



EVOLUTION DE L'HYDROLOGIE DE SURFACE EN FRANCE PAR NIVEAU DE RÉCHAUFFEMENT

**Éric SAUQUET (INRAE), Antoine TORREMOCHA (INRAE),
Guillaume THIREL (INRAE), Guillaume EVIN (INRAE, IGE),
Patrick ARNAUD (INRAE), Jérémie BONNEAU (INRAE),
Flora BRANGER (INRAE), Yvan CABALLERO (BRGM),
François COLLEONI (INRAE), Agnès DUCHARNE (CNRS,
IPSL), Joël GAILHARD (EDF), Frédéric HENDRICKX (EDF),
Louis HERAUT (INRAE), Benoît HINGRAY (CNRS, IGE), Peng
HUANG (Sorbonne Université), Sandra LANINI (BRGM),
Matthieu LE LAY (EDF), Louise MIMEAU (INRAE), Céline
MONTEIL (EDF), Simon MUNIER (Météo-France), Charles
PERRIN (INRAE), Olivier ROBELIN (INRAE, BRGM),
Fabienne ROUSSET (Météo-France), Laurent
STROHMENGER (INRAE), Flore TOCQUER (Météo-France),
Jean-Pierre VERGNES (BRGM)**

09/07/2025

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'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.

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement
Auteur(s)	<p>Éric SAUQUET, INRAE Antoine TORREMOCHA, INRAE Guillaume THIREL, INRAE Guillaume EVIN, INRAE, IGE Patrick ARNAUD, INRAE Jérémie BONNEAU, INRAE Flora BRANGER, INRAE Yvan CABALLERO, BRGM François COLLEONI, INRAE Agnès DUCHARNE, CNRS, IPSL Joël GAILHARD, EDF Frédéric HENDRICKX, EDF Louis HERAUT, INRAE Benoît HINGRAY, CNRS, IGE Peng HUANG, Sorbonne Université Sandra LANINI, BRGM Matthieu LE LAY, EDF Louise MIMEAU, INRAE Céline MONTEIL, EDF Simon MUNIER, Météo-France Charles PERRIN, INRAE Olivier ROBELIN, INRAE, BRGM Fabienne ROUSSET, Météo-France Laurent STROHMENGER, INRAE Flore TOCQUER, Météo-France Jean-Pierre VERGNES, BRGM</p>
Numéro de version	0
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2025
Date effective de remise du livrable	01/07/2025
Statut du document	Version provisoire
Accès en ligne	Libre
Mots-clés (5 maximum)	Débits saisonniers, étiage, crue, Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)

Table des matières

1	Introduction	11
2	Le climat selon la TRACC	12
2.1	Méthode et hypothèses pour l'élaboration de la TRACC	12
2.2	Approche par narratif	13
2.3	Principaux résultats	15
2.4	Avertissements	17
3	Rappels sur la modélisation hydrologique	19
4	Principes de l'analyse	21
5	Evolution de la recharge potentielle	23
6	Evolution des débits annuels et saisonniers	29
7	Evolution des extrêmes hydrologiques	42
8	Conclusion	49
9	Annexe 1 : Les quatre saisons climatiques selon la TRACC	52
10	Annexe 2 : L'hydrologie de surface selon la TRACC	59
11	Références	67

Résumé

Ce rapport est une des synthèses des résultats obtenus pour la recharge potentielle des aquifères et les débits. Un rapport spécifique aux évolutions des niveaux piézométriques complète l'analyse réalisée ici. Ce document fait suite aux rapports sur les impacts climatiques examinés par niveau de réchauffement (SOUBEYROUX *et al.*, 2024 ; SOUBEYROUX *et al.*, 2025).

Les analyses réalisées portent sur les recharges annuelles, les débits annuels et saisonniers et deux caractéristiques des extrêmes : un débit d'étiage et un débit de crue. L'ensemble décrit leurs évolutions au travers de cartes et de tableaux de synthèse. Les réponses à trois grands types d'évolution climatique (limitée, contrastée ou sèche) possible pour une France à +4°C illustrent les incertitudes.

Les analyses montrent :

- Des évolutions d'autant plus importantes que le niveau de réchauffement est fort,
- Des réponses différentes selon le territoire, en fonction de l'évolution du climat régional et des processus naturels en cours actuellement sur le bassin,
- Des secteurs de montagne particulièrement sensibles, conséquence de la réduction du manteau neigeux,
- Une baisse quasi généralisée des débits estivaux et automnaux, qui témoigne d'une sévérité et d'une durée accrue des étiages, sur l'ensemble de la France hexagonale et sur la Corse.

Acronymes

Acronyme	Description
ΔX	Changement projeté pour la variable X entre le niveau de réchauffement et la période de référence 1976-2005
DJF	Saison d'hiver (Décembre-Janvier-Février)
GIEC	Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du Climat
JJA	Saison d'été (Juin-Juillet-Août)
MAM	Saison de printemps (Mars-Avril-Mai)
MESO	Masse d'Eau SOuerraine
MTECT	Ministère de la Transition écologique et cohésion des territoires
Q_A	Débit (Q) annuel (A)
$QJXA$	Débit (Q) journalier (J) maximal (X) annuel (A)
RCP	Representative Concentration Pathway
R_A	Recharge annuelle moyenne
SON	Saison d'automne (Septembre-Octobre-Novembre)
T_A	Température annuelle moyenne
TRACC	Trajectoire de Réchauffement de référence pour l'Adaptation au Changement Climatique
$VCN10$	Débit moyen su 10 jours minimal sur la période 01/05 au 30/11

Table des figures

1	Évolution du cumul saisonnier de précipitation pour le niveau de réchauffement +4°C. Un point correspond à un couple GCM-RCM et la couleur est celle de sa famille parmi les trois proposées par Météo-France.	13
2	Évolution du cumul saisonnier de précipitation par niveau de réchauffement. La couleur des points est définie dans la légende de la Figure 1.	14
3	Changements médians des températures annuelles, d'hiver et d'été moyennes par rapport à la période 1976-2005 par niveau de réchauffement.	16
4	Changements médians des cumuls de précipitations moyens annuels, d'hiver et d'été par niveau de réchauffement.	17
5	Chaîne de modélisation retenue pour le projet Explore2	20
6	Disponibilité des modèles hydrologiques sur l'ensemble des points de simulation.	22
7	Changement relatif médian de la recharge potentielle annuelle pour les différents niveaux de réchauffement.	24
8	Dominance du signe du changement de la recharge potentielle annuelle pour les différents niveaux de réchauffement.	25
9	Changement relatif médian de la recharge potentielle annuelle par famille pour une France à +4°C.	28
10	Signe du changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2°C.	30
11	Signe du changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2.7°C.	31
12	Signe du changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +4°C.	32
13	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2°C.	35
14	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2.7°C.	36
15	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +4°C.	37
16	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution limitée pour une France à +4°C.	39
17	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution contrastée pour une France à +4°C.	40
18	Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution sèche pour une France à +4°C.	41
19	Changement relatif médian du VCN10 pour les différents niveaux de réchauffement.	43
20	Dominance du signe du changement du VCN10 pour les différents niveaux de réchauffement.	44
21	Changement relatif médian du VCN10 par famille pour une France à +4°C.	45
22	Changement relatif médian du QJXA pour les différents niveaux de réchauffement.	46
23	Dominance du signe du changement du QJXA pour les différents niveaux de réchauffement.	47
24	Changement relatif médian du QJXA par famille pour une France à +4°C.	48
25	Intensité et signe des changements relatifs par variable pour les différents niveaux de réchauffement. Dans chaque boîte à moustache, le segment en trait épais noir indique la médiane, et les bords inférieurs et supérieurs indiquent respectivement les 25eme et 75eme centiles. Les moustaches s'étendent à +/-1.5 fois l'écart-type.	50
26	Intensité et signe des changements relatifs par variable par type d'évolution pour une France à +4°C. Dans chaque boîte à moustache, le segment en trait épais noir indique la médiane, et les bords inférieurs et supérieurs indiquent respectivement les 25eme et 75eme centiles. Les moustaches s'étendent à +/-1,5 fois l'écart-type.	51
27	Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +2°C.	53
28	Changement médian de températures saisonnières pour une France à +2°C.	54
29	Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +2.7°C.	55
30	Changement médian de températures saisonnières pour une France à +2.7°C.	56

31	Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +4°C.	57
32	Changement médian de températures saisonnières pour une France à +4°C.	58
33	Régions hydrographiques en France hexagonale.	60

Liste des tableaux

1	Ensemble de projections climatiques issues du projet Explore2 identifiées par les couples GCM-RCM mobilisées pour la TRACC, et année pivot et fenêtre d'extraction associées aux niveaux de réchauffement $\Delta T A_A$	12
2	Caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet Explore2	19
3	Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +2°C	26
4	Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +2.7°C	26
5	Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +4°C	27
6	Statistiques sur les signes des changements projetés sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus, par niveau de réchauffement.	29
7	Statistiques sur les signes des changements projetés sur les débits extrêmes aux points de simulation, tous modèles confondus, par niveau de réchauffement.	42
8	Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +2°C	52
9	Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +2.7°C	52
10	Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +4°C	52
11	Dénomination et description des régions hydrographiques	59
12	Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les secteurs avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.	61
13	Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2.7°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les régions hydrographiques avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.	62
14	Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +4°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les régions hydrographiques avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.	63
15	Changements relatifs médians (%) des débits d'étiage et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections).	64
16	Changements relatifs médians (%) des débits d'étiage et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2.7°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections).	65

- 17 Changements relatifs médians (%) des débits d'été et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +4°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections). 66

1 Introduction

Le projet **Explore2** a produit un ensemble riche de projections hydrologiques décrivant l'évolution des débits, de la recharge potentielle des aquifères et des hauteurs piézométriques pour l'ensemble du XXI^e siècle. Ces données ont été examinées par scénario d'émission de gaz à effet de serre et par horizon de temps, comparativement à la période de référence 1976-2005. Ces analyses sont le coeur des supports de diffusion des résultats.

La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) est une initiative du Ministère de la Transition écologique et cohésion des territoires (MTECT) pour fixer un cadre climatique commun à l'échelle nationale pour le développement de stratégies d'adaptation. La TRACC est une traduction politique et normative du changement climatique. Elle prescrit trois niveaux de réchauffement en France (+2°C, 2.7°C et +4°C par rapport à la période pré-industrielle) à différents horizons, pour cadrer les actions du 3^e Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). La TRACC est apparue après le lancement d'Explore2 et n'a pas été initialement intégrée dans le programme scientifique du projet.

Ce rapport répond aux enjeux scientifiques et d'accompagnement posés par la TRACC. Un post-traitement des projections produites par le projet **Explore2** a été engagé afin de donner à voir l'hydrologie en France hexagonale et en Corse par niveau de réchauffement. Elle s'inscrit dans la continuité de l'examen des impacts par niveau de réchauffement publiés dans SOUBEYROUX *et al.* (2025).

2 Le climat selon la TRACC

2.1 Méthode et hypothèses pour l'élaboration de la TRACC

Les hypothèses d'évolution du climat de la TRACC s'appuient sur les travaux du Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC). Ainsi, si aucune action supplémentaire de limitation des émissions de gaz à effet de serre n'était engagée, à l'échelle mondiale, le réchauffement moyen annuel atteindrait +1,5 °C vers 2030, +2 °C au milieu de siècle et autour de +3 °C en 2100 par rapport à l'ère pré-industrielle (1900). Le réchauffement étant plus fort sur les surfaces continentales, *a fortiori* en Europe, ces hausses se traduiraient par des hausses ΔT_A amplifiées en France hexagonale et Corse : +2 °C en 2030, +2,7 °C en 2050 et +4 °C en 2100, par rapport à 1900.

Météo-France a été chargé de fournir des projections climatiques associées à ces niveaux de réchauffement à partir des données [EXPLORE2-Climat 2022](#) élaborées dans le cadre du projet d'Explore2. Seules les projections obtenues sous scénario d'émission RCP 8.5 (garantissant le franchissement du niveau de réchauffement le plus élevé (+4 °C)) et corrigées avec la méthode ADAMONT (exploitées par tous les modèles hydrologiques (surface et souterrain) du projet **Explore2**) ont été sélectionnées. Finalement, les différents niveaux de réchauffement sont décrits par 17 projections climatiques et la fenêtre d'extraction des données de 20 ans est propre à chaque projection.

Le processus décrit dans SOUBEYROUX *et al.* (2024) repose sur l'analyse de la température annuelle moyenne T_A sur l'ensemble France hexagonale et Corse. La date de l'atteinte du niveau de réchauffement ΔT_A spécifié par la TRACC constitue un point pivot. Des séquences de 20 ans ont été isolées autour cette année pivot, les dix années précédentes et les neuf années suivantes (Tableau 1). Il y a des recouvrements entre les fenêtres temporelles choisies et les horizons temporels qui ont prévalu dans les précédentes analyses des résultats de l'ensemble EXPLORE2-Climat 2022 (horizon proche 2021-2050 (H1), horizon moyen 2041-2070 (H2) et horizon lointain 2070-2099 (H3)). Ainsi, les fenêtres pour le niveau de réchauffement le plus faible ont en commun entre 9 et 20 ans avec H1. Le recouvrement médian est de 17, 18 et 14 ans pour les niveaux de réchauffement +2°C, +2,7°C et +4°C. A noter que les fenêtres pour les projections issues du GCM MOHC-HadGEM2-ES pour le niveau de réchauffement le plus élevé sont centrées sur une période plus précoce.

Cet ensemble baptisé TRACC-2023 est disponible au téléchargement sur le portail [DRIAS - les futurs du climat](#).

GCM	RCM	+2°C	+2,7°C	+4°C
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	2041 [2031 - 2050]	2056 [2046 - 2065]	2080 [2070 - 2089]
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	2035 [2025 - 2044]	2050 [2040 - 2059]	2074 [2064 - 2083]
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	2027 [2017 - 2036]	2043 [2033 - 2052]	2067 [2057 - 2076]
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	2036 [2026 - 2045]	2051 [2041 - 2060]	2076 [2066 - 2085]
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	2032 [2022 - 2041]	2047 [2037 - 2056]	2072 [2062 - 2081]
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	2035 [2025 - 2044]	2049 [2039 - 2058]	2073 [2063 - 2082]
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	2033 [2023 - 2042]	2048 [2038 - 2057]	2070 [2060 - 2079]
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	2024 [2014 - 2033]	2041 [2031 - 2050]	2066 [2056 - 2075]
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	2020 [2010 - 2029]	2035 [2025 - 2044]	2059 [2049 - 2068]
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	2023 [2013 - 2032]	2037 [2027 - 2046]	2062 [2052 - 2071]
MOHC-HadGEM2-ES	RegCM4-6	2026 [2016 - 2035]	2041 [2031 - 2050]	2065 [2055 - 2074]
MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	2047 [2037 - 2056]	2062 [2052 - 2071]	2089 [2079 - 2098]
MPI-M-MPI-ESM-LR	CTP-RegCM4-6	2044 [2034 - 2053]	2059 [2049 - 2068]	2086 [2076 - 2095]
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	2048 [2038 - 2057]	2064 [2054 - 2073]	2091 [2081 - 2100]
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	2033 [2023 - 2042]	2049 [2039 - 2058]	2075 [2065 - 2084]
NCC-NorESM1-M	GERICS-REMO2015	2036 [2026 - 2045]	2053 [2043 - 2062]	2078 [2068 - 2087]
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	2046 [2036 - 2055]	2063 [2053 - 2072]	2088 [2078 - 2097]

TABLEAU 1 : Ensemble de projections climatiques issues du projet **Explore2** identifiées par les couples GCM-RCM mobilisées pour la TRACC, et année pivot et fenêtre d'extraction associées aux niveaux de réchauffement ΔT_A

Il convient de rappeler qu'une France à un niveau de réchauffement ΔT_A ne signifie pas que tous les points du territoire seront soumis uniformément à ce niveau de réchauffement, et que les incertitudes pour les températures sont de fait réduites par construction.

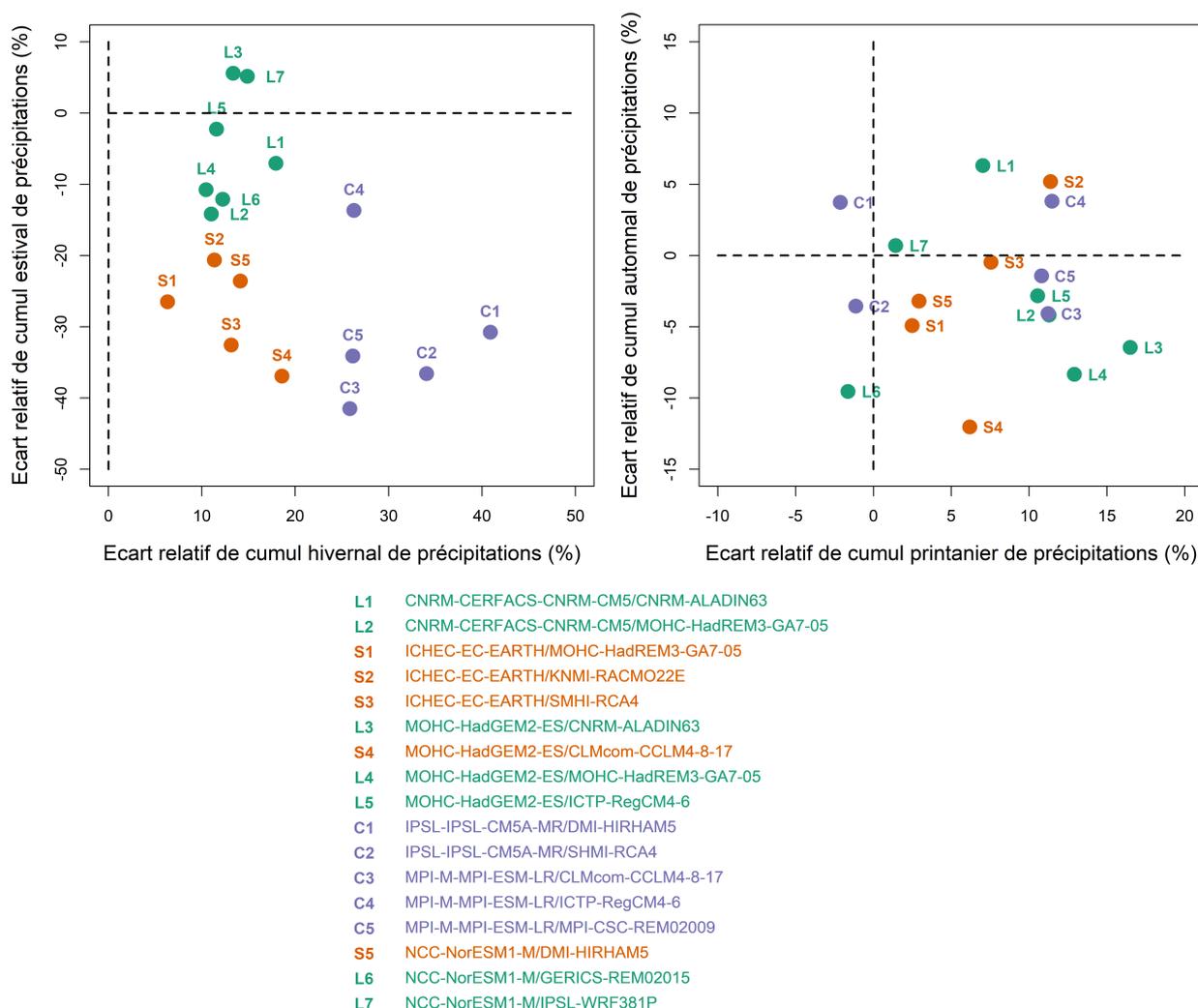


FIGURE 1 : Évolution du cumul saisonnier de précipitation pour le niveau de réchauffement +4°C. Un point correspond à un couple GCM-RCM et la couleur est celle de sa famille parmi les trois proposées par Météo-France.

Dans la suite du document, nous utilisons la terminologie « France à +2°C », « France à +2,7°C » et « France à +4°C » pour désigner les niveaux de réchauffement.

2.2 Approche par narratif

Dans une perspective d'illustration des incertitudes sur le climat, Météo-France a proposé de scinder l'ensemble TRACC-2023 formé des 17 projections en trois grandes familles selon les changements de précipitations d'été et d'hiver (Figure 1 en haut à gauche) pour le niveau de réchauffement +4 °C :

- la famille « évolution limitée » (L), qui rassemble sept projections climatiques présentant de faibles changements en été et en hiver,
- la famille « évolution contrastée » (C), qui rassemble cinq projections climatiques présentant une forte hausse des précipitations d'hiver et une forte diminution en été,
- la famille « évolution sèche » (S), qui rassemble cinq projections climatiques présentant une faible augmentation des précipitations d'hiver et une forte diminution en été.

La Figure 1 montre également les changements des précipitations saisonnières projetés pour l'automne et le printemps.

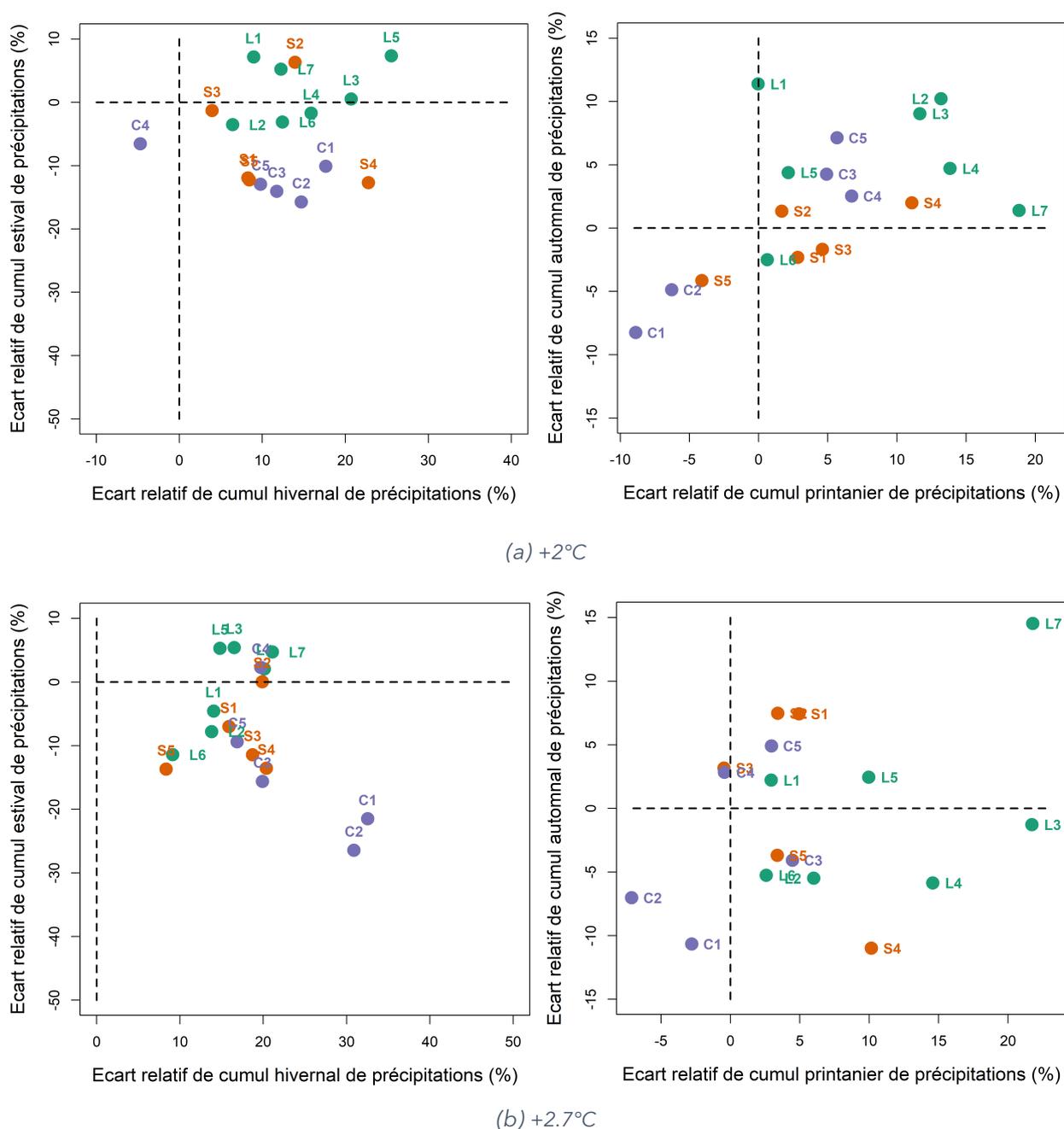


FIGURE 2 : Évolution du cumul saisonnier de précipitation par niveau de réchauffement. La couleur des points est définie dans la légende de la Figure 1.

