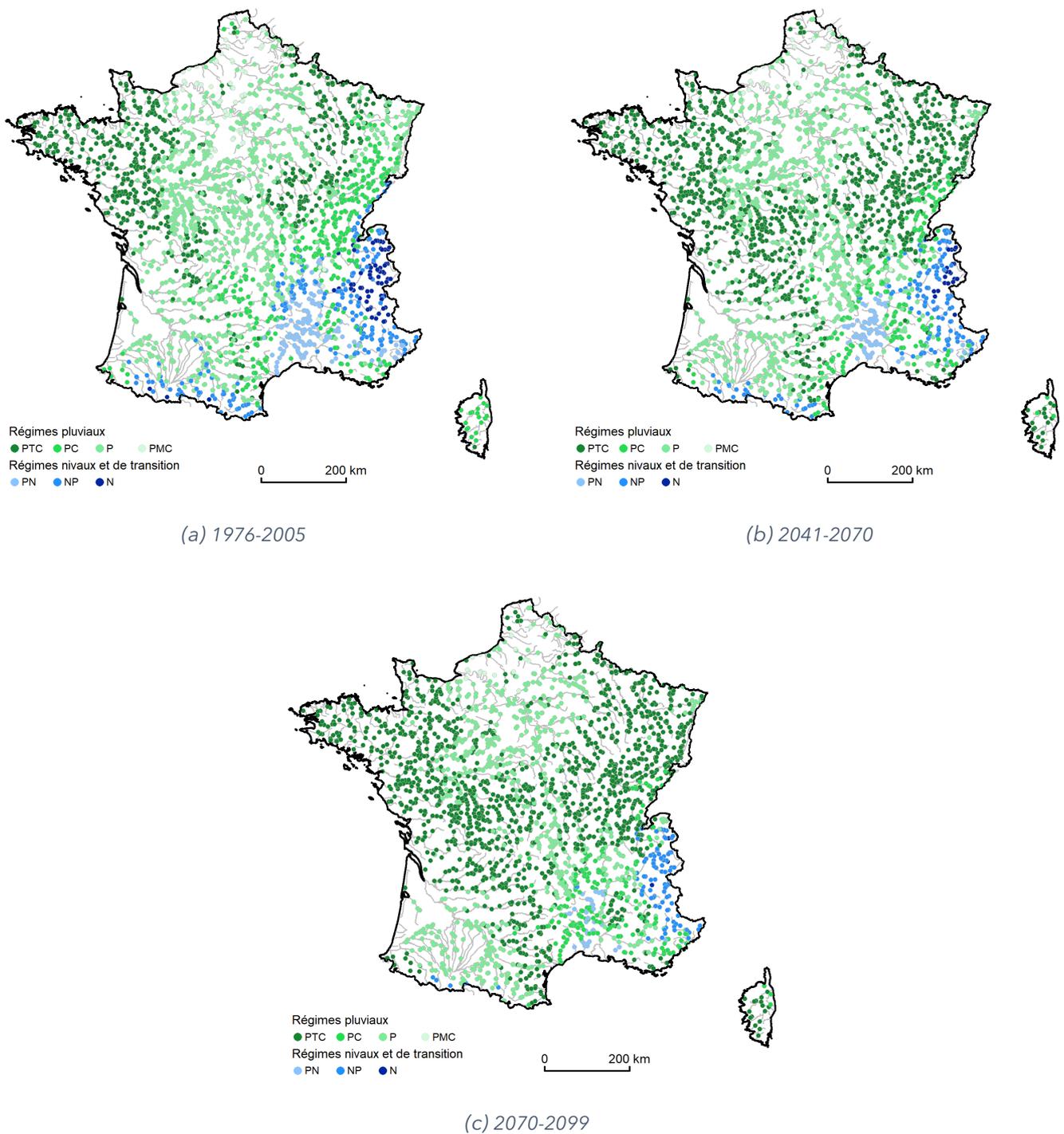


FIGURE 9 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par ADAMONT sous RCP8.5, tous modèles hydrologiques confondus.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

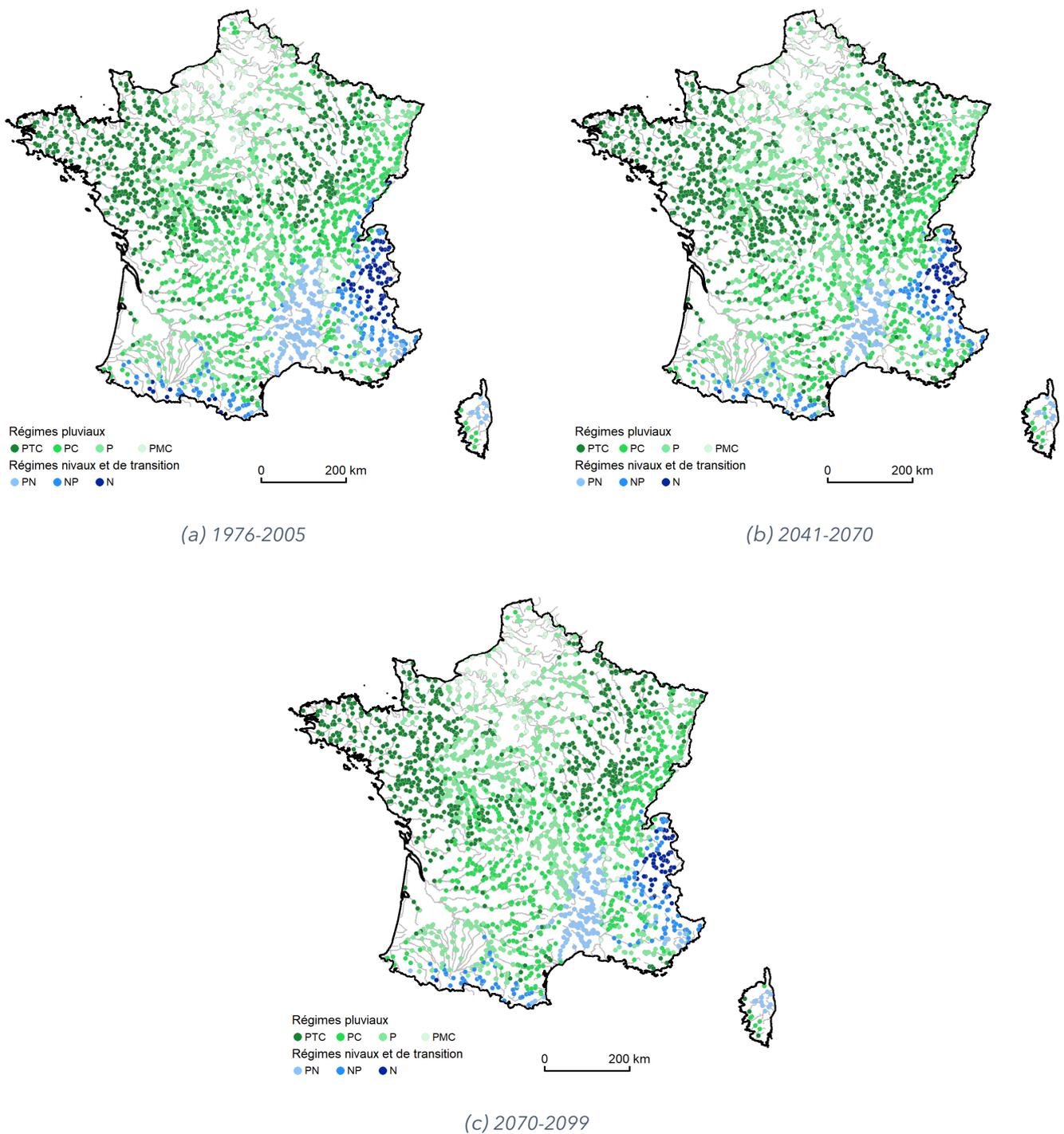


FIGURE 10 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP2.6, tous modèles hydrologiques confondus.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

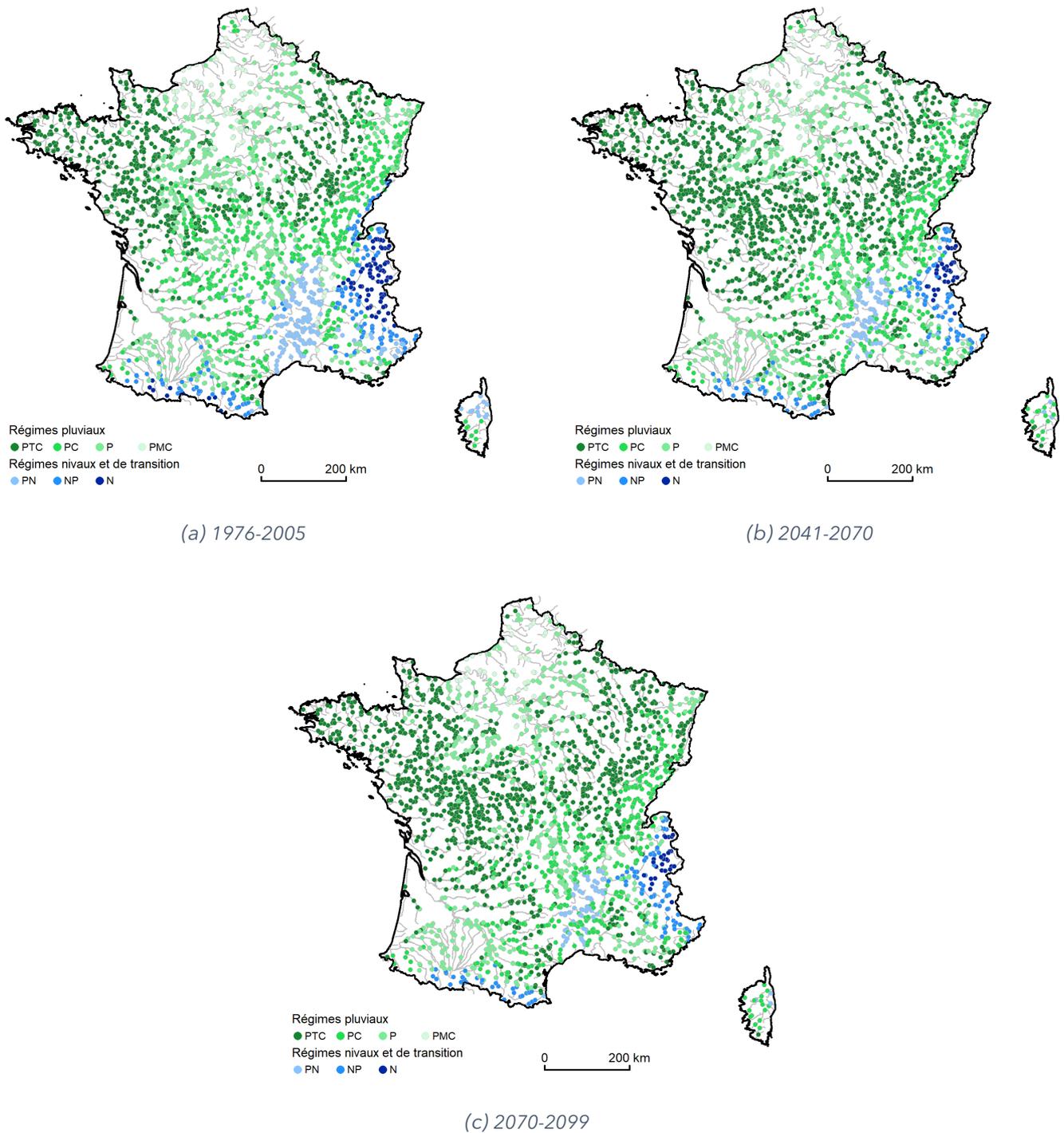


FIGURE 11 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP4.5, tous modèles hydrologiques confondus.

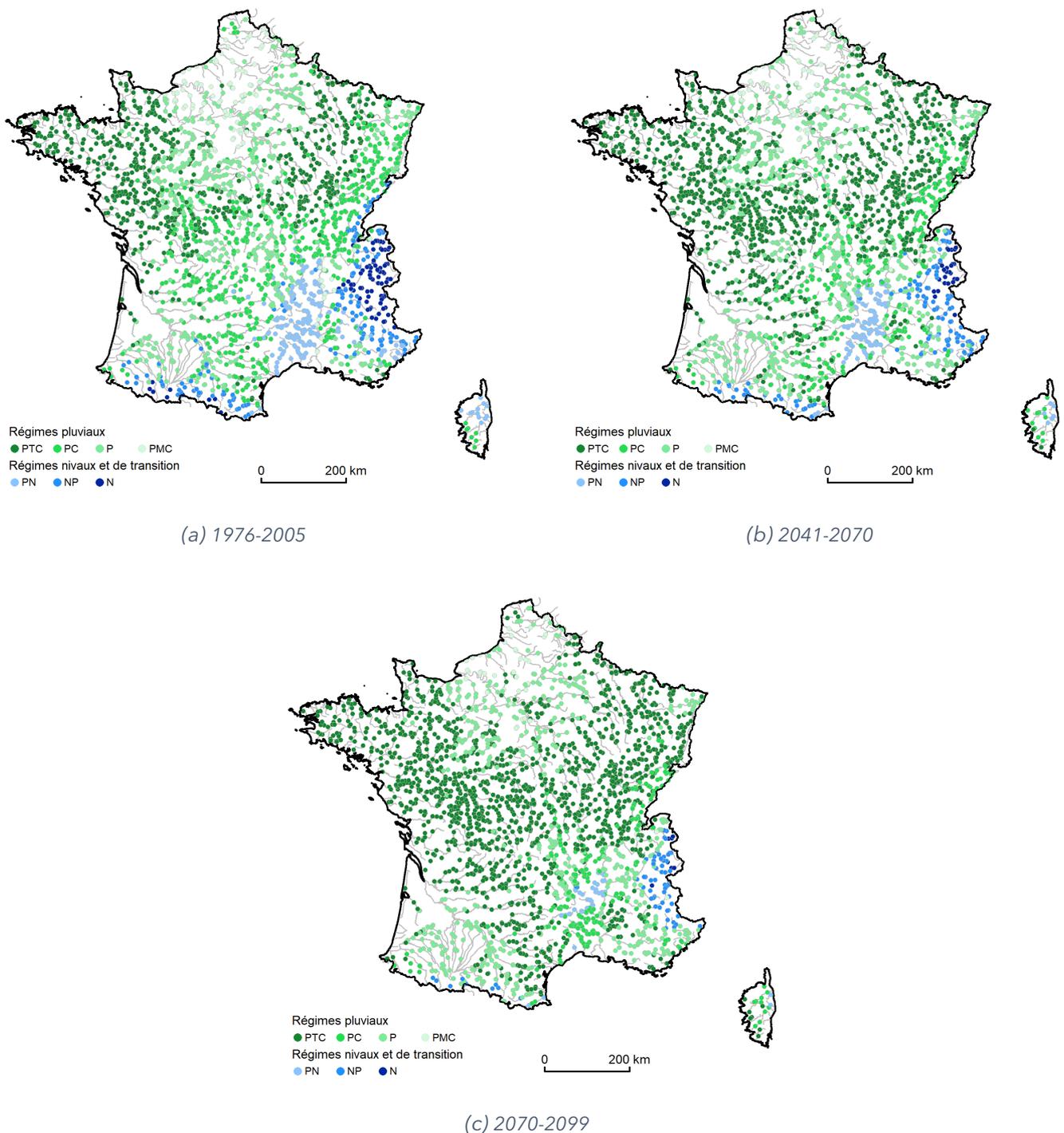
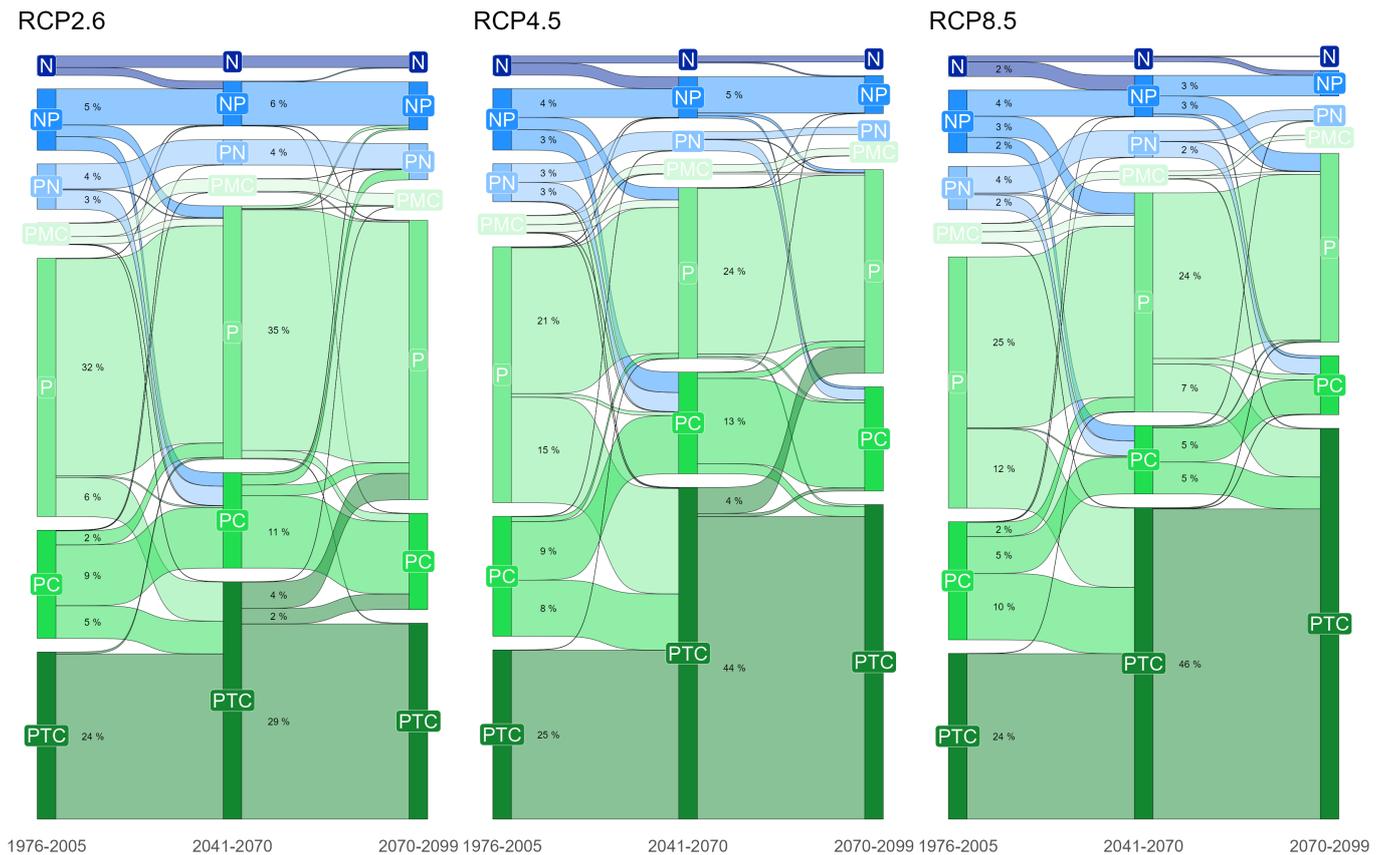


FIGURE 12 : Carte des régimes hydrologiques dominants aux différents horizons selon les projections corrigées par CDF-t sous RCP8.5, tous modèles hydrologiques confondus.

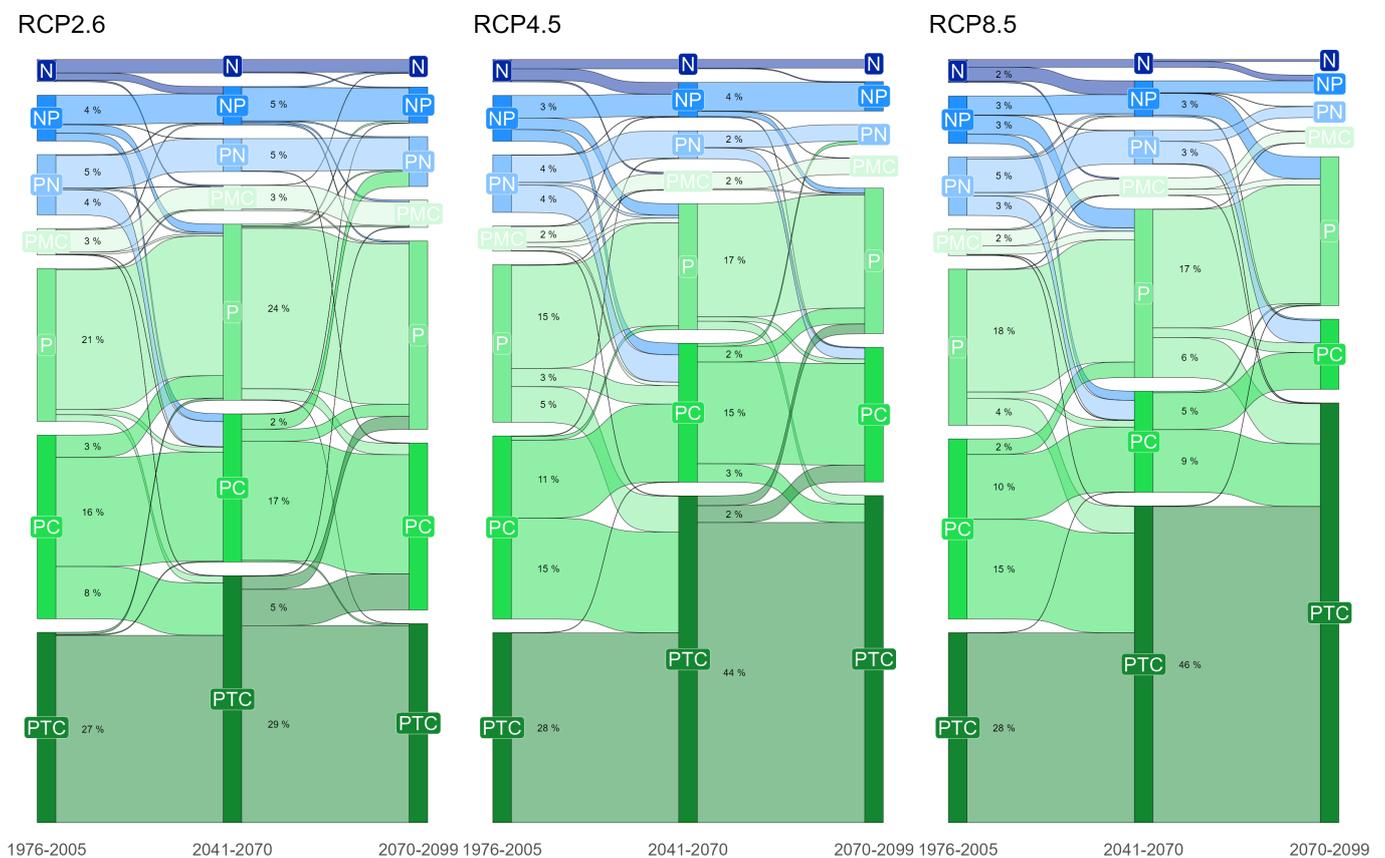
Une manière de décrire les transitions d'une classe à une autre est proposée en Figure 13. Elle s'apparente à un diagramme de Sankey. L'axe des abscisses représente le temps (les trois horizons H0, H2 et H3 dans l'ordre chronologique de gauche à droite avec une échelle non linéaire) et la proportion des points de simulation affectés dans chaque régime (selon le principe de la classe dominante) est donnée en ordonnée. L'épaisseur des courbes entre régimes indique l'intensité des flux entre les différentes classes d'un horizon à un autre, c'est-à-dire le pourcentage de points de simulation passant d'un régime hydrologique donné à un autre. Les résultats sont présentés tous modèles hydrologiques confondus, en isolant les résultats obtenus par les deux méthodes de correction de biais (Figure 13), pour les trois scénarios d'émission RCP2.6, RCP4.5

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

et RCP8.5.



(a) ADAMONT



(b) CDF-t

FIGURE 13 : Répartition des points de simulation dans les classes aux différents horizons par méthode de correction, tous modèles hydrologiques confondus.

Notons que :

- les répartitions entre classes sont globalement équivalentes pour la période de référence 1976-2005 quel que soit le RCP. La principale différence concerne les poids relatifs de deux classes de régimes pluviaux : la classe **PC** est davantage représentée dans les projections hydrologiques obtenues avec CDF-t que dans les projections obtenues avec ADAMONT, et c'est l'inverse pour la classe **P**. Cette différence est en partie expliquée par des ensembles distincts de modèles hydrologiques (neuf pour ADAMONT contre six pour CDF-t),
- sous RCP2.6, la Figure 13 confirme le sentiment de stabilité des régimes hydrologiques (Figures 10 et 7) : la répartition entre classes évolue certes mais, en fin de siècle, les poids relatifs des classes restent proches de ceux de la période de référence,
- sous RCP4.5 et RCP8.5, des changements notables sont perceptibles avec, principalement, une dominance du régime pluvial très contrasté **PTC** en fin de siècle (57 % pour H3 versus 24 % pour H0, soit plus qu'un doublement pour ADAMONT, et 62 % pour H3 versus 28 % pour H0, soit plus qu'un doublement pour CDF-t), et une disparition des régimes nivaux (6 % pour H3 versus 19 % pour H0 pour ADAMONT, et 5 % pour H3 versus 19 % pour H0 pour CDF-t). Ces évolutions se manifestent de manière progressive au fil du XXI^e siècle et sont communes aux résultats obtenus avec les deux méthodes de correction de biais ADAMONT et CDF-t. Cette faible sensibilité des évolutions des régimes à la méthode de correction de biais est en cohérence avec les conclusions de l'étude des sources d'incertitude (Evin et al., 2024) : pour l'hydrologie de surface, l'impact du choix de la méthode de correction de biais parmi les deux du projet **Explore2** est relativement marginal.

Sous l'effet du changement climatique, **sous RCP4.5 et RCP8.5, les régimes hydrologiques en France hexagonale vont évoluer avec un glissement progressif des régimes actuellement pluviaux vers des régimes pluviaux plus contrastés et une diminution de la proportion de régimes hydrologiques influencés par la neige au cours du XXI^e siècle. Ces changements sont plus importants avec le scénario RCP8.5 le plus émetteur de gaz à effet de serre.** Ces changements correspondent à une modification de la répartition des écoulements de surface au cours d'une année. Les changements sur les débits saisonniers seront abordés plus loin.

3.5 Des bassins au régime sensible aux évolutions climatiques

Cette section cherche à mettre en évidence les bassins versants qui vont *a priori* connaître les changements les plus importants. A cette fin, nous avons organisé les classes de manière logique en supposant une forme de continuité entre régimes. Ainsi nous avons ordonné les classes de la manière suivante : du régime pluvial très contrasté **PTC** au régime pluvial modérément contrasté **PMC**, puis les régimes de transition vers le régime nival **N** : le régime **PMC** est voisin du régime **PN**. L'hypothèse faite est que le régime dominant associé à un point de simulation de la période de référence peut évoluer vers un régime parmi les deux classes adjacentes en fin de siècle du fait de la variabilité naturelle du climat. En revanche, si le nouveau régime dominant est décalé d'au moins deux classes, nous supposons que c'est un changement significatif de régime hydrologique. Ce sont ces points qui sont l'objet de l'analyse, c'est certainement en ces points que le fonctionnement hydrologique du bassin sera affecté de manière importante. Les sauts de classes pour les régimes situés aux extrémités de l'échelle (**N** et **PTC**) sont limités. Nous y reviendrons plus loin.

Sans surprise, le nombre de points de simulation avec un changement de régime significatif reste faible sous RCP2.6 (216 pour les projections corrigées avec ADAMONT, 146 pour les projections corrigées avec CDF-t, soit moins de 10 % des 2500 points considérés). Ce nombre augmente sous RCP4.5 (557 pour les projections corrigées avec ADAMONT, 385 pour les projections corrigées avec CDF-t, une proportion supérieure à 15 %) et est maximum sous RCP8.5 (760 pour les projections corrigées avec ADAMONT, 575 pour les projections corrigées avec CDF-t, une proportion supérieure à 23 %). Sous RCP8.5, les changements significatifs sont communs pour 355 points de simulation aux résultats obtenus avec ADAMONT et CDF-t.

Les points de simulation dont les évolutions de régimes hydrologiques sont significatives sous RCP8.5 sont positionnés sur la Figure 14 (ADAMONT) et la Figure 15 (CDF-t), par un losange (la couleur de la partie

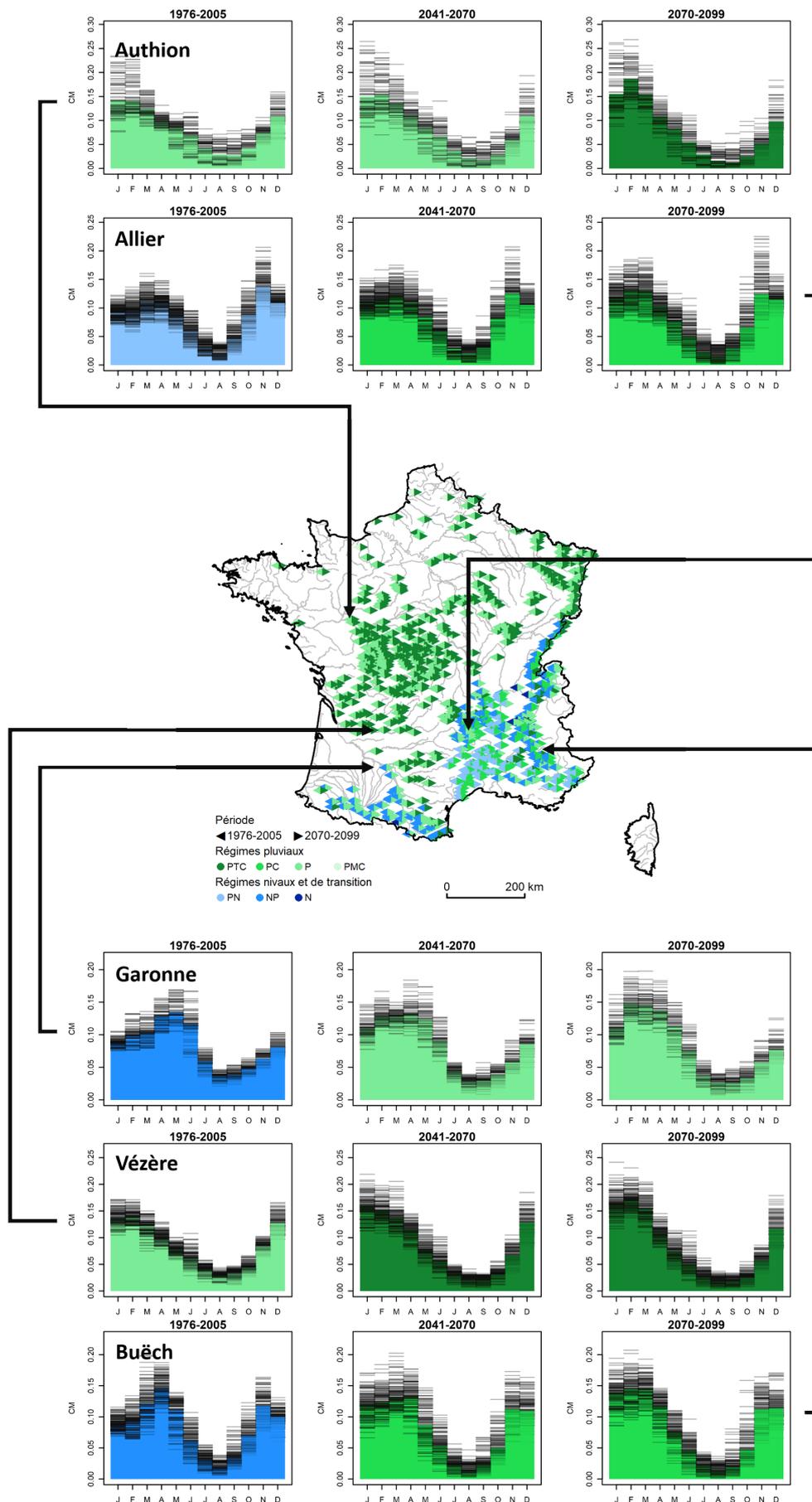


FIGURE 14 : Localisation des points avec une modification significative de régimes hydrologiques dominants obtenus avec ADAMONT sous RCP8.5 entre la période de référence et la fin de siècle.

