



MESSAGES ET ENSEIGNEMENTS DU PROJET EXPLORE2

Eric SAUQUET (INRAE), Guillaume EVIN (INRAE), Sonia SIAUVE (OiEau),
Audrey BORNANCIN-PLANTIER (OiEau), Natacha JACQUIN (OiEau),
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 (CNRS, IPSL), Maïté FOURNIER (ACTeon), Joël GAILHARD
(EDF), Florence HABETS (ENS), Frédéric HENDRICKX (EDF), Louis HERAUT
(INRAE), Benoît HINGRAY (CNRS, IGE), Peng HUANG (Sorbonne université),
Tristan JAOUEN (INRAE), Alexis JEANTET (Météo-France),
Sandra LANINI (BRGM), Matthieu LE LAY (EDF), Sarah LOUDIN (ACTeon),
Claire MAGAND (OFB), Paula MARSON (Météo-France), Louise MIMEAU
(INRAE), Céline MONTEIL (EDF), Simon MUNIER (Météo-France),
Charles PERRIN (INRAE), Alix REVERDY (IGE), Olivier ROBELIN (INRAE),
Yoann ROBIN (LSCE), Fabienne ROUSSET (Météo-France),
Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France), Laurent STROHMENGER
(INRAE), Soulivanh THAO (CNRS, IPSL), Guillaume THIREL (INRAE),
Flore TOCQUER (Météo-France), Yves TRAMBLAY (IRD), Jean-Pierre
VERGNES (BRGM), Jean-Philippe VIDAL (INRAE), Mathieu VRAC (CNRS, IPSL)

28/06/2024

Avec le soutien financier de :



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

Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des 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	Messages et enseignements du projet Explore2
Auteur(s)	Collectif
Numéro de version	4
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2024
Date effective de remise du livrable	28/06/2024
Statut du document	version provisoire /version finale
Accès en ligne	libre/ confidentiel
Mots-clés (5 maximum)	débit, changement climatique, piézométrie, accompagnement

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), 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 : Fondements et limites des messages

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 et hydrologiques les plus récentes disponibles au début du projet.
2. **Les projections sont le résultat de simulations numériques effectuées à l'aide de modèles climatiques et hydrologiques. Ces modèles sont imparfaits** (pour pouvoir le simuler, il est nécessaire de simplifier le système climatique ou le bassin versant, qui sont tous deux complexes). Pour illustrer les incertitudes liées à ces modèles, Explore2 considère un ensemble de 17 projections climatiques régionales (basées sur 9 modèles régionaux forcés par 6 modèles globaux) et un ensemble de projections hydrologiques (basées sur 1 à 9 modèles hydrologiques selon le bassin versant).
3. **Pour toutes les variables climatiques et hydrologiques, les changements à attendre seront d'autant plus sévères que les émissions de gaz à effet de serre seront fortes.** 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 possibles du climat, la communauté scientifique travaille avec des scénarios d'émissions. Dans Explore2, nous considérons 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).
4. **Les changements projetés dans Explore2 comprennent des incertitudes : les changements projetés dépendent du scénario d'émissions 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 augmentant pour certaines projections, diminuant 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, étages estivaux - intensification).
5. **Les changements projetés correspondent aux différences entre des climats futurs possibles et le climat passé. Ils représentent des changements de fond. Il faut garder en tête que 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.** Par exemple, il faut idéalement :

- a. **Considérer la confiance** que les scientifiques accordent aux projections (elle dépend de la variable d'intérêt), considérer **l'accord entre modèles** (par exemple, 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**,
- c. **Privilégier les approches plurielles et considérer des projections contrastées** : pour Explore2, quatre projections climatiques (quatre narratifs) sont mises en exergue à cet effet. Elles décrivent quatre histoires climatiques pour la fin de siècle, plausibles et contrastées. L'ensemble Explore2 peut aussi être utilisé pour construire des narratifs contrastés pour l'hydrologie.

7. Il ne faut pas surinterpréter les résultats qui ont été ou qui peuvent être dérivés 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, obtenus pour des scénarios choisis d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols.
- 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, il ne faut pas donner à des différences entre bassins versants voisins une valeur qu'elles n'ont pas forcément. Il peut être plus pertinent de considérer les évolutions moyennes projetées à l'échelle d'un territoire élargi englobant la localité ou le 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 spécificités particulières des bassins versants s'il en est, ni les effets des aménagements hydrauliques ou 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 vraiment dans les décennies à venir.** En effet, les émissions futures seront différentes de celles des scénarios. Certains phénomènes ou mécanismes ne sont pas (ou sont mal) 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.

A l'attention des lectrices et lecteurs

L'expertise des résultats montre que les effets du changement climatique seront d'autant plus sévères que les émissions de gaz à effet de serre seront importantes.

De ce fait, dans ce document :

- **Seuls deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont considérés ici** : le scénario RCP4.5 qualifié de « scénario d'émissions modérées » et le scénario RCP8.5 qualifié de « scénario de fortes émissions ». Nous renvoyons le lecteur vers les rapports techniques et autres supports pour plus de détails concernant les résultats concernant le scénario le moins émetteur.
- **Seuls deux horizons temporels futurs sont considérés ici** : 2041-2070 (dans la suite : « milieu de siècle ») et 2071-2100 (dans la suite : « fin de siècle »).
- **Les changements sont estimés par rapport à la période de référence 1976-2005.**
- **Les messages concernent uniquement la France hexagonale.**
- **Les changements indiqués ci-dessous s'appuient sur les résultats présentés dans l'un ou l'autre des rapports Explore2.**
- **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 modèles 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).
- **Pour chaque variable hydroclimatique, un degré de confiance est associé aux évolutions projetées dans Explore2.** Il dépend de l'accord entre les modèles 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 (faible, moyenne et forte).
- **Les graphiques privilégient les résultats obtenus avec les quatre narratifs d'Explore2 (vision contrastée des futurs sous le scénario de fortes émissions) en fin de siècle.** Ils illustrent la diversité des futurs possibles. Leur qualification est relative à l'ensemble de projections élaborées dans le cadre du projet :
 - le narratif vert : réchauffement marqué et augmentation des précipitations,
 - le narratif jaune : changements futurs relativement peu marqués,
 - le narratif violet : fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations,
 - le narratif orange : fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel).

A noter : Si les narratifs présentent des futurs contrastés en fin de siècle, les futurs qu'ils décrivent en milieu de siècle ne le sont pas forcément. Dans les rapports du projet, les résultats obtenus avec ces narratifs sont parfois aussi présentés pour le milieu de siècle. Ils ne doivent pas être sur-interprétés; en particulier, ils ne permettent pas forcément de donner une bonne idée de la diversité

des changements possibles pour cette période... Les résultats en milieu de siècle sont indiqués à titre informatif pour donner une idée de leur positionnement dans l'ensemble.