Les qualificatifs associés aux projections sont propres au niveau de réchauffement +4°C. Les caractères relatifs identifiés (secs, contrastés ou non) des projections climatiques ne sont pas pertinents pour les autres niveaux de réchauffement. Les regroupements opérés pour une France à +4°C sur les critères de changements de précipitations d'hiver et d'été se retrouvent éclatés pour les autres niveaux de réchauffement (graphiques de gauche de la Figure 2). La variabilité interne du climat en est à l'origine. Néanmoins, les qualificatifs sont en partie légitimes pour CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/MOHC-HadREM3-GA7-05 (L2), IPSL-IPSL-CM5A-MR/SHMI-RCA4 (C2) et NCC-NorESM1-M/DMI-HIRHAM5 (S5). Les résultats pour ces trois familles illustreront les incertitudes dans les sections suivantes pour le niveau de réchauffement +4°C.

2.3 Principaux résultats

Compte tenu du processus de construction, les incertitudes sont réduites sur les températures annuelles moyennes en France hexagonale et Corse (ΔT_A varie entre +3.2°C et +3.6°C par rapport à 1976-2005 pour le niveau de réchauffement +4°C par rapport à l'ère pré-industrielle). Les incertitudes sont plus importantes sur les températures saisonnières moyennes ΔT_{JJA} varie entre +3.6°C et +4.7°C pour le niveau de réchauffement +4°C) et sur les précipitations avec une incertitude sur le signe du changement des précipitations annuelles hors le nord de la France (hausse) et le sud-ouest (baisse) pour le niveau de réchauffement +4°C

Les changements des températures (Figure 3) sont structurés selon un axe nord-ouest / sud-est : le sud-est (y compris les Alpes) se réchauffe plus (de l'ordre de +1°C) que le nord-ouest et le réchauffement est plus marqué en été qu'en hiver pour une France à +4°C. A l'échelle du territoire, les changements de la température annuelle moyenne par rapport à 1976-2005 ΔT_A varient autour de +1.4°C, +2.1°C et +3.4°C pour une France à +2°, une France à +2,7°C et une France à +4°C.

Le régime des précipitations va évoluer vers plus de contrastes entre saisons à l'échelle de la France (Figure 4). Cette évolution est plus marquée pour le niveau de réchauffement +4°C avec majoritairement une augmentation des cumuls en hiver (entre +6 % et +42 % à l'échelle France) et une baisse ou au mieux un maintien de ces cumuls en été (entre -42 % et +6 % à l'échelle France). La hausse en hiver concerne l'ensemble du territoire, exception faite de la partie sud de la France. La baisse des précipitations estivales est quasi généralisée. Une incertitude demeure dans le quart nord-est de la France quel que soit le niveau de réchauffement. A l'échelle du territoire, les changements de cumul de précipitations annuel moyen ΔP_A par rapport à 1976-2005 varient autour de +4 %, +4 % et +2 % pour une France à +2°C, une France à +2,7°C et une France à +4°C.

Ces résultats sont cohérents avec les contrastes saisonniers et spatiaux projetés sur les températures et précipitations moyennes par horizon pour le RCP8.5 (MARSON *et al.*, 2024).

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

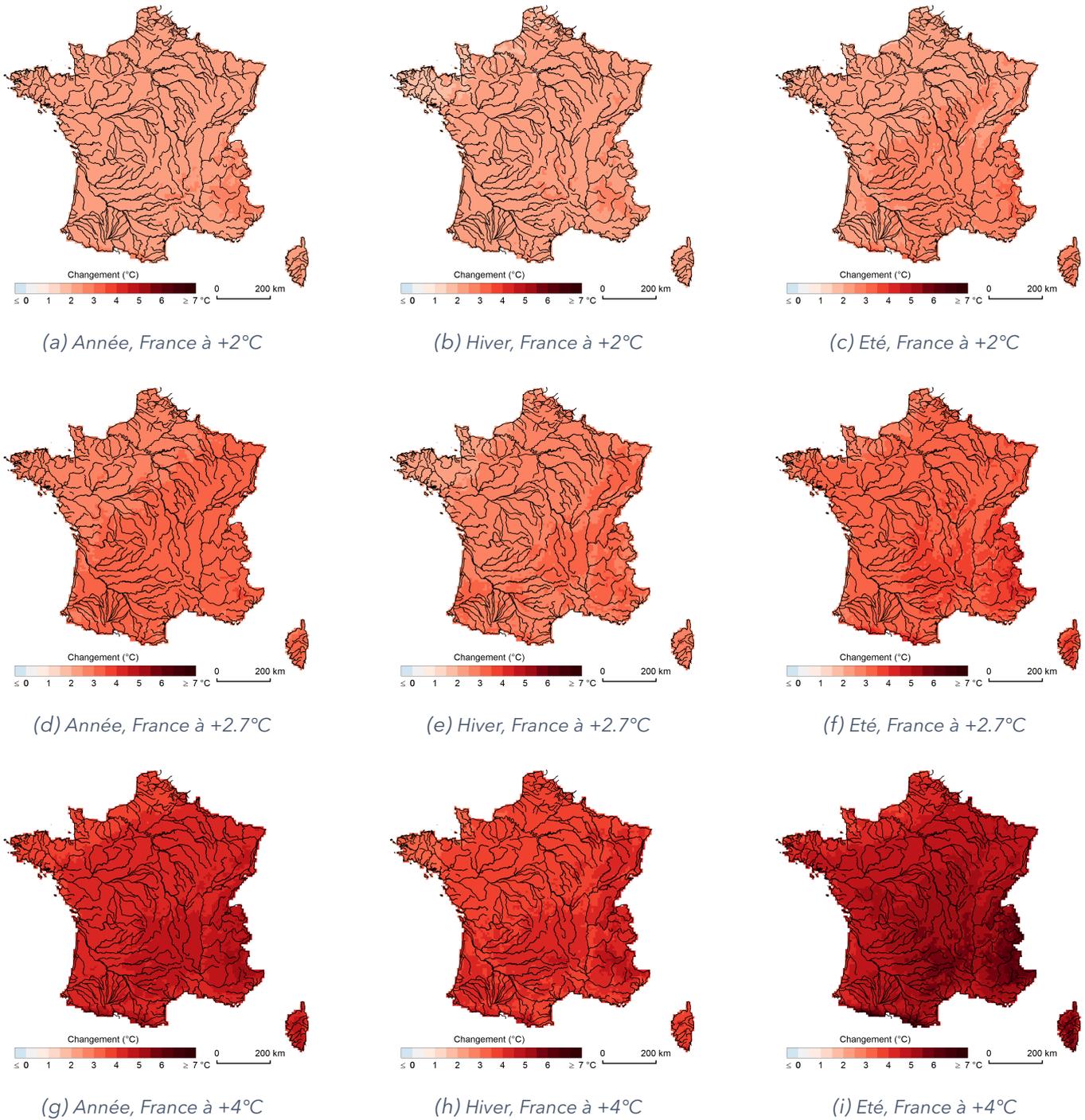


FIGURE 3 : Changements médians des températures annuelles, d'hiver et d'été moyennes par rapport à la période 1976-2005 par niveau de réchauffement.

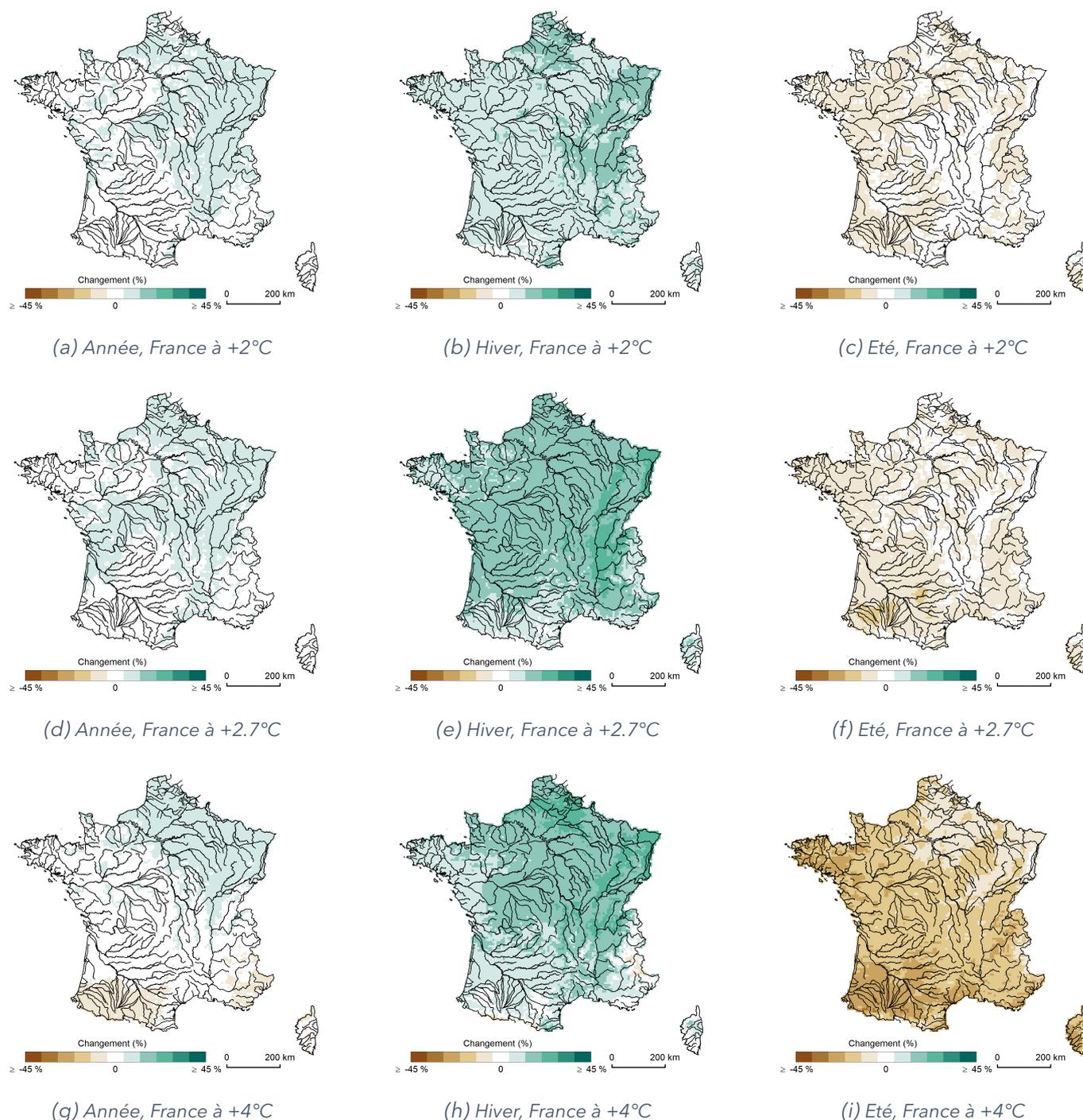


FIGURE 4 : Changements médians des cumuls de précipitations moyens annuels, d'hiver et d'été par niveau de réchauffement.

Des cartes complémentaires sur le climat et le détail des changements par projection à l'échelle de la France hexagonale et Corse sont présents en [Annexe 1 : Les quatre saisons climatiques selon la TRACC](#) (page 52).

2.4 Avertissements

Les choix techniques opérés par Météo-France ont été établis sans consultation du consortium scientifique d'Explore2, même si les données exploitées ont été élaborées dans le cadre du projet **Explore2**. Ils se sont imposés ici par seul souci de cohérence pour l'analyse des projections hydrologiques par niveau de réchauffement. Certains choix sont très discutables, notamment ceux concernant la durée des fenêtres

d'extraction de 20 ans, qui induit des biais d'échantillonnage lors de comparaison à la période de référence de 30 ans (1976-2005), le nombre de familles d'évolutions climatiques, etc.

3 Rappels sur la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est la dernière composante de la chaîne de modélisation du projet **Explore2** (Figure 5).

Le projet a fourni 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. Le projet **Explore2** s'inscrit dans une démarche multi-modèles et multi-scénarios : nous exploitons ainsi les résultats de plusieurs modèles hydrologiques de surface, jusqu'à neuf sur certains points de simulation dans le bassin versant de la Loire (Tableau 2). Un seul modèle baptisé RECHARGE, développé et mis en oeuvre par le BRGM, a estimé la recharge potentielle des aquifères sur un découpage de la France hexagonale et de la Corse en 621 entités hydrogéologiques réputées homogènes. Pour une description détaillée des modèles hydrologiques, le lecteur se reportera à l'Annexe du rapport SAUQUET *et al.* (2023). Les supports et les points des simulations hydrologiques ont été présentés par SAUQUET *et al.* (2022).

Nom	Type	Discretisation spatiale	Nombre de points de simulation	Référence
CTRIP	A base physique (résolution du bilan d'énergie)	Distribué (mailles régulières)	2024	DECHARME <i>et al.</i> , 2019
EROS	Conceptuel	Global Semi-distribué	60 327	THIÉRY, 2018 SEYEDHASHEMI <i>et al.</i> , 2020
GRSD	Conceptuel	Semi-distribué	3712	LAVENNE <i>et al.</i> , 2019
J2000	Orienté processus	Semi-distribué (mailles irrégulières)	1291	KRAUSE <i>et al.</i> , 2006
MORDOR-SD	Conceptuel	Global	611	GARAVAGLIA <i>et al.</i> , 2017
MORDOR-TS	Conceptuel	Semi-distribué	535	ROUHIER <i>et al.</i> , 2017
ORCHIDEE	A base physique (résolution du bilan d'énergie)	Distribué (mailles régulières)	3587	HUANG <i>et al.</i> , 2024
SIM2	A base physique (résolution du bilan d'énergie)	Distribué (mailles régulières)	649	LE MOIGNE <i>et al.</i> , 2020
SMASH	Conceptuel	Semi-distribué	3821	JAY-ALLEMAND <i>et al.</i> , 2020

TABLEAU 2 : Caractéristiques des modèles d'hydrologie de surface utilisés dans le projet **Explore2**.

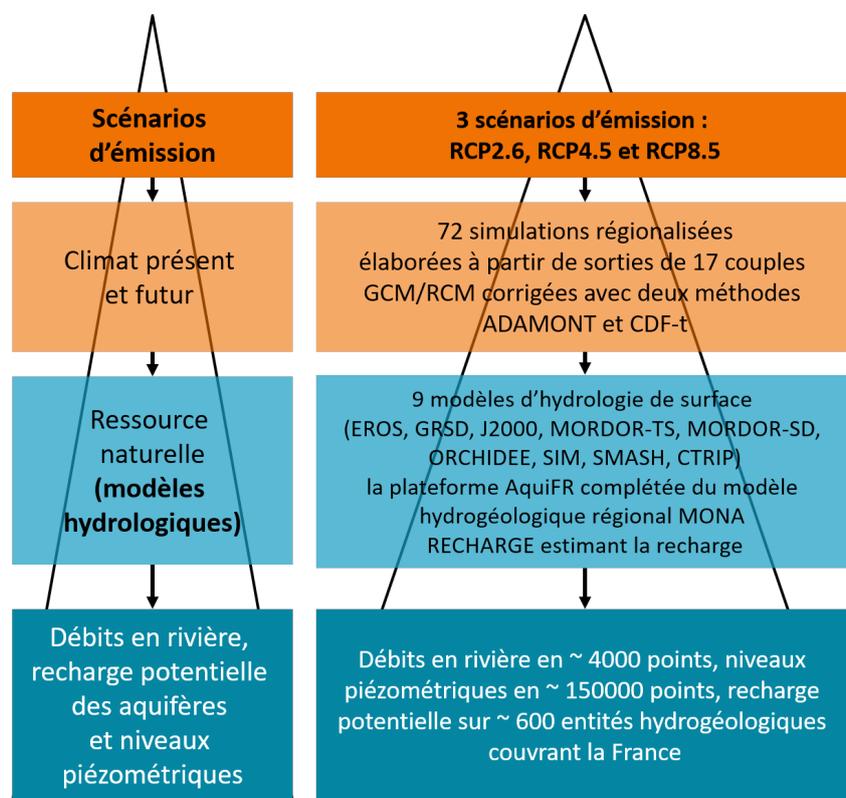


FIGURE 5 : Chaîne de modélisation retenue pour le projet **Explore2**.

4 Principes de l'analyse

Dans ce rapport, nous nous intéresserons aux simulations de la recharge potentielle des aquifères et des débits.

L'analyse sur la recharge repose sur les projections obtenues sur le découpage en masses d'eau souterraine (MESO). Dans les analyses qui suivent, sont exclues les 57 entités hydrogéologiques jugées non aquifères (plus de 50 % de la superficie référencée comme aquifère selon la BDLISA (BRUGERON *et al.*, 2018)). Les statistiques sont donc établies sur 564 masses d'eau souterraine, représentant 88 % de la superficie totale de la France hexagonale et de la Corse.

L'analyse réalisée sur les débits se concentre sur le sous-ensemble de 2500 points de simulation identifié précédemment (SAUQUET *et al.*, 2024a). Ces points sont ceux pour lesquels au moins quatre modèles hydrologiques de surface ont fourni des simulations de débits (Figure 6). Ainsi, nous intégrons les incertitudes portées par les modèles hydrologiques. Ces 2500 points permettent de couvrir le territoire, avec cependant une densité plus faible en Nouvelle-Aquitaine et dans les Hauts-de-France.

Aucune nouvelle simulation n'a été engagée pour répondre aux enjeux de la TRACC. La réponse hydrologique au réchauffement est examinée par extraction des variables (débit et recharge) sur les fenêtres temporelles définies par l'ensemble TRACC-2023 (Table 1).

Ici, nous examinons un ensemble de douze variables hydrologiques, obtenues par moyenne d'une variable Z échantillonnée annuellement. Elles sont descriptives des différentes phases du régime hydrologique (basses, moyennes et hautes eaux, recharge). Quelle que soit la variable analysée, chaque projection hydrologique issue d'une chaîne de modélisation est traitée indépendamment en chaque point de simulation des débits, ou entité hydrogéologique (pour la recharge) comme suit :

- Extraction des valeurs de Z pour chaque année, sur les fenêtres temporelles du Tableau 1 et sur la période de référence 1976-2005,
- Calcul des moyennes interannuelles de Z sur les fenêtres de 20 ans de la TRACC et de 30 ans sur la période de référence 1976-2005,
- Calcul des écarts relatifs entre moyennes interannuelles et de la médiane des écarts.

La convergence sur le signe du changement repose sur l'analyse des proportions des projections suggérant une hausse versus celles suggérant une baisse entre les deux fenêtres temporelles. Si une des deux proportions dépasse le seuil de 80 %, nous considérons que les projections s'accordent sur le signe. Ce diagnostic est opéré uniquement sur des ensembles aux effectifs supérieurs ou égaux à 17 (nombre de projections de TRACC-2023). Une analyse sur un effectif plus réduit n'est pas jugée robuste.

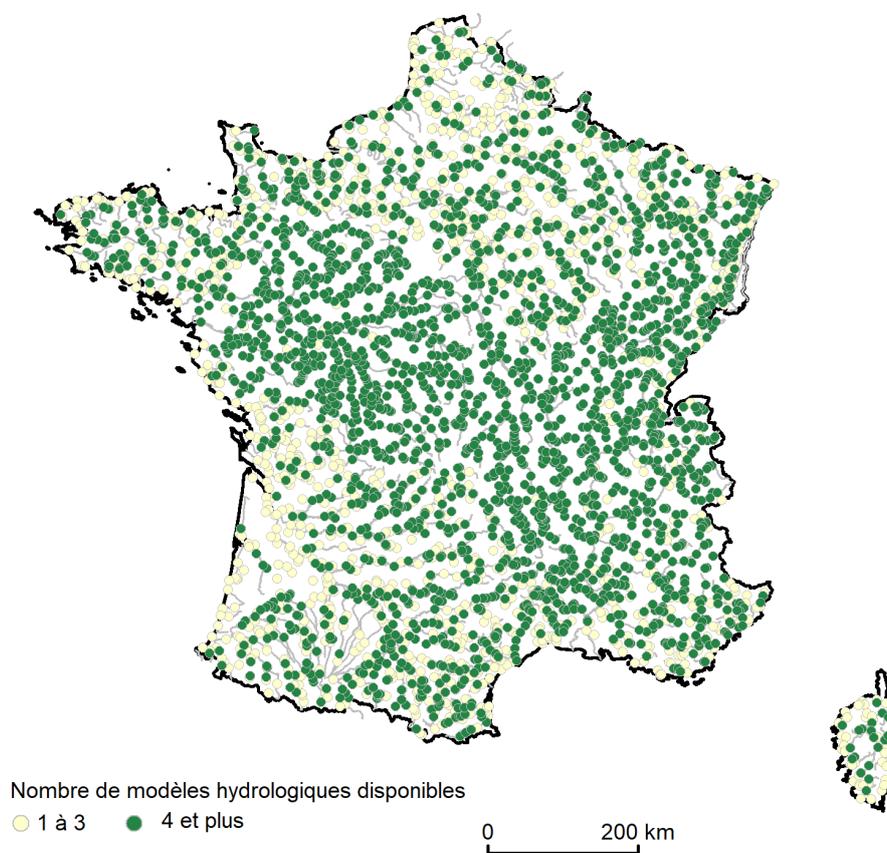


FIGURE 6 : Disponibilité des modèles hydrologiques sur l'ensemble des points de simulation.

5 Evolution de la recharge potentielle

Cette section quantifie les évolutions de la recharge potentielle des aquifères R aux échelles annuelle et saisonnières, c'est-à-dire les cumuls moyens R_{DJF} , R_{MAM} , R_{JJA} et R_{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 de la recharge annuelle R_A calculée du 1er janvier au 31 décembre.

Les changements suggérés pour la recharge ΔR sont fortement similaires à ceux identifiables sur les précipitations. Ainsi, la majorité des projections suggère une augmentation sur l'année et en hiver, et une baisse en été. A l'échelle globale, l'intensité et la dispersion des changements sont équivalentes (majoritairement entre 0 % et +20 % pour R_A quel que soit le niveau de réchauffement, avec une médiane d'ensemble comprise entre +7 % et +10 %).

Les statistiques portant sur la recharge potentielle annuelle ΔR_A (Tableaux 3, 4 et 5) occultent des disparités infra-annuelles et les contrastes inter-saisons sont corrélés au niveau de réchauffement (à l'échelle France, les valeurs médianes de R_{DJF} et R_{JJA} sont respectivement de +14 % et de -3 % pour une France à +2°C contre des valeurs médianes de R_{DJF} et R_{JJA} respectivement de +15 % et de -36 % pour une France à +4°C).

Les chiffres pour la France masquent des disparités régionales (Figure 7). Les cartes montrent un contraste nord-sud qui s'affirme avec l'intensité du réchauffement. Ainsi, le nord-est de la France voit la recharge annuelle R_A augmenter fortement (médiane d'ensemble pouvant dépasser +25 %) tandis que le sud-ouest voit cette recharge diminuer (médiane d'ensemble jusqu'à -15 % dans le coeur des Pyrénées et de l'ordre de -10 % dans le sud-est).

