



MESSAGES ET ENSEIGNEMENTS DU PROJET EXPLORE2

**Analyse de l'hydrologie de surface
selon les niveaux de réchauffement
fixés par la TRACC**

Eric SAUQUET (INRAE), Antoine TORREMOCHA (INRAE), Guillaume EVIN (INRAE), Sonia SIAUVE (OiEau), Patrick ARNAUD (INRAE), Jérémie BONNEAU (INRAE), Flora BRANGER (INRAE), Yvan CABALLERO (BRGM), François COLLEONI (INRAE), Lila COLLET (EDF), Lola CORRE (Météo-France), 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), Claire MAGAND (OFB), Louise MIMÉAU (INRAE), Céline MONTEIL (EDF), Simon MUNIER (Météo-France), Charles PERRIN (INRAE), Alix REVERDY (IGE), Olivier ROBELIN (INRAE), Fabienne ROUSSET (Météo-France), Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France), Laurent STROHMENGER (INRAE), Guillaume THIREL (INRAE), Flore TOCQUER (Météo-France), Yves TRAMBLAY (IRD), Jean-Pierre VERGNES (BRGM), Jean-Philippe VIDAL (INRAE)

15/09/2025

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.

*Messages et enseignements du projet Explore2 - Analyse de l'hydrologie de surface
selon les niveaux de réchauffement fixés par la TRACC*

Nom du projet	Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France
Nom du rapport	Messages et enseignements du projet Explore2 - Analyse de l'hydrologie de surface selon les niveaux de réchauffement fixés par la TRACC
Auteur(s)	Collectif
Numéro de version	2
Date contractuelle de remise du livrable	01/08/2025
Date effective de remise du livrable	15/09/2025
Statut du document	version provisoire /version finale
Accès en ligne	libre/ confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	débit, recharge, changement climatique, accompagnement, niveau de réchauffement

Table des matières

Les contributrices et contributeurs.....	6
Préambule	7
Le projet Explore2	7
La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC)	9
A l'attention des lectrices et lecteurs	10
Des futurs du climat par niveau de réchauffement	12
Des futurs de l'hydrologie par niveau de réchauffement.....	15
La ressource en eau	15
Les sécheresses	20
Les crues	23
Messages et enseignements	25
Les avancées scientifiques d'Explore2	25
Les enseignements pour la TRACC	25
Références.....	27

Liste des figures

Figure 1 : Changements médians projetés pour les températures annuelle et estivale par niveau de réchauffement (référence : 1976-2005).	13
Figure 2 : Changements relatifs médians projetés pour les cumuls annuels de précipitation moyens pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005).	14
Figure 3 : Changements relatifs médians projetés ΔRA pour la recharge potentielle annuelle moyenne pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005) – En jaune sont identifiées les masses d'eau souterraine considérées comme globalement non aquifères et pour lesquelles la notion de recharge n'a pas forcément de sens à l'échelle régionale. Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔRA . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 564 valeurs ΔRA aux 564 masses d'eau souterraine associées à des aquifères présentes sur les cartes.	16
Figure 4 : Changements relatifs médians projetés ΔQA pour le débit annuel moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔQA . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs ΔQA aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.	17
Figure 5 : Changements relatifs médians projetés ΔQ_{DJF} pour le débit d'hiver moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔQ_{DJF} . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs ΔQ_{DJF} aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.	18
Figure 6 : Régimes hydrologique pour la période de référence (1976-2005) et sous hypothèse d'une France à +4 °C pour les trois familles d'évolution climatique. Les cartes reposent sur les valeurs aux 2500 points de simulation disposant d'au moins quatre modèles hydrologiques. La classification décrite sous les cartes par des hydrogrammes s'appuie sur les coefficients mensuels de Pardé CM (% du volume annuel écoulé dans le mois).	19
Figure 7 : Changements relatifs médians projetés $\Delta VCN10_{été}$ pour le débit d'été VCN10 _{été} moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta VCN10_{été}$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs $\Delta VCN10_{été}$ aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.	21
Figure 8 : Changements médians projetés $\Delta SWI04D$ pour le nombre de jours secs moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta SWI04D$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les valeurs $\Delta SWI04D$ des mailles SAFRAN.	22
Figure 9 : Changements relatifs médians projetés $\Delta QJXA$ pour le débit de crue QJXA moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta QJXA$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs $\Delta QJXA$ aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.	24

Les contributrices et contributeurs

Coordination « volet scientifique » : Eric SAUQUET (INRAE)

Coordination « volet accompagnement » : Sonia SIAUVE (OiEau), Natacha JACQUIN (OiEau), Audrey BORNANCIN-PLANTIER (OiEau)

Equipe projet : Maud BEREL (MTECT), Claire MAGAND (OFB), Guillaume EVIN (INRAE), Eric SAUQUET (INRAE), Audrey BORNANCIN-PLANTIER (OiEau), Natacha JACQUIN (OiEau), Sonia SIAUVE (OiEau)

Constitutrices et contributeurs « volet scientifique » (par ordre alphabétique) :

Ryma AISSAT (BRGM), Nadia AMRAOUI (BRGM), Patrick ARNAUD (INRAE), Maud BEREL (MTECT), Sébastien BERNUS (Météo-France), Jérémie BONNEAU (INRAE), Flora BRANGER (INRAE), Yvan CABALLERO (BRGM), François COLLEONI (INRAE), Lila COLLET (EDF), Lola CORRE (Météo-France), Agathe DROUIN (Météo-France), Agnès DUCHARNE (Sorbonne Université), Guillaume EVIN (INRAE), Joël GAILHARD (EDF), Florence HABETS (ENS), Frédéric HENDRICKX (EDF), Louis HERAUT (INRAE), Benoît HINGRAY (IGE), Peng HUANG (Sorbonne Université), Tristan JAOUEN (INRAE), Alexis JEANTET (Météo-France), Sandra LANINI (BRGM), Matthieu LE LAY (EDF), Claire MAGAND (OFB), Paula MARSON (Météo-France), Samuel MERTZ (BRGM), Louise MIMEAU (INRAE), Céline MONTEIL (EDF), Simon MUNIER (Météo-France), Charles PERRIN (INRAE), Alix REVERDY (IGE), Lucia RINCHIUSO (Sorbonne Université), Olivier ROBELIN (INRAE), Yoann ROBIN (LSCE), Fabienne ROUSSET (Météo-France), Raphaëlle SAMACOÏTS (Météo-France), Eric SAUQUET (INRAE), Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France), Laurent STROHMENGER (INRAE), Soulivanh THAO (LSCE), Guillaume THIREL (INRAE), Flore TOCQUER (Météo-France), Antoine TORREMOCHA (INRAE), Yves TRAMBLAY (IRD), Florent VEILLON (INRAE), Jean-Pierre VERGNES (BRGM), Jean-Philippe VIDAL (INRAE), Mathieu VRAC (LSCE)

Constitutrices et contributeurs « volet accompagnement » (par ordre alphabétique) :

Audrey BORNANCIN-PLANTIER (OiEau), Jean COMBETTE (OiEau), Henri DECAMPS (OiEau), Natacha JACQUIN (OiEau), Sonia SIAUVE (OiEau)

Assistance à maîtrise d'ouvrage : Maïté FOURNIER (ACTeon), Sarah LOUDIN (ACTeon), Maud BOUSQUET (ACTeon), Camille PARROD (ACTeon)

Préambule

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du 3^{ème} Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3), qui prévoit notamment la mise à disposition de données climatiques et hydrologiques en fonction de la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC).

Les messages qui vont suivre s'appuient sur les données du projet Explore2 qui ont été traitées pour être présentées selon la TRACC. Les fondements du projet Explore2 et de la TRACC sont rappelés dans cette section.

Le projet Explore2

1. **L'ensemble de projections élaborées dans le cadre d'Explore2 couvre la France hexagonale et la Corse. Il reflète l'état actuel des connaissances scientifiques sur le changement climatique et l'hydrologie pour ces territoires.** Il a été produit, pour plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, à partir des modélisations climatiques régionales disponibles au début du projet (en 2021).
2. **Les projections sont le résultat de simulations numériques effectuées à l'aide de modèles climatiques et hydrologiques. Ces modèles sont imparfaits** (il est nécessaire de simplifier la complexité du système climatique ou du fonctionnement d'un bassin versant). Pour illustrer les incertitudes liées à la modélisation, Explore2 considère un ensemble de projections climatiques régionales (basées sur neuf modèles régionaux forcés par six modèles globaux) et un ensemble de projections hydrologiques (basées sur 1 à 9 modèles hydrologiques selon le bassin versant).
3. **Les émissions réelles qui seront produites lors des décennies futures sont évidemment inconnues pour le moment.** Elles vont dépendre des actions, des choix techniques et socio-économiques que feront les Etats, les entreprises et la société civile. Pour projeter les évolutions futures plausibles du climat, la communauté scientifique travaille avec des scénarios. Trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols du 5^{ème} rapport du GIEC : le RCP2.6 (émissions faibles, compatible avec les accords de Paris), le RCP4.5 (émissions modérées) et le RCP8.5 (fortes émissions) sont considérés dans le projet Explore2.
4. **Les changements projetés dans Explore2 comprennent des incertitudes : les changements projetés dépendent du scénario d'émissions de gaz à effet de serre et, pour un même scénario, différents modèles projettent différentes évolutions.** Pour toutes les variables, l'incertitude concerne l'intensité des changements. Pour les précipitations et les variables étroitement liées à celles-ci (débits annuels moyens ; débits journaliers maximum), l'incertitude concerne aussi le signe des changements, les précipitations pouvant augmenter pour certaines projections, diminuer pour d'autres. A l'inverse, les modèles sont toujours d'accord sur le signe des changements attendus pour les températures - augmentation - et aussi pour les variables qui en dépendent fortement (précipitations solides - diminution, évapotranspiration - augmentation).
5. **Les changements projetés correspondent aux différences entre des climats futurs plausibles et le climat passé. Ils représentent des changements de fond. Pour autant, toutes les variables hydroclimatiques varient, en plus, naturellement.** Ces variations naturelles, qui résultent de la variabilité naturelle du climat, s'ajoutent aux changements de fond. Elles sont imprévisibles. Les variations naturelles se traduisent par exemple par des fluctuations plus ou moins fortes d'une année à l'autre. Elles conduisent typiquement à des situations exceptionnelles ou extrêmes (par exemple : années ou séquence d'années sèches), potentiellement très impactantes pour les territoires et la

gestion des ressources en eau. Elles constituent une source d'incertitude supplémentaire irréductible.