- Les rapports techniques du projet Explore2 sont disponibles au téléchargement à l'adresse suivante : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/explore2>

Des futurs du climat selon Explore2

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 moyenne annuelle *	Le réchauffement moyen en France hexagonale se poursuivra, avec une forte différenciation à partir du milieu de siècle entre les scénarios d'émissions modérées ou de fortes émissions. En fin de siècle pour le scénario de fortes émissions : - Le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +4°C (entre +3°C et +5.5°C selon les modèles). - Des températures plus élevées de l'ordre de +1.5°C sont projetées dans le sud-est du pays par rapport au nord-ouest.	Forte	Fort
Température moyenne hiver	Le réchauffement moyen est légèrement moins marqué que pour la température moyenne annuelle. En fin de siècle, pour le scénario de fortes émissions, le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +3.5°C (entre +3°C et +4.5°C selon les projections).	Forte	Fort
Température moyenne été	L'été est la saison où le réchauffement moyen à l'échelle France est le plus intense. En fin de siècle, pour le scénario de fortes émissions, le réchauffement moyen projeté à l'échelle France est de l'ordre de +4.5°C (entre +3.5°C et +7°C selon les projections).	Forte	Fort
Cumul annuel de précipitation *	Les évolutions des cumuls annuels de précipitation en France hexagonale présentent d'importantes incertitudes. Les changements projetés varient fortement d'un modèle à un autre et la dispersion augmente avec l'horizon temporel. En moyenne, les changements projetés à l'échelle France sont faibles (proches de zéro). A de rares exceptions régionales près, les différentes projections ne s'accordent pas sur le signe des changements. Ces exceptions concernent le nord-est de la France (hausse des cumuls), et le sud-est et près des Pyrénées (baisse des cumuls) et concernent uniquement le scénario de fortes émissions.	Forte	Faible
Cumul hivernal de précipitation	La majorité des projections s'accorde sur une hausse de la pluviométrie en hiver pour les deux scénarios d'émissions. En fin de siècle et pour le scénario de fortes émissions, la hausse projetée des précipitations moyennes hivernales en France se situe autour de +20 % (entre +10 % et +45 %). Elle est plus importante dans le nord et faible, voire incertaine, dans le sud. La variabilité d'une année à l'autre reste forte et des hivers secs ou très humides sont possibles, quels que soient les scénarios et horizons considérés.	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. Cette diminution est particulièrement prononcée dans le sud-ouest en fin de siècle pour les deux scénarios d'émissions. En fin de siècle et pour le scénario de fortes émissions, les valeurs médianes projetées du changement à l'échelle France atteignent près de -25 % (entre -50 % et +5 %). La diminution est plus marquée sur le sud-ouest et le sud-est. La variabilité d'une année à l'autre des cumuls estivaux est importante et des étés très secs ou humides sont possibles, quels que soient les scénarios et horizons considérés.	Modérée	Modéré à fort
Evapotranspiration de référence	L'évapotranspiration de référence projetée est en hausse dans les deux scénarios d'émissions pour les deux horizons sur l'ensemble du territoire. Ces évolutions sont relativement uniformes en intensité : autour de +25 % (10 % à plus de 40 %) en fin de siècle.	Forte	Fort

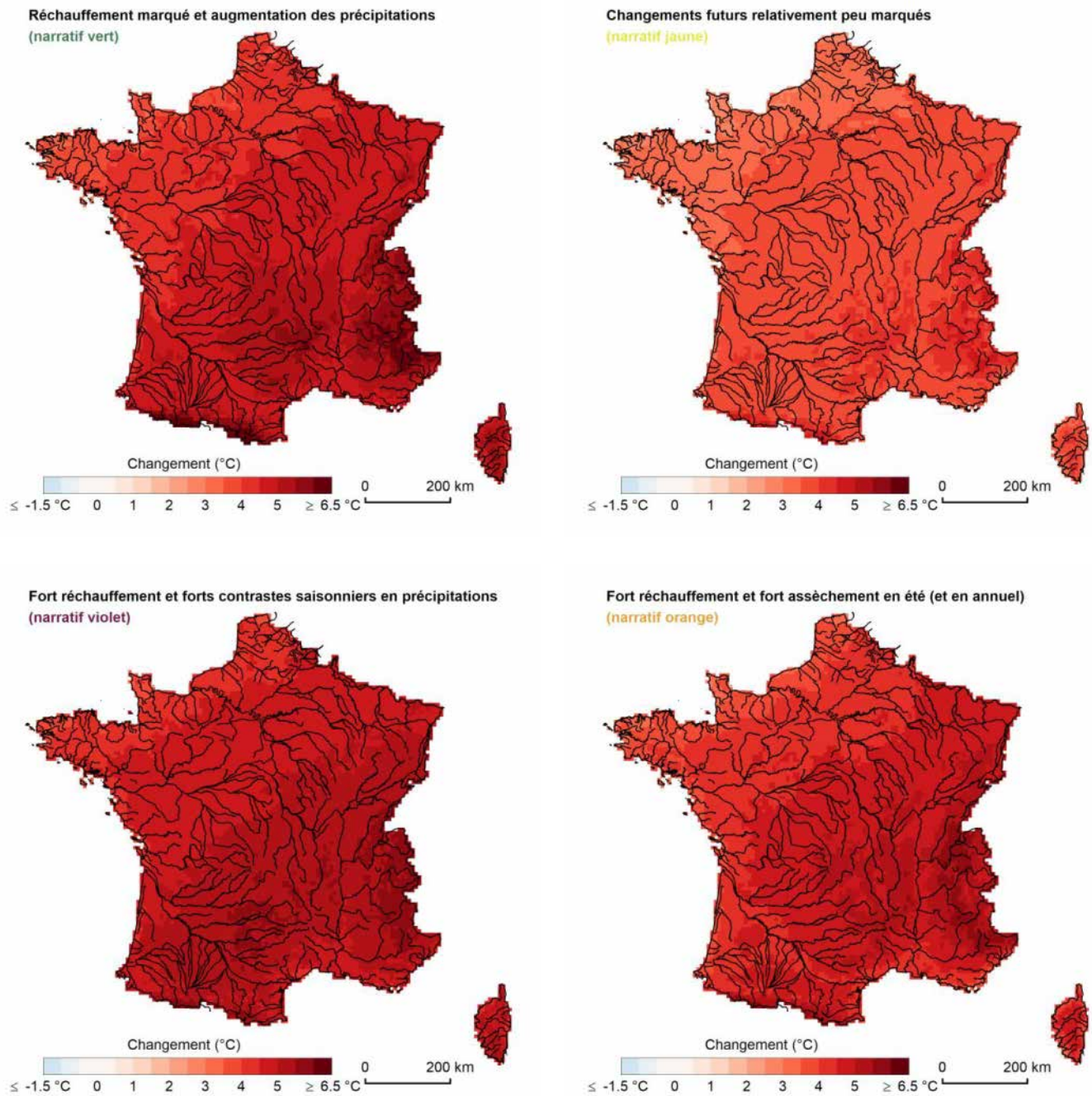


Figure 1 : Changements projetés pour la température moyenne annuelle pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005)