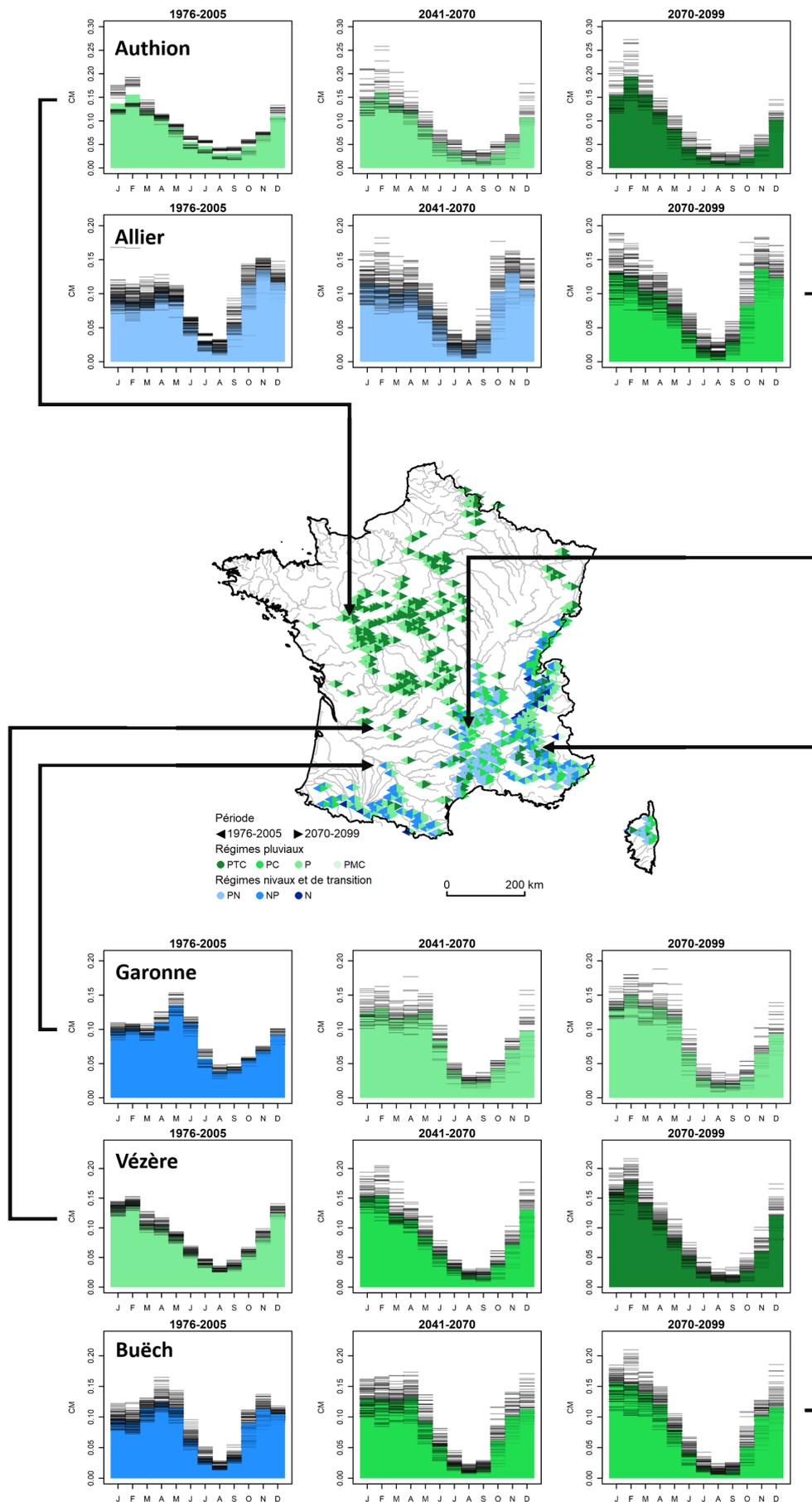


FIGURE 15 : Localisation des points avec une modification significative de régimes hydrologiques dominants obtenus avec CDF-t sous RCP8.5 entre la période de référence et la fin de siècle.

gauche désigne la classe de la période de référence et celle de la partie droite la classe en fin de siècle). Cinq points de simulation dans des secteurs aux changements de régime significatifs quelle que soit la méthode de correction de biais viennent illustrer les changements de régime (représentation des médianes des coefficients de Pardé sur la période de référence, en milieu de siècle et en fin de siècle). Chaque trait horizontal représente le résultat d'un modèle hydrologique alimenté par une projection climatique. En fond des graphiques est représenté l'hydrogramme construit à partir de la médiane multi-modèle des coefficients de Pardé avec la couleur de la classe dominante correspondante. Les points de simulation choisis sont les suivants :

- L'Allier à Saint-Haon (K209081001),
- L'Authion à Longué-Jumelles (L910000101),
- La Garonne à Saint-Aignan (O290002001),
- La Vézère à Campagne (P427101001),
- Le Buëch à Serres (X103402001).

L'Allier, le Buëch et la Garonne (**PN** ou **N**) perdent leur caractère nival de transition pour devenir des régimes pluviaux. Actuellement, le Buëch et la Garonne présentent leur débit mensuel maximum en avril ou mai ; en fin de siècle, ils apparaîtront en février ou mars pour la Garonne et en janvier ou février pour le Buëch. Il est à noter que le Buëch fait « un saut » de quatre classes (passage de la classe **PN** à la classe **PC**) entre la période de référence et la fin de siècle quelle que soit la correction de biais. Pour l'Allier, le maximum secondaire aujourd'hui au printemps disparaît avec les projections CDF-t. L'Authion et la Vézère (**P**) voient les contrastes entre hiver et été s'accroître (**PTC**).

La Figure 14 et la Figure 15 montrent les secteurs où les changements se concentrent. Il s'agit des affluents du Rhône et de la partie sud du bassin Rhône-Méditerranée, ainsi que de la Loire. Dans les zones de relief, l'augmentation de la température va faire disparaître ou atténuer l'onde de fonte du printemps, au bénéfice de débits augmentés en hiver du fait de changement de phase des précipitations.

Les changements de régime en France hexagonale sont contenus sous RCP2.6 et notables sous RCP4.5 et RCP8.5. Sous RCP8.5, les changements de régime affectent particulièrement la Loire moyenne, la Loire aval, et les cours d'eau de moyenne montagne du Massif central, des Pyrénées et des Alpes. Ces changements se caractérisent par des contrastes plus affirmés entre hautes (hiver) et (été) basses eaux sur les régimes pluviaux et par un glissement des régimes nivaux de transition vers des régimes à dominante pluviale.

3.6 Vers de nouveaux régimes hydrologiques en France hexagonale ?

Cette dernière section interroge la classification : est-elle toujours pertinente, notamment en fin de siècle sous RCP8.5 ? Cette question concerne principalement les classes aux deux extrémités : **PTC** et **N**, qui n'ont pas de classes adjacentes. Nous avons donc identifié parmi les projections hydrologiques individuelles celles dans une des deux classes **PTC** et **N** par horizon et par méthode de correction, nous en avons déduit ensuite les valeurs médianes des coefficients de Pardé (Tableaux 2 à 5). Nous avons représenté les projections individuelles et les médianes aux différents horizons (Figures 16 et 17).

| CM | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Obs | 0.033 | 0.031 | 0.043 | 0.070 | 0.154 | 0.202 | 0.141 | 0.081 | 0.067 | 0.068 | 0.055 | 0.038 |
| H0 | 0.039 | 0.034 | 0.042 | 0.067 | 0.113 | 0.197 | 0.135 | 0.079 | 0.074 | 0.071 | 0.068 | 0.050 |
| H2 | 0.054 | 0.038 | 0.049 | 0.071 | 0.128 | 0.199 | 0.113 | 0.066 | 0.053 | 0.069 | 0.080 | 0.065 |
| H3 | 0.063 | 0.055 | 0.066 | 0.093 | 0.132 | 0.153 | 0.094 | 0.060 | 0.050 | 0.058 | 0.087 | 0.072 |

TABLEAU 2 : Médianes des coefficients de Pardé de la classe du régime nival N avec les projections climatiques corrigées par ADAMONT pour le RCP8.5.

| CM | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Obs | 0.033 | 0.031 | 0.043 | 0.070 | 0.154 | 0.202 | 0.141 | 0.081 | 0.067 | 0.068 | 0.055 | 0.038 |
| H0 | 0.043 | 0.036 | 0.039 | 0.049 | 0.115 | 0.182 | 0.143 | 0.088 | 0.076 | 0.085 | 0.065 | 0.054 |
| H2 | 0.056 | 0.036 | 0.040 | 0.051 | 0.132 | 0.200 | 0.132 | 0.072 | 0.056 | 0.083 | 0.067 | 0.061 |
| H3 | 0.062 | 0.053 | 0.051 | 0.069 | 0.145 | 0.178 | 0.110 | 0.063 | 0.051 | 0.069 | 0.070 | 0.064 |

TABLEAU 3 : Médianes des coefficients de Pardé de la classe du régime nival N avec les projections climatiques corrigées par CDF-t pour le RCP8.5.

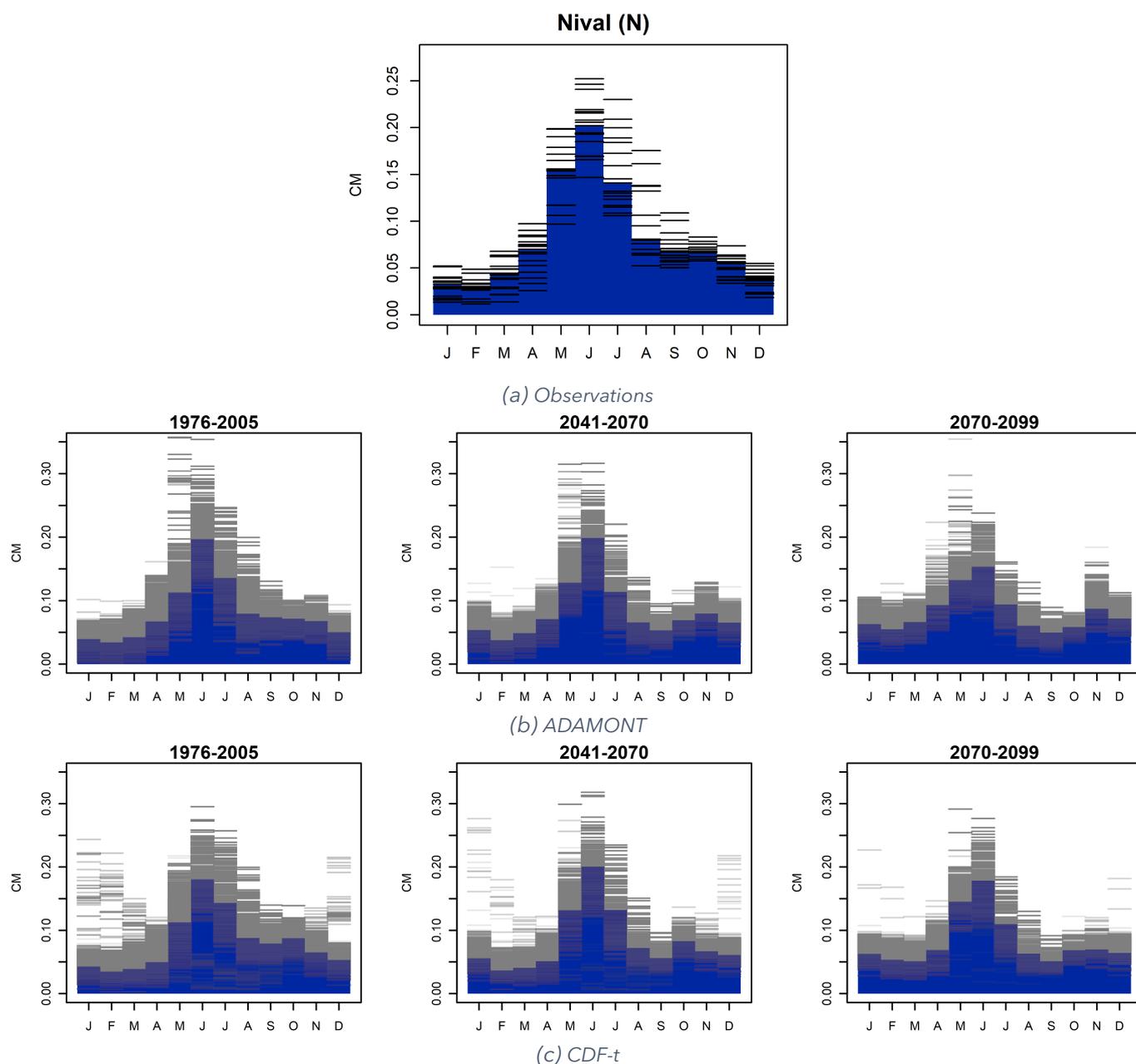


FIGURE 16 : Médianes des coefficients de Pardé calculés sur les observations des stations de référence (segment noir, a) et sur les projections hydrologiques pour les différents horizons sous RCP8.5, par méthode de correction de biais (segment gris, b, c), tous modèles hydrologiques confondus et pour la classe nival.

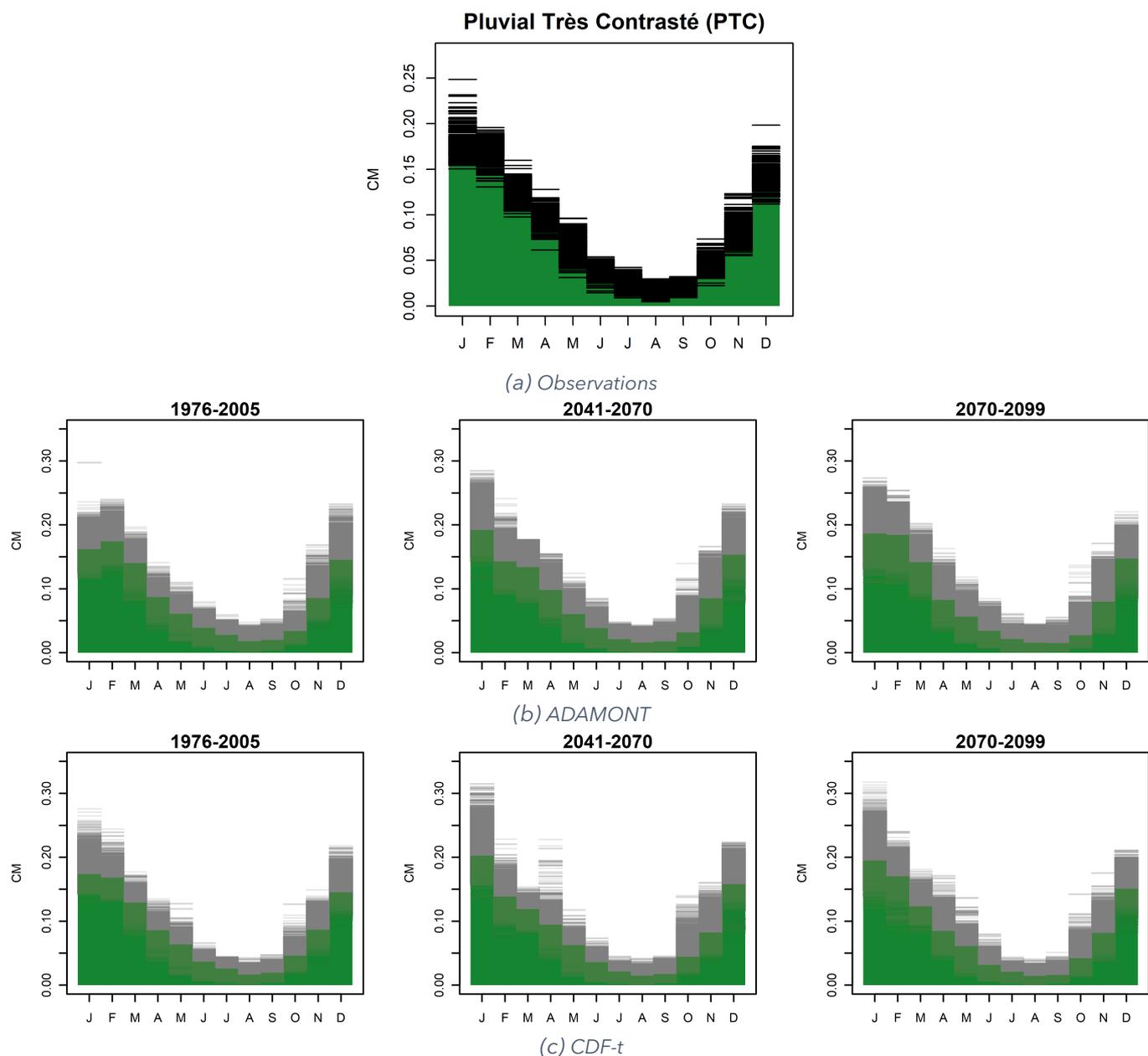


FIGURE 17 : Médianes des coefficients de Pardé calculés sur les observations des stations de référence (segment noir, a) et sur les projections hydrologiques pour les différents horizons sous RCP8.5, par méthode de correction de biais (segment gris, b, c), tous modèles hydrologiques confondus et pour la classe pluviale très contrastée.

| CM | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Obs | 0.179 | 0.169 | 0.126 | 0.098 | 0.065 | 0.038 | 0.025 | 0.016 | 0.018 | 0.042 | 0.079 | 0.138 |
| H0 | 0.162 | 0.174 | 0.140 | 0.087 | 0.061 | 0.039 | 0.028 | 0.018 | 0.020 | 0.034 | 0.085 | 0.145 |
| H2 | 0.192 | 0.143 | 0.134 | 0.098 | 0.060 | 0.038 | 0.021 | 0.016 | 0.017 | 0.032 | 0.085 | 0.153 |
| H3 | 0.186 | 0.184 | 0.142 | 0.082 | 0.056 | 0.034 | 0.021 | 0.015 | 0.015 | 0.027 | 0.079 | 0.147 |

TABEAU 4 : Caractéristiques médianes de la classe du régime pluvial très contrasté PTC avec les projections climatiques corrigées par ADAMONT pour le RCP8.5.

| CM | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Obs | 0.179 | 0.169 | 0.126 | 0.098 | 0.065 | 0.038 | 0.025 | 0.016 | 0.018 | 0.042 | 0.079 | 0.138 |
| H0 | 0.174 | 0.168 | 0.129 | 0.086 | 0.064 | 0.036 | 0.026 | 0.016 | 0.019 | 0.046 | 0.087 | 0.145 |
| H2 | 0.202 | 0.138 | 0.119 | 0.094 | 0.062 | 0.035 | 0.021 | 0.015 | 0.017 | 0.044 | 0.082 | 0.158 |
| H3 | 0.195 | 0.170 | 0.123 | 0.084 | 0.061 | 0.032 | 0.021 | 0.014 | 0.016 | 0.042 | 0.082 | 0.151 |

TABLEAU 5 : Caractéristiques médianes de la classe du régime pluvial très contrasté PTC avec les projections climatiques corrigées par CDF-t pour le RCP8.5.

Le régime médian au sein de la classe nivale **N** (Tableaux 2 et 3) évolue entre la période de référence et la fin de siècle. Le pic lié à la fonte de mai à juillet est toujours bien présent mais avec une intensité moindre (il concentre près de 50 % des écoulements sur la période de référence et chute de 10 % en fin de siècle). Notons l'émergence d'un maximum secondaire en fin d'automne (augmentation de la fraction de précipitations liquides) et d'un étiage en été (la réserve d'eau stockée par le manteau neigeux en hiver est moins importante, du fait d'apports de neige plus faibles, et la fonte est plus précoce et ne soutient plus les débits en été). La contribution des débits en hiver au volume total écoulé est en augmentation.

Le régime médian au sein de la classe pluviale très contrasté **PTC** présente des changements peu marqués : les médianes des coefficients de Pardé en hiver sont en très légère augmentation (Tableau 4, Tableau 5). La dispersion des coefficients de Pardé est plus forte en fin de siècle en hiver avec des débits de janvier qui pourraient contribuer à près de 30 % du débit annuel pour certains cours d'eau (ce qui semble inédit).

Globalement, ces régimes très contrastés sont donc légèrement plus contrastés en fin de siècle.

3.7 Quel avenir pour les régimes glaciaires ?

Les bassins versants au régime glaciaire n'ont pas été examinés explicitement dans la section précédente. Ils sont présents dans la classe des régimes nivaux. Ils ne sont pas suffisamment nombreux dans le jeu de stations de référence pour constituer une classe spécifique. Ici nous allons étudier le devenir de la composante glaciaire sur un ensemble de bassins versants simulés par le modèle **MORDOR-SD**, seul modèle représentant de manière explicite la dynamique des glaciers. Rappelons que cette modélisation est complexe : outre la représentation des processus de constitution et fonte de la glace, elle nécessite l'intégration de données spécifiques sur la géométrie des glaciers (topographie, superficie, volume) difficilement accessibles, le couplage avec les différents compartiments du modèle hydrologique, etc. A noter que l'ambition n'est ici que d'illustrer les résultats obtenus, et que seules les projections corrigées par la méthode de correction CDF-t sont présentées.

La représentation des glaciers dans MORDOR-SD

Le modèle **MORDOR-SD** dispose d'un module glaciaire, activé sur les bandes d'altitude avec présence de glaciers. Ce module s'appuie sur : (i) un terme d'accumulation, constitué par la neige résiduelle de fin d'été, (ii) une lame de fonte calculée par approche de type « degré-jour », (iii) une évolution dynamique de la superficie glaciaire fonction de l'évolution du volume glaciaire. Le volume glaciaire V_{gl} [m³ ou km³] est ainsi calculé pour chaque jour t à l'échelle de chaque bande d'altitude en fonction de son emprise spatiale S_{gl} [m² ou km²], suivant une loi puissance, inspirée de BAHR *et al.* (1997, 2015) :

$$V_{gl}(t) = sv_{g1} \times S_{gl}(t)^{sv_{g2}}$$

avec sv_{g1} [m] et sv_{g2} [-], deux paramètres à identifier. Cette formulation couplant l'évolution de masse glaciaire à celle de l'évolution de superficie, permet de tenir compte des effets du recul glaciaire observé et projeté dans nos simulations (LE LAY *et al.*, 2022, ROUZIES et LE LAY, 2024). Plusieurs types de données sont classiquement utilisés pour caler les paramètres du module glaciaire et valider les trajectoires glaciaires modélisées sur la période historique. Ici, il s'agit des reconstructions de bilans de masse des glaciers annuels produites sur la période 1965-2015 par BOLIBAR *et al.* (2020). Ces données sont utilisées pour le calage ou

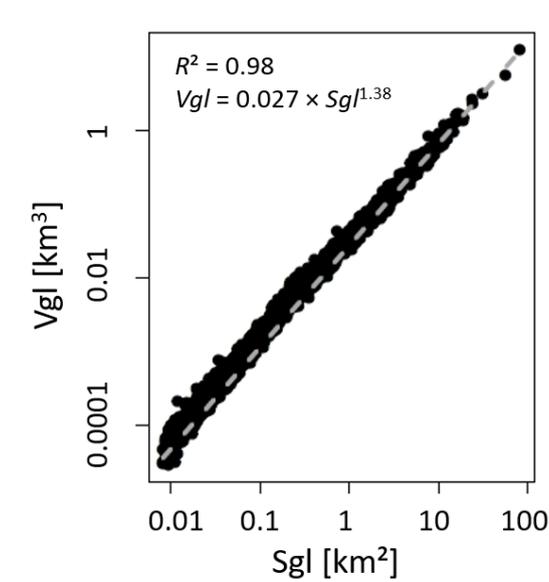


FIGURE 18 : Relation surface-volume identifiée à partir de (FARINOTTI et al., 2019), sur la base de 3927 glaciers des Alpes européennes.

la validation *a posteriori* en comparant les bilans de masse observés et modélisés. Il s'agit également de plusieurs inventaires d'emprises glaciaires disponibles sur les Alpes françaises, datés approximativement de 1967, 1985, 2003, 2006 et 2015 (GARDENT et al., 2014, PAUL et al., 2020), utilisés comme données de validation *a posteriori* des simulations.

Application dans le cadre du projet Explore2

Le module glaciaire a été activé sur seulement sept bassins versants, sur la base d'un double critère : (i) une superficie glaciaire significative (fraction glaciaire S_{gl}/S supérieure à 2 % en 2006, où S désigne la surface totale du bassin versant), (ii) des performances de modélisation sensibles à la prise en compte glaciaire. Le Tableau 6 décrit la liste des bassins.

| Code | Station | Fraction glaciaire S_{gl}/S (2006) |
|------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| W022000201 | Le Doron de Bozel à la Perrière | 7 % |
| W103000301 | L'Arc à la Saussaz | 5 % |
| W211401000 | La Séveraisse à Villard-Loubière | 2 % |
| W271000101 | La Romanche à Mizoen | 8 % |
| W024050000 | Le Doron de Belleville aux Bettaix | 2 % |
| W273050001 | Le Vénéon aux Étages | 12 % |
| W273050003 | Le Vénéon à Plan du Lac | 10 % |

TABLEAU 6 : Echantillon de bassins avec une modélisation des glaciers.

Le module glaciaire a été mis en œuvre de façon très simple, sans aucune calibration. Les valeurs de paramètres ont été préalablement identifiées à partir des données de l'inventaire superficie/volume issu de FARINOTTI et al. (2019) sur l'ensemble des glaciers alpins européens ($svg1 = 27$ m par et $svg2 = 1.38$, Figure 18). A noter enfin que les simulations ont été initialisées avec une superficie glaciaire un peu faible, car issue à tort d'un inventaire trop récent, daté de 2006.

Illustration des résultats sur deux bassins versants

Les résultats obtenus sont illustrés pour deux bassins versants, le Doron de Bozel à la Perrière et le Vénéon à Plan du Lac, comme évoqué plus haut avec les projections corrigées avec la méthode CDF-t, à travers

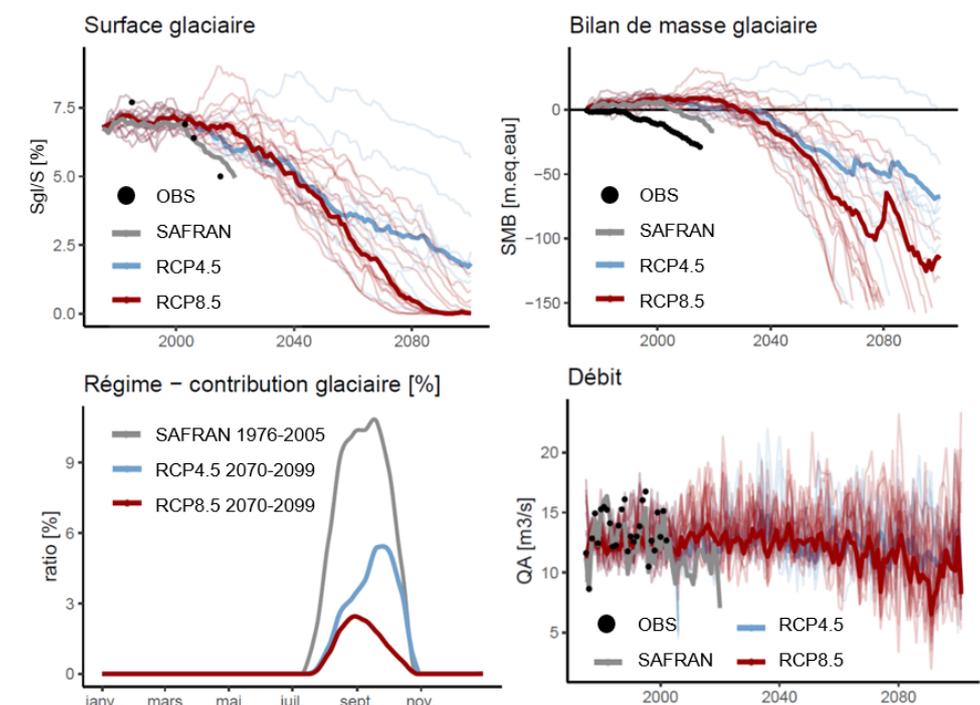


FIGURE 19 : Evolution des superficies, des bilans de masse, des contributions glaciaires et des débits sur le bassin du Doron de Bozel à la Perrière, pour la période 1976-2100. Les observations (ou reconstructions dans le cas des SMB) sont représentées en noir. Les simulations historiques, forcées par les données SAFRAN, sont figurées en gris. Les projections sont représentées en bleu (RCP4.5) et rouge (RCP8.5). Les projections médianes sont représentées par des traits épais.

quatre graphiques (Figures 19 et 20) :

- l'évolution des superficies glaciaires S_{gl} (en % de la superficie de bassin) sur la période 1976-2100,
- l'évolution des bilans de masse glaciaires cumulés SMB (en m.eq.eau) sur la période 1976-2100,
- l'évolution des débits moyens annuels QA (en m^3/s) sur la période 1976-2100,
- les contributions glaciaires médianes lissées (en % du débit à l'exutoire), sur la période récente 1976-2005 et sur l'horizon fin de siècle 2070-2099.

Sur la période de référence et sur la base des observations :

- Les superficies glaciaires sont très correctement simulées pour le Doron de Bozel (Figure 19), en particulier sur la période d'accélération du retrait glaciaire post-2000. La simulation des bilans de masse glaciaires SMB est plus contrastée : sur la période 1976-2000, le modèle ne reproduit pas la perte de masse observée ; depuis 2000 en revanche cette perte de masse est bien simulée. Les projections sont, elles, plutôt optimistes sur l'ensemble de la période historique, puisqu'elles présentent un bilan de masse quasi-équilibré jusqu'à aujourd'hui.
- **MORDOR-SD** pour le Vénéon (Figure 20) est initialisé avec une superficie glaciaire légèrement sous-estimée, mais son évolution est cohérente sur la période historique. La simulation des bilans de masse glaciaires SMB est assez réaliste sur la période historique, bien qu'un peu optimiste sur les années 1980-1990.