6. **Si l'ensemble des projections Explore2 est une source d'information précieuse pour se projeter, son exploitation nécessite certaines précautions.** Ainsi, il faut :
 - a. **Considérer la confiance** que les scientifiques ont dans les résultats compte tenu des imperfections connues des modèles (elle dépend de la variable d'intérêt), **considérer l'accord entre projections** (en premier lieu, le consensus sur le signe des changements),
 - b. Pour les changements projetés, **ne jamais considérer uniquement les résultats d'une seule combinaison de modèles, ni uniquement la médiane de l'ensemble.** Dans le cas contraire, cela conduirait à masquer ou ignorer délibérément les incertitudes,
 - c. **Privilégier les approches plurielles et mobiliser des projections contrastées.**
7. **Il ne faut pas sur-interpréter les résultats qui ont été ou qui peuvent être déduits de l'ensemble de projections Explore2 :**
 - a. **Les projections Explore2 ne sont pas des prévisions.** Elles illustrent des futurs possibles du climat et de l'eau.
 - b. **Les projections Explore2 ont été produites et fournies à une certaine échelle spatiale (par exemple, 64 km² pour le climat) et il est fortement déconseillé d'en déduire des comportements à des échelles plus fines (par exemple, un climat à une résolution plus fine).** De même, des différences de résultats entre deux bassins versants voisins sont généralement à nuancer. Il peut être plus pertinent de considérer les évolutions moyennes projetées à l'échelle d'un territoire élargi intégrant le point ou bassin cible.
 - c. **Les projections Explore2 ont été produites pour projeter l'évolution des ressources en eau et des écoulements « naturels » uniquement (qui seraient « observés » pour des bassins restés dans leur état naturel).** Les projections Explore2 ne prennent pas en compte les effets des aménagements hydrauliques, ni des activités humaines sur l'hydrologie. Par ailleurs, **les seuls facteurs d'évolution hydrologique pris en compte sont les facteurs climatiques.** N'ont pas été prises en compte les évolutions possibles des prélèvements d'eau, de l'occupation des terres, de la gestion de la ressource en eau via les retenues hydrauliques, etc.
 - d. **Les résultats d'un exercice de projection comme celui d'Explore2 dépendent de l'ensemble des projections sélectionnées.** Il n'est pas pertinent de probabiliser une trajectoire climatique, un contexte climatique futur ou même l'occurrence d'événements particuliers.
 - e. **Il est possible que l'ensemble Explore2 ne couvre pas les évolutions futures qui se réaliseront effectivement dans les décennies à venir.** Certains phénomènes ou mécanismes ne sont pas (ou sont mal) aujourd'hui représentés dans les modèles (par exemple, les scientifiques projettent une intensification des orages et des crues rapides, mais les modèles actuels ne permettent pas de la quantifier). **Le risque de « surprises » climatiques n'est pas nul.** La non prise en compte de certains mécanismes ou le dépassement de « points de bascule » pourrait aussi conduire le climat à évoluer de façon inattendue. Les incertitudes caractérisées dans le projet sont uniquement celles que l'on connaît et que l'on est capable de quantifier.

La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC)

La Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC) a été adoptée par le Gouvernement en 2023, et sera inscrite dans le code de l'environnement en 2025. Elle constitue le cadre de référence pour l'ensemble des politiques nationales et locales d'adaptation au changement climatique et, en particulier, le 3^{ème} Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3), publié le 10 mars 2025. Elle s'appuie sur les travaux du GIEC et de chercheurs français, dont ceux de Météo-France. Prenant en compte les politiques et engagements des Etats en matière de lutte contre le changement climatique, la TRACC correspond à un réchauffement de +1,5 °C en 2030, +2 °C en 2050 et + 3°C en 2100 dans le monde, soit respectivement +2 °C, +2,7 °C et +4 °C en France hexagonale et Corse par rapport aux niveaux préindustriels. Ces niveaux ont vocation à être révisés en fonction de l'avancée des connaissances scientifiques et du changement climatique constaté.

Pour répondre aux besoins opérationnels de la TRACC en France hexagonale et en Corse, Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2024) a été chargé de fournir des projections climatiques associées à ces niveaux de réchauffement à partir des données élaborées dans le cadre du projet d'Explore2. **Les conditions climatiques aux trois niveaux de réchauffement spécifiés par la TRACC sont décrites par les données produites par Explore2 extraites sur une fenêtre de 20 ans.** Seules les projections obtenues sous scénario d'émissions RCP 8.5 (garantissant le franchissement du niveau de réchauffement le plus élevé +4 °C) et, parmi les 34 disponibles, uniquement celles corrigées avec la méthode ADAMONT, soit un ensemble de 17 projections climatiques, ont été sélectionnées. La sélection des fenêtres temporelles propres à chaque projection repose sur l'analyse des écarts de la température annuelle moyenne agrégée sur l'ensemble France hexagonale et Corse à la valeur de référence calculée sur la période 1976-2005. La date de l'atteinte du niveau de réchauffement spécifié par la TRACC constitue une année pivot. Les séquences de 20 ans ont été isolées autour de cette année pivot.

Le diagnostic des projections hydrologiques élaborées par Explore2 s'inscrit dans la logique des travaux de Météo-France. **Aucune nouvelle modélisation n'a été donc engagée pour répondre aux enjeux de la TRACC** et ce sont les données des projections hydrologiques d'Explore2 qui ont été valorisées. Les données hydrologiques ont été extraites des séries temporelles (ici recharge potentielle des aquifères et débit) sur les mêmes fenêtres que celles identifiées pour le climat. La réponse hydrologique est analysée par des comparaisons entre statistiques déduites des données extraites sur les fenêtres de 20 ans et celles calculées sur la période de référence 1976-2005.

A l'attention des lectrices et lecteurs

Dans ce document :

- **L'expertise des résultats montre *a posteriori* que les effets du changement climatique seront d'autant plus sévères que le niveau de réchauffement sera important. Seuls les deux niveaux de réchauffement modérés et forts sont considérés ici : les niveaux de réchauffement +2.7 °C et +4 °C par rapport à la période préindustrielle.**
- **Les changements sont estimés par rapport à la période de référence 1976-2005.**
- **L'analyse de la recharge potentielle repose sur les projections obtenues sur le découpage en masses d'eau souterraine (MESO), en excluant 57 entités hydrogéologiques jugées non aquifères. 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, ceux pour lesquels au moins quatre modèles hydrologiques de surface ont fourni des simulations de débits.**
- **Les messages concernent uniquement la France hexagonale et la Corse.**
- **Les changements projetés s'appuient sur les résultats présentés dans les trois rapports (Sauquet *et al.*, 2025b) et (Soubeyroux *et al.*, 2024, 2025), cités en référence. Des résultats à l'échelle des secteurs hydrographiques du Système d'Information sur l'Eau du référentiel SANDRE (<https://www.sandre.eaufrance.fr>) sont disponibles (Héaut *et al.*, 2025 ; Sauquet *et al.*, 2025a).**
- **Les changements sont indiqués avec une précision estimée cohérente avec les limites de l'exercice. Pour les changements relatifs, la précision retenue est de 5 % ; pour les changements de températures, elle est de 0.5 °C.**
- **Pour chaque variable hydroclimatique,**
 - **Le degré d'accord entre les modèles est indiqué.** Il est évalué au regard du nombre de projections qui s'accordent sur le signe des changements. Il ne concerne pas l'intensité des changements (la dispersion entre les modèles est parfois mentionnée dans les messages si opportun)
 - **Un degré de confiance est associé aux évolutions projetées dans Explore2.** Il dépend de l'accord entre les projections mais également de la confiance dans les modèles, c'est-à-dire celle accordée par les scientifiques dans leur capacité à représenter les processus et les mécanismes explicatifs des évolutions ou des variations de cette variable. C'est une expertise de la chaîne de modélisation et des résultats, déclinée en trois niveaux de confiance (faible, moyenne et forte).
- **Les graphiques illustrent ici principalement les incertitudes sous hypothèse d'une France à +4 °C.** Ils présentent les résultats des projections obtenues par les modèles hydrologiques regroupées selon les trois familles de projections climatiques définies par Soubeyroux *et al.* (2024, 2025). Ces trois familles sont trois sous-ensembles, parmi les 17 projections sélectionnées, typés selon les changements des cumuls des précipitations d'été et d'hiver. Ces trois familles offrent une **vision contrastée des futurs climatiques en termes de précipitations pour le niveau de réchauffement le plus fort**. Leur qualification est relative à l'ensemble des 17 projections retenues et aux fenêtres temporelles de 20 ans :
 - La famille « évolution limitée », qui rassemble sept projections climatiques présentant de faibles changements des précipitations en été et en hiver,

- La famille « évolution contrastée », qui rassemble cinq projections climatiques présentant une forte hausse des précipitations d'hiver et une forte diminution en été,
- La famille « évolution sèche », qui rassemble cinq projections climatiques présentant une faible augmentation des précipitations d'hiver et une forte diminution en été.