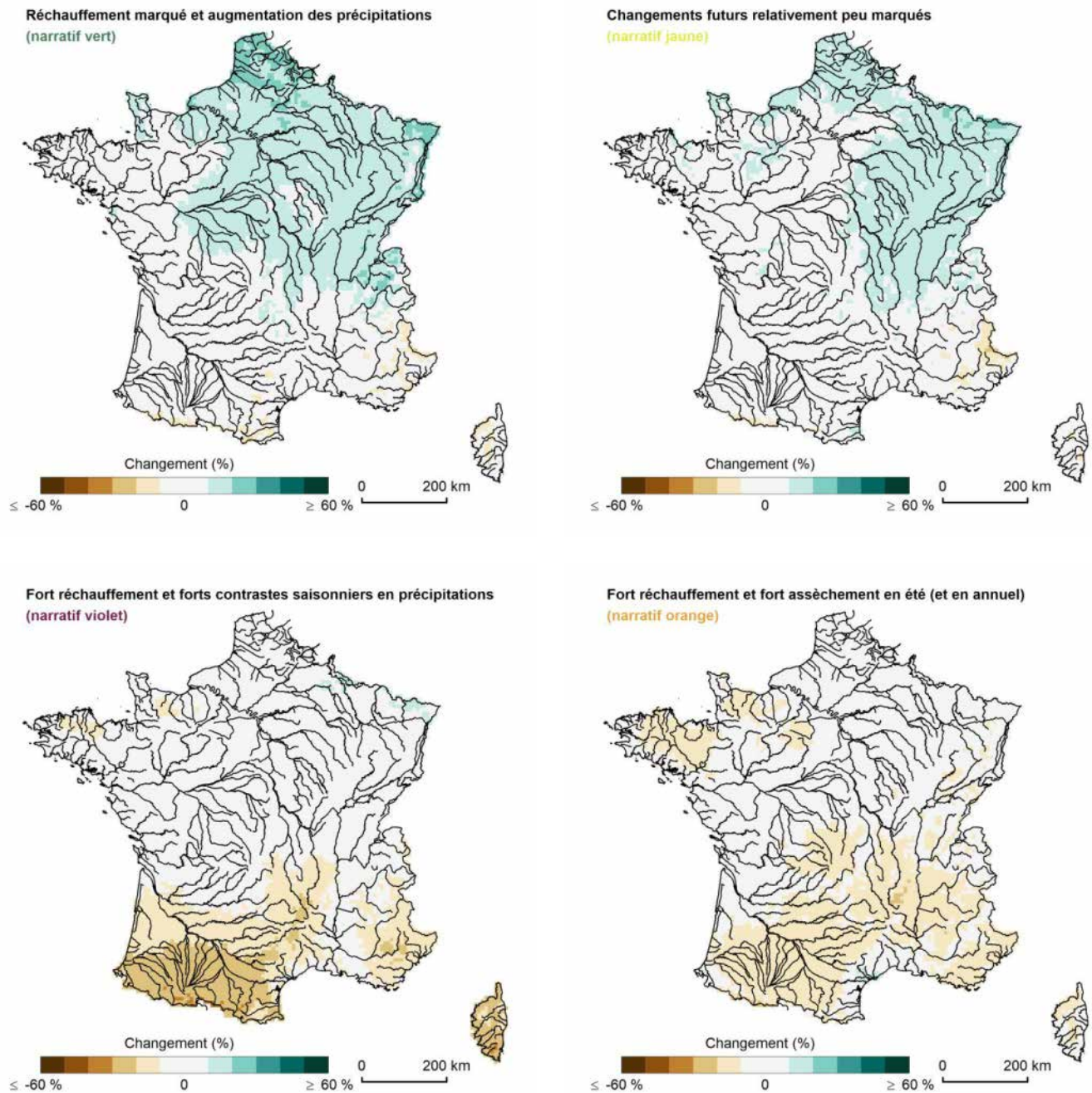


Figure 2 : Changements projetés pour les cumuls annuels de précipitation pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005)

Des futurs de l'hydrologie selon Explore2

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)	Pour les deux scénarios d'émissions : - La recharge potentielle annuelle augmente légèrement en fin de siècle dans le nord et le nord-est de la France et semble globalement stable sur le reste du pays, - La recharge potentielle hivernale augmente en milieu et fin de siècle pour quasiment toute la France, hormis une frange sud et une partie de la Bretagne. La saisonnalité de la recharge potentielle ne présente pas de changement notable en France hexagonale à quelques exceptions près (pour le scénario de fortes émissions, le maximum de recharge est avancé sur les massifs alpins et pyrénéens en réponse à la dynamique modifiée du manteau neigeux ; la recharge est retardée sur le pourtour méditerranéen).	Modérée à forte	Fort Fort Modéré
Débit annuel moyen	Pour les deux scénarios d'émission, les évolutions des débits annuels moyens en France hexagonale présentent d'importantes incertitudes. A de rares exceptions régionales, les différentes projections ne s'accordent pas sur le signe des changements. Les exceptions concernent la partie sud (Pyrénées et ses contreforts et Alpes du Sud) avec des baisses importantes (autour de -25 % dans ces secteurs) en fin de siècle sous scénario de fortes émissions. Les changements projetés varient fortement d'une chaîne de modélisation à une autre et la dispersion augmente avec l'horizon temporel (sur certains bassins du nord de la France de -30 % à +75% et sur certains bassins du sud de -75 % à +60 %).	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 pour les deux scénarios d'émissions. En fin de siècle et pour le scénario d'émissions modérées, la hausse des débits d'hiver en France hexagonale se situe autour de +15 % (pour la majorité entre +5 % et +30 %). Sous scénario de fortes émissions, en fin de siècle, les contrastes en France hexagonale sont plus marqués. Les hausses sont majoritaires (médiane autour de +10 %) mais des secteurs voient leurs débits hivernaux chuter (cours d'eau de plaine dans le sud-ouest, autour de -10 %). Les augmentations sont particulièrement sensibles en montagne (Pyrénées et Alpes) du fait du changement de phase des précipitations neigeuses.	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 pour les deux scénarios d'émissions. 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. En fin de siècle et pour le scénario d'émissions modérées, la baisse des débits d'été en France se situe autour de -15 % (pour la majorité entre -25 % et 0). Sous scénario de fortes émissions, en fin de siècle, les baisses en France hexagonale sont plus marquées (-30 % en médiane, avec une majorité entre -50 % et -15 %). Les baisses les plus sensibles concernent le sud-ouest (-50 %), les Alpes (-50 %) et le secteur méditerranéen (-40 %).	Forte	Fort