La hausse (Figure 8) fait consensus sur 38 % de la surface totale des MESO aquifères (hausse de R_A) pour une France à +4°C). Ces entités sont principalement localisées sur le quart nord-est du territoire. Le consensus à la baisse de la recharge annuelle concerne 6 % du territoire - Garonne amont, Adour et région Sud - à l'échelle annuelle pour une France à +4°C. Pour les deux autres niveaux de réchauffement, le consensus à la hausse est quasi généralisée (plus de 80 % des projections s'accordent sur une hausse de la recharge annuelle sur les deux tiers de la superficie totale des MESO aquifères pour le niveau de réchauffement modéré et sur la moitié de la superficie totale des MESO aquifères pour le niveau de réchauffement le plus faible).

Les résultats obtenus pour une France à +2.7°C et à +4°C sont à rapprocher des évolutions de la recharge projetées par horizon selon **Explore2** (LANINI *et al.*, 2024). Les cartes présentées ici font écho aux Figures 9 (page 26), et 11 (page 28) de ce précédent rapport.

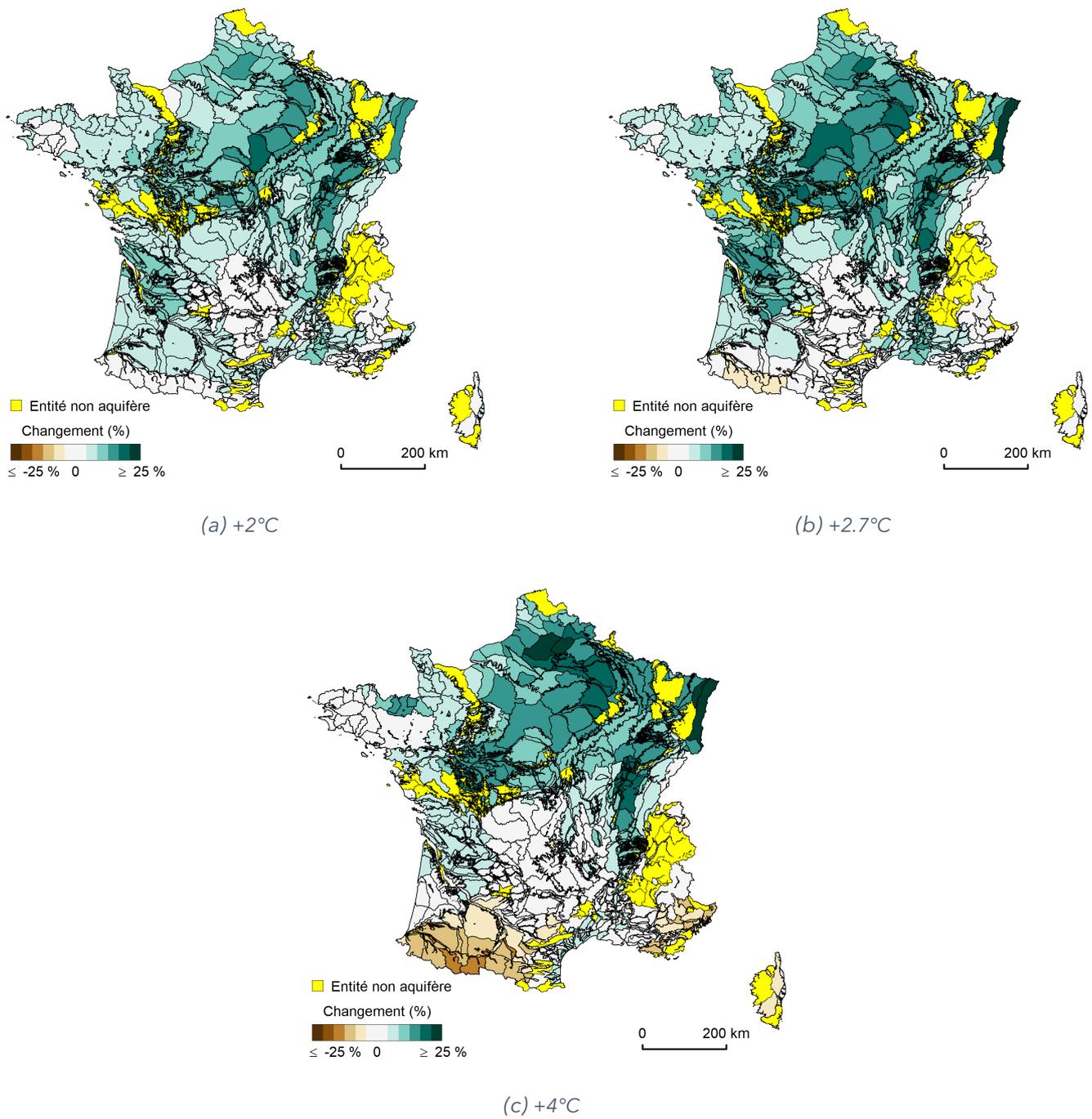


FIGURE 7 : Changement relatif médian de la recharge potentielle annuelle pour les différents niveaux de réchauffement.

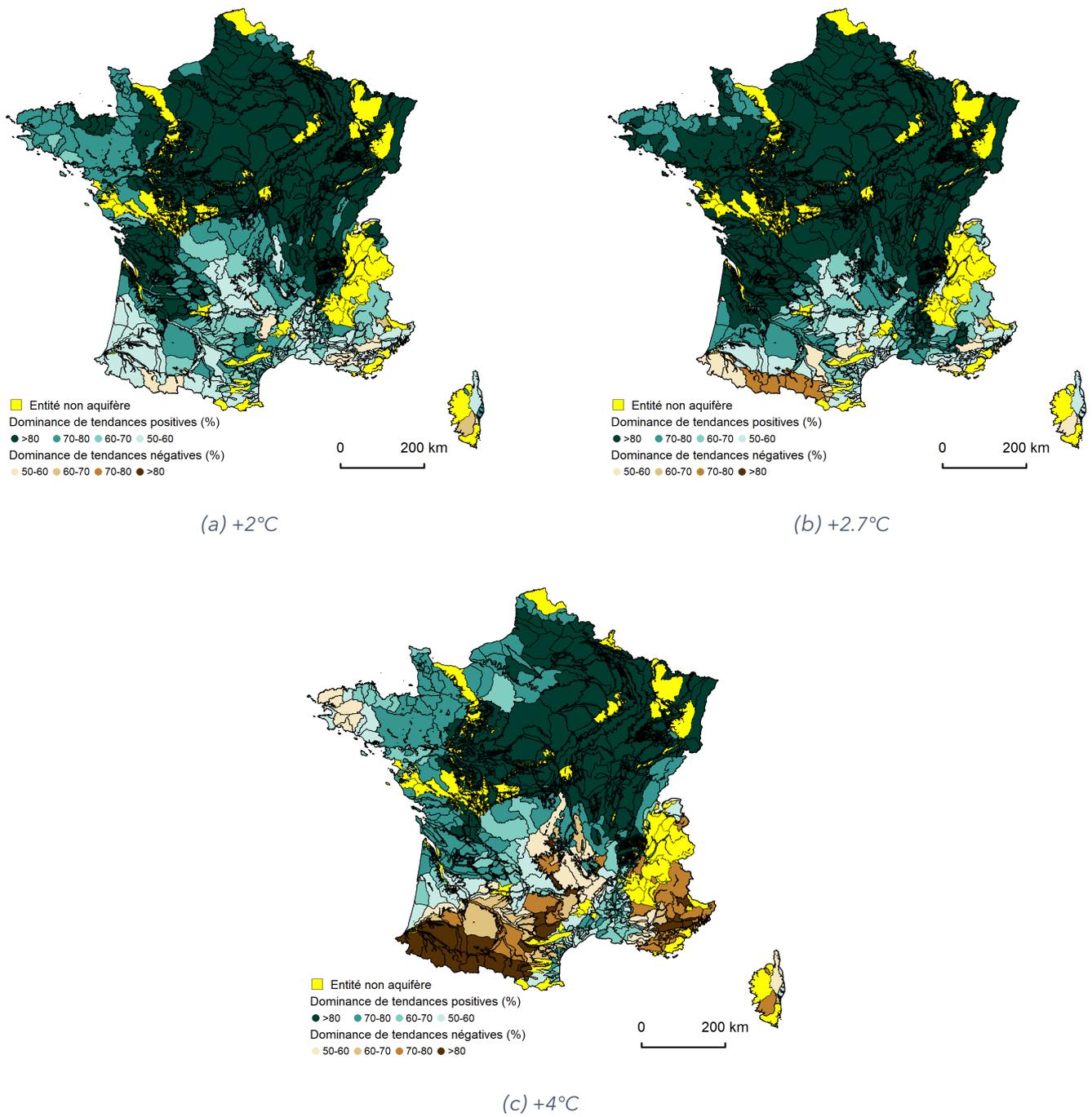


FIGURE 8 : Dominance du signe du changement de la recharge potentielle annuelle pour les différents niveaux de réchauffement.

GCM	RCM	ΔR_{DJF}	ΔR_{MAM}	ΔR_{JJA}	ΔR_{SON}	ΔR_A
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	12	-4	-.2	31	10
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	9	16	3	24	15
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	5	5	-18	-8	2
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	16	4	31	6	12
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	5	6	6	-5	5
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	31	18	6	9	22
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	28	18	-23	8	17
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	17	10	1	3	12
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	36	5	-5	-4	15
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	23	-14	-13	-27	0
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	20	-13	-32	-23	-1
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	17	8	11	-14	8
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	-8	10	0	-8	-2
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	14	11	29	4	11
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	6	-9	-22	-9	-2
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	11	7	2	-1	6
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	13	32	17	4	16

TABLEAU 3 : Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +2°C

GCM	RCM	ΔR_{DJF}	ΔR_{MAM}	ΔR_{JJA}	ΔR_{SON}	ΔR_A
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	15	0	-26	1	5
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	9	4	-21	-17	1
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	18	11	-14	5	14
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	23	13	28	9	19
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	20	0	-24	4	9
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	16	47	10	-3	19
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	17	20	-14	-15	8
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	21	18	-1	-21	10
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	15	28	1	-1	13
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	35	-1	-42	-31	8
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	38	-6	-46	-24	9
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	20	-1	16	-28	6
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	29	-1	3	-10	13
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	27	-1	29	0	14
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	6	-2	-13	-16	-3
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	10	5	-16	-16	1
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	26	43	37	32	31

TABLEAU 4 : Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +2.7°C

GCM	RCM	ΔR_{DJF}	ΔR_{MAM}	ΔR_{JJA}	ΔR_{SON}	ΔR_A
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	15	6	-29	3	8
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	7	6	-36	-29	-1
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	3	-1	-55	-13	-4
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	9	18	-38	2	8
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	9	12	-63	-3	2
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	17	25	22	-17	12
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	14	17	-37	-32	0
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	8	21	-14	-27	3
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	7	16	-4	-9	6
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	49	3	-31	2	23
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	45	7	-64	-5	21
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	30	25	-37	-29	16
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	32	22	-39	-13	18
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	29	13	-40	-19	11
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	11	-1	-37	-16	-1
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	8	-13	3	-20	-4
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	15	5	8	-3	9

TABLEAU 5 : Changements relatifs des recharges potentielles saisonnières et annuelle pour une France à +4°C

Les cartes des médianes par famille climatique illustrent la diversité des futurs possibles : la recharge annuelle R_A à l'échelle France est peu modifiée sous évolution sèche (médiane d'ensemble **S** nulle), elle croit de manière modérée sous évolution limitée (médiane d'ensemble **L** : +6 %) et fortement sous évolution contrastée (médiane d'ensemble **C** : +18 %). Si les intensités diffèrent, la structure spatiale semble en revanche assez similaire. Les projections, quelle que soit la famille, suggèrent, de manière plus ou moins prononcée, une diminution de la recharge annuelle R_A dans le Sud-Ouest, en Corse et dans la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, et inversement une augmentation dans le nord de la France. Sous évolution contrastée, les baisses atteignent et même dépassent -25 % dans le bassin de la Garonne. Les projections sous évolutions **C** et **S** se distinguent par une baisse sensible de la recharge estivale (médiane d'ensemble **C** et **S** à l'échelle France proche de -40 %). Les hausses de la recharge hivernale sont les plus marquées sous évolution contrastée (médiane d'ensemble **C** à l'échelle France : +32 %).

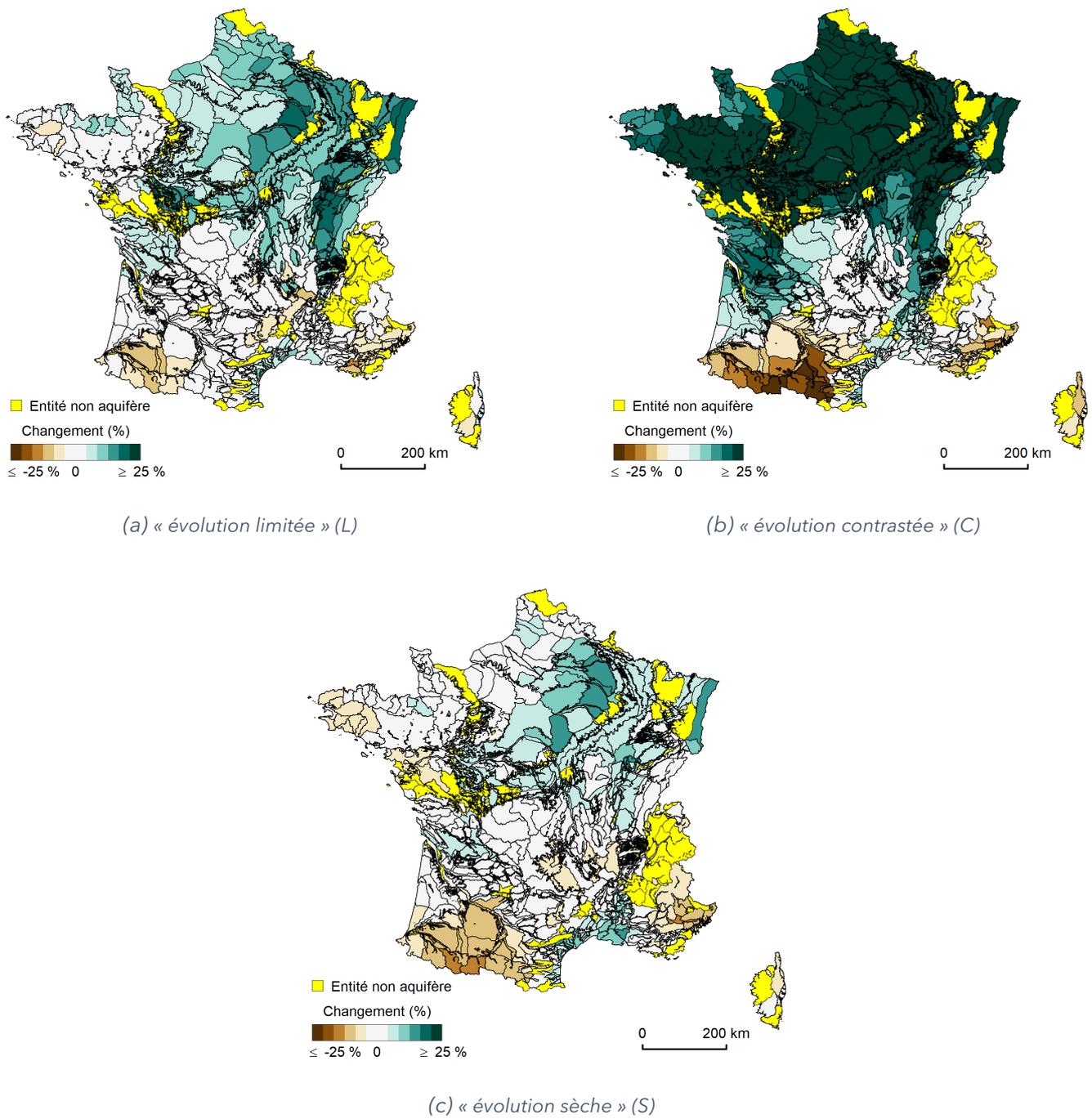


FIGURE 9 : Changement relatif médian de la recharge potentielle annuelle par famille pour une France à +4°C.

6 Evolution des débits annuels et saisonniers

Cette section quantifie les évolutions des débits Q saisonniers, c'est-à-dire les débit 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. Les résultats de cette section sont complétés par des supports cartographiques et des tableaux de synthèse dans l'Annexe 2 : L'hydrologie de surface selon la TRACC (page 59).

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 médiane des écarts positive), avec une dominance de projections à la baisse ($N50-$, sur la base d'une médiane des écarts 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 le GIEC (fort accord lorsque plus de 80% des projections s'accordent sur le signe du changement).

Niveau de réchauffement	Débit	N50+ (%)	N50- (%)	N80+ (%)	N80- (%)
France à +2°C	Q_{DJF}	98	2	56	0
	Q_{MAM}	82	17	18	0
	Q_{JJA}	43	55	0	5
	Q_{SON}	32	63	0	3
	Q_A	90	9	29	0
France à +2.7°C	Q_{DJF}	98	2	67	0
	Q_{MAM}	83	16	46	1
	Q_{JJA}	25	72	0	14
	Q_{SON}	4	95	0	19
	Q_A	84	15	35	1
France à +4°C	Q_{DJF}	81	19	34	4
	Q_{MAM}	77	22	22	5
	Q_{JJA}	2	98	0	45
	Q_{SON}	1	98	0	55
	Q_A	58	40	4	17

TABLEAU 6 : Statistiques sur les signes des changements projetés sur les débits annuels et saisonniers aux points de simulation, tous modèles confondus, par niveau de réchauffement.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

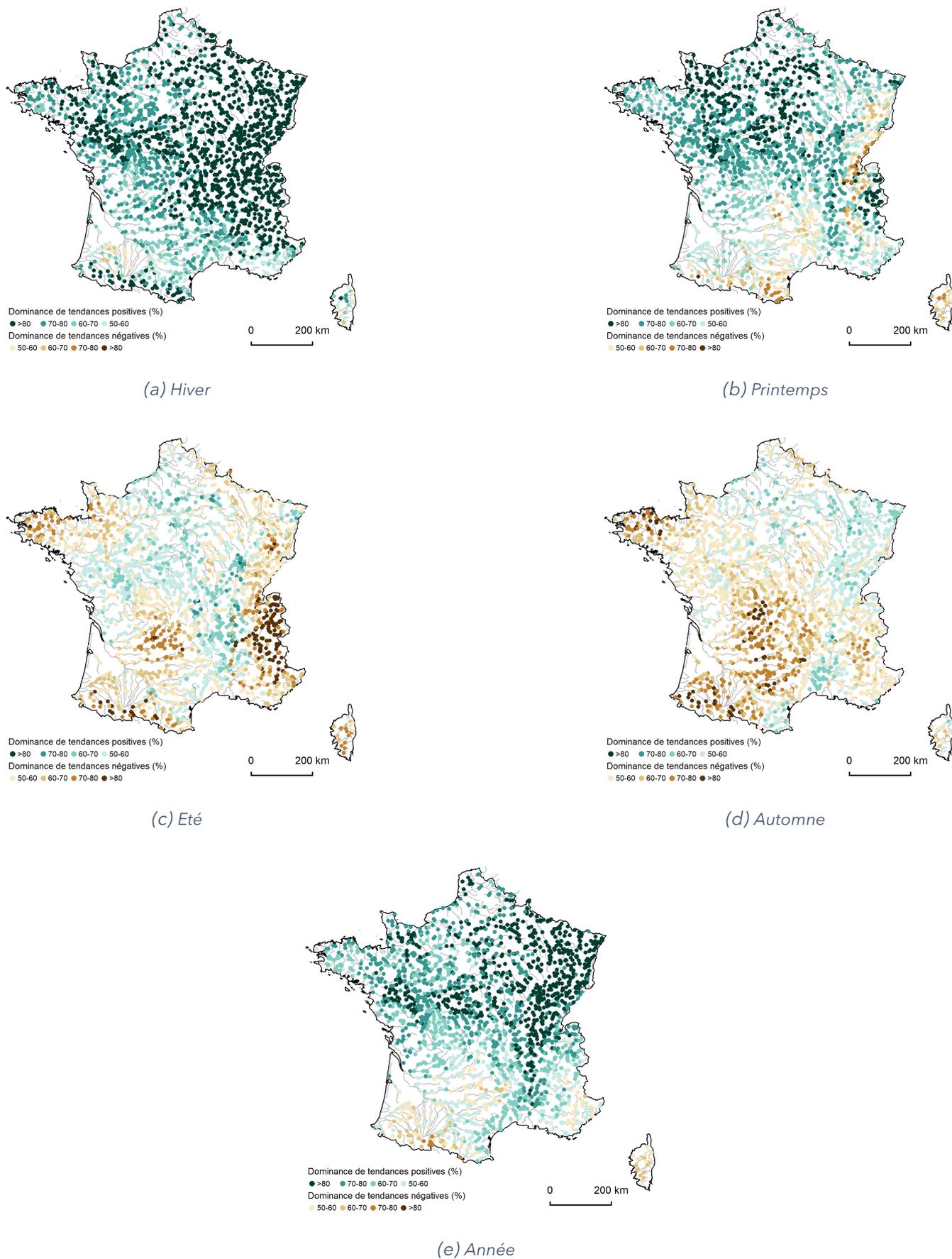


FIGURE 10 : Signe du changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

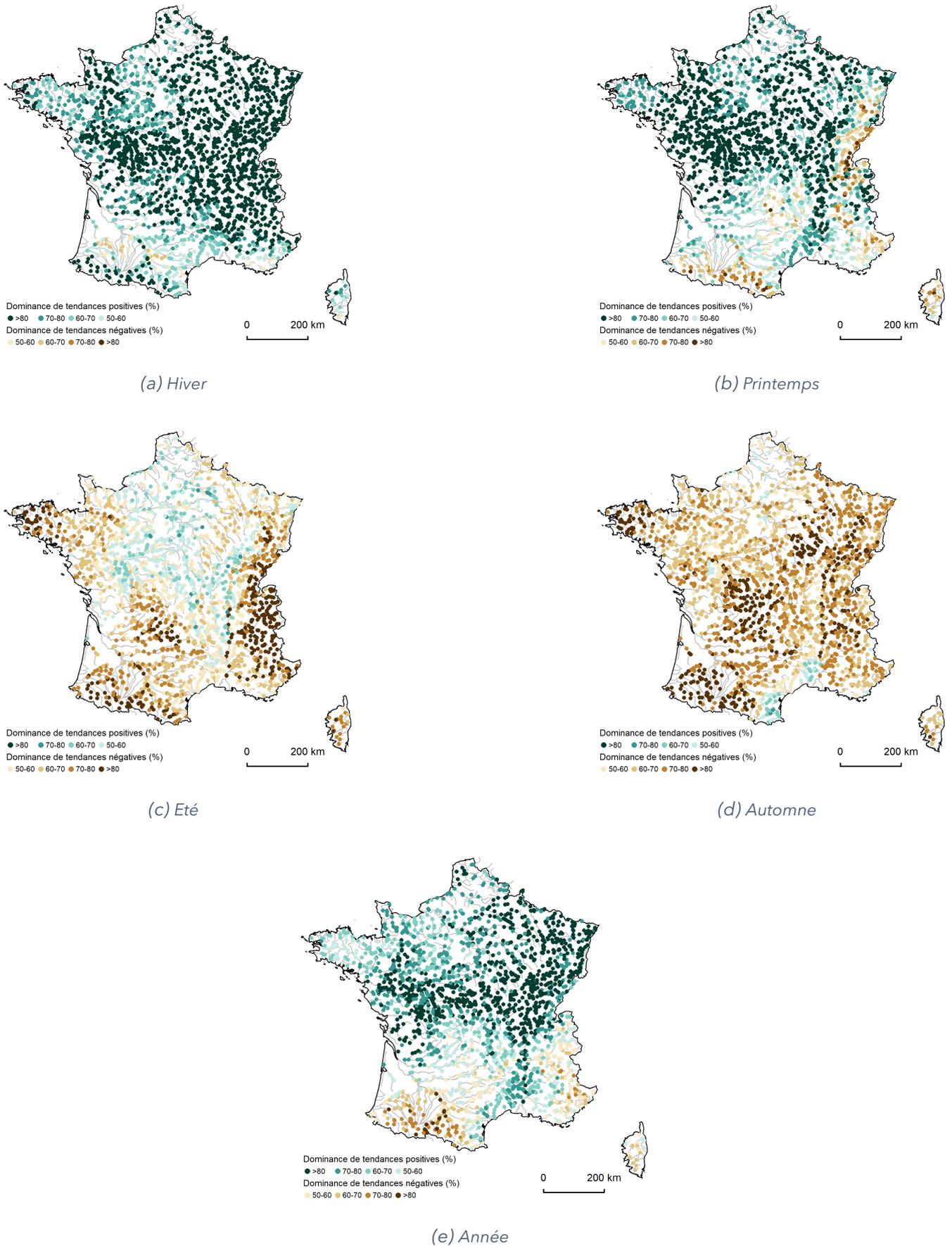


FIGURE 11 : Signe de changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2.7°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