Aux horizons futurs :

- Sur les deux bassins, les deux scénarios RCP mettent en évidence, jusqu'en 2050, une évolution relativement comparable pour les deux RCP : le retrait glaciaire, i.e. la perte de masse, s'accélère ensuite pour le scénario RCP8.5, avec une disparition totale des glaciers projetée en fin de siècle.
- Les régimes de contribution glaciaire montrent un pic de contribution sur les mois d'août et septembre sur la période de référence (avec un maximum proche de 15 % pour le Doron de Bozel et de 25 % pour le Vénéon). La contribution glaciaire diminue de manière drastique pour le Doron de Bozel. À

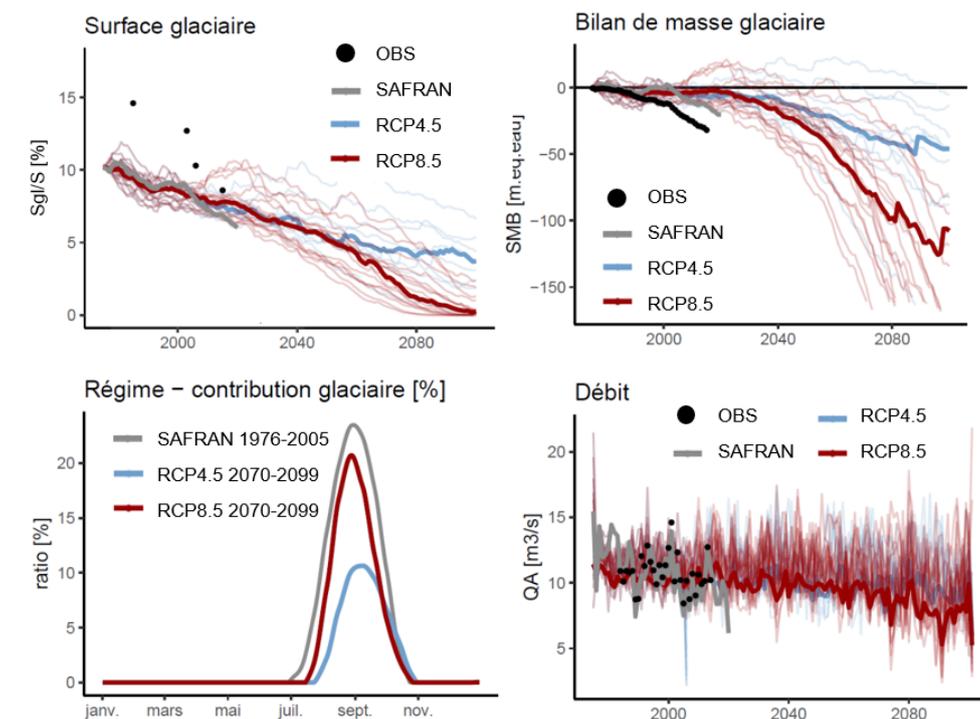


FIGURE 20 : Evolution des superficies, des bilans de masse, des contributions glaciaires et des débits sur le bassin du Vénéon à Plan du Lac pour la période 1976-2100. Les observations (ou reconstructions dans le cas des SMB) sont représentées en noir. Les simulations historiques, forcées par les données SAFRAN, sont figurées en gris. Les projections sont représentées en bleu (RCP4.5) et rouge (RCP8.5). Les projections médianes sont représentées par des traits épais.

noter que la saisonnalité centrée sur octobre observée sur le scénario RCP4.5 pour le Doron de Bozel est à considérer avec précaution, car probablement due à la simplicité des hypothèses de modélisation. Pour le Vénéon, pour le scénario RCP8.5, la perte de masse très importante des glaciers encore présents soutient la contribution relative de la fonte au débit pendant l'été (un maximum proche de 20%). En revanche, sur le scénario RCP4.5, le retrait et la fonte glaciaire tendent à ralentir et la contribution de la fonte au débit diminue nettement (un maximum proche de 10%). La contribution glaciaire relative pour le Vénéon est plus importante en fin de siècle sous RCP8.5 que sous RCP4.5 pour deux raisons : (1) les débits sont plus faibles (dénominateur plus faible), (2) la fonte glaciaire est plus forte (numérateur plus fort),

- Les projections de débits annuels suivent une tendance relativement stable pour le Doron de Bozel jusqu'en 2050, quel que soit le scénario RCP, puis une légère diminution sur la seconde moitié de siècle. Les projections de débits annuels sont globalement stables ou en très légère baisse pour le Vénéon jusqu'en 2050, quel que soit le scénario RCP, puis sont en baisse plus marquée sur la seconde moitié de siècle.

Les conséquences en termes de régime hydrologique sont illustrées en Figure 21 pour les deux bassins examinés ici. Ils sont tous deux affectés dans la classe **N** sur l'ensemble du XXI^e siècle. La réduction de la contribution glaciaire est pour partie responsable de la réduction des débits en août (*CM* pour le mois d'août de l'ordre de 15% pendant la période de référence, contre 8% en fin de siècle sous RCP8.5). Le modèle **MORDOR-SD** suggère un décalage des débits de hautes eaux dans l'année : les débits mensuels maximaux se concentrent en juin-juillet sur la période de référence 1976-2005 et en mai-juin en fin de siècle.

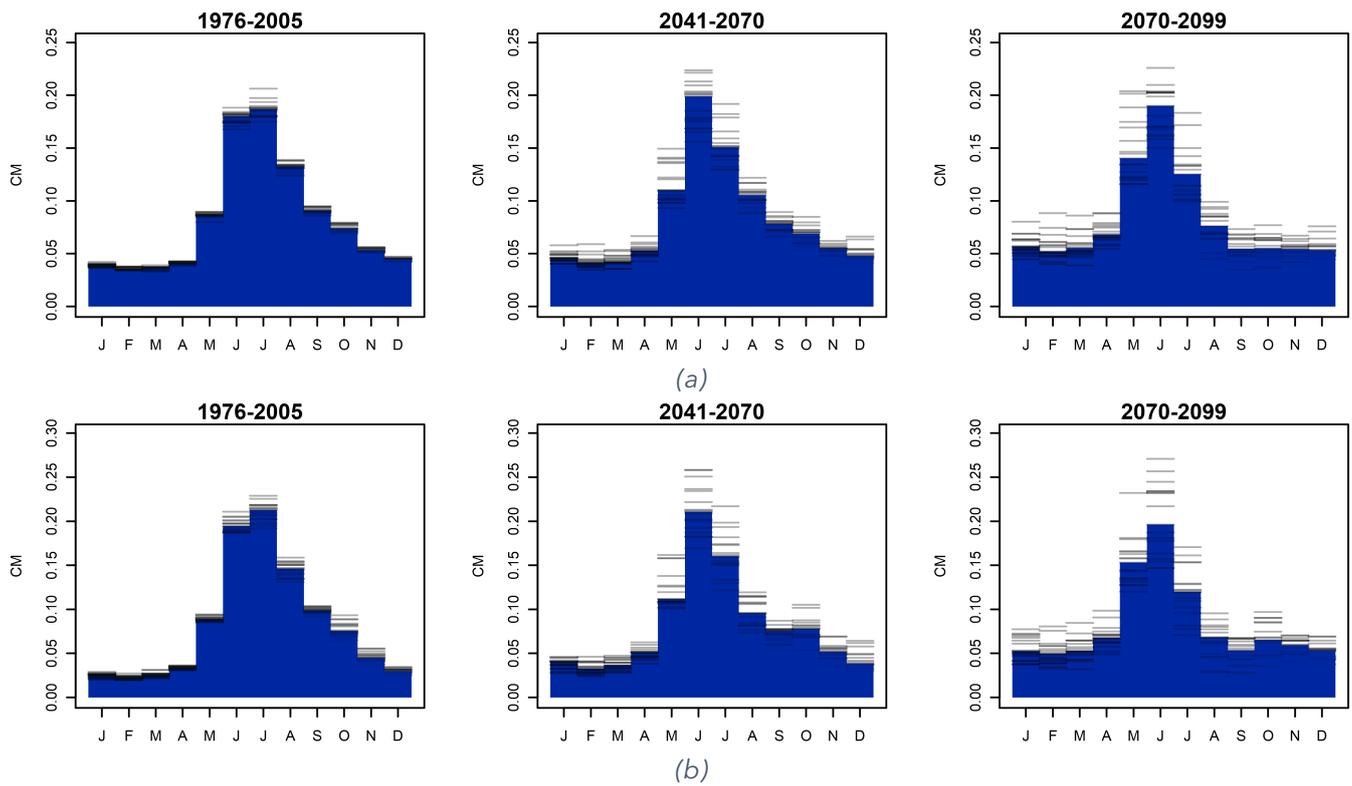


FIGURE 21 : Médianes des coefficients de Pardé sur la période de référence, en milieu de siècle et en fin de siècle obtenues avec MORDOR-SD pour le Doron de Bozel à la Perrière (a) et le Vénéon à Plan du Lac (b) sous RCP8.5, toutes méthodes de correction confondues. Chaque trait horizontal représente les coefficients de Pardé de MORDOR-SD alimenté par une projection climatique.

4 Evolution des débits annuels et saisonniers

Cette section cherche à quantifier les évolutions des débits saisonniers, c'est-à-dire les débits moyens Q_{DJF} , Q_{MAM} , Q_{JJA} et Q_{SON} calculés sur les saisons hiver (décembre à février), printemps (mars à mai), été (juin à août) et automne (septembre à novembre) et les évolutions des débits annuels Q_A calculés du 1er septembre au 31 août de l'année suivante. L'analyse reprend le même cadre que celui considéré pour les extrêmes (TRAMBLAY *et al.*, 2024) : elle est centrée sur la convergence inter-modèles, à la base des messages clefs. Les résultats sont complétés par des supports cartographiques et des tableaux de synthèse dans l'Annexe 3 : Changements médians en fin de siècle (Section 8, page 76).

Chaque projection de débits issue d'une chaîne de modélisation est traitée indépendamment en chaque point de simulation comme suit :

- extraction des débits annuels ou saisonniers année par année, l'ensemble formant une série temporelle,
- analyse statistique et test de stationnarité (calcul de statistiques descriptives, application du test de Mann-Kendall, calcul de la pente de Sen).

En chaque point de simulation, l'accord entre modèles sur les tendances est mesurée par l'indice *MIA* (Multimodel Index of Agreement, TRAMBLAY et SOMOT (2018)) défini par :

$$MIA = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (i_m)$$

où pour une chaîne de modélisation donnée m , $i_m = 1$ si la chaîne de modélisation m suggère une hausse, $i_m = -1$ si la chaîne de modélisation suggère une baisse, et $i_m = 0$ si les tendances ne sont pas significatives. Il est calculé en chaque point de simulation sur l'ensemble des projections disponibles et évolue entre -1 et 1. L'indice *MIA* tend vers 1 lorsque la majorité des simulations suggèrent une hausse du débit examiné. Inversement, il tend vers -1 lorsque la majorité des simulations suggèrent une baisse du débit examiné.

Dans cette section,

- le test de Mann-Kendall modifié (HAMED et RAO, 1998 ; HAMED, 2008) mesure la significativité de la tendance sur la période 1976-2100 et le signe de la tendance est donné par la pente de Sen,
- comme précédemment, l'analyse réalisée ici se concentre sur le sous-ensemble de 2500 points de simulation pour lesquels au moins quatre modèles hydrologiques ont fourni des simulations de débits (Figure 3, page 15).

Le diagnostic du signe des changements repose sur la proportion de points avec une dominance de projections à la hausse ($N50+$, sur la base d'une pente de Sen strictement positive), avec une dominance de projections à la baisse ($N50-$, sur la base d'une pente de Sen strictement négative), avec plus de 80% de projections suggérant une hausse ($N80+$), avec plus de 80% de projections suggérant une baisse du débit ($N80-$). La valeur de 80% est la valeur choisie par l'IPCC (fort accord lorsque plus de 80% des projections s'accordent sur le signe du changement). Est calculée également *NMIA80* la proportion de points avec un consensus soit à la hausse, soit à la baisse (c'est-à-dire une valeur absolue de *MIA* supérieure à 0.8). Les analyses des signes des changements sont accompagnées des changements relatifs médians de débits entre la période de référence et la fin de siècle (sous forme de cartes dans cette section, et de statistiques par région hydrographique dans l'Annexe 8).

| RCP | Débit | N50+ (%) | N50- (%) | N80+ (%) | N80- (%) | NMIA80 (%) |
|--------|-----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| RCP2.6 | Q_{DJF} | 100 | 0 | 54 | 0 | 5 |
| | Q_{MAM} | 87 | 12 | 28 | 2 | 1 |
| | Q_{JJA} | 71 | 26 | 1 | 2 | 0 |
| | Q_{SON} | 60 | 35 | 2 | 0 | 0 |
| | Q_A | 99 | 1 | 27 | 0 | 0 |
| RCP4.5 | Q_{DJF} | 96 | 3 | 67 | 0 | 11 |
| | Q_{MAM} | 69 | 31 | 23 | 9 | 1 |
| | Q_{JJA} | 2 | 98 | 0 | 56 | 5 |
| | Q_{SON} | 4 | 95 | 0 | 24 | 0 |
| | Q_A | 69 | 30 | 13 | 5 | 0 |
| RCP8.5 | Q_{DJF} | 81 | 19 | 27 | 5 | 7 |
| | Q_{MAM} | 59 | 40 | 2 | 16 | 1 |
| | Q_{JJA} | 0 | 99 | 0 | 87 | 29 |
| | Q_{SON} | 0 | 100 | 0 | 73 | 10 |
| | Q_A | 41 | 58 | 0 | 23 | 3 |

TABLEAU 7 : Statistiques sur les signes des tendances projetées sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus, par RCP.

4.1 Analyse sur l'ensemble des projections

Le Tableau 7 décrit les changements des débits saisonniers moyens à l'échelle de la France. Une carte de l'indice d'accord multi-modèle *MIA* par RCP et par indicateur (Figures 22, 24 et 26) permet d'isoler les secteurs avec des consensus de signe : les points qui présentent des valeurs de *MIA* inférieures à -0.8 (consensus à la baisse, triangle pointant vers le bas) ou supérieures à 0.8 (consensus à la hausse, triangle pointant vers le haut).

Sous RCP2.6, les valeurs de *MIA* restent dans l'intervalle [-0.8; 0.8] à quelques exceptions près, et ceci quelle que soit la saison considérée (Figure 22). Autrement dit, même si les projections suggèrent majoritairement une hausse des débits saisonniers ($N50+ > 50\%$, Tableau 7), ces changements restent statistiquement peu significatifs sur les débits saisonniers sous RCP2.6 à l'échelle de la France. Un faible signal de convergence est perceptible en Figure 22-a sur les débits moyens d'hiver dans les massifs alpin et pyrénéen (sous l'effet de la diminution de la fraction neigeuse (conséquence de la hausse des températures de l'air, Figure 28 (MARSON *et al.*, 2024)), les étiages hivernaux sont moins sévères). Les valeurs des changements médians entre la période de référence et la fin de siècle sont de l'ordre de +10 %, de +9 %, de +5 % et de +2 %, respectivement, pour les débits moyens d'hiver, de printemps, d'été et d'automne (Figure 23).

La proportion de points de simulation avec des valeurs de *MIA* en dehors dans l'intervalle [-0.8; 0.8] augmentent sous RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 24-c et -d, Figure 26-c et -d).

Les changements de débits d'hiver et de printemps les plus significatifs concernent le massif alpin et le Jura pour le RCP4.5 et s'étendent à une partie du sud de la France pour le RCP8.5. Les cartes des changements médians (Figure 25-a et -b, Figure 27-a et -b) font apparaître un gradient nord-sud pour les deux saisons hiver et printemps : des hausses sont suggérées sur la partie nord-est tandis que des diminutions sont suggérées dans le sud-est et le sud-ouest de la France. Ce gradient est « modulé » par les massifs montagneux (Pyrénées et Alpes, principalement). Les évolutions dans les massifs ont pour raison le changement de phase des précipitations, une constitution plus tardive et une fonte plus précoce du manteau neigeux, comme pour le RCP2.6. Un fort contraste est perceptible en Adour et sur les affluents rive gauche de la Garonne : les cours d'eau de tête alimentés verront leurs débits hivernaux sensiblement augmenter tandis que ceux de plaine verront leurs débits hivernaux chuter. Sous RCP4.5, les valeurs des changements

médians entre la période de référence et la fin de siècle sont de l'ordre de +14 % et de +7 %, respectivement, pour les débits moyens d'hiver et de printemps (Figure 25). Sous RCP8.5, ces valeurs sont de l'ordre de +11 % et de +6 %, respectivement, pour les débits moyens d'hiver et de printemps (Figure 27).

Les débits d'été et d'automne sont majoritairement à la baisse sur l'ensemble de la France hexagonale. Le consensus est présent pour presque un tiers du territoire en été sous RCP8.5 ($NMIA80 = 29\%$, Tableau 7). Un signal à la baisse en été et en automne concernant plus de 95 % des 2500 points sous RCP8.5 et sous RCP4.5 (25-c et -d, 27-c et -d). À l'image des évolutions projetées en été, les changements médians sont quasi intégralement à la baisse en automne, ils témoignent d'une diminution des débits moyens en cette saison et donc d'un allongement des périodes d'étiage. L'intensité moyenne et la dispersion des changements en été et en automne à l'échelle de la France est corrélée au caractère émetteur en GES du scénario d'émission (changements médians et dispersion plus forte avec le RCP8.5) :

- 80% des points de simulation présentent des changements médians des débits moyens d'été entre -47 % et -15 % (médiane -30 %) sous RCP8.5 contre entre -23 % et -2 % (médiane : -12 %) sous RCP4.5,
- 80% des points de simulation présentent des changements médians des débits moyens d'automne entre -44 % et -15 % (médiane -28 %) sous RCP8.5 contre entre -23 % et -4 % (médiane : -13 %) sous RCP4.5.

Les changements en été et automne sont également structurés selon un axe nord-sud avec des diminutions les plus fortes dans le sud-ouest (entre -63 % et -32 % sur le bassin de l'Adour versus entre -13 % et +2 % pour les fleuves côtiers de la limite du bassin Artois-Picardie à l'embouchure de la Seine (exclue) pour les débits moyens d'été sous RCP8.5, Tableau 13). Les plaines de la Garonne et de l'Adour, ainsi que les petits fleuves côtiers méditerranéens, apparaissent comme des hot-spots avec une baisse des débits saisonniers quasi généralisée. Notons que la convergence est faible dans le nord de la France du fait de comportements différenciés des modèles hydrologiques (cette divergence a été constatée également sur l'évolution des statistiques de débits mensuels minimums annuels $QMNA$ (Evin et al., 2024 ; Trambly et al., 2024). Notons que la comparaison avec Evin et al. (2024) et Trambly et al., (2024) doit se limiter aux secteurs de plaine car les valeurs de $QMNA$ sont échantillonnées en hiver en zone de montagne ; ailleurs, c'est en été que les valeurs de $QMNA$ sont échantillonnées.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

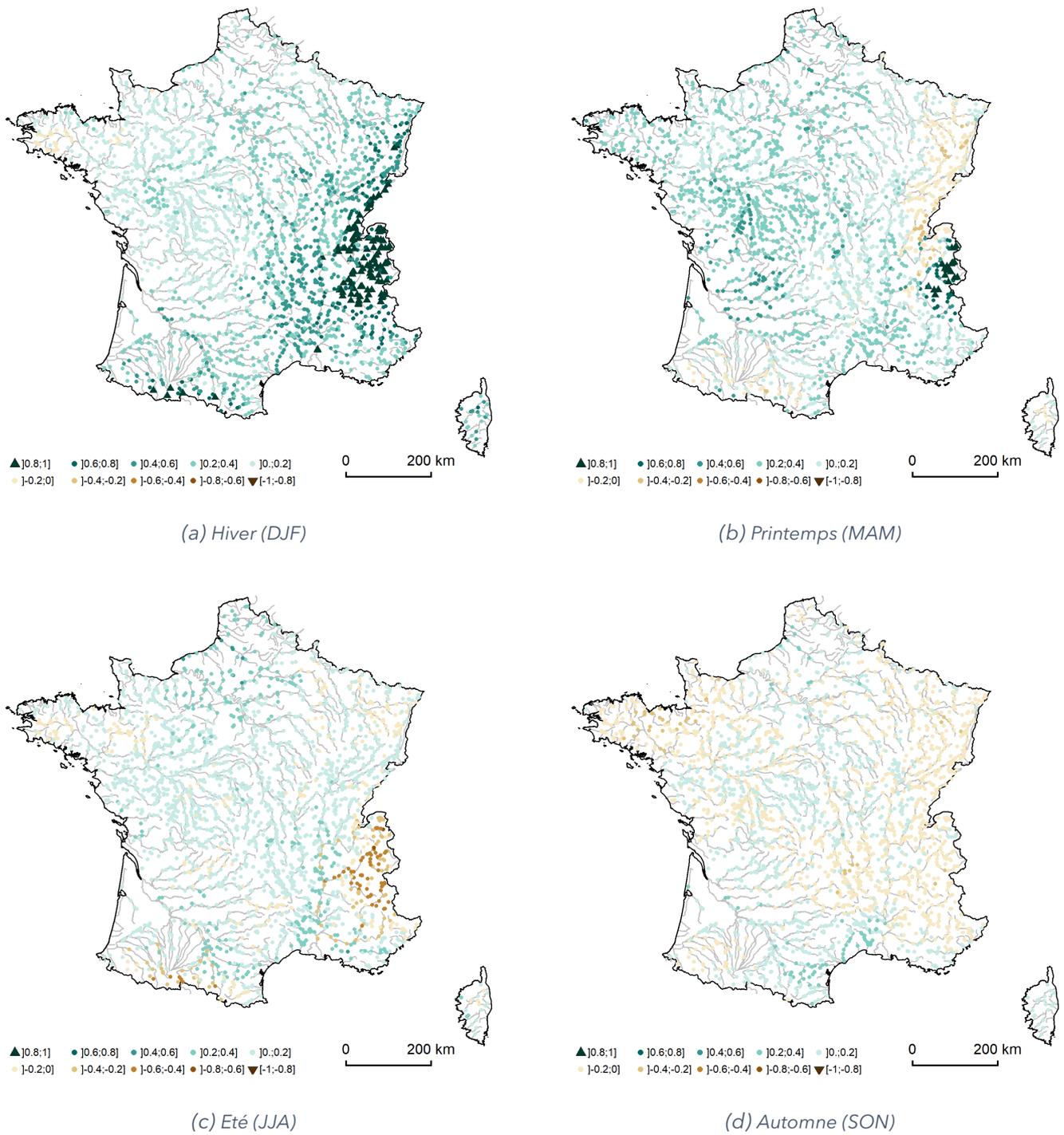


FIGURE 22 : Indice d'accord multi-modèle MIA pour les débits saisonniers pour le RCP2.6 (multi-modèles, ADA-MONT et CDF-t).

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

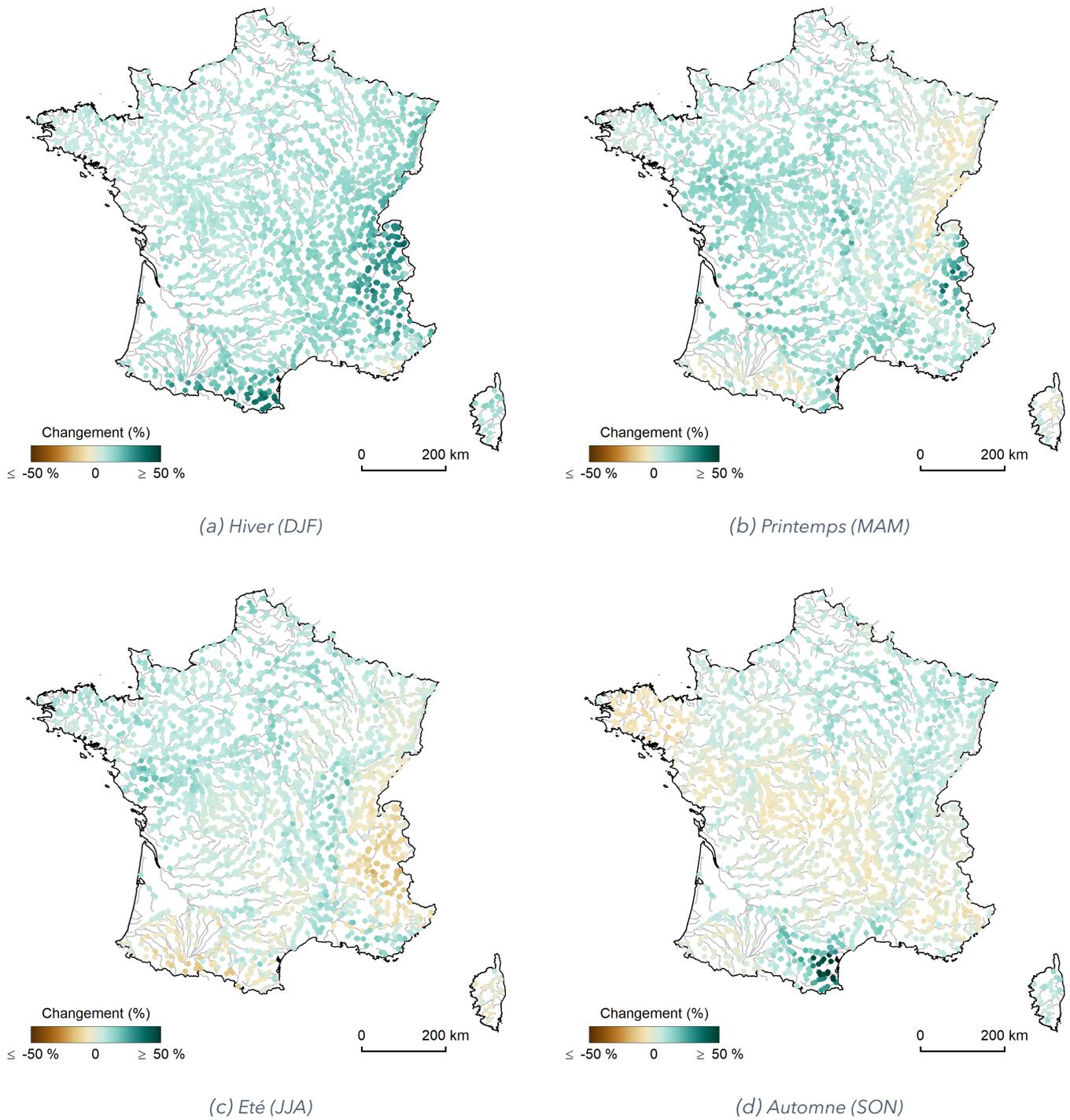


FIGURE 23 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP2.6, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t).

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

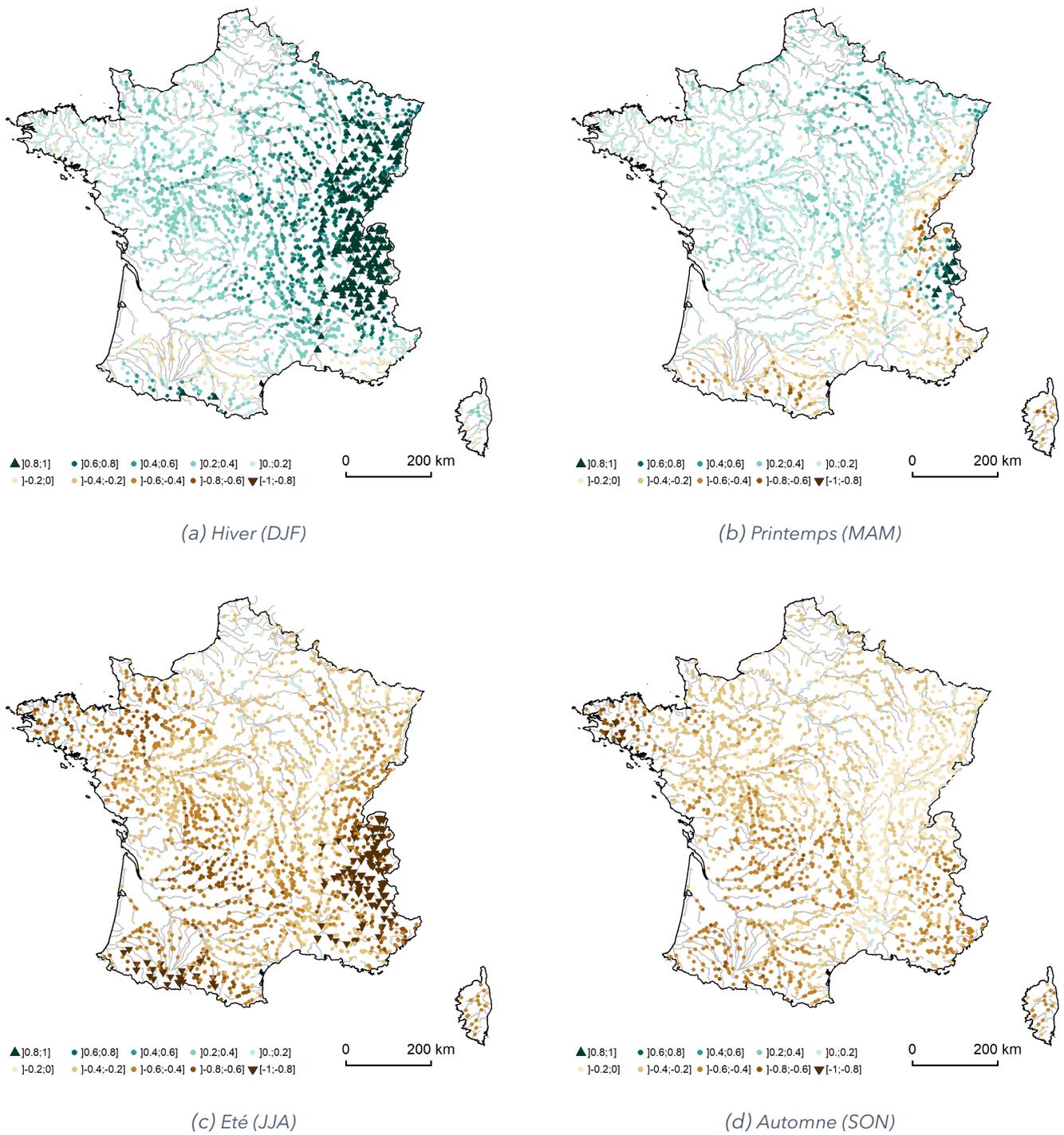


FIGURE 24 : Indice d'accord multi-modèle MIA pour les débits saisonniers pour le RCP4.5 (multi-modèles, ADA-MONT et CDF-t).