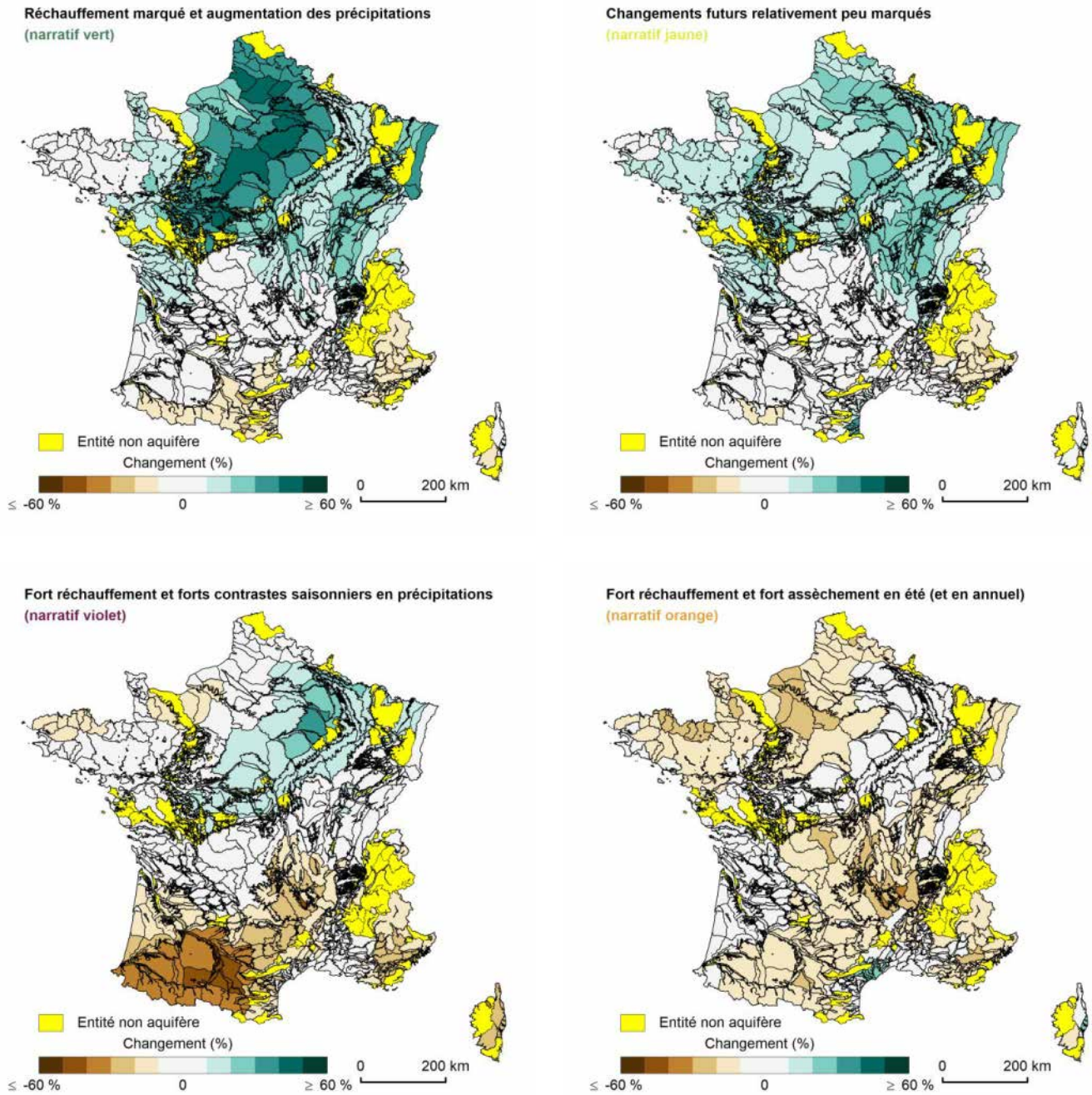


Figure 3 : Changements projetés pour la recharge potentielle moyenne hivernale pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005) – En jaune sont identifiées les masses d'eau souterraine considérées comme globalement non aquifères et pour lesquelles la notion de recharge n'a pas forcément de sens à l'échelle régionale

