

Travail de fin d'études pour le diplôme d'ingénieur de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

**Analyse des projections hydrologiques du projet Explore2
Comparaison à l'exercice précédent (Explore2070) et
examen des évolutions des composantes du cycle de l'eau**



Réalisé par :

DURMONT Jean-François

3A Cours d'Eau, Littoral & Voies Navigables (ENTPE)

M2 Mécanique des fluides et énergétique (Université Lyon 1 UCBL & Centrale Lyon)

Soutenu le 29/08/24

Devant le jury composé de :

- Tuteur du TFE : Eric Sauquet
- Expert : Olivier Payrastra
- Référent École : Laurent Lassabatere
- Référents Master : Alexis Giauque & Lionel Le Penven

Remerciements

Je tiens à remercier Eric SAUQUET pour m'avoir proposé ce sujet de modélisation sur l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau et m'avoir accueilli au sein du centre INRAE Lyon Grenoble. Mais également pour sa patience, en me laissant chercher par moi-même, et me questionner ainsi que pour ses explications, clarifications et précisions lorsque cela s'avérait nécessaire (« *repetitio est mater studiorum* »).

Je remercie Olivier PAYRASTRE d'avoir accepté d'être mon expert pour mon jury.

Je remercie également les collègues de l'équipe Hydrologie des Bassins Versants : Tristan JAOUEN, Louise MIMEAU, Louis HERAUT, Olivier CHAMPAGNE, Olivier ROBELIN, Michel LANG pour les échanges qui ont alimenté ma réflexion et contribué à me guider. Mais également les autres contributeurs de manière plus indirecte, que ce soit pour l'accès aux données, ou aux productions écrites réalisées dans le cadre des projets Explore2 & Explore2070.

Je remercie également mes collègues stagiaires de l'équipe Hydraulique des rivières avec qui j'ai pu passer de nombreux moments de convivialité, que ce soit à la machine à café, ou au réfectoire du CNRS : Jacques LIÉGIOIS, collègue de promotion à l'ENTPE, Batiste CHRÉTIEN, Rémi COMBEAUX, Clara CHABBRILLANGEAS, Thomas MARQUES, Ruben KUBINA mais aussi plus globalement tous les permanents du premier étage du centre INRAE qui ont contribué à mon intégration durant ce stage.

Notice analytique

AUTEUR	
Nom	DURMONT
Prénom	Jean-François
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	INRAE – Centre Lyon – Grenoble – Auvergne-Rhône-Alpes 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne
Nom du Tuteur	Eric Sauquet
ANALYSE DU TFE	
Titre	Analyse des projections hydrologiques du projet Explore2 : Comparaison à l'exercice précédent (Explore2070) et examen des évolutions des composantes du cycle de l'eau
Titre (anglais)	Study of Explore2 hydrology projection : comparison to the previous exercise (Eplore2070) and trends examination in components of the water cycle
Résumé	<p>Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite du projet Explore 2070 (2010-2012) grâce auquel 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, 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.</p> <p>L'objectif de ce stage est de comparer les grands jeux de données climatiques et hydrologiques produites dans le cadre de ces projets, via une approche statistique, sur un maximum de points en commun et sur un même horizon temporel (2046-2065), afin d'évaluer si les conclusions de ces deux exercices, divergent ou non, en ce qui concerne l'évolution des composantes du cycle de l'eau.</p>
Résumé (anglais)	<p>Explore2 project, driven by INRAE and OiEau, follows Explore2070 project (2010-2012), from which some research actors, gathered by the French ecology ministry, established first projections regarding water resources, at the French scale, for 2070. Started in July 2021, Explore2 has for main objective to update knowledges about the climate change on hydrology, using IPCC publications (CMIP5), but also by helping stakeholder in the understanding and use of these results, for an adaptative water resources strategy purpose.</p> <p>The objective of this internship is to compare extended climatic and hydrological datasets, produced in the context of these projects, with a statistic approach, on a maximum of shared points, on the same period (2046-2065), to assess if the conclusions from those exercises agree or not, regarding water resources components.</p>
Mots-clés	Changement climatique, hydrologie statistique, modélisation, projections futures, cycle de l'eau
Mots-clés (anglais)	Climate change, statistical hydrology, modelling, future projection, water cycle
Termes géographiques	France métropolitaine, bassins versants.
Version	Final – Août 2024
COLLATION	
Nombre de pages	99
Nombre de pages d'annexes	4
Nombre de références	30

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. À ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Sommaire

REMERCIEMENTS	I
NOTICE ANALYTIQUE	II
DECLARATION DE TRAVAIL PERSONNEL	III
SOMMAIRE	IV
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	VII
ACRONYMES & ABREVIATIONS	IX
I. INTRODUCTION	1
1.1 Bref état des lieux sur le contexte du changement climatique	1
1.1.1 Définitions de quelques concepts clés	1
1.1.2 Prise en compte du changement climatique dans la communauté scientifique et ses implications dans la politique internationale.	2
1.1.3 Enjeux du changement climatique.....	3
1.2 Prise en compte au niveau national : les projets Explore2070 & Explore2	4
1.3 Objectifs du stage	5
II. METHODOLOGIE ET DONNEES	6
2.1 Grands principes d'une chaîne de modélisation hydroclimatique	6
2.1.1 Modélisation climatique : les Modèles à Circulation Générale (GCM)	6
2.1.2 Concept de « descente d'échelle » : lien avec la modélisation hydrologique.....	7
2.1.3 Correction des biais induits par la descente d'échelle.....	9
2.1.4 Projections hydroclimatiques futures (climat futur)	9
2.1.5 Simulations hydroclimatiques sur la période de référence (climat présent).....	10
2.1.6 Modélisation hydrologique	10
2.1.7 Nombre de simulations hydroclimatiques par point.....	13
2.1.8 Synthèse des principales différences entre les projets Explore2070 & Explore2	13
2.2 Données disponibles	15
2.3 Nature des variables climatiques et hydrologiques manipulées.....	15
2.3.1 Variables climatiques	16
2.3.2 Variables hydrologiques	16
III. RESULTATS	19
3.1 Traitement des données réalisé.....	19

3.1.1	Prise en main des données d'Explore2070	19
3.1.2	Détermination des points de simulation en commun entre les deux projets.....	19
3.1.3	Traitement des données climatiques (Explore2070 & Explore2)	24
3.1.4	Traitement des données hydrologiques (Explore2070 & Explore2)	24
3.1.5	Réalisation d'infographies et choix des données représentées (Explore2070 & Explore2)	26
3.2	Dispersion des projections climatiques	29
3.2.1	Comparaison annuelle.....	29
3.2.2	Comparaison sur les saisons météorologiques	30
3.2.3	Synthèse de la comparaison des projections climatiques	34
3.3	Synthèse spatiale des anomalies pour la France métropolitaine	35
3.3.1	Température moyenne interannuelle	35
3.3.2	Cumul moyen interannuel de précipitation.....	36
3.3.3	Analyse croisée annuelle	38
3.4	Dispersion spatiale des projections hydrologiques : évolution des débits annuels, saisonniers ainsi que de leurs extrêmes	39
3.4.1	Débit annuel (QA).....	39
3.4.2	Débits saisonniers	43
a.	Hiver (Q _{DJF})	43
b.	Printemps (Q _{MAM})	46
c.	Été (Q _{JJA}).....	49
d.	Automne (Q _{SON})	52
3.4.3	Le Débits extrêmes	55
a.	Étiages – QMNA5.....	55
b.	Étiages – QMNA2.....	58
c.	Crues – QJXA10.....	61
d.	Crues – QJXA2.....	64
e.	Évolution des périodes de retour des évènements extrêmes	64
3.5	Évolutions du régime hydrologique sur cinq grands bassins versants (comparaison par type de modèle hydrologique)	67
3.5.1	Comparaison des hydrogrammes avec modèle GR.....	68
3.5.2	Comparaison des hydrogrammes avec modèle SIM	71
3.5.3	Synthèse	72
IV.	DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	74
4.1	Discussions des résultats obtenus.....	74
4.1.1	Évolution de la température et du cumul de précipitation.....	74
4.1.2	Évolution des débits annuels et saisonniers.....	74
4.1.3	Évolutions des extrêmes (crues et étiages).....	76
4.1.4	Limites dans l'exercice de comparaison des projets Explore2070 et Explore2	77

4.1.5	Synthèse	78
4.2	Perspectives	79
V.	CONCLUSION	80
	BIBLIOGRAPHIE	81
	ANNEXES	83

Liste des figures et tableaux

Figure 1 – Conceptualisation de la « descente d'échelle » (désagrégation) et de la « remontée d'échelle » (agrégation) entre les modèles globaux (GCM ou AOGCM) et ici l'échelle hydrologique. (Herrera et al., 2007).	8
Figure 2 – « Grille Safran » en coordonnées Lambert II étendues, en projection Mercator. Les points rouges représentent les points où ont été simulées des données climatiques. (Marson et al., 2024)	8
Figure 3 – Schématisation d'un bassin versant et de la modélisation (simplifiée) de la transformation pluie-débit. 11	
Figure 4 – Schématisation des modèles globaux (à gauche) et des modèles distribués (à droite). La transformation pluie-débit est globale à gauche (Le BV est une entité numérique unique.), discrétisée à l'échelle des mailles à droite.	12
Figure 5 – Illustration de la détermination des QMNA et du calcul des QMNA5. (Chazot et al., 2012).....	18
Figure 6 – Illustration de la détermination des QJXA et du calcul des QJXA10. (Chazot et al., 2012).....	18
Figure 7 – Schématisation des deux approches utilisées pour la détermination des stations en commun entre les projets Explore2070 et Explore2.	21
Figure 8 – Répartition spatiale des points de simulation en commun entre les deux projets	23
Figure 9 – Nombre de simulations hydroclimatiques dans le cadre des projets Explore2070 & Explore2.....	28
Figure 10 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour les valeurs annuelles. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.....	30
Figure 11 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour la saison hivernale. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.	31
Figure 12 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour le printemps. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES	32
Figure 13 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour la saison estivale. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.	33
Figure 14 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour l'automne. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES	34
Figure 15 – Comparaison des anomalies annuelles des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065). Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.....	39
Figure 16 – Changements relatifs médians du débit annuel QA (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.	41
Figure 17 – Indices d'accord pour l'évolution du débit annuel QA entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	42
Figure 18 – Changements relatifs médians du débit hivernal Q_{DJF} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés	44
Figure 19 – Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{DJF} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	45
Figure 20 – Changements relatifs médians du débit printanier Q_{MAM} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés	47
Figure 21 – Indices d'accord pour l'évolution du débit printanier Q_{MAM} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	48
Figure 22 – Changements relatifs médians du débit estival Q_{JJA} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés	50
Figure 23 – Indices d'accord pour l'évolution du débit estival Q_{JJA} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	51
Figure 24 – Changements relatifs médians du débit automnal Q_{SON} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés	53

Figure 25 — Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{SON} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	54
Figure 26 — Changements relatifs médians des débits d'étiage $QMNA5$ (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.	56
Figure 27 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'étiage $QMNA5$ entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	57
Figure 28 — Changements relatifs médians des débits d'étiage $QMNA2$ (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés	59
Figure 29 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'étiage $QMNA2$ entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	60
Figure 30 — Changements relatifs médians des débits de crue $QJXA10$ (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.	62
Figure 31 — Indices d'accord pour l'évolution des débits de crues $QJXA10$ entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	63
Figure 32 — Changements relatifs médians des débits de crue $QJXA2$ (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.	65
Figure 33 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'étiage $QJXA2$ entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2.....	66
Figure 34 — Localisation des stations associées aux cinq grands versants étudiés.....	67
Figure 35 — Hydrogrammes interannuels pour les cinq stations considérées à l'horizon temporel 2046 – 2065 en sortie de modèles de type GR pour chacun des forçages climatiques ainsi que pour les périodes de référence des projets Explore2070 & Explore2.....	70
Figure 36 — Hydrogrammes interannuels pour trois des cinq stations considérées à l'horizon temporel 2046 – 2065 en sortie de modèles de type SIM pour chacun des forçages climatiques ainsi que pour les périodes de référence des projets Explore2070 & Explore2.....	72
Tableau 1 — Comparaison des projets Explore2070 & Explore2 (synthèse).....	14
Tableau 2 — Écarts de température moyenne annuelle, en hiver et au printemps par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990).....	36
Tableau 3 — Écarts de température moyenne annuelle, en été et en automne par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990).....	36
Tableau 4 — Écarts relatifs de cumul de précipitation moyenne annuelle, en hiver et au printemps par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)	37
Tableau 5 — Écarts relatifs de cumul de précipitation moyenne annuelle, en été et en automne par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)	37
Tableau 6 — Statistiques sur les accords à la hausse et à la baisse des projections des débits annuels et saisonniers en fonction des différents scénarios d'émission, tous modèles hydroclimatiques confondus, à l'horizon temporel 2046-2065.....	75

Acronymes & abréviations

ADAMONT : ADAPtation en territoire de MONTagne

AR : Assessment Report

AOGCM : Atmosphere – Ocean General Circulation Model (GCMAO en français pour Modèles à Circulation Générale Atmosphère Océan)

CATNAT : Régime d'indemnisation des CATastrophes NATurelles

CCNUC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CDF-t : Cumulative Distribution Function – Transform

CMIP : Climate Model Intercomparison Project

COP : Conference of the Parties

CRNM : Centre National de Recherche Météorologique

GCM : General Circulation Model (MCG en français pour Modèles à Circulation Générale)

GES : Gaz à effet de Serre

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change)

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière (le sigle provient de l'ancien nom, Institut Géographique National)

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

OiEau : Office international de l'Eau

PAPI : Plan d'Actions pour la Prévention des Inondations

PCAET : Plan Climat Air Énergie Territoriale

PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison

PJXA : Cumul de Pluie Journaliers maXimal Annuel en mm

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global (GWP pour Global Warmin Potential en anglais)

QJXA : Débits Journaliers maXimal Annuel en m³/s (Q est la lettre traditionnellement associée au débit)

QM : Débits Journaliers moyens Mensuels en m³/s (On parle également de module mensuel)

QMNA : Débits Mensuels moyens miNimal Annuels en m³/s

RCM : Regional Climate Model (MRC en français pour Modèles à Circulation Régionale)

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

SANDRE : Système d'Administration Nationale des Données et Référentiel sur l'Eau

I. Introduction

Au préalable de mon travail à proprement dit, il est nécessaire de présenter le contexte et les objectifs de ce travail de fin d'études. Les disciplines principales de ce stage sont l'hydrologie statistique et la climatologie.

Mon sujet s'inscrit dans le contexte du changement climatique et comment celui-ci impacte le cycle naturel de l'eau. C'est pourquoi, un bref état des lieux sur le contexte du changement climatique est nécessaire, avant d'aborder les projets Explore2070 et Explore2 sur lesquels porte mon sujet et de détailler ainsi les objectifs de mon travail.

1.1 Bref état des lieux sur le contexte du changement climatique

1.1.1 Définitions de quelques concepts clés

L'effet de serre est un phénomène naturel, mis en évidence par Joseph Fourier (1768 – 1830) en 1824. Il résulte de l'influence des gaz composant l'atmosphère terrestre et mettant en jeu des échanges thermiques entre l'atmosphère, le Soleil et la Terre. Lorsque les rayons solaires atteignent la Terre, une partie est réfléchiée dans l'espace (environ 30 %), une autre partie est absorbée par l'atmosphère (environ 20 %) et le reste est réfracté pour finalement être absorbée par le sol (environ 50 %) : on parle de bilan radiatif. Cette énergie thermique est réémise par le sol sous forme de rayons infra-rouges (IR) vers l'atmosphère¹.

Ce qu'on appelle l'effet de serre est la partie de ces IR qui est emprisonnée dans l'atmosphère et renvoyée vers le sol en raison de la présence de gaz à effet de serre (GES). Rappelons que sans ce phénomène, la température moyenne à la surface serait de l'ordre de -19 °C. Ces GES permettent d'avoir une température moyenne à la surface de l'ordre de +15 °C². On parle de forçage radiatif, à savoir la différence entre la puissance radiative reçue et la puissance radiative émise par le système Terre. Un forçage radiatif positif signifie que le système émet moins d'énergie qu'il n'en reçoit et que celui-ci tend par conséquent à se réchauffer³.

Le changement climatique est induit par le dérèglement de ce phénomène en raison des activités anthropiques, via principalement les activités économiques. Ces activités (industrie, transport des biens et des personnes, agriculture, habitat, etc.) conduisent à la consommation d'énergies fossiles carbonées, dont la combustion génère l'émission dans l'atmosphère de GES.

Les principaux GES sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), la vapeur d'eau (H₂O), le protoxyde d'azote (N₂O), l'ozone (O₃) et les chlorofluorocarbures (CFC). On distingue, parmi ceux-ci, les GES anthropiques dont la présence dans l'atmosphère est imputable aux activités humaines évoquées ci-dessus, en opposition des GES « naturels⁴ ». Afin que leurs impacts

¹ (Earth's Energy Budget | My NASA Data, 2022)

² (L'effet de serre | Météo-France, 2020)

³ (DRIAS, Les futurs du climat - Les scénarios RCP, s. d.)

⁴ Les principaux GES dits « naturels » sont le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O). Ces GES existaient avant l'intervention de l'homme, d'où la qualification de GES « naturels » en opposition aux GES anthropiques. Pour ces GES, il existe des puits naturels d'absorption : la pluie et la photosynthèse. Cela ne signifie pas que l'homme n'exerce pas d'influence sur ceux-ci (Quels sont les gaz à effet de serre ? – Jean-Marc Jancovici, s. d.)

puissent être comparés et additionnés, on se ramène généralement dans une base commune, en l'occurrence le CO_{2e} (équivalent CO₂) via le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG), qui représente la quantité équivalente de CO₂ qui serait émise dans l'atmosphère actuelle pour qu'une quantité donnée d'un autre GES ait le même impact sur le climat à un horizon temporel donné (généralement 100 ans)⁵.

Ces valeurs de PRG sont définies par le GIEC dans le cadre des *Assessment Reports* (AR) et ont évolué aux gré de ceux-ci⁶

1.1.2 Prise en compte du changement climatique dans la communauté scientifique et ses implications dans la politique internationale.

Bien que le phénomène de l'effet de serre, et plus spécifiquement de l'effet de serre dit « naturel » soit connu depuis plus de 160 ans⁷, la conscience et la prise en compte du changement climatique induit par l'effet de serre d'origine anthropique est récent.

L'IPCC (GIEC en français) est un organisme intergouvernemental dépendant de l'organisation météorologique mondiale (OMM) et créé en 1988 à la suite d'une initiative internationale regroupant 195 états. Il est constitué de trois groupes de travail spécialisés, travaillant respectivement sur la science du changement climatique, son impact ainsi que l'adaptation et la vulnérabilité des territoires, et enfin son atténuation. La mission principale du GIEC est de fournir des recommandations d'ordre scientifique, technique et socio-économique en rapport avec les risques du changement climatique et ainsi donner des préconisations, à l'attention des décideurs, en matière d'adaptation et d'atténuation⁸. Il publie son premier rapport d'évaluation (AR1) en 1990 dans lequel il est confirmé l'existence d'un effet de serre « naturel » et que les émissions de GES résultant des activités humaines augmentent leur concentration dans l'atmosphère, conduisant de ce fait à un réchauffement global. D'autres rapports suivront en 1995, 2001, 2007, 2014, avec la sixième version en date ayant été publiée en août 2021⁹.

À la suite du premier rapport, en 1992, la conférence internationale des parties (COP), pour le climat, a été créée lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro et la première édition a eu lieu en 1995 à Berlin. Regroupant les états ayant signé la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) ainsi que des acteurs de la société civile, les itérations annuelles de cette conférence ont pour objectif de coordonner la lutte contre le changement climatique, en évaluant principalement l'application des engagements pris par les différents états membres en matière de réduction d'émission de GES¹⁰. C'est lors de la troisième édition, en 1997, qu'est signé le protocole de Kyoto imposant la réduction de 6 GES d'au moins 5 % par rapport aux niveaux de 1990 durant la période 2008 – 2012. La 21^{ème} édition a conduit à la ratification de l'accord de Paris, engageant 195 états à réduire leurs émissions de GES pour garantir une hausse en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, d'ici 2100¹¹.

⁵ (Pachauri et al., 2007)

⁶ Les premiers PRG ont été définis dans l'AR2 en 1995.

⁷ John Tyndall (1820 – 1893) a mis en évidence l'effet de serre dit « naturel » et identifié les premiers GES responsables du phénomène en 1862.

⁸ (*Structure of the IPCC*, 2024)

⁹ (*Reports — IPCC*, 2024)

¹⁰ (*Qu'est-ce qu'une COP ?*, 2022)

¹¹ (*COP28, sommet de la Terre... 7 questions sur les conférences du climat | vie-publique.fr*, 2023)

Les différents rapports du GIEC ont conduit à la définition de scénarios d'émission de GES dans l'atmosphère et ce que cela impliquerait à l'horizon 2100, en fonction des efforts réalisés en matière de réduction d'émission ou de captation de GES dans l'atmosphère. Au moyen des PRG, ainsi que des hypothèses de développement économique et/ou sociétale, les experts définissent des forçages radiatifs auxquels on peut s'attendre et par conséquent l'augmentation probable de température associée à l'horizon 2100. Les plus connus étant ceux émis dans le cadre du cinquième rapport, les RCP pour *Representative Concentration Pathway* (et son scénario pessimiste, le RCP 8.5¹² que nous aborderons dans le cadre de ce rapport)¹³.

1.1.3 Enjeux du changement climatique¹⁴

Dans la sixième version de son rapport d'évaluation, l'AR6 (Mukherji et al., 2023), le GIEC confirme à nouveau l'origine anthropique du réchauffement climatique, au travers l'émission de GES, avec une augmentation de la température de surface de +1,1 °C sur la période de 2011-2020 par rapport à la période 1850-2020, et que les émissions de GES continuent d'augmenter. Le scénario le plus optimiste de l'AR6, estime que le réchauffement global sera contenu à +1,5 °C à l'horizon 2100 relativement à la période 1850-1900 (Scénario SSP1 – 1.9¹⁵), mais que cet objectif ne sera probablement pas atteint compte tenu des émissions probables de GES d'ici 2030¹⁶ et qu'il sera difficile de respecter la limite de +2 °C de l'accord de Paris (l'AR5 indiquait précédemment que seul le scénario RCP 2.6 permettait de respecter ce dernier.).

Le changement climatique induit une élévation du niveau de la mer et ce phénomène s'accélère¹⁷. Une augmentation de la fréquence¹⁷ des événements extrêmes (vagues de chaleur, pluies intenses, cyclones, sécheresses, tempêtes, crues, etc.) ainsi que de leur intensité est à prévoir, leur lien avec l'activité humaine s'étant renforcé depuis l'AR5.

Il est estimé que 3,3 à 3,6 milliards de la population mondiale vit dans des territoires vulnérables au changement climatique. Qui plus est, les risques et les impacts en termes de vies humaines et de dégâts matériels sont plus importants que dans l'AR5, et que ceux-ci augmentent, quel que soit le scénario en matière d'émission de CO₂. Il est en outre estimé que la mortalité humaine entre 2010 et 2020 en raison des crues, sécheresses, et tempêtes a été 15 fois plus importante dans les territoires vulnérables en comparaison à ceux qui sont moins sensibles au changement climatique. Et qu'en raison de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, cela ira en s'aggravant. Cela se reflète principalement avec l'augmentation du nombre annuel de jours où les hommes, la faune, et la flore seraient exposés à des températures et à des conditions d'humidité potentiellement mortelles, notamment dans les pays au niveau de l'équateur, alors que ce sont principalement les pays qui ont le moins contribué au changement climatique (injustice climatique).

¹² 8,5 désigne le forçage radiatif en W/m² atteint à l'horizon 2100.

¹³ (DRIAS, *Les futurs du climat - Les scénarios RCP*, s. d.)

¹⁴ Les données et informations décrites ici sont accessibles dans le résumé de l'AR6 à destination des décideurs (Mukherji et al., 2023).

¹⁵ SSP pour Shared Socio-economic Pathway. 1,9 désigne là aussi le forçage radiatif en W/m² atteint à l'horizon 2100.

¹⁶ L'inertie du phénomène de l'effet de serre implique que les émissions actuelles en GES ont un impact pour plusieurs années.

¹⁷ L'augmentation moyenne du niveau de la mer était de 1,3 mm/an sur la période 1901-1971 contre 1,9 mm/an sur la période 1971-2006.

Malgré ce contexte anxiogène, le GIEC insiste sur le fait que les actions gouvernementales des différents états, à différentes échelles (locales, nationales ou internationales) vont jouer un rôle prépondérant en matière d'adaptation et de résilience des territoires.

1.2 Prise en compte au niveau national : les projets Explore2070 & Explore2

En France, le changement climatique génère beaucoup d'interrogations dans le monde scientifique, politique, et civil notamment en ce qui concerne l'incidence qu'il aura sur notre société, notre économie et notre mode de vie. Les travaux du GIEC servent de point de départ à différentes études, travaux et décisions politiques et législatives. À titre d'exemple, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) s'appuie sur les travaux du GIEC, et du CNRM, au travers la modélisations et simulations, pour prendre en compte le changement climatique sur l'évolution de la sinistralité des catastrophes naturelles (en particulier les crues¹⁸) dans les années à venir, en estimer les coûts des dommages, et ainsi donner des préconisations de financement pour la pérennité du régime CATNAT afin d'orienter les politiques publiques nationales associées.

Les PCAET & PAPI sont des exemples de politiques publiques qui prennent en compte les travaux du GIEC et d'organismes de recherche nationaux ou non, en matière d'adaptation et de lutte contre le changement climatique^{19 20}.

Les projets Explore2070 et Explore2 font partie de ces travaux et productions scientifiques. Leur objectif principal est (ou a été en ce qui concerne Explore2070) de déterminer le lien entre le changement climatique et son impact sur l'évolution des hydrosystèmes.

Le premier, Explore2070 a eu lieu de juin 2010 à octobre 2012 et a été porté par le ministère de l'Écologie. Il a impliqué des experts des services centraux et déconcentrés, agences de l'eau, établissements de recherche et bureaux d'études spécialisés. Il a permis d'obtenir des premières projections, à l'échelle nationale, en matière de disponibilité de la ressource en eau et la réponse hydrologique des bassins versants sur la période 2046 – 2065 (d'où le terme d'Explore2070) à partir du scénario d'émission médian issu de l'AR4 du GIEC (SRES A1B²¹) qui induit une augmentation de la température moyenne à la surface du globe autour de +2,8 °C à l'horizon 2100 par rapport à l'an 2000.

S'inscrivant dans la continuité d'Explore2070, le projet Explore2, débuté en 2021 et se terminant en 2024, est porté par INRAE et l'OiEau, autour du MTE et différents acteurs de la recherche. Il se base quant à lui sur l'AR5 du GIEC ainsi que trois scénarios RCP (2,6, 4,5 et 8,5 W/m²). Il a pour objectif d'actualiser les connaissances en matière d'impact du changement climatique sur la ressource en eau, en métropole, au moyen des publications du GIEC et de la modélisation numérique d'évolution du climat associée sur l'ensemble du XXI^e siècle. Qui plus est, il

¹⁸ 49% des coûts de la sinistralité non-auto depuis la création du fond CATNAT sur la période 1982 – 2022 sont liés aux inondations (Les catastrophes naturelles en France | Bilan 1982-2022 - Catnat - Liferay DXP CCR, 2023)

¹⁹ « Le plan climat-air-énergie territorial définit, [...] les objectifs stratégiques et opérationnels [...] afin d'atténuer le changement climatique, de le combattre efficacement et de s'y adapter, en cohérence avec les engagements internationaux de la France » (Article L229-26 - Code de l'environnement - Légifrance, 2023)

²⁰ « La gestion des risques d'inondation est d'autant plus efficace qu'elle permet la cohérence avec les autres politiques publiques mises en œuvre sur le territoire, en particulier celles concernant [...] l'adaptation au changement climatique ou la gestion du trait de côte » (MTE - Cahier des charges PAPI 3, 2021)

²¹ Special Reports on Emission Scenarios. Le scénario A1B étant un scénario médian. En termes de forçage radiatif, il correspond plus ou moins au scénario RCP 4.5 de l'AR5 du GIEC (note 45 p. 30).

ambitionne une plus grande concertation avec les utilisateurs de ces résultats, en se proposant d'accompagner les acteurs des territoires dans l'utilisation et la compréhension des résultats obtenus, cela, afin que ces derniers puissent adapter leur stratégie de gestion de la ressource en eau, de sorte que ces territoires soient plus résilients et moins vulnérables dans les années à venir.

1.3 Objectifs du stage

Mon sujet de stage s'inscrit dans le cadre des projets Explore2070 & Explore2.

Ces projets ont permis d'obtenir des projections en matière de la disponibilité de la ressource en eau sur la métropole, et ainsi évaluer l'impact du changement climatique, au travers de variables climatiques et hydrologiques.

Toutefois, les projections réalisées dans le cadre de ces projets se basent sur des travaux du GIEC différents qui rendent compte de l'évolution des connaissances et techniques en matière de modélisations et de simulations en ce qui concerne le changement climatique.

L'objectif principal de ce stage est de comparer les deux exercices sur un même horizon temporel (celui d'Explore2070 en l'occurrence 2046-2065), sur un maximum de points de simulation en commun, via une démarche statistique, et évaluer si les conclusions de ces deux études convergent ou non, sachant que ces projets reposent sur des chaînes de modélisation hydroclimatiques et des scénarios d'évolution de la concentration en GES différents.

Aussi, les enjeux de ce stage sont :

- De savoir dans quelles mesures il est possible de comparer ces projets, et de déterminer quels en sont les contours, leurs différences et les limites induites par la modélisation climatique sur les projections hydrologiques ;
- De comparer, malgré ces limites, ces deux exercices d'un point de vue climatique et hydrologique, au travers des principales variables caractéristiques, que sont la température moyenne, le cumul moyen de précipitation, les débits moyens et leurs extrêmes (étiages et crues). Et ainsi déterminer si les projections réalisées avec Explore2070, ainsi que leurs conclusions, sur la réponse hydrologique des bassins versants, et la disponibilité de la ressource en eau, divergent ou non des projections et conclusions d'Explore2.