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

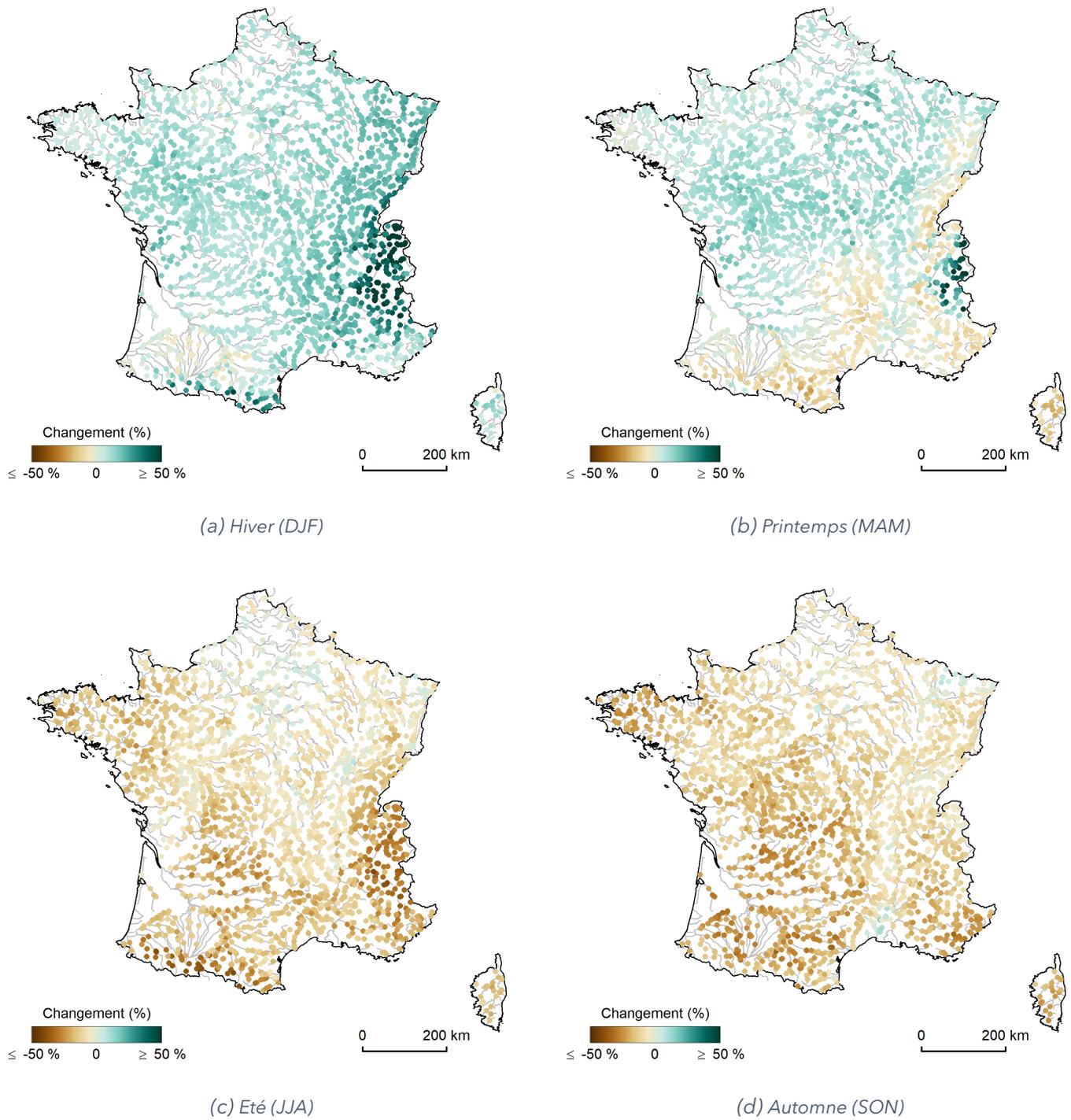


FIGURE 25 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP4.5, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t).

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

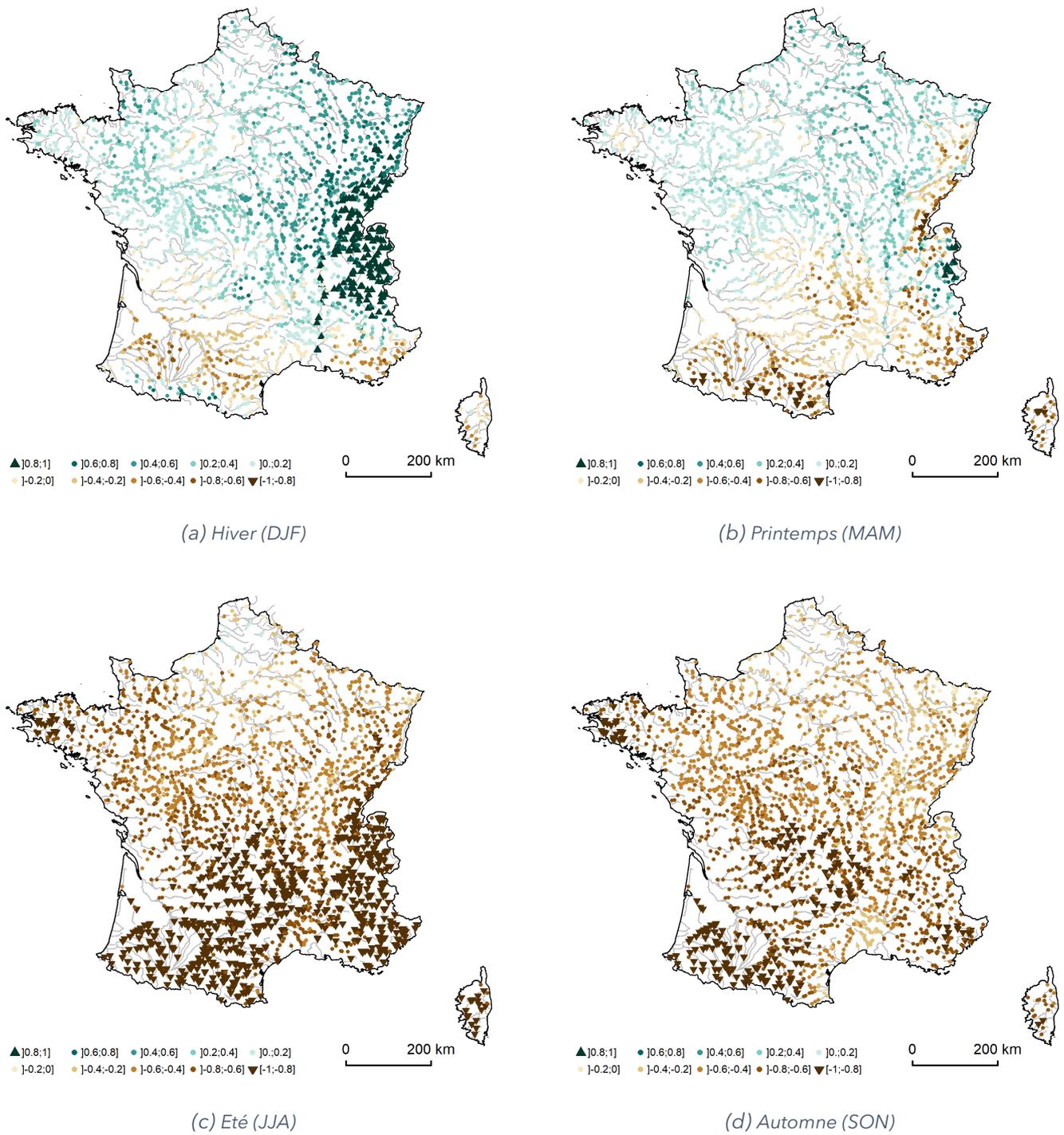


FIGURE 26 : Indice d'accord multi-modèle MIA pour les débits saisonniers pour le RCP8.5 (multi-modèles, ADA-MONT et CDF-t).

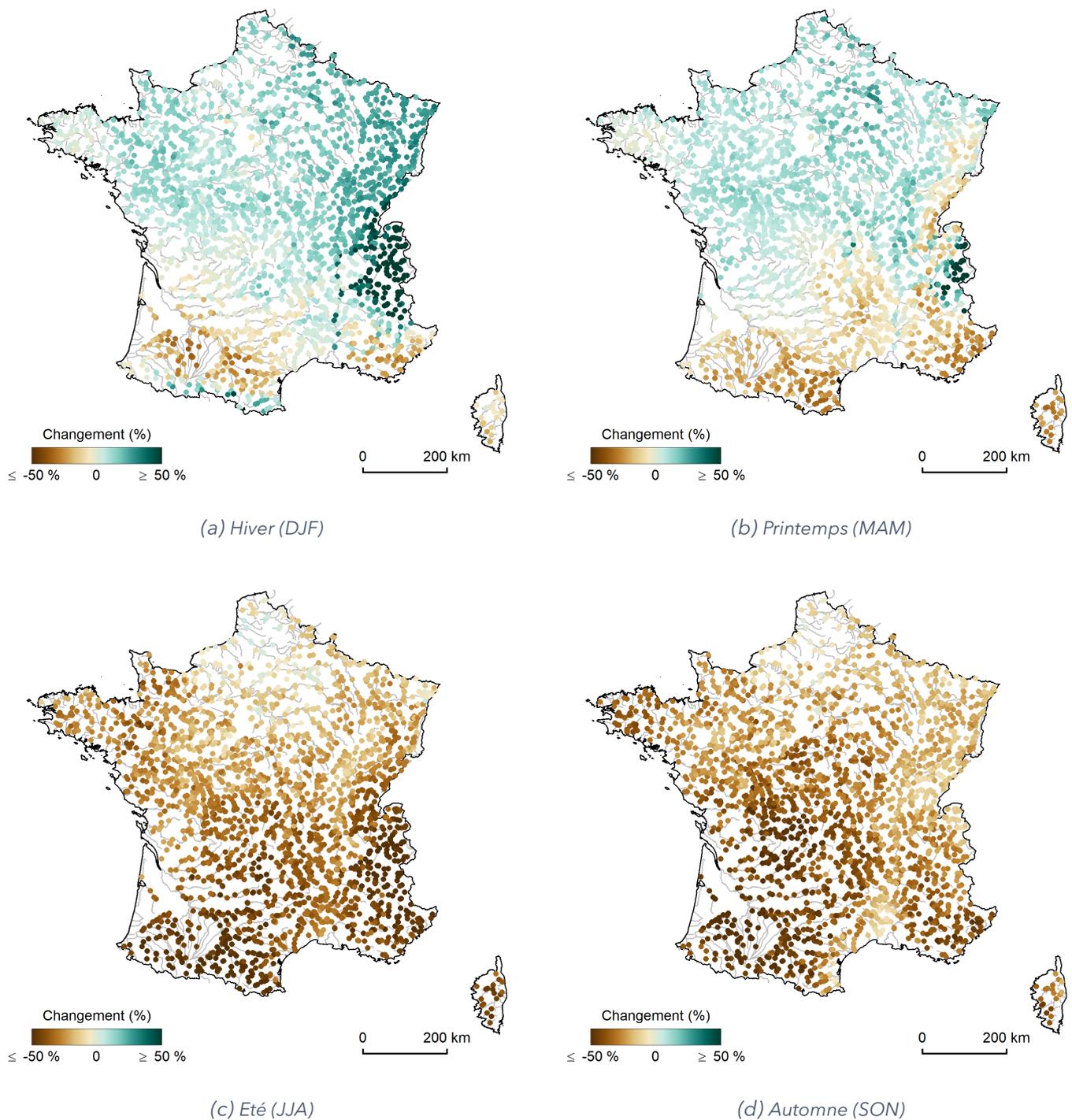


FIGURE 27 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers pour le RCP8.5, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t).

Les conclusions portant sur le débit annuel Q_A sont conformes à celles de EVIN *et al.* (2024) en [Section 5.1](#) et sont dans la logique des changements constatés sur la recharge potentielle des aquifères (LANINI *et al.*, 2024). Une majorité de tendances à la hausse se dégage sous RCP2.6 (N_{50+} est proche de 100 % dans le Tableau 7, Figure 29-a) mais sans qu'elles soient significatives ($N_{MIA80} = 0$, Figure 28-a). Un gradient de changement nord-sud émerge sous RCP4.5 et s'affirme sous RCP8.5. Comme dans EVIN *et al.* (2024), des changements significatifs apparaissent dans la partie sud (Pyrénées et ses contreforts et Alpes du Sud). Les changements médians se situent autour de -25 % dans ces secteurs (Tableau 14). Ces évolutions sont pour une grande partie du territoire conditionnées par les évolutions des débits d'hiver et de printemps

qui concentrent l'essentiel des volumes annuels. Même si le jeu de données analysé ici n'est pas strictement le même, pour des raisons d'application de la méthode QUALYPSO développée pour caractériser les ensembles de projections et les incertitudes associées, que celui analysé par Evin *et al.* (2024) (exploitant uniquement les modèles **CTrip**, **GRSD**, **ORCHIDEE** et **SMASH** appliqués sur l'ensemble de la France hexagonale), les changements médians estimés sont de même ordre de grandeur et présentent une organisation spatiale similaire sous les différents RCPs. De même, nous retrouvons les structures spatiales des changements annuels médians de recharge (à comparer à la Figure 9 de LANINI *et al.* (2024) sous RCP4.5 et RCP8.5 et en fin de siècle : la recharge annuelle augmente de +15 % en moyenne dans le nord de la France pour les deux RCPs et diminue significativement sous RCP8.5, dans les régions pyrénéennes et alpines).

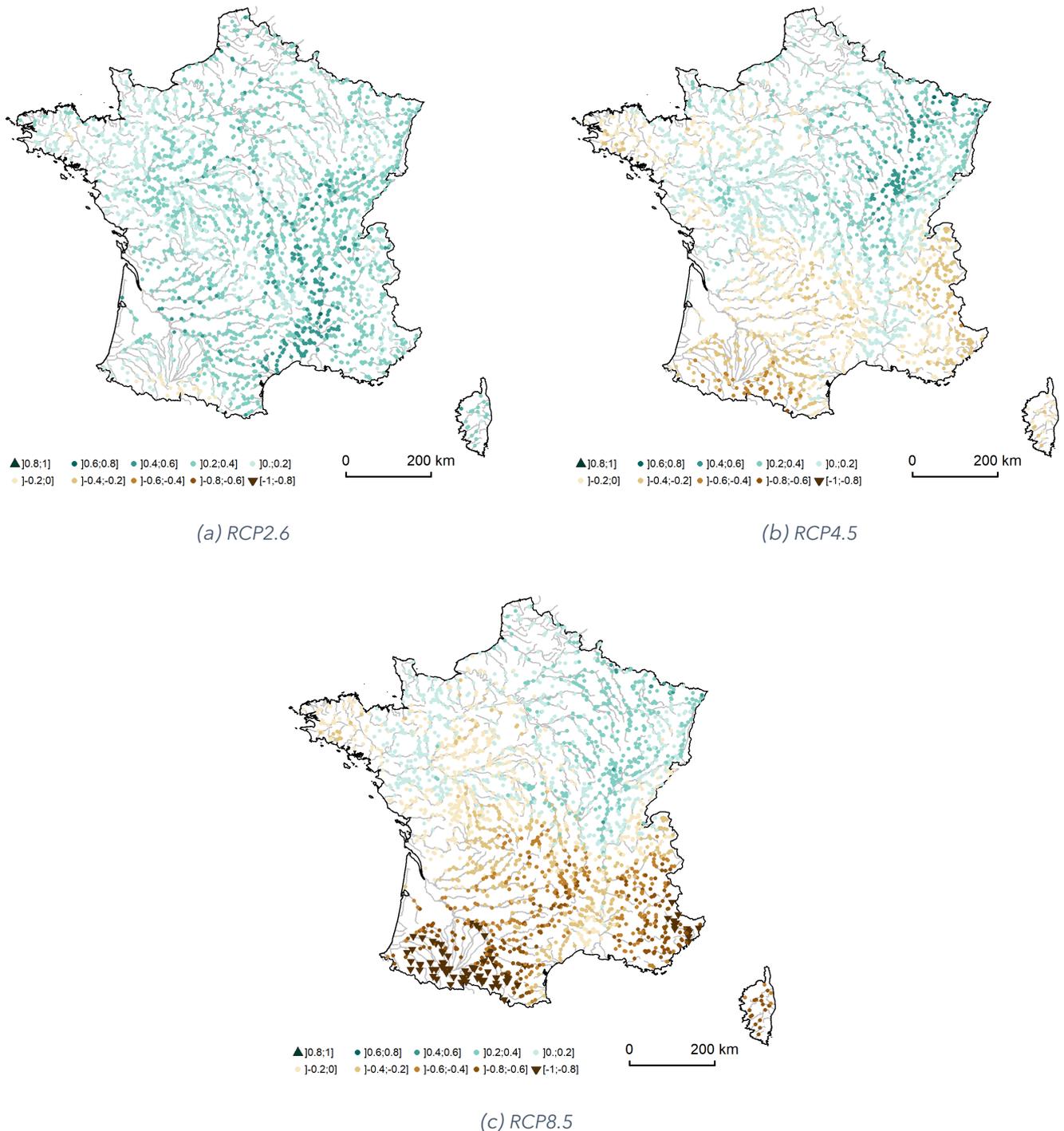


FIGURE 28 : Indice d'accord multi-modèle MIA pour le débit annuel par RCP (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t).

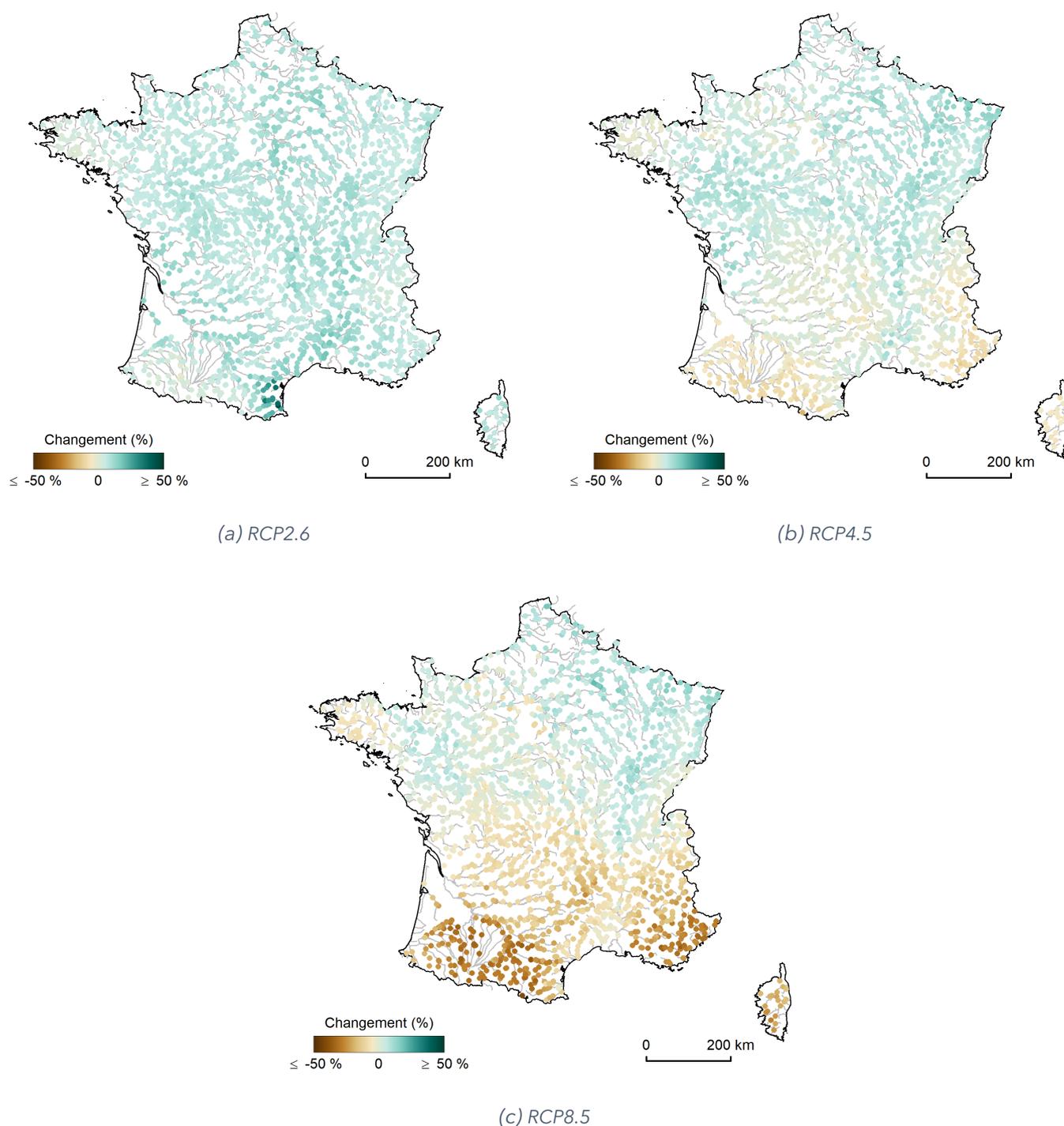


FIGURE 29 : Changements relatifs médians (%) des débits annuels par RCP, calculé entre la période de référence et la fin de siècle (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t).

4.2 Analyse conditionnelle aux quatre narratifs

Cette section est consacrée à la réponse spécifique des modèles hydrologiques à quatre projections climatiques bien identifiées : les quatre narratifs (MARSON *et al.*, 2024). Pour mémoire, ces quatre narratifs d'Explore2 ont été choisis par les hydrologues et les climatologues du projet, pour répondre au besoin d'illustrer des futurs possibles du climat, avec un focus particulier sur les risques de sécheresse. Ces quatre narratifs correspondent à des changements contrastés de température et précipitations d'ici la fin du siècle avec des qualificatifs relativement à l'ensemble **Explore2** :

- le narratif **orange** (ICHEC-EC-EARTH - MOHC-HadREM3-GA7-05) : fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel),
- le narratif **jaune** (CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 - CNRM-ALADIN63) : changements futurs relativement peu marqués,
- le narratif **violet** (MOHC-HadGEM2-ES - CLMcom-CCLM4-8-17) : fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations,
- le narratif **vert** (MOHC-HadGEM2-ES - CNRM-ALADIN63) : réchauffement marqué et augmentation des précipitations.

Il s'agit de mesurer en quoi ces narratifs conduisent à des futurs hydrologiques contrastés.

Les indicateurs $N50+$, $N50-$, $N80+$, $N80-$ et $NMIA80$ ont été calculés tous modèles hydrologiques confondus séparément pour chaque narratif. Les chiffres sont à relativiser car en chacun des 2500 points, le nombre de simulations est compris entre 4 et 9 (égal au nombre de modèles hydrologiques disponibles pour le narratif considéré). Ils reflètent une certaine logique. Ainsi, les faibles changements projetés par le narratif **jaune** se traduisent en faibles valeurs de MIA , comparativement aux autres narratifs. Les changements existent mais leur intensité est moindre. Sans surprise, comme précédemment, le signe des tendances est négatif en été ($N50- > 90\%$) et dans une moindre mesure en automne ($N50- \geq 67\%$) quel que soit le narratif. Ainsi, des nuances apparaissent :

- Le narratif **vert** est celui qui est le plus « humide » : les débits sont majoritairement à la hausse en hiver sauf sur l'extrême ouest de la Bretagne et le sud de la France,
- Il semble que le caractère très chaud du narratif **violet** compense des précipitations hivernales plus abondantes (Figure 30-a) et une recharge potentielle en hausse (Figure 12, LANINI *et al.* (2024)), ce qui entraîne une tendance globale à la baisse en hiver, à l'inverse du narratif **jaune**,
- Les débits sont en majorité à la baisse quelle que soit la saison du fait du caractère très sec de ce narratif **orange**.

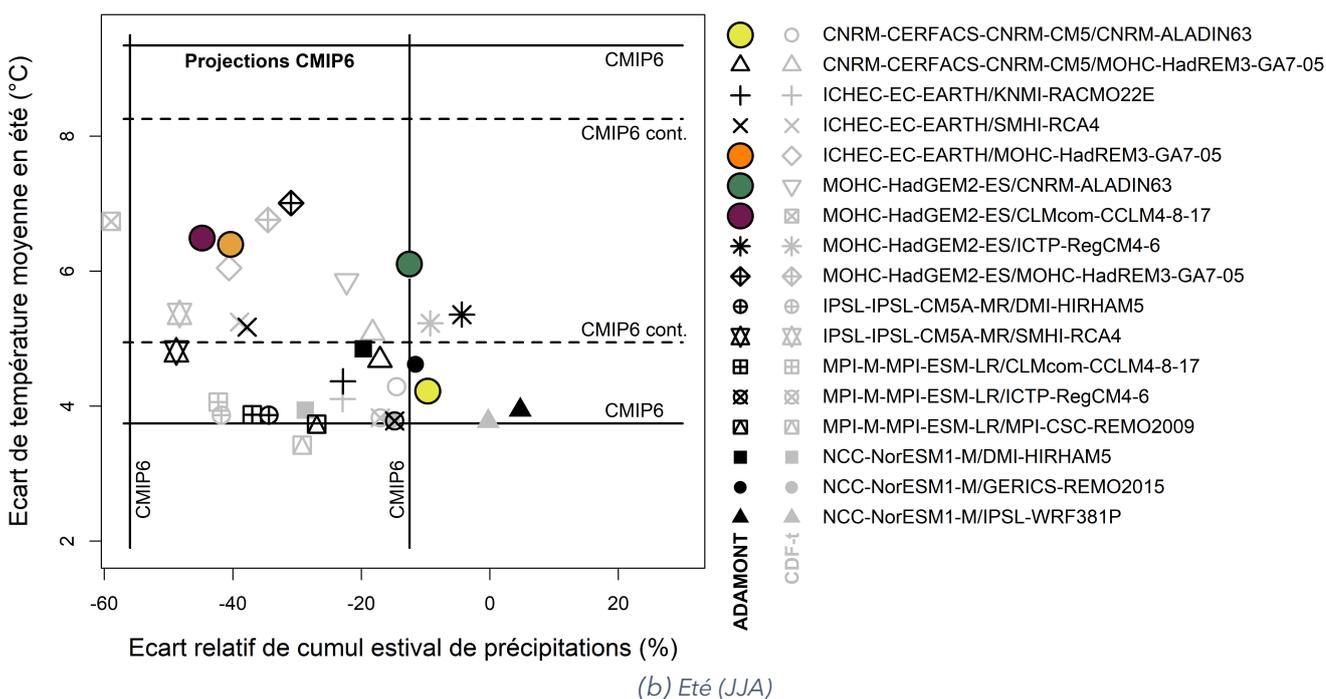
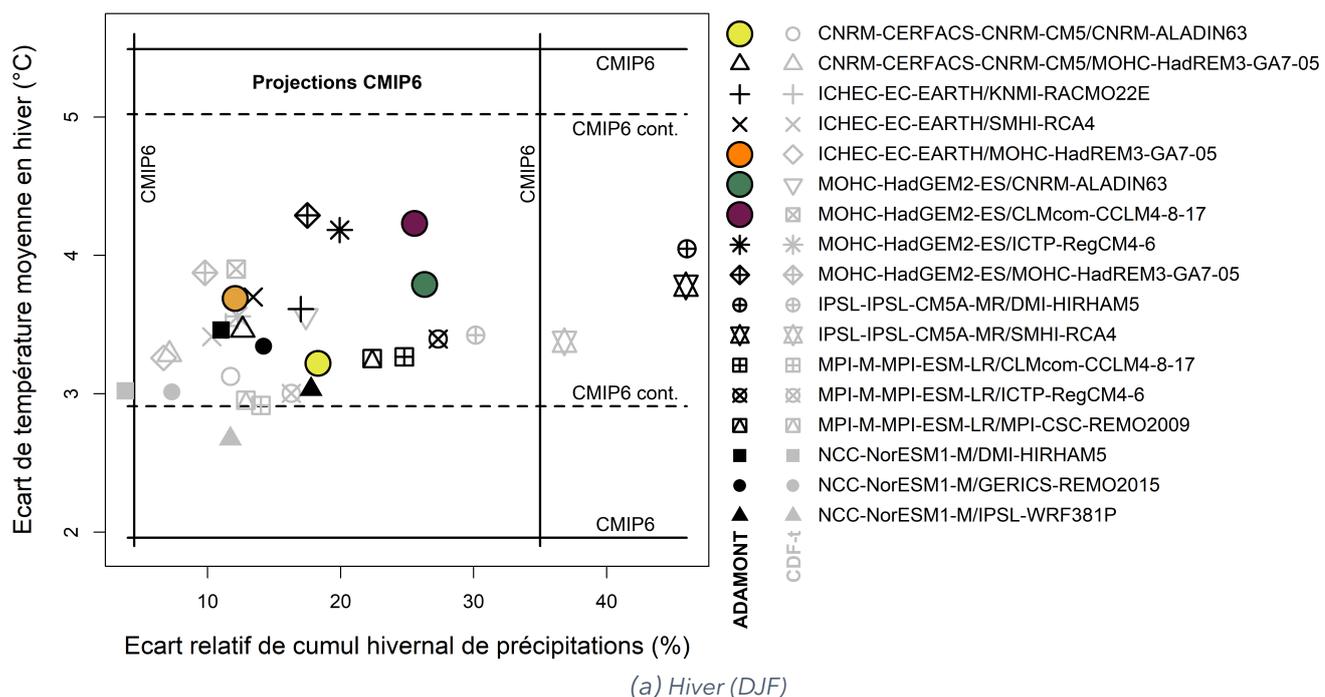


FIGURE 30 : Changements en température et en précipitations sur la France selon les 34 simulations sous RCP8.5 avec identification des quatre narratifs sur les saisons hiver et été, comparés aux quantiles 5 % et 95 % (Q5 et Q95) de l'ensemble CMIP6 (« CMIP6 ») et CMIP6 contraint (« CMIP6 cont. ») par les observations pour les températures.

Les Figures 31 à 34 apportent un regard spatial et font apparaître des réponses différenciées selon le bassin hydrographique. Les réponses hydrologiques aux narratifs **vert** et **jaune** reprennent la structure identifiée sur les analyses toutes projections climatiques confondues avec l'expression d'un gradient nord-sud, visible sur les changements médians des débits d'hiver et de printemps (Figure 31-a et -b, Figure 32-a et -b). A titre d'exemples, les changements médians varient autour de +24 % pour le narratif vert et de +16 % pour le narratif jaune pour le bassin de la Seine, et autour de -12 % pour le narratif vert et de -4 % sous RCP8.5 pour le bassin de la Garonne (Tableau 15, Tableau 16). Les cartes relatives au narratif **violet** sont moins

structurées (par « bandes » orientées sud-ouest nord-est), plus complexes avec l'émergence d'un hot spot centré sur les plaines de l'Adour, de la Garonne et de l'Aude jusqu'à l'Hérault (baisse sensible des débits en toute saison (Tableau 17); ainsi pour les fleuves côtiers méditerranéens dont la Corse présentent des changements médians autour de -30 % en hiver, -31 % au printemps, -61 % en été et -44 % en automne). Enfin, la réponse hydrologique au narratif **orange** est d'une grande homogénéité en termes de signe des tendances : la baisse des débits concerne toutes les saisons, à quelques exceptions près (les Alpes en hiver et au printemps, les Pyrénées en hiver, et les Cévennes en automne) et en termes d'intensité : les statistiques médianes des changements se situent autour de -50 % en été et en automne quel que soit le bassin (Tableau 18). Les changements de débits annuels conditionnés par les narratifs (Figure 35) font apparaître deux contextes « humides » (narratif **vert** et, de manière moins prononcée, narratif **jaune**). Enfin, le caractère uniformément sec du narratif **orange** observé sur les débits saisonniers se transmet au débit annuel QA et les changements médians se situent autour de -30 % (Tableau 19). Le narratif **violet** conduit à une situation intermédiaire avec des hausses concentrées autour du bassin de la Meuse. Les réponses hydrologiques aux quatre narratifs à l'échelle annuelle sont cohérentes avec les cartes de recharge potentielle proposées par LANINI *et al.* (2024).