Les caractères relatifs identifiés (limité, contrasté et sec) des projections climatiques ne sont pas pertinents pour les niveaux de réchauffement autres que +4 °C.

- Les rapports techniques du projet Explore2 sont disponibles au téléchargement à l'adresse suivante : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>. Une collection spécifique sur cet entrepôt rassemble les documents et supports relatifs à la TRACC : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2-tracc>.
- Seul le volet scientifique est exposé ici. Les messages du volet « accompagnement » sont présentés dans le rapport (Sauquet *et al.*, 2024).

Des futurs du climat par niveau de réchauffement

Variables (* : résultats illustrés par des cartes)	Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2	Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
Température annuelle moyenne*	Par construction, l'incertitude sur le réchauffement moyen en France hexagonale et Corse est faible. Au niveau de réchauffement +2.7 °C par rapport à l'ère pré-industrielle (France à +2.7 °C) correspond une augmentation des températures annuelles moyennes autour de 2 °C (entre +1.5 °C et +2.5 °C) par rapport à 1976–2005. Au niveau de réchauffement +4 °C par rapport à l'ère pré-industrielle (France à +4 °C) correspond une augmentation des températures annuelles moyennes autour de 3.5 °C (entre +3 °C et +4 °C) par rapport à 1976–2005. Des températures plus élevées de l'ordre de +1 °C sont projetées dans le sud-est du pays par rapport au nord-ouest.	Forte	Fort (par construction)
Température d'hiver moyenne	Le réchauffement est légèrement moins marqué en hiver qu'à l'échelle annuelle. Le réchauffement moyen en hiver par rapport à 1976–2005 varie entre +1.5 °C et +2.5 °C selon les projections sous hypothèse d'une France à +2.7 °C et entre +2 °C et +4 °C selon les projections sous hypothèse d'une France à +4 °C.	Forte	Fort (par construction)
Température d'été moyenne*	L'été est la saison où le réchauffement moyen à l'échelle France hexagonale et Corse est le plus intense. Le réchauffement moyen en été par rapport à 1976–2005 varie entre +2 °C et +3 °C, selon les projections, sous hypothèse d'une France à +2.7 °C et entre +3.5 °C et +5 °C sous hypothèse d'une France à +4 °C, selon les projections.	Forte	Fort (par construction)
Cumul annuel de précipitation moyen*	Quel que soit le niveau de réchauffement considéré (+2.7 °C et +4 °C) : - Les changements suggérés varient fortement d'une projection climatique à une autre. Les évolutions des cumuls annuels de précipitation en France hexagonale et Corse présentent d'importantes incertitudes. - En moyenne, les changements projetés à l'échelle France hexagonale et Corse sont faibles (quasi nuls). Les différentes projections ne s'accordent pas sur le signe des changements, sauf dans le nord-est de la France (hausse des cumuls).	Forte	Faible
Cumul hivernal de précipitation	La majorité des projections climatiques s'accorde sur une hausse globale de la pluviométrie en hiver pour les deux niveaux de réchauffement +2.7 °C et +4 °C. Cette augmentation est plus importante dans le nord et faible, voire incertaine, dans le sud. La hausse projetée des précipitations moyennes hivernales en France hexagonale et Corse se situe autour de +20 % (entre +5 % et +35 % selon les projections) pour une France à +2.7 °C et autour de +15 % (entre +5 % et +45 %) pour une France à +4 °C. La variabilité d'une année à l'autre reste forte et des hivers qualifiés aujourd'hui de « secs » ou de « très humides » sont plausibles quel que soit le niveau de réchauffement.	Forte	Modéré à fort selon les régions
Cumul estival de précipitation	L'été se caractérise par une tendance à la diminution des précipitations à l'échelle France hexagonale et Corse. Cette diminution est particulièrement prononcée dans le sud-ouest pour les deux niveaux de réchauffement. Une incertitude sur le signe du changement est perceptible sur le quart nord-est de l'Hexagone. La baisse projetée des précipitations moyennes estivales en France hexagonale et Corse se situe autour de -10 % (entre -30 % et +5 % selon les projections) pour une France à +2.7 °C et autour de -20 % (entre -45 % et +5 % selon les projections) pour une France à +4 °C. La variabilité d'une année à l'autre reste forte et des étés qualifiés aujourd'hui de « très secs » ou de « humides » sont plausibles quel que soit le niveau de réchauffement.	Modérée	Modéré à fort
Evapotranspiration de référence	L'évapotranspiration de référence projetée est en hausse quel que soit le niveau de réchauffement. Les changements sont relativement uniformes en intensité : autour de +10 % (entre +5 % et 15 % selon les projections) pour une France à +2.7 °C et autour de +15 % (entre +10 % et +30 % selon les projections) pour une France à +4 °C.	Forte	Fort

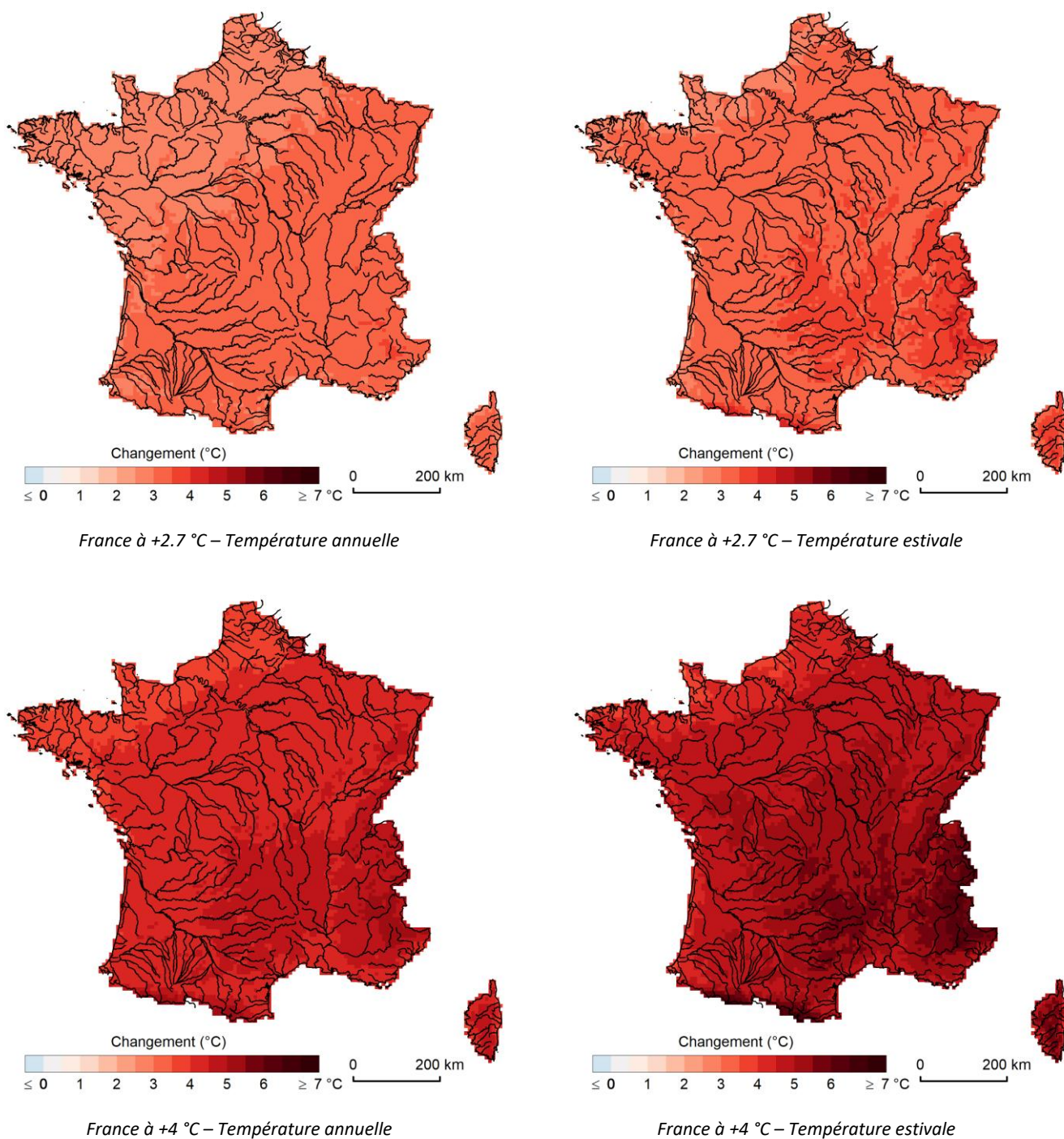


Figure 1 : Changements médians projetés pour les températures annuelle et estivale par niveau de réchauffement (référence : 1976-2005).