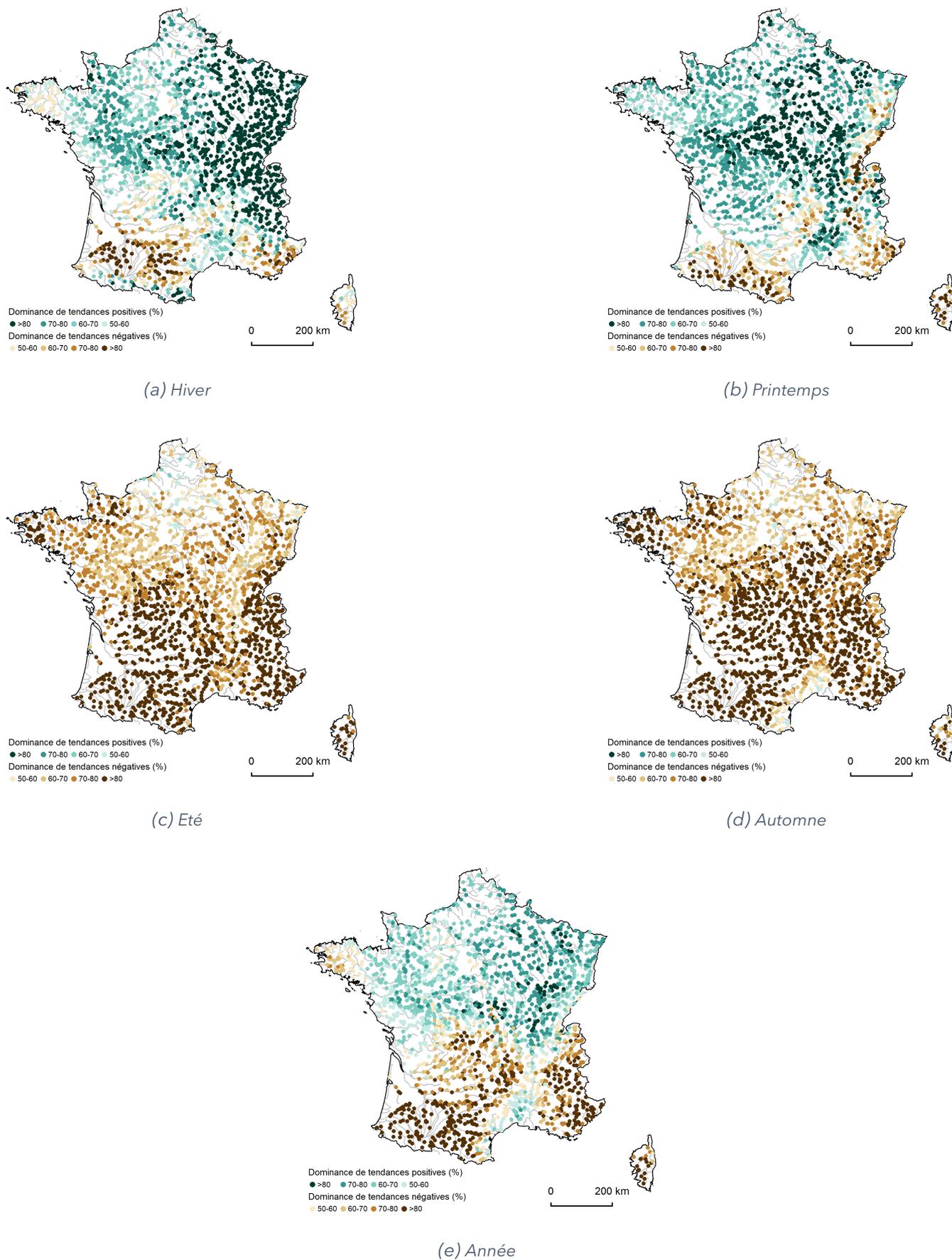


FIGURE 12 : Signe du changement dominant pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +4°C.

Le Tableau 6 décrit les changements de signe des débits saisonniers et annuels moyens à l'échelle de la France. Des spécificités régionales émergent sur le signe dominant des changements (Figures 10, à 12). Lorsque le changement de signe est majoritairement négatif dans les projections (resp. positif), le point est coloré en marron (resp. en vert). L'intensité de la couleur croît avec l'affirmation du signe. Les points avec une dominance supérieures 80 % contribuent au calcul de (N_{80+}) et (N_{80-}) et donc à l'évaluation de la robustesse des changements.

Sur la base des proportions N_{50-} et N_{50+} , deux tendances différentes apparaissent quel que soit le niveau de réchauffement : une hausse des débits est suggérée en hiver et au printemps ($N_{50+} > 50\%$) sur une majorité de points, tandis qu'une baisse des débits est suggérée en été et en automne ($N_{50-} > 50\%$) sur une majorité de points.

Pour une France à $+2^{\circ}\text{C}$ (Figure 10), un signal de convergence est perceptible uniquement sur les débits moyens d'hiver ($N_{80+} > 50\%$) sur les deux tiers nord-est et dans les Pyrénées (sous l'effet de la diminution de la fraction neigeuse, les étiages hivernaux sont moins sévères). Il y a un accord sur une baisse de débits dans les massifs alpin et pyrénéen en été (sous l'effet de l'élévation des températures, la fonte des neiges est plus précoce et les débits en début d'été naturellement moins soutenus). Les valeurs des changements médians par rapport à la période de référence sont de l'ordre de $+15\%$, de $+7\%$, de -1% et de -2% , respectivement, pour les débits moyens d'hiver, de printemps, d'été et d'automne.

Pour une France à $+2.7^{\circ}\text{C}$ (Figure 11), le signal de convergence concerne les débits moyens d'hiver sur les deux tiers nord-est et dans les Pyrénées et les débits de printemps, principalement sur le bassin de la Loire et les Alpes. Les projections hydrologiques s'accordent sur une baisse de débits dans les massifs alpin et pyrénéen en été. L'accord à la baisse des débits en automne apparait de manière isolé en Bretagne, dans le Massif central et dans le bassin de la Garonne. Les valeurs des changements médians sont de l'ordre de $+19\%$, de $+7\%$, de -5% et de -12% , respectivement, pour les débits moyens d'hiver, de printemps, d'été et d'automne.

Pour une France à $+4^{\circ}\text{C}$ (Figure 12), le signal de convergence sur une hausse des débits moyens d'hiver concerne principalement le quart nord-est de la France, les Pyrénées et les Alpes. 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. Pour les débits de printemps, la zone de convergence concerne le bassin de la Loire et la partie amont du bassin de la Seine. Pour ces deux saisons, cette zone de convergence des résultats se réduit comparativement aux précédents niveaux de réchauffement sans pour autant qu'un signal inverse émerge. Le consensus sur une baisse de débits est présent dans la partie sud et à l'extrémité ouest de la Bretagne en été et en automne. Les valeurs des changements médians sont de l'ordre de $+11\%$, de $+10\%$, de -20% et de -20% , respectivement, pour les débits moyens d'hiver, de printemps, d'été et d'automne.

Si les débits annuels sont majoritairement à la hausse sur le territoire pour une France à $+2^{\circ}\text{C}$ ou à $+2.7^{\circ}\text{C}$, la proportion entre baisse et hausse tend à s'équilibrer pour le niveau de réchauffement le plus fort. Le contraste nord-sud est proportionnel au niveau de réchauffement. Les évolutions pour Q_A 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, d'où des structures spatiales assez similaires entre évolutions en hiver et printemps et celles projetées sur l'année. Les valeurs des changements médians sont de l'ordre de $+8\%$, de $+3\%$ et de $+3\%$, respectivement, pour les niveaux de réchauffement $+2^{\circ}\text{C}$, $+2.7^{\circ}\text{C}$ et $+4^{\circ}\text{C}$.

Les cartes des Figures 13 à 15 décrivent les changements médians, toutes projections confondues. La structure spatiale de ces changements est semblable à celle du signe dominant. 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 ; elles sont partagées par les modèles hydrologiques et se traduisent par une convergence sur le signe du changement en hiver, printemps et en été. En automne, comme ailleurs en France hexagonale, c'est l'effet conjugué de plusieurs facteurs hydro-climatiques (baisse des précipitations en automne, hausse de l'évapotranspiration, sécheresse des sols en été...) qui en est à l'origine. Les changements projetés en été ΔQ_{JJA} et en automne ΔQ_{SON} témoignent d'une diminution robuste des débits moyens et donc d'un allongement des périodes d'étiage pour une France à $+4^{\circ}\text{C}$. L'intensité moyenne et

la dispersion des changements en été et en automne à l'échelle de la France est corrélée au niveau de réchauffement (changements médians et dispersion plus forte).

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

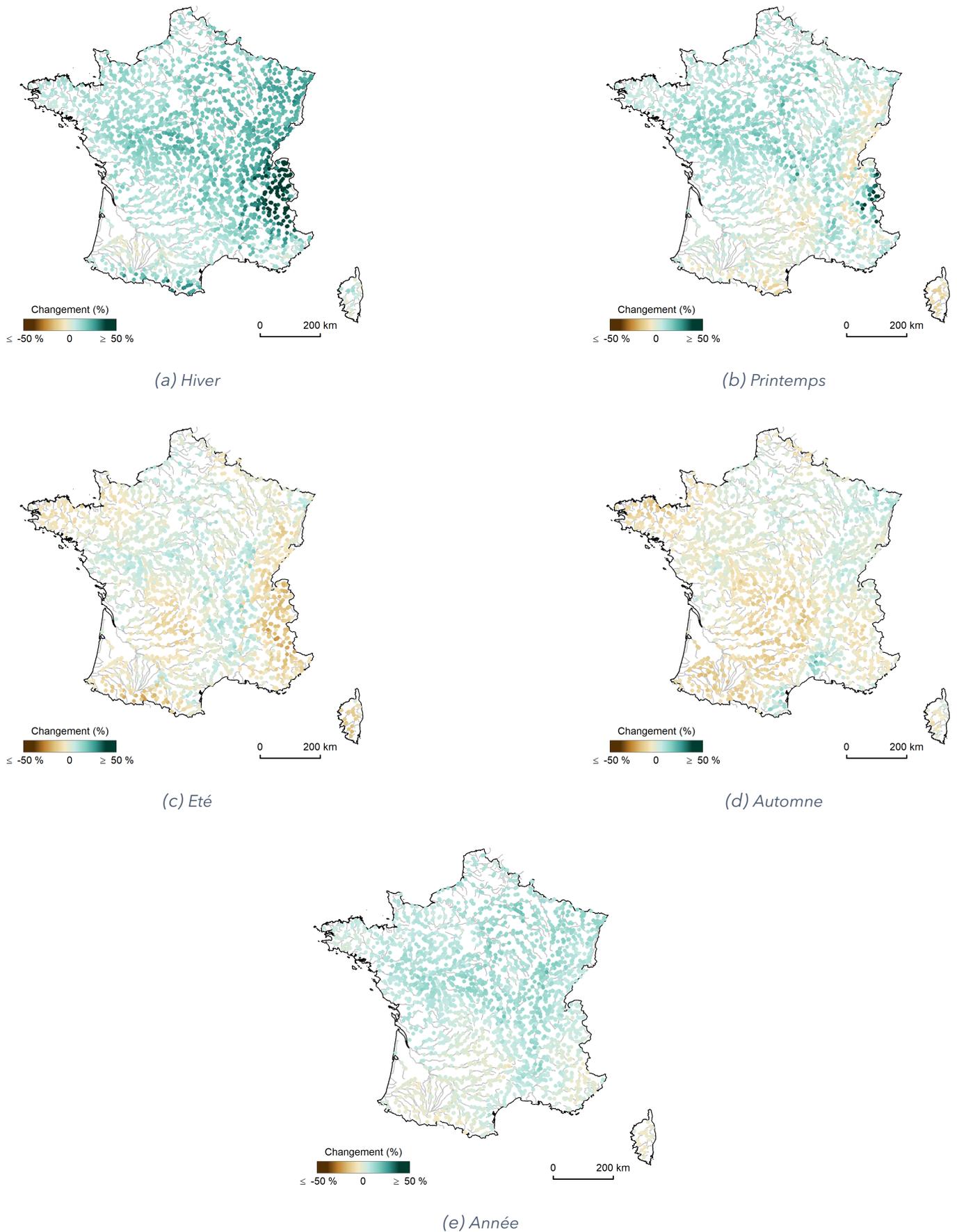


FIGURE 13 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

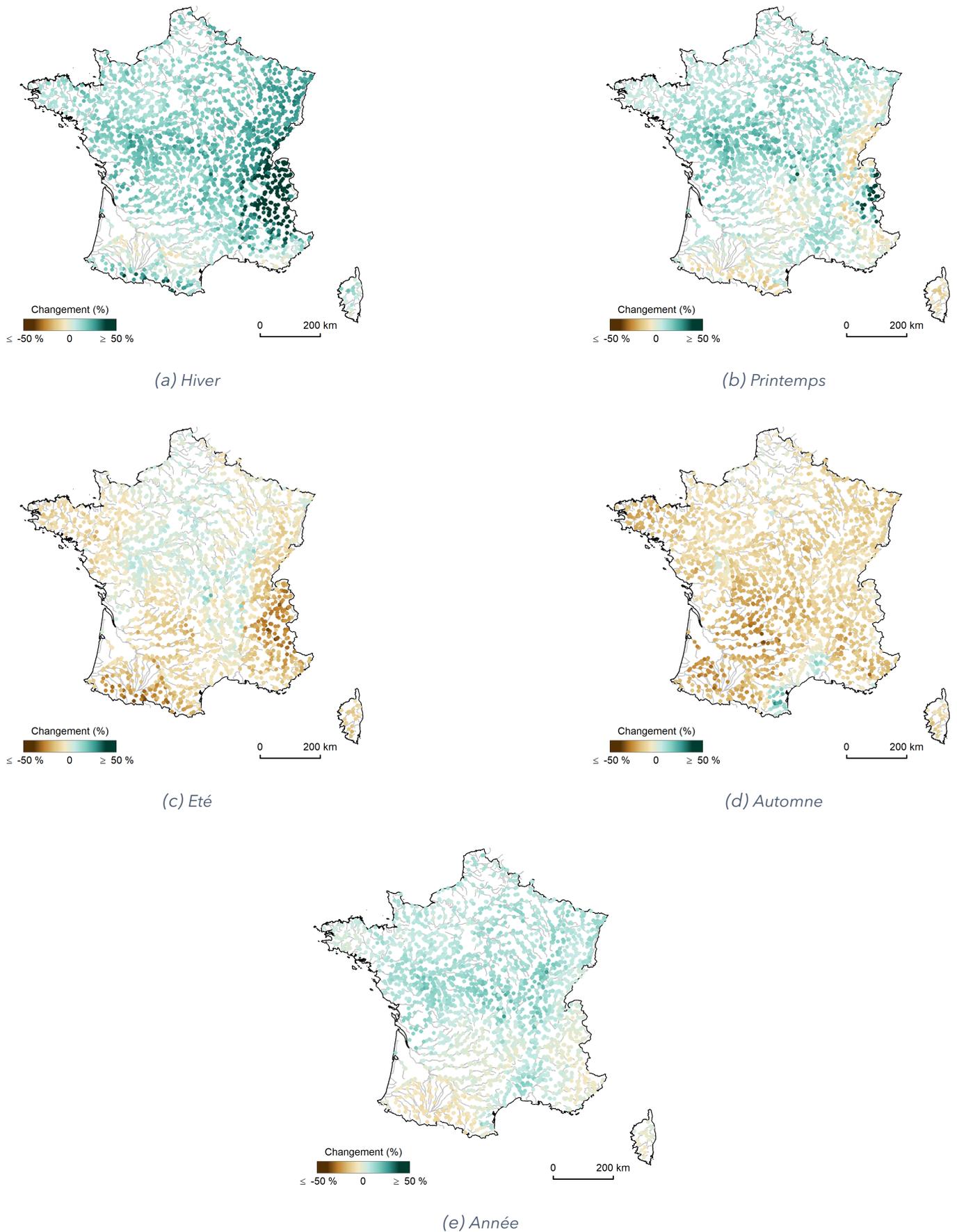


FIGURE 14 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +2.7°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

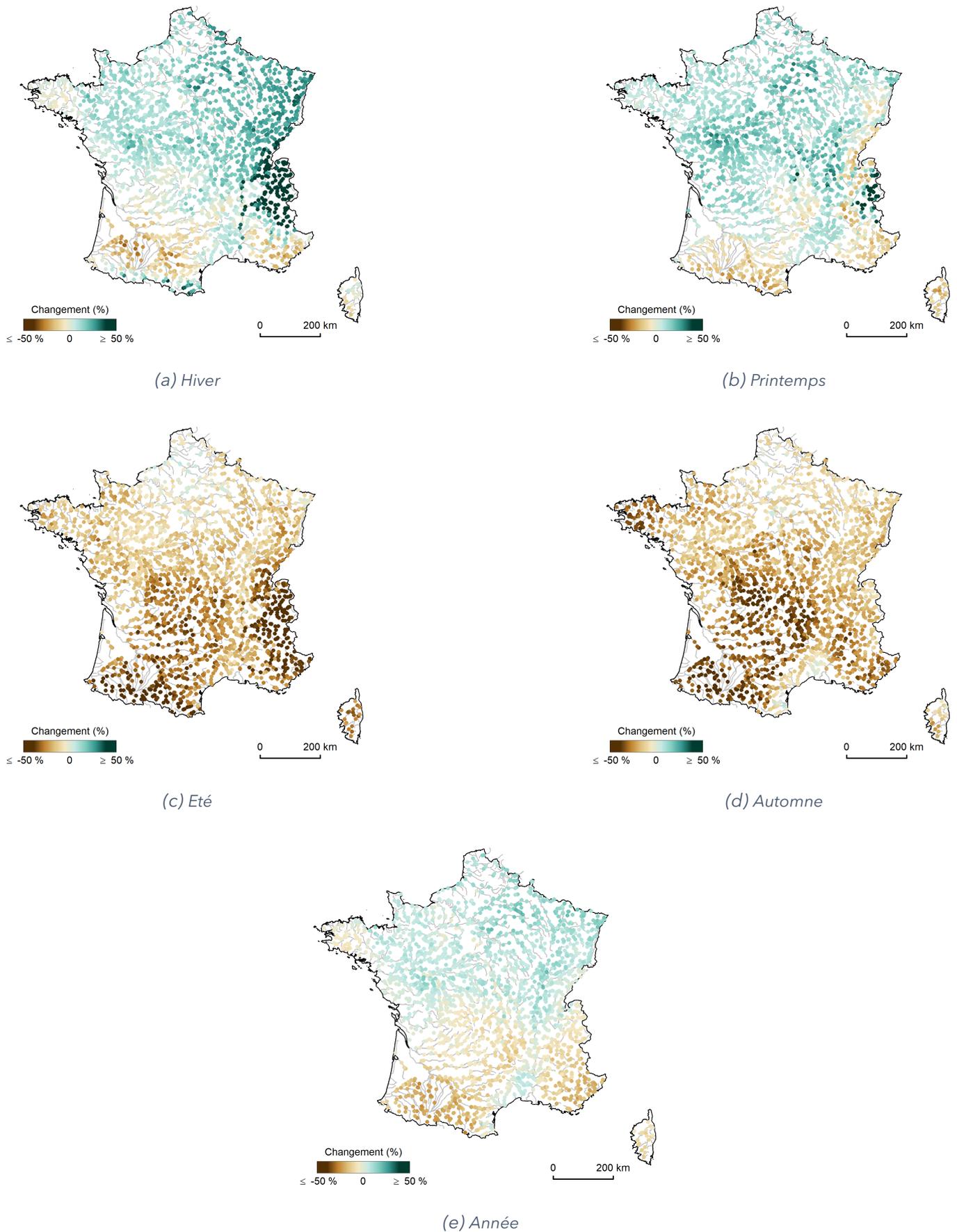


FIGURE 15 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens pour une France à +4°C.

Les résultats obtenus pour une France à +4°C sont à rapprocher des évolutions des débits annuels et saisonniers projetées en fin de siècle selon **Explore2** (SAUQUET *et al.*, 2024a, EVIN *et al.*, 2024). Les cartes présentées ici font écho aux Figures 27 (page 48), et 29 (page 34) de SAUQUET *et al.* (2024), et à la Figure 23A (page 57) de EVIN *et al.* (2024).

Comme précédemment, les résultats des différents modèles hydrologiques ont été examinés conditionnellement aux trois familles d'évolution climatique, afin d'illustrer la pluralité des futurs hydrologiques (Figures 16 à 18). Les cartes ont en commun le signe du changement en secteurs de relief et la partie sud du territoire (plaine de la Garonne et littoral méditerranéen de la région Sud). Quel que soit le caractère de l'évolution du climat (*limitée*, *contrastée* ou *sèche*) au niveau de réchauffement +4°C, la hausse des débits hivernaux et printaniers et la baisse des débits estivaux et automnaux semblent consensuelles en montagne et les baisses sont généralisées dans les secteurs sud. Notons que l'analyse des signes du changement des débits est autorisée car l'effectif par type d'évolution est supérieur à 4 X 5 (4 correspondant au nombre minimal de modèles disponibles en chacun des 2500 points de simulation et 5 l'effectif des deux familles les plus petites (*contrastée* et *sèche*)).