Les changements médians par région hydrographique sont tous disponibles dans l'Annexe 8 dans les Tableaux 15 à 18 pour les débits saisonniers et 19 pour les débits annuels).

| Narratif | Débit | N50+ (%) | N50- (%) | N80+ (%) | N80- (%) | NMIA80 (%) |
|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| violet | Q_{DJF} | 25 | 72 | 15 | 55 | 24 |
| | Q_{MAM} | 38 | 57 | 6 | 34 | 9 |
| | Q_{JJA} | 0 | 100 | 0 | 98 | 82 |
| | Q_{SON} | 0 | 100 | 0 | 99 | 85 |
| | QA | 3 | 95 | 0 | 80 | 35 |
| orange | Q_{DJF} | 29 | 67 | 15 | 49 | 15 |
| | Q_{MAM} | 3 | 97 | 1 | 94 | 40 |
| | Q_{JJA} | 0 | 100 | 0 | 100 | 99 |
| | Q_{SON} | 0 | 99 | 0 | 97 | 75 |
| | QA | 0 | 100 | 0 | 99 | 55 |
| jaune | Q_{DJF} | 88 | 11 | 79 | 7 | 38 |
| | Q_{MAM} | 64 | 31 | 47 | 18 | 7 |
| | Q_{JJA} | 4 | 95 | 1 | 80 | 33 |
| | Q_{SON} | 28 | 67 | 13 | 37 | 7 |
| | QA | 68 | 29 | 51 | 20 | 9 |
| vert | Q_{DJF} | 61 | 35 | 42 | 22 | 22 |
| | Q_{MAM} | 74 | 24 | 62 | 17 | 19 |
| | Q_{JJA} | 10 | 88 | 3 | 68 | 27 |
| | Q_{SON} | 0 | 99 | 0 | 94 | 55 |
| | QA | 44 | 52 | 29 | 34 | 13 |

TABLEAU 8 : Statistiques sur les signes des tendances projetées sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus par narratif.

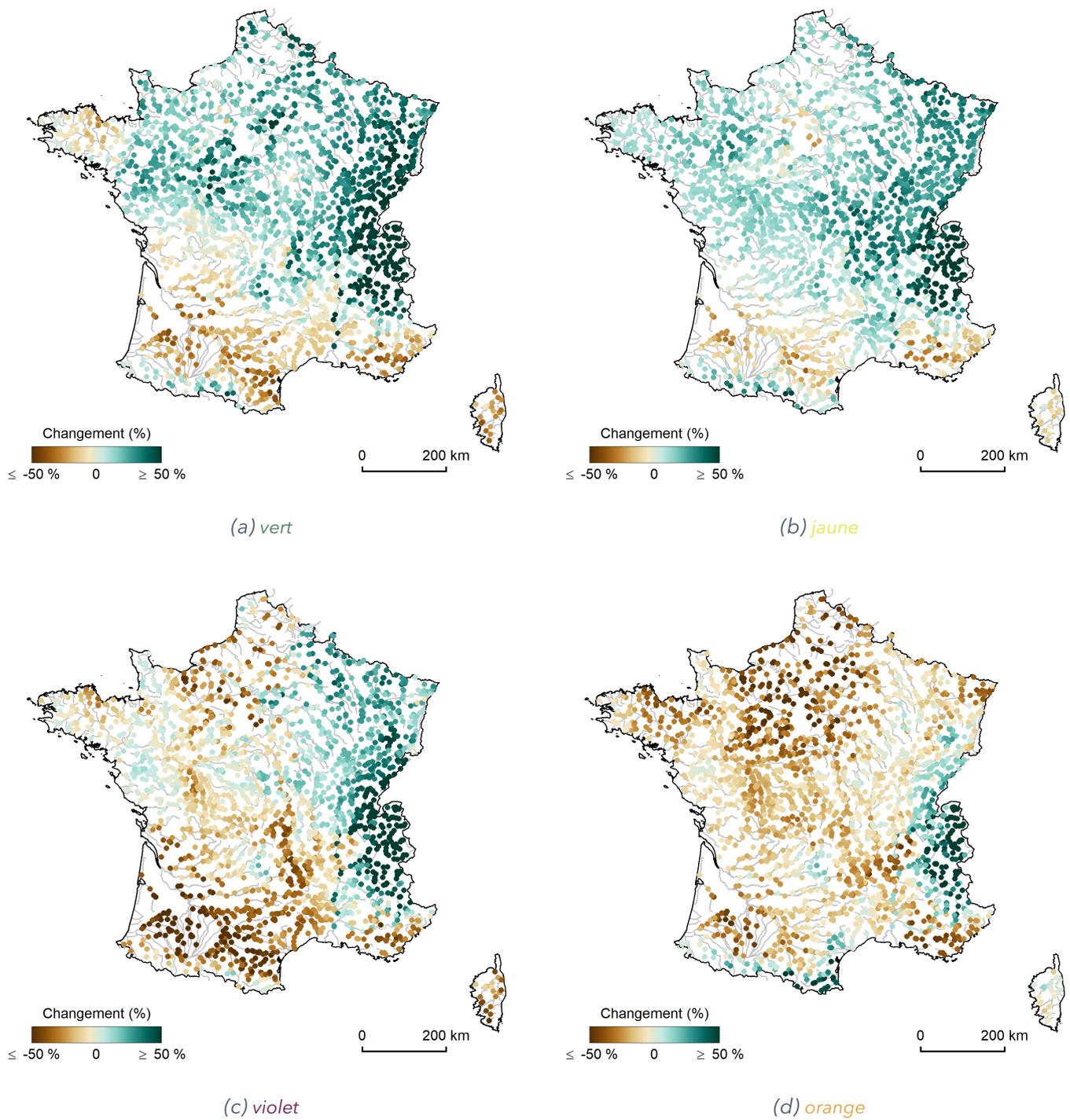


FIGURE 31 : Changements relatifs médians (%) des débits d'hiver (DJF) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

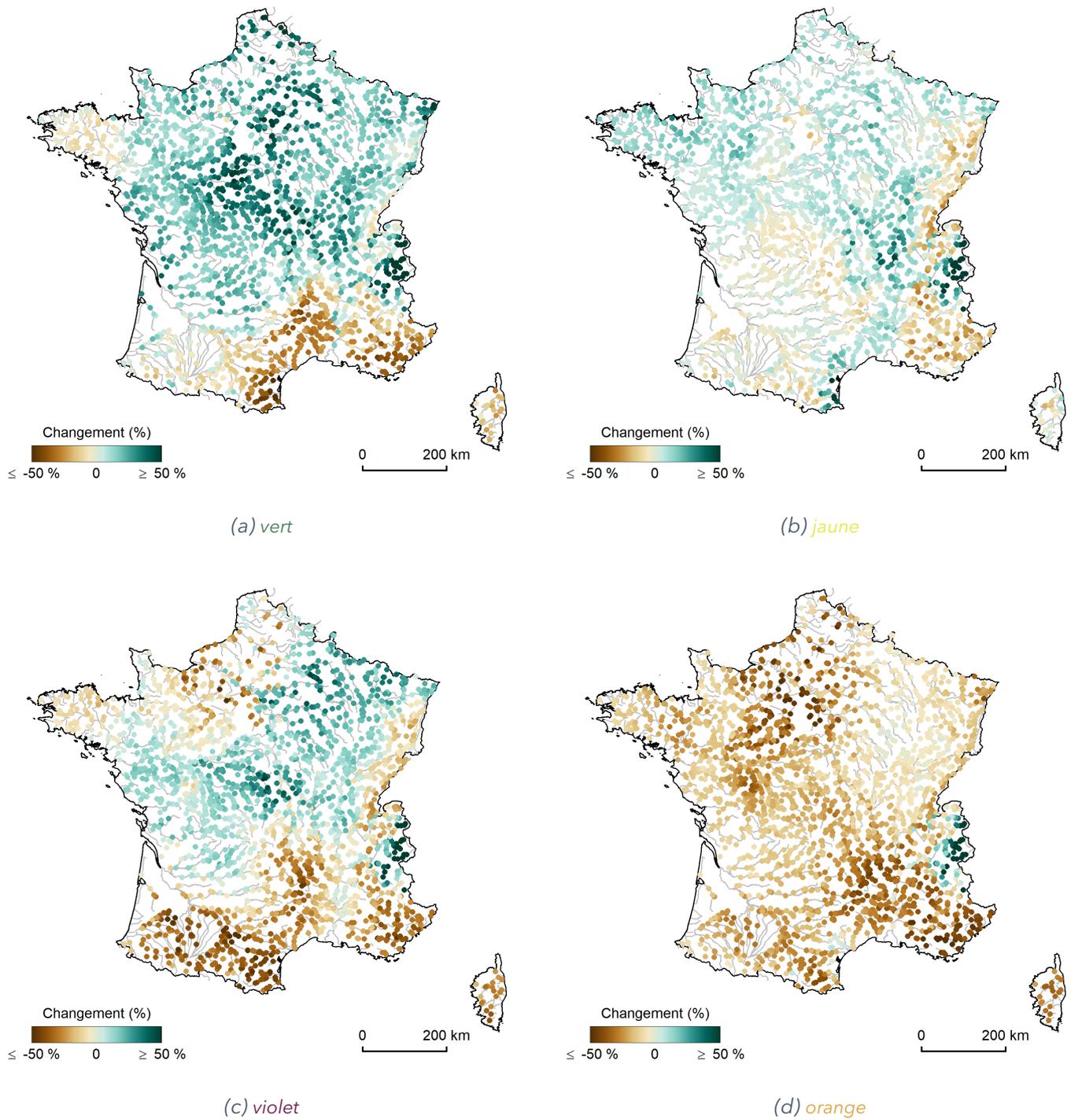


FIGURE 32 : Changements relatifs médians (%) des débits de printemps (MAM) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus.

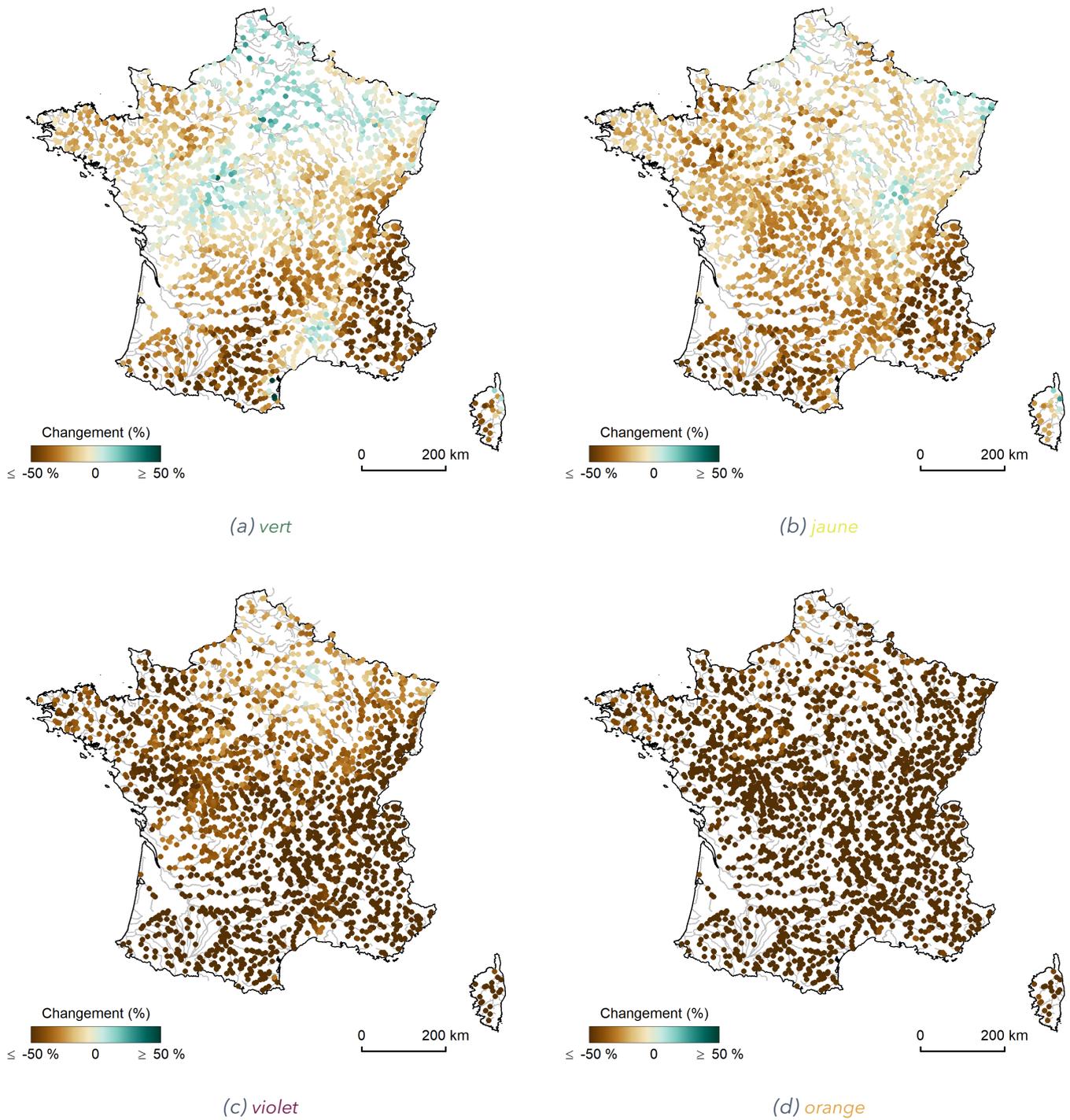


FIGURE 33 : Changements relatifs médians (%) des débits d'été (JJA) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus.

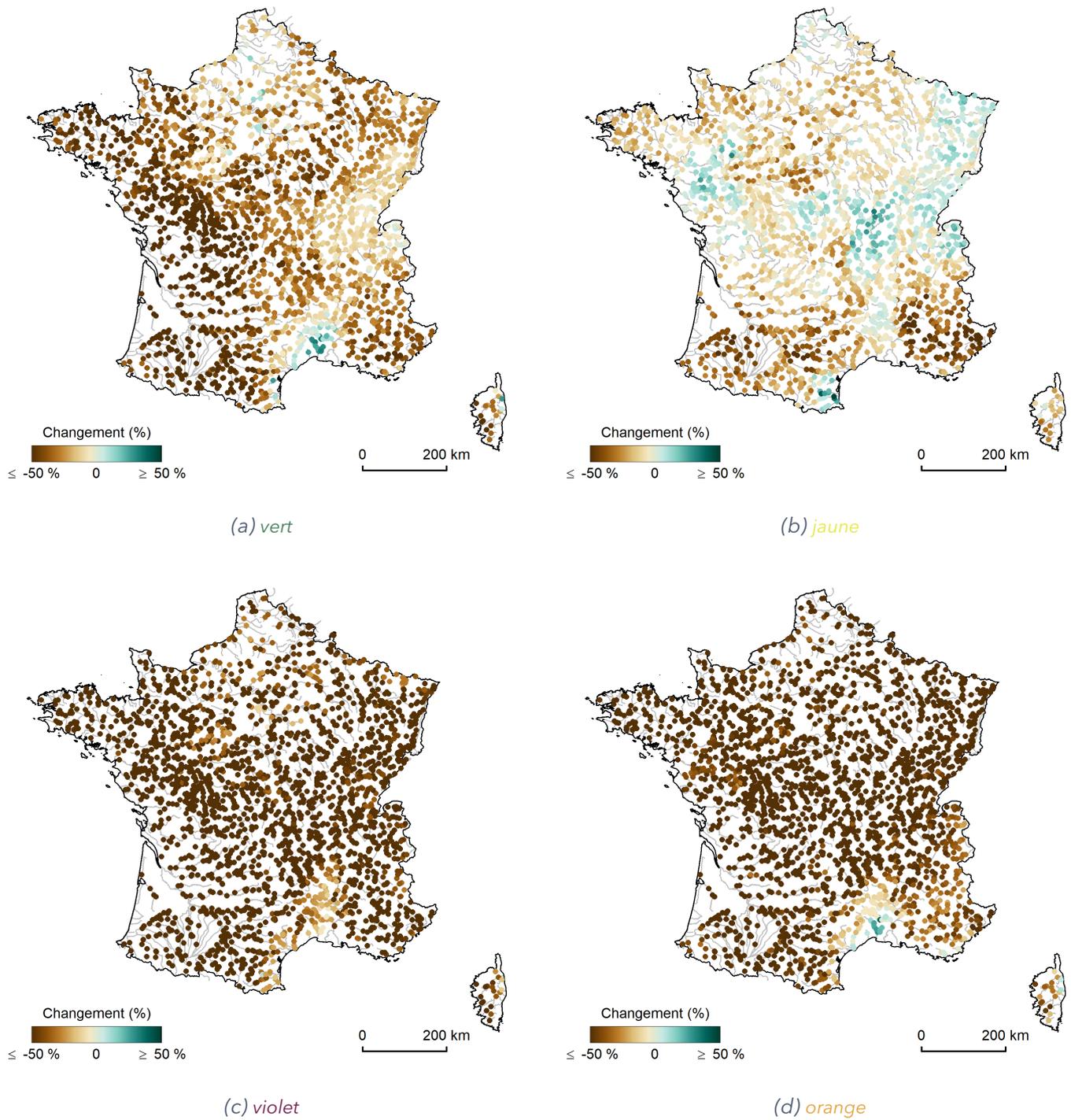


FIGURE 34 : Changements relatifs médians (%) des débits d'automne (SON) par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus.

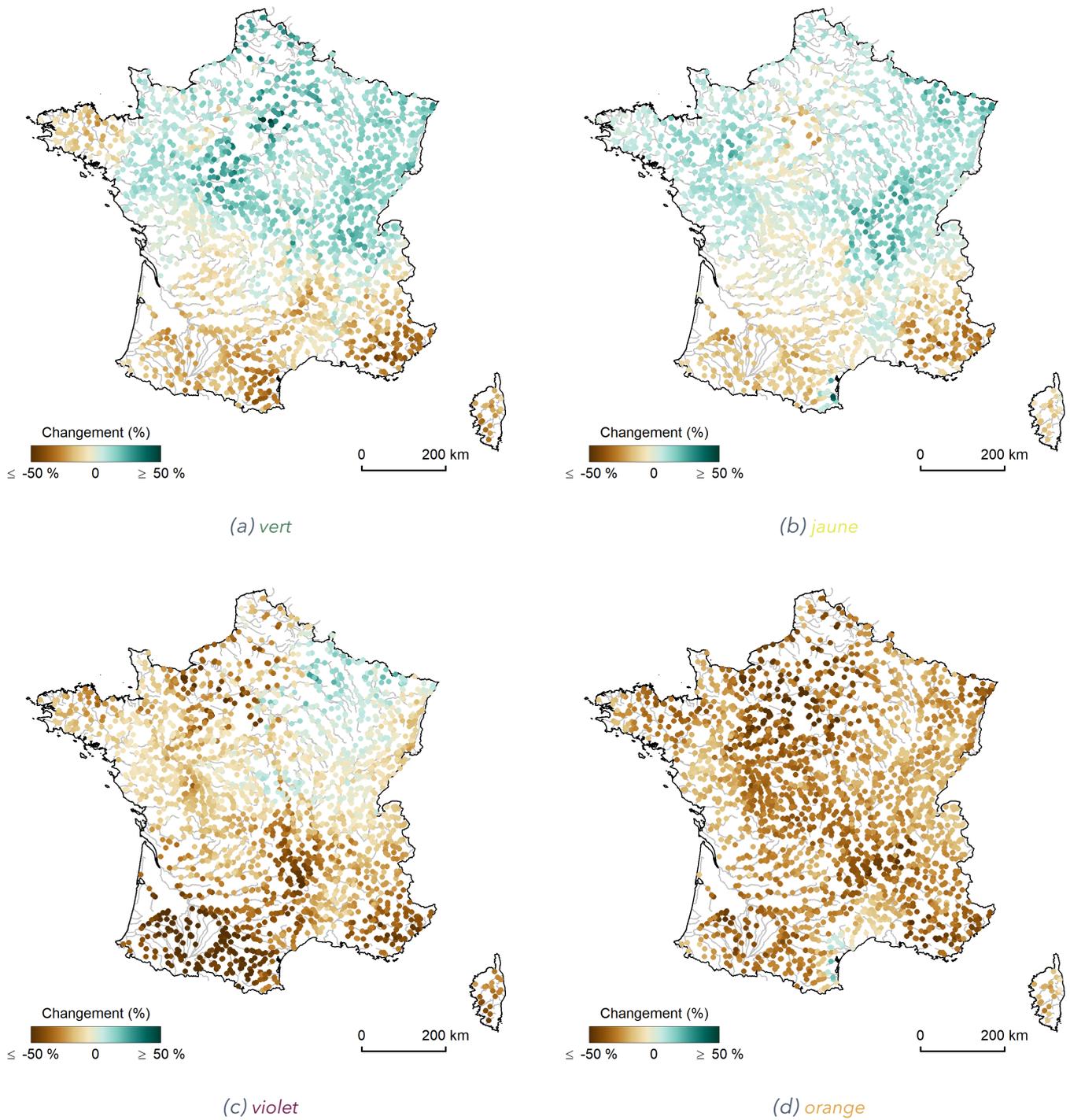


FIGURE 35 : Changements relatifs médians (%) par des débits annuels par narratif, calculé entre la période de référence et la fin de siècle, tous modèles hydrologiques confondus.

5 Conclusions

Les évolutions du fonctionnement hydrologique des bassins versants induites par le changement climatique sont d'autant plus importantes que le scénario d'évolution en GES est émetteur. Le changement climatique affecte de manière différenciée le territoire, en fonction de l'évolution du climat régional et des processus naturels actuellement actifs sur le bassin. Les évolutions du fonctionnement du bassin versant sont examinées ici au travers de l'appartenance à une classe de régime et des évolutions des débits moyens saisonniers.

Le scénario RCP2.6 même modérément émetteur ne garantit pas l'absence de changements du fonctionnement des bassins versants, c'est-à-dire l'absence de transition d'un régime hydrologique à un autre au fil du XXI^e siècle.

Globalement, les régimes hydrologiques à dominante pluviale seront plus contrastés avec des volumes d'eau écoulés qui vont se concentrer en période hivernale. Ce changement est notable dans le bassin de la Loire. Les bassins à régime mixte (alliant contributions nivale et pluviale) devraient glisser vers des régimes pluviaux. Ces bassins se situent en zone de moyenne montagne (Préalpes, Pyrénées). Les bassins en plus haute altitude conservent leur caractère nival mais présenteront des régimes moins contrastés avec potentiellement des étiages hivernaux moins sévères. Le retrait glaciaire contribue à la réduction sensible des débits notamment en août sur les bassins de haute montagne modélisés dans le bassin de l'Isère.

L'analyse sur l'ensemble des projections suggère :

- un gradient nord-sud pour les deux saisons hiver et printemps : des hausses sont suggérées sur la partie nord-est tandis que des diminutions sont suggérées dans le sud de la France. Ce gradient est « modulé » par les massifs montagneux (Pyrénées et Alpes, principalement). Les évolutions dans les massifs ont pour raison le changement de phase des précipitations, une constitution plus tardive et une fonte plus précoce du manteau neigeux,
- une baisse quasi généralisée des débits d'été et d'automne sur l'ensemble de la France hexagonale, qui témoigne d'une sévérité et d'une durée accrue des étiages. Les changements sont structurés selon un axe nord-sud avec des diminutions les plus fortes dans le sud-ouest (entre -63 % et -32 % sur le bassin de l'Adour versus entre -13 % et 2 % pour les fleuves côtiers de la limite du bassin Artois-Picardie à l'embouchure de la Seine (exclue) pour les débits estivaux sous RCP8.5).
- une intensité moyenne et une dispersion des changements en été et en automne à l'échelle de la France corrélées au caractère émetteur en GES du scénario d'émission :
 - 80% des points de simulation présentent des changements médians des débits moyens d'été entre -47 % et -15 % (médiane -30 %) sous RCP8.5 contre entre -23 % et -2 % (médiane : -12 %) sous RCP4.5,
 - 80% des points de simulation présentent des changements médians des débits moyens d'automne entre -44 % et -15 % (médiane -28 %) sous RCP8.5 contre entre -23 % et -4 % (médiane : -13 %) sous RCP4.5.

Notons que la convergence est faible dans le nord de la France. Les bassins de la Garonne et l'Adour, ainsi que ceux des petits fleuves côtiers méditerranéens, apparaissent comme des hot-spots avec une baisse des débits saisonniers quasi généralisée.

Les résultats pour l'ensemble de 2500 points de simulation sont disponibles sous forme de graphique pour le RCP8.5 en milieu et fin de siècle sont donnés sur un jeu de fiches synthétiques (HERAUT et SAUQUET, 2024).

La réponse hydrologique aux quatre narratifs a été examinée. Ces quatre narratifs conduisent effectivement à des visages contrastés de l'hydrologie. Ces contrastes s'expriment principalement par des nuances en hiver. Le nord de la France bénéficie de précipitations à la hausse, ce qui entraîne des débits plus importants pour les narratifs globalement « humides » (principalement les narratifs **vert** et **jaune**). Malgré des hausses de précipitations présentes dans certains narratifs, la recharge accrue des aquifères (LANINI et al., 2024) ne vient pas compenser l'élévation des températures : les étiages sont plus prononcés en fin de siècle. Un scénario de baisse généralisée des débits en toute saison est possible : il est porté par le narratif **orange**.

6 Annexe 1 : Cartographie des régimes en temps présent

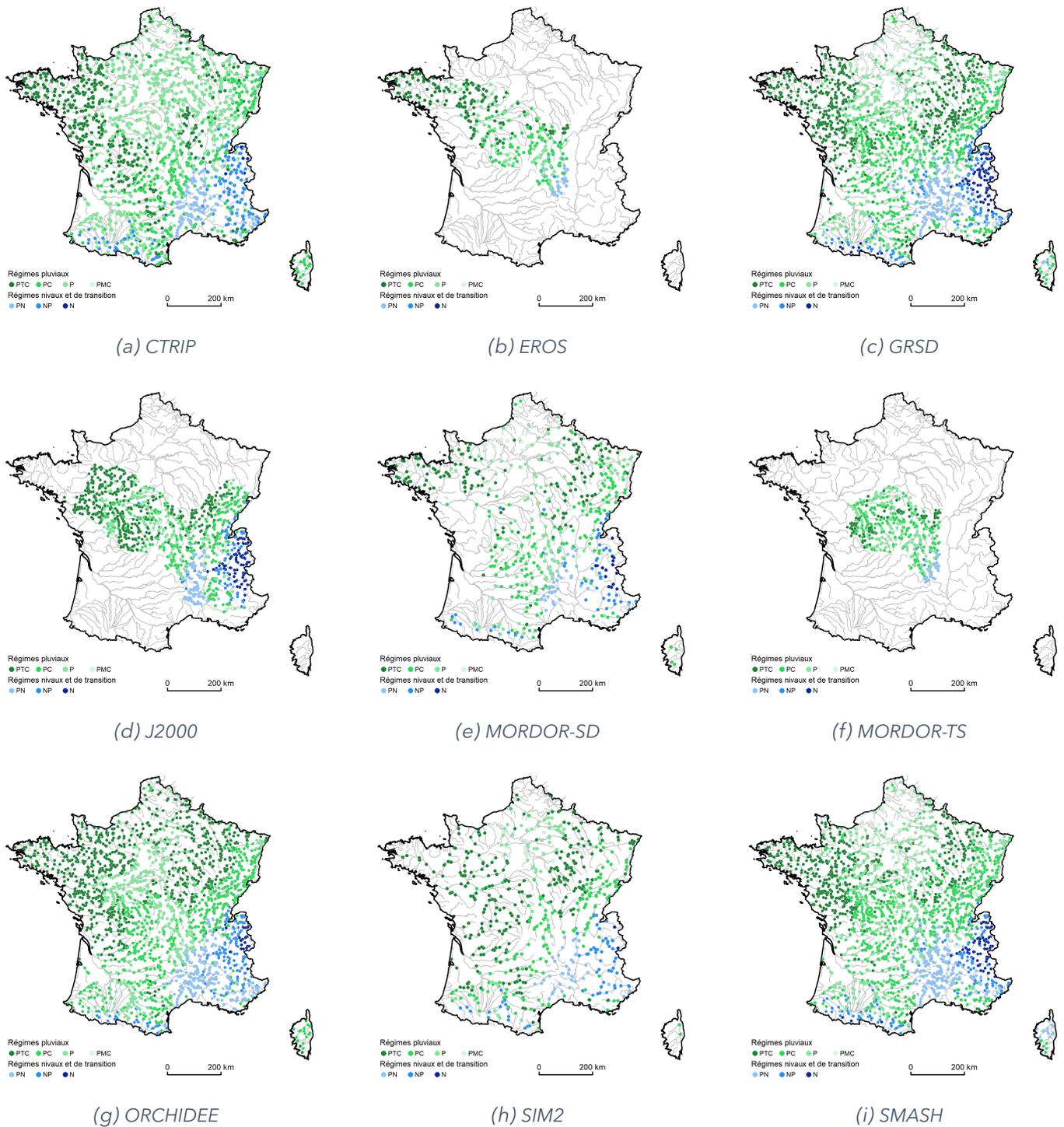


FIGURE 36 : Carte des régimes hydrologiques par modèle hydrologique forcé par SAFRAN sur la période 1976-2005.

7 Annexe 2 : Présentation des modèles hydrologiques

7.1 CTRIP

Le modèle **CTRIP** est un modèle de routage en rivière développé et maintenu au CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) depuis le début des années 2000, avec pour objectif premier de représenter les écoulements de l'eau dans le réseau hydrographique sur l'ensemble des continents du globe dans le modèle global de climat du CNRM (DECHARME *et al.*, 2019). **CTRIP** est couplé au modèle de surface ISBA du CNRM, qui représente les échanges verticaux d'eau et d'énergie à l'interface sol-atmosphère. Le modèle couplé ISBA-**CTRIP** permet alors de représenter l'ensemble des processus hydrologique de l'échelle du sous-bassin versant à l'échelle continentale (Figure 37). Dans le cadre du projet **Explore2**, le modèle **CTRIP** est déployé sur le territoire métropolitain (étendu à la Suisse pour le bassin amont du Rhône), et alimenté par le modèle ISBA dans sa configuration **SIM2** (Section 7.7, page 71).

Le modèle **CTRIP** est un modèle à base physique permettant avant tout de représenter les écoulements en rivière sur l'ensemble d'un réseau hydrographique. Ce dernier est établi sur une grille régulière à la résolution de $1/12^\circ$ (soit environ 6-8 km sur la France, Figure 38) à partir du réseau hydrographique global MERIT-Hydro (YAMAZAKI *et al.*, 2019) disponible à la résolution de 90 m et considéré aujourd'hui comme le plus précis à l'échelle du globe. Un certain nombre de paramètres hydro-géomorphologiques, tels que les longueurs et pentes des tronçons de rivière, sont obtenus à partir des données haute résolution issues de MERIT-Hydro, d'autres paramètres, tels que les largeurs, profondeurs et rugosité, à partir de formules empiriques (MUNIER et DECHARME, 2022). Il est fait l'hypothèse que chaque maille contient un et un seul tronçon de rivière, représenté sous la forme d'un réservoir s'écoulant dans la maille aval. L'équation de Manning est utilisée pour calculer la vitesse d'écoulement en fonction du volume d'eau dans le tronçon, lui-même mis à jour par les apports des tronçons amont et les ruissellements issus du modèle ISBA.