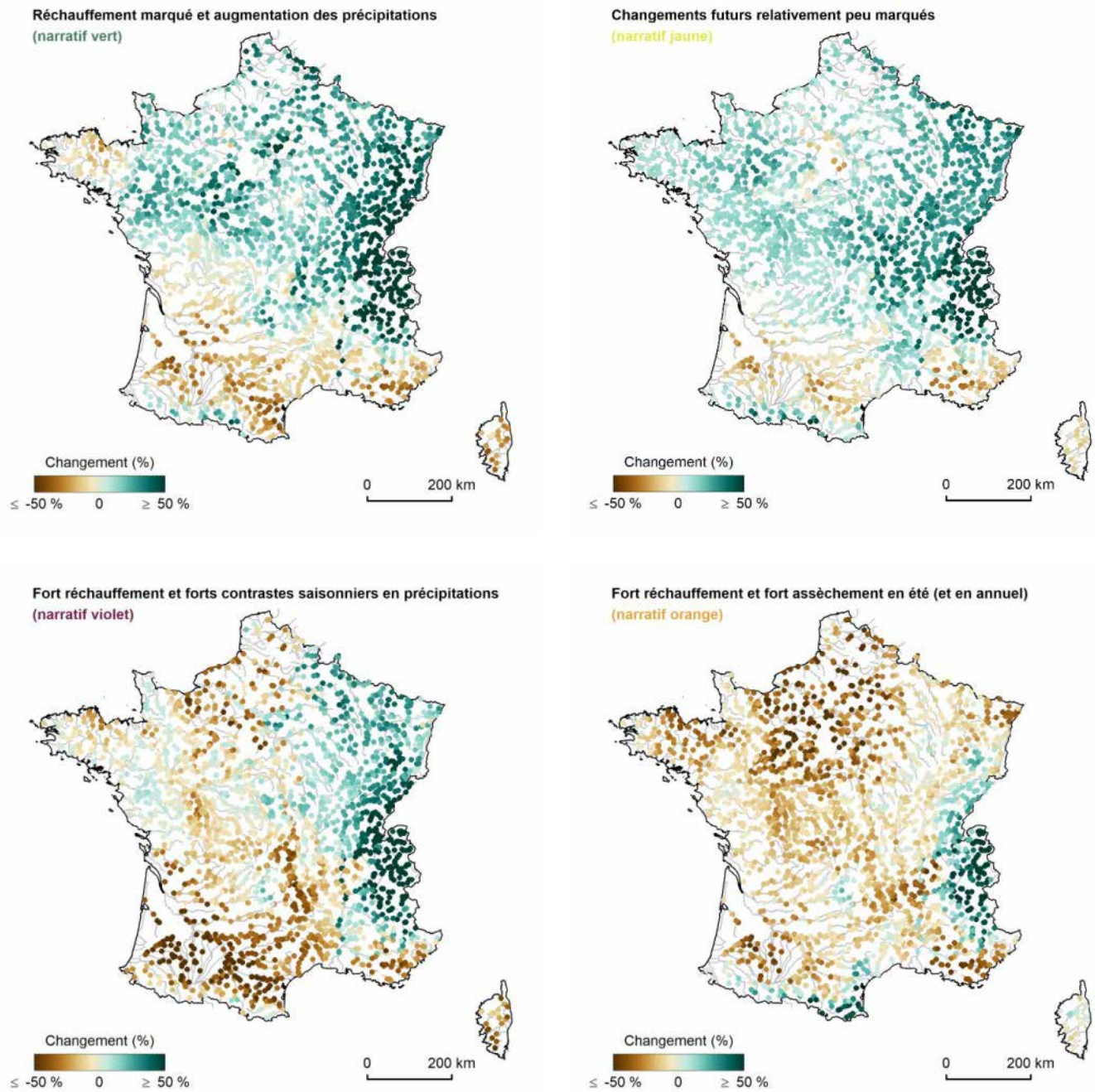


Figure 4 : Changements projetés pour le débit moyen hivernal pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005) (estimation médiane tous modèles hydrologiques confondus)

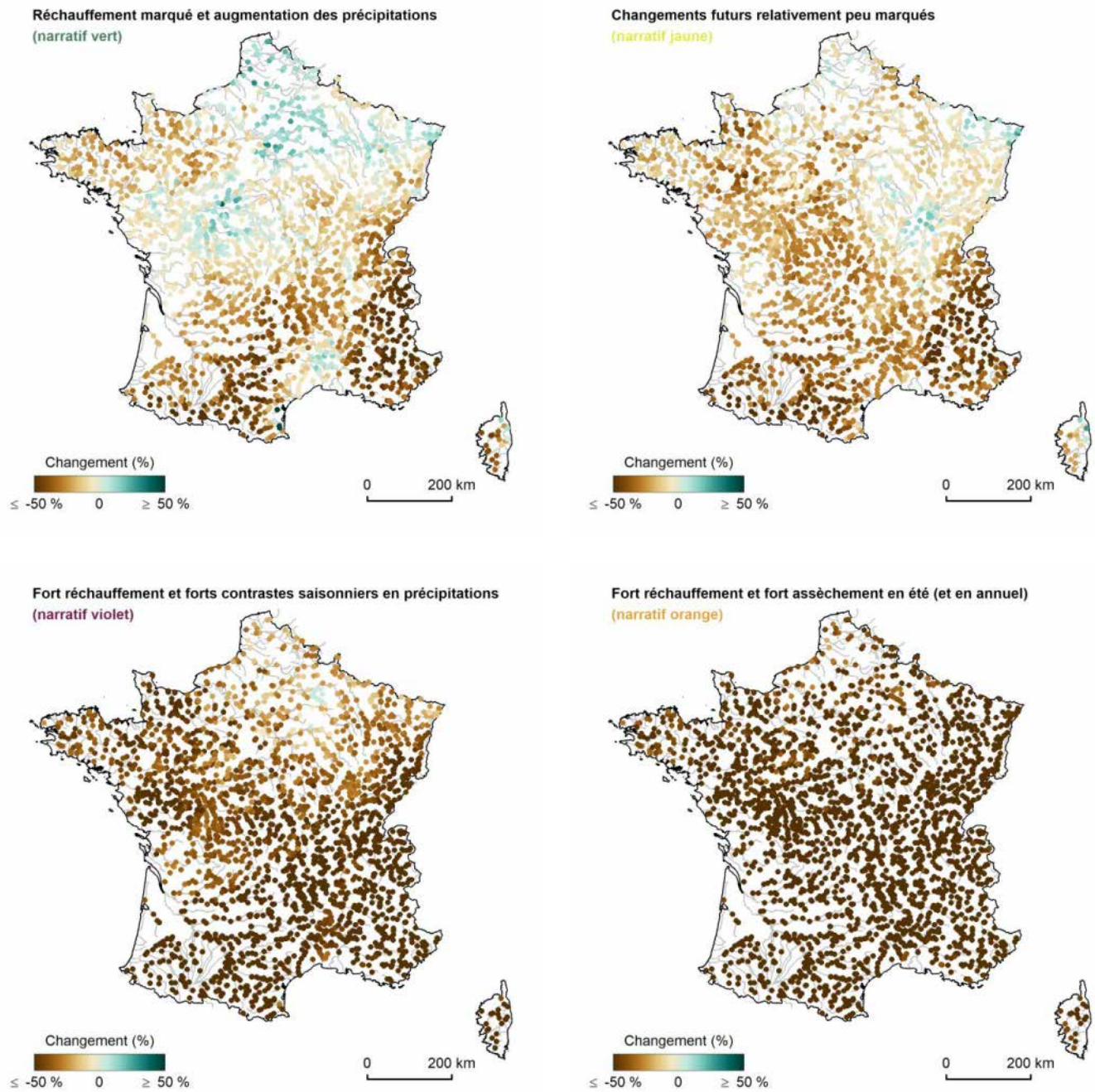


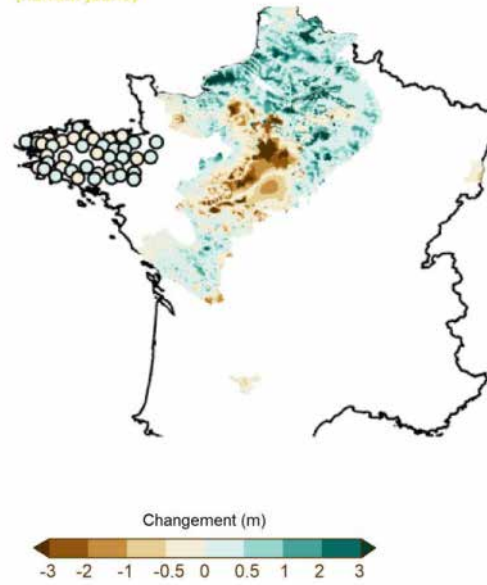
Figure 5 : Changements projetés pour le débit moyen estival pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005) (estimation médiane tous modèles hydrologiques confondus)