Les principales lignes directrices de ce travail sont donc :

- De comprendre les grands principes des chaînes de modélisation hydroclimatique sur lesquelles s'appuient les projets Explore2070 et Explore2, et d'en faire la comparaison ;
- De s'approprier les sorties des simulations de ces modèles, que ce soient les variables climatiques ou hydrologiques ;
- De réaliser un post-traitement des données, après avoir déterminé les points de simulation hydrologique qui sont en communs aux deux exercices. Ce post-traitement implique de lire, manipuler une grande quantité de données de natures différentes, de faire des extractions, et des « calculs de masse » ;
- D'analyser ces données pour comparer la vision future obtenue avec le projet Explore2070 aux projections d'aujourd'hui obtenues dans le cadre du projet Explore2.

II. Méthodologie et données

Dans cette partie, nous détaillerons la méthodologie employée pour répondre aux objectifs de ce stage. Nous y expliquerons également les données manipulées, leur disponibilité et leur traitement. En effet, la disponibilité des données brutes, la nature des variables utilisées et/ou calculées, ainsi que les méthodes de calcul associées sont des éléments déterminants et conditionnent l'analyse qu'il est possible d'en tirer.

Les projets Explore2070 et Explore2 ont en commun qu'ils s'appuient tous les deux sur de la modélisation hydroclimatique pour déterminer les projections futures. C'est pourquoi il paraît essentiel de débiter cette partie par définir ce qu'est une chaîne de modélisation et les concepts qui gravitent autour. Ce faisant, nous pointerons les grandes différences entre les projets.

2.1 Grands principes d'une chaîne de modélisation hydroclimatique

2.1.1 Modélisation climatique : les Modèles à Circulation Générale (GCM)

Les scénarios d'émission de GES du GIEC, sont déclinés au travers de Modèles de Circulation Générale (GCM), qui sont des modèles numériques de l'atmosphère en fonction du temps permettant de simuler l'évolution climatique dans les décennies à venir en faisant varier les concentrations en GES sur la base d'hypothèses démographiques, socio-économiques définies dans ces scénarios (autrement dit des trajectoires de forçage radiatif). Les évolutions technologiques en matière de puissance de calcul des ordinateurs et de connaissances scientifiques vis-à-vis des méthodes numériques, ainsi que de la paramétrisation des principes physiques qui sont en jeu, ont permis une amélioration des GCM ces dernières années (Herrera et al., 2007).

Le projet de coordination de cette modélisation numérique du changement climatique, i.e. le CMIP²², est supervisé par le PCMDI. Ces modèles servent de référence numérique en matière de changement climatique et sont utilisés en entrée d'autres modèles qui permettent ainsi de simuler l'influence du changement climatique sur d'autres phénomènes physiques. Explore2070 s'est basé sur la phase 3 du projet (CMIP3) tandis qu'Explore2 s'est basé sur la cinquième phase (CMIP5).

Les modèles hydrologiques ou hydrogéologiques font partie de ces autres modèles, qui alimentés avec les projections climatiques (qui découlent de la déclinaison d'un ou plusieurs scénarios d'émission au travers d'un ou plusieurs GCM, voir parties 2.1.2 à 2.1.5), permettent de simuler et d'évaluer les composantes du cycle de l'eau. Citons à titre d'exemple, la répartition spatiale et l'intensité des précipitations, l'évapotranspiration et l'assèchement des sols, l'infiltration de l'eau et le niveau des nappes, ou encore les événements extrêmes sur le réseau hydrographique de surface (crues et étiages).

²² (WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), 2024)

2.1.2 Concept de « descente d'échelle » : lien avec la modélisation hydrologique

Toutefois, la résolution spatiale des GCM est trop grande, comparée à la résolution plus fine que nécessitent les modèles hydrologiques, pour simuler un impact localisé du changement climatique sur la ressource en eau. En effet, les GCM travaillent avec des mailles de l'ordre de quelques dizaines de milliers de km² (mailles de 100 à 200 km de côté) alors que les modèles hydrologiques travaillent à l'échelle de quelques dizaines de km² pour tenir compte de la variabilité géographique et climatique des bassins versants sur lesquels on simule la réponse hydrologique²³.

Il est donc nécessaire de travailler avec des données climatiques à une échelle plus petite : on parle de descente d'échelle ou de « désagrégation » (*downscaling* en anglais). Cette descente d'échelle permet de mieux prendre en compte les climats locaux, dont l'échelle caractéristique est souvent de quelques dizaines de km², bien qu'il reste difficile de modéliser les événements extrêmes convectifs (pluies intenses ou orages, vagues de chaleur, etc.). À l'issue du processus, on obtient une déclinaison « locale » du GCM, compatible avec l'échelle hydrologique.

Différentes méthodes existent pour faire le lien entre une variable à grande échelle, i.e. le prédicteur, avec la même variable à une échelle plus réduite, le prédicteur :

- Une approche statistique qui vise à obtenir l'information à l'échelle « locale » à partir des informations à plus grande échelle au moyen d'une fonction stochastique²⁴ ou déterministe (ou bijective). On parle de fonction de transfert ;
- Une approche dynamique qui consiste à utiliser les équations gouvernant le système climatique. En les résolvant, on peut obtenir les variables climatiques à une échelle plus fine à partir des conditions aux bords. Elle nécessite toutefois des modèles climatiques à une échelle plus réduite que les GCM (à une échelle mésoscopique), dite à haute résolution, de quelques centaines de km² : les RCM, i.e. Regional Climate Model.

L'approche dynamique nécessite de plus grandes ressources de calculs. L'approche statistique, quant à elle, a l'inconvénient de ne pas toujours correctement représenter la variabilité temporelle et la représentation des phénomènes extrêmes (pluies intenses par exemple). Elle nécessite, en outre, une période d'observation historique qui sert de référence pour le climat simulé. Dans le cadre d'Explore2070, une approche statistique a été utilisée. Pour Explore2, il s'agit d'une approche dynamique.

La Figure 1, page suivante, synthétise ce principe de descente d'échelle.

Pour chaque GCM, il peut y avoir une ou plusieurs désagrégations « partielles » vers le RCM. Ainsi, pour Explore2, pour chaque GCM, il y a 3 voire 4 RCM et par conséquent, in fine 3 à 4 déclinaisons « locales » du modèle climatique global.

Dans le cadre des projets Explore2070 et Explore2, les déclinaisons « locales » des GCM (ou les couples GCM – RCM pour Explore2) ont été réalisées « à la même échelle régionale » en l'occurrence la « grille SAFRAN » (Figure 2).

²³ Cette nécessité de travailler à des échelles plus fines n'est pas propre à la modélisation hydrologique et d'autres phénomènes physiques nécessitent également une échelle plus fine pour qu'ils puissent être correctement modélisés.

²⁴ « La même cause ne va pas déclencher le même effet » ; c'est une fonction qui génère une ou plusieurs variables aléatoires, ici les variables climatiques.

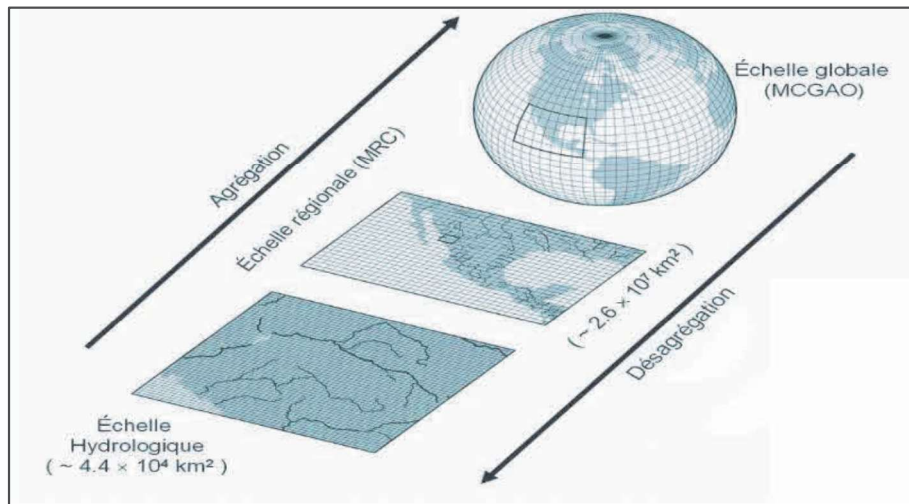


Figure 1 – Conceptualisation de la « descente d'échelle » (désagrégation) et de la « remontée d'échelle » (agrégation) entre les modèles globaux (GCM ou AOGCM) et ici l'échelle hydrologique. (Herrera et al., 2007).

SAFRAN est à l'origine, une réanalyse climatique de très haute résolution (comparée aux GCM & RCM), développée par le CNRM, pour la prévision des avalanches dans le massif alpin, et bien adaptée pour alimenter les modèles hydrologiques. La grille de résolution développée dans le cadre de ce projet (i.e. la « grille SAFRAN ») a été reprise pour Explore2070 & Explore2 : c'est un ensemble de 143 x 134 points dont la résolution est de 64 km² (mailles de 8 km x 8 km) centrés sur la France.

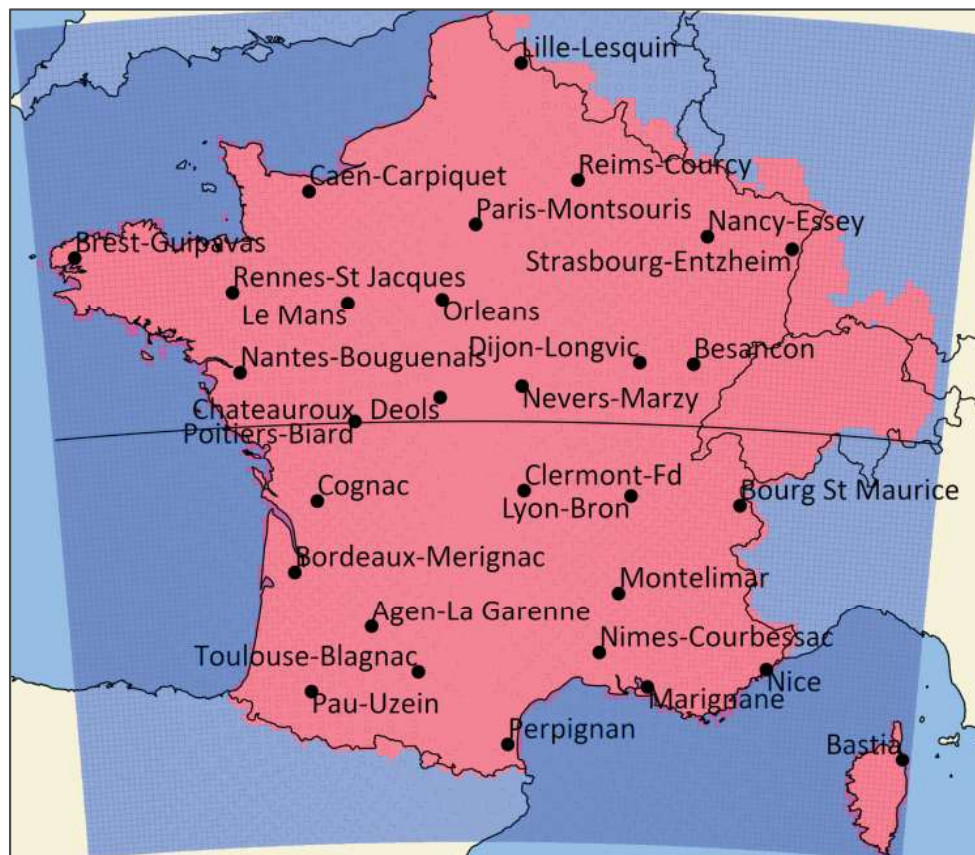


Figure 2 – « Grille Safran » en coordonnées Lambert II étendues, en projection Mercator. Les points rouges représentent les points où ont été simulées des données climatiques. (Marson et al., 2024)

Seuls les points correspondant à la France métropolitaine ont été utilisés dans le cadre de

l'exercice de comparaison climatique entre les projets. En particulier, la Suisse, et par conséquent, le bassin versant du Rhône amont ainsi que les points de simulation en Suisse, ont été exclus de l'exercice de comparaison, bien que les points de simulation en aval (entre le lac Léman et l'estuaire du Rhône) héritent de la simulation hydrologique sur la Suisse. Il en est de même pour les cours d'eau inter-frontaliers qui héritent ou transmettent les simulations hydrologiques respectivement sur leur bassin versant amont ou aval : c'est le cas du Bénélux, de l'Allemagne et de l'Espagne vis-à-vis de la France, dans « un sens ou dans l'autre ».

2.1.3 Correction des biais induits par la descente d'échelle

La descente d'échelle induit des biais en termes d'intensité des phénomènes étudiés, et de leur fréquence, et qu'il est nécessaire de corriger. Cette correction est effectuée au moyen d'un jeu de données de référence. Dans le cadre des deux projets, le jeu de données de référence en question est la « réanalyse SAFRAN » ou tout simplement la BDD SAFRAN²⁵. Cette dernière étant mise à jour chaque année.

Pour Explore2, deux méthodes statistiques (Marson et al., 2024) reposant sur la méthode des quantiles-quantiles, au moyen de la « réanalyse SAFRAN », ont été utilisées. Nous ne développerons pas celles-ci :

- La *méthode ADAMONT* ;
- La *méthode CDF-t*.

Pour Explore2070, il n'y a pas eu de correction de biais à proprement parler puisque celle-ci est « incluse » en quelque sorte dans la méthode de descente d'échelle statistique utilisée (*méthode CERFACS DSCLIM*²⁶) au travers d'une méthode s'appuyant sur les analogues et régimes de temps, qui implique l'utilisation de la « réanalyse SAFRAN ».

Succinctement, la méthode quantiles-quantiles au moyen de la « réanalyse SAFRAN », permet de tenir compte des observations climatiques passées, et de « corriger » d'une certaine façon, les données brutes issues des GCM ou RCM-GCM : on détermine pour chaque valeur modélisée le centile le plus proche, à partir de sa fréquence d'apparition, puis celle-ci est remplacée par le centile empirique correspondant²⁷ des observations passées, réanalysées avec SAFRAN.

Quant à la méthode des analogues et des régimes de temps, celle-ci s'appuie sur le principe que les mêmes causes météorologiques produisent les mêmes effets. On identifie un évènement analogue de la même saison météorologique et du même régime de temps d'une chronique de référence pour projeter ce qu'il pourrait avoir lieu.

2.1.4 Projections hydroclimatiques futures (climat futur)

Finalement, après descente d'échelle, chaque chronique (au pas de temps journalier) d'une variable climatique donnée issue d'une combinaison scénario d'émission (RCP ou SRES) - GCM (couplés avec un RCM dans le cadre d'Explore2) est déclinée spatialement sur la « grille SAFRAN

²⁵ (Quintana-Seguí et al., 2008)

²⁶ (CERFACS - Code de calcul - Traitement des données climatiques, 2013)

²⁷ On calcule les centiles de la série simulée, par extrapolation linéaire, aux moyens des fréquences d'apparition dans chacune des séries simulées. On fait de même pour les observations historiques de référence. Et on fait correspondre chaque centile modélisé à chaque centile historique.

» après la descente d'échelle. On parle alors de projections climatiques futures²⁸ ou de forçage climatique. Ce sont ces projections qui ont été utilisées en entrée des modèles hydrologiques.

Les horizons temporels de ces projections futures peuvent être variés. Dans le cadre d'Explore2070, un seul horizon temporel a été considéré : 2046-2065. Pour Explore2, les projections ont été réalisées sur l'ensemble du XXI^e siècle. La comparaison des deux projets a donc impliqué de se placer à une même fenêtre temporelle, en l'occurrence celle utilisée pour Explore2070.

2.1.5 Simulations hydroclimatiques sur la période de référence (climat présent)

La simulation climatique a été également faite pour une période de référence²⁹. Dans le cadre d'Explore2070, la période temporelle de référence considérée est 1961 - 1990. Pour Explore2, il s'agit de 1976 - 2005. Les chroniques issues de ces simulations ont également été utilisées en entrée des modèles hydrologiques. On parle également de « runs historiques ».

L'intérêt de cette démarche étant de pouvoir calculer des écarts futur - présent (on parle également d'anomalie.) pour les deux projets : ces écarts rendant compte de l'« effet » du changement climatique. Cependant, nous verrons plus loin que cela implique une certaine prudence quant à l'interprétation de ces écarts.

2.1.6 Modélisation hydrologique³⁰

La dernière étape de la chaîne hydroclimatique est la modélisation hydrologique.

La modélisation hydrologique consiste à simuler la transformation de la pluie en débit à l'échelle d'un bassin versant. Elle permet de modéliser des variables hydrologiques, principalement le débit journalier moyen, à partir duquel, on déduit d'autres variables hydrologiques (QM, QMNA, etc.)³¹.

Rappelons qu'un bassin versant est essentiellement défini par un exutoire, celui-ci étant un point de convergence de l'eau précipitée sur un territoire donné. C'est ce territoire qu'on appelle bassin versant. Aussi, la définition d'un bassin versant est toujours relative : ces derniers sont rattachés à un cours d'eau, et définis par des lignes topographiques de départage des eaux. De plus, ceux-ci s'imbriquent les uns dans les autres au gré des confluences de ces cours d'eau.

La modélisation s'appuie sur trois principes principaux (Figure 3), qui rendent compte des échanges entre les compartiments associés à un bassin versant et qui interviennent dans le cycle de l'eau, i.e. l'atmosphère, la surface, le sol/sous-sol, et enfin le réseau hydrographique. Ces principes sont :

- La production de la pluie en débit d'un point de vue uniquement volumique (conservation de la masse) entre le moment où la pluie tombe sur le sol et le moment

²⁸ Par abus de langage, on parlera tout simplement de projections futures. Il sera question de projections climatiques ou hydrologiques selon le contexte et les variables d'intérêt concernées.

²⁹ En réalité, les scénarios d'émission incluent la période historique de référence ainsi que les projections futures à une échéance plus ou moins longue.

³⁰ Les concepts développés ici sont détaillés dans le cours ENTPE d'hydrométéorologie (Boudevillain et al., 2023)

³¹ la partie 2.3.2 p.15, pour la définition de ces variables.

où le bassin-versant « répond » à son exutoire dans le réseau hydrographique. On parle de pluie efficace ou de pluie nette ;

- Le transfert qui rend compte du temps de réponse du bassin versant, entre le moment où la pluie tombe sur le sol et le moment où un écoulement est observé à l'exutoire à la suite de cette précipitation ;
- La propagation sur l'ensemble du réseau hydrographique qui rend compte du temps de la propagation d'un tronçon amont à un tronçon aval.

Les deux premiers principes sont associés à des fonctions mathématiques plus ou moins complexes, respectivement la fonction de production et la fonction de transfert. Comme la fonction de transfert rend uniquement compte du temps de réponse d'un bassin versant, celle-ci est conservative en volume.

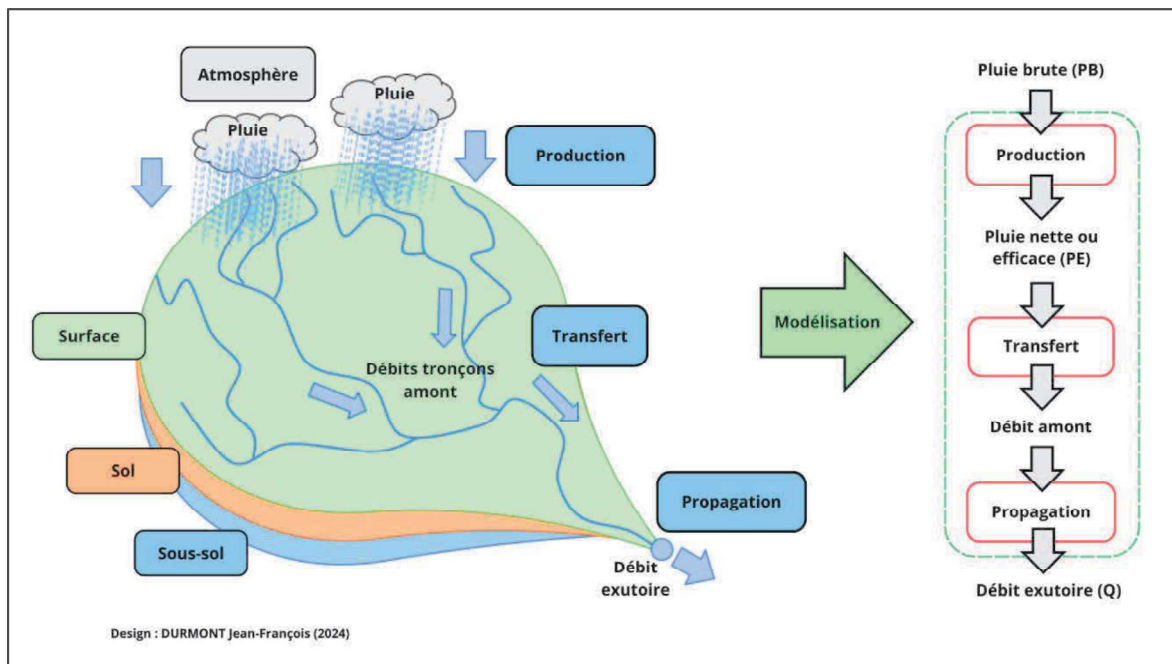


Figure 3 — Schématisation d'un bassin versant et de la modélisation (simplifiée) de la transformation pluie-débit.

D'un point de vue processus, on distingue trois grandes familles de modèles hydrologiques :

- Les modèles empiriques dans lesquels les phénomènes évoqués ci-dessus ne sont pas séparés et regroupés dans une seule fonction mathématique caractérisant la relation entre l'entrée et la sortie d'un bassin versant, fonction basée sur un ou plusieurs paramètres simplifiés n'ayant aucune réalité physique. Ils sont également qualifiés de modèles « boîtes noires ». Ces modèles nécessitent un calage au moyen de chroniques pluie - débit observées ;
- Les modèles conceptuels ou à réservoirs où le bassin versant est conceptualisé au travers de réservoirs et permettent à minima de séparer les principes de transformation et de transfert ci-dessus. Ces principes sont associés à des paramètres simplifiés n'ayant aucune réalité physique. Ces modèles nécessitent également un calage au moyen de chroniques pluie - débit observées ;
- Enfin, les modèles à base physique qui rendent compte des phénomènes physiques impliqués au travers des lois et des équations qui les régissent. Ces modèles ne

nécessitent pas nécessairement d'un calage, mais ils font l'objet d'une vérification et/ou d'une correction, toujours sur la base de chroniques pluie – débit observées.

D'un point de vue spatial, on distingue deux grandes familles (Figure 4) :

- Les modèles globaux où le bassin versant est représenté via une seule entité homogène et uniforme, et où les paramètres sont restreints et rendent compte d'une simplification des processus physiques mis en jeu (comportement moyen) ;
- Les modèles distribués où le bassin versant est décomposé en mailles régulières ou non, sur lesquelles on suppose que les processus (et paramètres associés) sont homogènes. Sur chacune des mailles, on applique les processus décrits ci-dessus. La propagation est associée aux échanges entre les mailles « amont » et « aval » du bassin versant.

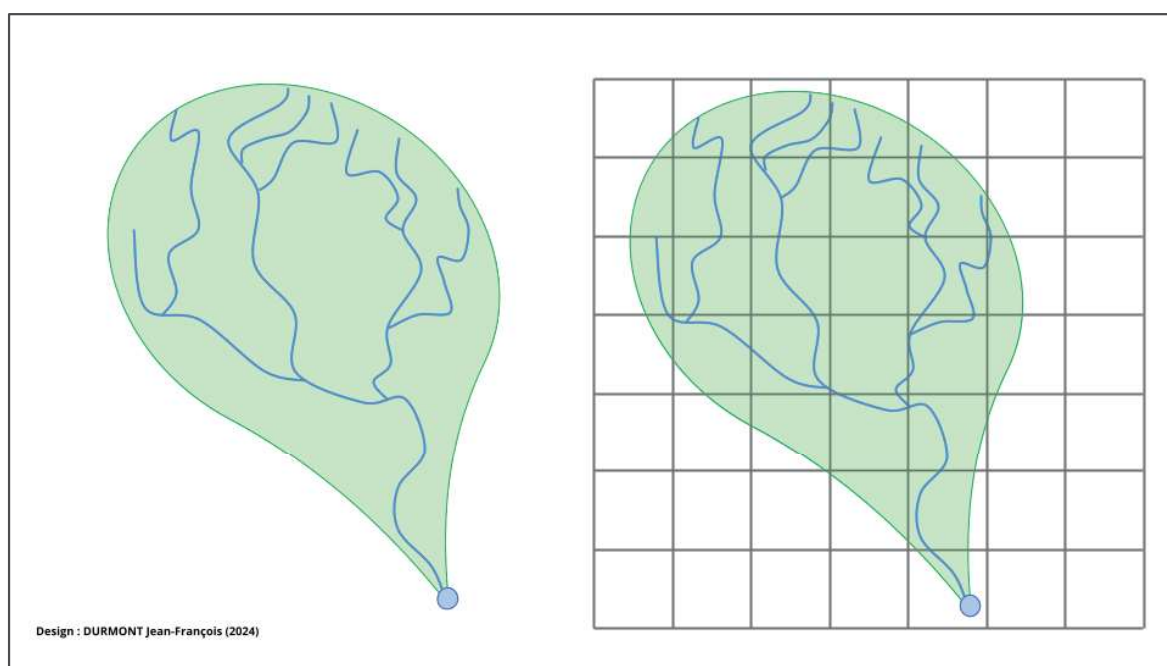


Figure 4 — Schématisation des modèles globaux (à gauche) et des modèles distribués (à droite). La transformation pluie-débit est globale à gauche (Le BV est une entité numérique unique.), discrétisée à l'échelle des mailles à droite.

Dans le cadre des projets Explore2070 et Explore2, les modèles hydrologiques sont à la fois conceptuels et physiques. Et ils sont tous distribués (ou semi-distribués³²) sur la grille SAFRAN, à savoir une résolution de 64 km², à l'exception notable du modèle GR4J pour Explore2070. En conséquence, l'incertitude sera plus élevée pour les bassins versants dont la surface est de l'ordre de quelques mailles à contrario des bassins versants de plusieurs centaines ou milliers de km². Les petits bassins versants (inférieurs à 64 km²) ne sont de fait pas modélisés en tant qu'entité indépendante et sont forcément intégrés à un bassin versant plus grand (résolution des modèles de 64 km²).

Finalement, les projets Explore2070 et Explore2 ont permis de générer des séries hydrologiques présentes et futures, en l'occurrence des débits moyens au pas de temps journaliers, et ce, sur deux ensembles de points (stations), pour chacun des deux projets, qui se recouvrent partiellement et qui représentent les exutoires des bassins versants.

³² La distribution se fait à l'échelle des sous-bassins versants, et non à l'échelle de mailles arbitraires (d'où le terme de « semi-distribution »). Ces sous-bassins peuvent être vus comme une addition de « sous-modèles globaux ».

2.1.7 Nombre de simulations hydroclimatiques par point

En ce qui concerne Explore2, le nombre de simulations hydroclimatiques en chacun des points considérés dépend des différentes combinaisons Scénario RCP – GCM – RCM – Méthode Correction Biais – Modèle hydrologique. Au total, tout scénario d'émission confondu, il y a 36 chaînes climatiques possibles déclinées selon deux méthodes de correction qui conduisent jusqu'à 72 forçages climatiques, eux-mêmes déclinés au travers jusqu'à 9 modèles hydrologiques différents. En raison d'une incompatibilité du format des données en sortie des combinaisons Chaîne Climatique - Méthode Correction Biais, certains modèles hydrologiques³³ n'ont tourné qu'avec 36 forçages climatiques (1 seule méthode de correction), conduisant ainsi jusqu'à un maximum de 540 simulations par point (tout scénario d'émission et combinaisons hydroclimatiques confondus).

Pour Explore2070, ce nombre est beaucoup plus restreint car il n'y a que deux modèles hydrologiques en sortie des 7 RCM pour un scénario d'émission, ce qui conduit à avoir uniquement 7 ou 14 simulations pour un point donné.

2.1.8 Synthèse des principales différences entre les projets Explore2070 & Explore2

Le Tableau 1 synthétise les principales différences qui ont été abordées dans cette partie.

³³ C'est le cas des modèles hydrologiques CTRIP, Orchidée, et SIM2 qui n'étaient pas compatibles avec la méthode de correction CDF-t (Sauquet, Strohmenger, et al., 2024).

	Explore2070	Explore2
Scénarios d'émission	Scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios). Seul A1B a été considéré dans Explore2070 (Estimation de +2.8 °C à l'horizon 2100).	Scénarios RCP (Representative Concentration Pathways). Les chiffres font référence au forçage radiatif atteint à l'horizon 2100. Ont été considérés les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 & RCP 8.5
Assessment Report de l'IPCC (GIEC) associé	AR4 (2007)	AR5 (2014)
Climate Model Intercomparison Project	CMIP Phase 3	CMIP Phase 5
Modèles GCM (General Circulation Model)	7 (ARPV3, CCCMA, ECHAM5, GFDL20, GFDL21, GISS, MRI)	6 (CNRM, ICHEC, IPSL, MOHC, MPI, NCC)
Méthode de descente d'échelle	Approche statistique	Approche dynamique
RCM (Regional Climate Model)	Non	17 (déclinaison des GCM)
Nombre de chaînes climatiques complètes	7 (les 7 GCM pour un seul scénario SRES)	36 (déclinaison des 17 RCM sur les scénarios RCP)
Méthodes de correction de biais	Aucune	2
Après descente d'échelle (échelle hydrologique)	Sur la grille SAFRAN 8 x 8 km (mailles de 64 km ²)	
Nombre de forçages climatiques	7	36 ou 72 (selon 1 ou 2 méthodes de corrections de biais utilisées)
Modèles hydrologiques	ISBA MODCOU & GR4J	CTRIP, EROS, GRSD, J2000, MORDOR-SD, MORDOR-TS, ORCHIDEE, SIM2, SMASH
Nombre de chaînes hydroclimatiques complètes	14	540 (36 ou 72 forçages climatiques pour les 9 modèles hydrologiques)
Points de simulation	1 524	4 043
Période de référence utilisée	1961 - 1990	1976-2005

Tableau 1 — Comparaison des projets Explore2070 & Explore2 (synthèse)

2.2 Données disponibles

La nature des données manipulées a été diverse et a conditionné en partie le traitement et l'analyse qu'il a été possible de faire.