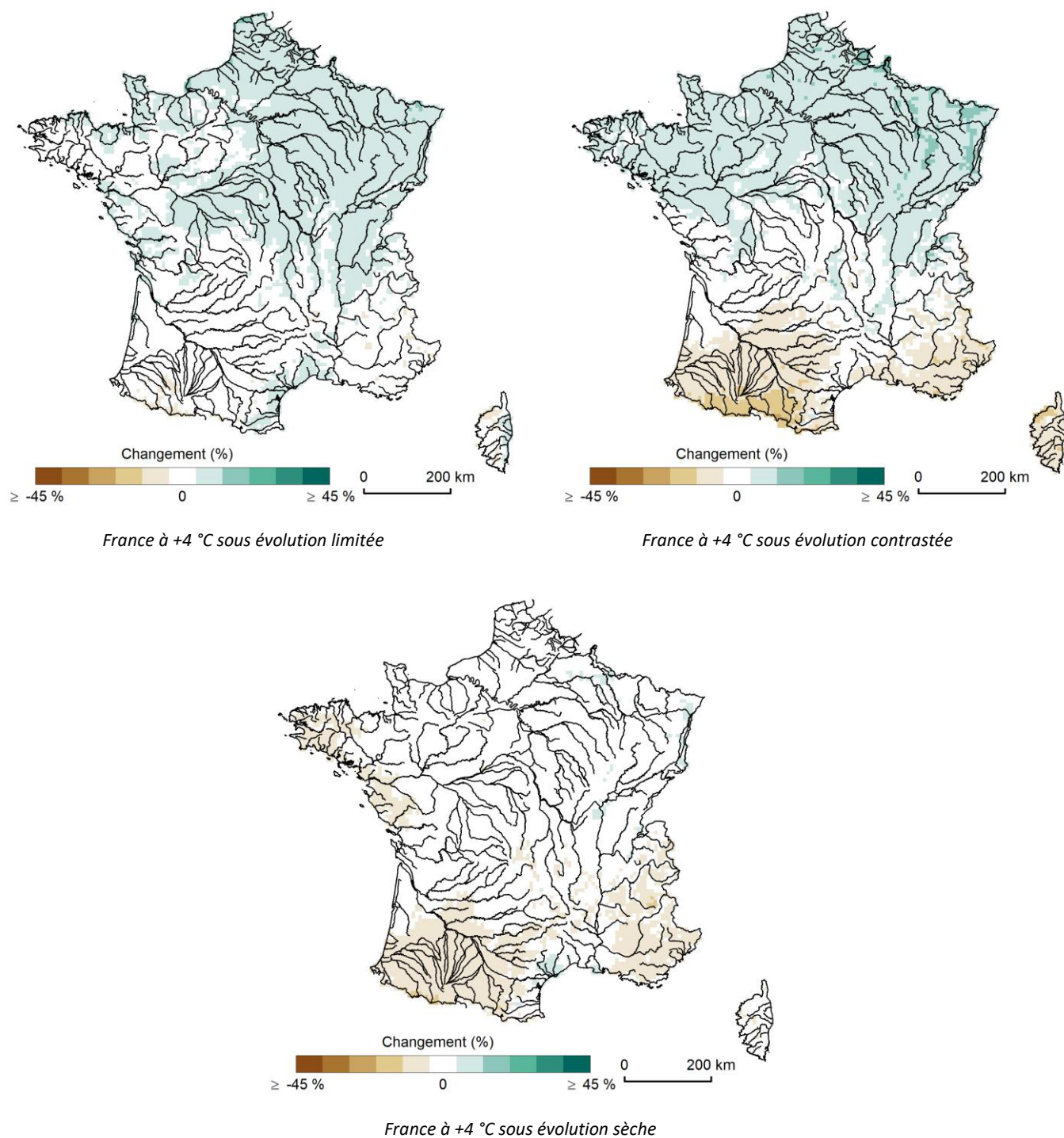


Figure 2 : Changements relatifs médians projetés pour les cumuls annuels de précipitation moyens pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005).

Des futurs de l'hydrologie par niveau de réchauffement

La ressource en eau

Variables (* : résultats illustrés par des cartes)	Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2	Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
Recharge potentielle * (part de la pluie efficace qui s'infiltre sans garantir qu'elle soit stockée dans un aquifère)	La recharge potentielle annuelle augmente globalement pour une France à +2.7 °C et +4 °C (autour de +10 %) mais avec une incertitude forte (entre -5 % et +30 %). Cette hausse est portée par une augmentation des précipitations hivernales et donc de la recharge hivernale (autour de +20 % pour une France à +2.7 °C et autour de +15 % pour une France à +4 °C). Les changements ne sont pas homogènes sur l'Hexagone. Un gradient nord-est sud-ouest est présent de manière plus ou moins affirmée pour les deux niveaux de réchauffement, qui se traduit par une hausse sur le nord-est et une baisse dans le sud-est de l'Hexagone.	Modérée à forte	Fort
Débit annuel moyen *	Pour les deux niveaux de réchauffement, les évolutions des débits annuels moyens en France hexagonale et Corse présentent d'importantes incertitudes. Les changements projetés varient fortement d'une chaîne de modélisation à une autre. Pour une France à +2.7 °C, les projections hydrologiques s'accordent sur une hausse sur près d'un tiers du territoire (au nord de la Loire). Ailleurs il n'y a pas de consensus. Pour une France à +4 °C, les projections hydrologiques s'accordent peu, hormis sur un cinquième du territoire (au sud de la Loire, dont la Corse) où la baisse est consensuelle.	Modérée à forte	Faible à modéré
Débit moyen hivernal * (décembre à février)	La majorité des projections s'accorde sur une hausse des débits en hiver sur les deux tiers nord de l'Hexagone pour une France à +2.7 °C et un tiers du territoire pour une France à +4 °C. Les augmentations sont particulièrement sensibles en montagne (Pyrénées et Alpes) du fait du changement de phase des précipitations neigeuses. Les consensus sur une baisse sont marginaux. Pour une France à +2.7 °C, l'augmentation des débits d'hiver en France hexagonale et Corse varie autour de +15 % (pour la majorité entre +10 % et +25 %). Pour une France à +4 °C, l'augmentation des débits d'hiver en France hexagonale et Corse varie autour de +10 % (pour la majorité entre 0 % et +20 %).	Modérée à forte	Modéré à fort
Débit moyen estival (juin à août)	La majorité des projections s'accorde sur une baisse des débits en été quel que soit le niveau de réchauffement. Ces baisses héritent de la hausse de l'évapotranspiration de référence, de la diminution des précipitations estivales et de la diminution du manteau neigeux, selon les régions. Pour une France à +2.7 °C, la diminution des débits d'été en France hexagonale et Corse varie autour de -5 % (pour la majorité entre -10 % et 0 %). Pour une France à +4 °C, la diminution des débits d'été en France hexagonale et Corse varie autour de -20 % (pour la majorité entre -30 % et -10 %). Les baisses les plus sensibles concernent le sud-ouest et le sud-est (-30 %) et les Alpes (-40 %).	Forte	Fort
Régime hydrologique* (synthèse des douze débits mensuels moyens interprétée en classes de fonctionnement – ex. pluvial (resp. nival) pour les cours d'eau aux débits contrôlés par les précipitations liquides (resp. solides))	Les changements de régime hydrologique en France hexagonale et Corse sont notables pour une France à +2.7 °C et +4 °C. Pour les régimes pluviaux, les contrastes seront plus affirmés entre hautes et basses eaux (hiver et été). En moyenne montagne, les régimes nivaux de transition évoluent vers des régimes à dominante pluviale. Les bassins versants en très haute montagne conserve leurs signatures nivales mais la contribution glaciaire est incertaine. Les régimes influencés par la neige sont présents sur 19 % des points de simulation sur la période 1976–2005 contre 11 % pour une France à +2.7 °C et 9 % pour une France à +4 °C.	Forte	Fort