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)
Régime hydrologique (synthèse des douze débits mensuels moyens interannuels 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 sont notables sous les deux scénarios d'émissions. Pour les régimes pluviaux, les contrastes seront plus affirmés entre hautes et basses eaux (hiver et été). En moyenne montagne, les régimes niveaux de transition évoluent vers des régimes à dominante pluviale. Après une phase d'apports estivaux accrus, due au retrait des glaciers (et donc à leur fonte), les bassins au régime glaciaire voient leurs débits estivaux (en particulier en août) fortement baisser. Les changements de régime affectent plus particulièrement le bassin de la Loire, la région Grand Est, et les cours d'eau de moyenne montagne du Massif central, des Pyrénées et des Alpes, en fin de siècle sous scénario de fortes émissions.	Forte	Fort
Débit mensuel minimum annuel (QMNA)	A l'échelle de la France, le débit d'étiage QMNA projeté tend à diminuer pour les deux scénarios et les deux horizons temporels sauf pour les Alpes (tendance à la hausse) et le Bassin parisien (qui présente des incertitudes fortes). Les changements médians sont globalement de l'ordre de -40 % en fin de siècle sous scénario de fortes émissions. Les diminutions sont plus fortes pour le sud (autour de -60 %). L'incertitude sur l'intensité des changements est importante mais l'accord sur le signe des changements est très fort entre les modèles.	Modérée à forte	Fort
Niveau des nappes *	L'analyse repose sur l'évolution des niveaux piézométriques moyens annuels pour tous les modèles hydrogéologiques et sur l'évolution des Indicateurs Piézométriques Standardisés (IPS) pour les modèles hydrogéologiques au pas de temps journalier. L'évolution du niveau des nappes a été estimée pour les territoires où les modèles hydrogéologiques sont disponibles. En Bretagne, les projections s'accordent sur une baisse des niveaux des nappes moyens annuels aux deux horizons et pour les deux scénarios d'émissions. Ces baisses sont plus marquées en été. Elles sont d'autant plus importantes que le scénario est émetteur. Sur le Bassin parisien et en région Poitou-Charentes, sous le scénario d'émissions modérées en fin de siècle, les projections s'accordent sur une tendance à l'augmentation qui amène à dépasser les niveaux jugés extrêmes sur la période de référence. Sous le scénario de fortes émissions, la dispersion entre projections est la plus importante , mais des tendances se dégagent des résultats : - Des augmentations des niveaux de nappe sur le Bassin parisien, la Basse-Normandie, la région Hauts-de-France et le nord du bassin de la Loire, - Des diminutions des niveaux de nappe en Poitou-Charentes, dans le département du Tarn-et-Garonne et en Alsace. En Nord-Aquitaine, en contexte de nappes profondes, la médiane des projections montre que l'influence des prélèvements historiques sur l'évolution future projetée des niveaux de nappe masque celle du signal changement climatique au niveau des aquifères profonds et des zones spatiales affectées par ces prélèvements. Ailleurs, les projections montrent une tendance à l'augmentation du niveau des nappes pour les deux scénarios considérés, avec un niveau de confiance modéré compte tenu du caractère très inertiel des nappes profondes (temps de réponse de plusieurs années), pouvant fausser l'interprétation des écarts de niveaux de nappe entre périodes de 30 ans futures et période historique.	Forte Modérée Modérée	Fort Modéré Fort

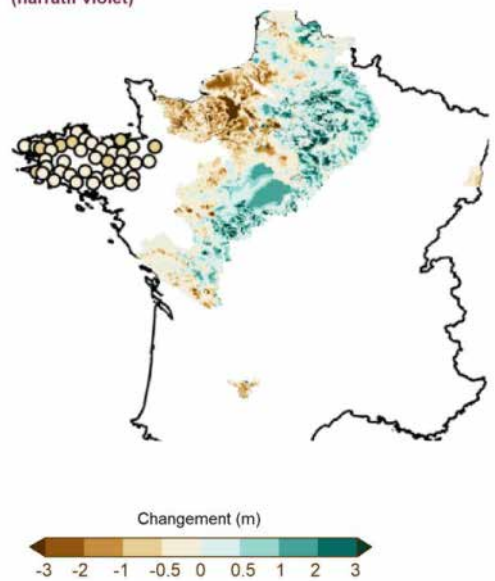
Réchauffement marqué et augmentation des précipitations
(narratif vert)



Changements futurs relativement peu marqués
(narratif jaune)



Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations
(narratif violet)



Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel)
(narratif orange)

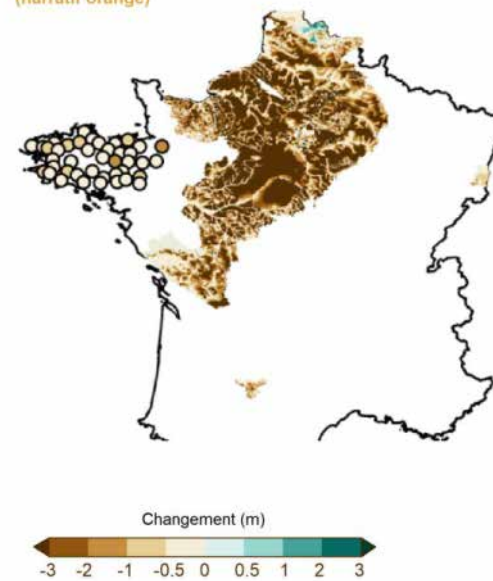


Figure 6 : Changements projetés pour la hauteur de nappe moyenne annuelle pour quatre futurs contrastés (narratifs d'Explore2) sous scénario de fortes émissions en fin de siècle (référence : 1976-2005) aux piézomètres selon le modèle EROS en Bretagne et sur le domaine modélisé par AquiFR (ailleurs)

Des futurs des aléas hydroclimatiques selon Explore2

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 météorologique	L'analyse repose sur l'évolution en fréquence et en surface impactée d'une situation sèche qualifiée aujourd'hui de décennale. Pour les deux scénarios d'émission et les deux horizons temporels, la fréquence et l'extension spatiale des sécheresses météorologiques estivales ont tendance à augmenter. En fin de siècle pour le scénario de fortes émissions : - Le pourcentage de la surface de la France hexagonale touchée par une sécheresse météorologique aujourd'hui décennale atteint près de 20 % de la France hexagonale contre 10 % aujourd'hui, - La fréquence d'occurrence des sécheresses météorologiques décennales augmente très fortement dans tout le tiers sud de l'hexagone (facteur x 3 à x 5).	Forte	Fort
Sécheresse du sol	L'analyse repose sur l'évolution en fréquence et en surface impactée d'une situation sèche qualifiée aujourd'hui de décennale. Pour les deux scénarios d'émission et les deux horizons temporels, la fréquence, l'extension spatiale et la durée des sécheresses du sol ont tendance à augmenter. En fin de siècle : - Le pourcentage de la surface de la France hexagonale touchée par une sécheresse du sol aujourd'hui décennale augmente fortement ; la surface touchée double pour le scénario d'émissions modérées et triple pour le scénario de fortes émissions, - La fréquence d'occurrence des sécheresses du sol décennales augmente très fortement en France hexagonale : elle double à triple pour le scénario d'émissions modérées et augmente de 4 à 5 fois (voire 6 sur le sud) pour le scénario de fortes émissions, - La fréquence des sécheresses du sol durant plusieurs mois et couvrant 10 % ou plus du territoire hexagonal augmente fortement.	Forte	Fort
Sécheresse hydrologique	Cette analyse repose sur l'évolution du quantile de débit mensuel minimum annuel de période de retour 5 ans sec. Les sécheresses hydrologiques projetées seront plus sévères avec un fort accord de signe entre les modèles pour le sud de la France (changement médian de l'ordre de - 40 % sur le QMNA5) tandis que dans le nord de la France les signaux divergent dans les différents modèles hydrologiques.	Modérée à forte	Fort