Les données disponibles pour la réalisation du travail sur ce sujet sont issues :

- D'un ensemble de rapports liés aux projets Explore2070 & Explore2. Ces documents techniques, produits par l'ensemble des parties prenantes des projets, ont été utilisés pour comprendre d'un point de vue global ces projets, et de se familiariser avec les chaînes de modélisation, ainsi que leurs conclusions. Le travail réalisé s'est principalement appuyé sur les rapports de synthèse qui ont permis de faire l'inventaire des grandes différences dans la modélisation, mais également d'appréhender les points communs ;
- D'autres ressources bibliographiques en lien avec le contexte du changement climatique et la modélisation hydroclimatique. Citons de manière non exhaustive les rapports de synthèse du GIEC, les ressources produites dans le cadre des portails Wikhydro³⁴ ainsi que DRIAS, les futurs du climat³⁵ ;
- Des données de simulation issues de la modélisation de ces projets sur l'ensemble des chaînes hydroclimatiques de format divers et variés, de pas de temps différents, agrégées géographiquement et/ou temporellement ou non. Ces données ont été en grande partie produites et bancarisées par d'autres parties prenantes des projets.

Le travail sur les données simulées, a été essentiellement de :

- Comprendre la nature des variables manipulées ;
- De lire, mettre en forme ces données ;
- De traiter ces données selon la finalité nécessaire : extractions des variables d'intérêt, sur les périodes temporelles d'intérêt, agrégations temporelles et/ou spatiales, et calculs de nouvelles variables au moyen d'approches statistiques simplifiées et de masse ;
- Confronter, visualiser et analyser ces données.

Ce travail a été réalisé en très grande partie sur l'environnement R Studio avec le langage de programmation R, ce qui a impliqué la réalisation de scripts de programmation. Des visualisations géographiques ont été également réalisées au moyen d'un outil SIG, en l'occurrence QGIS.

2.3 Nature des variables climatiques et hydrologiques manipulées

Puisque la nature des variables manipulées, dans le cadre de l'exercice de comparaison des deux projets, constitue le cœur du travail, il est utile de nous attarder sur celles-ci afin d'en donner leurs définitions, ce qu'elles représentent, et indiquer comment elles sont calculées.

On parle également d'indicateurs puisque ces variables permettent de juger d'une tendance d'évolution, de la fréquence ou de l'intensité d'un phénomène étudié. Les indicateurs

³⁴ (Wikhydro, s. d. <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Portail:Wikhydro>)

³⁵ (DRIAS, *Les futurs du climat*, s. d. <https://www.drias-climat.fr/>)

manipulés dans le cadre de ce travail sont de nature climatique et hydrologique. Ceux-ci provenant des chaînes de modélisation associées, directement (sortie directe des modèles) ou indirectement (ajustement statistique et/ou agrégation de données brutes de modélisation).

2.3.1 Variables climatiques

Les variables climatiques (ou indicateurs climatiques) caractérisent le climat et sont représentatives de leurs comportements moyens sur une période temporelle donnée de plusieurs années et sont par conséquent qualifiées d'interannuelles. Celles-ci ont pu être considérées à différentes échelles spatiales à savoir, à l'échelle de la maille SAFRAN, à l'échelle nationale (France métropolitaine), ou à l'échelle d'un bassin versant.

Dans le cadre de l'exercice de comparaison des projets, deux d'entre-elles ont été utilisées :

- **Température moyenne en °C** à différents pas de temps : annuel, saisonnier ou mensuel ;
- **Cumul moyen total de précipitation en mm** à différents pas de temps : annuel, saisonnier ou mensuel.

2.3.2 Variables hydrologiques

Les variables hydrologiques (ou indicateurs hydrologiques) caractérisent l'hydrologie, ici l'hydrologie de surface, et sont représentatives également de leurs comportements moyens sur une période temporelle donnée de plusieurs années, et peuvent donc aussi être qualifiées d'interannuelles. La topologie des variables hydrologiques est différente des variables climatiques : celles-ci sont inhérentes à la notion de bassin versant. Et si on peut parler de température moyenne à l'échelle de la France (agrégation spatiale), on ne peut pas faire de même pour les débits par exemple, car cela amènerait à compter plusieurs fois la réponse hydrologique de bassins versants d'une part (sous-bassins imbriqués dans d'autres), et d'autre part, on perdrait le caractère spatialisé de l'information.

Il s'agit de données extraites ou calculées à partir de données simulées, bien que ces définitions soient également valables dans le cadre de valeurs observées (via la mesure et calcul à une station hydrométrique notamment).

Les variables qui ont été considérées sont les suivantes :

- **Débits journaliers moyens en m³/s** à différents pas de temps (annuel, saisonnier ou mensuel). Les modèles hydrologiques produisent des chroniques de débits journaliers, sur l'ensemble de la période de simulation et celles-ci sont agrégées (moyennées) aux pas de temps évoqués, de façon interannuelle. Dans l'exercice de comparaison, le pas de temps considéré a été le **pas de temps mensuel, annuel et saisonnier** car cela permet d'apprécier l'évolution de l'hydrogramme moyen pour une année type, sur une période temporelle de projection ou de référence pour le pas de temps mensuel. Ou encore d'apprécier les différences spatiales ainsi que l'évolution saisonnière et annuelle du débit entre la période de référence et la période de projection future pour un scénario d'émission donné ;
- **Débits mensuels moyens minimums annuels en m³/s (QMNA)**. Ceux-ci sont par définition donnés au pas de temps annuel et ne sont pas interannuels. Pour une chronique de débits journaliers moyens, au pas de temps mensuel, on réalise un échantillonnage des valeurs minimales annuelles puis on extrait ces données sur une fenêtre temporelle voulue, ici 2046-2065 ainsi que sur la période de référence (Figure 5) ;

- **Débits mensuels moyens minimums annuels en m³/s de période de retour 5 ans (QMNA5).** Il s'agit de la valeur de QMNA qui a 20 % de chances (1 chance sur 5) de se produire. Autrement dit, il s'agit de la valeur de QMNA, qui statistiquement, en moyenne, sera dépassée 4 années sur 5 (80 % du temps), et sera inférieure 1 année sur 5 (20 % du temps). Il s'agit d'une valeur de quantile obtenue par le calage d'une loi log-normale à partir d'une série de données de QMNA, en l'occurrence ici, les séries sur les fenêtres temporelles 2046-2065 et de référence (Figure 5 ci-dessous, l'Annexe 2 & l'Annexe 4 pour le détail sur le calcul des estimateurs des paramètres ainsi que des quantiles). Le QMNA5 a une valeur réglementaire car c'est le débit d'étiage de référence utilisé dans le cadre des autorisations de prélèvements dans les cours d'eau ou pour le maintien d'un débit réservé en aval des ouvrages.
- **Débits mensuels moyens minimums annuels en m³/s de période de retour 2 ans (QMNA2).** Il s'agit de la valeur de QMNA qui a 50 % de chances (1 chance sur 2) de se produire. Autrement dit, il s'agit de la valeur de QMNA, qui statistiquement, en moyenne, sera dépassée 1 année sur 2 (50 % du temps). De la même manière que pour le QMNA5, c'est une valeur de quantile obtenue par le calage d'une loi log-normale à partir d'une série de données de QMNA.
- **Débits journaliers maximums annuels en m³/s (QJXA).** Ceux-ci sont par définition donnés au pas de temps annuel et ne sont pas interannuels. Pour une chronique de débits journaliers (ce ne sont donc pas des moyennes mensuelles), on réalise un échantillonnage des valeurs maximales, puis on extrait ces données sur une fenêtre temporelle désirée, ici 2046-2065 ainsi que sur la période de référence (Figure 6) ;
- **Débits journaliers maximums annuels en m³/s de période de retour 10 ans (QJXA10).** Il s'agit de la valeur de QJXA qui a 10% de chances (1 chance sur 10) de se produire. Autrement dit, il s'agit de la valeur de QJXA, qui statistiquement, en moyenne, sera dépassée 1 année sur 10 (10% du temps), et sera inférieure 9 années sur 10 (90% du temps). Il s'agit d'une valeur de quantile obtenue par le calage d'une loi de Gumbel à partir d'une série de données de QJXA, en l'occurrence ici, les séries sur les fenêtres temporelles 2046-2065 et de référence (Figure 6 page suivante, l'Annexe 3 & l'Annexe 4 pour le détail sur les calcul des estimateurs des paramètres ainsi que des quantiles).
- **Débits journaliers maximums annuels en m³/s de période de retour 2 ans (QJXA2).** Il s'agit de la valeur de QJXA qui a 50% de chances (1 chance sur 2) de se produire. Autrement dit, il s'agit de la valeur de QJXA, qui statistiquement, en moyenne, sera dépassée 1 année sur 2 (50% du temps). De la même manière que pour le QJXA10, c'est une valeur de quantile obtenue par le calage d'une loi de Gumbel à partir d'une série de données de QJXA.

m3/s	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	...	Année n
janv	12	15	17	9		m1
févr	14	12	22	15		m2
mars	15	17	35	25		m3
avr	35	23	37	34		m4
mai	45	38	39	35		m5
juin	37	22	18	25		m6
juil	14	10	14	17		m7
août	8	7	9	12		m8
sept	5	9	10	11		m9
oct	8	12	7	14		m10
nov	12	14	10	13		m11
déc	11	12	11	12		m12

QMNA	5	7	7	9	...	min(m _i)
------	---	---	---	---	-----	----------------------

Calage d'une loi statistique (loi log-normale) sur la série des QMNA pour calculer le QMNA5 (QMNA de temps de retour 5 ans sec)

Le QMNA5 est tel que, statistiquement, en moyenne, une année sur 5 le QMNA est plus faible que le QMNA5, 4 années sur 5 il est plus élevé.

Figure 5 — Illustration de la détermination des QMNA et du calcul des QMNA5. (Chazot et al., 2012)

m3/s	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	...	Année n
01-janv	120	134	256	176		QJ1
02-janv	122	145	280	177		QJ2
03-janv	137	147	282	189		QJ3
04-janv	142	153	300	190		QJ4
...
...	...	...	...	724	...	...
...	...	450	...	...	...	...
...	514	...	540	...	...	...
...
28-déc	213	76	234	97		QJ362
29-déc	199	80	240	102		QJ363
30-déc	187	82	241	107		QJ364
31-déc	186	84	238	98		QJ365

QJXA	514	450	540	724	...	max(QJ _i)
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----------------------

Calage d'une loi statistique (loi de Gumbel) sur la série des QJXA pour calculer le QJXA10 (QJXA de temps de retour 10 ans)

Le QJXA10 est tel que, statistiquement, en moyenne, une année sur 10 le QJXA est plus élevé que le QJXA10, 9 années sur 10 il est plus faible.

Figure 6 — Illustration de la détermination des QJXA et du calcul des QJXA10. (Chazot et al., 2012)

III. Résultats

Dans le cadre de ce stage, a été réalisée une analyse des projections climatiques ainsi qu'hydrologiques. Avoir le contexte climatique sur l'horizon temporel d'étude est nécessaire au préalable de l'étude hydrologique, puisque cela permet d'en dégager les grandes tendances et l'impact probable sur les variables hydrologiques étudiées. Mais abordons également le traitement qui a été effectué sur les données.

3.1 Traitement des données réalisé

3.1.1 Prise en main des données d'Explore2070

Dans le cadre du projet Explore2070, des fiches de synthèse (Annexe 1) ont été produites par station (ou point de simulation), sur lesquelles on trouve les informations suivantes, présentées ici de manière succincte :

- Tout ce qui relève du climat avec notamment les données simulées de température, de cumul de précipitation, en valeurs moyennes mensuelles interannuelles (à l'échelle de la station³⁶ et du bassin versant), ainsi que les anomalies entre l'horizon temporel futur de projection (1976-2005) et la période de référence (1961-1990 pour Explore2070) ;
- Tout ce qui relève de l'hydrologie de surface (également à l'échelle de la station et du bassin versant), avec les caractéristiques du bassin versant, les données observées de débit, les débits simulés (moyennes mensuelles interannuelles) pour les chaînes hydroclimatiques, ainsi que les anomalies, là aussi entre l'horizon temporel futur de projection et la période de référence. On y trouve également des données statistiques sur les extrêmes, avec les étiages et les crues ;
- Enfin, quelques graphiques de synthèse.

La prise en main des données Explore2070 a consisté à faire de la relecture des données produites, déjà en grande partie mises en forme et synthétisées, dans le cadre du projet Explore2070 (sous format .csv) pour retrouver les résultats explicités sur ces fiches de synthèse (l'ensemble des indicateurs et écarts). Ce faisant, ce travail a permis de contribuer à la compréhension des données qu'on obtient en sortie de chaîne de modélisation, mais constituait également un préalable nécessaire à la comparaison des deux projets.

Par la suite, les données hydrologiques d'Explore2070 ont été retravaillées pour être dans le même format que les données hydrologiques d'Explore2 afin de simplifier la comparaison des deux projets au travers la réalisation d'infographies synthétiques.

3.1.2 Détermination des points de simulation en commun entre les deux projets

Comme évoqué précédemment, le nombre de points de simulation entre les deux projets sont différents puisque Explore2 a permis de simuler la réponse hydrologique des bassins versants sur beaucoup plus de points qu'Explore2070 (Tableau 1 p. 14). Comparer les deux projets

³⁶ Par station, on entend essentiellement ici l'exutoire d'un bassin versant. Cela désigne également ici un point de simulation hydrologique auquel est associé des chroniques de variables hydrologiques en sortie (débit principalement).

nécessitait de déterminer en premier lieu, les points en commun entre ceux-ci.

Précisons qu'un point de simulation peut correspondre ou non à une station hydrométrique, à laquelle est rattachée un code « Hydro » de l'Hydro Portail³⁷, stations qui sont utilisées par différents gestionnaires de l'eau (réseau Vigicrues, syndicats de rivières, etc.). D'autres, ont pu faire l'objet d'une codification dans le référentiel SANDRE³⁸ (avec notamment la création d'un code « Hydro »), sans pour autant correspondre à une station hydrométrique (stations « purement virtuelles »). Enfin, une troisième partie, n'avait aucune codification « Hydro » (ne concerne que des stations du projet Explore2070 pour ce dernier point).

Chaque point de simulation est associé à un bassin versant et ses caractéristiques, avec notamment les informations suivantes :

- Les coordonnées géographiques (qui sont les coordonnées de l'exutoire du bassin versant) ;
- La surface du bassin versant ;
- Un libellé qui fait référence généralement au nom du cours d'eau et au lieu-dit (ou localité) où est situé le point de simulation ou la station ;
- Et éventuellement le code « Hydro ».

Aussi, pour identifier si deux points de simulation entre les deux projets pouvaient être considérés comme identiques (et désigner ainsi le même point de simulation ou station), le code « Hydro » mais aussi la distance entre deux points de simulation, ainsi que l'écart relatif des surfaces de bassin versant associées à ces deux points ont été considérés. Le dernier critère, le libellé, a été utilisé essentiellement à des fins de vérification.

La difficulté de l'exercice résidait dans :

- Les coordonnées géographiques associées aux deux projets, exprimées dans deux systèmes de projection cartographique différents, respectivement Lambert 2 étendu pour Explore2070 et Lambert 93 pour Explore2070 ;
- Le changement de nomenclature du code « Hydro » entre les deux projets (La BDD Explore2 comprenait cependant les deux nomenclatures, l'ancienne et la nouvelle.) ;
- La détermination des bons seuils sur les distances et écarts relatifs de surface (approche itérative).

Le calcul de distance a impliqué :

- La conversion des coordonnées projetées en coordonnées géographiques (latitude, longitude dans le système géodésique WGS 84), conversion réalisée au moyen d'algorithmes de conversion, mis à disposition par l'IGN³⁹ ;

³⁷ (SCHAPI - HydroPortail, 2024 <https://hydro.eaufrance.fr/>)

³⁸ SANDRE est un service permettant le stockage et l'échange des données relatives à l'eau. Il permet une uniformisation de la codification des données qui sont regroupées dans différentes bases de données (comme la BD Topage relative essentiellement aux cours d'eau), simplifie la mise en commun ainsi que l'échange de ces données entre tous les gestionnaires de l'eau. (*Missions et organisation du Sandre | Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau*, s. d. <https://www.sandre.eaufrance.fr/>)

³⁹ (*Repères de référence géodésiques en France Conversions et transformations de coordonnées*, 2022)

- L'utilisation d'une approche simplifiée, s'appuyant sur le théorème de Pythagore⁴⁰, pour calculer la distance à partir de deux couples de points (latitude, longitude) obtenus.

In fine, il a donc été considéré deux approches, schématisées sur la Figure 7 :

- Une première sélection au moyen du code « Hydro » entre une station identifiée par celui-ci dans la base de données Explore2070 et une autre dans la base de données Explore2. Le calcul de la distance et de l'écart relatif des surfaces associées aux bassins versants ont été également considérés pour évaluer si les points identifiés étaient bien les mêmes (Approche 1) ;
- Une seconde approche en prenant les stations Explore2070 non sélectionnées par cette première approche où seuls les critères de distance ainsi que la surface ont été considérés (Approche 2).

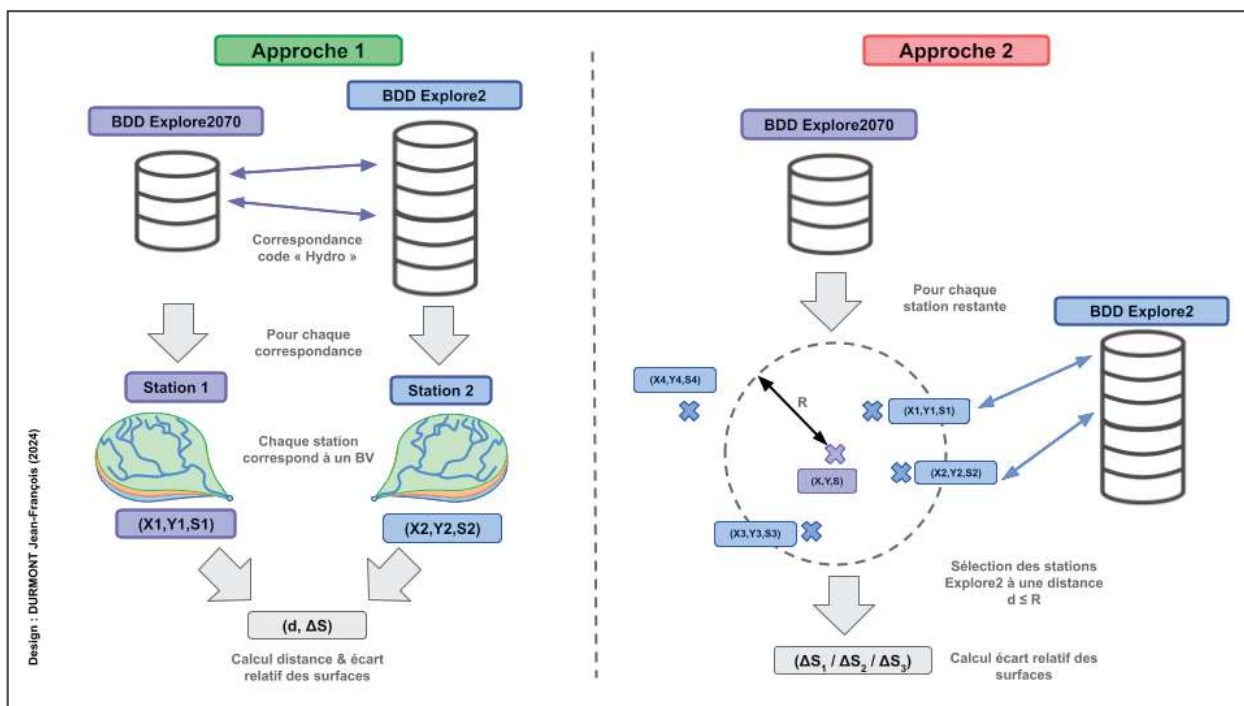


Figure 7 — Schématisation des deux approches utilisées pour la détermination des stations en commun entre les projets Explore2070 et Explore2.

L'approche via une pré-sélection au moyen du code « Hydro » a permis de simplifier le travail : le calcul de distance et de surface permettait surtout de vérifier l'adéquation des deux candidats avec le même code « Hydro », bien que cette approche masque les stations hydrologiquement proches, voire identiques, mais qui peuvent être différentes administrativement parlant vis-à-vis du référentiel SANDRE (d'où la seconde approche).

La seconde approche, plus systématique, sur les points Explore2070 non sélectionnés en première approche, identifiait d'abord les points de simulation d'Explore2 géographiquement proches d'un point de simulation d'Explore2070 (détermination des plus proches voisins) ; le critère de surface permettant principalement de faire la différence entre deux entités hydrologiques d'un même exutoire (mais avec un code « Hydro » différent) avec deux entités rendant compte de deux bassins-versants imbriqués l'un dans l'autre (sous-bassin) ou deux bassins d'une confluence. C'est surtout sur cette seconde approche que la vérification au

⁴⁰ Calcul de distance avec latitudes et longitudes (Villemin, s. d.)

moyen du nom du cours d'eau, ainsi que du lieu-dit, a été faite (avec une élimination pure et simple des stations pour lesquelles il subsistait une incertitude).

Enfin, 970 points de simulation sur les 1524 points de simulation d'Explore2070 ont été identifiés comme ayant un équivalent numérique dans Explore2 ; points de simulation pour lesquels a été extrait un fichier de correspondance. La carte de la Figure 8 permet d'apprécier la répartition spatiale de ces points de simulation sélectionnés ; les points verts et rouges étant associés aux deux approches utilisées.

Concernant la répartition spatiale des points sélectionnés (Figure 8), on peut remarquer que la majorité des points ont été détectés par la première approche, ce qui est cohérent avec le fait que la codification « Hydro » est unique. Vis-à-vis de la répartition spatiale, on peut remarquer l'absence de stations correspondant aux exutoires maritimes et des régions pour lesquelles la densité est plus importante que d'autres (les régions Hauts-de-France, Normandie, Nouvelle-Aquitaine ayant une densité apparente de points plus faible que les autres régions). Les premières ayant été volontairement non considérées, conduisant de fait à une densité plus faibles pour les régions maritimes (qu'on retrouve en partie dans la liste évoquée).

La densité plus faible dans ces régions peut également s'expliquer par l'absence de code « Hydro » : les stations en question n'ont donc pas été considérées dans le processus. Cela peut aussi rendre compte d'un réseau hydrographique moins dense ou d'une absence locale d'enjeux, car le suivi hydrométrique des cours d'eau est réalisé à des fins de surveillance, que ce soient vis-à-vis de la gestion de la ressource ou de prévention des extrêmes (crues, étiages). Aussi un territoire avec moins d'enjeux, au regard de la ressource en eau, sera de fait, moins instrumenté, et par conséquent, sera moins susceptible d'avoir autant de stations déclarées sur l'hydro-portail qu'un autre territoire avec plus d'enjeux, conduisant de fait à moins de points dans la modélisation.

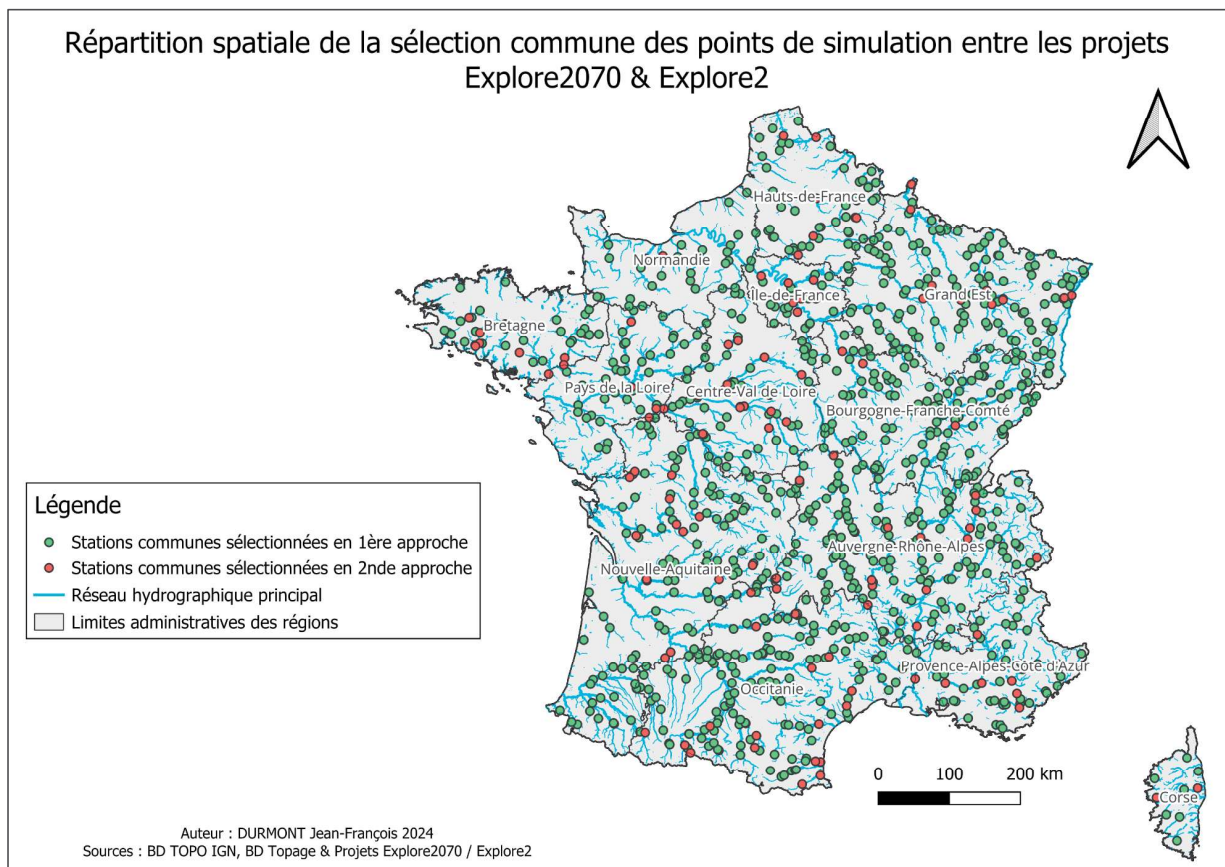


Figure 8 — Répartition spatiale des points de simulation en commun entre les deux projets

3.1.3 Traitement des données climatiques (Explore2070 & Explore2)

Le traitement des données des deux projets a été différent. Cela s'explique par :

- Les formats de fichiers différents, agrégés partiellement ou non, avec des pas de temps différents et couvrant un territoire différent ;
- La disponibilité des données.

Pour Explore2070, les données à disposition étaient déjà agrégées spatialement (France métropolitaine) et temporellement (valeurs interannuelles sur les périodes considérées). Le pas de temps était mensuel, le tout décliné par chaîne climatique (7 chaînes pour Explore2070). pour un unique scénario d'émission GES (SRES A1B).

Pour Explore2, les données à disposition étaient agrégées temporellement (valeurs interannuelles sur les périodes considérées, référence et futur), mais pas spatialement. Elles couvraient par ailleurs la France métropolitaine et la Suisse. Le pas de temps était la saison météorologique. Elles étaient en outre déclinées par chaîne climatique (36 chaînes⁴¹ pour Explore2) et scénario d'émission GES.

Il a donc fallu se ramener à une base commune, à savoir les valeurs saisonnières et annuelles interannuelles, agrégées spatialement (moyennes nationales). Les variables climatiques considérées dans l'exercice ont été le cumul moyen de précipitation et la température moyenne, à l'échelle de la France métropolitaine, et de manière interannuelle.

3.1.4 Traitement des données hydrologiques (Explore2070 & Explore2)

La difficulté pour les données hydrologiques d'Explore2 résidait dans le fait qu'il y a beaucoup plus de chaînes hydroclimatiques (combinaison des Scénarios RCP – GCM – RCM – Méthode Correction Biais – Modèle hydrologique), comparé à Explore2070, et par conséquent une quantité beaucoup plus importante de données brutes déclinées pour les 4 043 points de simulation, sur 1976 – 2005 pour la référence et le XXIème siècle pour les projections futures.

Aussi, l'approche utilisée ici a été systématique, de « masse » et a consisté numériquement (sous R Studio) à :

- Inventorier les différentes combinaisons de Scénario RCP – GCM – RCM – Méthode Correction Biais – Modèle hydrologique ;
- Pour chaque variable considérée (QM, QMNA, QJXA), d'aller lire le fichier de chronique correspondant pour chaque combinaison précédente. Des chroniques de ces variables étant déjà disponibles ;
- De faire, sur ces fichiers, une sélection sur les périodes temporelles d'intérêt. 1976 – 2005 pour la période de référence et 2046-2065 pour la projection futur ;
- De faire, sur ces fichiers, une sélection des points de simulation en commun avec Explore2070 ;
- D'appliquer une méthode de calcul ou d'ajustement statistique selon l'indicateur hydrologique considéré (voir partie 2.3.2 p. 16) pour en déterminer une valeur moyenne interannuelle ou le quantile correspondant pour chaque période temporelle et chaîne de modélisation hydroclimatique ;

⁴¹ Seules les projections climatiques « corrigées » avec la méthode *Adamont* (partie 2.1.3 p.9) ont été considérées ici

- De calculer les anomalies (ou écarts) entre la période de référence et la période de projection future, déclinées par scénario et chaîne de modélisation hydroclimatique ;
- De calculer différents indicateurs de dispersion de ces ensembles obtenus par station et scénario d'émission (sur les valeurs absolues pour chaque période temporelle ou sur les anomalies) à savoir la moyenne (multi-modèles), écart-type, médiane, maximum et minimum. Et ainsi déterminer la tendance d'évolution et dans quelle mesure les différents résultats simulés, pour chacune des chaînes de modélisation, convergent entre eux ;
- Enfin, de déterminer la tendances d'évolution de ces variables hydrologiques.