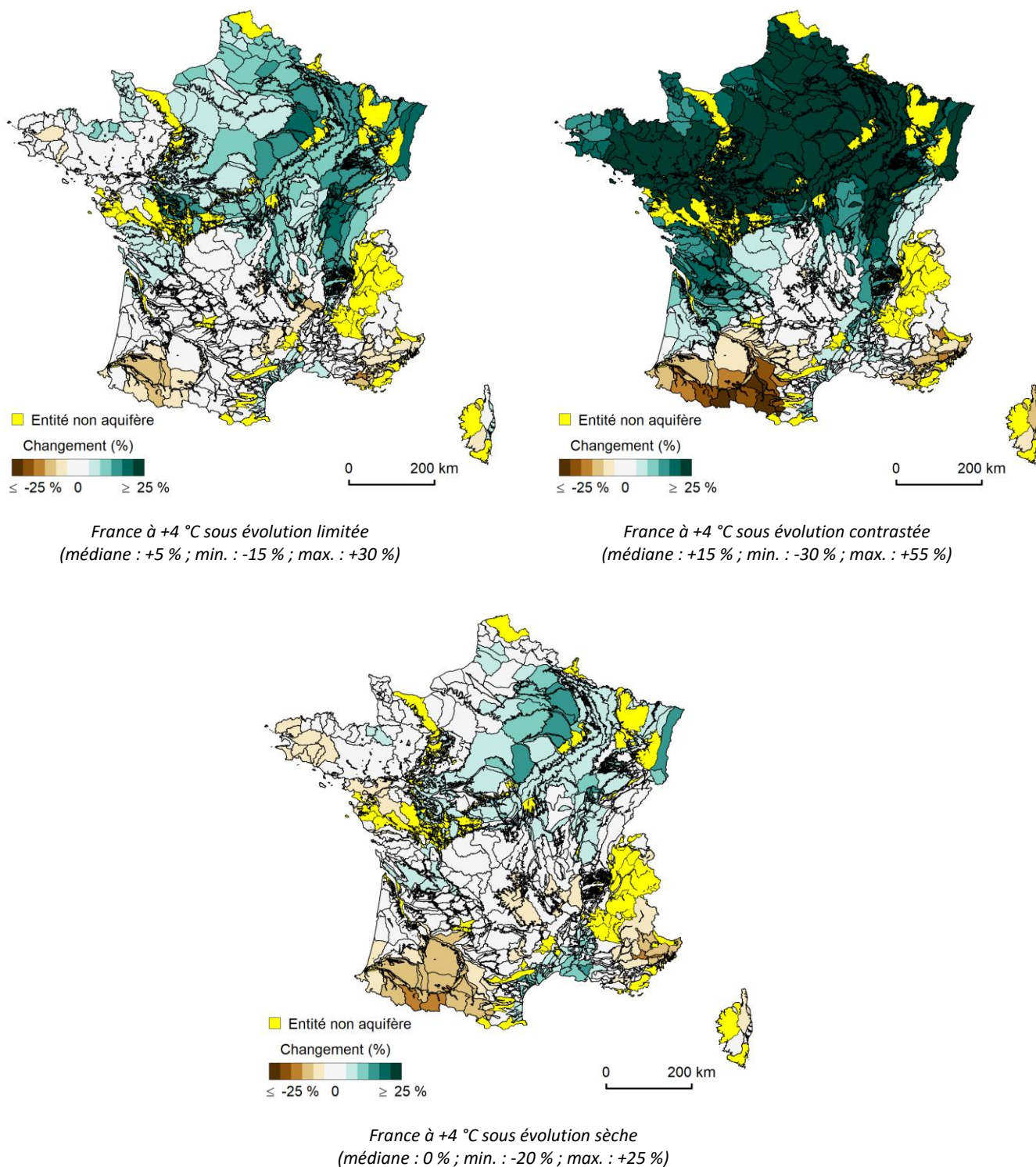


Figure 3 : Changements relatifs médians projetés ΔRA pour la recharge potentielle annuelle moyenne pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005) – En jaune sont identifiées les masses d'eau souterraine considérées comme globalement non aquifères et pour lesquelles la notion de recharge n'a pas forcément de sens à l'échelle régionale. Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔRA . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 564 valeurs ΔRA aux 564 masses d'eau souterraine associées à des aquifères présentes sur les cartes.

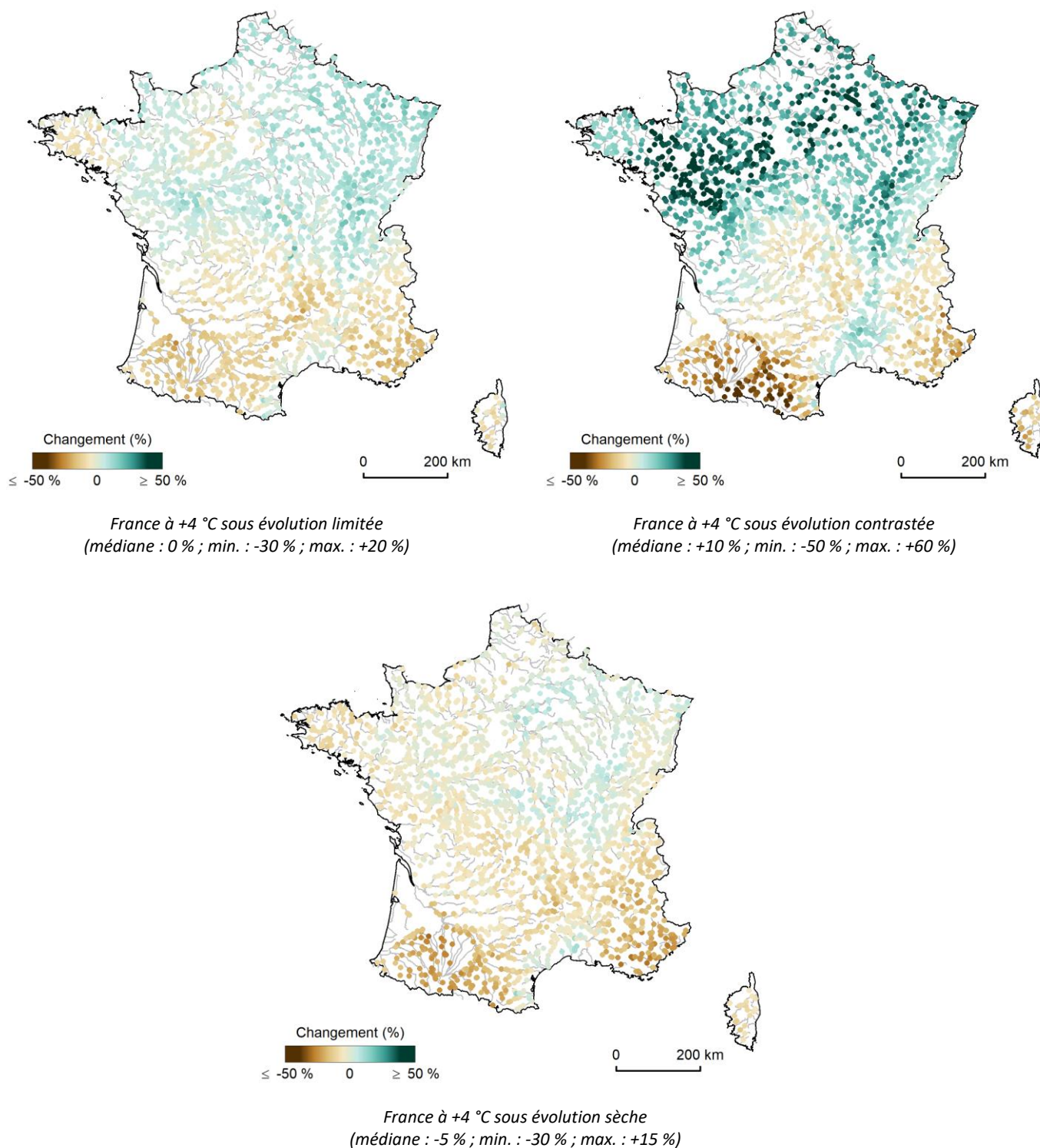


Figure 4 : Changements relatifs médians projetés ΔQA pour le débit annuel moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔQA . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs ΔQA aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.