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

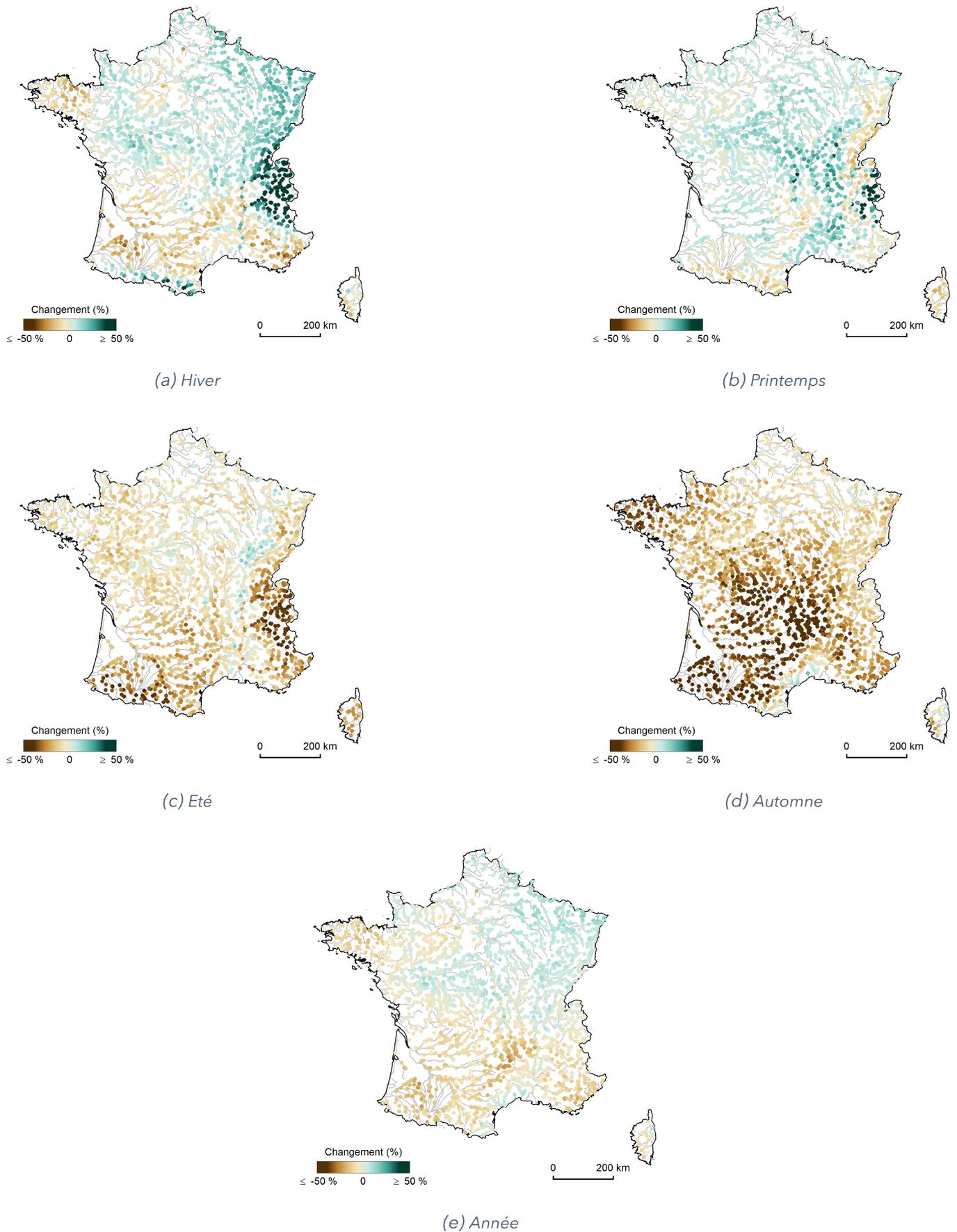


FIGURE 16 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution limitée pour une France à +4°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

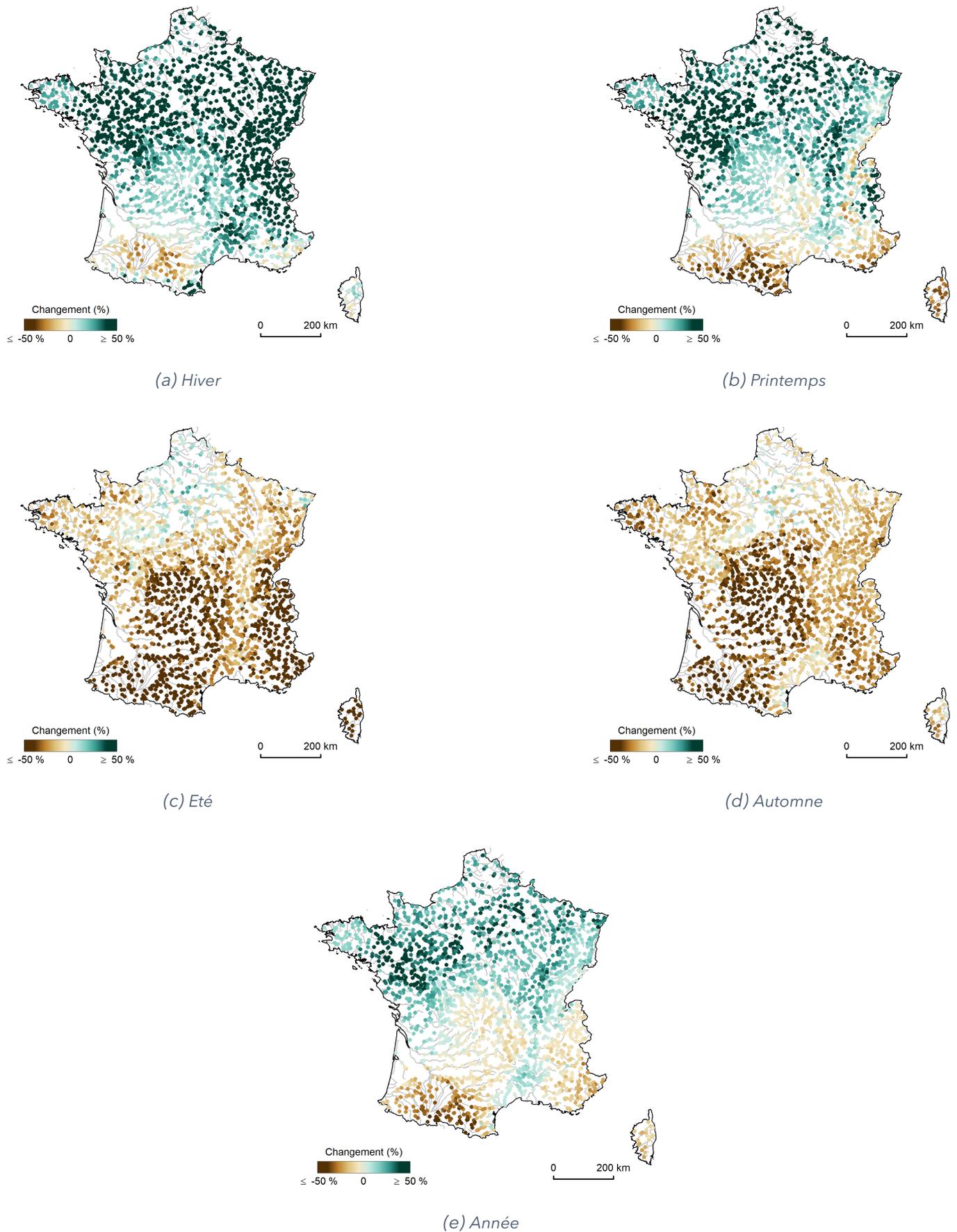


FIGURE 17 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution contrastée pour une France à +4°C.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

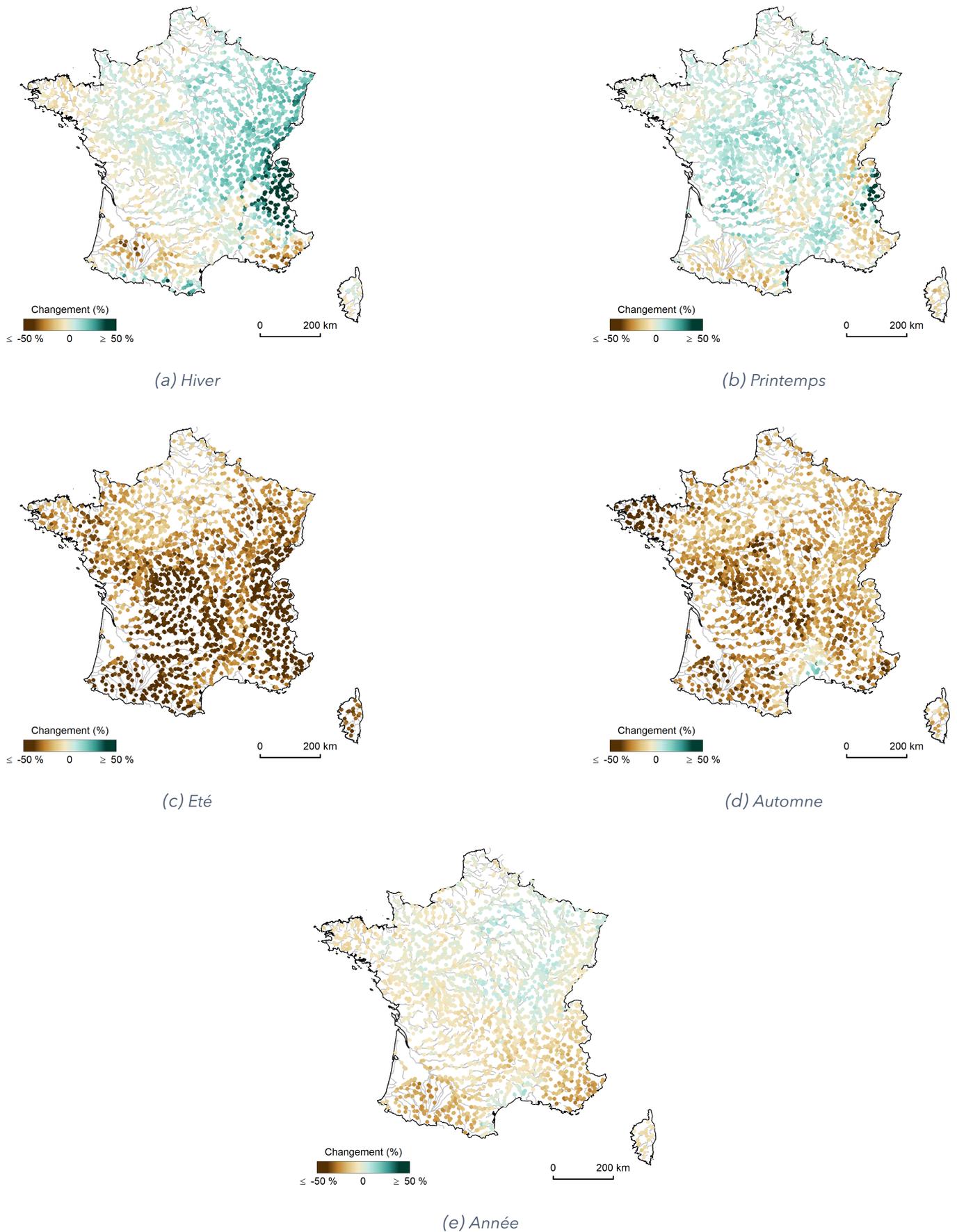


FIGURE 18 : Changement médian pour les débits saisonniers et annuels moyens sous évolution sèche pour une France à +4°C.

7 Evolution des extrêmes hydrologiques

Cette section cherche à quantifier les évolutions d'une caractéristique de crue : la moyenne inter-annuelle des $QJXA$ (débit journalier maximal annuel sur l'année hydrologique), et d'une caractéristique d'étiage : la moyenne inter-annuelle des $VCN10$ (minimum de la moyenne sur 10 jours du débit journalier sur la période 01/05 au 30/11).

Comme précédemment, le diagnostic du signe des changements repose sur la proportion de points de simulation avec une dominance de projections à la hausse ($N50+$, $N80+$), avec une dominance de projections à la baisse ($N50-$, $N80-$).

Niveau de réchauffement	Débit	N50+ (%)	N50- (%)	N80+ (%)	N80- (%)
France à +2°C	$VCN10$	8	91	0	24
	$QJXA$	99	1	45	0
France à +2.7°C	$VCN10$	2	98	0	56
	$QJXA$	97	2	50	0
France à +4°C	$VCN10$	0	99	0	80
	$QJXA$	89	10	46	0

TABLEAU 7 : Statistiques sur les signes des changements projetés sur les débits extrêmes aux points de simulation, tous modèles confondus, par niveau de réchauffement.

Les cartes associées au $VCN10$ (Figures 19 et 20) rappellent celles sur les débits estivaux mais cependant avec des intensités des changements plus prononcées que ceux projetés sur les débits moyens d'été (Figures 13-c, 14-c et 15-c). Globalement, la sévérité augmente avec le niveau de réchauffement. Pour le niveau de réchauffement le plus faible, les baisses sont contenues (majoritairement inférieures à 20 %) et le signe du changement est incertain. Elles se situent autour de -16 % pour une France à +3°C et de -31 % pour une France à +4°C et les projections convergent fortement vers une baisse de ce débit d'étiage sur quasi l'ensemble du territoire pour une France à +4°C (Tableau 7, cf. $N80-$), exceptions faites du Bassin parisien et du Nord de la France.

Les structures spatiales révélées par cartes associées au $QJXA$ sont assez semblables, mais là encore avec des intensités des changements plus prononcées pour le niveau de réchauffement le plus fort (Figures 22 et 23). Quel que soit le niveau de réchauffement, le consensus à la hausse concerne les deux tiers nord. Le consensus touche environ 50 % des points de simulation quel que soit le niveau de réchauffement (Tableau 7, cf. $N80+$). Des dominances (faibles) à la baisse apparaissent dans le sud de la France. Cette structure fait écho à la Figure 19 de SOUBEYROUX *et al.* (2024) qui présente l'évolution des pluies maximales quotidiennes annuelles selon les niveaux de réchauffement avec une incertitude sur le signe du changement présent sur la moitié sud du pays pour les différents niveaux de réchauffement. Les précipitations extrêmes étant un des facteurs de contrôle des crues, leurs évolutions gouvernent en partie (et dans le même sens) les crues. Les changements varient autour d'une médiane de 13 % pour une France à +2°C, de +15 % pour une France à +2.7°C et de +17 % pour une France à +4°C (à comparer aux médianes de changement portant sur les moyennes des pluies journalières maximales annuelles de +9 %, +11 % et +15 % pour les niveaux de réchauffement croissant). Il faut souligner, comme cela a été écrit précédemment dans SAUQUET *et al.* (2024), des incertitudes assez importantes sur la simulation des pluies extrêmes et, de ce fait, la confiance est faible dans l'évolution des caractéristiques de crue, en l'état des capacités de modéliser le climat.

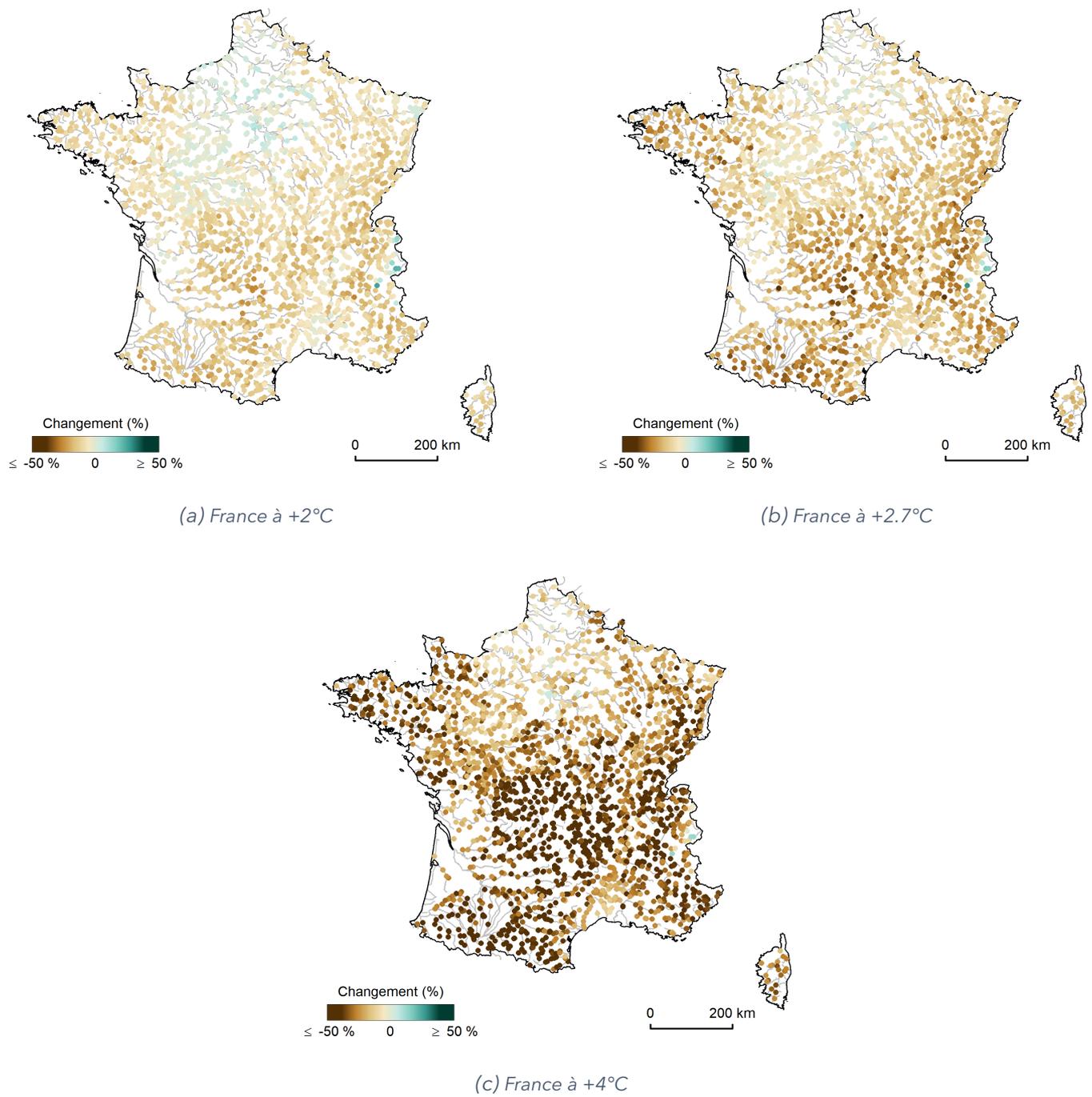


FIGURE 19 : Changement relatif médian du VCN10 pour les différents niveaux de réchauffement.

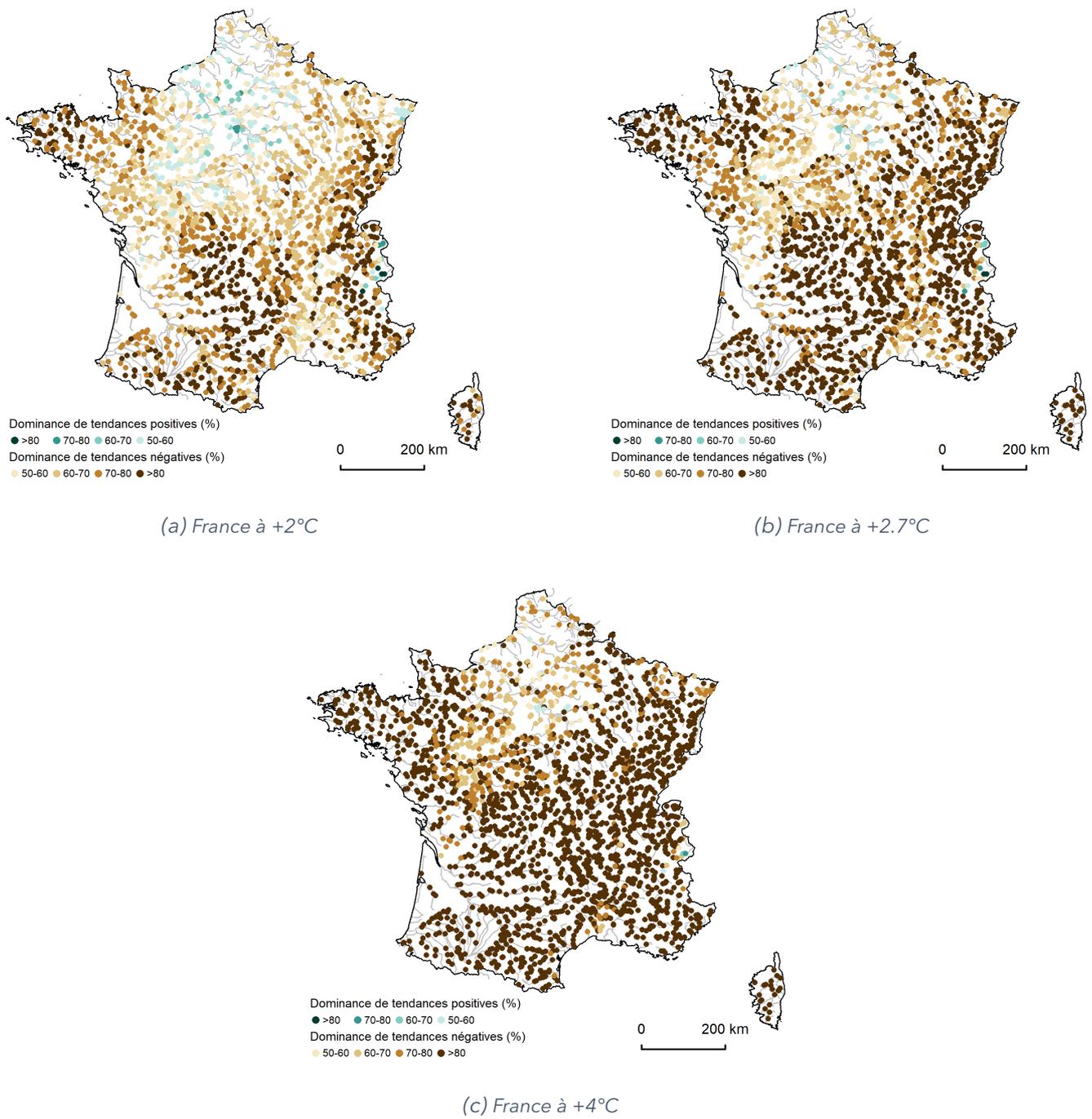


FIGURE 20 : Dominance du signe du changement du VCN10 pour les différents niveaux de réchauffement.

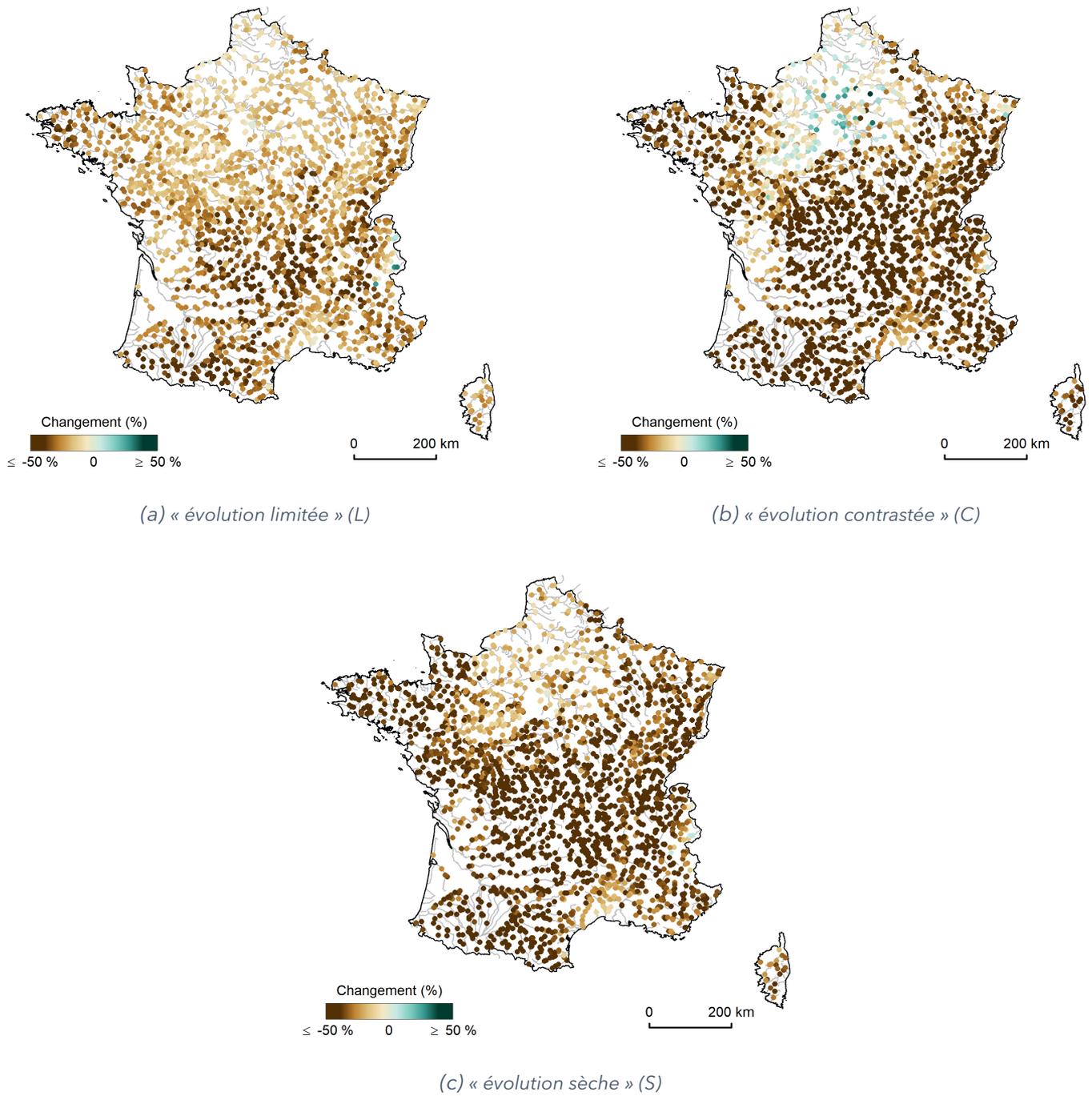


FIGURE 21 : Changement relatif médian du VCN10 par famille pour une France à +4°C.