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 hydro- géologique	L'analyse repose sur les évolutions en fréquence de situations sèches qualifiées aujourd'hui de décennales. L'analyse ne concerne que certaines parties de la France hexagonale. Sur le Bassin parisien et en région Poitou-Charentes, la dispersion entre les chaînes de modèles est importante. Pour les deux scénarios d'émissions et les deux horizons temporels, il n'y a pas ou peu d'accords sur le signe des changements. Pour le scénario d'émissions modérées en fin de siècle, la fréquence des événements secs a majoritairement tendance à diminuer sur la quasi-totalité du domaine. Pour le scénario de fortes émissions en fin de siècle, la fréquence a majoritairement tendance à : - Diminuer sur la moitié nord du Bassin parisien, - Rester globalement inchangée sur la Beauce et la Normandie, - Augmenter en région Poitou-Charentes et surtout dans le département du Tarn-et-Garonne. En Bretagne, on s'attend à une augmentation de la fréquence des événements secs aux deux horizons et pour les deux scénarios d'émission. Les augmentations sont les plus fortes sous le scénario de fortes émissions en fin de siècle.	Modérée	Modéré
	En Bretagne, on s'attend à une augmentation de la fréquence des événements secs aux deux horizons et pour les deux scénarios d'émission. Les augmentations sont les plus fortes sous le scénario de fortes émissions en fin de siècle.	Forte	Fort
Assecs	Cette analyse repose sur l'évolution de la proportion moyenne sur la période de juillet à octobre inclus de cours d'eau avec des débits nuls (assecs) estimée sur un découpage en hydro-écorégions en France hexagonale. Les assecs en tête de bassin (cours d'eau d'ordre de Strahler entre 1 et 4) devraient progresser dans une majorité des régions de la France sous les deux scénarios d'émissions. Ils seront plus précoces et plus longs, avec un retour en eau retardé. Les incertitudes sont plus importantes dans le nord que dans le sud de la France pour les deux scénarios, à l'image des résultats obtenus pour les sécheresses hydrologiques. Sous scénario de fortes émissions, la proportion moyenne de cours d'eau en assec en France entre juillet et octobre (actuellement de 15 %) atteint 20 % en milieu de siècle, puis 25 % en fin de siècle.	Forte	Fort

Les crues

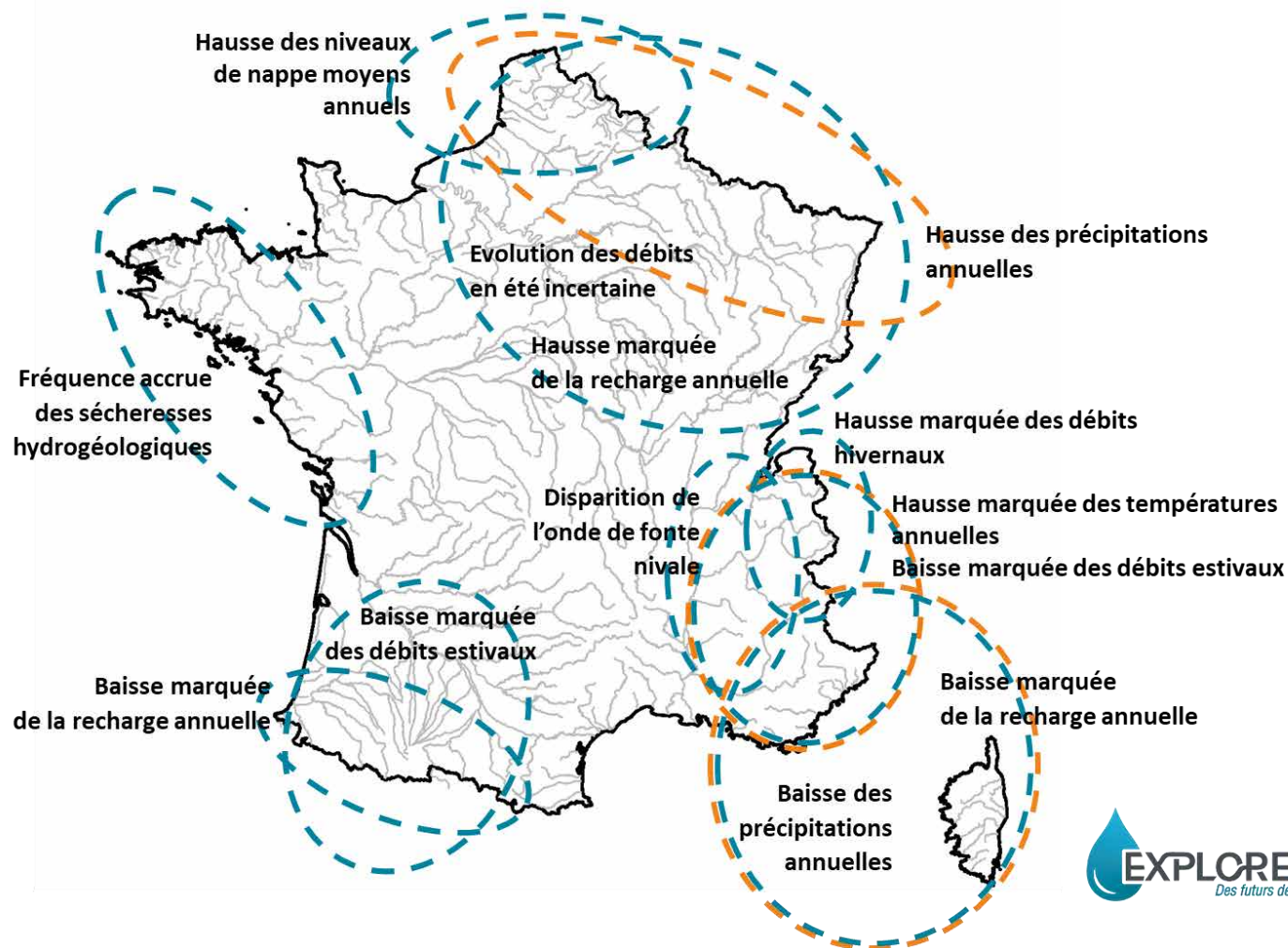
Variables (* : résultats illustrés par des cartes)	Messages appuyés par les projections hydroclimatiques d'Explore2	Confiance	Consensus sur le signe à l'échelle France (sauf précision)
Précipitations journalières fortes	Avertissement : Les modèles climatiques utilisés ne donnent qu'une estimation très 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). Précipitations journalières maximales annuelles : - En moyenne, les projections indiquent une tendance à l'augmentation généralisée, pour les deux scénarios et les deux horizons temporels, - L'accord entre les modèles sur le signe du changement est fort (augmentation) mais l'incertitude sur l'intensité des changements est importante (quelques chaînes pouvant même projeter très localement une diminution des précipitations journalières maximales annuelles, notamment dans le sud de la France). Précipitations maximales journalières de période de retour 20 ans (PJXA20) : - L'évolution projetée du quantile de pluie PJXA20 est à l'image de celle sur les pluies journalières maximales annuelles. - A l'échelle de la France, le quantile de pluie PJXA20 projeté tend à augmenter pour les deux scénarios d'émissions et les deux horizons temporels (augmentation autour de +20 % en fin de siècle sous scénario de fortes émissions).	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). Indépendamment de cette limitation, à l'échelle de la France, les tendances projetées pour les débits journaliers maximum sont incertaines. Pour les deux scénarios et les deux horizons, il n'y a souvent pas ou que peu d'accords sur le signe des changements entre les modèles et la dispersion entre projections est très forte. Une illustration en est donnée ci-dessous. Débit journalier maximal annuel (QJXA) : Pour le scénario de fortes émissions en fin de siècle, les changements projetés varient de -75 % à +75 % selon les modèles pour certains bassins du sud. Débit journalier maximal annuel de période de retour 20 ans (QJXA20) : Pour les deux scénarios et les deux horizons, les changements projetés peuvent varier de -50 % à +100 % selon les modèles pour certains bassins. Les incertitudes sont plus grandes que pour les changements projetés sur les pluies fortes.	Faible à modérée	Faible