Le modèle **CTRIP** bénéficie en outre d'une représentation bidimensionnelle de la dynamique des aquifères et des échanges nappe-rivière (VERGNES et DECHARME, 2012).

Enfin, les processus de surface liés à la végétation (dont évapotranspiration réelle) et au manteau neigeux (dont sublimation et fonte) sont pris en compte dans le modèle ISBA (voir fiche modèle **SIM2**). A noter que le schéma d'inondation (DECHARME *et al.*, 2012) n'a pas été ici utilisé car n'ayant que peu d'influence sur le territoire métropolitain. En outre, il est également important de noter que, contrairement à la plupart des modèles hydrologiques, le modèle **CTRIP** ne bénéficie pas d'une étape de calibration de ses paramètres. Ce choix permet d'assurer une cohérence spatiale lorsque le modèle est utilisé sur d'autres région du globe - voire en global - où peu d'observations sont disponibles.

7.2 EROS

Développé par le BRGM, **EROS** (Ensemble de Rivières Organisées en Sous-bassins) désigne avant tout un logiciel de modélisation semi-distribué dédié à la modélisation de grands bassins versants (THIÉRY, 2018). Il permet la modélisation des débits des cours d'eau et de niveaux piézométriques de la nappe sous-jacente dans un bassin versant hétérogène découpé en sous-bassins. Ce bassin versant hétérogène est modélisé par **EROS** sous forme de grappes de sous-bassins emboîtés.

Dans chaque sous-bassin, **EROS** met en œuvre le modèle hydrologique global à réservoir GARDENIA (THIÉRY, 2014). Chaque modèle global simule de manière conceptuelle les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un sous-bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) de manière conceptuelle. Les lois intégrées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs. Le principe de fonctionnement d'un modèle GARDENIA est schématisé sur la Figure 39. Dans un sous-bassin, les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples décrites par les paramètres dimensionnels du modèle (capacité de rétention du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.). Ces paramètres sont déterminés par ajustement simultané sur des séries d'observations de débits à l'exutoire des sous-bassins et des séries d'observations de niveaux piézométriques dans la nappe sous-jacente de cer-

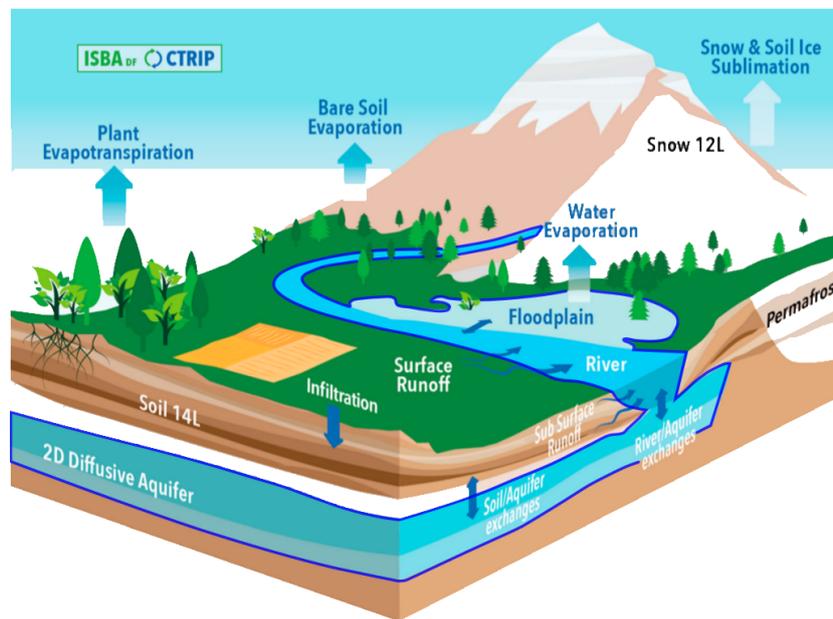


FIGURE 37 : Représentation schématique du modèle couplé ISBA-CTRIP.

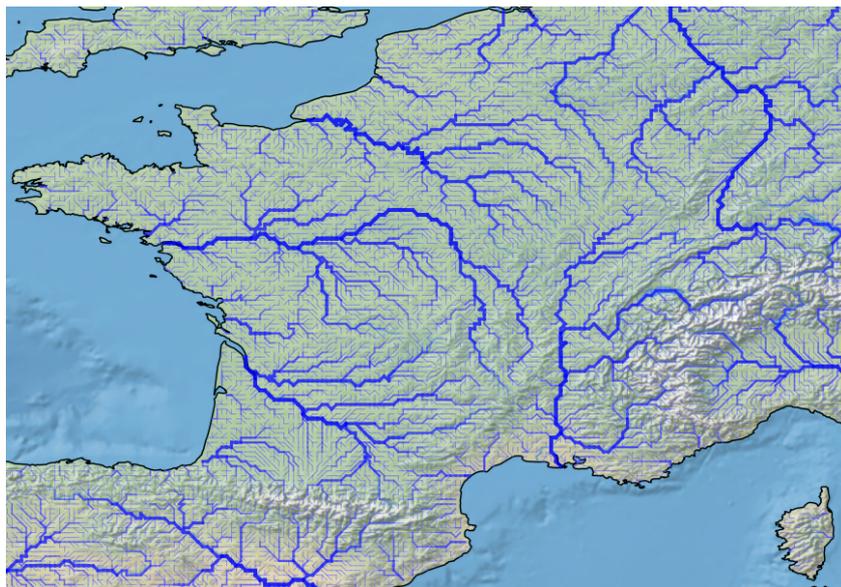


FIGURE 38 : Représentation du réseau hydrographique de CTRIP à la résolution de 1/12° sur la France hexagonale.

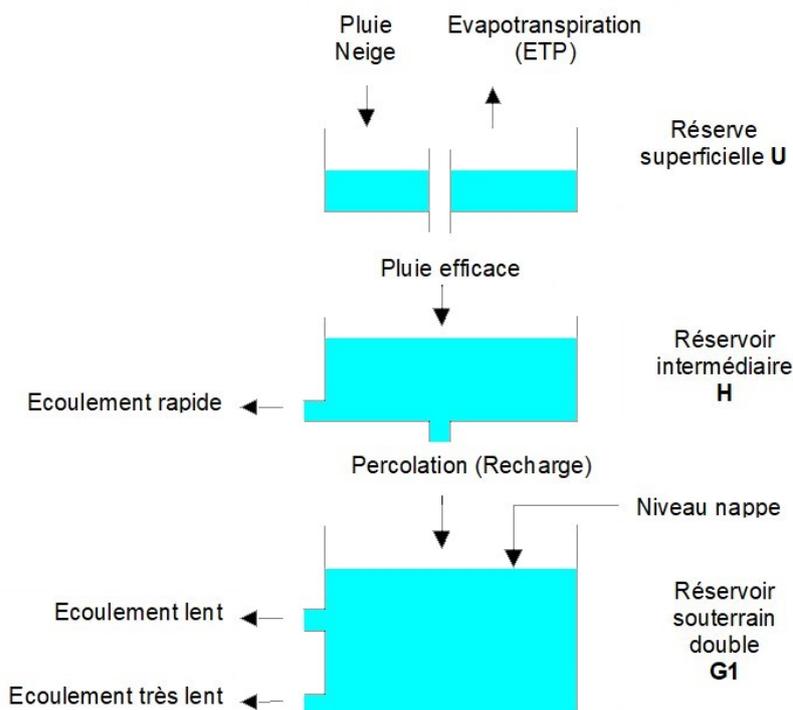


FIGURE 39 : Schéma de principe du modèle GARDENIA. Cette configuration utilise un seul réservoir souterrain à deux orifices de vidange permettant de simuler un effet de débordement ou une fracture.

tains sous-bassins. Les paramètres sont calés par une méthode d'optimisation permettant de minimiser les écarts entre les séries de données observées et celles simulées par le modèle. Dans chaque sous-bassin, à partir des séries de données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle, température de l'air) sur le bassin d'alimentation, le modèle hydrologique global simule le débit élémentaire à l'exutoire du sous-bassin et le niveau piézométrique en un point représentatif de la nappe sous-jacente. Les débits élémentaires des sous-bassins sont alors agglomérés de l'amont vers l'aval, en prenant en compte le temps de transfert d'un bassin à l'autre. L'accumulation et la fonte de la neige peuvent être prises en compte, ainsi que les effets de prélèvements et de rejets d'eau en rivière ou en nappe dans certains sous-bassins (option non activée dans le projet **Explore2**).

Le modèle **EROS-Bretagne** a été initialement développé par le BRGM dans le cadre du projet de plateforme de modélisation hydrogéologique nationale **AquiFR** (VERGNES *et al.*, 2020). Il **EROS-Bretagne** couvre ainsi 96 sous-bassins versants et simule les chroniques de débits journaliers en rivière au droit de 96 stations hydrométriques et le niveau journalier de la nappe sous-jacente dans 41 piézomètres (Figure 40-a). Le calage est réalisé à la fois sur le débit du cours d'eau et le niveau de la nappe pour chaque sous bassin. La période de calibration varie en fonction des données d'observation disponibles, ici celles disponibles entre 1976 à 2019. Les débits des 96 sous-bassins sont simulés de manière indépendante. Cela signifie que ces sous-bassins sont déconnectés les uns des autres dans **EROS**, ce qui revient à simuler 96 modèles GARDENIA indépendants.

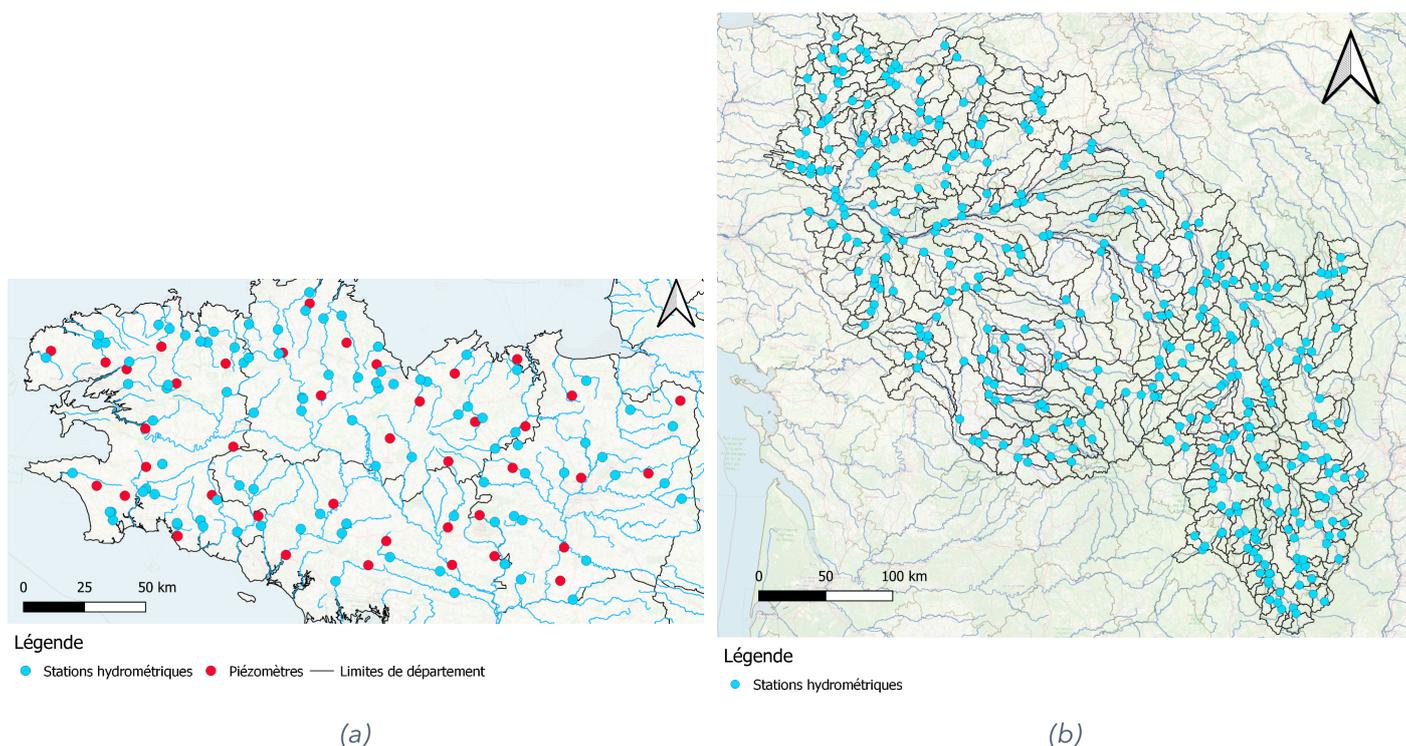


FIGURE 40 : Points de restitution du modèle EROS-Bretagne (débit et niveau piézométrique) (a) et du modèle EROS-Loire (débit) (b).

Le modèle **EROS-Loire** a déjà utilisé dans plusieurs autres études, incluant des études d'impact du changement climatique (BUSTILLO *et al.*, 2014; SEYEDHASHEMI *et al.*, 2020). Il simule des débits journaliers à l'exutoire de 368 sous-bassins dont les surfaces varient de 40 à 1600 km² (Figure 40-b). Ces sous-bassins ont été choisis pour être les plus homogènes possibles par rapport à l'occupation du sol et à la géologie. La période de calibration s'étend de 1971 à 2019.

Les paramètres des modèles **EROS-Bretagne** et **EROS-Loire** ont été calés par optimisation numérique.

7.3 GRSD

Le modèle **GRSD** est un modèle pluie-débit journalier développé à INRAE Antony. Il a été initié dans le cadre des travaux de (LOBLIGEOIS, 2014). Il s'agit d'une version semi-distribuée d'un modèle pluie-débit journalier conceptuel de la famille des GR, ici GR4J (PERRIN *et al.*, 2003), couplé à un modèle d'accumulation et de fonte de la neige journalier, CemaNeige. L'approche semi-distribuée permet de diviser les bassins versants en sous-unités hydrologiques (des bassins versants intermédiaires) au niveau de chacune des stations hydrométriques d'intérêt. Les débits journaliers de ces bassins intermédiaires sont simulés par GR4J et CemaNeige à partir des données d'entrées agrégées (précipitation, température de l'air, évapotranspiration), sur chaque bassin versant intermédiaire considéré. Ces débits sont ensuite propagés, avec un retard lié à la taille des bassins versants intermédiaires, vers les stations situées en aval selon un réseau de routage établi à partir de la topographie du bassin versant. Plusieurs variables peuvent être simulées par le modèle **GRSD** en plus du débit : elles reflètent les dynamiques du manteaux neigeux (volume, étendue, fonte), d'humidité du sol, d'évapotranspiration, et des eaux souterraines.

CemaNeige

CemaNeige est un modèle journalier d'accumulation et de fonte de la neige à deux paramètres (un paramètre d'inertie thermique CTg du manteau et un facteur de fonte degrés-jours Kf) développé dans le cadre des travaux de (VALÉRY, 2010). CemaNeige permet de simuler l'accumulation, le couvert et la fonte de neige à partir des données d'entrées de précipitations neigeuses et de température de l'air au pas de temps journalier. CemaNeige est appliqué, pour chaque bassin versant intermédiaire, sur cinq bandes d'al-

titude de même surface. La fonte de la neige est calculée en fonction du stock de neige accumulée, de l'état thermique du manteau neigeux, de la surface enneigée et de la température du jour. Les volumes de fonte du manteau neigeux et de précipitations liquides sont ensuite agrégés sur chaque bassin versant intermédiaire, puis injectés dans un modèle pluie-débit tel que GR4J. Dans le cadre de la modélisation avec **GRSD**, les valeurs des deux paramètres de CemaNeige ont été fixées aux valeurs préconisées par (VALÉRY, 2010) et (NICOLLE, 2010).

Un traitement est effectué en amont de CemaNeige afin de déterminer les proportions de précipitations sous forme de neige et de pluie. Les précipitations sont considérées comme de la neige lorsque la température moyenne journalière est inférieure à -1°C , ou comme de la pluie si cette température est supérieure à $+3^{\circ}\text{C}$. Entre ces deux températures, une fonction linéaire est appliquée afin de déterminer le taux de neige et le taux de pluie. Par ailleurs, une extrapolation vient répartir les précipitations sur les cinq bandes d'altitude en fournissant plus de précipitations en altitude qu'en vallée. Enfin, les températures de l'air sont modifiées afin de respecter un gradient adiabatique classique, afin de disposer de températures plus fraîches en altitude qu'en vallée.

GR4J

GR4J est un modèle pluie-débit global (*i.e.* représentant les processus hydrologiques de manière agrégée à l'échelle du bassin versant) à quatre paramètres. Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir de données d'entrées d'intensité de pluie et d'évapotranspiration potentielle au pas de temps journalier. Le modèle est constitué de deux réservoirs (Figure 41) : un réservoir de production et un réservoir de routage. Le réservoir de production permet d'intercepter et de distribuer le volume de pluie entrant vers différents flux d'évapotranspiration, de pluie nette, et de percolation. La pluie nette et la percolation sont divisées en deux flux dirigés (après transformation par un hydrogramme unitaire) vers le réservoir de routage et vers la rivière. Le réservoir de routage permet de simuler des échanges souterrains et d'alimenter le débit de la rivière en fonction du niveau d'eau dans ce réservoir (noté R sur la Figure 41). Les quatre paramètres de GR4J permettent de déterminer les capacités des deux réservoirs ainsi que les échanges souterrains et la durée de l'hydrogramme unitaire.

GRSD est un modèle dont les paramètres sont optimisés pour maximiser une fonction-objectif calculée par comparaison entre les valeurs de débits simulées et les valeurs de débits mesurées aux stations de référence. Le modèle **GRSD** a été calé et évalué à l'aide de la fonction-objectif **KGE** sur les racines carrées des débits (GUPTA *et al.*, 2009).

7.4 J2000

J2000 est un modèle hydrologique développé par l'UR RiverLy, INRAE Lyon (initialement développé en Allemagne au Forschungszentrum Jülich, puis à l'Université de Jena) avec un objectif de modélisation quantitative et qualitative. Le modèle est adapté aux bassins versants allant de 10 à plus de 100 000 km² et fonctionne dans la plate-forme de modélisation **JAMS**.

J2000 est un modèle distribué à base physique qui simule les principaux processus hydrologiques sur un maillage irrégulier constitué d'Unités de Réponse Hydrologiques (HRU pour Hydrological Response Unit, en anglais). Le modèle utilise une approche réservoir pour représenter les compartiments de stockage d'eau. Le modèle tourne au pas de temps journalier. Le maillage est obtenu avec un logiciel de discrétisation HRU-delin qui découpe le bassin versant en HRU à partir de données spatiales : Modèle Numérique de Terrain (MNT), localisation des stations hydrométriques, occupation du sol, pédologie et géologie. La génération des HRU se fait en plusieurs étapes : remplissage des lacunes éventuelles du MNT, découpage en bandes d'altitude, génération d'une carte de drainage à partir de la pente et l'aspect, relocalisation des stations sur les brins de rivières générés par le découpage, intersection des couches de données et création des connexions topologiques entre les HRUs et les brins de rivière. Dans chaque HRU, les principaux processus hydrologiques sont modélisés (HORNÉ, 2020, *Hydrological_Model_J2000*, Figure 42) :

- Interception par la végétation,
- Partition pluie/neige des précipitations,

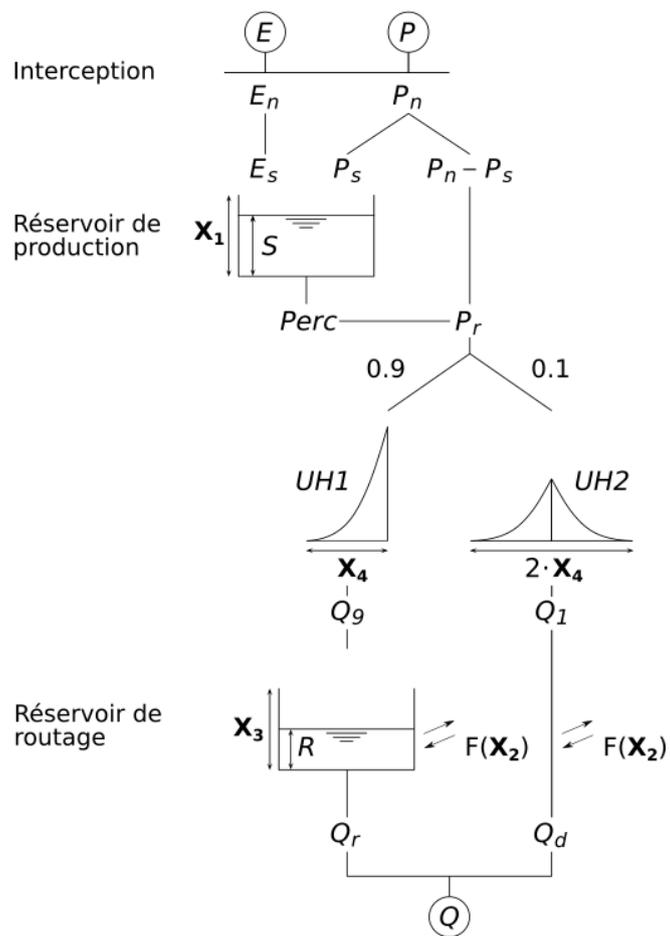


FIGURE 41 : Schéma de fonctionnement du modèle GR4J (source : PERRIN et al. (2003)).

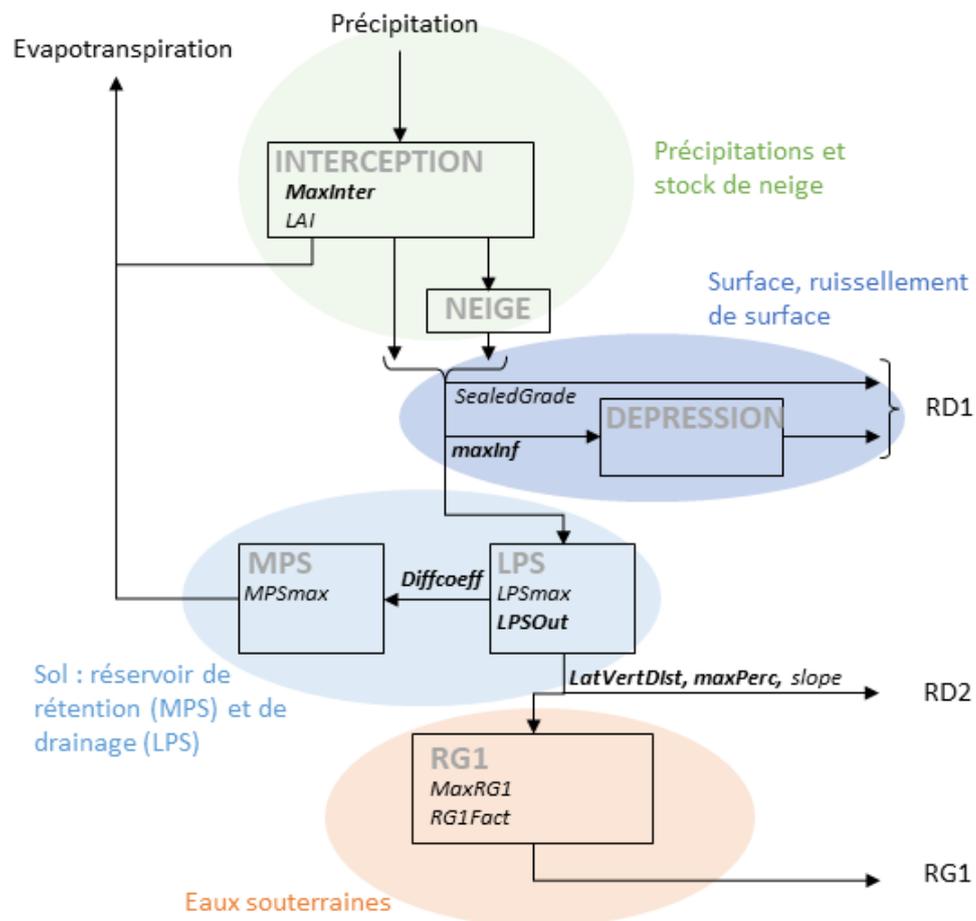


FIGURE 42 : Schéma conceptuel du modèle hydrologique J2000 dans chaque maille du modèle.

- Accumulation et fonte de la neige,
- Ruissellement de surface,
- Infiltration dans le sol,
- Évapotranspiration,
- Percolation vers la nappe,
- Écoulements dans le réseau hydrographique.

Les deux modèles correspondant **J2000-Rhône** et **J2000-Loire** correspondant aux deux applications sont calés « manuellement » en faisant évoluer les valeurs par défaut des paramètres sur la base d'essais-erreurs. A noter la volonté d'attribuer finalement des valeurs physiquement crédibles par classe d'occupation du sol, de géologie... pour les paramètres distribués.

Les maillages de **J2000-Rhône** et **J2000-Loire** ont été réalisés à partir de différentes bases de données spatialisées, résumées dans le Tableau 9.

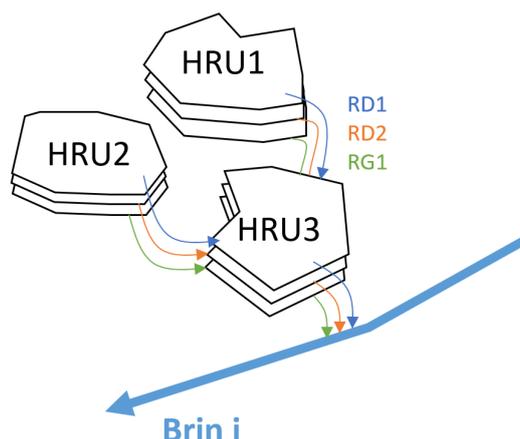


FIGURE 43 : Schéma conceptuel du routage des flux hydrologiques entre HRU puis dans le réseau hydrographique.

| | J2000-Rhône | J2000-Loire |
|--|--|------------------------|
| Occupation du sol | Corine Land Cover 2006 | Corine Land Cover 2006 |
| Sols | European Soil Database | European Soil Database |
| Géologie | Carte de géologie réalisée par (WASSON et al., 2002) | BD LISA |
| Modèle numérique de terrain | BD ASTER (200 m) | BD ALTI (50 m) |
| Nombre de HRU | 31426 | 15349 |
| Surface moyenne des HRU (km ²) | 3 | 7.7 |

TABLEAU 9 : Quelques caractéristiques des modèles hydrologique J2000-Rhône et J2000-Loire

7.5 MORDOR

MORDOR (MOdèle à Réservoirs de Détermination Objective du Ruissellement, GARÇON, 1996) est un modèle conceptuel développé par EDF à des fins d'hydrologie opérationnelle (crues extrêmes, prévisions, hydrologie générale, changement climatique). Il a, ces dernières années, largement évolué, pour donner naissance à plusieurs versions : une version **MORDOR-SD** (« semi-distribué », (GARAVAGLIA et al., 2017), intégrant un découpage en bandes d'altitude; une version **MORDOR-TS** (« totalement spatialisé », ROUHIER et al., 2017), qui y ajoute un découpage en mailles hydrologiques, i.e. en sous-bassins de superficie choisie. Les deux versions **MORDOR-SD** et **MORDOR-TS** ont été mobilisées dans le cadre du projet **Explore2** : **MORDOR-SD** sur les 611 points du réseau de référence constitué pour le diagnostic des modèles hydrologiques de surface et **MORDOR-TS** sur le bassin de la Loire en amont de Saumur.

Le modèle **MORDOR** est composé de plusieurs modules (Figure 44) :

- Le module production est composé de cinq réservoirs associés à une variable d'état, à savoir le stock de neige, le stock superficiel, le stock évaporant, le stock intermédiaire et le stock profond. Les forçages météorologiques (précipitations et température) sont répartis sur chaque bande d'altitude via des gradients orographiques. Les modules neige et pluie-débit du modèle permettent de calculer, sur chaque bande d'altitude, la part nivale de l'écoulement, et distinguent trois composantes d'écoulement (ruissellement de surface, écoulements de versant et débit de base).
- Sur chaque bande d'altitude, la fraction neigeuse des précipitations est estimée à partir de températures d'air à l'aide d'une équation de type sigmoïde (en forme de S), centrée autour d'une température d'équilibre fixée à 1°C et sur un intervalle de 4°C. Ainsi, en deçà de -1°C, la fraction neigeuse des précipitations atteint 100 %, contre 0 % au-delà de 3°C.
- La fonte nivale est décrite par un modèle de type degré-jours, enrichi pour améliorer la représentation

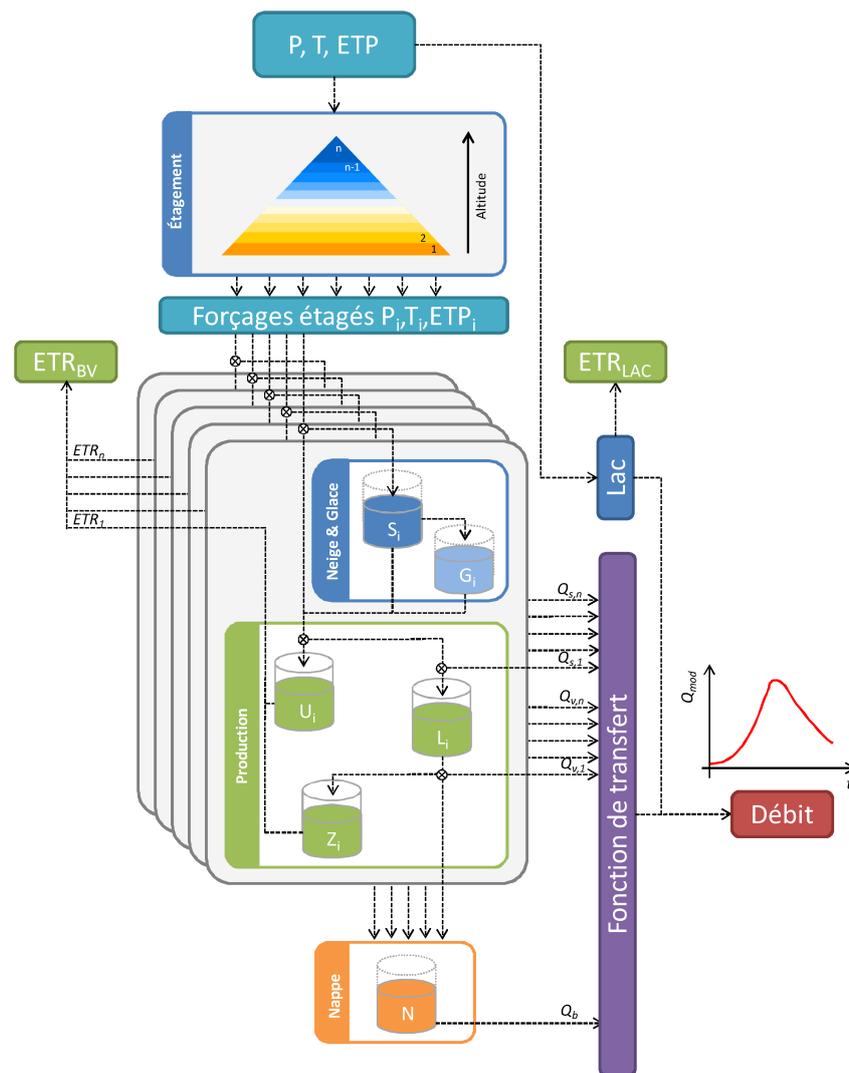


FIGURE 44 : Schéma de principe du modèle MORDOR.

des processus nivaux (fontes superficielle et basale, coefficients de fonte variables, inertie thermique du manteau neigeux et contenu en eau liquide).