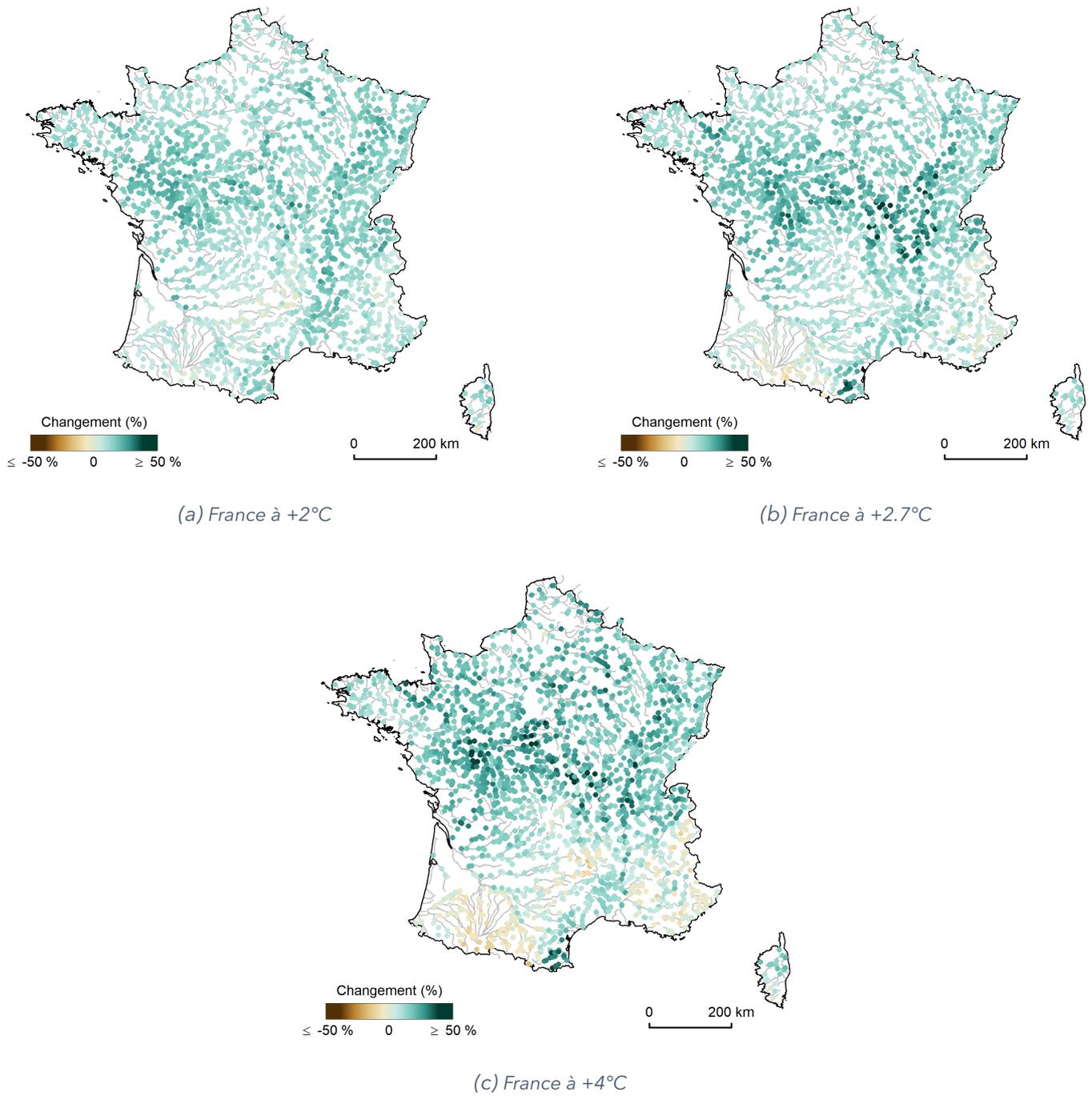


FIGURE 22 : Changement relatif médian du QJXA pour les différents niveaux de réchauffement.

Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement

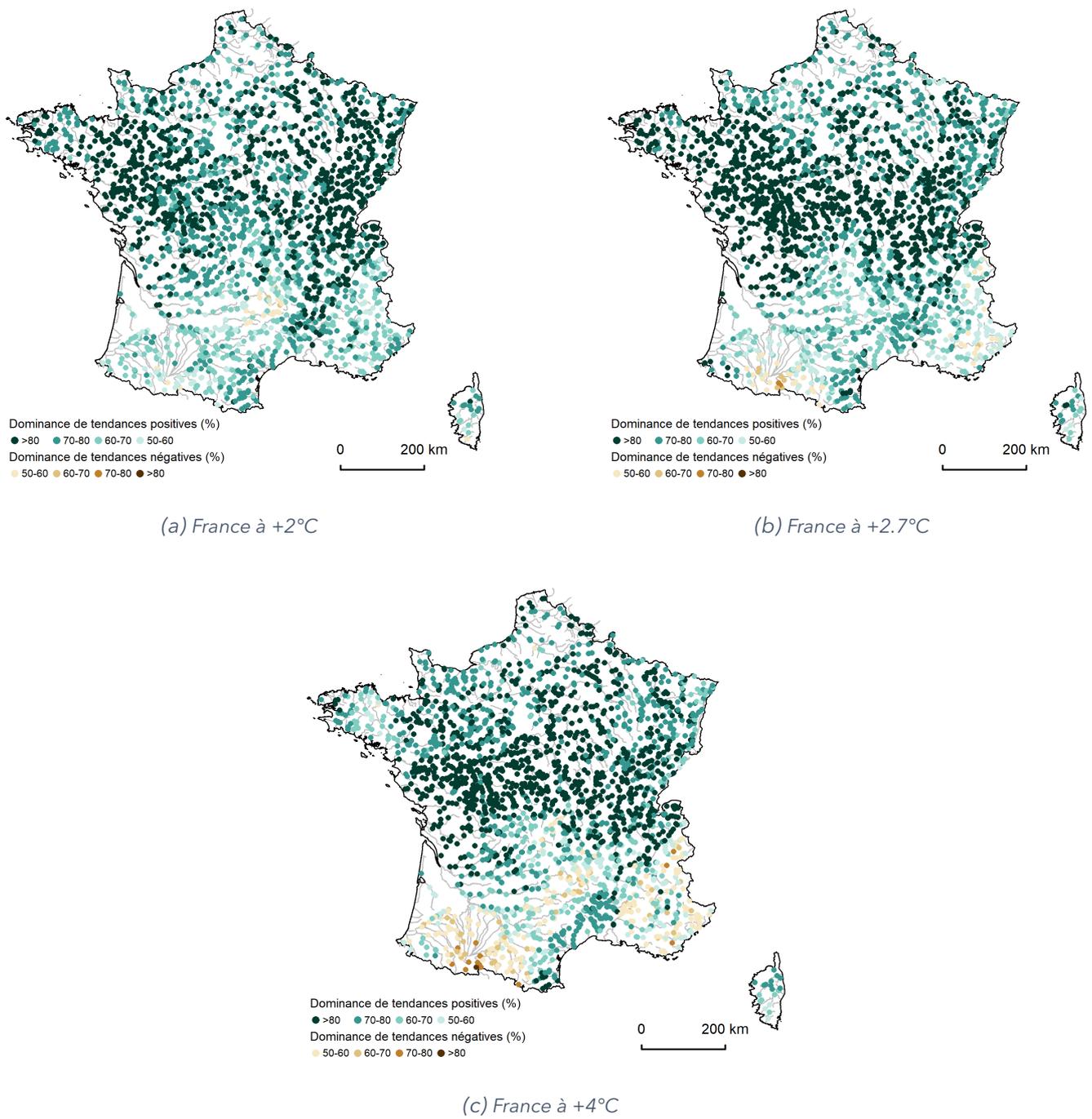


FIGURE 23 : Dominance du signe du changement du QJXA pour les différents niveaux de réchauffement.

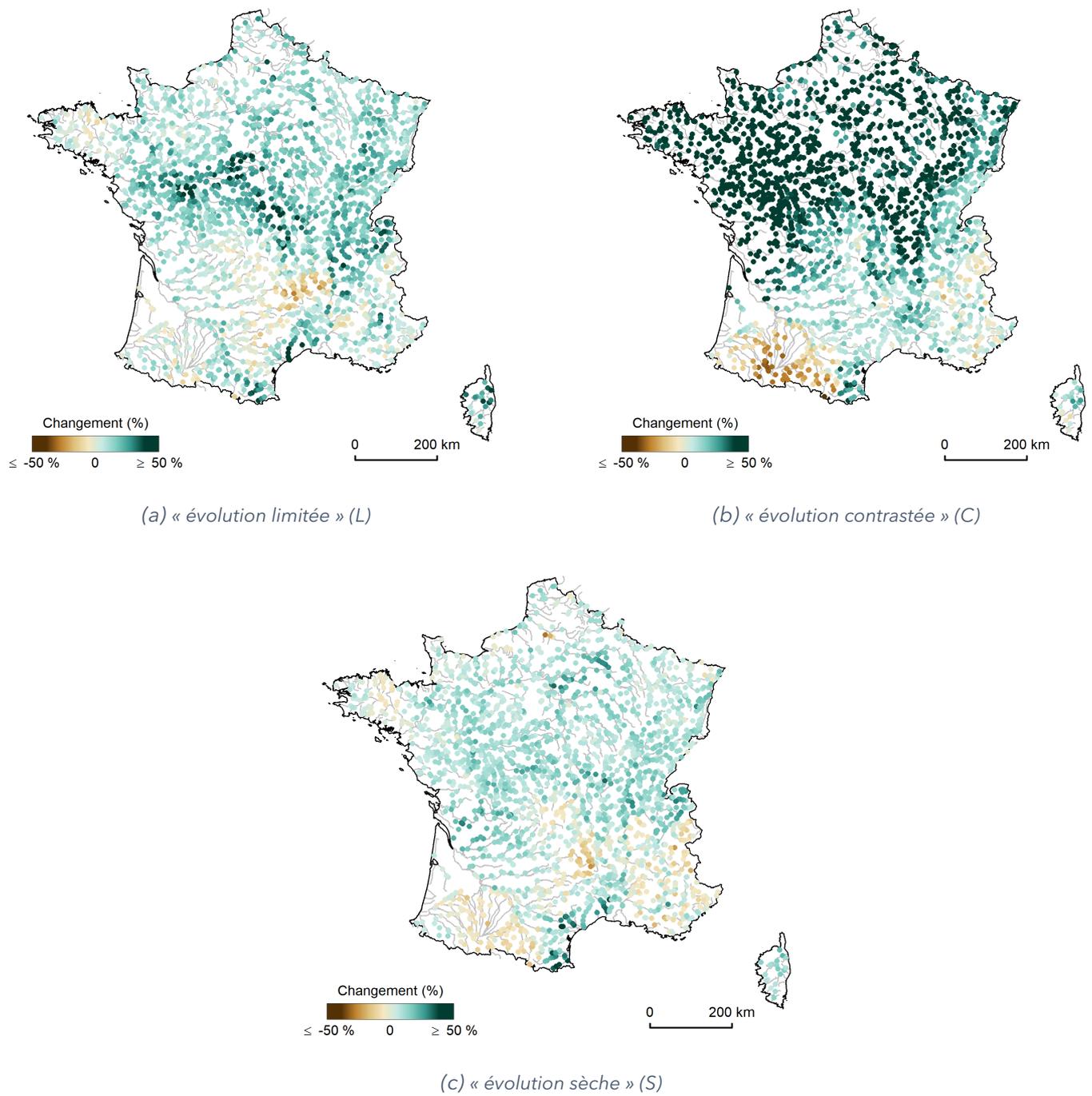


FIGURE 24 : Changement relatif médian du QJXA par famille pour une France à +4°C.

8 Conclusion

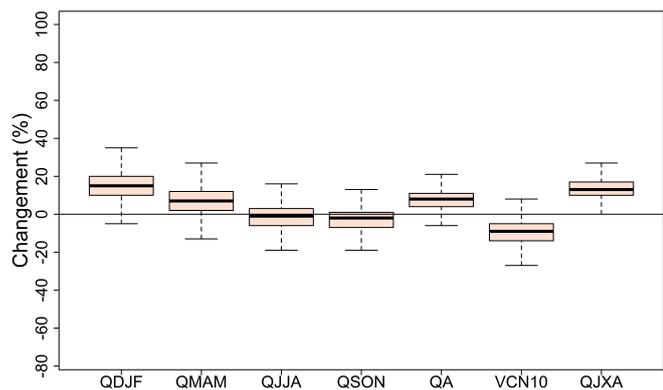
Sans réelle surprise, compte tenu des recouvrements entre fenêtres temporelles associées aux niveaux de réchauffement et horizons proche, moyen et lointain des précédentes analyses du projet **Explore2**, les conclusions obtenues ici sont cohérentes avec les tendances de long terme suggérées par les analyses aux différents horizons et avec les principaux messages du projet **Explore2** (SAUQUET *et al.*, 2024b).

L'intensité et le signe des changements sont territorialisés pour un niveau de réchauffement donné. Les boîtes à moustache (Figures 25 et 26) résument et montrent la distribution (i.e. la dispersion) des changements médians et de la proportion des projections suggérant une baisse de la variable (interprétable en consensus à la baisse quand cette proportion dépasse 80 % ou à la hausse quand cette proportion est inférieure à 20 %) sur les 2500 points de simulation.

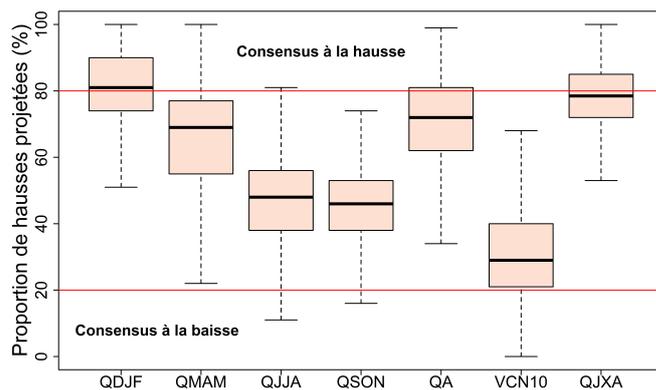
L'intensité et le signe des changements sont globalement corrélés au niveau de réchauffement (Figures 25). Cependant la dispersion sur l'intensité et le signe des changements reste importante, qu'une seule moyenne ou médiane ne peut décrire.

Pour une France à +4°C, les analyses par type d'évolution (limitée, contrastée et sèche) permettent d'isoler des ensembles statistiquement bien différents et d'illustrer les incertitudes pour ce niveau de réchauffement le plus élevé (Figure 26). Sans grande surprise, les changements les plus modérés sont projetés sous évolution limitée. Sous évolutions contrastées, les extrêmes vont être plus sévères et de manière consensuelle (donc généralisée) : à la hausse pour les crues (cf. variable $QJXA$) et à la baisse pour les étiages (cf. variable $VCN10$). Les évolutions sèches conduisent à une réduction des débits d'étiage, annuels, estivaux et automnaux. Hausses comme baisses sont possibles pour les autres débits, à l'image de ce qui a été obtenu pour les évolutions limitées. Quelle que soit l'évolution (limitée, contrastée et sèche), le consensus à la baisse du débit d'étiage $VCN10$ est quasi généralisé.

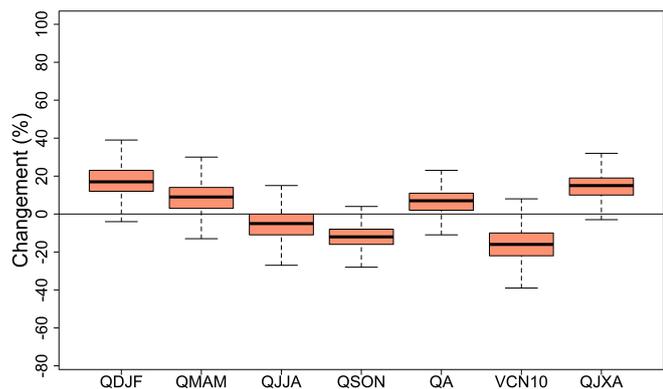
Explore2 - Evolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement



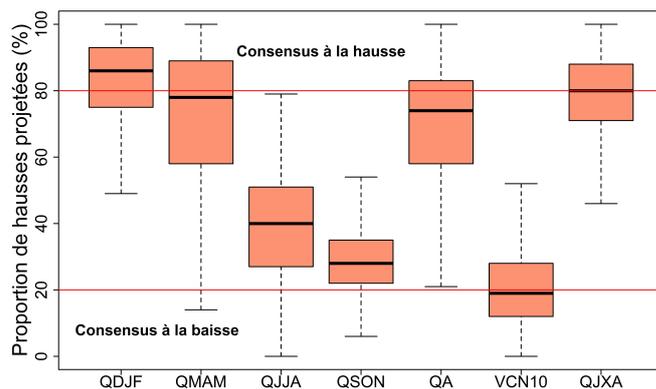
(a) Intensité du changement à +2°C



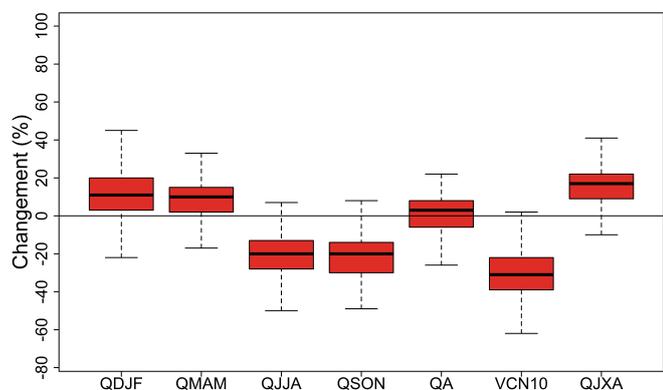
(b) Signe du changement à +2°C



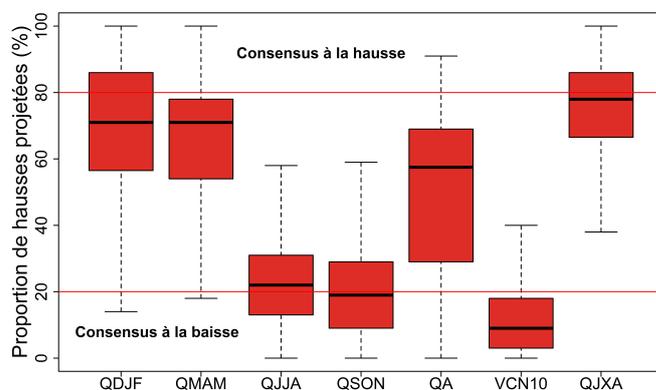
(c) Intensité du changement à +2.7°C



(d) Signe du changement à +2.7°C

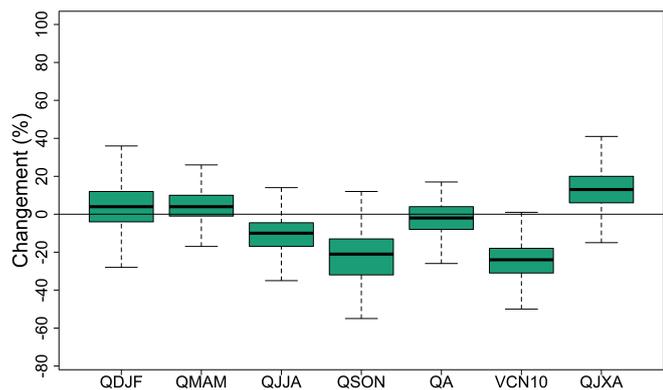


(e) Intensité du changement à +4°C

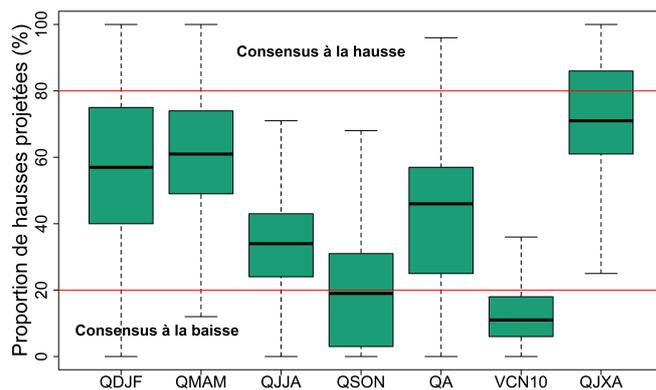


(f) Signe du changement à +4°C

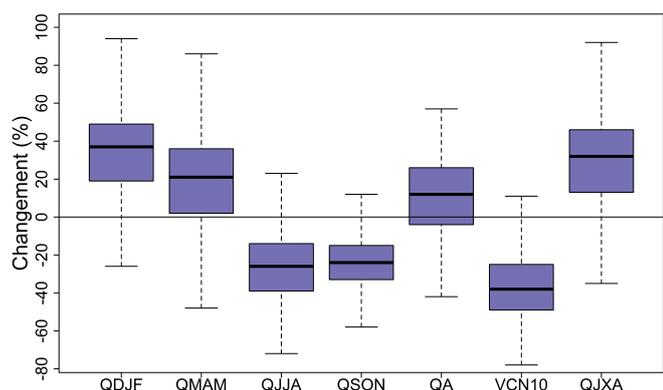
FIGURE 25 : Intensité et signe des changements relatifs par variable pour les différents niveaux de réchauffement. Dans chaque boîte à moustache, le segment en trait épais noir indique la médiane, et les bords inférieurs et supérieurs indiquent respectivement les 25ème et 75ème centiles. Les moustaches s'étendent à +/-1.5 fois l'écart-type.