Pour évaluer si des résultats de simulations convergent entre eux, l'indice de significativité a été considéré. Ce dernier se calcule de la façon suivante pour une variable hydrologique et une station données :

$$\text{indice de significativité} = \frac{\bar{X}_s}{\sigma(X_s)}$$

Où :

$\sigma(X_s)$: écart-type de la série de valeurs obtenues pour chacune des chaînes hydroclimatiques pour un scénario d'émission donné, à un horizon temporel donné et en un point de simulation donné (station).

\bar{X}_s : moyenne de cette même série.

Afin de pouvoir comparer les projets Explore2070 et Explore2, mais également de déterminer si une organisation spatiale ressort pour un scénario donné, cet indice a été normalisé au moyen du maximum des valeurs calculées de cet indice, pour l'ensemble des points pour un scénario d'émission donné. Il est donc à valeurs dans]0 ; 1]⁴². Au plus l'indice de significativité normalisé est proche de 1, au plus l'écart-type de la série de valeurs obtenues pour un point donné est faible, et au plus on peut considérer que les valeurs simulées convergent entre-elles, et que, par conséquent, les modèles sont d'accord entre eux.

Pour évaluer la tendance d'évolution, le signe des écarts a été considéré. Cela consiste plus concrètement à déterminer si, pour une chaîne hydroclimatique donnée, un scénario d'émission donné, à une station donnée, la variable hydrologique considérée évolue à la baisse ou à la hausse, entre un horizon temporel et la période de référence. On définit alors un indice qui se calcule, là encore, pour une variable hydrologique et une station hydrologique données :

$$\text{indice d'accord} = \frac{1}{N} \cdot (N_{\text{écarts positifs}} - N_{\text{écarts négatifs}})$$

Où N est le nombre de projections hydroclimatiques pour une station donnée et un scénario d'émission donné. $N_{\text{écarts positifs}}$ et $N_{\text{écarts négatifs}}$ étant respectivement les nombres de simulations hydroclimatiques projetant une hausse et une baisse, là encore pour une station donnée et un scénario d'émission donné. Pour Explore2070, le nombre de simulations hydroclimatiques était de 7 ou 14. Pour Explore2, ce nombre est variable selon les différentes combinaisons RCP – GCM – RCM – Corrections de Biais – Modèles hydrologiques.

Cet indice est à valeur dans [-1 ; 1]. Au plus cet indice tend vers 1, au plus il y a de chaînes hydroclimatiques qui suggèrent une hausse de la variable hydrologique considérée. Au plus cet

⁴² Sauf aberration numérique ou erreurs d'arrondis, il est peu probable d'obtenir une moyenne nulle pour une chronique de débit. Un débit est de plus une grandeur positive ou nulle ici.

indice tend vers -1, au plus il y a de chaînes hydroclimatiques qui suggèrent une baisse de cette même variable. Lorsque cette indice dépasse le seuil de +0.8, on considère qu'il y a consensus à la hausse. De manière analogue, lorsque cet indice est en deçà de -0.8, on considère qu'il y a consensus à la baisse.

En ce qui concerne le traitement pour Explore2070, comme évoqué plus haut, les données hydrologiques étaient déjà disponibles, et il s'agissait, ici dans le cadre de ce travail, de surtout « lire » les variables hydrologiques d'intérêt sur les points de simulation d'intérêt. Néanmoins, pour permettre la comparaison des projets, les données Explore2070 ont été mises dans le même format de base qu'Explore2. Qui plus est, les valeurs représentatives de la dispersion des chaînes de modélisation (moyenne, écart-type, min, max), ainsi que les indices, évoqués ci-dessus, ont été également calculés pour Explore2070.

3.1.5 Réalisation d'infographies et choix des données représentées (Explore2070 & Explore2)

Les données climatiques n'ont pas pu être représentées spatialement car les données Explore2070 à disposition étaient déjà agrégées spatialement (paragraphe 3.1.3 p. 24), à l'échelle de la France hexagonale. C'est pourquoi, seuls des graphiques température - précipitation ainsi que tableaux synthétiques ont été réalisés. L'objectif était de comparer les projections climatiques et d'en apprécier la dispersion. Aussi, avec l'absence de données mensuelles, une représentation classique aux moyens de graphiques combinés Précipitation - Température⁴³ n'était pas adaptée.

En ce qui concerne les données hydrologiques, plusieurs cartes ont été produites à l'échelle métropolitaine car il s'agit de la façon la plus synthétique de représenter les données calculées, tout en permettant de détecter des organisations spatiales pour une variable considérée au travers des différents scénarios d'émission. Ainsi, trois types de données ont été représentées spatialement :

- Les écarts relatifs médians en % couplés aux indices de significativité, et ce pour chacun des points de simulation ;
- Les indices d'évolution permettant d'apprécier les tendances spatiales et le consensus à la hausse ou à la baisse entre les différentes simulations pour une variable hydrologique donnée, et ce, là encore, pour chacun des points de simulation (station).

Aussi, on a, pour chacune de ces variables, les éléments permettant d'apprécier l'impact du changement climatique à horizon 2046-2065 pour chacun des scénarios d'émission, la robustesse des résultats au travers de la convergence des valeurs obtenues (indice de significativité) ainsi que de l'accord des modèles à projeter une même tendance d'évolution (indice d'accord).

Le choix de la valeur médiane s'explique en raison du faible nombre de simulations hydroclimatiques pour le projet Explore2070 (au plus 14 simulations par points), ce qui concerne également quelques points d'Explore2 sous un scénario d'émission donné, mais aussi par le fait qu'on cherche à caractériser la dispersion des projections d'ensemble.

La Figure 9, plus loin, montre le nombre de simulations hydroclimatiques pour chacun des points en commun aux deux projets et déclinés pour chacun des scénarios d'émission.

⁴³ Ces graphiques sont des diagrammes à bâtons représentant la pluviométrie mensuelle, combinés à des courbes moyenne de température.

Pour Explore2070, le nombre de simulations (7 ou 14) s'explique par l'utilisation d'un seul modèle hydrologique pour certains points. En effet, le modèle GR4J est un modèle conceptuel nécessitant un calage au moyen de chroniques mesurées de débit (provenant principalement de la banque Hydro⁴⁴) et en absence de ces données, ce modèle n'a pas pu être utilisé. Pour Safran Isba Modcou (SIM), certains points n'ont pas été modélisés car ils n'ont pas pu être placés sur le réseau hydrographique généré par le modèle. Pour Explore2, on remarque que les points de simulation au centre de la France métropolitaine comprennent plus de simulations pour chacun des scénarios d'émission (plus de 100 pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 4.5 et plus de 200 pour le scénario RCP 8.5). Cela s'explique par le fait qu'aucun modèle hydrologique ne peut fournir de simulations sur l'ensemble des points considérés (Sauquet, Strohmenger, et al., 2024). À quelques rares exceptions, la plupart des points comprennent plus de 40 simulations distinctes (combinaisons des GCM – RCM – Méthode Correction Biais – Modèle hydrologique pour chacun des scénarios d'émission).

Par ailleurs, des hydrogrammes annuels au pas de temps mensuels ont été produits pour quelques stations (les grands bassins versants) afin de pouvoir apprécier l'évolution du régime hydrologique pour les différents scénarios d'émission GES, et ce au travers des modèles hydrologiques similaires aux deux projets.

⁴⁴ (SCHAPI - HydroPortail, 2024 <https://hydro.eaufrance.fr/>)

Nombre de simulations hydroclimatiques déclinées par projet et scénarios d'émissions sur les points de simulation en commun

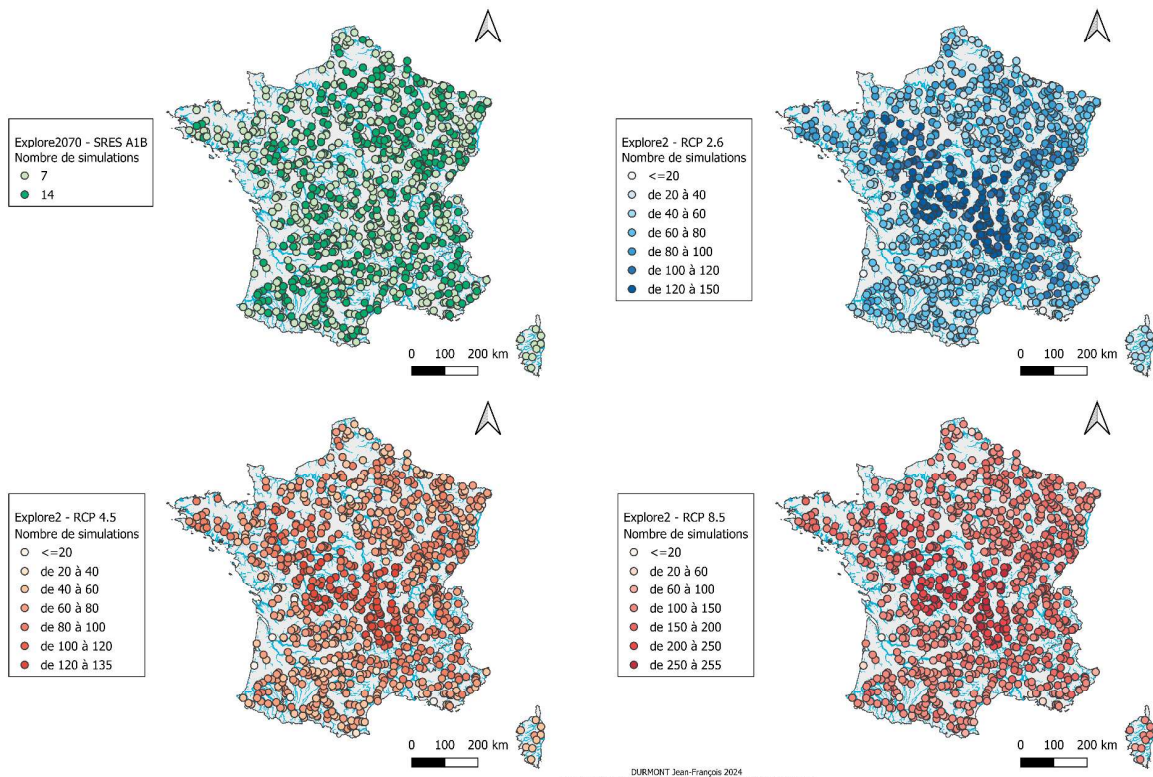


Figure 9 — Nombre de simulations hydroclimatiques dans le cadre des projets Explore2070 & Explore2

DURMONT Jean-François 2024
Sources : BD Topo IGR, BD Topogéom & Projets Explore2070 / Explore2

3.2 Dispersion des projections climatiques

3.2.1 Comparaison annuelle

Le graphique (Figure 10), page suivante, représente la dispersion des projections climatiques, dans le cadre des projets Explore2070 et Explore2, de manière annuelle, et ce pour chaque scénario d'émission GES, à l'horizon temporel médian 2046 – 2065, à l'échelle de la France métropolitaine. Pour Explore2, il s'agit des données corrigées avec la méthode ADAMONT (36 projections).

Les données sont représentées graphiquement par le cumul moyen interannuel de précipitation en mm, en ordonnée, et la température moyenne interannuelle en abscisse en °C. Ce sont des valeurs absolues et non des écarts par rapport à une période temporelle de référence. Les différentes couleurs sont associées à un scénario d'émission GES. La nomenclature du GIEC a été reprise pour les scénarios RCP et représente la gradation de ces trois scénarios (optimiste – médian – pessimiste respectivement pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5).

Le nombre de points différents, entre les différents scénarios d'émission GES, rend compte du nombre différent de projections climatiques pour chacun.

Sur ce graphique, on retrouve, en ce qui concerne la température, la tendance à la hausse des trois scénarios RCP (au plus le scénario RCP est pessimiste et le forçage radiatif associé important, au plus la température moyenne est élevée.). En revanche, en ce qui concerne les cumuls de pluie, aucune tendance nette n'est observée en fonction des différents scénarios RCP (Explore 2) et ceux-ci s'accordent globalement sur un cumul moyen annuel situé entre 850 et 980 mm de pluie. Néanmoins, il y a une légère tendance qui se dessine entre les scénarios RCP 2.6 et 8.5, avec respectivement une température de l'ordre de 12 °C, avec un cumul moyen apparent aux alentours de 920 mm pour le scénario RCP 2.6, et un scénario de l'ordre de 13 °C, avec un cumul moyen de précipitation légèrement moindre de l'ordre de 900 mm pour le scénario RCP 8.5. Le scénario RCP 4.5 quant à lui semble s'accorder sur une température moyenne de 12,5 °C et un cumul moyen de précipitation de l'ordre de 900 mm également.

Les projections sous le scénario SRES A1B (Explore2070), sont semblables à plusieurs projections associées au scénario RCP 4.5 (Explore2). Celles-ci tendent à montrer un assèchement annuel global plus prononcé au regard des projections climatiques associées au scénario RCP 2.6, et semblent plus fraîches que les projections associées au scénario RCP 8.5. Aussi, au vu de ces observations, les projections du scénario A1B peuvent être qualifiées de médianes, toujours relativement par rapport aux projections des scénarios RCP. Il est à noter que puisqu'on se situe à un horizon temporel médian (2046-2065), les projections sous les divers scénarios divergent globalement peu, car l'incertitude liée aux scénarios d'émission GES augmentent avec l'échéance temporelle⁴⁵.

⁴⁵ Les forçages radiatifs des scénarios SRES et RCP à l'horizon temporel médian (2046-2065) sont sensiblement proches. On peut donc s'attendre à ce que soit la même chose pour les projections de température moyenne à l'échelle mondiale, et par conséquent pour la France sur ce même horizon temporelle (*DRIAS, Les futurs du climat - Les scénarios RCP*, s. d.)

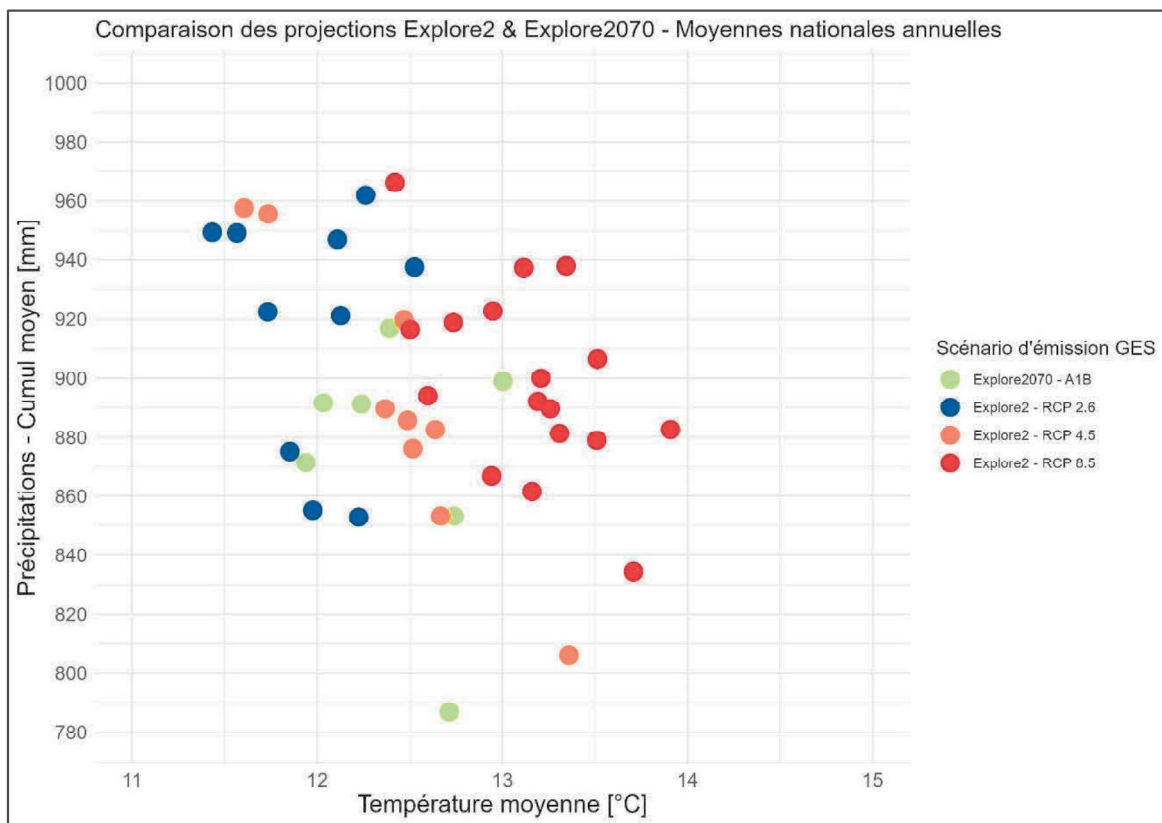


Figure 10 — Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour les valeurs annuelles. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.

3.2.2 Comparaison sur les saisons météorologiques

Les quatre graphiques suivants (Figure 11 à Figure 14) représentent la dispersion des projections climatiques en fonction des saisons météorologiques, toujours pour chaque scénario d'émission GES, ainsi qu'à l'horizon temporel médian 2046 - 2065.

Les saisons météorologiques sont considérées d'un point de vue trimestriel et sont différentes de la définition courante (point de vue astronomique). L'hiver, avec les mois de Décembre, Janvier et Février (DJF). Le printemps avec les mois de Mars, Avril et Mai (MAM). L'été avec les mois de Juin, Juillet et Aout (JJA). Enfin, l'automne avec les mois de Septembre, Octobre et Novembre (SON). D'où les notations utilisées dans les graphiques qui suivent.⁴⁶

On observe, sur la Figure 11, la gradation des scénarios RCP (Explore2) sur la saison hivernale, puisque la température va en augmentant lorsqu'on parcourt les projections des scénarios RCP 2.6 (température moyenne de l'ordre de 4,5 – 5 °C) au scénario RCP 8.5 (température moyenne de l'ordre de 5,5 – 6,5 °C). Soit un réchauffement de +1,5 – +2 °C entre ces scénarios RCP extrêmes.

⁴⁶ (Pourquoi les saisons météorologiques diffèrent-elles des saisons astronomiques ? s. d.)

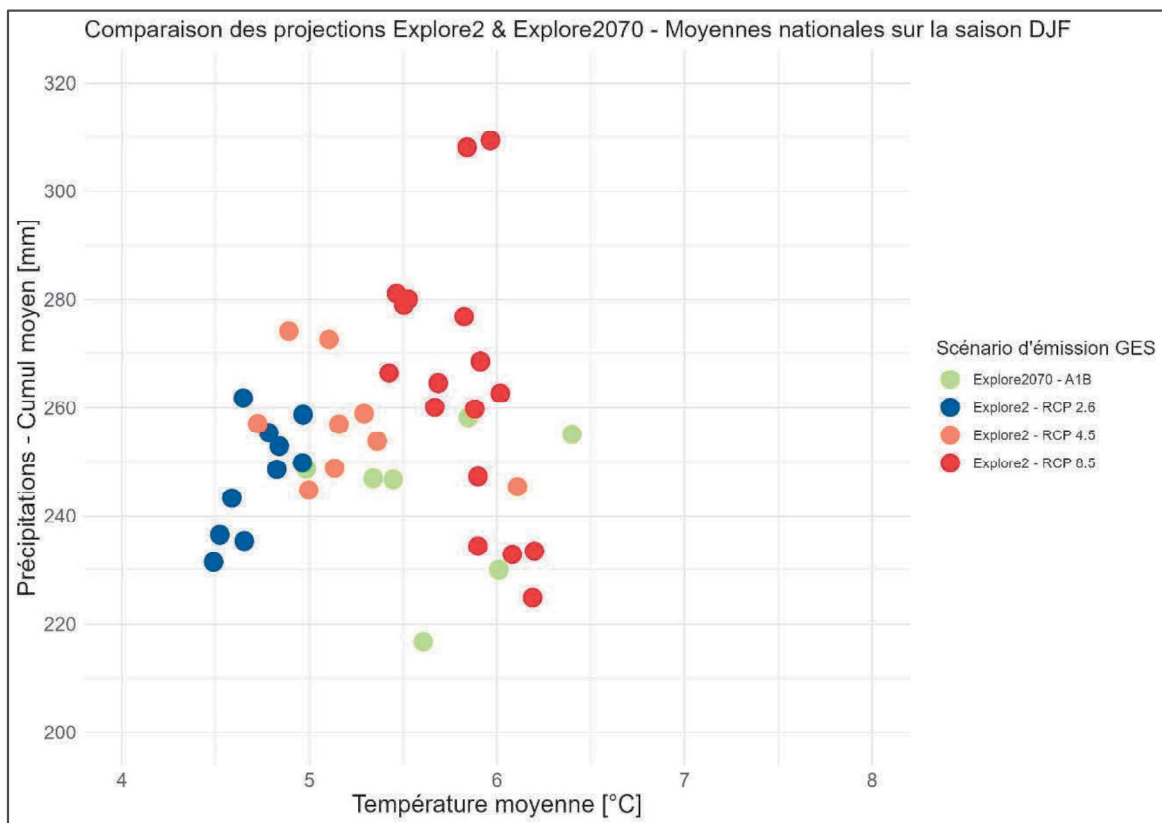


Figure 11 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour la saison hivernale. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.

En ce qui concerne le cumul moyen de précipitation hivernal, aucune tendance nette ne se dessine, bien que certaines projections des scénarios 2.6 et 4.5 soient plus déficitaires que les autres. La plupart des projections suggèrent un cumul de pluie, relativement identique, de l'ordre de 240-280 mm. Aussi, l'assèchement sera graduel entre les scénarios RCP sur cette saison, et sera plus important pour les projections associées au scénario RCP 8.5.

Les projections sous le scénario SRES A1B (Explore2070) sont plutôt semblables aux scénarios RCP 4.5 & 8.5, en ce qui concerne la gamme de température. Elles sont cependant plus sèches puisqu'elles présentent un cumul moyen de pluie moindre, et majoritairement plus chaudes que les projections du scénario RCP 2.6.

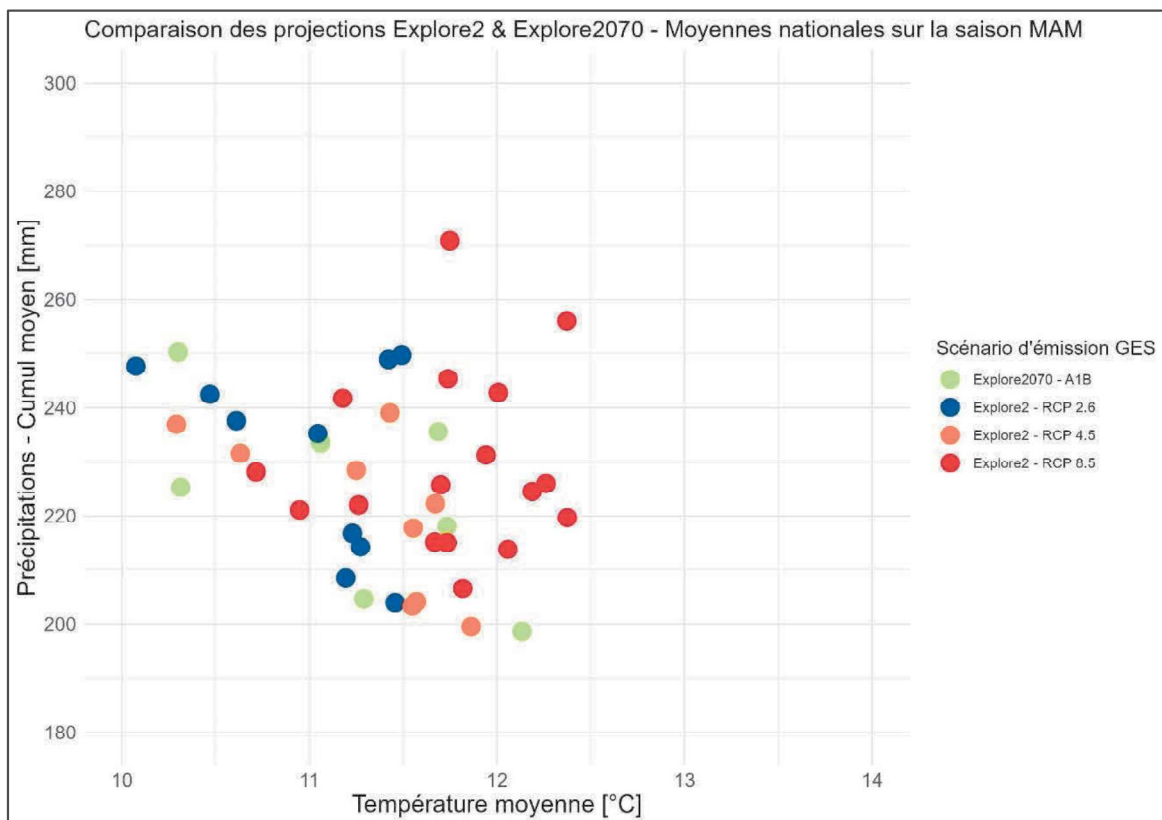


Figure 12 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour le printemps. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES

Au regard de ce graphique de la Figure 12, pour le printemps, les projections climatiques sous l'hypothèse d'un scénario RCP (Explore2) semblent converger vers une température moyenne de 11 - 12 °C et un cumul moyen interannuel de précipitation l'ordre de 220 mm. Aussi, aucune différence ne ressort de ce graphique entre les projections de chacun des scénarios RCP, pour cette saison (recouvrement des projections).

Les projections du scénario SRES A1B (Explore2070) semblent suivre également cette tendance et converger vers les mêmes ordres de grandeur pour ces deux paramètres climatiques.

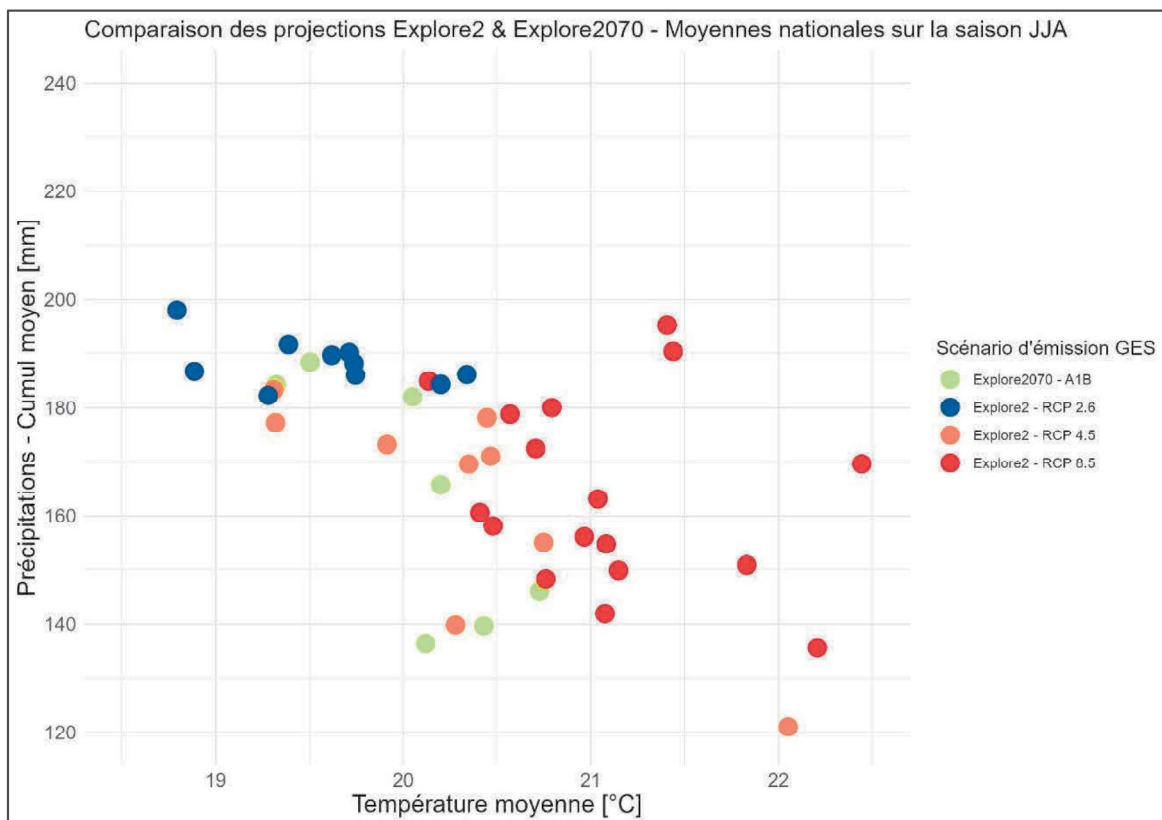


Figure 13 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour la saison estivale. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES.

Pour la saison estivale (Figure 13), on observe une tendance à la baisse de cumul de précipitation (presque 40 % entre les deux extrêmes) et d'augmentation de la température (de +1 à +3 °C) entre les projections des trois scénarios RCP (Explore2), indiquant un assèchement graduel entre ces derniers.

Les projections associées au scénario SRES A1B (Explore2070) se répartissent entre les projections des scénarios RCP en termes de tendance pour la température. Elles ne semblent cependant pas s'accorder en ce qui concerne la précipitation : les projections associées à A1B et semblables aux projections des scénarios RCP 4.5 et 8.5 sont plus sèches tandis que celles semblables aux projections du scénario RCP 2.6 ont un cumul de pluie du même ordre de grandeur.