Des « hot-spots » sous RCP8.5 en fin de siècle

HOT SPOTS & PARTICULARITÉS RÉGIONALES SOUS SCENARIO DE FORTES EMISSIONS EN FIN DE SIECLE POUR

--- : le climat
- - - : l'hydrologie

Se reporter aux chiffres « France hexagonale » pour les régions non identifiées



L'absence d'indication sur les autres régions ne signifie pas l'absence de changement. Les secteurs en pointillés sont les zones particulièrement sensibles au changement climatique. Cette carte s'appuie sur l'ensemble des projections obtenues sous le scénario de fortes émissions RCP8.5 (ex. 34 pour le climat).

Les messages du « volet scientifique »

- 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 effets du changement climatique seront d'autant plus sévères que les émissions de gaz à effet de serre seront importantes.
- La gestion de l'eau d'hier et celle de demain seront nécessairement différentes pour s'adapter au changement des régimes hydrologiques.
- Selon les projections Explore2, le changement climatique conduira à une intensification de divers événements extrêmes sur les domaines modélisés. Les simulations projettent une intensification des sécheresses du sol et hydrologiques (confiance forte). Elles projettent aussi une fréquence accrue de hauts niveaux de nappe en hiver.
- Selon les projections Explore2, l'évolution possible des débits de crue est incertaine. Cependant, il faut noter que selon les travaux synthétisés dans les rapports successifs du GIEC, les scientifiques s'attendent, pour beaucoup de régions du monde, à une intensification des extrêmes pluviométriques et à une augmentation de l'intensité des crues. Les modèles climatiques utilisés pour Explore2 ne donnent qu'une estimation très imparfaite des changements possibles pour les pluies fortes en France hexagonale, d'où l'incertitude qui en résulte pour partie sur les simulations des débits de crue.
- 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 (ETR), 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 recherches sur ces verrous scientifiques sont en cours et les progrès de modélisation bénéficieront à une prochaine étude d'impact, coordonnée avec les futures publications du GIEC.

Les messages du « volet accompagnement »

- Explore2 est une première brique pour prendre des décisions éclairées en termes de planification d'adaptation et de passage à l'action avec la mise en œuvre d'actions concrètes dans un contexte incertain mais qui change assurément. Les résultats obtenus constituent une base essentielle pour les exercices de prospective à l'échelle des territoires. Les acteurs locaux doivent s'appropriier ces résultats dans leur propre contexte de gestion et poursuivre ainsi le dialogue sur l'évolution des usages pour un partage équilibré et durable des ressources en eau dans les territoires.
- **Poursuivre la médiation scientifique** : Pour faciliter la compréhension et l'utilisation des résultats scientifiques sur les projections hydro-climatiques, le projet Explore2 a associé un comité d'utilisateurs (le COUT) aux côtés des scientifiques dès le démarrage du projet. Cette médiation scientifique a permis de rassembler scientifiques et utilisateurs pour notamment recueillir leurs besoins et leurs priorités. Elle constitue un pont indispensable entre les scientifiques et les acteurs qu'il faut pérenniser pour assurer une bonne appropriation des connaissances.
- **Renforcer la pédagogie et l'accompagnement** : Les utilisateurs du COUT ont exprimé l'importance de faire un effort de pédagogie, d'accompagnement et de formation des acteurs, indispensables pour bien comprendre les résultats d'Explore2. Le MOOC et les fiches de synthèse produits dans le cadre du projet témoignent de cette volonté.
- **Répondre au besoin urgent des gestionnaires de l'eau** : Les gestionnaires de l'eau ont un besoin urgent des résultats produits par Explore2 pour réviser leurs plans d'adaptation au changement climatique tenant compte des futurs possibles de la ressource en eau sur leurs territoires.
- **Continuer à investir sur la connaissance c'est anticiper** : Le projet Explore2 a actualisé les connaissances acquises depuis la fin d'Explore2070, soit plus de 10 ans après. Alors que la réalité est changeante, l'actualisation des connaissances doit être réalisée en continu sans attendre 10 ans de plus. Elle mérite également d'être enrichie avec de nouvelles données pour permettre une analyse plus fine des projections hydro-climatiques.
- **Poursuivre la réflexion vers un exercice Explore2 pour les territoires d'Outre-Mer** : Etant donné un certain nombre de verrous scientifiques, comme, par exemple, le manque de données d'observation disponibles par exemple, indispensables à la validation des modèles utilisés pour réaliser un exercice de type Explore2, la mise à jour des connaissances a concerné uniquement la France métropolitaine. Ces travaux sont à considérer pour les territoires d'Outre-Mer. Un travail a été mené par l'équipe d'Explore2 avec les territoires d'Outre-Mer afin de remédier à la situation et de pouvoir programmer, dans les années à venir, la réalisation d'un exercice scientifiquement du type Explore2 dans chacun de ces territoires. La réflexion sur la construction d'une feuille de route est à poursuivre.