- Le modèle de bilan hydrique permettant de calculer la reprise évaporative s'appuie sur : le calcul d'une évapotranspiration maximale, déduite de l'évapotranspiration de référence et d'un coefficient cultural, et le calcul d'une évapotranspiration réelle à partir d'un terme d'interception et d'une reprise dans les réservoirs superficiels et évaporant.
- La partition entre ruissellement de surface, écoulements de subsurface et débit de base est calculée à partir de l'état de saturation des réservoirs de surface et subsurface via des formulations non linéaires.
- La fonction de transfert, appliquée à l'ensemble des contributions, s'appuie sur une équation de l'onde diffusante à deux paramètres (célérité et diffusion).
- Le modèle **MORDOR** dispose également d'un module glaciaire, activé sur les bandes d'altitude avec présence de glaciers. Ce module s'appuie sur : (i) un terme d'accumulation, constitué par la neige résiduelle de fin d'hiver, (ii) une lame de fonte calculée par approche degré-jour, (iii) une évolution dynamique de la superficie glaciaire en fonction des volumes de glace (relation surface/volume de type puissance).

Le calage de **MORDOR-SD** a été réalisé via un optimiseur de type algorithme génétique, en s'appuyant sur une fonction-objectif multi-critères intégrant plusieurs signatures hydrologiques (débits, régimes inter-annuels, débits classés, séquences d'étiage). S'ajoutent, à ces critères, un critère sur la surface enneigée

simulée (confrontation aux informations satellites). Le calage de **MORDOR-TS** est réalisé en utilisant l'optimiseur CaRamel (MONTEIL *et al.*, 2020).

7.6 ORCHIDEE

Le modèle **ORCHIDEE** est un modèle de surface continentale à bases physiques développé à l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). C'est une des composantes du modèle de climat de l'IPSL (BOUCHER *et al.*, 2020, CHERUY *et al.*, 2020), utilisé pour tous les exercices de simulation du climat passé et futur réalisés pour alimenter les rapports du GIEC dans le cadre du projet CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Pour **Explore2**, le modèle **ORCHIDEE** est utilisé seul, et doit donc être alimenté par un forçage atmosphérique, à savoir la réanalyse SAFRAN ou les projections climatiques **Explore2**, qui couvrent le territoire métropolitain, la Corse et l'amont du bassin du Rhône en Suisse et en Allemagne avec le même maillage de 8 km *times* 8 km.

Le modèle **ORCHIDEE** décrit de nombreux processus ayant lieu à la surface des continents : les processus hydrologiques (bilans d'eau liquide et solide dans les bassins versants, écoulements en rivière et dans les nappes), mais en tenant compte de leur couplage avec le fonctionnement de la végétation et le cycle du carbone, si bien que les variables simulées y compris les débits dépendent de la teneur en CO₂ atmosphérique (KRINNER *et al.*, 2005). Les bilans d'eau, d'énergie et de carbone sont calculés au pas de temps de 30 minutes au sein d'unités de calcul indépendantes (ici les mailles de 8 km × 8 km), et les débits sont ensuite déduits par agrégation des écoulements de chaque maille le long du réseau hydrographique.

Chaque maille **ORCHIDEE** (Figure 45) est caractérisée par de nombreux paramètres, dont certains sont déduits de la lecture de cartes :

- La végétation n'est pas uniforme mais composée d'une mosaïque de plusieurs types de plantes (Figure 1) dont les fractions sont déduites pour **Explore2** d'une carte de végétation pour l'année 2005. Chaque type de plante est caractérisé par des propriétés morphologiques, physiologiques, phénologiques et radiatives différentes, basées sur la littérature spécialisée.
- Le sol fait 2 m de profondeur, et chaque maille est caractérisée par sa texture dominante avec pour conséquence des propriétés différenciées de rétention en eau du sol.

Le bilan d'eau du sol est calculé en séparant trois colonnes dans chaque maille (pour le sol nu, les forêts et les prairies et cultures). Dans chaque colonne, la pluie non interceptée par le couvert végétal et la lame de fonte peuvent soit s'infiltrer, soit ruisseler pour la part qui excède la conductivité hydraulique. A chaque pas de temps, l'humidité du sol est redistribuée verticalement selon l'équation de Richards et discrétisée selon 22 couches.

Le manteau neigeux et sa dynamique sont décrits par un modèle qui rend compte des variations d'albédo, de densité et donc des propriétés isolantes du manteau, en fonction de l'âge de la neige et de la nature de la végétation sous-jacente (WANG *et al.*, 2013). La fraction neigeuse de chaque maille augmente avec le contenu en eau du manteau.

L'évapotranspiration est calculée comme la somme de la transpiration des plantes, de l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage, de celle du sol, et de la sublimation du manteau neigeux. Ce calcul ne dépend pas d'une évapotranspiration de référence mais il est couplé au bilan d'énergie en surface. Il est important de noter que la transpiration dépend de la teneur en CO₂ atmosphérique car elle est couplée à la photosynthèse par l'ouverture des stomates. Cette dépendance amène la transpiration donc l'évapotranspiration à diminuer quand la teneur en CO₂ augmente, ce qui augmente les écoulements (toutes choses égales par ailleurs). En parallèle, l'indice de surface foliaire est augmenté car la photosynthèse est favorisée par de fortes teneurs en CO₂, mais cet effet fertilisant est inférieur à l'effet anti-transpirant. **ORCHIDEE** est le seul modèle utilisé pour **Explore2** à disposer de cette fonctionnalité, observée dans la nature et implémentée dans la plupart des modèles de climat, mais avec des incertitudes importantes aux fortes teneurs en CO₂, faute d'observations (CANADELL *et al.*, 2021, Cross-Chapter Box 5.1).

Les débits des cours d'eau sont ensuite calculés par un module de routage, qui permet l'agrégation des écoulements de chaque maille le long du réseau hydrographique. Ce module mobilise trois réservoirs li-

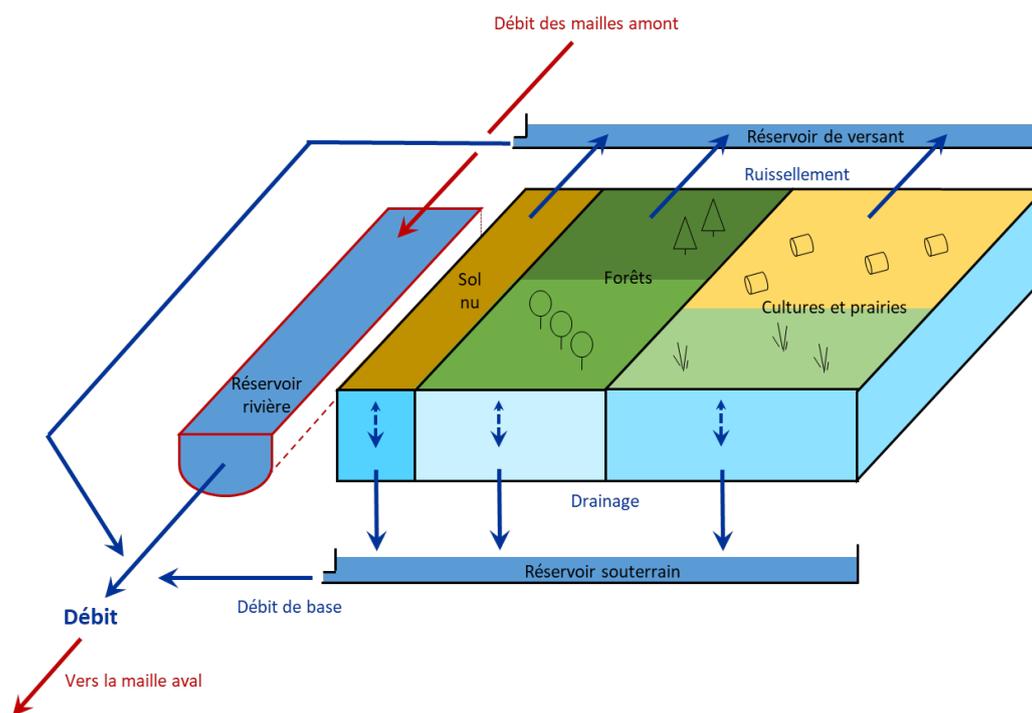


FIGURE 45 : Schématisation des principaux processus hydrologiques (hors évapotranspiration et neige) dans une maille ORCHIDEE.

néaires dans unité de calcul, comme illustré en Figure 45 : le réservoir rivière permet le transfert horizontal du débit de maille en maille (baptisée « hydrological transfer unit » (HTU)) le long du réseau hydrographique, alors que les réservoirs souterrains et de versant servent à rendre compte du temps de transit entre la production du drainage et du ruissellement, respectivement, et leur contribution au débit sortant du réservoir rivière d'une HTU. Le réservoir souterrain est une représentation simplifiée d'un aquifère libre, et le flux en sortant comme le débit de base du cours d'eau local.

7.7 SIM2

La chaîne de modèles SAFRAN-Isba(Surfex)-Modcou, baptisé SIM, a été développée dans le cadre d'une coopération entre Météo-France et le Centre de géosciences de Mines ParisTech (HABETS *et al.*, 2008). Elle permet de simuler, en France hexagonale, les flux d'eau et d'énergie à l'interface sol-biosphère-atmosphère, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des principales nappes de surface.

Cette chaîne de modèles est utilisée en opérationnel depuis près de 20 ans pour le suivi temps réel de l'hydrologie de surface sur la France, la caractérisation climatique, et la prévision à différentes échéances. Elle a fait l'objet de nombreuses actions de recherche, pour son développement et son utilisation.

La chaîne hydro-météorologique SIM a été évaluée sur l'ensemble de la France par (HABETS *et al.*, 2008) par comparaison à des observations quotidiennes de débit, hauteurs de nappes et hauteurs de neige sur la période 1995-2005. Ces dernières années, une version 2 de la chaîne a été mise en place en y apportant de nombreuses améliorations décrites par (LE MOIGNE *et al.*, 2020). Ces dernières portent notamment sur la correction du biais du rayonnement infra-rouge dans SAFRAN, et l'intégration d'une nouvelle version ISBA diffusion multi-couche et la mise à jour de différentes bases de données sur la végétation, la texture du sol et l'orographie (ajout de 3878 mailles de montagne en plus des 9892 mailles existantes). Des réservoirs ont été ajoutés pour représenter les effets des aquifères en zone de plaine et de montagne. Les évaluations ont montré les améliorations apportées sur les débits (identifiées sur la plupart des stations hydrométriques du sud et de l'ouest du pays alors que quelques régressions ont été notées sur les bassins du nord-est de la France), la hauteur de neige, les bilans d'eau et d'énergie à l'échelle des bassins. C'est la version **SIM2** qui est appliquée dans le projet **Explore2**.

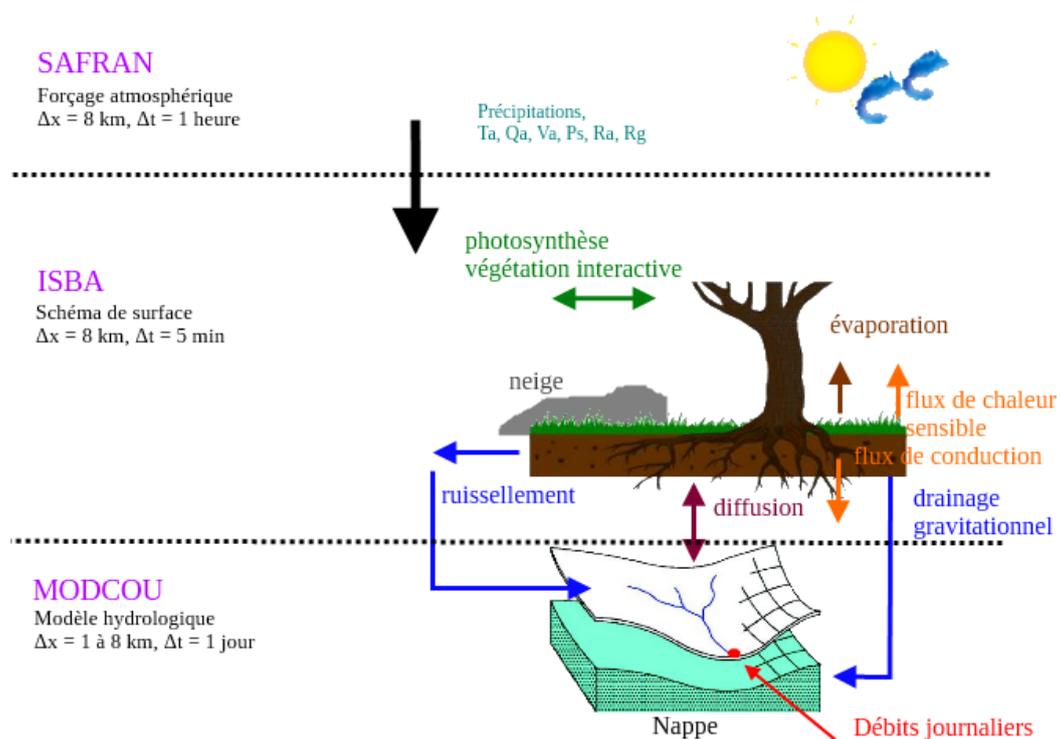


FIGURE 46 : Diagramme de fonctionnement de la chaîne SIM2.

La chaîne **SIM2** est composée de trois modèles.

SAFRAN

L'analyse atmosphérique SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) est un système d'analyse permettant de reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiquement homogènes, à partir d'observations au sol et de produits de modèles météorologiques de grande échelle. Ces profils sont projetés spatialement et verticalement sur une grille régulière de 8 km de résolution horizontale sur la France et permettent de produire une analyse en point de grille de huit variables météorologiques sur la France au pas de temps horaire et quotidien : température de l'air, précipitations liquides, précipitations solides, force du vent, humidité de l'air, rayonnement solaire direct, rayonnement solaire diffus et nébulosité. La réanalyse climatologique SAFRAN produite par Météo-France débute le 1er août 1958 et est complétée chaque année. En modélisation sous changement climatique, les projections climatiques régionalisées viennent se substituer à SAFRAN.

Isba

Isba (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) est un modèle permettant de représenter les processus se produisant sur les surfaces continentales dans les modèles atmosphériques et hydrologiques. Isba est développé par le CNRM (Météo-France - CNRS) en collaboration avec plusieurs autres laboratoires de recherche. Isba est une composante de la plate-forme de modélisation SURFEX, qui représente aussi les surfaces urbaines, les lacs et les océans. Isba comporte plusieurs modules permettant de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans le sol, la végétation, le manteau neigeux, et l'hydrologie superficielle (drainage et ruissellement), et d'en calculer l'évolution en fonction des conditions météorologiques. Le modèle Isba s'appuie sur une représentation de la texture du sol (pourcentage de sable et d'argile) à résolution kilométrique et de la végétation en 12 classes issues de la base Ecoclimap2.

Modcou

Le modèle hydrogéologique Modcou est un modèle développé par le Centre de Géosciences de Mines ParisTech. Météo-France a collaboré avec le Centre de Géosciences pour développer une version du modèle sur l'ensemble de la France. Cette version est utilisée dans le cadre de la chaîne **SIM2**. Le modèle hydro-

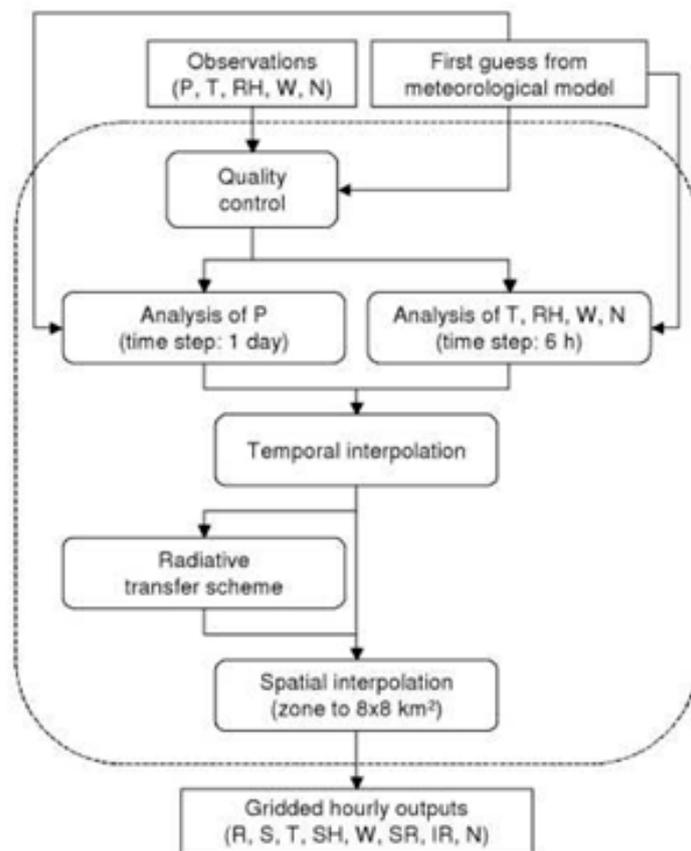


FIGURE 47 : Diagramme de fonctionnement de SAFRAN adapté de (QUINTANA SEGUÍ, 2008). Les variables météorologiques sont les précipitations quotidiennes (P), les lames d'eau (R), la précipitation neigeuse (S), la température de l'air (T), la vitesse du vent (W), l'humidité relative (RH), l'humidité spécifique (SH), le rayonnement solaire incident (SR), le rayonnement infra rouge incident (IR) et la nébulosité (N).

géologique Modcou couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de simuler les débits des rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés. L'eau est transportée vers les rivières ou alimente les aquifères. Modcou simule l'évolution des aquifères et des nappes, ainsi que leurs interactions avec les rivières.

Les paramètres de la chaîne **SIM2** ne font pas l'objet d'une procédure d'optimisation numérique.

7.8 SMASH

SMASH est une plate-forme de calcul, développée à INRAE, et dédiée à la modélisation hydrologique continue et spatialement distribuée ainsi qu'à l'assimilation de données (JAY-ALLEMAND *et al.*, 2020). Cette plate-forme est conçue pour simuler des hydrogrammes de débit sur l'ensemble des mailles constituant le domaine de calcul en tirant parti des forçages météorologiques spatialement distribués et des observations hydrométriques. Le modèle est basé sur une représentation conceptuelle des processus hydrologiques dominants sur la base des modèles GR (PERRIN *et al.*, 2003) tout en visant à maintenir une relative parcimonie des paramètres. La modélisation peut être mise en oeuvre pour différents pas de temps et différentes résolutions spatiales (Figure 50). La plate-forme **SMASH** est notamment utilisée en opérationnel dans le cadre du service d'avertissement Vigicrues Flash (PIOTTE *et al.*, 2020). La plate-forme **SMASH** étant basée sur une représentation conceptuelle des processus hydrologiques, elle dispose de différents algorithmes et méthodes d'optimisation.

Concernant le calage, les paramètres aux stations de référence ont été obtenus en maximisant le critère **KGE** (GUPTA *et al.*, 2009) sur les débits.

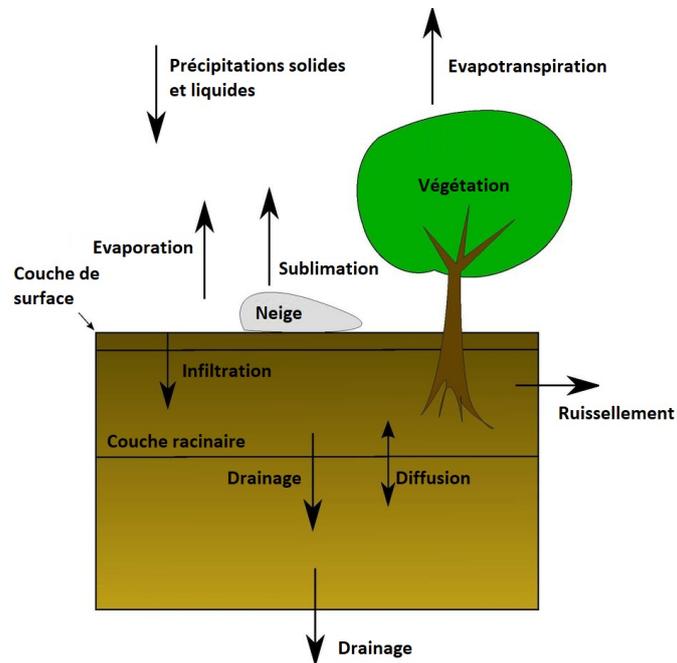


FIGURE 48 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de surface Isba, d'après (QUINTANA SEGUÍ, 2008). Les flèches montrent les principaux flux d'eau.

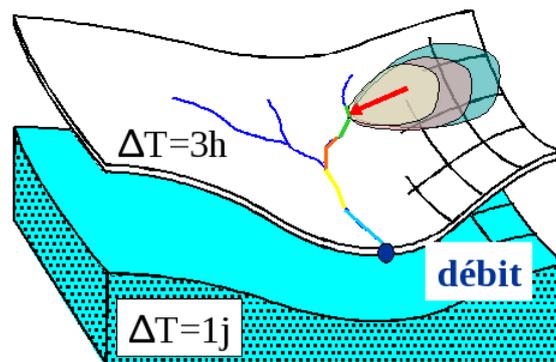


FIGURE 49 : Schéma de principe de Modcou : l'eau est transférée vers la rivière, puis propagée le long du réseau hydrographique de surface avec un pas de temps de 3 heures. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière.

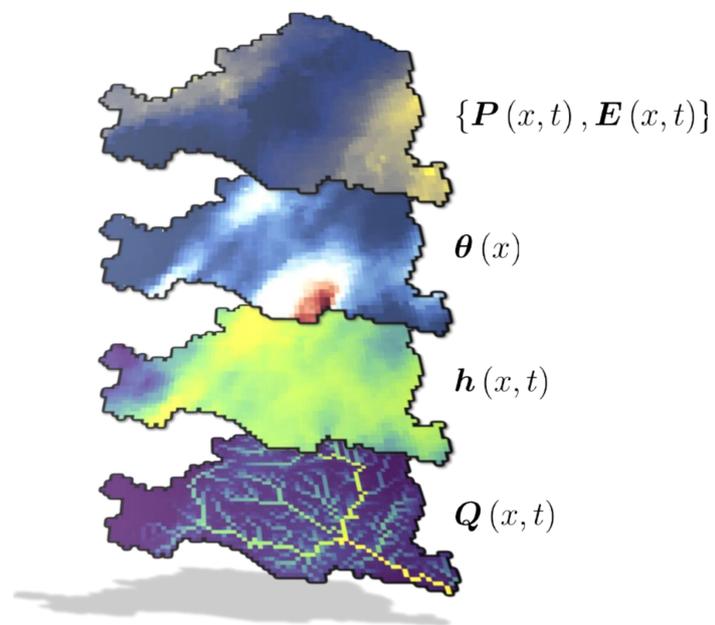


FIGURE 50 : Représentation du modèle hydrologique distribué SMASH avec $P(x,t)$ le champ pluie, $E(x,t)$ le champ d'évapotranspiration potentielle, $\theta(x)$ le champ de paramètre, $h(x,t)$ le champ d'état et $Q(x,t)$ le débit routé.

8 Annexe 3 : Changements médians en fin de siècle

| Bassin de gestion | Id. | Description |
|--------------------------|-----|--|
| Rhin-Meuse | A | Le Rhin |
| | B | La Meuse |
| Artois-Picardie | D | Affluents du Rhin |
| | E | L'Escaut et fleuves de la frontière belge à l'embouchure de la Bresle (exclue) |
| Seine-Normandie | F | La Seine de sa source au confluent de l'Oise (exclu) |
| | G | Fleuves côtiers de la limite du bassin Artois-Picardie à l'embouchure de la Seine (exclue) |
| | H | La Seine du confluent de l'Oise (inclus) à l'embouchure |
| | I | Fleuves côtiers de l'embouchure de la Seine (exclue) à la limite du bassin Loire-Bretagne |
| Loire-Bretagne | J | Fleuves côtiers de Bretagne |
| | K | La Loire de sa source à la Vienne (exclue) |
| | L | La Loire de la Vienne à la Maine (exclue) |
| | M | La Loire de la Maine à la mer |
| | N | Fleuves côtiers du sud de la Loire |
| Adour-Garonne | O | La Garonne |
| | P | La Dordogne |
| | Q | L'Adour |
| | R | La Charente |
| | S | Fleuves côtiers façade atlantique |
| Rhône-Méditerranée-Corse | U | La Saône |
| | V | Le Rhône (Saône-Isère-Durance exclues) |
| | W | L'Isère |
| | X | La Durance |
| | Y | Fleuves côtiers méditerranéens (Corse incluse) |
| | Z | Îles (France hexagonale, Corse exclue) |

TABLEAU 10 : Dénomination et description des régions hydrographiques

Dans les tableaux de synthèse qui suivent,

- aucune statistique sur la région hydrographique Z n'est fournie, faute de stations modélisées (cours d'eau de taille trop petite pour être modélisés),
- les statistiques sont fournies de manière agrégée sur les régions hydrographiques F et H du fait d'un problème d'identification des points de simulation par leur code Sandre. Ce problème hérite d'incohérences présentes dans les métadonnées de l'Hydroportail (<https://hydro.eaufrance.fr/>, consulté le 15/06/2024); les codes des stations hydrométriques et de l'entité hydrographique de rattachement devraient partager les mêmes quatre premiers caractères, or ce n'est pas le cas, par exemple, avec la station hydrométrique du Vrin à Précy-sur-Vrin (H251341001) rattaché à l'entité hydrographique (F353). L'incohérence identifiée dans les codes Sandre est propre aux deux régions hydrographiques H et F créées lors de la migration des données hydrométriques vers le l'Hydroportail. Le regroupement F-H forme le bassin de la Seine (hors portion de l'Oise en Belgique).

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max |
| A | 13 | 8 | 23 | -1 | -8 | 10 | 2 | -3 | 13 | 8 | 2 | 16 |
| B | 9 | 5 | 11 | 3 | -1 | 4 | 7 | -2 | 15 | 6 | 0 | 9 |
| D | 9 | 8 | 10 | 4 | 3 | 5 | 7 | 5 | 8 | 4 | -1 | 9 |
| E | 10 | 5 | 16 | 7 | 4 | 13 | 10 | 5 | 20 | 8 | 3 | 14 |
| G | 10 | 5 | 12 | 6 | 3 | 9 | 9 | 8 | 11 | 9 | 7 | 11 |
| F-H | 9 | 1 | 17 | 8 | 1 | 18 | 8 | -2 | 18 | 7 | -1 | 18 |
| I | 8 | 5 | 12 | 8 | 3 | 10 | 8 | 2 | 14 | 4 | -1 | 11 |
| J | 6 | 3 | 12 | 7 | 2 | 15 | 9 | 0 | 15 | -6 | -13 | 6 |
| K | 11 | 2 | 19 | 9 | -4 | 26 | 7 | -3 | 17 | -2 | -11 | 9 |
| L | 8 | 4 | 12 | 11 | 7 | 18 | 5 | 1 | 20 | -3 | -8 | 9 |
| M | 6 | 1 | 11 | 12 | 3 | 22 | 7 | 2 | 22 | 2 | -5 | 8 |
| N | 5 | 3 | 12 | 13 | 12 | 16 | 12 | 5 | 19 | -2 | -7 | 7 |
| O | 11 | 5 | 36 | 10 | -8 | 23 | 1 | -16 | 11 | 3 | -6 | 27 |
| P | 8 | 6 | 15 | 12 | -3 | 20 | 3 | -3 | 12 | 0 | -4 | 8 |
| Q | 10 | 4 | 30 | 2 | -5 | 14 | -3 | -14 | 5 | 0 | -4 | 10 |
| R | 11 | 8 | 13 | 15 | 10 | 21 | 6 | 1 | 11 | 3 | -3 | 9 |
| S | 13 | 10 | 16 | 16 | 2 | 17 | 9 | 0 | 11 | 9 | 1 | 10 |
| U | 13 | 9 | 24 | 3 | -8 | 11 | 4 | -6 | 22 | 6 | -2 | 17 |
| V | 17 | 10 | 43 | 8 | -9 | 32 | 1 | -14 | 18 | 3 | -8 | 14 |
| W | 26 | 11 | 35 | 17 | -7 | 37 | -11 | -21 | 4 | 1 | -6 | 9 |
| X | 22 | 5 | 33 | 8 | -2 | 41 | -6 | -19 | 18 | -2 | -11 | 9 |
| Y | 13 | -10 | 42 | 10 | -4 | 22 | 2 | -14 | 18 | 8 | -9 | 57 |

TABEAU 11 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP2.6 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur MIA suggère un consensus.

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----|-----|-----|------------|------------|------------|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max |
| A | 22 | 14 | 30 | 7 | -8 | 17 | -5 | -19 | 6 | -7 | -15 | 8 |
| B | 16 | 11 | 22 | 10 | 3 | 13 | -5 | -14 | -1 | -6 | -11 | 1 |
| D | 14 | 12 | 15 | 4 | 3 | 5 | -5 | -9 | -2 | -11 | -11 | -6 |
| E | 10 | 4 | 14 | 7 | 3 | 12 | -2 | -9 | 4 | -5 | -12 | 1 |
| G | 10 | 3 | 12 | 9 | 3 | 11 | 0 | -4 | 3 | -3 | -11 | -2 |
| F-H | 12 | -2 | 21 | 11 | 0 | 23 | -4 | -14 | 7 | -8 | -19 | 4 |
| I | 10 | -2 | 13 | 6 | -2 | 11 | -14 | -23 | -3 | -13 | -24 | -4 |
| J | 6 | 0 | 18 | 5 | -2 | 16 | -17 | -26 | -5 | -20 | -27 | -8 |
| K | 14 | 7 | 23 | 10 | -13 | 23 | -8 | -20 | 2 | -15 | -27 | -2 |
| L | 11 | 5 | 22 | 13 | 5 | 22 | -11 | -22 | 2 | -18 | -32 | -3 |
| M | 13 | 0 | 22 | 10 | 2 | 19 | -12 | -24 | 3 | -11 | -23 | 0 |
| N | 14 | 13 | 22 | 10 | 8 | 17 | -13 | -20 | -7 | -19 | -23 | -9 |
| O | 9 | -8 | 48 | -2 | -21 | 17 | -17 | -40 | -9 | -20 | -34 | -9 |
| P | 10 | 3 | 19 | 6 | -11 | 16 | -20 | -32 | -6 | -22 | -31 | -7 |
| Q | 1 | -6 | 37 | -2 | -15 | 10 | -17 | -39 | -9 | -24 | -32 | -13 |
| R | 16 | 9 | 23 | 17 | 9 | 20 | -7 | -21 | 0 | -14 | -27 | -8 |
| S | 4 | 0 | 16 | 4 | 0 | 17 | -14 | -17 | -2 | -22 | -30 | -10 |
| U | 19 | 16 | 40 | 7 | -15 | 18 | -7 | -21 | 8 | -8 | -17 | 0 |
| V | 23 | 11 | 91 | 0 | -16 | 56 | -17 | -31 | 1 | -9 | -23 | 15 |
| W | 44 | 11 | 66 | 19 | -15 | 89 | -29 | -41 | -1 | -14 | -23 | -7 |
| X | 28 | 4 | 57 | -2 | -14 | 65 | -26 | -37 | -10 | -18 | -25 | -9 |
| Y | 13 | -5 | 40 | -8 | -23 | 6 | -17 | -39 | -6 | -20 | -34 | 12 |

TABLEAU 12 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP4.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur MIA suggère un consensus.