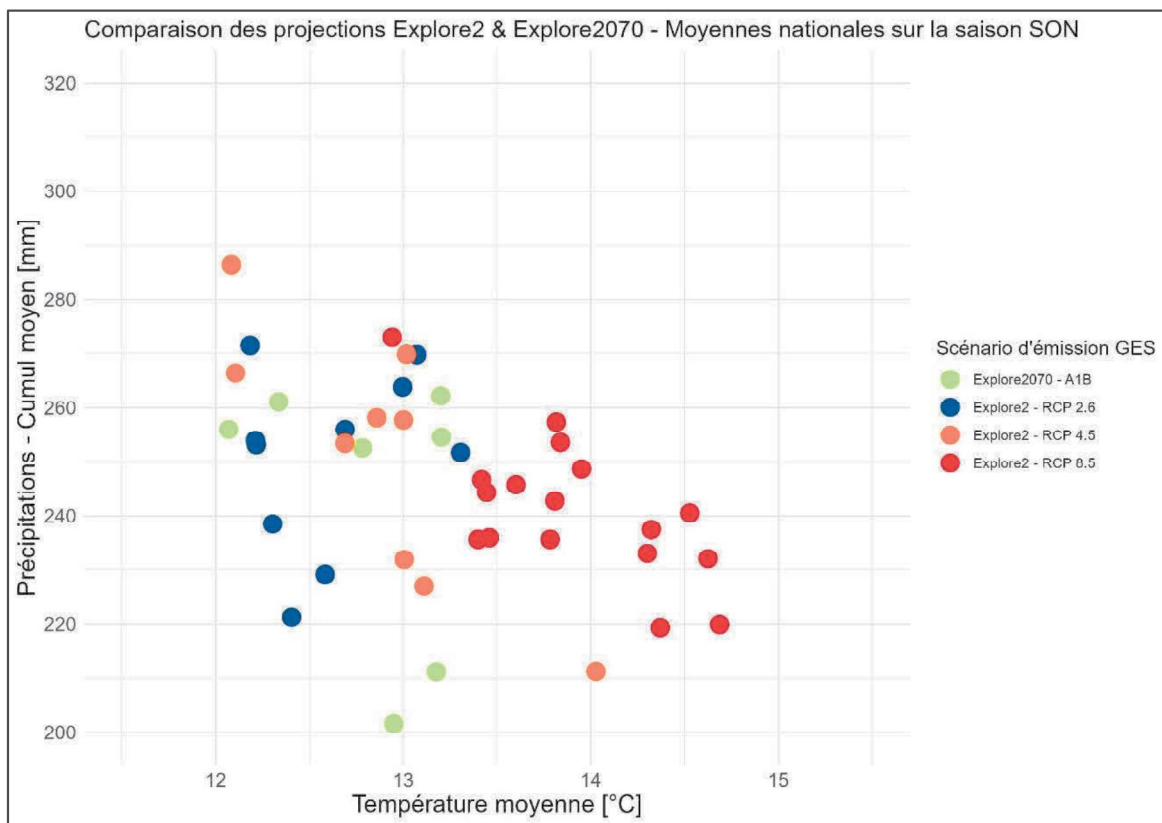


Figure 14 – Comparaison des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065), pour l'automne. Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES

En ce qui concerne l'automne (Figure 14), on observe à nouveau le gradient de température (de +1 à +2,5 °C) pour les projections associées aux trois scénarios RCP (Explore2). Les projections des scénarios RCP 2.6 et RCP 4.5 sont semblables. Le cumul de précipitation médian est de 250 mm, et on observe que les cumuls de pluie, sont en majorité, moindres (inférieurs à 250 mm) pour les projections associées aux scénarios RCP 8.5 à contrario des projections relatives aux autres scénarios RCP (cumuls supérieurs à 250 mm en majorité pour ces dernières). Cela indique un assèchement et un stress hydrique plus important dans le cadre du scénario RCP 8.5.

La majorité des projections associées au scénario SRES A1B (Explore2070) sont semblables aux projections des scénarios RCP 2.6 & 4.5 que ce soit pour la température ou le cumul de pluie.

3.2.3 Synthèse de la comparaison des projections climatiques

Les projections saisonnières associées aux scénarios RCP (Explore2) traduisent toutes une dispersion de l'ordre de 2 °C, lorsqu'on les parcourt du scénario optimiste RCP 2.6 au scénario dit pessimiste RCP 8.5. Le cumul de pluie est globalement constant en hiver et au printemps, avec un ordre de grandeur de cumul moyen variant de 220 à 260 mm. Sur ces deux saisons, les projections associées aux scénarios RCP traduisent donc un assèchement graduel. Cet assèchement est très marqué en été, avec un cumul moyen de précipitation, d'au moins -20% moindre par rapport aux autres saisons. Il en est de même pour l'automne, qui présente un comportement similaire, avec là aussi, un assèchement marqué et de plus en plus important lorsqu'on parcourt les scénarios RCP du plus optimiste au plus pessimiste. In fine, les projections, associées aux scénarios RCP, suggèrent des étés ainsi que des automnes plus secs et plus chauds.

Les projections associées au scénario SRES A1B (Explore2070) sont semblables aux projections des scénarios RCP 4.5 et 8.5 pour l'été et l'hiver. En automne, les projections sont semblables aux projections associées aux scénarios RCP 2.6 et 4.5, tandis que pour le printemps, aucune ressemblance principale ne ressort, avec un fort recouvrement des projections climatiques.

3.3 Synthèse spatiale des anomalies pour la France métropolitaine

Concernant la synthèse qui va suivre, il convient de faire preuve de prudence dans la comparaison et l'interprétation des anomalies entre la période projection future (2046-2065) et les périodes de référence des deux projets. En effet, la période de référence pour Explore2070 est 1961-1990 tandis que pour Explore2, la période de référence considérée est 1976-2005. Bien que ces périodes se recouvrent, le climat a évolué entre celles-ci, en raison du changement climatique, mais également pour des raisons naturelles (du fait de la variabilité interne du climat). Aussi, il y a un biais dans la comparaison des anomalies entre les deux projets. Par conséquent, il est difficile de juger comment les anomalies d'Explore2070 se placent vis-à-vis des anomalies d'Explore2, puisqu'une partie de ces anomalies peuvent trouver, en partie, leur explication dans le réchauffement climatique ayant eu lieu entre les deux périodes de référence considérées⁴⁷.

3.3.1 Température moyenne interannuelle

Les Tableau 2 & Tableau 3, page suivante, synthétisent les écarts de températures moyennes interannuelles pour la France métropolitaine, toutes chaînes de modélisation climatique confondues, à l'horizon temporel 2046-2065, par rapport aux périodes temporelles de référence, pour les différents scénarios d'émission GES sur les deux projets Explore2070 et Explore2, annuellement ainsi que pour les quatre saisons météorologiques de l'année.

Le chiffre à l'extérieur des crochets est l'écart absolu médian⁴⁸ de la température moyenne en °C, tandis que les valeurs entre les crochets représentent respectivement les écarts absolus minimum et maximum obtenus sur l'ensemble des différentes projections. Soit plus synthétiquement :

Ecart Médian °C [Min ; Max]

À titre d'exemple, pour le scénario RCP 4.5, les valeurs indiquées pour la saison hivernale, sont +1,4 °C [+0,9 ; +2,4]. Cela signifie que pour ce scénario d'émission GES, la médiane de l'ensemble des écarts des températures moyennes (entre la période temporelle de référence et la période temporelle de projection), toutes projections climatiques confondues, à l'échelle de la France,

⁴⁷ Météo France fait face au même problème lorsqu'il s'agit d'évaluer les normales saisonnières, qui sont des moyennes statistiques sur des périodes de 30 ans. En 2022, l'établissement public a changé sa référence temporelle météorologique en passant de 1981-2010 à 1991-2020. Entre les périodes 1961 – 1990 et 1971-2000, Météo France a évalué l'augmentation annuelle de la température moyenne à +0,34 °C et 2,23% en ce qui concerne le cumul de précipitation annuel. Il serait hasardeux de corriger directement les données présentées car il ne s'agit pas tout à fait des mêmes périodes (1971-2000 contre 1976-2005) d'une part et d'autre part, cela ne peut s'appliquer aux valeurs saisonnières. (*De nouvelles normales pour qualifier le climat en France | Météo-France, 2022*)

⁴⁸ Étant donné le faible nombre de chaînes climatiques pour Explore2070 (7 avec un seul scénario d'émission SRES A1B) ainsi que pour Explore2 (respectivement 10 et 9, 17 pour les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 & RCP 8.5), la valeur médiane est plus adaptée que la valeur moyenne. C'est également justifié par le fait que l'on travaille sur des projections d'ensemble (paragraphe 3.1.5 p. 27).

et associées à ce scénario, est de +1,4°C. L'écart minimal des températures moyennes interannuelles est de +0,9 °C tandis que l'écart maximal est de +2,4 °C.

Autrement dit, les projections suggèrent qu'il y a 50 % de chances pour que l'augmentation de température moyenne soit plus de +1.4 °C à l'échelle de la France, à l'horizon temporel 2046-2065, par rapport à la période de référence (1976-2005), pour ce scénario d'émission (RCP 4.5). La projection la plus pessimiste prévoit une augmentation moyenne de +2,4 °C quand la plus optimiste prévoit +0,9 °C.

Changement de température moyenne - Horizon temporel : 2046-2065				
Projet	Scénario GES	Annuel	Hiver [DJA]	Printemps [MAM]
Explore2070	SRES A1B	+2,2 °C [+1,6 ; +2,8]	+2,1 °C [+1,7 ; +3,0]	+1,9 °C [+1,0 ; +2,8]
Explore2	RCP 2.6	+1,3 °C [+0,7 ; +1,8]	+0,9 °C [+0,7 ; +1,3]	+1,3 °C [+0,2 ; +1,7]
	RCP 4.5	+1,7 °C [+0,8 ; +2,6]	+1,4 °C [+0,9 ; +2,4]	+1,6 °C [+0,5 ; +1,9]
	RCP 8.5	+2,4 °C [+1,6 ; +3,2]	+2,1 °C [+1,6 ; +2,5]	+2,0 °C [+0,9 ; +2,6]

Tableau 2 — Écarts de température moyenne annuelle, en hiver et au printemps par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)

Changement de température moyenne - Horizon temporel : 2046-2065				
Projet	Scénario GES	Annuel	Été [JJA]	Automne [SON]
Explore2070	SRES A1B	+2,2 °C [+1,6 ; +2,8]	+2,7 °C [+1,6 ; +2,9]	+2,4 °C [+1,3 ; +2,8]
Explore2	RCP 2.6	+1,3 °C [+0,7 ; +1,8]	+1,4 °C [+0,5 ; +2,0]	+1,3 °C [+1,0 ; +2,1]
	RCP 4.5	+1,7 °C [+0,8 ; +2,6]	+2,1 °C [+1,0 ; +3,7]	+1,8 °C [+0,9 ; +2,8]
	RCP 8.5	+2,4 °C [+1,6 ; +3,2]	+2,8 °C [+1,9 ; +4,1]	+2,7 °C [+1,7 ; +3,5]

Tableau 3 — Écarts de température moyenne annuelle, en été et en automne par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)

Au regard de ces projections, à l'horizon temporel moyen (2046-2065), la température moyenne, pour la France métropolitaine, est en hausse quels que soient les scénarios d'émission GES considérés, et les saisons considérées dans l'année.

Le réchauffement est légèrement plus faible au printemps et légèrement plus chaud en automne qu'en moyenne sur l'année pour les projections climatiques des trois scénarios RCP (Explore2). On remarque également la même chose pour le scénario SRES A1B (Explore2070).

Le réchauffement est légèrement plus faible sur la période hivernale qu'en moyenne sur l'année pour les projections des trois scénarios RCP (Explore2), ce qui n'est pas le cas pour les projections sous le scénario SRES A1B (Explore2070) où les bornes des réchauffements possibles sont plus élevés. En été, les réchauffements sont plus importants et intenses pour Explore2 (avec des maximums de +3,7 °C & 4,1 °C respectivement pour les projections des scénarios RCP 4.5 & RCP 8.5). Le scénario SRES A1B (Explore2070), quant à lui, présente une médiane plus importante que la médiane annuelle, avec des bornes [min, max] équivalentes, laissant sous-entendre des projections plus chaudes en été également.

3.3.2 Cumul moyen interannuel de précipitation

Les Tableau 4 & Tableau 5, page suivante, synthétisent les écarts relatifs du cumul moyen interannuel de précipitation pour la France hexagonale, toutes chaînes de modélisation climatique confondues, à l'horizon temporel 2046-2065, par rapport aux périodes temporelles

de référence, et ce, pour les différents scénarios d'émission GES sur les deux projets Explore2070 et Explore2, annuellement, ainsi que pour les quatre saisons météorologiques.

De manière analogue à la température, le chiffre à l'extérieur des crochets est l'écart relatif médian interannuel du cumul de précipitation sur la période considérée (annuelle ou saisonnière), tandis que les valeurs entre les crochets représentent respectivement les écarts relatifs minimum et maximum obtenus sur l'ensemble des différentes projections. Soit plus synthétiquement :

Ecart relatif Médian % [Min ; Max]

Là encore, à titre d'exemple, pour le scénario SRES A1B, les valeurs indiquées pour l'automne sont -6,3 % [-22,7 ; +1,8]. Cela signifie que dans un cas sur deux, en moyenne, le déficit du cumul moyen de précipitation sera plus important que -6,3 %, pour cette saison. La projection climatique la plus pessimiste indique un déficit de -22,7 % tandis que la plus optimiste indique un gain de +1,8 %.

Changement de cumul moyen de précipitation (écart relatif) - Horizon temporel : 2046-2065				
Projet	Scénario GES	Annuel	Hiver [DJA]	Printemps [MAM]
Explore2070	SRES A1B	-5,5 % [-13,9 ; -2,2]	+3,6 % [-11,3 ; +11,4]	-2,3 % [-8,3 ; +6,2]
Explore2	RCP 2.6	+5,7 % [-2,5 ; +11]	+6,1 % [-0,1 ; +17,4]	+7,1 % [-5,5 ; +12,6]
	RCP 4.5	+0,2 % [-7,9 ; +8,3]	+10,8 % [+4,5 ; +18,4]	+1,8 % [-8,2 ; +8,5]
	RCP 8.5	+1,0 % [-4,7 ; 10,3]	+13,4 % [+3,4 ; +33,8]	+2,4 % [-6,1 ; 21,7]

Tableau 4 — Écarts relatifs de cumul de précipitation moyenne annuelle, en hiver et au printemps par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)

Changement de cumul moyen de précipitation (écart relatif) - Horizon temporel : 2046-2065				
Projet	Scénario GES	Annuel	Été [JJA]	Automne [SON]
Explore2070	SRES A1B	-5,5 % [-13,9 ; -2,2]	-20,9 % [-34,9 ; -6,4]	-6,3 % [-22,7 ; +1,8]
Explore2	RCP 2.6	+5,7 % [-2,5 ; +11]	+2,6 % [0,4 ; +8,3]	+4,0 % [-9,3 ; +11,7]
	RCP 4.5	+0,2 % [-7,9 ; +8,3]	-6,6 % [-34,0 ; +0,3]	+4,0 % [-15,5 ; +17,8]
	RCP 8.5	+1,0 % [-4,7 ; 10,3]	-12,5 % [-26,1 ; +7,1]	-3,0 % [-12,9 ; +12,4]

Tableau 5 — Écarts relatifs de cumul de précipitation moyenne annuelle, en été et en automne par rapport aux périodes de référence (Explore2 : 1976 - 2005 - Explore2070 : 1961 - 1990)

Au regard de ces projections, à l'horizon temporel moyen, on observe une absence d'accord sur le sens du changement relatif sur le cumul moyen interannuel de précipitation entre la période de référence et l'horizon temporel considéré (déficit ou excès de précipitation).

De plus, les intervalles [min, max] à peu de choses près, centrés sur 0, ne permettent pas de conclure sur la tendance. C'est d'autant plus le cas si la médiane est proche de 0. C'est le cas par exemple des projections sous le scénario RCP 4.5 au niveau annuel, pour le printemps pour ce même scénario, ainsi que des projections sous les trois scénarios RCP (Explore2) en automne.

À l'inverse, on peut qualitativement dire que les projections pour la saison hivernale, sous les trois scénarios RCP (Explore2), suggèrent une augmentation des précipitations. Il en est de même pour les projections du printemps sous les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5, même si la tendance est moins nette qu'en hiver. Quant à l'été, la tendance est au déficit pour les

projections associées aux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, alors qu'elle est plutôt à la hausse pour le scénario RCP 2.6.

Par conséquent, toujours au regard des scénarios RCP (Explore2), les projections suggèrent une humidification plus importante en hiver et un assèchement en été (à l'exception du scénario RCP 2.6 pour l'été). Les projections ne permettent pas de conclure pour l'automne. Quant au printemps, une tendance à la hausse se dégage, en particulier pour les scénarios RCP 2.6 & RCP 8.5, même s'il subsiste une incertitude. Les projections pour le scénario RCP 4.5, toujours pour le printemps, ne permettent pas de conclure (médiane proche de 0 et intervalle [min ; max] centré sur 0).

Les projections, sous le scénario SRES A1B (Explore2070), se distinguent des scénarios RCP dans le sens où la tendance globale annuelle est au déficit de précipitation. C'est également vrai si on regarde les saisons, sauf pour le printemps où il reste une incertitude assez forte (au regard de l'intervalle [min, max] et du positionnement de la médiane) là où les projections avec les scénarios RCP suggèrent un assèchement concentré essentiellement sur la saison estivale, et une humidification en hiver.

3.3.3 Analyse croisée annuelle

Le graphique de la Figure 15, représente la dispersion des anomalies des projections climatiques dans le cadre des projets Explore2070 et Explore2, de manière annuelle, et pour chaque scénario d'émission GES, à l'horizon temporel médian 2046 - 2065.

Là encore, les anomalies de températures (en abscisse) sont exprimées en valeurs absolues tandis que les anomalies de cumul de précipitation (en ordonnée) sont exprimées de manière relative.

On observe de nouveau la gradation entre les scénarios RCP (Explore2) pour les anomalies de températures moyennes. En revanche, les anomalies relatives aux cumuls moyens interannuels de précipitation varient sur l'intervalle [-5 % ; +10 %]. L'assèchement est donc plus important d'un scénario RCP à un autre, bien que les signaux soient ici lissés annuellement.

En revanche, on observe de façon nette que les projections sous le scénario d'émission GES A1B (Explore2070) sont plus défavorables d'un point de vue déficit de précipitation, et celles-ci sont globalement similaires aux projections sous le scénario RCP 8.5 en ce qui concerne la température. En termes d'ordre de grandeur, si on « corrige » les écarts de températures moyennes interannuelles en raison des périodes de référence différentes (avec une « correction » de l'ordre de 0,34 – 0,40 °C⁴⁹), le scénario SRES A1B reste à cheval des scénarios RCP 4.5 & 8.5. Si on fait de même avec le cumul de précipitation (avec une « correction » de l'ordre 2,2 %), cela ne suffit pas à « compenser » la différence entre le scénario SRES A1B & les scénarios RCP et on peut donc raisonnablement penser que les projections sous le scénario SRES A1B sont plus sèches. Pour s'en convaincre, il conviendrait de se ramener à une même période de référence, que ce soit de 1961-1990 à 1975-2005 pour Explore2070 ou l'inverse pour Explore2, afin de pouvoir refaire les calculs⁵⁰.

⁴⁹ Les corrections ont été évaluées par Météo-France (voir plus haut) : Cette correction doit être considérée avec prudence (*De nouvelles normales pour qualifier le climat en France | Météo-France, 2022*)

⁵⁰ Les données ne sont malheureusement pas disponibles pour ce faire.

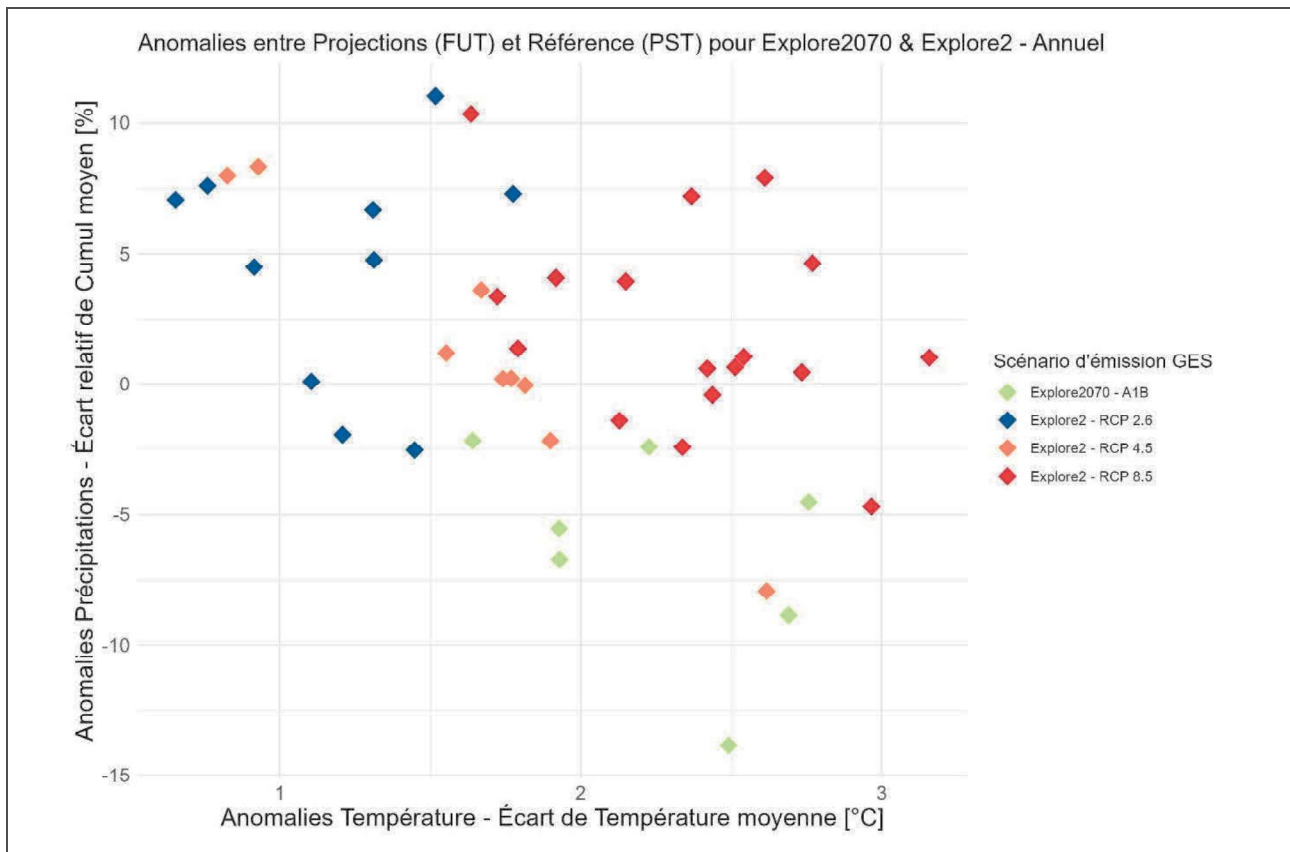


Figure 15 — Comparaison des anomalies annuelles des projections climatiques, à l'horizon temporel médian (2046-2065). Déclinaison selon les différents scénarios d'émission GES

3.4 Dispersion spatiale des projections hydrologiques : évolution des débits annuels, saisonniers ainsi que de leurs extrêmes

Concernant la synthèse qui va suivre, et de la même manière que pour le climat, il convient de faire preuve de prudence dans la comparaison et l'interprétation des anomalies hydrologiques entre la période projection future (2046-2065) et les périodes de référence des deux projets Explore2070 & Explore2 car, là encore, celles-ci sont différentes pour ces derniers (respectivement 1961-1990 & 1976-2005).

3.4.1 Débit annuel (QA)

Les Figure 16 et Figure 17, pages suivantes, représentent respectivement les changements relatifs médians du débit annuel (QA) à l'horizon temporel 2046-2065, et l'indice d'accord du changement pour chacun des projets, scénarios d'émission, ainsi que pour l'ensemble des stations considérées.

Sur la Figure 16, la taille du symbole est proportionnelle à l'indice de significativité normalisé et traduit une convergence plus ou moins importante des modèles (au plus les simulations sont d'accord entre-elles, au plus la taille de ce symbole est important). Le gradient de couleurs indique le changement médian relatif du QA, dans les teintes verts-bleues pour une évolution médiane à la hausse et dans les teintes marrons pour une évolution à la baisse. Par exemple, un changement médian relatif de +10% pour une station donnée, signifie que pour 50% des simulations hydroclimatiques, le changement relatif entre la période de référence et la période

de projection future (2046-2065) est supérieur à 10%.

Sur la Figure 17, le gradient de couleurs permet d'apprécier le consensus des modèles et si globalement ceux-ci projettent un changement à la hausse ou à la baisse du QA pour une station donnée.

Au regard de ces Figures, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent une baisse généralisée médiane du QA, de plus de -20%. Sur les régions de l'Île de France et la partie sud des Hauts de France (ancienne Picardie), ainsi que l'Occitanie (en particulier le sud de l'ancienne Aquitaine et des Midi-Pyrénées), le changement relatif médian est au-delà de -50% et on y observe une convergence des simulations via l'indice de significativité normalisé de l'ordre de 0,5 en moyenne et qui va au-delà dans les Pyrénées, le Massif central ou l'Île de France. Ces changements sont renforcés par un consensus à la baisse inférieur à -0.8. Pour le bassin aval du Rhône (en dessous de Valence), on y observe une légère hausse mais avec toutefois un indice de significativité normalisé plus faible. L'indice d'accord ne permet pas de dire qu'il y a consensus à la hausse.

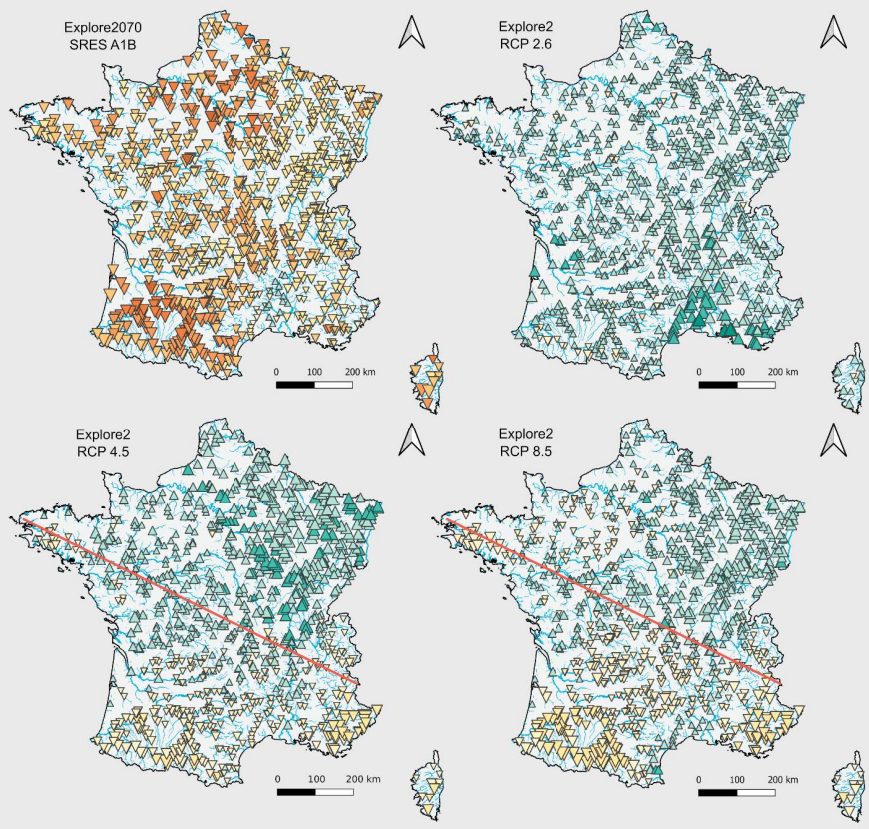
En ce qui concerne Explore2, les simulations projettent plutôt une augmentation globale du QA pour ce qui est du scénario RCP 2.6, avec en particulier un changement relatif médian à la hausse de +10% pour le bassin aval du Rhône (en dessous de Valence), confirmé par un indice de significativité normalisé de plus de 0,5, et un indice d'accord de plus de +0,4 sur le secteur. Pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, la disparité spatiale sur le changement relatif médian du QA est plus marquée que pour Explore2070 et on peut globalement couper le territoire métropolitain en deux, selon une diagonale imaginaire reliant la pointe du Corsen à Briançon dans les Alpes (gradient sud-ouest, nord-est), avec pour la moitié sud, un changement relatif médian à la baisse et pour la partie nord, un changement relatif médian à la hausse. Sur la partie nord, en particulier sur la région du Grand Est, on observe une hausse du QA avec un changement relatif médian allant jusqu'à +20% pour ce qui est du scénario RCP 4.5, cela étant appuyé par un indice de significativité de plus de 0,5 et un indice d'accord allant jusqu'à +0,8. Cette hausse étant atténuée dans le cadre du scénario RCP 8.5. Sur la partie sud, pour le scénario RCP 4.5, on observe une diminution relative médiane, allant jusqu'à -20% sur la région PACA, en particulier sur les départements du Var, Alpes de Haute-Provence et les Alpes Maritimes, ainsi que pour le sud de la Nouvelle Aquitaine et l'Occitanie. Ce changement étant plus marqué sur ces secteurs dans le cadre du scénario RCP 8.5 avec un indice de significativité de plus de 0,5 ainsi qu'un indice d'accord inter-modèles en deçà de -0,4 et allant jusqu'au consensus à la baisse (indice inférieur à -0.8) pour le secteur des Pyrénées.

Aussi, là où les QA en France hexagonale sont globalement à la baisse dans le cadre d'Explore2070 à l'horizon 2046-2065, les simulations sont plus nuancées pour Explore2 et une organisation spatiale se dessine, avec un assèchement des cours d'eau au sud, dans les secteurs des Pyrénées et la région PACA qui va en s'aggravant lorsqu'on considère les scénarios RCP médian (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5), tandis que l'on observe une hausse pour le Grand Est (RCP 4.5 et RCP 8.5), hausse qui est néanmoins moins prononcée lorsqu'on considère le scénario RCP 8.5.

D'après l'analyse croisée annuelle des projections climatiques (Figure 15 p. 39), le scénario SRES A1B est à cheval entre les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Cela ne semble pas être globalement le cas d'un point de vue hydrologique bien que les simulations associées à ces scénarios projettent, tous les trois, une diminution du QA pour la région PACA et les Pyrénées, avec cependant des intensités différentes (l'assèchement sous le scénario SRES A1B est plus important dans cette région que dans le cadre du scénario RCP 8.5).