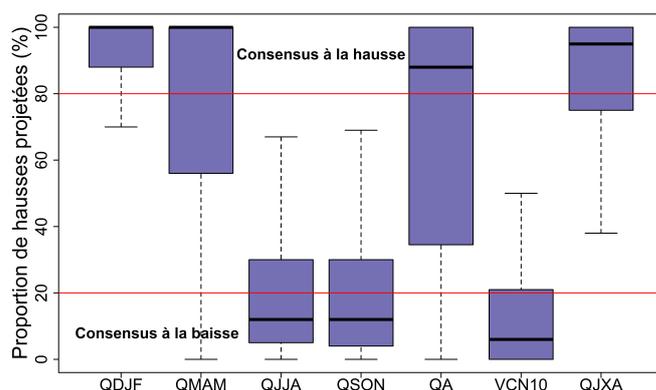
(a) Intensité sous évolution limitée



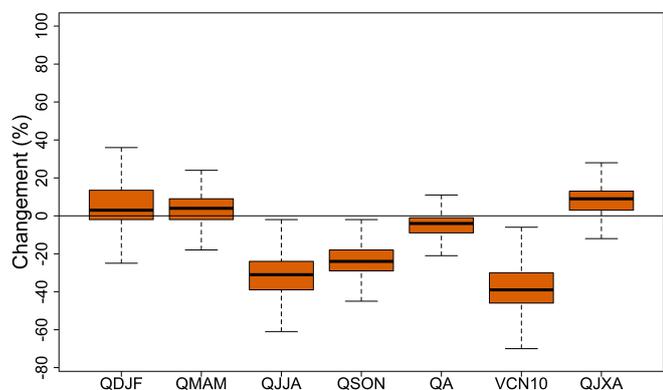
(b) Signe du changement sous évolution limitée



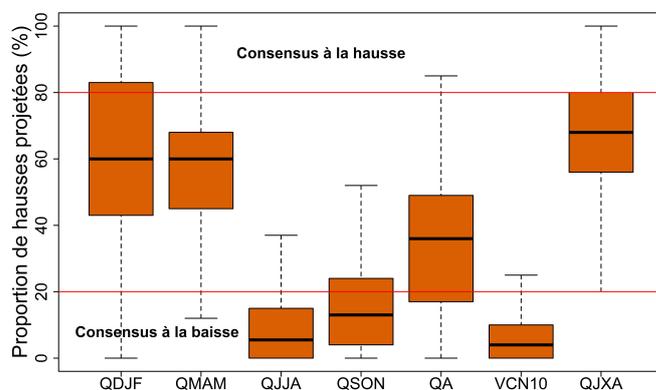
(c) Intensité du changement sous évolution contrastée



(d) Signe du changement sous évolution contrastée



(e) Intensité du changement sous évolution sèche



(f) Signe du changement sous évolution sèche

FIGURE 26 : Intensité et signe des changements relatifs par variable par type d'évolution pour une France à +4°C. Dans chaque boîte à moustache, le segment en trait épais noir indique la médiane, et les bords inférieurs et supérieurs indiquent respectivement les 25ème et 75ème centiles. Les moustaches s'étendent à +/-1,5 fois l'écart-type.

9 Annexe 1 : Les quatre saisons climatiques selon la TRACC

GCM	RCM	ΔP_{DJF}	ΔP_{MAM}	ΔP_{JJA}	ΔP_{SON}	ΔT_{DJF}	ΔT_{MAM}	ΔT_{JJA}	ΔT_{SON}
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	9	0	7.2	11.4	1	1.5	1.2	1.4
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	6.4	13.2	-3.5	10.2	0.8	1.6	1.7	1.5
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	8.3	2.8	-11.9	-2.3	1.1	1	1.7	1.6
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	13.9	1.7	6.3	1.3	1.8	1.1	1.1	1.3
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	4	4.6	-1.3	-1.7	1.5	1	1.2	1.4
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	20.7	11.7	0.5	9	1.5	0.9	1.9	1.9
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	22.8	11.1	-12.7	2	1.6	0.7	1.7	1.8
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	15.9	13.8	-1.7	4.7	1.7	0.9	1.7	1.5
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	25.6	2.1	7.3	4.4	1.7	1.1	1.5	1.8
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	17.6	-8.9	-10.1	-8.2	1.1	0.5	0.7	2
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	14.7	-6.3	-15.7	-4.9	0.9	0.8	1.2	1.8
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	11.7	4.9	-14.1	4.3	1.2	0.7	1.6	1.5
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	-4.7	6.7	-6.6	2.5	1	1.2	1.3	1.5
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	9.8	5.7	-12.9	7.1	1.2	0.7	1.8	1.7
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	8.4	-4.1	-12.2	-4.1	1.5	1.6	1.8	1.5
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	12.4	0.6	-3.1	-2.5	1.3	1.2	1.5	1.3
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	12.2	18.8	5.2	1.4	1.5	0.7	1.7	1.5

TABLEAU 8 : Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +2°C

GCM	RCM	ΔP_{DJF}	ΔP_{MAM}	ΔP_{JJA}	ΔP_{SON}	ΔT_{DJF}	ΔT_{MAM}	ΔT_{JJA}	ΔT_{SON}
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	14.1	2.9	-4.6	2.2	1.9	1.8	2.3	2.7
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	13.8	6	-7.8	-5.5	1.6	2.1	2.2	2.3
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	15.9	4.9	-7	7.4	2.4	1.7	2.7	1.8
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	19.9	3.4	0	7.5	2.5	2	2.4	2.3
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	18.7	-0.5	-11.4	3.2	2.6	2.1	2.3	1.9
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	16.5	21.7	5.4	-1.3	1.6	1.4	2.4	2.6
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	20.4	10.2	-13.6	-11	1.9	1.1	2.3	2.7
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	20.1	14.6	2.1	-5.9	2	1.5	2.8	2.3
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	14.8	10	5.3	2.5	1.8	1.4	2.1	2.6
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	32.5	-2.8	-21.5	-10.7	2	1.3	2	2.5
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	30.9	-7.1	-26.4	-7	1.8	1.3	2.5	2.3
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	19.9	4.5	-15.6	-4.1	1.9	1.4	2.5	2.6
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	19.7	-0.4	2.3	2.8	1.7	1.6	2.4	2.5
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	16.9	3	-9.4	4.9	2.2	1.3	2.7	2.6
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	8.3	3.4	-13.7	-3.7	1.6	1.6	2.2	2.1
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	9.1	2.6	-11.4	-5.3	1.5	1.6	2.5	2
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	21.1	21.8	4.7	14.5	2.1	1.2	2.4	2.1

TABLEAU 9 : Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +2.7°C

GCM	RCM	ΔP_{DJF}	ΔP_{MAM}	ΔP_{JJA}	ΔP_{SON}	ΔT_{DJF}	ΔT_{MAM}	ΔT_{JJA}	ΔT_{SON}
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	17.9	7.0	-7	6.3	3.2	3.1	3.6	3.6
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	MOHC-HadREM3-GA7-05	11.0	11.3	-14.2	-4.2	2.8	3.8	3.9	3.3
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	6.3	2.5	-26.5	-4.9	2.2	2.9	4.7	3.3
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	11.3	11.4	-20.6	5.2	2.8	2.7	3.9	3.5
ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	13.1	7.6	-32.6	-0.5	2.5	3	4.1	3.2
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63	13.4	16.5	5.6	-6.4	2.6	2.5	3.8	4.2
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	18.6	6.2	-36.9	-12.0	3.2	2.3	4.3	4
MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	10.5	12.9	-10.8	-8.3	2.9	2.7	4.3	3.7
MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-6	11.6	10.6	-2.3	-2.8	2.6	2.5	3.7	4.1
IPSL-IPSL-CM5A-MR	DMI-HIRHAM5	40.9	-2.1	-30.8	3.7	3.7	3.1	3.6	3.9
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SHMI-RCA4	34.1	-1.1	-36.6	-3.6	3	3.2	3.8	3.9
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	25.9	11.2	-41.5	-4.1	3.3	2.4	4.2	4
MPI-M-MPI-ESM-LR	ICTP-RegCM4-6	26.3	11.5	-13.7	3.8	3.3	2.9	3.8	3.8
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REM02009	26.2	10.8	-34.1	-1.4	3.4	2.2	4.2	3.9
NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5	14.1	2.9	-23.6	-3.2	3	2.9	4.3	3.5
NCC-NorESM1-M	GERICS-REM02015	12.2	-1.6	-12.1	-9.5	3	2.9	4.1	3.3
NCC-NorESM1-M	IPSL-WRF381P	14.9	1.4	5.1	0.7	3.2	3.2	4.2	3.6

TABLEAU 10 : Changement de précipitations et températures saisonnières pour le niveau de réchauffement +4°C

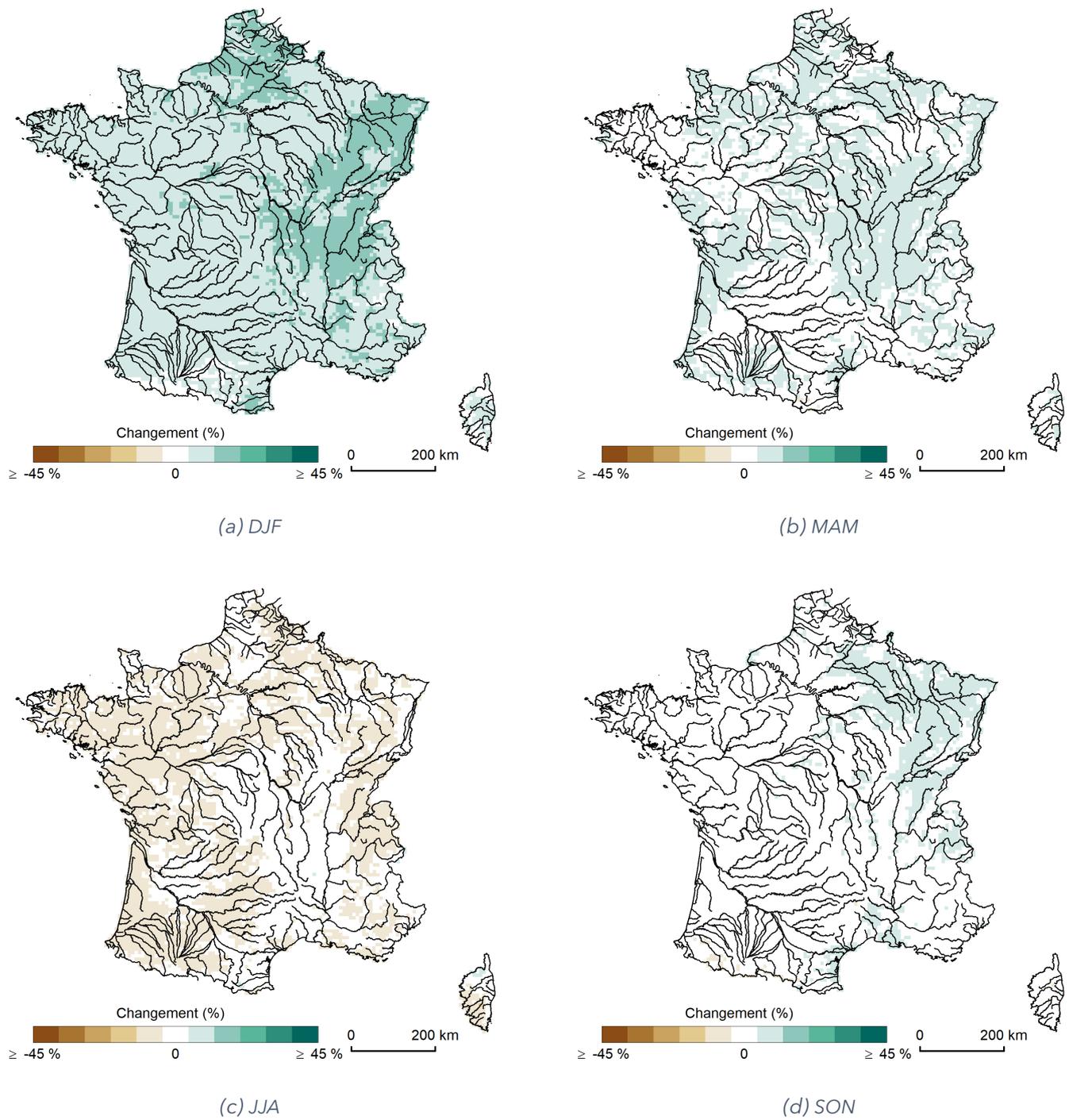


FIGURE 27 : Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +2°C.

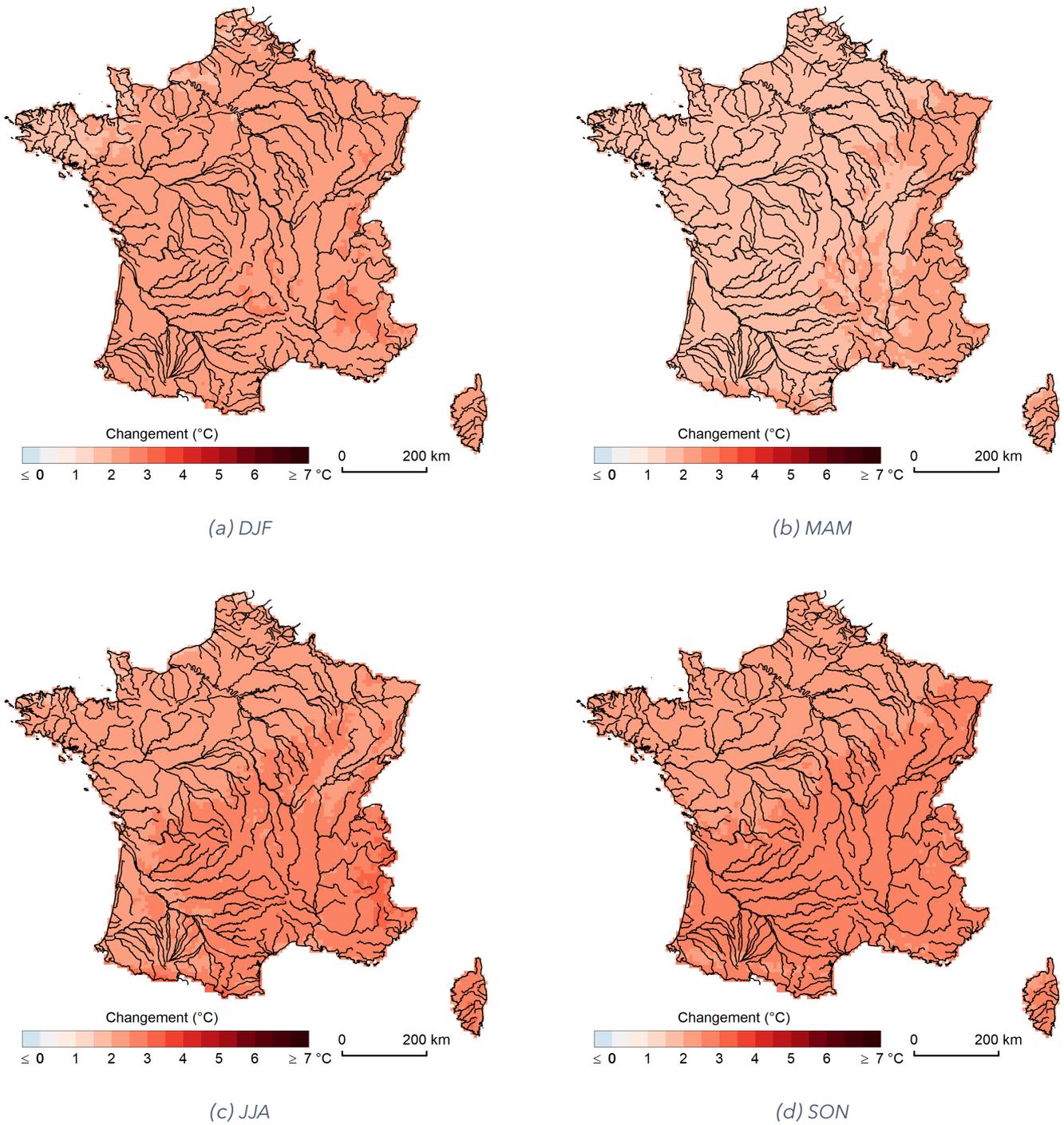


FIGURE 28 : Changement médian de températures saisonnières pour une France à +2°C.

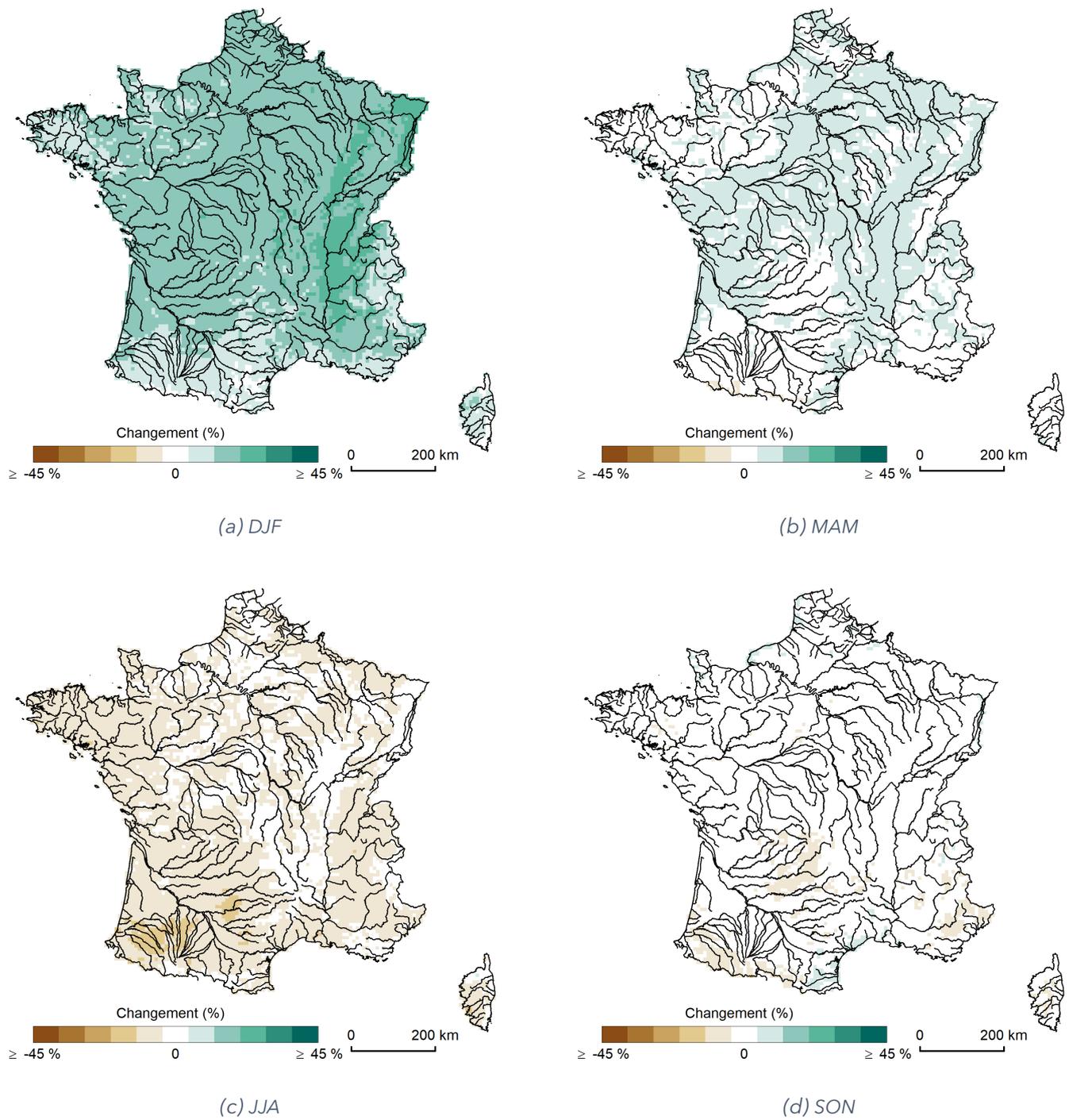


FIGURE 29 : Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +2.7°C.

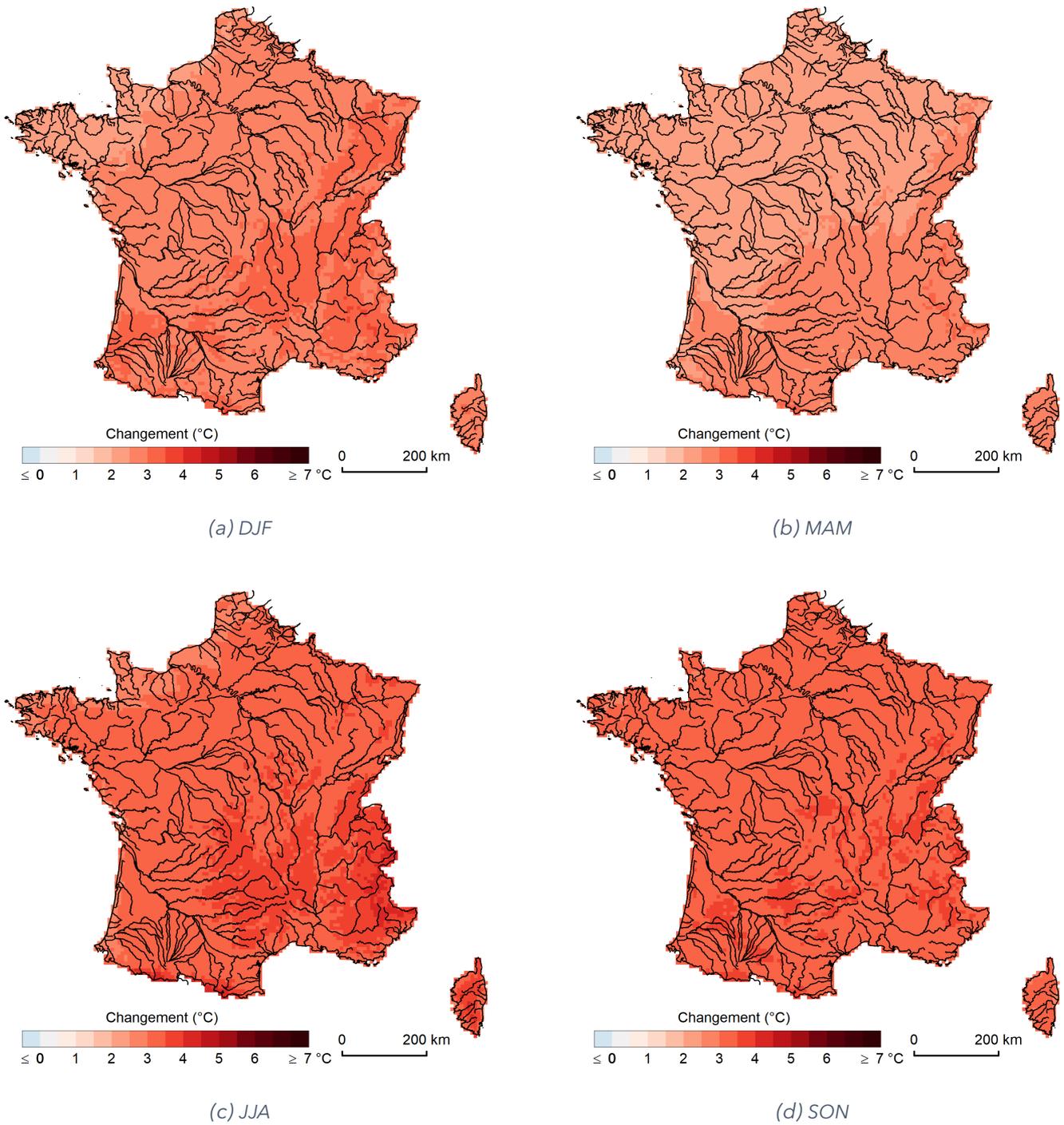


FIGURE 30 : Changement médian de températures saisonnières pour une France à +2.7°C.