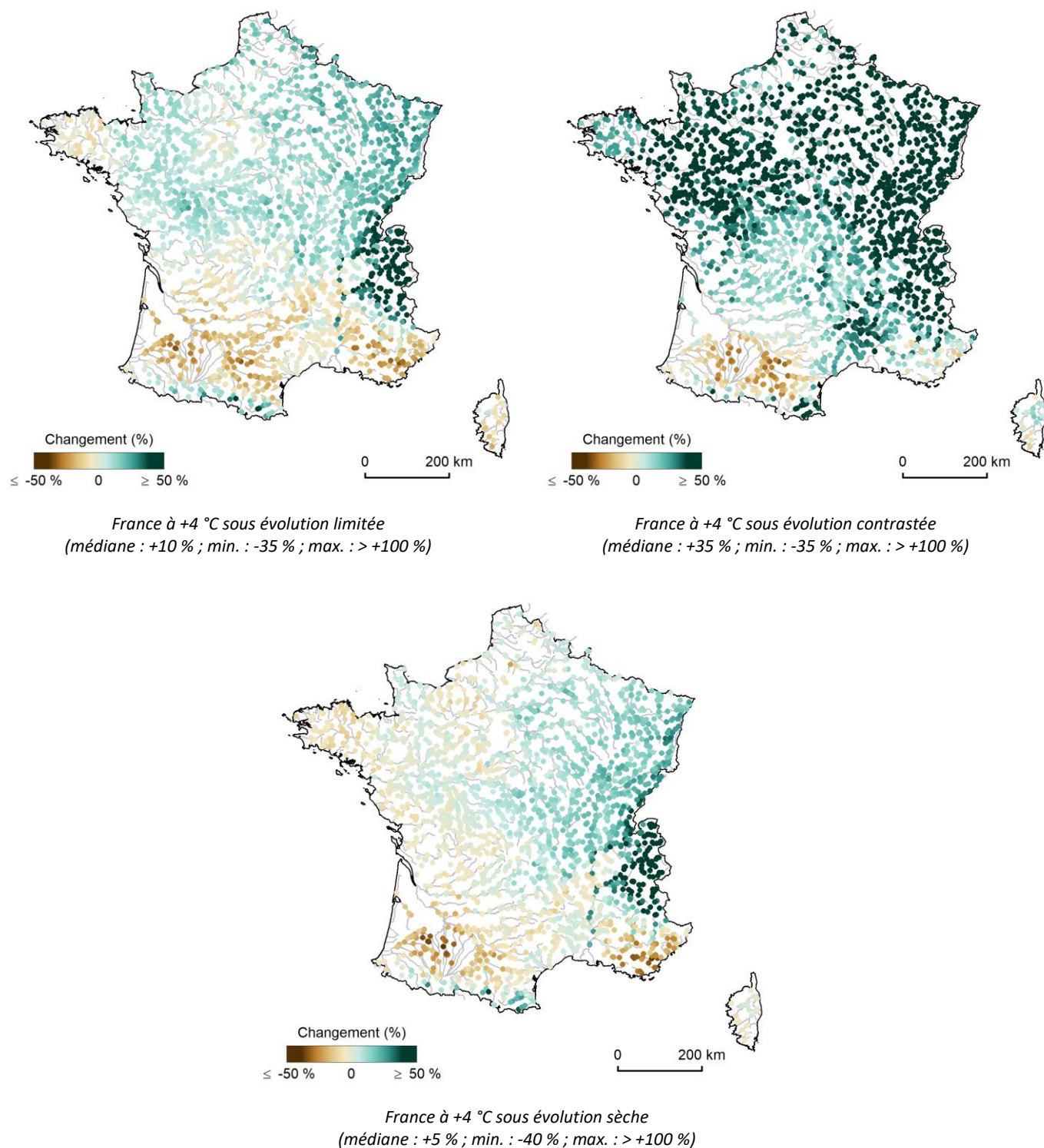


Figure 5 : Changements relatifs médians projetés ΔQ_{DJF} pour le débit d'hiver moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians ΔQ_{DJF} . Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs ΔQ_{DJF} aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.

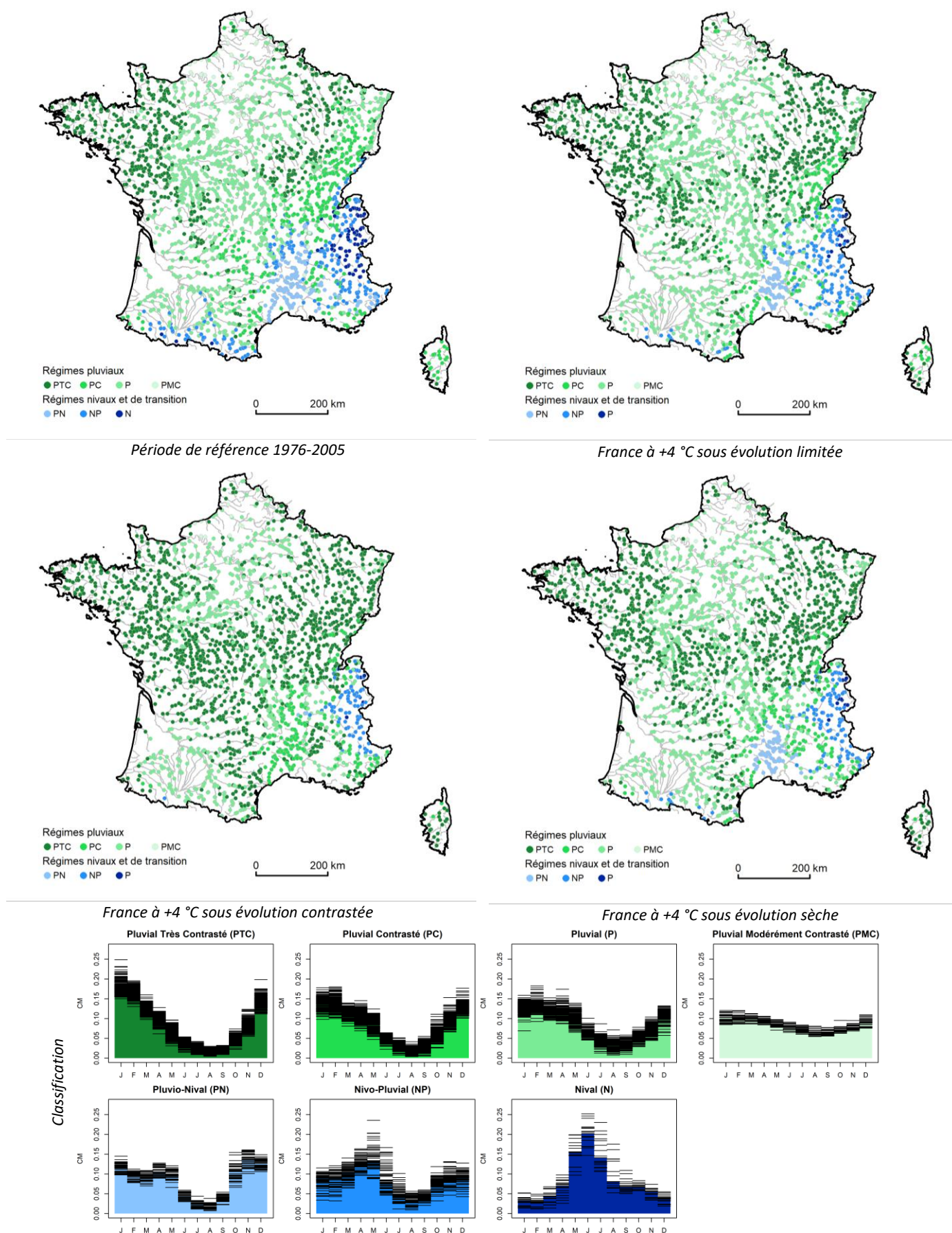


Figure 6 : Régimes hydrologiques pour la période de référence (1976-2005) et sous hypothèse d'une France à +4 °C pour les trois familles d'évolution climatique. Les cartes reposent sur les valeurs aux 2500 points de simulation disposant d'au moins quatre modèles hydrologiques. La classification décrite sous les cartes par des hydrogrammes s'appuie sur les coefficients mensuels de Pardé CM (% du volume annuel écoulé dans le mois).

Les sécheresses

Variables (* : résultats illustrés par des cartes)	Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2	Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
Sécheresse des sols*	La majorité des projections s'accorde sur une intensification des sécheresses des sols quel que soit le niveau de réchauffement. Cette intensification est plus marquée dans le sud que dans le nord. Le nombre de jours considérés comme « secs » en France hexagonale et Corse (SWI04D) augmente d'environ 24 jours pour une France à +2.7 °C (entre +2 et +41 jours selon les projections) et d'environ 39 jours (entre +23 et +68 jours selon les projections) pour une France à +4 °C.	Forte	Fort
Sécheresse hydrologique*	Cette analyse repose sur l'évolution de la moyenne des débits moyens sur 10 jours minimal sur la période 01/05 au 30/11 de chaque année civile (VCN10_{été}). Quel que soit le niveau de réchauffement (+2.7 °C et +4 °C) : Les sécheresses hydrologiques projetées seront plus sévères avec un fort accord de signe sur les trois quarts du territoire. L'exception concerne le nord de la France et les secteurs de haute montagne où des incertitudes demeurent sur le signe du changement. L'incertitude sur l'intensité des changements est importante. Pour une France à +2.7 °C, la diminution du débit d'étiage VCN10_{été} en France hexagonale et Corse varie autour de -15 % (pour la majorité entre -25 % et -10 %). Pour une France à +4 °C, la diminution du débit d'étiage VCN10_{été} en France hexagonale et Corse varie autour de -30 % (pour la majorité entre -40 % et -20 %). Les réductions sont plus sensibles dans le sud-ouest de la France (autour de -40% dans le bassin de gestion Adour-Garonne) que dans le nord-est (autour de -25% dans le bassin de gestion Rhin-Meuse).	Modérée à forte	Fort