Changement relatif médian (%) QA

- Légende**
- Changement relatif médian (%)
- >20%
 - de 10% à 20%
 - de 0% à 10%
 - de -10% à 0%
 - de -20% à -10%
 - de -30% à -20%
 - de -40% à -30%
 - de -50% à -40%
 - de -60% à -50%
 - <=-60%
- Indice de significativité normalisé
- ▲ <= 0,25
 - ▲ de 0,25 à 0,5
 - ▲ de 0,5 à 0,75
 - ▲ >0,75
- Dynamique du changement
- ▲ à la hausse
 - ▼ à la baisse
- Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

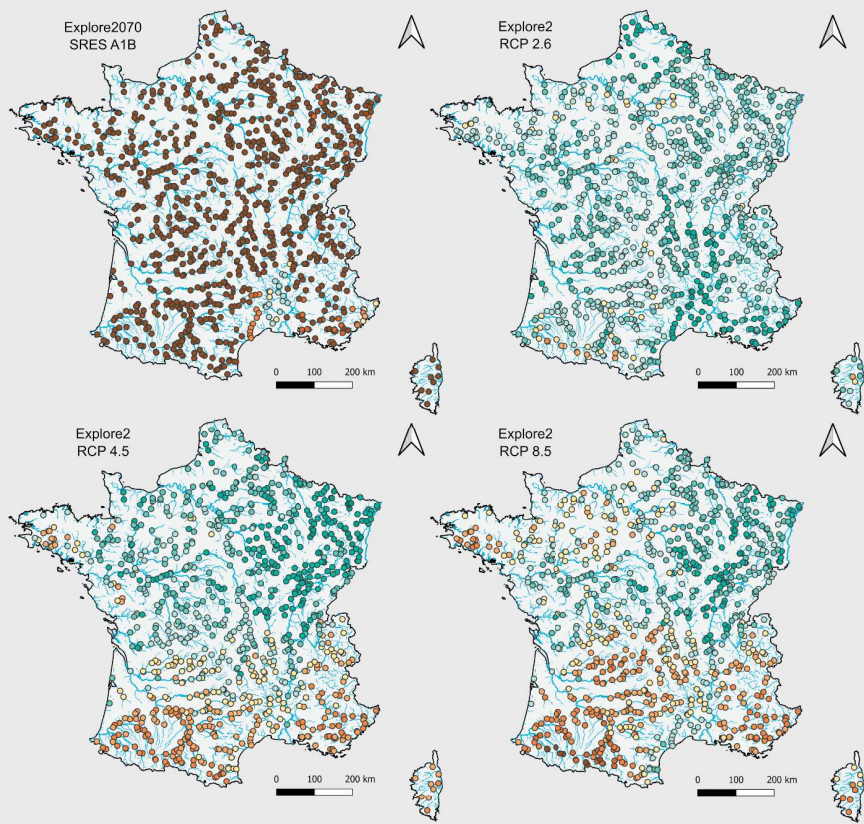
Figure 16 — Changements relatifs médians du débit annuel QA (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.

Indice d'accord QA

Légende

Indice d'accord

-]0,8 ; 1]
-]0,6 ; 0,8]
-]0,4 ; 0,6]
-]0,2 ; 0,4]
-]0 ; 0,2]
-]-0,2 ; 0]
-]-0,4 ; -0,2]
-]-0,6 ; -0,4]
-]-0,8 ; -0,6]
-]-1 ; -0,8]
- Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 17 — Indices d'accord pour l'évolution du débit annuel QA entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

3.4.2 Débits saisonniers

Pour chacune des saisons météorologiques (Figure 18 à Figure 25) sont représentés les changements relatifs médians des débits saisonniers⁵¹ (Q_{DJF} , Q_{MAM} , Q_{JJA} , Q_{SON}) à l'horizon temporel 2046-2065, et l'indice d'accord du changement pour chacun des projets, scénarios d'émission, ainsi que pour l'ensemble des stations considérées.

La lecture de ces cartes se fait de manière analogue aux cartes précédentes associées au QA, si ce n'est que l'échelle des couleurs du changement relatif médian est symétrique et centré sur 0.

a. Hiver (Q_{DJF})

Au regard des Figure 18 et Figure 19, pages suivantes, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent une baisse générale du débit hivernal à l'exception notable des Alpes, des Vosges et du sud du bassin du Rhône (au sud de Valence), là où les simulations associées aux scénarios RCP (Explore2) projettent plutôt une hausse, au travers d'un gradient ouest-est, avec en particulier une hausse plus prononcée sur les Alpes et les Vosges. Celle-ci étant de plus en plus marquée lorsqu'on parcourt les scénarios RCP du plus optimiste (avec un changement relatif médian de +10 à +30% pour le scénario RCP 2.6) au plus pessimiste (changement relatif médian supérieur à +50% sur certaines stations pour le scénario RCP 8.5). Cela est appuyé par une convergence des modèles (indice de significativité normalisé) qui augmente entre ces scénarios, ainsi que par un consensus à la hausse (indice d'accord supérieur à +0,8) sur les mêmes zones géographiques. Cela rend compte d'une fonte nivale de plus en plus prononcée, toujours en considérant les scénarios RCP dans l'ordre croissant, mais également d'un cumul de précipitation hivernale plus important dans le cadre du scénario RCP 8.5 (Explore2) comparativement au scénario SRES A1B (Explore2070), cf. paragraphe 3.2.2, p. 30. En revanche, uniquement pour les scénarios RCP cette fois, on observe une baisse du débit sur les Pyrénées, entre les scénarios RCP 2.6 & RCP 4.5 (changement relatif médian de l'ordre de +10 à +30% pour le scénario RCP 2.6 contre 10 à 20% pour le scénario RCP 4.5) mais qui tend à augmenter lorsqu'on regarde cette fois les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (jusqu'à +30% sur le sud de la Haute Garonne) toujours en considérant ces derniers de façon croissante. Néanmoins, il subsiste une incertitude car l'indice de significativité normalisé ne dépasse pas 0,5 pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sur ce secteur, et il n'y a pas consensus général à la hausse pour les trois scénarios RCP sur cette zone, bien que les indices d'accord soient en majorité supérieurs à +0,6.

D'un point de vue climatique, le scénario SRES A1B est à cheval entre les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la saison hivernale (Figure 11 p. 31). D'un point de vue hydrologique, seules les projections sur le secteur des Alpes, ainsi que dans une moindre mesure, les projections sur le secteur de la jonction entre les Landes et les Pyrénées Atlantiques ainsi que le Gers et les Hautes Pyrénées sont similaires. Pour cette seconde similarité, il est à noter toutefois que les changements relatifs médians sont moins prononcés, que les convergences entre les modèles ne sont pas identiques entre les projets (l'indice de significativité normalisé est inférieur à 0,25 sur le secteur pour les scénarios RCP), et enfin que les indices d'accord ne font pas consensus pour les scénarios RCP (à contrario du scénario SRES A1B pour Explore2070). Ainsi, seul le phénomène de fonte nivale sur les Alpes, est réellement partagée et identifiable sur les simulations hydrologiques associées aux deux projets.

⁵¹ cf. paragraphe 3.2.2, p. 31 pour la définition des saisons météorologiques.

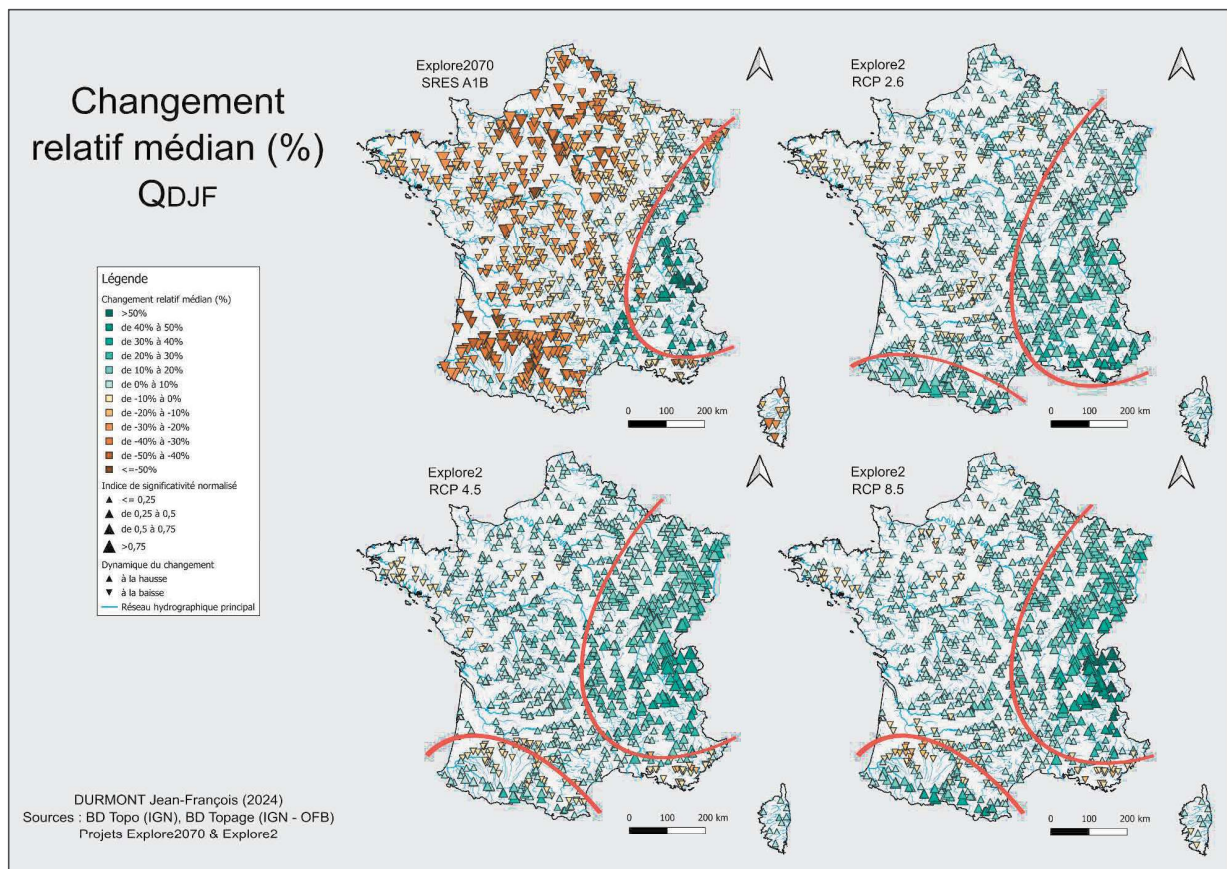
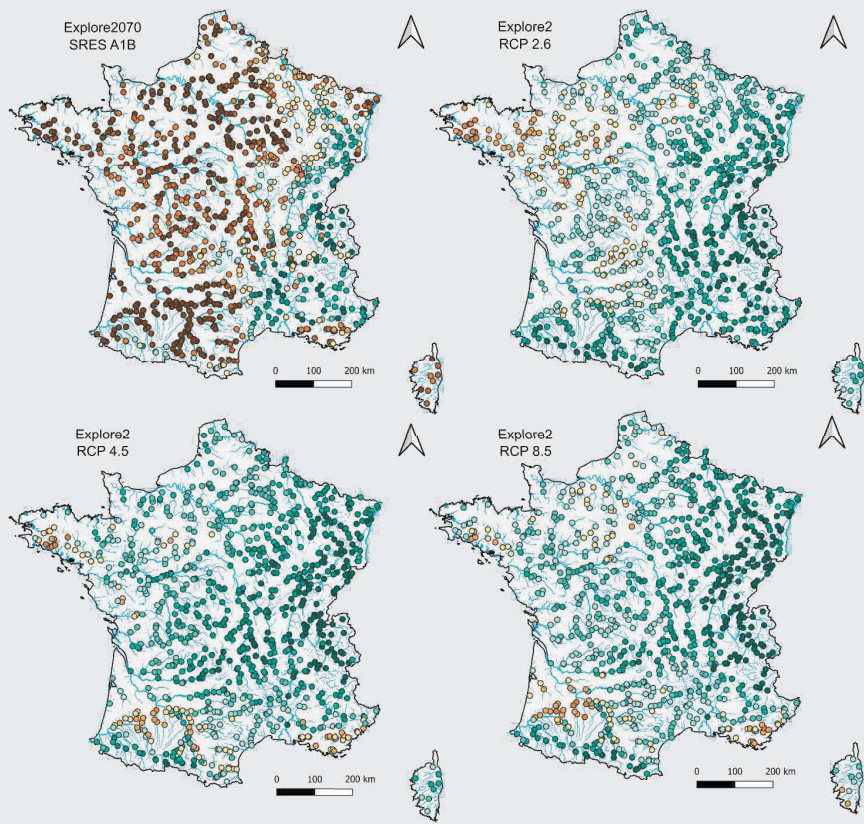


Figure 18 — Changements relatifs médians du débit hivernal Q_{DJF} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés

Indice d'accord

Q_{DJF}

- Légende
- Indice d'accord
-]0,8 ; 1]
 -]0,6 ; 0,8]
 -]0,4 ; 0,6]
 -]0,2 ; 0,4]
 -]0 ; 0,2]
 -]-0,2 ; 0]
 -]-0,4 ; -0,2]
 -]-0,6 ; -0,4]
 -]-0,8 ; -0,6]
 -]-1 ; -0,8]
- Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 19 — Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{DJF} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

b. Printemps (Q_{MAM})

Au regard des Figure 20 et Figure 21, pages suivantes, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent une baisse générale du débit printanier à l'exception notable des Alpes (changement relatif médian à la hausse supérieur à +30% sur le secteur de Chambéry et Grenoble), et on observe un assèchement des cours d'eau sur l'Île de France, l'ancienne Picardie, la moitié sud de l'Occitanie et l'ancienne Aquitaine avec un changement relatif médian à la baisse inférieur ou égal à -40%. Cela est confirmé par une convergence des modèles avec un indice de significativité normalisé supérieur à 0,5 ainsi qu'un consensus des modèles à la baisse avec un indice d'accord inférieur à -0,8.

À contrario, les projections associées aux scénarios RCP (Explore2) suggèrent plutôt une hausse, en particulier sur les régions des anciennes Bourgogne, Centre et Poitou-Charentes (selon un axe imaginaire reliant les villes de Metz et Bordeaux), avec un changement relatif médian supérieur à +10% dans le cadre du scénario RCP 8.5. Constat appuyé par un indice de significativité normalisé qui augmente lorsqu'on considère les scénarios RCP du plus optimiste au plus pessimiste et un indice d'accord qui va jusqu'au consensus à la hausse (supérieur à +0,8) pour le scénario RCP 8.5. De plus, les simulations sous les trois scénarios RCP projettent également une baisse du débit printanier au niveau des Pyrénées, des Vosges, l'ancienne Alsace, ainsi qu'une hausse pour les Alpes. Cependant, pour les Pyrénées, cette baisse est plus faible avec un changement relatif médian à la baisse de -20% à 0%, baisse qui est à relativiser au regard de l'indice de significativité normalisé inférieur à 0,25, et un indice d'accord à la baisse d'au plus -0,6, traduisant une absence de consensus à la baisse des modèles, et ce pour la majorité de stations du secteur. En ce qui concerne les Alpes, le changement relatif médian est à la hausse et supérieur à +20%, appuyé non seulement par un indice de significativité supérieur à 0,5 et un indice d'accord d'au moins +0,6, avec dans certains cas un consensus à la hausse, pour chacun des scénarios RCP. Pour les Vosges et l'Alsace, le changement relatif médian est à la baisse et d'au plus -10% pour le scénario RCP 2.6 et -20% pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, mais ces projections sont à relativiser au regard d'une non convergence des modèles (indice de significativité normalisé inférieur à 0,5 la plupart du temps) avec néanmoins un indice d'accord qui tend à confirmer une baisse sans pour autant faire consensus (l'indice d'accord à la baisse est d'au plus -0,6 pour le scénario RCP 2.6, et supérieur à -0,8 pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour la plupart des points).

D'un point de vue climatique, il y a recouvrement entre les scénarios SRES A1B et RCP (Figure 12 p. 32). Ce n'est pas le cas d'un point de vue hydrologique puisque les simulations sous les scénarios RCP semblent s'opposer aux simulations du scénario SRES A1B, même s'il y a une similarité sur les projections à la baisse sur les Pyrénées, Vosges et la région PACA et les projections à la hausse concernant les Alpes (secteur de Chamonix). Ces baisses sont cependant moins prononcées pour les scénarios RCP (Explore2) que pour le scénario SRES A1B (Explore2070), et à l'inverse, la hausse sur les Alpes est plus prononcée pour les scénarios RCP que pour le scénario SRES A1B. Enfin, si on regarde la France dans son entièreté, les projections à la baisse sous les scénarios RCP sont plus nuancées et ne font pas consensus, tandis que les projections à la hausse vont jusqu'au consensus (indice d'accord supérieur à +0,8), là où les simulations du scénario SRES A1B projettent quasiment systématiquement une baisse du débit avec consensus sur la grande moitié ouest du pays.

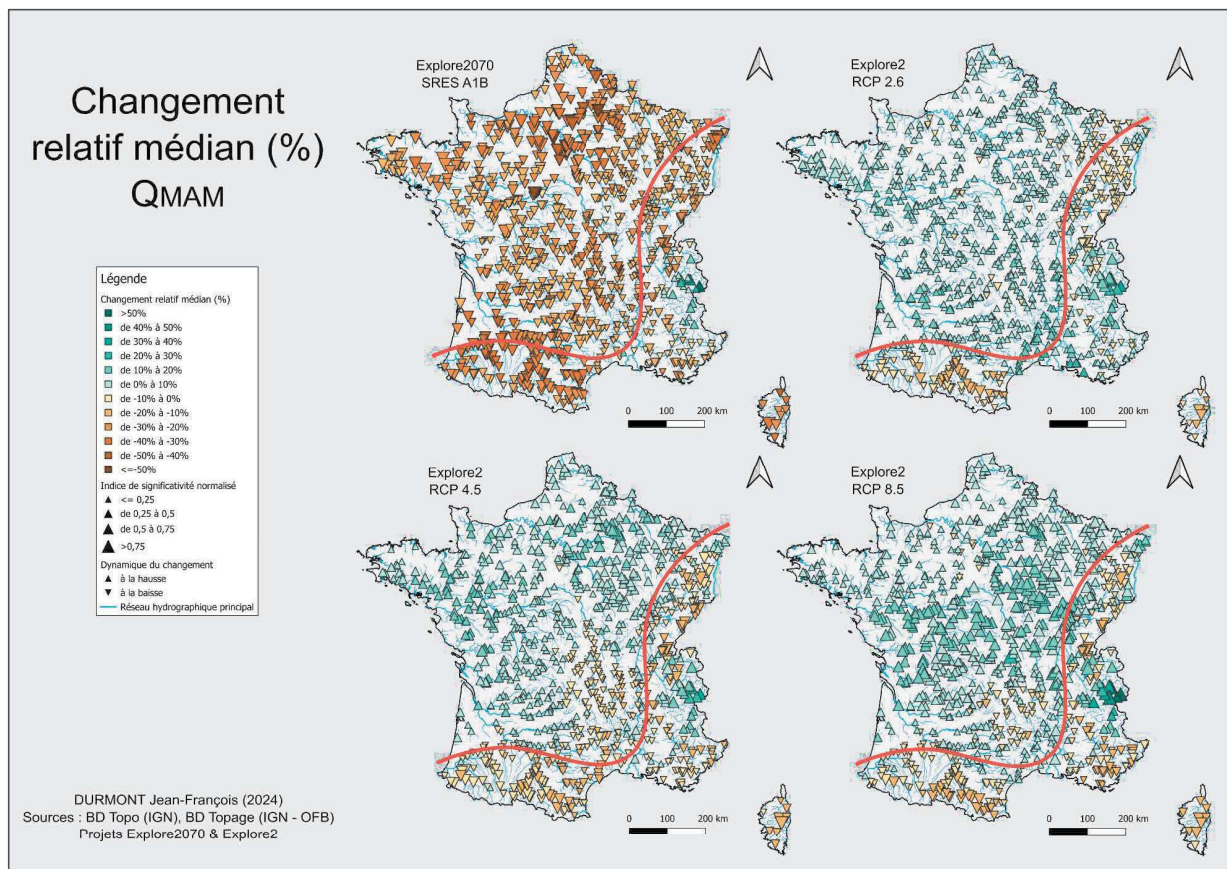


Figure 20 — Changements relatifs médians du débit printanier Q_{MAM} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés

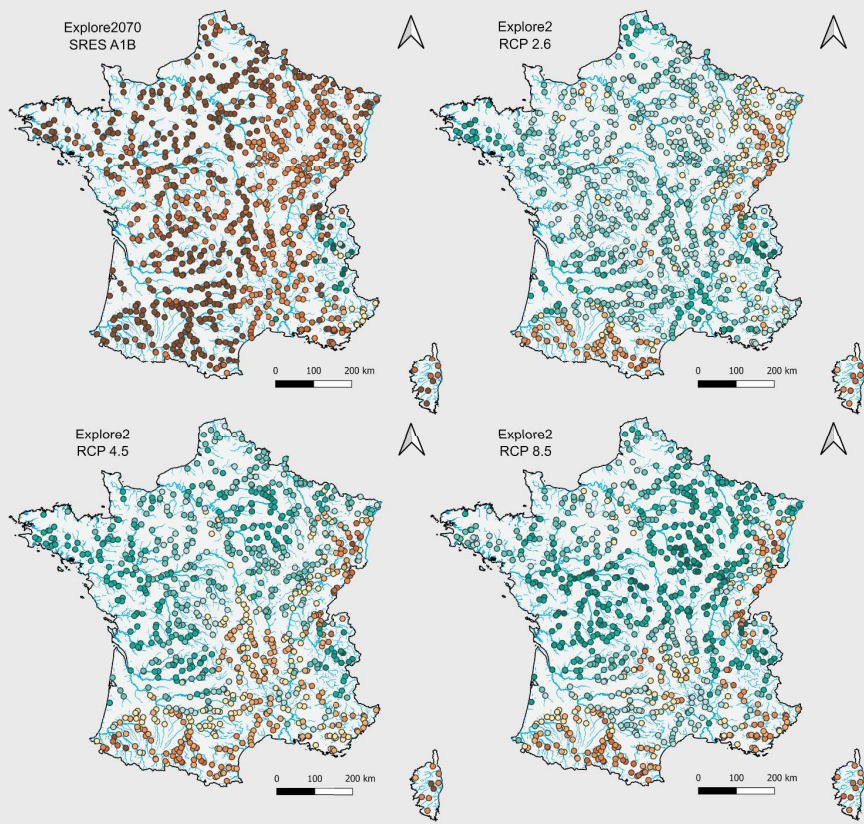
Indice d'accord Q_{MAM}

Légende

Indice d'accord

-]0,8 ; 1]
-]0,6 ; 0,8]
-]0,4 ; 0,6]
-]0,2 ; 0,4]
-]0 ; 0,2]
-]-0,2 ; 0]
-]-0,4 ; -0,2]
-]-0,6 ; -0,4]
-]-0,8 ; -0,6]
-]-1 ; -0,8]

— Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 21 — Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{MAM} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

c. Été (QJJJ)

Au regard des Figure 22 et Figure 23, pages suivantes, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent une baisse générale du débit estival avec un changement relatif médian à la baisse, d'au moins quasiment -20% (sauf rares exceptions) sur la France hexagonale, d'au moins -40% sur le Massif central et en deçà de -50% pour les Pyrénées. Sur ces régions, les simulations à la baisse semblent converger avec un indice de significativité normalisé supérieur à 0,5 et faire consensus (indice d'accord à la baisse inférieur à -0,8)

Les simulations sous les scénarios RCP (Explore2) rendent compte d'une raréfaction de la ressource en eau qui va en s'aggravant lorsqu'on regarde ces scénarios du plus optimiste (RCP 2.6) au plus pessimiste (RCP 8.5). Si pour environ la moitié des points sous le scénario RCP 2.6, les simulations projettent une légère hausse du débit avec un changement relatif médian d'au plus +10%, cela ne fait pas pour autant consensus (indice d'accord à la hausse d'au plus +0.6) et il n'y a pas convergence entre les modèles (indice de significativité inférieur ou égal à 0,25). En revanche, pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, les simulations projettent une baisse générale du débit estival, mais cette baisse est néanmoins plus atténuée que dans le cadre du scénario SRES A1B (avec un changement relatif médian à la baisse d'au plus -40%). Ces simulations convergent sur les Pyrénées, les Alpes et la région PACA, toujours pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, comme le témoigne l'indice de significativité supérieur à 0,5 dans la plupart des cas, et font consensus avec un indice d'accord à la baisse inférieur à -0.8 pour les Pyrénées et les Alpes (cet indice est de l'ordre de -0,5 en moyenne pour la région PACA).

D'un point de vue climatique, le scénario SRES A1B est à cheval entre les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. D'un point de vue hydrologique, le scénario SRES A1B est semblable à ces scénarios RCP. Néanmoins, la réduction des cumuls estivaux est beaucoup plus prononcée dans le cadre du scénario SRES A1B, ce qui est cohérent avec le déficit de cumul de précipitation plus important constaté pour ce dernier par rapport aux scénarios RCP (Figure 13 p. 33).

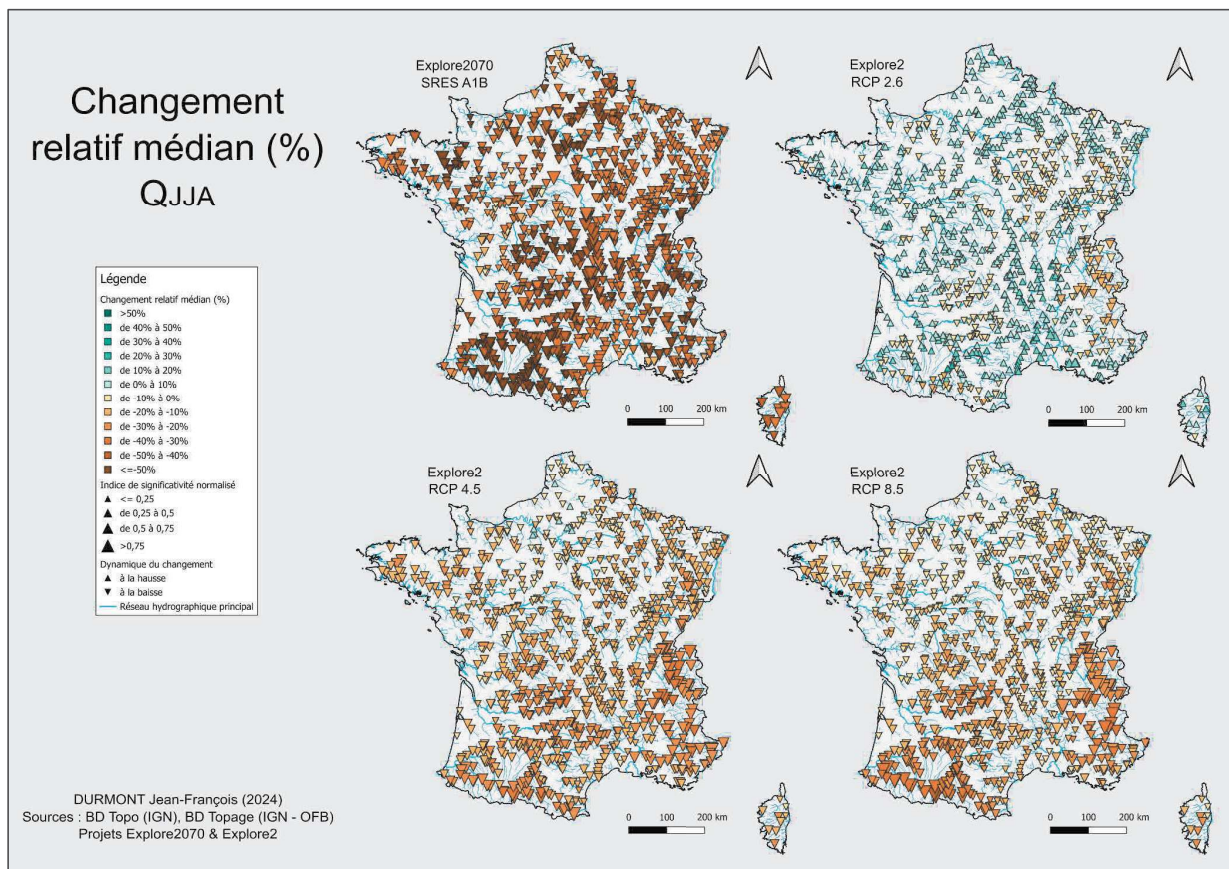


Figure 22 — Changements relatifs médians du débit estival Q_{JJA} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés

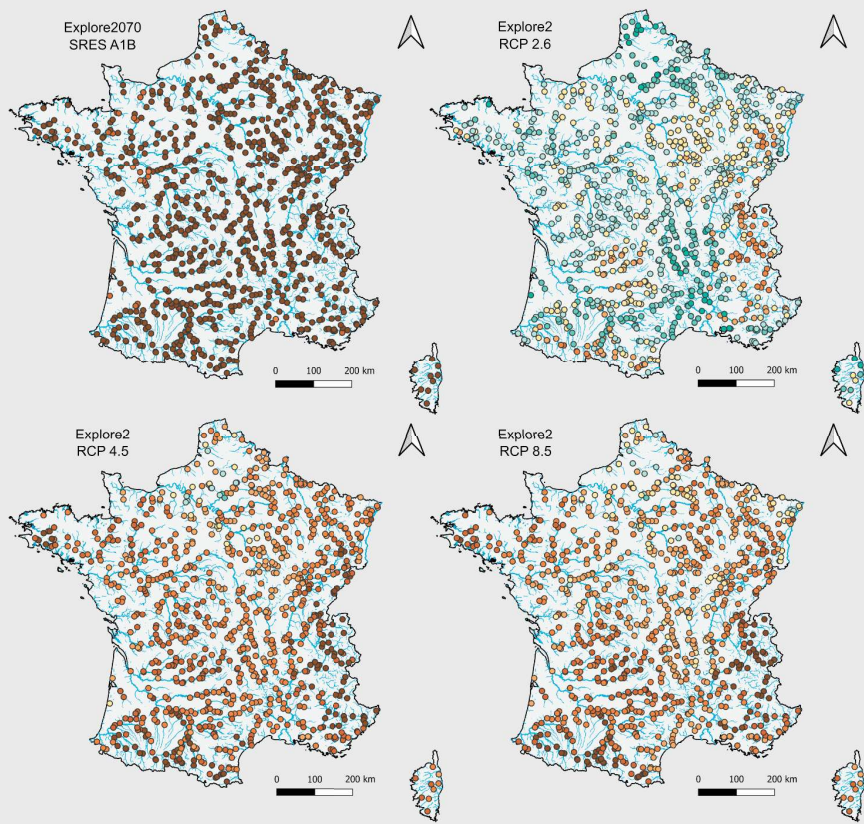
Indice d'accord Q_{JJA}

Légende

Indice d'accord

-]0,8 ; 1]
-]0,6 ; 0,8]
-]0,4 ; 0,6]
-]0,2 ; 0,4]
-]0 ; 0,2]
-]-0,2 ; 0]
-]-0,4 ; -0,2]
-]-0,6 ; -0,4]
-]-0,8 ; -0,6]
-]-1 ; -0,8]

— Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 23 — Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{JJA} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

d. Automne (Q_{SON})

Au regard des Figure 24 et Figure 25, pages suivantes, les simulations sous le scénario SRES A1B là encore une baisse généralisée du débit automnal sur l'ensemble du territoire métropolitain. Le changement relatif médian est en grande majorité d'au moins -50%, appuyé par une convergence des modèles au travers un indice de significativité supérieur à 0,5 et par un consensus à la baisse avec un indice d'accord inter-modèles inférieur à -0,8 dans la plupart des cas.