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max |
| A | 27 | 19 | 36 | 7 | -14 | 30 | -19 | -34 | 4 | -19 | -29 | -1 |
| B | 23 | 20 | 27 | 9 | 5 | 13 | -18 | -23 | -11 | -18 | -22 | -8 |
| D | 27 | 26 | 28 | 13 | 11 | 15 | -16 | -17 | -14 | -19 | -21 | -15 |
| E | 17 | 0 | 33 | 19 | 8 | 29 | -3 | -15 | 7 | -7 | -20 | 0 |
| G | 10 | 1 | 18 | 13 | 5 | 20 | -4 | -13 | 2 | -11 | -19 | -6 |
| F-H | 16 | -8 | 31 | 14 | -3 | 33 | -16 | -34 | 4 | -23 | -42 | 4 |
| I | 15 | 0 | 19 | 11 | 2 | 18 | -27 | -41 | -6 | -25 | -34 | -7 |
| J | 4 | -2 | 23 | 4 | -4 | 17 | -28 | -47 | -13 | -32 | -41 | -17 |
| K | 10 | -12 | 23 | 7 | -25 | 36 | -30 | -45 | -8 | -33 | -45 | -13 |
| L | 7 | -2 | 21 | 8 | -1 | 18 | -28 | -39 | -13 | -36 | -55 | -14 |
| M | 13 | -5 | 25 | 10 | 3 | 21 | -22 | -38 | -4 | -23 | -40 | -9 |
| N | 7 | 5 | 11 | 10 | 7 | 13 | -30 | -34 | -26 | -38 | -44 | -29 |
| O | -9 | -36 | 48 | -15 | -32 | 3 | -44 | -68 | -28 | -44 | -60 | -23 |
| P | 2 | -19 | 21 | 3 | -21 | 10 | -37 | -52 | -26 | -43 | -54 | -22 |
| Q | -19 | -34 | 29 | -17 | -29 | -1 | -46 | -63 | -32 | -49 | -58 | -34 |
| R | 2 | -2 | 6 | 11 | 6 | 16 | -23 | -34 | -20 | -38 | -49 | -28 |
| S | -10 | -23 | 0 | 1 | -4 | 15 | -33 | -42 | -21 | -46 | -51 | -37 |
| U | 24 | 14 | 50 | 9 | -23 | 26 | -23 | -38 | -4 | -20 | -29 | -7 |
| V | 10 | -11 | 177 | -5 | -27 | 93 | -36 | -55 | -7 | -21 | -44 | -6 |
| W | 70 | 0 | 124 | 19 | -27 | 181 | -50 | -64 | -27 | -28 | -43 | -16 |
| X | 14 | -27 | 100 | -16 | -30 | 59 | -48 | -63 | -31 | -35 | -49 | -19 |
| Y | -7 | -36 | 32 | -25 | -40 | -7 | -42 | -63 | -22 | -33 | -56 | -4 |

TABLEAU 13 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le RCP8.5 (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur MIA suggère un consensus.

| Id. | RCP2.6 | | | RCP4.5 | | | RCP8.5 | | |
|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|------------|------------|------------|
| | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max |
| A | 7 | 4 | 16 | 10 | 3 | 19 | 9 | 1 | 18 |
| B | 7 | 6 | 10 | 9 | 4 | 13 | 8 | 4 | 12 |
| D | 9 | 5 | 9 | 6 | 5 | 8 | 12 | 9 | 13 |
| E | 10 | 5 | 16 | 6 | 3 | 8 | 11 | -3 | 18 |
| G | 10 | 7 | 11 | 6 | 3 | 9 | 5 | 0 | 9 |
| F-H | 9 | 4 | 17 | 7 | -5 | 15 | 5 | -11 | 20 |
| I | 7 | 4 | 10 | 3 | -4 | 6 | 3 | -8 | 6 |
| J | 5 | 0 | 10 | 1 | -4 | 12 | -2 | -10 | 10 |
| K | 9 | 3 | 19 | 5 | -6 | 13 | -2 | -25 | 12 |
| L | 8 | 5 | 14 | 4 | -1 | 13 | -2 | -12 | 8 |
| M | 7 | 2 | 13 | 6 | -3 | 15 | 3 | -9 | 11 |
| N | 7 | 6 | 13 | 7 | 5 | 13 | -1 | -3 | 2 |
| O | 8 | 1 | 17 | -2 | -12 | 5 | -20 | -35 | -7 |
| P | 7 | 4 | 15 | 0 | -3 | 9 | -9 | -22 | -1 |
| Q | 3 | -2 | 12 | -6 | -13 | 0 | -27 | -35 | -15 |
| R | 12 | 8 | 16 | 10 | 0 | 15 | -4 | -9 | -1 |
| S | 14 | 6 | 16 | -2 | -6 | 10 | -15 | -22 | -4 |
| U | 8 | 4 | 14 | 8 | 2 | 16 | 6 | -3 | 17 |
| V | 9 | 2 | 19 | 3 | -5 | 17 | -5 | -21 | 10 |
| W | 4 | 2 | 14 | -2 | -9 | 4 | -11 | -21 | 1 |
| X | 8 | 2 | 14 | -3 | -10 | 5 | -21 | -31 | -9 |
| Y | 11 | 4 | 48 | -4 | -18 | 11 | -23 | -41 | -2 |

TABLEAU 14 : Changements relatifs médians (%) des débits annuels par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) par RCP (multi-modèles, ADAMONT et CDF-t). En gras les secteurs avec une forte présence de points de simulation où l'indicateur MIA suggère un consensus.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max |
| A | 38 | 15 | 65 | 19 | -3 | 55 | 2 | -27 | 27 | -28 | -42 | -8 |
| B | 31 | 18 | 41 | 16 | 8 | 19 | -4 | -22 | 16 | -36 | -41 | -27 |
| D | 40 | 38 | 43 | 25 | 20 | 26 | 8 | 6 | 9 | -33 | -35 | -30 |
| E | 33 | 4 | 47 | 40 | 8 | 60 | 13 | -9 | 31 | -12 | -36 | 15 |
| G | 10 | 3 | 24 | 27 | 14 | 42 | 4 | -7 | 17 | -15 | -29 | -4 |
| F-H | 24 | -16 | 68 | 24 | -8 | 72 | -1 | -28 | 27 | -31 | -51 | 21 |
| I | 17 | -3 | 34 | 18 | 12 | 36 | -18 | -29 | 9 | -40 | -62 | -9 |
| J | -2 | -28 | 31 | -3 | -12 | 20 | -21 | -36 | -3 | -48 | -61 | -28 |
| K | 17 | -15 | 51 | 27 | -36 | 67 | -11 | -39 | 39 | -33 | -55 | -1 |
| L | 5 | -12 | 42 | 20 | 10 | 45 | -3 | -28 | 21 | -51 | -67 | -24 |
| M | 21 | -8 | 53 | 18 | 2 | 53 | -9 | -31 | 23 | -38 | -58 | 8 |
| N | 9 | -2 | 21 | 23 | 15 | 31 | -5 | -9 | 2 | -58 | -63 | -44 |
| O | -12 | -38 | 47 | -6 | -44 | 31 | -40 | -61 | 0 | -46 | -66 | -6 |
| P | -3 | -34 | 38 | 20 | 3 | 32 | -24 | -44 | -7 | -50 | -65 | -17 |
| Q | -19 | -42 | 25 | -2 | -18 | 21 | -29 | -54 | -21 | -55 | -63 | -32 |
| R | -5 | -12 | 3 | 25 | 15 | 35 | -7 | -22 | 1 | -53 | -58 | -42 |
| S | -15 | -36 | 5 | 17 | 6 | 40 | -17 | -22 | -4 | -51 | -61 | -35 |
| U | 38 | 25 | 75 | 20 | -9 | 42 | -14 | -37 | 8 | -16 | -36 | -1 |
| V | 11 | -18 | 278 | -2 | -35 | 133 | -26 | -47 | 19 | -11 | -40 | 33 |
| W | 98 | 7 | 148 | 29 | -25 | 202 | -48 | -64 | -6 | -26 | -47 | -2 |
| X | 8 | -38 | 135 | -15 | -40 | 37 | -51 | -66 | -31 | -35 | -50 | -22 |
| Y | -22 | -49 | 11 | -29 | -53 | -4 | -37 | -58 | 72 | -33 | -65 | 35 |

TABEAU 15 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif vert.

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max |
| A | 31 | 19 | 47 | 3 | -25 | 23 | -5 | -15 | 26 | 3 | -14 | 21 |
| B | 28 | 20 | 37 | 3 | -4 | 16 | -10 | -28 | 5 | -7 | -20 | 3 |
| D | 25 | 23 | 28 | 4 | -2 | 4 | -21 | -26 | -20 | -12 | -16 | -8 |
| E | 19 | -2 | 32 | 12 | 0 | 20 | -4 | -16 | 11 | -2 | -12 | 10 |
| G | 9 | 7 | 16 | 11 | 7 | 16 | -1 | -15 | 3 | -4 | -19 | 1 |
| F-H | 16 | -25 | 31 | 9 | -17 | 27 | -12 | -38 | 11 | -11 | -36 | 7 |
| I | 15 | -1 | 27 | 15 | 3 | 25 | -25 | -47 | 2 | -21 | -32 | -3 |
| J | 13 | 2 | 25 | 15 | 2 | 35 | -20 | -39 | -2 | -15 | -27 | 13 |
| K | 18 | -6 | 45 | 7 | -15 | 44 | -23 | -40 | 19 | -4 | -39 | 34 |
| L | 13 | 4 | 24 | 0 | -9 | 11 | -24 | -37 | -6 | -7 | -33 | 11 |
| M | 16 | -13 | 35 | 7 | -1 | 24 | -21 | -47 | 3 | -3 | -37 | 32 |
| N | 11 | 8 | 15 | 6 | 4 | 9 | -23 | -28 | -18 | -2 | -19 | 5 |
| O | -4 | -31 | 52 | -1 | -19 | 10 | -34 | -59 | -14 | -28 | -57 | 0 |
| P | 10 | -13 | 28 | -2 | -16 | 5 | -27 | -42 | -16 | -9 | -36 | 8 |
| Q | -9 | -33 | 42 | -2 | -20 | 17 | -39 | -55 | -23 | -38 | -53 | -21 |
| R | 10 | -1 | 20 | -1 | -5 | 7 | -12 | -30 | -6 | -3 | -20 | 8 |
| S | -10 | -28 | 1 | -1 | -11 | 9 | -23 | -45 | -7 | -29 | -35 | -20 |
| U | 28 | 18 | 47 | 6 | -28 | 39 | -5 | -23 | 20 | 2 | -16 | 21 |
| V | 21 | -15 | 165 | 6 | -31 | 105 | -30 | -53 | 11 | -1 | -56 | 25 |
| W | 66 | 4 | 94 | 23 | -28 | 219 | -44 | -56 | -17 | -17 | -50 | 18 |
| X | 7 | -42 | 91 | -13 | -34 | 60 | -44 | -60 | -23 | -38 | -62 | -21 |
| Y | -9 | -39 | 25 | -4 | -35 | 94 | -31 | -53 | 28 | -23 | -53 | 48 |

TABEAU 16 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif jaune.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max |
| A | 23 | -9 | 46 | 12 | -25 | 39 | -34 | -56 | 2 | -53 | -80 | -19 |
| B | 27 | 16 | 40 | 24 | 16 | 32 | -28 | -39 | -9 | -50 | -62 | -34 |
| D | 10 | 5 | 28 | 11 | 10 | 14 | -30 | -34 | -28 | -64 | -67 | -62 |
| E | -14 | -43 | 19 | -1 | -39 | 12 | -22 | -43 | -10 | -42 | -63 | -21 |
| G | -36 | -39 | -18 | -26 | -34 | -8 | -36 | -38 | -19 | -44 | -54 | -38 |
| F-H | 8 | -60 | 45 | 18 | -52 | 56 | -28 | -58 | 6 | -56 | -76 | -5 |
| I | -14 | -56 | 10 | -7 | -42 | 8 | -50 | -66 | -27 | -65 | -84 | -36 |
| J | -6 | -34 | 10 | -6 | -20 | 17 | -42 | -56 | -25 | -61 | -73 | -46 |
| K | -7 | -49 | 23 | 9 | -47 | 50 | -47 | -69 | -21 | -56 | -75 | -28 |
| L | -11 | -34 | 7 | 11 | -13 | 26 | -41 | -58 | -28 | -65 | -76 | -34 |
| M | -3 | -39 | 13 | -1 | -27 | 23 | -43 | -55 | -17 | -60 | -78 | -23 |
| N | 0 | -5 | 7 | 13 | 9 | 17 | -49 | -55 | -38 | -72 | -77 | -55 |
| O | -35 | -69 | 17 | -28 | -53 | 8 | -66 | -83 | -43 | -66 | -87 | -26 |
| P | -9 | -47 | 22 | 7 | -27 | 25 | -45 | -69 | -31 | -62 | -73 | -42 |
| Q | -49 | -72 | 1 | -33 | -51 | -13 | -68 | -76 | -49 | -78 | -87 | -52 |
| R | -19 | -43 | 1 | 14 | -6 | 24 | -35 | -49 | -25 | -63 | -77 | -58 |
| S | -38 | -57 | -25 | -11 | -31 | -2 | -47 | -63 | -37 | -70 | -75 | -67 |
| U | 23 | -9 | 67 | 7 | -26 | 25 | -44 | -62 | -23 | -52 | -72 | -37 |
| V | 9 | -33 | 230 | -11 | -29 | 147 | -51 | -67 | -22 | -46 | -71 | -1 |
| W | 77 | -19 | 143 | 17 | -26 | 297 | -60 | -73 | -45 | -50 | -70 | -38 |
| X | 19 | -50 | 94 | -24 | -40 | 67 | -65 | -75 | -44 | -53 | -67 | -29 |
| Y | -30 | -71 | 51 | -31 | -51 | -9 | -61 | -80 | -30 | -44 | -82 | 8 |

TABLEAU 17 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif violet.

| Id. | DJF | | | MAM | | | JJA | | | SON | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Méd | Min | Max |
| A | -11 | -41 | 21 | -13 | -40 | -1 | -59 | -83 | -43 | -69 | -77 | -49 |
| B | -10 | -26 | 4 | -6 | -12 | -1 | -56 | -79 | -31 | -60 | -71 | -51 |
| D | -24 | -29 | -18 | -7 | -12 | -5 | -47 | -54 | -43 | -70 | -73 | -61 |
| E | -37 | -61 | -1 | -25 | -57 | -1 | -41 | -60 | -19 | -53 | -67 | -33 |
| G | -45 | -48 | -31 | -38 | -43 | -21 | -42 | -45 | -29 | -48 | -55 | -44 |
| F-H | -24 | -74 | 10 | -15 | -71 | 1 | -53 | -80 | -27 | -63 | -79 | -33 |
| I | -25 | -56 | 0 | -16 | -46 | -6 | -53 | -67 | -36 | -63 | -80 | -41 |
| J | -24 | -48 | 2 | -19 | -29 | -9 | -48 | -69 | -31 | -65 | -74 | -43 |
| K | -17 | -49 | 7 | -21 | -46 | -2 | -63 | -82 | -36 | -62 | -80 | -26 |
| L | -18 | -33 | -3 | -19 | -38 | -10 | -61 | -84 | -33 | -64 | -78 | -25 |
| M | -20 | -59 | 4 | -22 | -50 | -6 | -53 | -75 | -34 | -55 | -79 | -35 |
| N | -9 | -16 | -2 | -15 | -18 | -13 | -56 | -64 | -49 | -57 | -63 | -41 |
| O | -14 | -46 | 56 | -23 | -43 | 7 | -67 | -80 | -48 | -53 | -75 | -14 |
| P | -7 | -32 | 22 | -15 | -29 | -7 | -63 | -81 | -50 | -55 | -70 | -30 |
| Q | -26 | -53 | 29 | -21 | -34 | -3 | -64 | -73 | -50 | -65 | -75 | -33 |
| R | -16 | -21 | -6 | -13 | -17 | -10 | -52 | -64 | -45 | -59 | -65 | -51 |
| S | -14 | -38 | 0 | -13 | -23 | -8 | -53 | -58 | -43 | -59 | -68 | -45 |
| U | -2 | -30 | 32 | -7 | -23 | 2 | -61 | -77 | -41 | -60 | -77 | -36 |
| V | -2 | -48 | 206 | -26 | -41 | 78 | -61 | -76 | -32 | -42 | -76 | 41 |
| W | 54 | -31 | 109 | 16 | -40 | 171 | -56 | -74 | -49 | -42 | -63 | -30 |
| X | 10 | -44 | 81 | -30 | -50 | 95 | -62 | -75 | -43 | -32 | -45 | -16 |
| Y | -3 | -56 | 60 | -30 | -59 | 8 | -59 | -81 | -38 | -31 | -77 | 30 |

TABLEAU 18 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers par région hydrographique (médiane, minimum, maximum) pour le narratif orange.

Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?

| Id. | vert | | | jaune | | | violet | | | orange | | |
|-----|------|-----|-----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|
| | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max | Méd | Min | Max |
| A | 14 | 5 | 30 | 13 | 4 | 28 | -2 | -28 | 24 | -26 | -42 | -12 |
| B | 12 | 2 | 18 | 11 | 4 | 23 | 7 | 2 | 18 | -21 | -27 | -14 |
| D | 21 | 18 | 21 | 6 | 5 | 6 | -8 | -10 | 1 | -24 | -27 | -23 |
| E | 25 | -3 | 36 | 11 | -4 | 17 | -18 | -42 | 0 | -31 | -61 | -14 |
| G | 11 | 5 | 22 | 6 | 4 | 11 | -35 | -37 | -22 | -42 | -45 | -28 |
| F-H | 13 | -20 | 50 | 6 | -25 | 17 | -3 | -59 | 30 | -28 | -74 | -12 |
| I | 6 | -5 | 21 | 7 | -4 | 15 | -21 | -54 | -5 | -29 | -55 | -18 |
| J | -11 | -27 | 13 | 8 | 0 | 20 | -16 | -35 | -1 | -29 | -43 | -14 |
| K | 10 | -29 | 34 | 5 | -15 | 29 | -14 | -54 | 11 | -30 | -49 | -15 |
| L | 1 | -13 | 27 | 2 | -9 | 16 | -15 | -37 | -1 | -30 | -42 | -17 |
| M | 10 | -14 | 37 | 10 | -19 | 26 | -12 | -44 | -2 | -28 | -60 | -7 |
| N | 2 | -1 | 10 | 7 | 5 | 10 | -11 | -16 | -6 | -19 | -23 | -16 |
| O | -18 | -33 | 5 | -13 | -25 | 2 | -40 | -61 | -19 | -29 | -44 | -15 |
| P | -4 | -21 | 7 | -1 | -14 | 3 | -18 | -36 | -5 | -23 | -38 | -9 |
| Q | -19 | -29 | -7 | -17 | -30 | -9 | -49 | -64 | -35 | -33 | -50 | -14 |
| R | 1 | -8 | 6 | 4 | -3 | 10 | -16 | -32 | -2 | -20 | -28 | -15 |
| S | -9 | -22 | 6 | -13 | -22 | -1 | -33 | -50 | -28 | -21 | -42 | -16 |
| U | 15 | 7 | 27 | 13 | 2 | 29 | -6 | -22 | 8 | -21 | -34 | -11 |
| V | 1 | -24 | 27 | 4 | -30 | 26 | -15 | -33 | 5 | -20 | -52 | -8 |
| W | -3 | -24 | 16 | -6 | -25 | 8 | -20 | -27 | -9 | -24 | -46 | -14 |
| X | -23 | -42 | -5 | -19 | -41 | -2 | -30 | -48 | -14 | -30 | -50 | -13 |
| Y | -28 | -54 | -1 | -12 | -40 | 45 | -36 | -62 | -11 | -23 | -59 | 21 |

TABEAU 19 : Changements relatifs médians (%) des débits annuels par narratif et par région hydrographique (médiane, minimum, maximum).

9 Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul de l'IDRIS au travers des allocations de ressources A0150114642 et AD010113599 attribuées par GENCI, et à ceux des centres de calcul ISDM-Meso (<https://meso-lr.umontpellier.fr>) et ESPRI (<https://espri.ipsl.fr/computing-centre>) qui ont hébergé les calculs des indicateurs et de mise en forme des données au format NetCDF.

Les auteurs remercient l'ensemble des modélisateurs du projet **Explore2** impliqués dans l'élaboration des projections hydrologiques.

10 Références

- BAHR, D. B., M. F. MEIER et S. D. PECKHAM (1997). « The physical basis of glacier volume-area scaling ». In : *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* 102.B9, p. 20355-20362. DOI : <https://doi.org/10.1029/97JB01696>.
- BAHR, D. B., W. T. PFEFFER et G. KASER (2015). « A review of volume-area scaling of glaciers ». In : *Reviews of Geophysics* 53.1, p. 95-140. DOI : <https://doi.org/10.1002/2014RG000470>.
- BOLIBAR, J. et al. (2020). « A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps : 1967-2015 ». In : *Earth System Science Data* 12.3, p. 1973-1983. DOI : [10.5194/essd-12-1973-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-1973-2020).
- BOUCHER, O. et al. (2020). « Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model ». In : *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12.7. e2019MS002010 10.1029/2019MS002010, e2019MS002010. DOI : <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>.
- BUSTILLO, V. et al. (2014). « A multimodel comparison for assessing water temperatures under changing climate conditions via the equilibrium temperature concept : case study of the Middle Loire River, France ». In : *Hydrol. Process.* 28, p. 1507-1524. DOI : [10.1002/hyp.9683](https://doi.org/10.1002/hyp.9683).
- CANADELL, J. et al. (2021). *Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks*. In : "Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. P. 673--816. DOI : [10.1017/9781009157896.007](https://doi.org/10.1017/9781009157896.007).
- CHERUY, F. et al. (2020). « Improved Near-Surface Continental Climate in IPSL-CM6A-LR by Combined Evolutions of Atmospheric and Land Surface Physics ». In : *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12.10. e2019MS002005 10.1029/2019MS002005, e2019MS002005. DOI : <https://doi.org/10.1029/2019MS002005>.
- DECHARME, B. et al. (2012). « Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model ». In : *Climate Dynamics* 38.7-8, p. 1389-1412. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1054-9>.
- DECHARME, B. et al. (2019). « Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications ». In : *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11.5, p. 1207-1252. DOI : <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>.
- EVIN, G. et al. (2024). *Ensemble de projections Explore2 : changements moyens et incertitudes associées*. Rapp. tech. INRAE ; CNRS ; IGE, p. 91. DOI : [hal-0460954](https://hal.inrae.fr/hal-0460954).
- FARINOTTI, D. et al. (2019). « A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth ». In : *Nature Geoscience* 12, p. 168-173. DOI : [10.1038/s41561-019-0300-3](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3).
- GARAVAGLIA, F. et al. (2017). « Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism : from a lumped to a semi-distributed approach ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 21.8, p. 3937-3952. DOI : [10.5194/hess-21-3937-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017).
- GARDENT, M. et al. (2014). « Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s ». In : *Global and Planetary Change* 120, p. 24-37. ISSN : 0921-8181. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.004>.
- GARÇON, R. (1996). « Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR, Bilan de l'année 1994-1995 ». In : *La Houille Blanche* 5, p. 71--76. DOI : [10.1051/lhb/1996056](https://doi.org/10.1051/lhb/1996056).
- GUPTA, H. V. et al. (2009). « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling ». In : *Journal of Hydrology* 377, p. 80-91.

- HABETS, F. et al. (2008). « The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France ». In : *Journal of Geophysical Research* 113, p. D06113. DOI : [10.1029/2007JD008548](https://doi.org/10.1029/2007JD008548).
- HAMED, K. H. (2008). « Trend detection in hydrologic data : The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis ». In : *Journal of Hydrology* 349.3-4, p. 350-363.
- HAMED, K. H. et A. R. RAO (1998). « A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data ». In : *Journal of Hydrology* 204.1-4, p. 182-196.
- HERAUT, L. et E. SAUQUET (2024). *Notice de lecture des fiches de synthèse aux points de simulation de débits du projet Explore2*. Rapp. tech. INRAE, p. xx. DOI : [hal-xxxx](https://hal.inrae.fr/hal-xxxx).
- HORNER, I. (2020). *Design and evaluation of hydrological signatures for the diagnostic and improvement of a process-based distributed hydrological model*. Thèse de Doctorat. Université Grenoble Alpes.
- JAY-ALLEMAND, M. et al. (2020). « On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model : application on a Mediterranean catchment ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24, p. 5519-5538. DOI : [10.5194/hess-24-5519-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-5519-2020).
- KRINNER, G. et al. (2005). « A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system ». In : *Global Biogeochemical Cycles* 19.1. DOI : <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.
- LANINI, S. et al. (2024). *jections hydrologiques : recharge potentielle des aquifères*. Rapp. tech. BRGM ; INRAE, p. xx. DOI : [hal-xxxxx](https://hal.inrae.fr/hal-xxxxx).
- LE LAY, M., J. GAILHARD et A. BRENOT (2022). « Dynamic glacio-hydrological modelling for climate change studies on mountainous alpine catchments ». In : *3rd International Conference on Snow Hydrology*.
- LE MOIGNE, P. et al. (2020). « The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France ». In : *Geosci. Model Dev.* 13, p. 3925–3946. DOI : [10.5194/gmd-13-3925-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020).
- LOBLIGEOIS, F. (2014). « Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français ». Thèse de doctorat. Hydrologie Paris, AgroParisTech. Thèse de doct.
- MARSON, P. et al. (2024). *Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées*. Rapp. tech. Météo-France ; INRAE, p. 134. DOI : [hal-04443633](https://hal.inrae.fr/hal-04443633).
- MONTEIL, C. et al. (2020). « Multi-objective calibration by combination of stochastic and gradient-like parameter generation rules - the caRamel algorithm ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24.6, p. 3189-3209. DOI : [10.5194/hess-24-3189-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-3189-2020).
- MUNIER, S. et B. DECHARME (2022). « River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies ». In : *Earth System Science Data* 14.5, p. 2239-2258. DOI : [10.5194/essd-14-2239-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-2239-2022).
- NICOLLE, P. (2010). *Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales ? Mémoire de Master*. Cemagref (Antony), UPMC (Paris), p. 53.
- PARDÉ, M. (1933). *Fleuves et rivières*. Librairie Armand Colin.
- PAUL, F. et al. (2020). « Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 ». In : *Earth System Science Data* 12.3, p. 1805-1821. DOI : [10.5194/essd-12-1805-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020).
- PERRIN, C., C. MICHEL et V. ANDRÉASSIAN (2003). « Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. » In : *Journal of hydrology* 279.1-4, p. 275-289.
- PIOTTE, O. et al. (2020). « The early warning service for heavy rainfalls and flash floods ». In : *La Houille Blanche* 106.6, p. 75-84. DOI : [10.1051/lhb/2020055](https://doi.org/10.1051/lhb/2020055).

- QUINTANA SEGUÍ, P. (2008). *Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. Thèse de Doctorat.* Université Paul Sabatier - Toulouse III, p. 205.
- ROBIN, Y. et al. (2023). *Projections climatiques régionalisées : correction de biais et changements futurs.* Rapp. tech. IPSL; Météo-France, p. 62. DOI : <https://doi.org/10.57745/OMWYR0>.
- ROUHIER, L. et al. (2017). « Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response ». In : *Journal of Hydrology* 553, p. 13-25. DOI : [10.1016/j.jhydrol.2017.07.037](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.037).
- ROUZIES, E. et M. LE LAY (2024). « Assessing future changes in water resources in the Alpes with a dynamic glacio-hydrological model. Application to the Isere catchment ». In : *4th International Conference on Snow Hydrology*.
- SAUQUET, E., L. GOTTSCHALK et I. KRASOVSKAIA (2008). « Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France ». In : *Hydrology Research* 39.5-6, p. 403-423. ISSN : 0029-1277. DOI : [10.2166/nh.2008.331](https://doi.org/10.2166/nh.2008.331).
- SAUQUET, E. et al. (2022a). *Identification de stations hydrométriques et piézomètres pour l'évaluation des modélisations hydrologiques et hydrogéologiques.* Rapp. tech. INRAE; BRGM, p. 31. DOI : [hal-03940233](https://doi.org/10.31803/2474-9518X000031).
- SAUQUET, E. et al. (2022b). *Points et supports de simulation des projections hydrologiques.* Rapp. tech. INRAE; BRGM, p. 22. DOI : [hal-03940238](https://doi.org/10.31803/2474-9518X000022).
- SAUQUET, E. et al. (2023). *Diagnostic des modèles hydrologiques : des données aux résultats.* Rapp. tech. INRAE; IGE, p. 100. DOI : doi.org/10.57745/OMWYR0.
- SEYEDHASHEMI, H. et al. (2020). « Regional, multi-decadal analysis on the Loire River basin reveals that stream temperature increases faster than air temperature ». In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26, p. 2583-2603. DOI : [10.5194/hess-26-2583-2022](https://doi.org/10.5194/hess-26-2583-2022).
- THIÉRY, D. (2014). *Logiciel GARDÉNIA, version v8.2. Guide d'utilisation.* Rapp. tech. BRGM/RP-62797-FR.
- (2018). *Logiciel ÉROS version v7.1. Guide d'utilisation.* Rapp. tech. BRGM/RP-67704-FR.
- TRAMBLAY, Y. et S. SOMOT (2018). « Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean ». In : *Climatic Change* 151, p. 289-302. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>.
- TRAMBLAY, Y. et al. (2024). *Scénarios d'extrêmes hydrologiques.* Rapp. tech. IRD; INRAE; Météo-France; BRGM, p. xx. DOI : [hal-xxxxx](https://doi.org/10.31803/2474-9518X0000xx).
- VALÉRY, A. (2010). *Modélisation précipitations - débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat.* Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), p. 405.
- VERGNES, J.-P. et B. DECHARME (2012). « A simple groundwater scheme in the TRIP river routing model : global off-line evaluation against GRACE terrestrial water storage estimates and observed river discharges ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 16.10, p. 3889-3908. DOI : [10.5194/hess-16-3889-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-3889-2012).
- VERGNES, J.-P. et al. (2020). « The AquifR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France : evaluation over a 60-year period ». In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, p. 633-654. DOI : [10.5194/hess-24-633-2020](https://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020).
- WANG, T. et al. (2013). « Evaluation of an improved intermediate complexity snow scheme in the ORCHIDEE land surface model ». In : *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 118.12, p. 6064-6079. DOI : <https://doi.org/10.1002/jgrd.50395>.
- WASSON, J. G. et al. (2002). « Typology and reference conditions for surface water bodies in France : the hydro-ecoregion approach. » In : *TemaNord* 566, p. 37-41.

YAMAZAKI, D. *et al.* (2019). « MERIT Hydro : A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset ». In : *Water Resources Research* 55.6, p. 5053-5073. DOI : <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>.