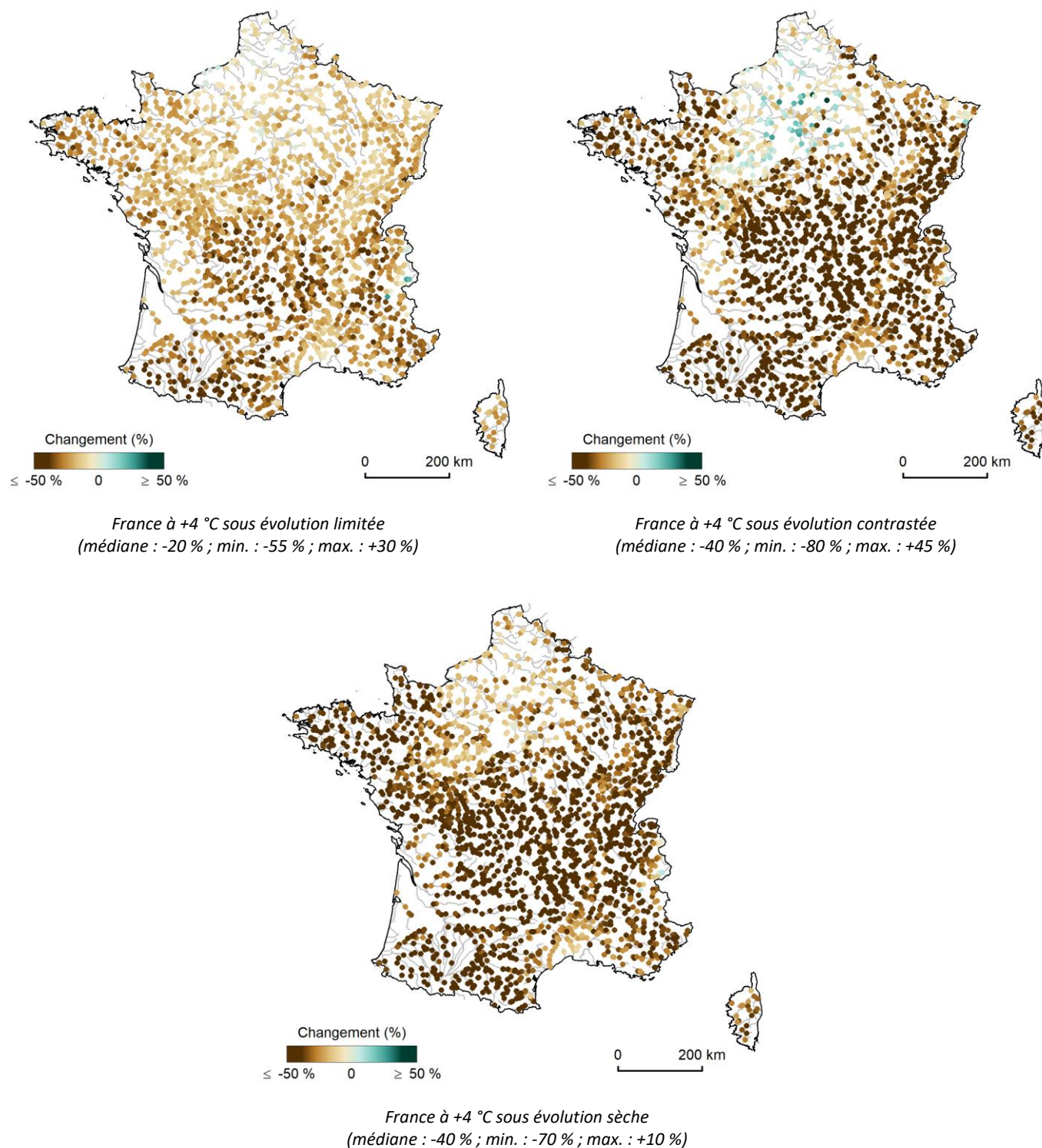


Figure 7 : Changements relatifs médians projetés $\Delta VCN10_{été}$ pour le débit d'étéage $VCN10_{été}$ moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta VCN10_{été}$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs $\Delta VCN10_{été}$ aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.

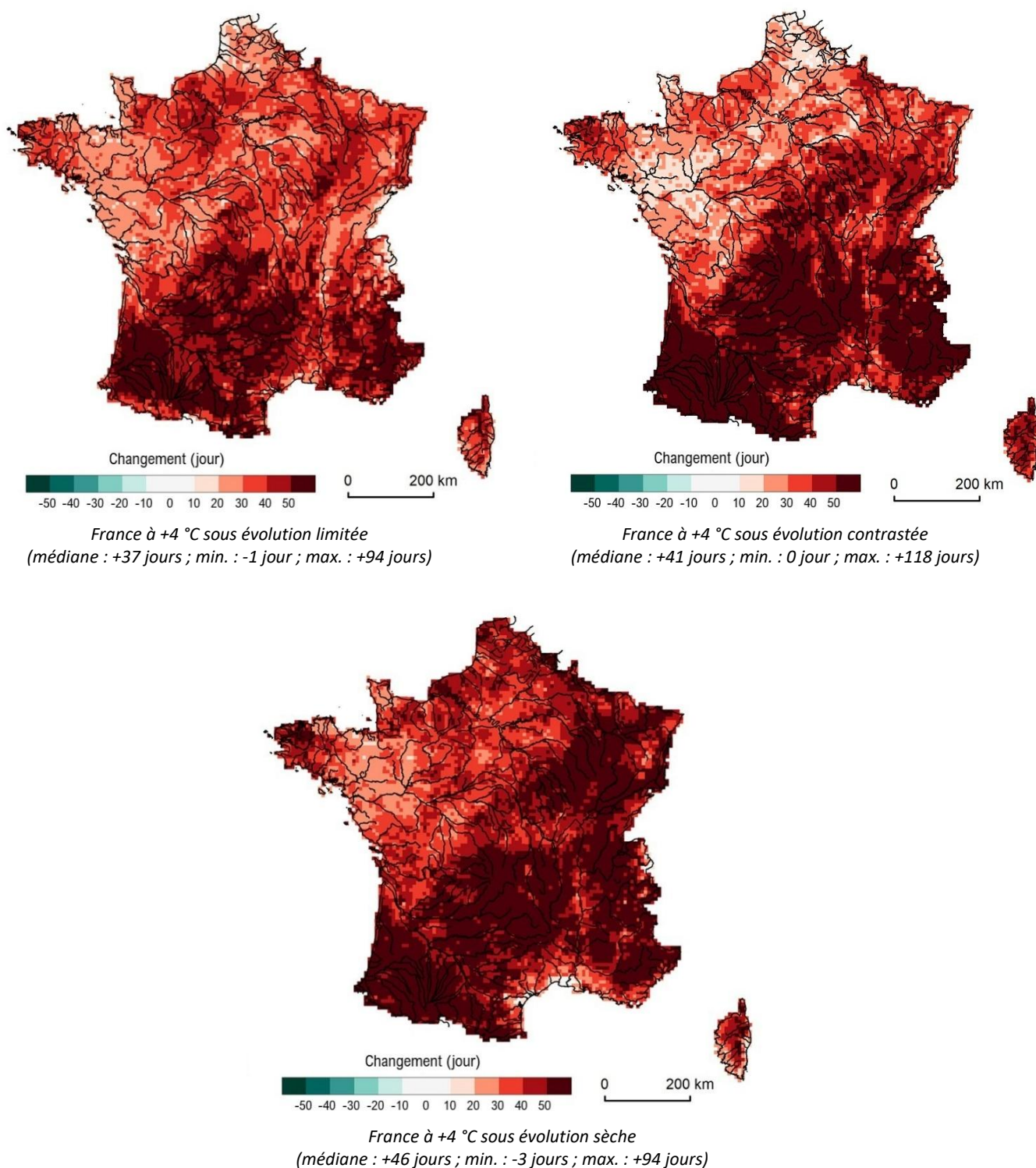


Figure 8 : Changements médians projetés $\Delta SWI04D$ pour le nombre de jours secs moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta SWI04D$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les valeurs $\Delta SWI04D$ des mailles SAFRAN.

Les crues

Variables (* : résultats illustrés par des cartes)	Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2	Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
Précipitations journalières fortes	Avertissement : Les modèles climatiques utilisés ne donnent qu'une estimation très imparfaite des changements possibles pour les pluies fortes. En particulier, ils ne permettent pas d'estimer les changements aux échelles locales (les modèles utilisés ne simulent pas les pluies convectives). Cette analyse repose sur l'évolution de la moyenne des pluies journalières maximales annuelles (PJXA). Indépendamment de la limitation énoncée ci-dessus, quel que soit le niveau de réchauffement (+2.7 °C et +4 °C) : • Globalement, les projections suggèrent une augmentation de la moyenne des PJXA avec un consensus sur le changement de signe quasi général (les exceptions concernent principalement les régions Occitanie, Corse et Provence-Alpes-Côte d'Azur). • L'incertitude sur l'intensité des changements est importante. Pour une France à +2.7 °C, la hausse de la moyenne des PJXA en France hexagonale et Corse varie autour de +10 % (entre +5 % et +15 % selon les projections). Pour une France à +4 °C, la hausse de la moyenne des PJXA en France hexagonale et Corse varie autour de +15 % (entre +10 % et +30 % selon les projections). Un gradient d'intensité des changements nord-sud est perceptible avec des hausses les plus importantes au nord de la France (localement +30 %).	Modérée à forte	Fort
Crues*	Avertissement : Les modèles climatiques utilisés ne donnent qu'une estimation très imparfaite des changements possibles pour les pluies fortes. Par conséquent, ils donnent une estimation très imparfaite des changements possibles pour les crues. En particulier, ils ne permettent pas d'estimer les changements aux échelles locales (et donc pour les petits bassins versants). Cette analyse repose sur l'évolution de la moyenne des débits journaliers maximaux annuels (QJXA), correspondant à une crue fréquente (de période de retour entre 2 et 5 ans). Indépendamment de la limitation énoncée ci-dessus, quel que soit le niveau de réchauffement (+2.7 °C et +4 °C), les projections suggèrent une augmentation de la moyenne des QJXA avec un consensus sur le changement de signe sur la partie nord du territoire. La hausse de la moyenne des QJXA en France hexagonale et Corse varie autour de +15 % pour les deux niveaux de réchauffement +2.7 °C et +4 °C. Les incertitudes sur l'intensité des changements sont importantes et plus grandes que sur l'intensité des changements projetés pour les pluies fortes (sous hypothèse d'une France à +4 °C, entre -20 % et +50 % pour la moyenne des QJXA contre entre +10 % et +30 % pour la moyenne des PJXA, selon les projections).	Faible à modérée	Faible