En ce qui concerne les scénarios RCP (Explore2), les simulations sous le scénario RCP 2.6 projettent en très large majorité une légère baisse du débit sur une zone géographique délimitée au sud par un axe imaginaire reliant Chambéry dans les Alpes à Carcassonne dans l'Aude et au nord un axe reliant le Havre en Normandie à Charleville-Mézières dans les Ardennes. Dans cette zone, délimitée par ces deux axes, le changement relatif médian à la baisse est d'au plus -20%. Néanmoins, il n'y a pas convergence des modèles (indice de significativité inférieur à 0,25 dans la majorité des cas), ni consensus à la baisse (indice d'accord de l'ordre de -0,5 en moyenne). Pour le scénario RCP 4.5, on observe, de façon analogue au QA, une grande organisation spatiale (gradient sud-ouest, nord-est) qui se dessine si on trace une ligne imaginaire reliant la Pointe du Corsen à Briançon dans les Alpes, avec au sud de cette ligne, les simulations qui projettent une baisse du débit. Tandis qu'au nord de cet axe, la situation est plus nuancée, et aucune grande tendance régionale ne se dessine si ce n'est une légère hausse observée sur les Vosges, l'Alsace, les Ardennes et anciennement la région Franche-Comté. Ces zones diffèrent également par la convergence des modèles plus importante sur la partie sud que sur la partie nord (l'indice de significativité est inférieur à 0,25 sur la partie nord alors qu'il est le plus souvent supérieur sur la partie sud), ainsi que des indices d'accord projetant plutôt une baisse pour la partie sud et projetant plutôt une hausse pour les Vosges, l'Alsace, les Ardennes et Franche-Comté, sans pourtant qu'il y ait consensus à la baisse ou à la hausse. Pour le scénario RCP 8.5, la baisse du débit est généralisée, bien que plus prononcée au sud de la ligne imaginaire précédemment évoquée, au regard de la convergence des modèles (indice de significativité normalisé en majorité supérieur à 0,5 en dessous de cette ligne). Globalement, le changement relatif médian est en grande partie d'au moins -20%. L'indice d'accord indique que les simulations projettent une baisse du débit avec un indice moyen de l'ordre de -0,6 voire -0,7 c'est-à-dire sans consensus à la baisse.

D'un point de vue climatique, pour cette saison, le scénario SRES A1B est semblable aux scénarios RCP 2.6 et RCP 4.5 (Figure 14 p.34). Cela n'est pas le cas d'un point de vue hydrologique puisqu'il est plutôt semblable au scénario RCP 8.5. Toutefois, bien que le scénario RCP 8.5 soit, en moyenne, plus chaud et plus sec que le scénario SRES A1B, cela ne se traduit pas par une situation hydrologique plus dégradée.

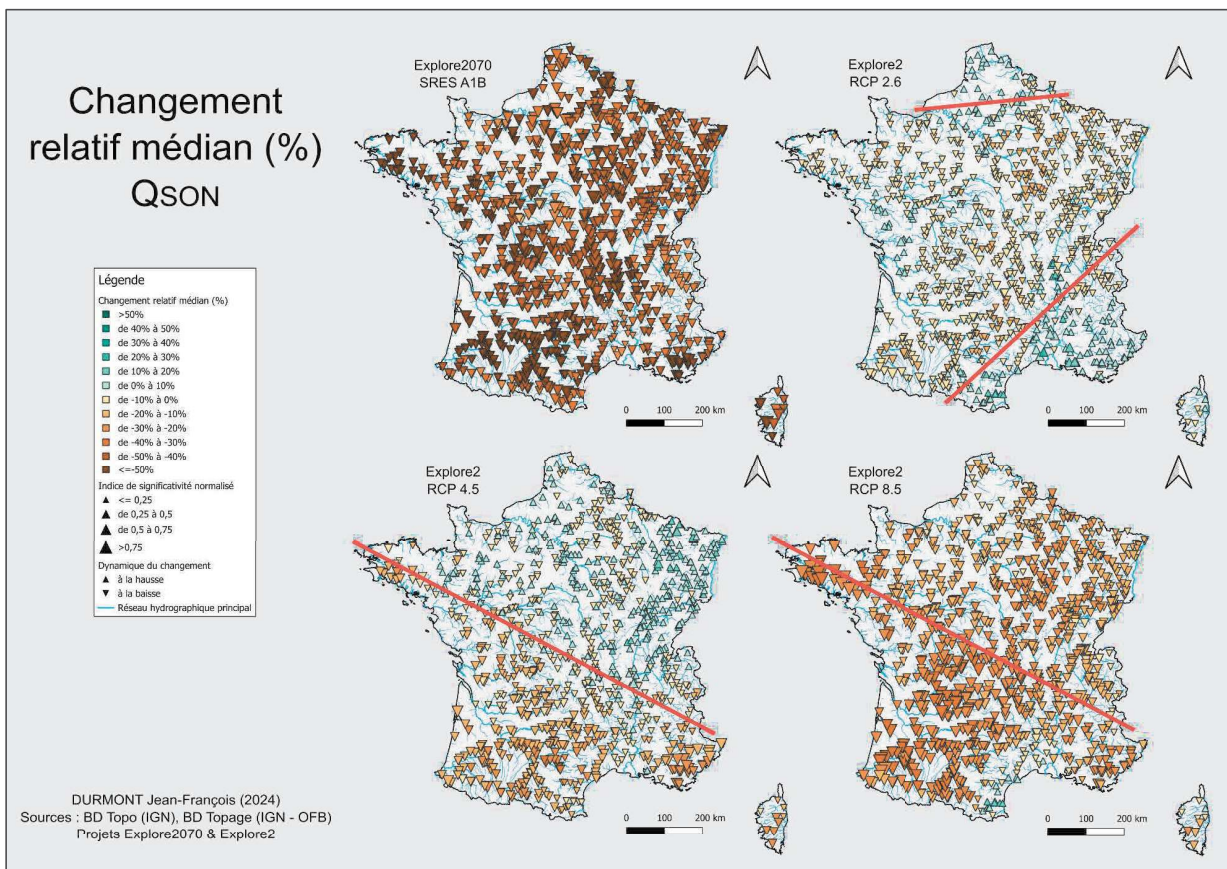


Figure 24 — Changements relatifs médians du débit automnal Q_{SON} (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés

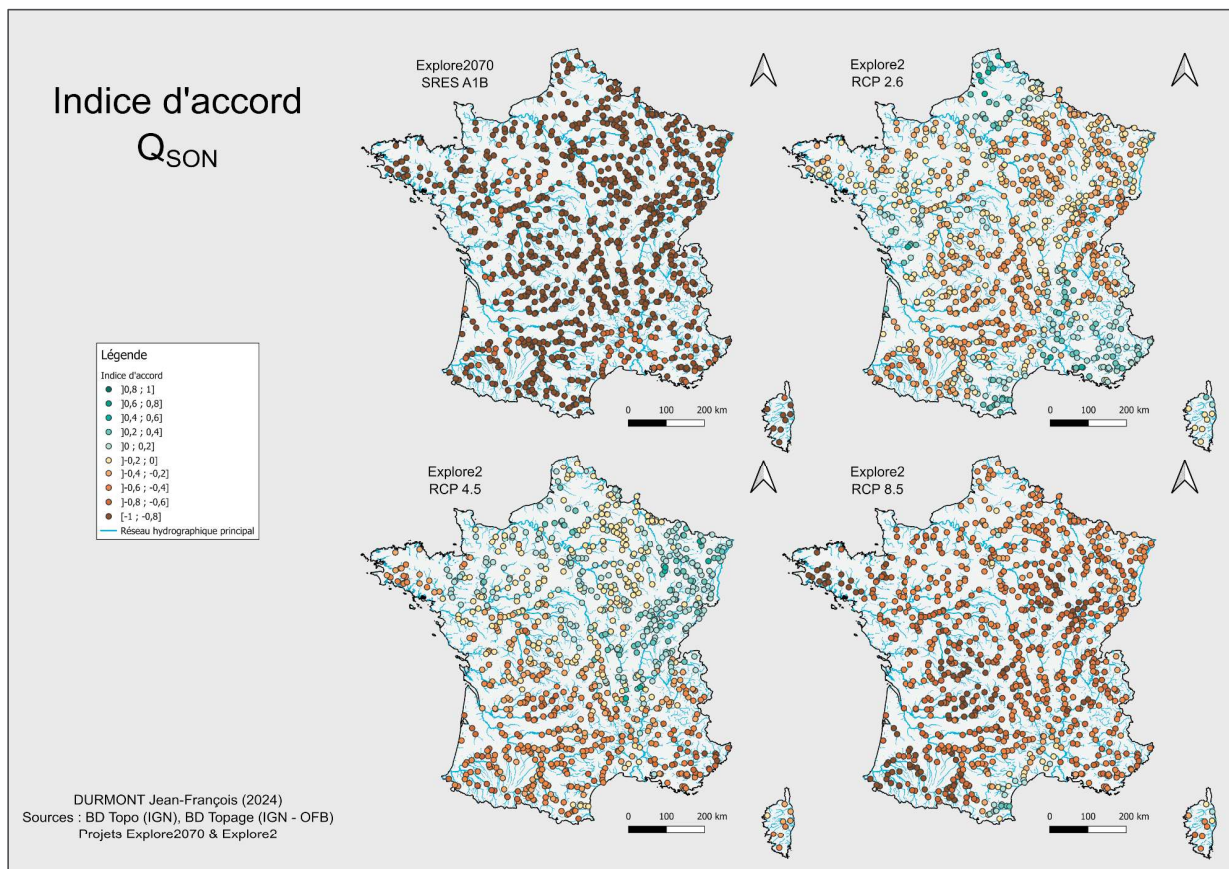


Figure 25 — Indices d'accord pour l'évolution du débit hivernal Q_{SON} entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

3.4.3 Le Débits extrêmes

Comme les cartographies précédentes, les Figure 26 à Figure 31 représentent les changements relatifs médians des extrêmes (QMNA5 , QMNA2, QJXA10 & QJXA2) à l'horizon temporel 2046-2065, et l'indice d'accord du changement pour chacun des projets et scénarios d'émission, ainsi que pour l'ensemble des stations considérées.

Pour rappel, les changements relatifs médians sont ici calculés à partir des quantiles de séries de QMNA et QJXA, obtenus respectivement par le calage de lois log-normales et Gumbel , pour toutes combinaisons Scénario RCP - GCM - RCM - Méthode Correction Biais - Modèle hydrologique - Station (Explore2) ou toutes combinaisons GCM - Modèle hydrologique - Station (Explore2070). Ces calages ont été réalisés sur des périodes de 20 ans, au moyen d'estimateurs. On caractérise ensuite la dispersion des ensembles d'écart relatifs multi-modèles obtenus, via le changement relatif médian principalement (paragraphes 2.3.2 & 3.1.3, respectivement, pages 16 et 24).

Là encore, la lecture de ces cartes se fait manière analogue aux précédentes. On prendra garde de nouveau au fait que les échelles des couleurs du changement relatif médian sont différentes pour les quatre variables considérées.

a. Étiages - QMNA5

Au regard des Figure 26 et Figure 27, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent sur quasiment la totalité du territoire une aggravation des débits d'étiages QMNA5. Bien qu'il y ait consensus à la baisse (à quelques exceptions, la quasi-totalité des points présentent un indice d'accord inférieur à -0,8), on ne peut pas dire qu'il y a convergence entre les modèles (indice de significativité normalisé en très grande majorité inférieur ou égal à 0,5). Qui plus est, le changement relatif médian est très disparate sur le territoire.

Les simulations associées aux scénarios RCP (Explore2) projettent également une baisse mais celle-ci est plus modérée et uniforme. Pour les simulations sous le scénario RCP 2.6, l'ensemble du territoire est concernée par une légère dégradation des débits d'étiages QMNA5 (dans la plupart des cas, avec un changement relatif médian d'au plus -10%), mais il n'y a pas convergence ni consensus à la baisse (indices de significativité en majorité inférieurs à 0,25 et les indices d'accord à la baisse sont d'au plus -0,6), ce qui traduit une incertitude. Cette baisse est plus marquée pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (avec un changement relatif médian à la baisse d'au moins -20% sur la majorité du territoire, notamment la moitié sud), et la convergence des simulations est en outre plus uniforme pour le scénario RCP 8.5 (indice de significativité normalisé en grande partie supérieur à 0,5 sur les Pyrénées et le Massif central). Il y a consensus à la baisse pour la partie sud du territoire métropolitain (en dessous d'un axe horizontal passant par Lyon) avec un indice d'accord majoritairement en dessous de -0,8 pour le scénario RCP 4.5. Pour le scénario RCP 8.5, cette limite est décalée vers le nord (ligne imaginaire horizontale passant par Poitiers) et on y observe également, outre le consensus à la baisse au sud, un consensus sur la Bourgogne et la Bretagne notamment, néanmoins à relativiser avec une convergence des simulations hydroclimatiques plus incertaine (indice de significativité normalisé inférieur à 0,5). On peut remarquer que sur le secteur très localisé des Alpes, on observe plutôt une hausse qui peut trouver son explication par un étiage à la hausse en raison d'une fonte nivale plus prononcée, mais cela reste incertain car on ne peut pas dire que les modèles convergent (indice de significativité normalisé inférieur à 0,5 pour les trois scénarios RCP), ni qu'il y ait consensus à la hausse (indice d'accord d'au plus +0,8 dans la plupart des cas).

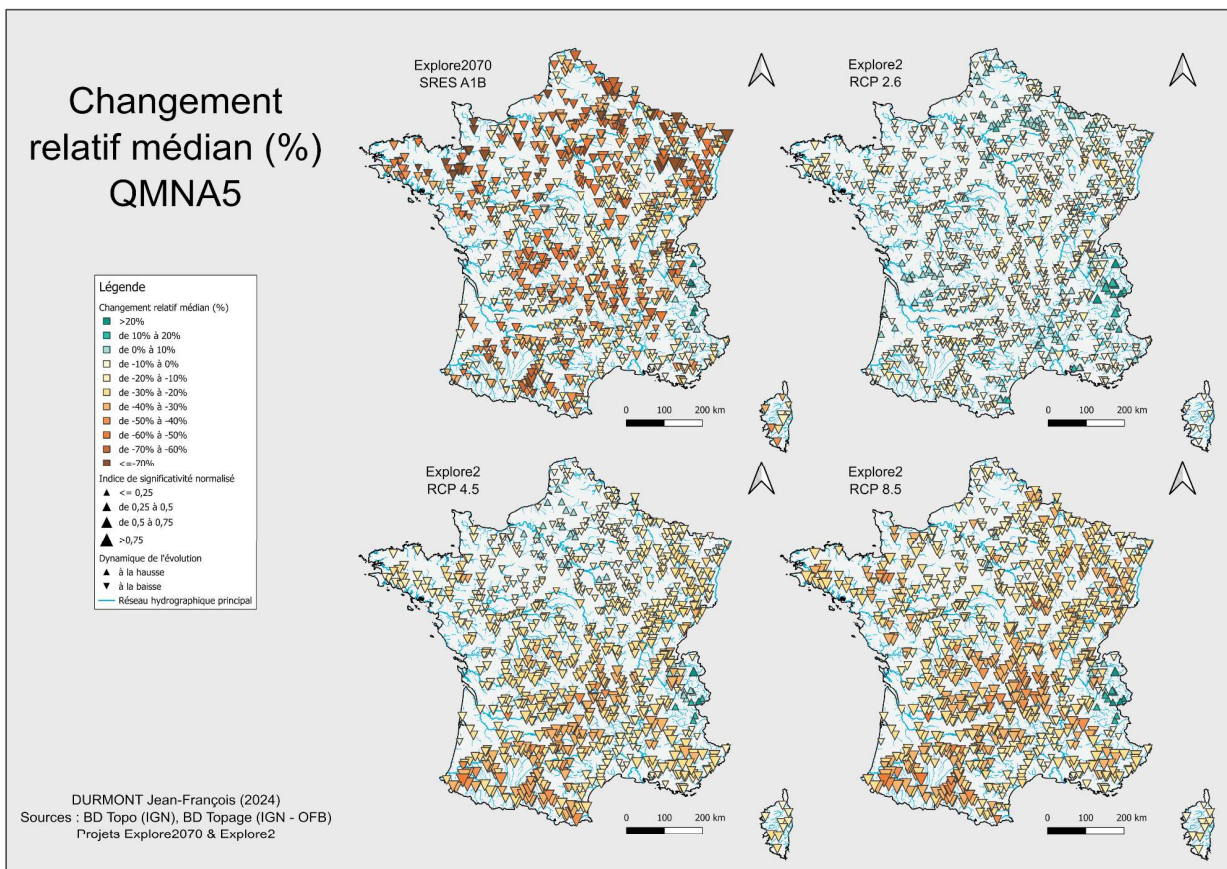


Figure 26 — Changements relatifs médians des débits d'étiage QMNA5 (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.

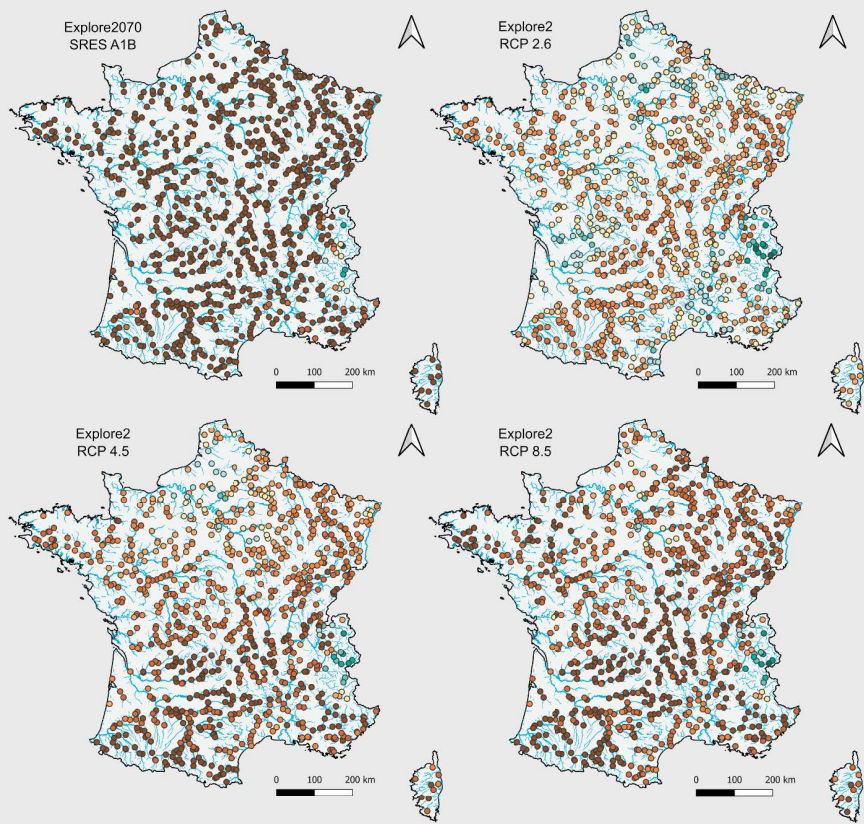
Indice d'accord QMNA5

Légende

Indice d'accord

-]0,8 ; 1]
-]0,6 ; 0,8]
-]0,4 ; 0,6]
-]0,2 ; 0,4]
-]0 ; 0,2]
-]-0,2 ; 0]
-]-0,4 ; -0,2]
-]-0,6 ; -0,4]
-]-0,8 ; -0,6]
-]-1 ; -0,8]

— Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 27 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'étiage QMNA5 entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

b. Étiages – QMNA2

Au regard des Figure 28 et Figure 29, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore 2070) projettent également sur la quasi-totalité du territoire une aggravation des débits d'étiage QMNA2. S'il y a aussi consensus à la baisse (à quelques exceptions, la quasi-totalité des points présentent un indice d'accord inférieur à -0,8), on a cette fois-ci une meilleure convergence des simulations hydroclimatiques que pour les QMNA5 avec une diagonale reliant les Pyrénées au Grand Est où les indices de significativité sont en majorité d'au moins 0,25 et souvent au-dessus de 0,5. Le changement relatif médian à la baisse est d'au moins -20% et dépasse souvent -40%.

Là aussi, les simulations associées aux scénarios RCP (Explore2) projettent également une baisse des débits d'étiage QMNA2 et celle-ci est plus modérée et uniforme par rapport au scénario SRES A1B. Pour les simulations associées au scénario RCP 2.6, l'ensemble du territoire est concerné par une légère baisse des débits d'étiage QMNA2 (changement relatif médian à la baisse allant jusqu'à -10%) mais il n'y a pas convergence des simulations (indices de significativité inférieurs à 0,25), et on ne peut pas dire qu'il y a consensus à la baisse. Cette baisse est plus marquée pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (changement relatif médian sur la moitié sud du territoire d'au moins -10%). Sur les Pyrénées, il y a une convergence des simulations plus marquée que pour le reste du territoire (indices de significativité supérieurs à 0,5 pour l'Occitanie). À l'exception notable de quelques points dans les Alpes, il y a consensus à la baisse (indice d'accord à la baisse inférieur à -0,8) pour la majorité des points de la moitié sud du territoire (axe horizontal passant par Lyon), dans le cadre du scénario RCP médian (RCP 4.5). Cette limite est également décalée vers le nord du territoire avec une ligne horizontale passant par Dijon pour le scénario RCP 8.5. Là encore, sur la zone très localisée du nord des Alpes, on observe une hausse médiane de +10% dans le cadre des trois scénarios RCP mais il n'y a pas convergence des simulations (indice de significativité inférieur à 0,25) ni consensus à la hausse. Enfin, sur la moitié nord du pays, l'évolution à la baisse, reste globalement incertaine en raison d'un indice de significativité inférieur à 0,5 et une absence d'accord à la baisse.

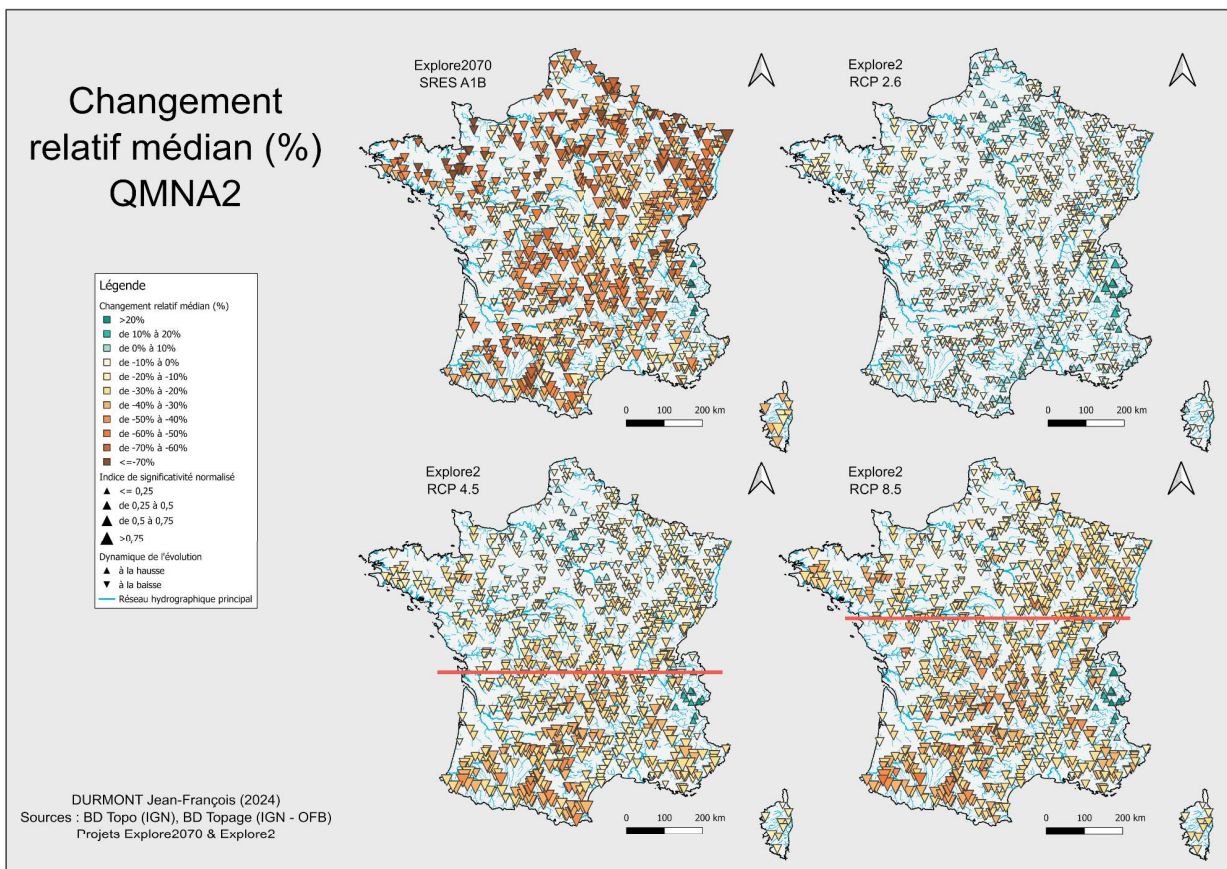
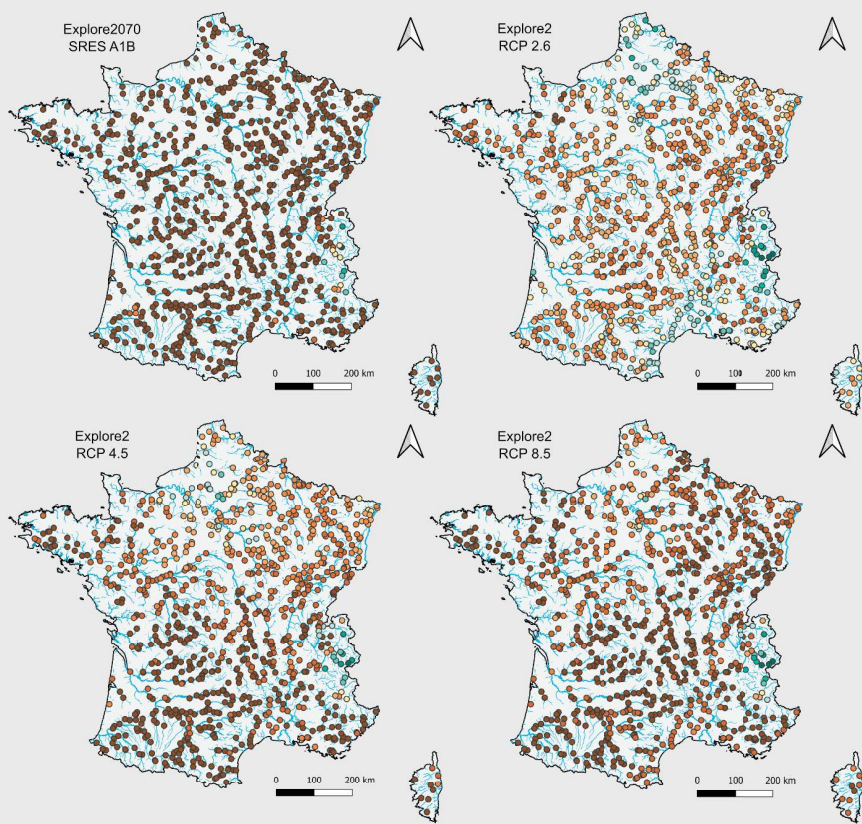


Figure 28 — Changements relatifs médians des débits d'étiage QMNA2 (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés

Indice d'accord QMNA2

Légende

Indice d'accord	
●	]0,8 ; 1]
●	]0,6 ; 0,8]
●	]0,4 ; 0,6]
●	]0,2 ; 0,4]
○	]0 ; 0,2]
○	] -0,2 ; 0]
○	] -0,4 ; -0,2]
○	] -0,6 ; -0,4]
○	] -0,8 ; -0,6]
○	] -1 ; -0,8]
—	Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 29 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'été QMNA2 entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

c. Crues – QJXA10

Au regard des Figure 30 et Figure 31, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent sur quasiment la totalité du territoire une diminution des débits de crue QJXA10, avec un changement relatif médian en moyenne de l'ordre de -10%, à l'exception notable d'un secteur au nord-est sur le département de la Meuse et l'aval du bassin versant du Rhône (au sud de Valence), en particulier les affluents en rive droite (à gauche sur la carte), comme l'Ardèche ou le Gardon (ou Gard), où on constate une hausse avec un changement relatif médian à la hausse jusqu'à +20%. Le secteur des Alpes, le bassin aval de la Seine (en aval de Paris à l'ouest en direction de la Seine Maritime vers Rouen et le Havre) et les Pyrénées sont les zones où la baisse est la plus marquée avec un changement relatif médian à la baisse jusqu'à -30% pour les Alpes et -50% pour les deux autres zones considérées. En revanche, il n'y a pas convergence des simulations, avec un indice de significativité normalisé inférieur à 0,25 dans la grande majorité des cas. Une baisse est toutefois projetée pour les Alpes et les Pyrénées, sans qu'il y ait consensus. Sur les zones où il est projeté une hausse (grand est et bassin aval du Rhône), il n'y a pas consensus entre les modèles avec au plus un indice d'accord de +0,8.