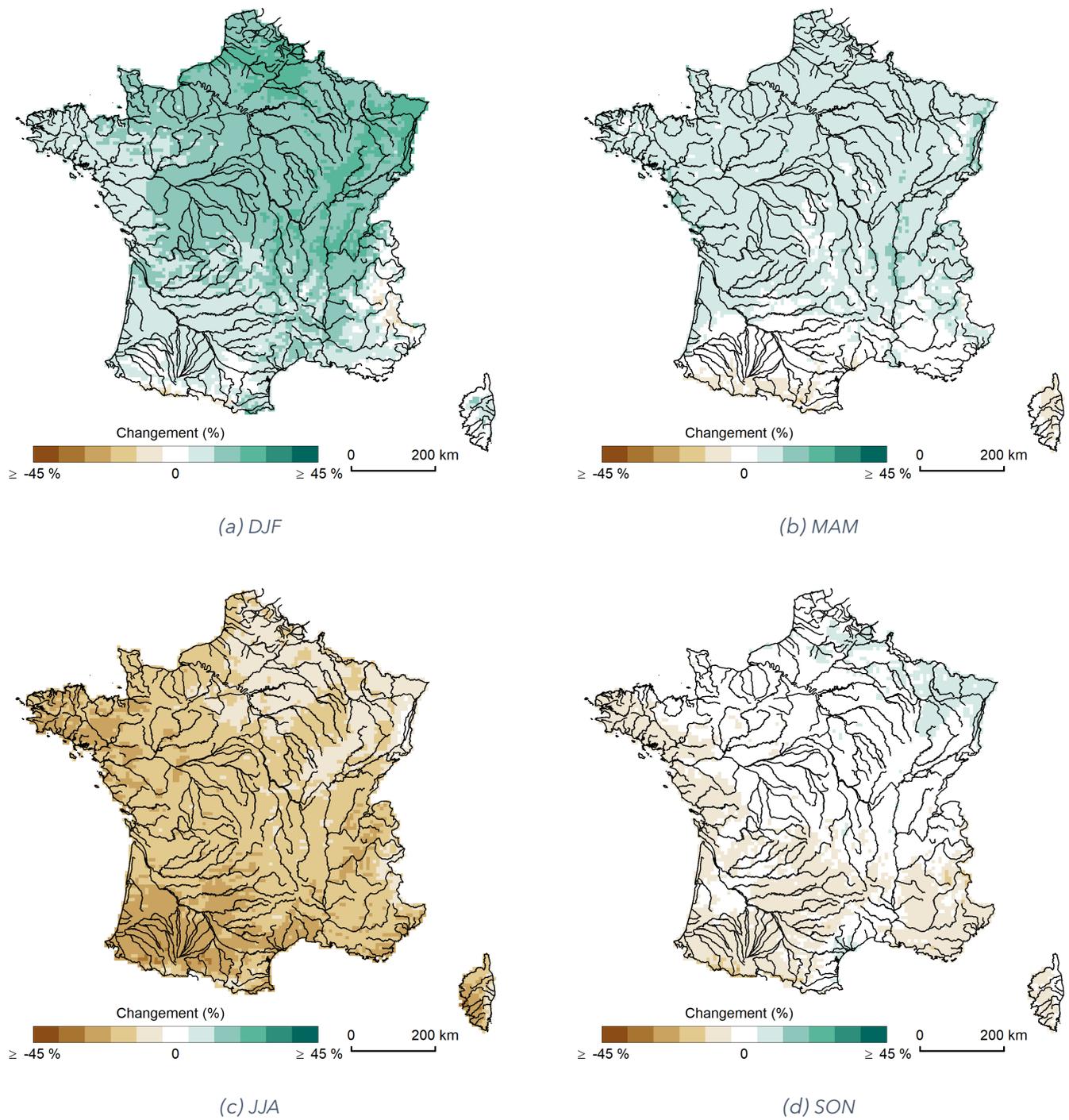


FIGURE 31 : Changement médian de précipitations saisonnières pour une France à +4°C.

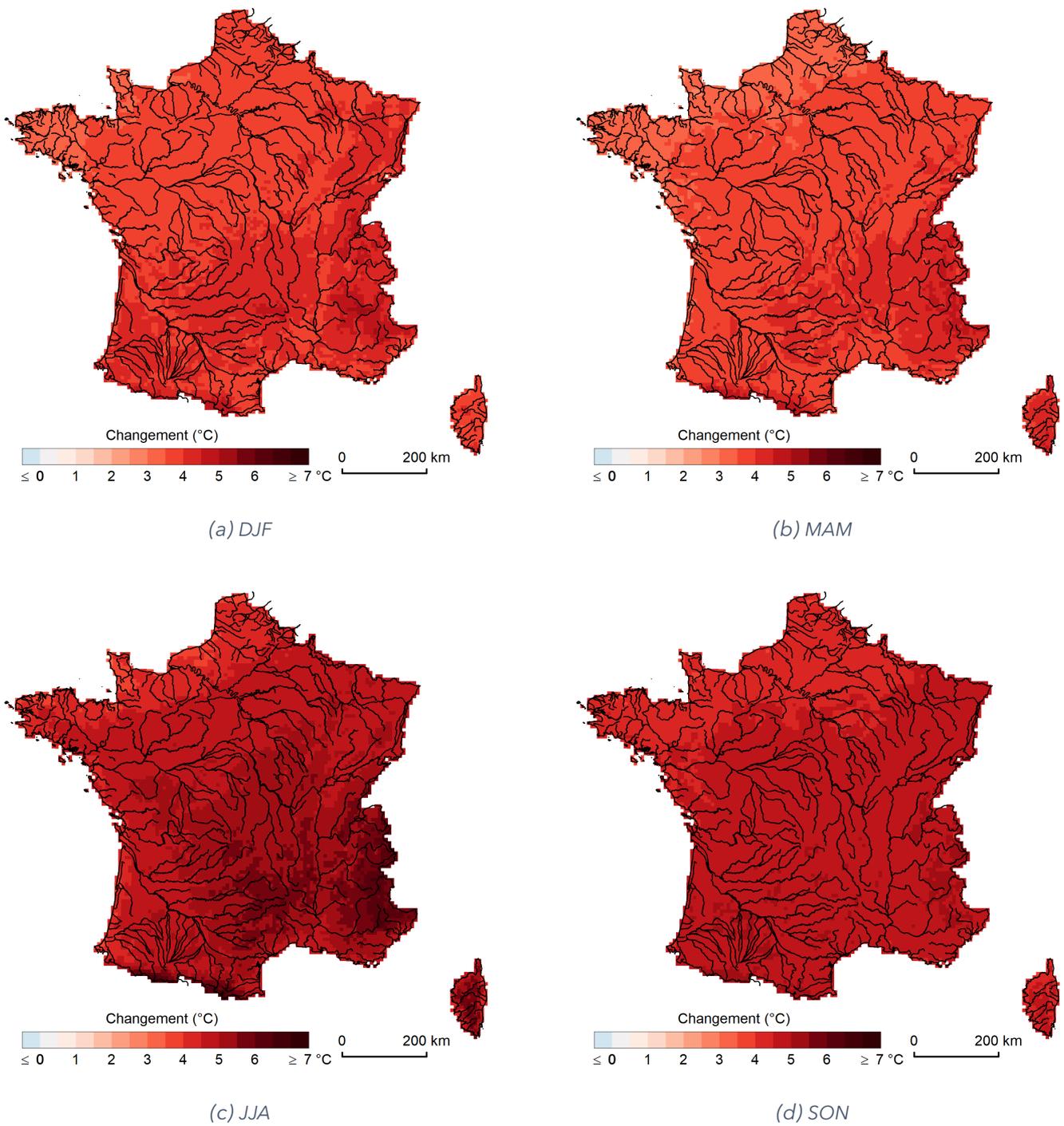


FIGURE 32 : Changement médian de températures saisonnières pour une France à +4°C.

10 Annexe 2 : L'hydrologie de surface selon la TRACC

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 11 : 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 Précly-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).

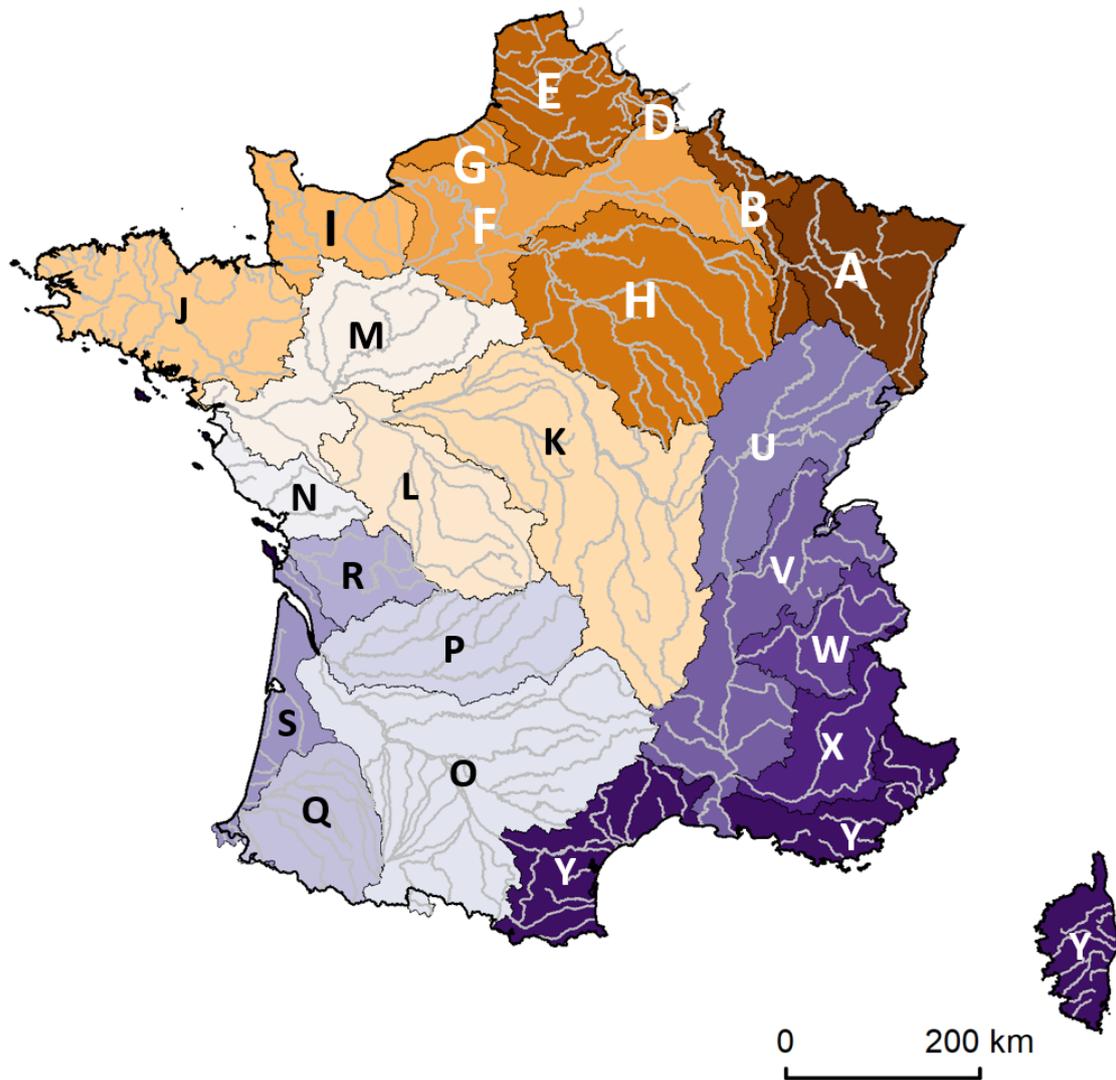


FIGURE 33 : Régions hydrographiques en France hexagonale.

Id.	Q_{DJF}			Q_{MAM}			Q_{JJA}			Q_{SON}			Q_A		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	24	12	30	5	-8	21	-1	-15	11	5	-6	16	11	5	17
B	19	8	26	5	1	9	-1	-7	2	2	-4	10	12	7	15
D	18	17	19	5	4	6	-6	-7	-5	-8	-11	-5	10	7	10
E	14	7	18	10	6	16	2	-6	10	0	-12	9	10	5	13
F-H	17	6	28	9	-1	24	1	-8	12	1	-7	11	11	2	20
G	16	9	19	12	8	13	5	2	8	3	0	7	12	8	14
I	13	6	17	8	6	12	-4	-13	3	-4	-10	3	8	2	10
J	9	3	14	7	2	15	-6	-13	3	-8	-18	-1	5	1	11
K	17	7	26	11	-10	29	3	-7	14	-4	-19	6	10	-3	19
L	13	7	22	10	3	20	0	-11	10	-5	-15	8	8	2	15
M	11	7	19	13	6	19	1	-8	9	-1	-10	5	9	2	15
N	8	6	15	10	7	16	1	-3	5	-3	-6	0	6	5	9
O	6	-5	36	0	-14	12	-4	-23	8	-10	-18	2	0	-7	9
P	9	4	18	5	-7	10	-9	-16	7	-9	-17	0	2	-2	9
Q	2	-4	29	2	-7	8	-6	-21	0	-12	-18	-8	-1	-6	2
R	12	8	17	9	7	12	2	-4	5	-1	-7	8	8	5	10
S	6	2	14	6	2	9	-4	-6	5	-11	-13	1	2	0	9
U	21	15	34	7	-7	18	-1	-14	16	1	-8	9	11	5	21
V	20	4	81	3	-10	40	0	-20	18	1	-9	23	8	0	17
W	39	14	62	13	-8	46	-15	-25	8	-4	-12	10	3	-2	12
X	22	3	52	5	-8	53	-10	-22	2	-3	-8	11	2	-5	8
Y	7	-4	36	0	-14	13	-4	-21	12	-1	-12	16	3	-7	11
FR	15	-5	81	7	-14	53	-1	-25	18	-2	-19	23	8	-7	21

TABLEAU 12 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les secteurs avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.

Id.	Q_{DJF}			Q_{MAM}			Q_{JJA}			Q_{SON}			Q_A		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	26	18	32	6	-9	18	-4	-16	7	-12	-20	-2	10	5	16
B	19	12	25	11	5	16	-2	-8	3	-12	-19	-6	10	5	17
D	20	20	22	8	6	9	-6	-8	-3	-10	-12	-8	10	9	11
E	15	6	23	10	7	15	2	-7	6	-3	-14	2	10	2	15
F-H	17	5	24	12	2	23	0	-9	11	-9	-23	4	10	1	17
G	15	7	18	9	5	13	1	0	5	-3	-7	2	8	6	12
I	14	6	22	8	1	11	-3	-10	3	-9	-15	-2	8	1	12
J	12	4	22	6	3	14	-10	-20	0	-18	-26	-10	4	0	12
K	18	7	34	13	-8	37	1	-10	22	-12	-24	1	11	-5	27
L	17	9	29	15	5	28	-1	-13	9	-14	-27	4	11	0	22
M	12	2	23	13	4	27	-3	-16	9	-8	-18	0	8	4	19
N	15	9	24	15	13	17	-6	-16	-1	-15	-23	-3	10	7	13
O	6	-9	46	1	-14	15	-12	-35	2	-18	-34	-5	-1	-11	9
P	15	0	24	6	-10	19	-12	-23	0	-23	-34	-6	2	-2	18
Q	3	-7	43	0	-14	10	-16	-32	-5	-22	-32	-15	-6	-10	1
R	21	13	25	18	8	22	-1	-12	3	-11	-24	-5	14	6	16
S	8	0	20	9	8	19	-7	-11	5	-20	-27	-13	2	-1	13
U	25	19	41	9	-15	26	-4	-15	14	-10	-19	-1	11	2	2
V	26	6	137	9	-18	54	-11	-31	15	-9	-25	17	7	-4	21
W	50	14	84	13	-14	80	-26	-36	-3	-12	-23	-5	-1	-5	5
X	29	2	68	0	-11	67	-20	-33	-2	-14	-25	2	0	-6	8
Y	7	-4	42	1	-18	22	-11	-28	-3	-6	-31	30	0	-12	15
FR	17	-9	137	9	-18	80	-5	-36	22	-12	-34	30	7	-12	27

TABLEAU 13 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2.7°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les régions hydrographiques avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.

Id.	Q_{DJF}			Q_{MAM}			Q_{JJA}			Q_{SON}			Q_A		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	27	19	36	8	-12	30	-13	-29	2	-14	-25	3	11	3	20
B	22	16	26	10	5	14	-11	-21	-5	-10	-21	-2	11	7	16
D	28	27	29	11	8	12	-14	-15	-12	-11	-13	-10	15	13	16
E	17	-3	28	18	9	23	-2	-13	7	-8	-19	5	11	0	16
H	19	-1	33	14	1	31	-10	-27	4	-12	-34	6	9	-5	22
G	14	6	21	17	9	21	0	-5	5	-6	-13	-1	10	6	14
I	13	3	20	11	5	18	-16	-29	-2	-20	-30	-7	7	-2	11
J	2	-6	22	8	0	23	-17	-31	-3	-28	-40	-13	0	-8	12
K	11	-10	24	13	-15	40	-21	-37	-1	-27	-44	-6	2	-21	14
L	9	-4	27	16	5	31	-22	-36	-1	-28	-46	-3	3	-9	17
M	11	0	20	12	3	31	-11	-25	-1	-14	-28	-3	6	-3	14
N	5	0	9	15	11	21	-21	-26	-14	-25	-29	-15	2	-3	6
O	-9	-30	40	-4	-25	12	-32	-54	-17	-33	-45	-19	-13	-25	-2
P	2	-16	20	11	-11	19	-29	-46	-13	-32	-43	-18	-4	-13	3
Q	-17	-32	31	-7	-22	6	-36	-54	-18	-37	-49	-27	-20	-26	-10
R	4	1	8	18	13	22	-14	-30	-8	-18	-35	-13	2	-3	7
S	-8	-15	1	8	4	18	-18	-28	-6	-32	-36	-24	-9	-15	1
U	23	12	46	12	-18	32	-16	-33	1	-17	-28	-6	8	-2	20
V	10	-13	214	9	-24	87	-22	-49	3	-18	-39	3	0	-17	14
W	62	-2	101	14	-24	149	-43	-56	-17	-22	-37	-11	-8	-15	2
X	7	-21	81	-6	-20	70	-37	-54	-11	-24	-35	-11	-14	-22	-2
Y	-1	-26	39	-12	-29	11	-28	-48	-8	-17	-46	8	-11	-28	12
FR	11	-32	214	10	-29	149	-20	-56	7	-20	-49	8	3	-28	22

TABLEAU 14 : Changements relatifs médians (%) des débits saisonniers et annuel moyens par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +4°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiqués les régions hydrographiques avec un accord (celui de la médiane) sur le signe du changement pour une majorité de points de simulation.

Id.	VCN10			QJXA		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	-8	-17	7	16	6	26
B	-8	-16	-3	13	4	18
D	-14	-18	-13	15	14	19
E	-3	-11	7	12	6	20
F-H	-3	-19	11	13	4	27
G	2	-3	5	14	12	18
I	-9	-19	1	11	5	18
J	-11	-21	-3	13	7	21
K	-9	-22	4	13	-6	31
L	-9	-23	4	17	8	28
M	-4	-17	4	18	8	26
N	-12	-15	-2	17	14	22
O	-16	-26	-4	6	-5	25
P	-16	-27	0	8	4	17
Q	-14	-23	-9	6	0	12
R	-4	-15	1	16	12	18
S	-10	-15	0	6	3	19
U	-11	-19	1	17	7	27
V	-9	-26	13	16	3	29
W	-14	-23	26	9	-2	26
X	-14	-22	6	8	1	19
Y	-12	-23	-1	12	-3	23
FR	-9	-27	26	13	-6	31

TABLEAU 15 : Changements relatifs médians (%) des débits d'étiage et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections).

Id.	VCN10			QJXA		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	-16	-28	-2	15	6	29
B	-13	-30	-8	12	0	21
D	-15	-15	-12	17	10	21
E	-4	-14	2	12	2	20
F-H	-8	-27	7	14	5	24
G	-2	-9	1	14	9	15
I	-16	-25	-1	11	5	20
J	-22	-34	-11	15	7	31
K	-17	-36	-1	20	2	45
L	-13	-31	3	20	6	37
M	-9	-33	1	19	7	28
N	-18	-24	-4	18	15	22
O	-24	-36	-5	6	-11	21
P	-23	-39	-3	9	2	24
Q	-22	-35	-9	4	-6	10
R	-5	-21	-2	22	18	25
S	-10	-19	-4	10	5	24
U	-18	-29	-4	19	4	39
V	-17	-38	11	14	2	39
W	-21	-32	28	8	-5	26
X	-20	-30	-1	6	-4	21
Y	-18	-34	-2	11	-7	41
FR	-31	-65	13	17	-18	47

TABLEAU 16 : Changements relatifs médians (%) des débits d'étiage et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +2.7°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections).

Id.	VCN10			QJXA		
	Méd	Min	Max	Méd	Min	Max
A	-26	-43	-6	18	7	32
B	-22	-42	-14	15	6	22
D	-28	-31	-25	24	22	32
E	-10	-26	1	20	-4	32
F-H	-18	-50	4	20	8	36
G	-6	-16	0	20	12	30
I	-30	-43	-5	20	11	31
J	-35	-48	-16	15	-2	35
K	-36	-62	-8	20	-17	47
L	-32	-52	-5	22	7	43
M	-21	-44	-4	20	10	32
N	-38	-44	-14	19	15	23
O	-39	-58	-19	1	-15	20
P	-40	-65	-17	12	-6	25
Q	-40	-56	-20	-2	-14	7
R	-20	-40	-12	23	17	33
S	-24	-30	-17	8	3	25
U	-30	-50	-11	20	-2	39
V	-31	-57	-4	14	-10	30
W	-36	-53	13	5	-11	37
X	-34	-49	-14	2	-13	20
Y	-32	-51	-9	10	-18	40
France	-31	-65	13	17	-18	47

TABLEAU 17 : Changements relatifs médians (%) des débits d'étiage et de crue par région hydrographique et à l'échelle France hexagonale et Corse (FR) pour le niveau de réchauffement +4°C (médiane, minimum, maximum). En gras sont indiquées les régions hydrographiques avec un accord sur le signe du changement (celui de la médiane) pour une majorité de points de simulation (i.e. plus de 50 % points de simulation avec un changement de signe sur plus de 80 % des projections).

11 Références

- BRUGERON, A., J.-B. PAROISSIEN et L. TILLIER (2018). *Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions*. Rapp. tech. BRGM. DOI : [BRGM/RP-67489-FR](https://doi.org/10.5194/brgm-rp-67489-fr).
- 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. (juin 2024). *Ensemble de projections Explore2 : Changements moyens et incertitudes associées*. Rapp. tech. INRAE - IGE ; CNRS - IGE ; CNRS - IPSL ; INRAE.
- 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).
- HUANG, P. et al. (2024). « Multi-objective calibration and evaluation of the ORCHIDEE land surface model over France at high resolution ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 28.19, p. 4455-4476. DOI : [10.5194/hess-28-4455-2024](https://doi.org/10.5194/hess-28-4455-2024).
- 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).
- KRAUSE, P. et al. (2006). « Multiscale investigations in a mesoscale catchment-hydrological modelling in the Gera catchment ». In : *Advances in Geosciences* 9, p. 53-61. DOI : [10.5194/adgeo-9-53-2006](https://doi.org/10.5194/adgeo-9-53-2006).
- LANINI, S. et al. (2024). *Projections hydrologiques : Recharge potentielle des aquifères*. Rapp. tech. BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières); INRAE. DOI : [10.57745/ZQPNIE](https://doi.org/10.57745/ZQPNIE).
- LAVENNE, A. de et al. (2019). « A Regularization Approach to Improve the Sequential Calibration of a Semi-distributed Hydrological Model ». In : *Water Resources Research* 55.11, p. 8821-8839. DOI : doi.org/10.1029/2018WR024266.
- LE MOIGNE, P. et al. (2020). « The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydro-meteorological 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).
- MARSON, P. et al. (2024). *Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées*. Rapp. tech. Météo-France; INRAE, p. 134. DOI : [hal-04443633](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).
- SAUQUET, E. et al. (2022). *Points et supports de simulation des projections hydrologiques*. Rapp. tech. INRAE ; BRGM, p. 22. DOI : [hal-03940238](https://doi.org/10.57745/TLUTKF).
- 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.
- SAUQUET, E. et al. (juin 2024a). *Explore2 - Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?* Rapp. tech. INRAE ; EDF. DOI : [10.57745/TLUTKF](https://doi.org/10.57745/TLUTKF).
- SAUQUET, E. et al. (2024b). *Messages et enseignements du projet Explore2*. Rapp. tech. INRAE ; OiEau ; OFB ; MTECT ; BRGM ; CNRS ; IRD ; BRGM ; EDF ; Météo-France. DOI : [10.57745/J3XIPW](https://doi.org/10.57745/J3XIPW).
- 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).

- SOUBEYROUX, J.-M. et al. (nov. 2024). *A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ?* Rapp. tech. Meteo-France.
- SOUBEYROUX, J.-M. et al. (mars 2025). *À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? partie 2.* Rapp. tech. Meteo-France, p. 46.
- THIÉRY, D. (2018). *Logiciel ÉROS version v7.1. Guide d'utilisation.* Rapp. tech. BRGM/RP-67704-FR.