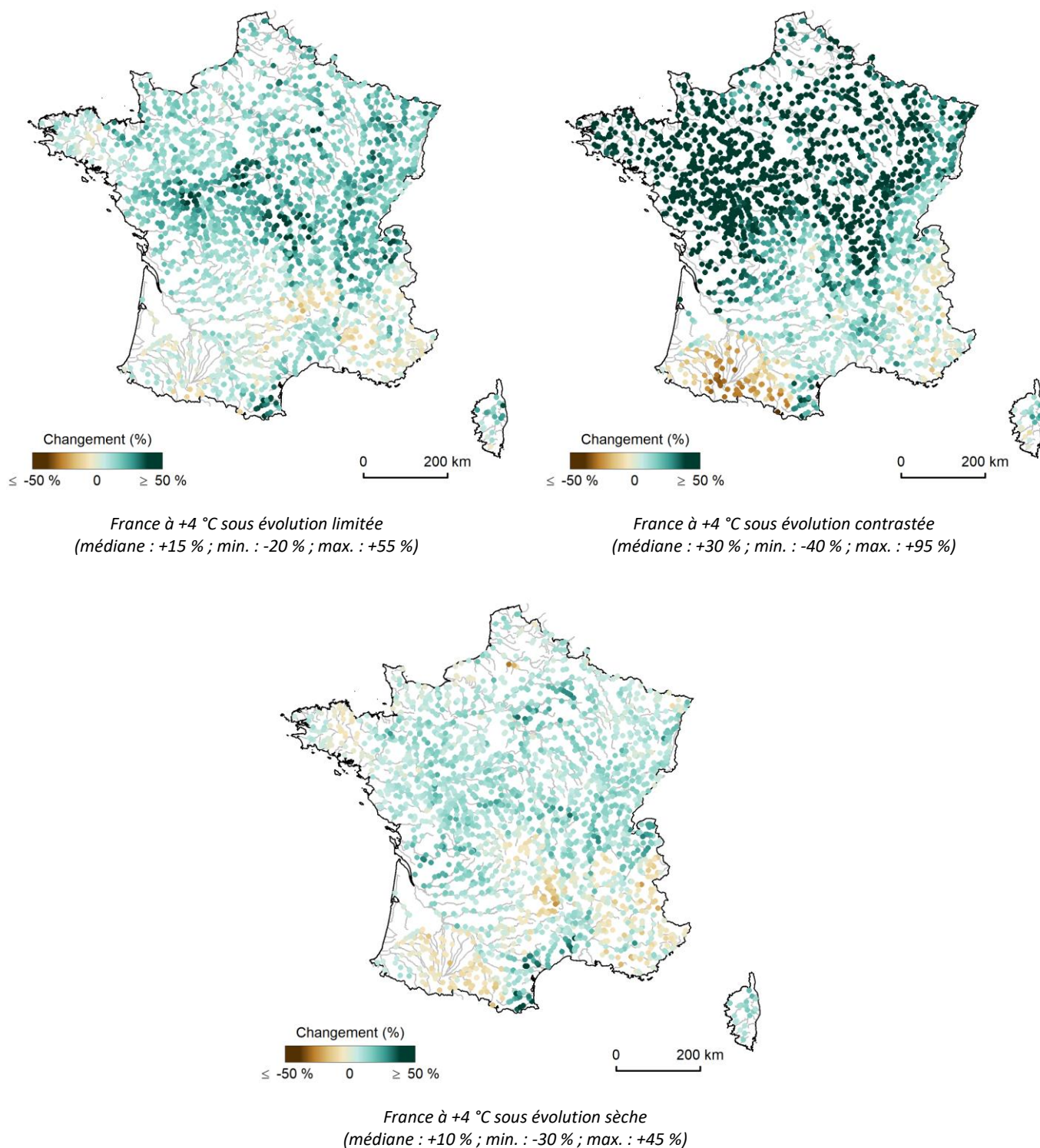


Figure 9 : Changements relatifs médians projetés $\Delta QJXA$ pour le débit de crue $QJXA$ moyen pour les trois familles d'évolution climatique sous hypothèse d'une France à +4 °C (référence : 1976-2005). Les statistiques reportées sous chaque carte décrivent la variabilité spatiale des changements médians $\Delta QJXA$. Ce sont les médianes, minimums et maximums calculés sur les 2500 valeurs $\Delta QJXA$ aux 2500 points de simulation présents sur les cartes.

Messages et enseignements

Les avancées scientifiques d'Explore2

- Le projet Explore2 a produit un ensemble de projections inédit : inédit en termes de richesse de modèles appliqués, de résolution spatiale et temporelle, qui n'a pas d'équivalent en Europe, grâce à une communauté de recherche mobilisée et fédérée autour des enjeux du changement climatique.
- Les modèles appliqués dans le cadre du projet Explore2 le sont dans leur forme la plus aboutie. Ils sont néanmoins perfectibles. De nombreux verrous scientifiques restent par exemple à lever pour réduire l'incertitude sur le climat et l'hydrologie (intégration des phénomènes de convection dans les projections climatiques, effet de la hausse de la concentration en CO₂ et ses répercussions sur l'évaluation de l'évapotranspiration réelle, identification et prise en compte des échanges nappe-rivière actifs, représentation de la dynamique du manteau neigeux et des glaciers...) et pour progresser, notamment sur la résolution spatiale et temporelle des simulations.
- A terme, les modèles doivent également prendre en compte les actions anthropiques pour intégrer des scénarios de gestion et d'usage de l'eau et représenter le cycle de l'eau altéré par les actions humaines. Les recherches se poursuivent autour de la qualité de l'eau, la thermie en rivière et les impacts sur les milieux, pour leur intégration dans les modèles et un déploiement à l'échelle nationale.

Les enseignements pour la TRACC

- Les effets du changement climatique seront d'autant plus sévères que le réchauffement sera important.
- Les incertitudes et la dispersion des résultats (hors température annuelle moyenne) sont plus importantes pour le niveau de réchauffement le plus élevé.
- Selon les projections Explore2,
 - La recharge potentielle annuelle des aquifères augmente globalement pour une France à +2.7 °C et +4 °C mais avec une incertitude forte et une grande hétérogénéité spatiale.
 - Une France à +2.7 °C ou à +4 °C sera soumise à une nouvelle distribution – certainement plus contrastée - des écoulements au fil des saisons.
 - Le changement climatique conduira à des sécheresses édaphiques et hydrologiques plus sévères (confiance forte). Il induira 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 de la Corse.
 - L'évolution future des débits de crue est incertaine (confiance faible à modérée sur les résultats), compte tenu des limitations des modèles climatiques utilisés dans le cadre d'Explore2 (estimation très imparfaite des changements possibles pour les pluies fortes). Néanmoins, notons que selon les rapports du GIEC, les scientifiques s'attendent, pour beaucoup de régions du monde, à une augmentation de l'intensité des pluies extrêmes et des crues.
- Compte tenu des recouvrements entre fenêtres temporelles associées aux niveaux de réchauffement et horizons moyen et lointain des précédentes analyses du projet Explore2, **les messages sont cohérents avec les conclusions des analyses des projections hydrologiques réalisées par horizon sous RCP8.5** (Sauquet *et al.*, 2024).

- **La gestion de l'eau d'hier et celle de demain devront être nécessairement différentes pour s'adapter au changement des régimes hydrologiques quel que soit le niveau de réchauffement.**

Références

Hérait L., Sauquet E., Torrémocha A., Calmel B., Vidal J.-P. (2025). Analyse des débits et de la recharge potentielle des aquifères par niveau de réchauffement et par secteur hydrographique — Fiche de synthèse, <https://doi.org/10.57745/QDCSBZ>, Recherche Data Gouv.

Sauquet *et al.* (2024). Messages et enseignements du projet Explore2, <https://doi.org/10.57745/J3XIPW>, Recherche Data Gouv.

Sauquet E., Torrémocha A., Hérait L., Vidal J.-P., Calmel B. (2025a). Notice de lecture des fiches des changements hydrologiques (recharge et débit) par niveau de réchauffement, <https://doi.org/10.57745/FGAOCD>, Recherche Data Gouv.

Sauquet *et al.* (2025b). Évolution de l'hydrologie de surface en France par niveau de réchauffement, <https://doi.org/10.57745/MN29RG>, Recherche Data Gouv.

Soubeyroux *et al.* (2024). A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Partie 1. Météo-France <[hal-04797481v3](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04797481v3)>.

Soubeyroux *et al.* (2025). A quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Partie 2. Météo-France <[hal-04991790v3](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04991790v3)>.