À l'opposé, la plupart des simulations sous les scénarios RCP (Explore2) projettent une hausse du débit de crue QJXA10 avec un changement relatif médian à la hausse, d'au plus +30% pour le scénario RCP 2.6 ou RCP 8.5 et allant jusqu'à +50% pour le scénario RCP 4.5 (région PACA et Bassin versant du Rhône), mais qui pour autant ne font pas consensus (indice d'accord à la hausse de l'ordre de +0,4 ou +0,5 en moyenne). Quelques simulations projettent de légères baisses, avec notamment, la Bretagne sud dans le cadre du scénario RCP 4.5, le département du Var et le secteur de Mont-de-Marsan (département des Landes) pour le scénario RCP 2.6, et les secteurs de Nice, Mont-de-Marsan et le sud de l'Ariège (Pyrénées) pour le scénario RCP 8.5. Toutefois, ces changements relatifs médians à la baisse sont d'au plus -10% et ne sont donc pas vraiment significatifs ; les simulations associées ne convergent pas (indice de significativité normalisé inférieur à 0,25) et il y a absence d'accord (indice d'accord à la baisse d'au plus de -0,2).

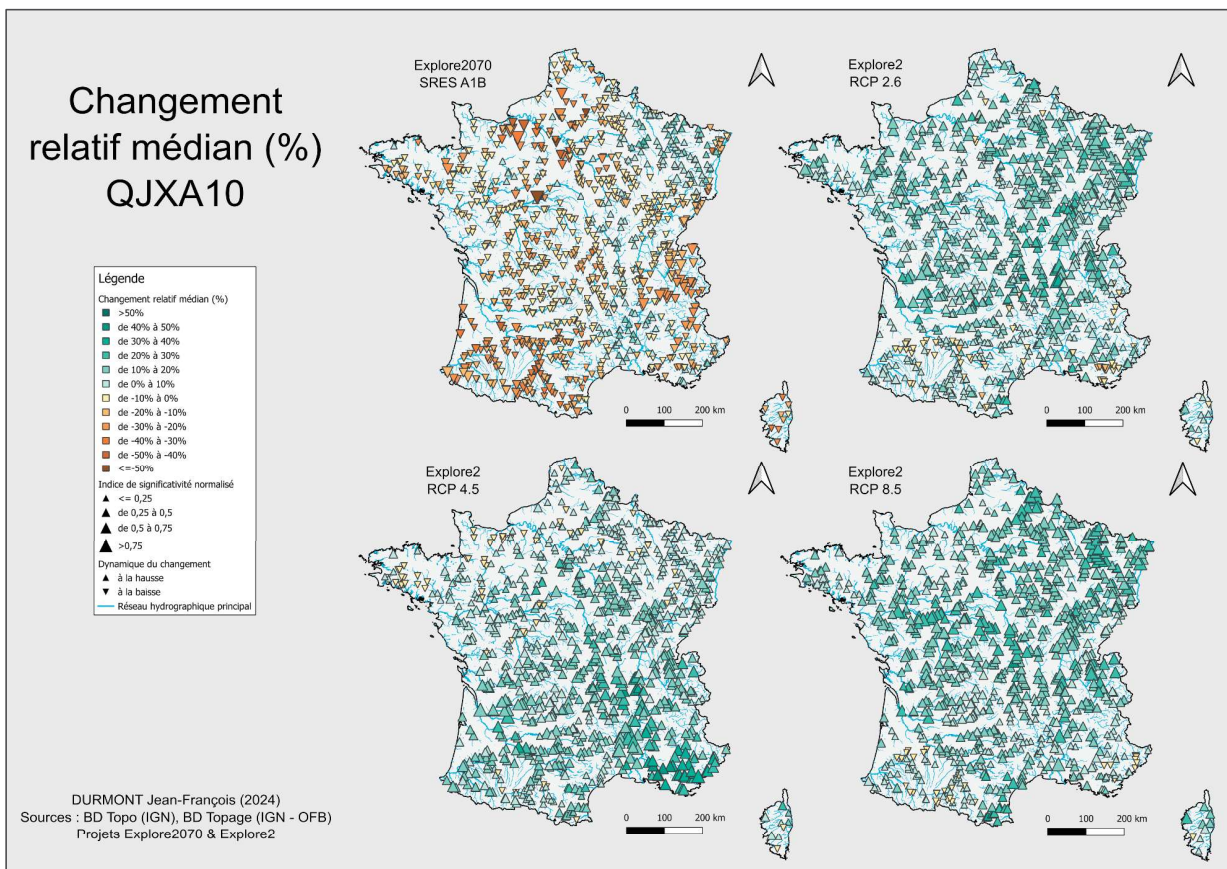
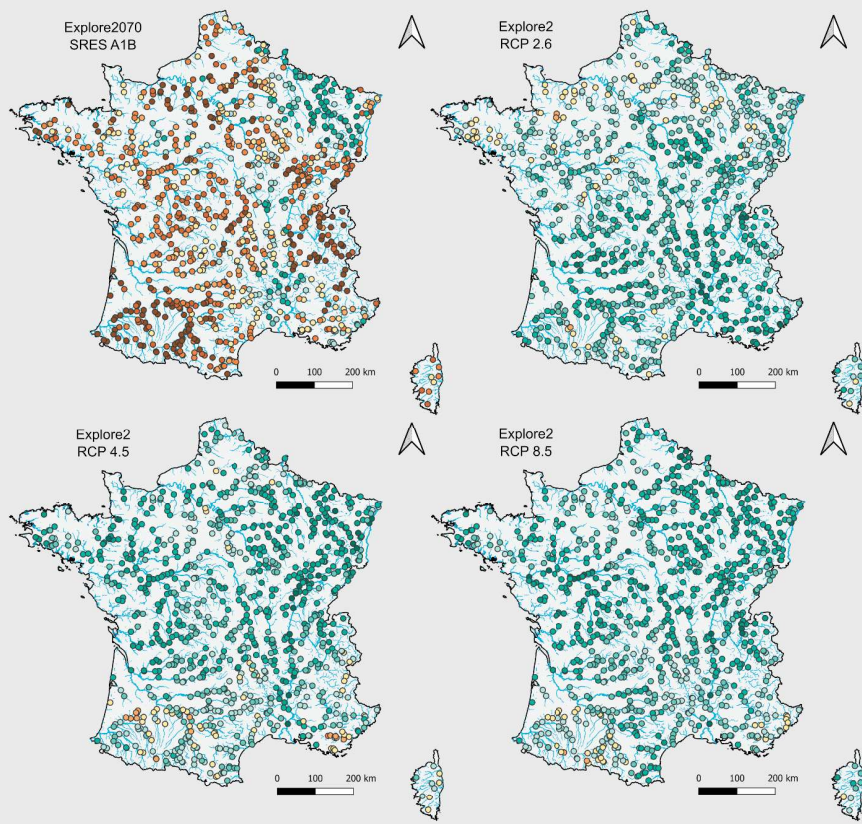


Figure 30 — Changements relatifs médians des débits de crue QJXA10 (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.

Indice d'accord QJXA10

Légende

●	[0,8 ; 1]
●	[0,6 ; 0,8]
●	[0,4 ; 0,6]
●	[0,2 ; 0,4]
○	[0 ; 0,2]
○	[-0,2 ; 0]
○	[-0,4 ; -0,2]
○	[-0,6 ; -0,4]
○	[-0,8 ; -0,6]
○	[-1 ; -0,8]
—	Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 31 — Indices d'accord pour l'évolution des débits de crues QJXA10 entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

d. Crues – QJXA2

Au regard des Figure 32 et Figure 33, les simulations sous le scénario SRES A1B (Explore2070) projettent également sur quasiment la totalité du territoire une diminution des débits de crue QJXA2 à l'exception du bassin aval du Rhône (en dessous de Valence), là aussi sur les affluents en rive droite (Ardèche et Gard) ainsi qu'un secteur localisée sur le département de la Meuse. Toutefois, il n'y a pas convergence des simulations (indices de significativité inférieurs à 0,25 et il n'y aucun consensus à la baisse ou la hausse avec respectivement un indice d'accord variant entre -0,2 et +0,2 et de -0,4 à -0,6 dans les Pyrénées.).

Dans le cadre des scénarios RCP (Explore2), les simulations projettent une hausse avec un changement relatif médian à la hausse d'au plus +30%. Il y a convergence des simulations pour le bassin versant du Rhône et la région PACA pour les simulations associées au scénario RCP 2.6, et le quart nord-est pour les scénarios RCP 4,5 et RCP 8.5, avec un indice de significativité normalisé supérieur à 0,5. Les accords à la hausse sont importants (au plus +0,6 voire +0,8) mais font rarement consensus (secteur de la Meurthe et Moselle pour le scénario RCP 4.5). On observe par ailleurs des légères baisses sur le secteur des Pyrénées et la région PACA pour les scénarios RCP médian et pessimiste mais pour autant, on ne peut pas dire qu'il y a convergence des simulations hydroclimatiques ni qu'il y a consensus à la baisse au regard des indices de significativité normalisé et indices d'accord sur ces secteurs géographiques.

e. Évolution des périodes de retour des évènements extrêmes

Au regard de l'évolution des résultats obtenus pour les QMNA5 et les QMNA2, en particulier les changements relatifs médians du même ordre de grandeur et du consensus à la baisse sur le secteur des Pyrénées et la région PACA, il est vraisemblable que les périodes de retour des étiages entre 2 et 5 ans observées pour les QMNA de la période de référence 1976-2005 vont diminuer à l'horizon du milieu siècle dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (les étiages QMNA5 que l'on observe aujourd'hui seront plus fréquents dans le futur). La situation est plus incertaine concernant le Massif central en raison d'une absence de convergence des chaînes de modélisation pour les deux paramètres, même s'il y a une forme de similitude sur les changements relatifs médians. Dans les autres cas, que ce soit pour les scénarios SRES A1B ou RCP 2.6, ou globalement, la moitié nord du pays, il n'est pas possible de se prononcer soit en raison d'un changement relatif médian proche de 0, soit une convergence moins prononcée des simulations hydroclimatiques.

Au regard de l'évolution des résultats obtenus pour les QJXA2, les QJXA10, l'impact du changement climatique sur la période de retour des crues entre 2 et 10 ans est plus incertain. Néanmoins, une tendance se dessine pour le scénario RCP 8.5. Les épisodes de crues qui sont actuellement d'une période de retour entre 2 et 10 ans seront vraisemblablement plus fréquents à l'horizon du milieu de siècle pour le Grand Est, ainsi que le centre de la France (à cheval sur les régions Auvergne Rhône-Alpes, Bourgogne Franche-Comté, Centre Val de Loire et Nouvelle Aquitaine).

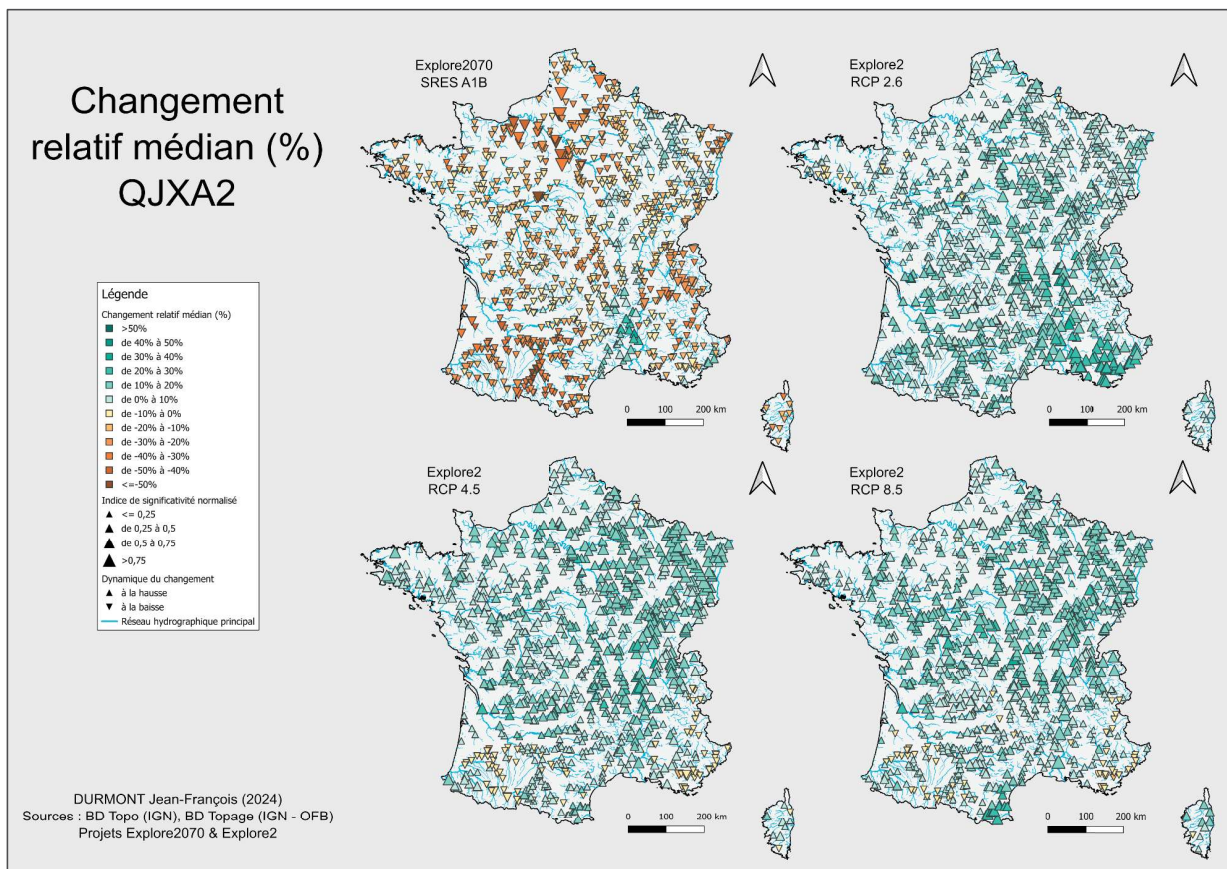


Figure 32 — Changements relatifs médians des débits de crue QJXA2 (%) à l'horizon temporel 2046-2065 pour les projets Explore2070 & Explore2 et les différents scénarios d'émission associés.

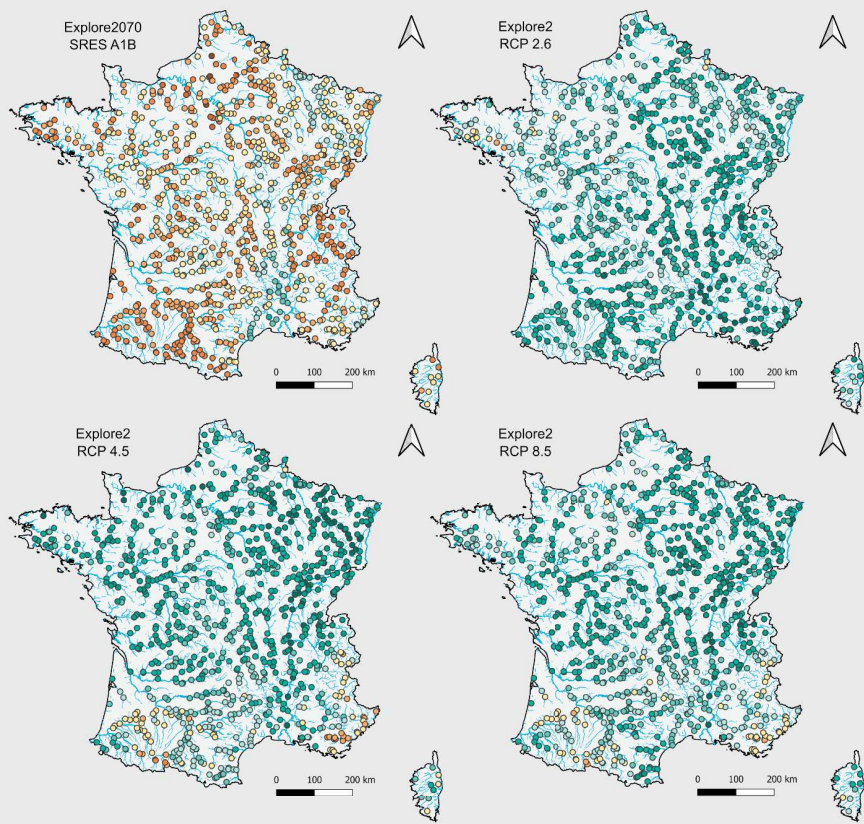
Indice d'accord QJXA2

Légende

Indice d'accord

-]0,8 ; 1]
-]0,6 ; 0,8]
-]0,4 ; 0,6]
-]0,2 ; 0,4]
-]0 ; 0,2]
-]-0,2 ; 0]
-]-0,4 ; -0,2]
-]-0,6 ; -0,4]
-]-0,8 ; -0,6]
- [-1 ; -0,8]

— Réseau hydrographique principal



DURMONT Jean-François (2024)
Sources : BD Topo (IGN), BD Topage (IGN - OFB)
Projets Explore2070 & Explore2

Figure 33 — Indices d'accord pour l'évolution des débits d'étiage QJXA2 entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046 – 2065 pour les projets Explore2070 & Explore2

3.5 Évolutions du régime hydrologique sur cinq grands bassins versants (comparaison par type de modèle hydrologique)

Dans cette partie, nous allons nous attarder sur l'analyse d'hydrogrammes formés des 12 débits mensuels moyens interannuels sur cinq grands bassins versants associés aux grands fleuves français que sont :

- La Garonne ;
- La Loire ;
- La Moselle;
- Le Rhône ;
- La Seine.

Cette comparaison est ici faite au travers de la comparaison de deux variantes du modèle hydrologique de type GR (GR4J pour Explore2070 et GRSD pour Explore2) et de SIM, i.e Safran-Isba-Modcou (SIM pour Explore2070 et SIM2 pour Explore2). La raison première est que ces derniers ont été utilisés dans les deux projets et que cela fait donc sens de les comparer. Qui plus est, même si ces modèles ont connu des évolutions entre les deux projets, ils conservent, deux à deux, des structures similaires.

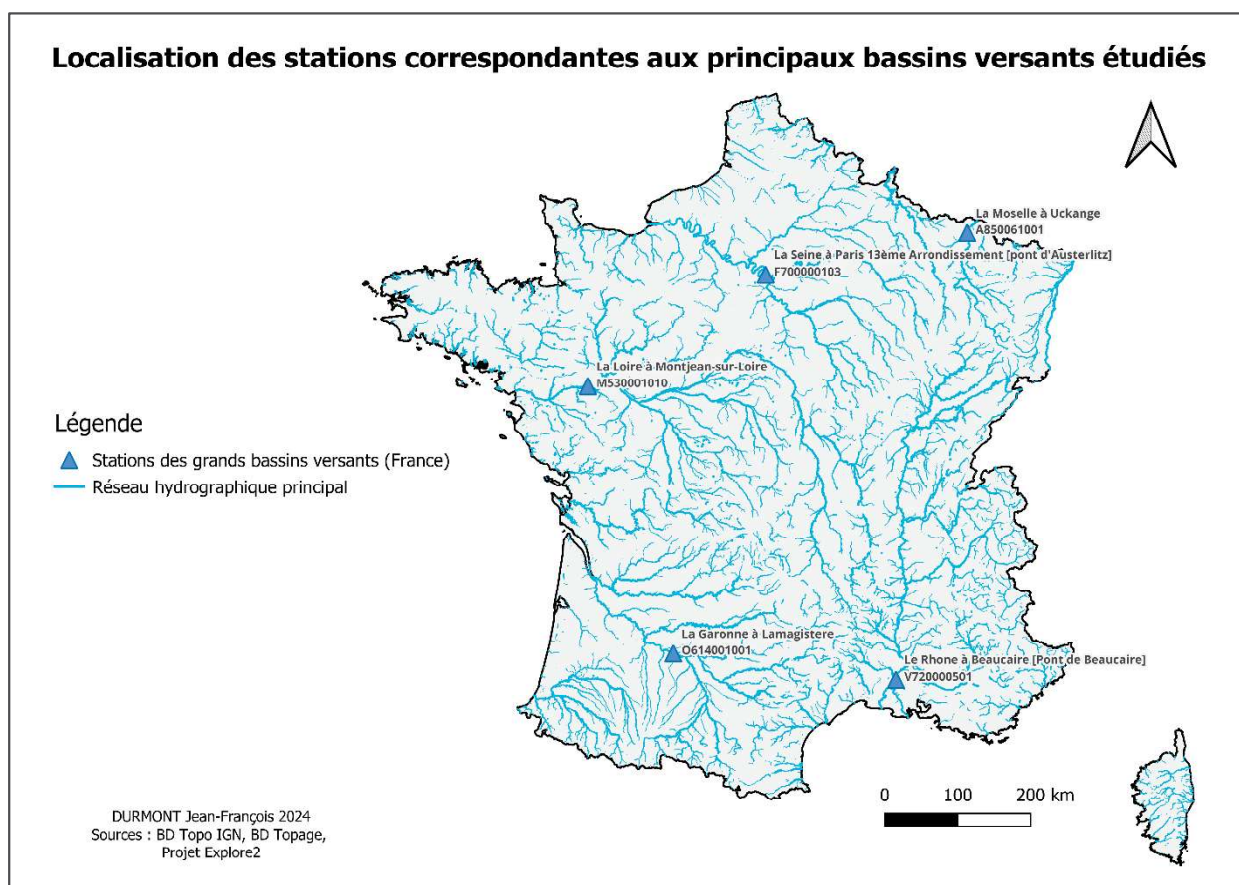


Figure 34 — Localisation des stations associées aux cinq grands versants étudiés

Le Rhin étant un fleuve frontalier avec l'Allemagne, l'ensemble de son bassin versant n'a pas été modélisé dans le cadre des projets Explore2070 et Explore2. Aussi, son analyse se fera au

travers de son principal affluent en rive gauche (située en France), en l'occurrence la Moselle.

La Figure 34, page précédente, permet de visualiser la localisation géographique des stations de ces bassins versants.

Dans chacun des cas, sont représentés les hydrogrammes construits à partir de la moyenne des 12 débits mensuels interannuels et inter-modèles pour l'horizon temporel 2046-2065, toutes projections climatiques confondues, ainsi que pour les périodes de référence des deux projets Explore2070 & Explore2, et ce pour chacun des types de modèles hydrologiques considérés (Figure 35 et Figure 36).

Il s'agit toutes de stations soumises à un régime pluvial caractérisé par un débit faible (ou basses eaux) en été, à l'exception de la station de la Garonne et le Rhône, sous influences nivales (on observe toujours un étiage en été, mais les débits printaniers sont « soutenus » par une fonte du manteau neigeux).

3.5.1 Comparaison des hydrogrammes avec modèle GR

Remarquons avant d'analyser les hydrogrammes des stations qui suivent, que le graphique de la Seine (Figure 35 – (e)) a été construit au moyen de deux points de simulation distincts. Pour la station F700000103 (La Seine au Pont d'Austerlitz), aucune simulation avec le modèle GRSD (Explore2) n'a été réalisée. Aussi, la station F704000000, directement à l'aval (La Seine au Pont Alexandre III) a été considérée puisque des simulations avec le modèle hydrologique GRSD étaient disponibles pour celle-ci (bien que ce point n'ait pas fait l'objet de simulations dans le cadre d'Explore2070). Quoique géographiquement distinctes, ces stations sont proches d'un point de vue hydrologique car la surface drainée supplémentaire entre les deux stations est négligeable au regard de la surface totale du bassin versant de la Seine et qu'il n'y a aucun affluent, si ce n'est le canal St Martin (port de plaisance à proximité de Bastille). Par conséquent, ces deux stations peuvent être considérées comme un seul et même exutoire hydrologique et sur

la Figure 35 – (e), les simulations GRAJ (Explore2070) sont rattachées à la station du pont d'Austerlitz, tandis que les simulations GRSD (Explore2) sont rattachées à la station du pont Alexandre III, quelque 5 km à l'aval (à proximité des Invalides).

Au regard des graphiques de la Figure 35, on aurait pu s'attendre, en premier lieu, à ce que l'hydrogramme de la période de référence pour Explore2070 (1961-1990 avec les courbes noires discontinues) soit systématiquement au-dessus de l'hydrogramme de référence pour Explore2 (1976-2005 avec les courbes noires continues), en raison de l'effet de changement climatique entre les deux périodes temporelles.

C'est le cas de la Moselle (Figure 35 – (c)) mais pas de la Garonne (Figure 35 – (a)), pour lesquelles l'hydrogramme de référence Explore2070 est respectivement au-dessus et en-dessous de l'hydrogramme de référence Explore2. Pour les autres stations, à savoir la Loire, le Rhône et la Seine (Figure 35 – (b), (d) et (e)), on y observe un contraste saisonnier dans la position relative de ces hydrogrammes de référence. Pour la Loire et la Seine, l'hydrogramme de référence Explore2070 est globalement au-dessus de l'hydrogramme de référence Explore2 au printemps et en été. À l'inverse, le débit saisonnier est plus faible pour l'automne et l'hiver. Pour le Rhône, l'hydrogramme de référence Explore2070 est la plupart du temps en dessous de l'hydrogramme de référence Explore2, à l'exception notable des mois de mars et d'avril.

Les simulations sous le scénario SRES A1B (courbes roses discontinues) sont la plupart du temps en dessous des simulations sous les scénarios RCP (courbes avec trois teintes de bleues continues). C'est le cas de la Garonne, la Loire, le Rhône et la Seine (Figure 35 – (a), (b), (d) et (e)).

Le déficit du débit annuel moyen est particulièrement plus prononcé pour la Garonne et le Rhône que dans le cadre des deux autres stations. Pour la Loire et la Seine, les différences entre les hydrogrammes des projections Explore2070 et Explore2 sont moins marquées. Enfin, pour la Moselle (Figure 35 – (c)), on observe une disparité saisonnière entre les projections Explore2070 et Explore2, puisque l'hydrogramme associé au scénario SRES A1B se trouve au-dessus de l'hydrogramme associé aux scénarios RCP pour les mois de février à juillet, et l'ordre relatif est inversé pour le reste de l'année. Ces constats traduisent un faible recouvrement des valeurs simulées sous les scénarios SRES A1B d'une part et RCP d'autre part pour chacune de ces stations.

Enfin, en ce qui concerne les projections par rapport aux périodes de référence, le scénario SRES A1B suggère une baisse généralisée des débits mensuels là où on observe des changements contrastés entre les saisons pour les scénarios RCP, avec des projections suggérant une hausse du débit saisonnier en hiver et une baisse sur la saison estivale, même si on peut noter que la projection sous scénario SRES A1B est ponctuellement plus élevée que la référence Explore2070 pour le mois de février dans le cas de la Moselle (Figure 35 – (c)). Pour les simulations SRES A1B, le changement relatif débit annuel⁵² traduit une baisse, avec la plus forte amplitude, par rapport à la référence Explore2070, qui est observé pour la Garonne avec -44% (Figure 35 – (a)). Vient ensuite la Seine avec -30% (Figure 35 – (e)), la Loire avec -28% (Figure 35 – (b)), le Rhône avec -23% (Figure 35 – (d)) et enfin -20% avec la Moselle (Figure 35 – (c)).

Pour les projections associées aux scénarios RCP, la hausse la plus importante pour la saison hivernale est observée pour le Rhône avec un écart relatif du débit saisonnier⁵³ hivernal variant de +15% (RCP 2.6) à +25% (RCP 8.5), lorsqu'on considère les scénarios RCP du moins émetteur au plus émetteur de GES. Pour la Garonne, les projections hivernales sous scénario RCP sont du même ordre de grandeur et la hausse du débit saisonnier est de l'ordre de +6% (Figure 35 – (a)). Pour la Loire (Figure 35 – (b)), on constate une hausse hivernale de l'ordre de +4% (RCP 2.6) à +9% (RCP 4.5). Pour la Moselle (Figure 35 – (c)), celle-ci varie entre +7% (RCP 2.6) et +19% (RCP 8.5) et enfin, pour la Seine (Figure 35 – (e)), l'écart relatif du débit saisonnier à la hausse varie entre +4% (RCP 2.6) et +10% (RCP 8.5). Pour l'été, le déficit en eau est plus important que le scénario RCP est émetteur et l'écart relatif du débit saisonnier estival le plus important est observé pour le Rhône (Figure 35 – (d)), pour lequel, ce dernier varie entre -8% (RCP 2.6) et -25% (RCP 4.5 et RCP 8.5). Pour les quatre autres stations, le changement relatif du débit saisonnier estival est non significatif dans le cadre du scénario RCP 2.6. En revanche, pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, l'écart relatif du débit saisonnier estival est de -30% (RCP 4.5 et RCP 8.5) pour la Garonne (Figure 35 – (a)), -18% (RCP 4.5) pour la Loire et la Moselle, tous scénarios RCP confondus (Figure 35 – (b) et (c).) et enfin -17% (RCP 4.5 et RCP 8.5) pour la Seine (Figure 35 – (e)).

⁵² L'écart est ici calculé en considérant la (Valeur du débit annuel moyen sous le scénario SRES A1B – Valeur du débit annuel moyen de la période de référence Explore2070) que divise la Valeur du débit annuel moyen de la période de référence Explore2070. Le débit annuel moyen est la moyenne des débits mensuels moyens interannuels.

⁵³ L'écart est ici calculé en considérant la (Valeur du débit saisonnier moyen sous un ou plusieurs scénarios RCP – Valeur du débit saisonnier moyen de la période de référence Explore2) que divise la Valeur du débit saisonnier moyen de la période de référence Explore2. Le débit saisonnier moyen est la moyenne des débits mensuels moyens interannuels correspondant à la saison considérée (paragraphe 3.2.2, p. 31 pour la définition des saisons météorologiques).

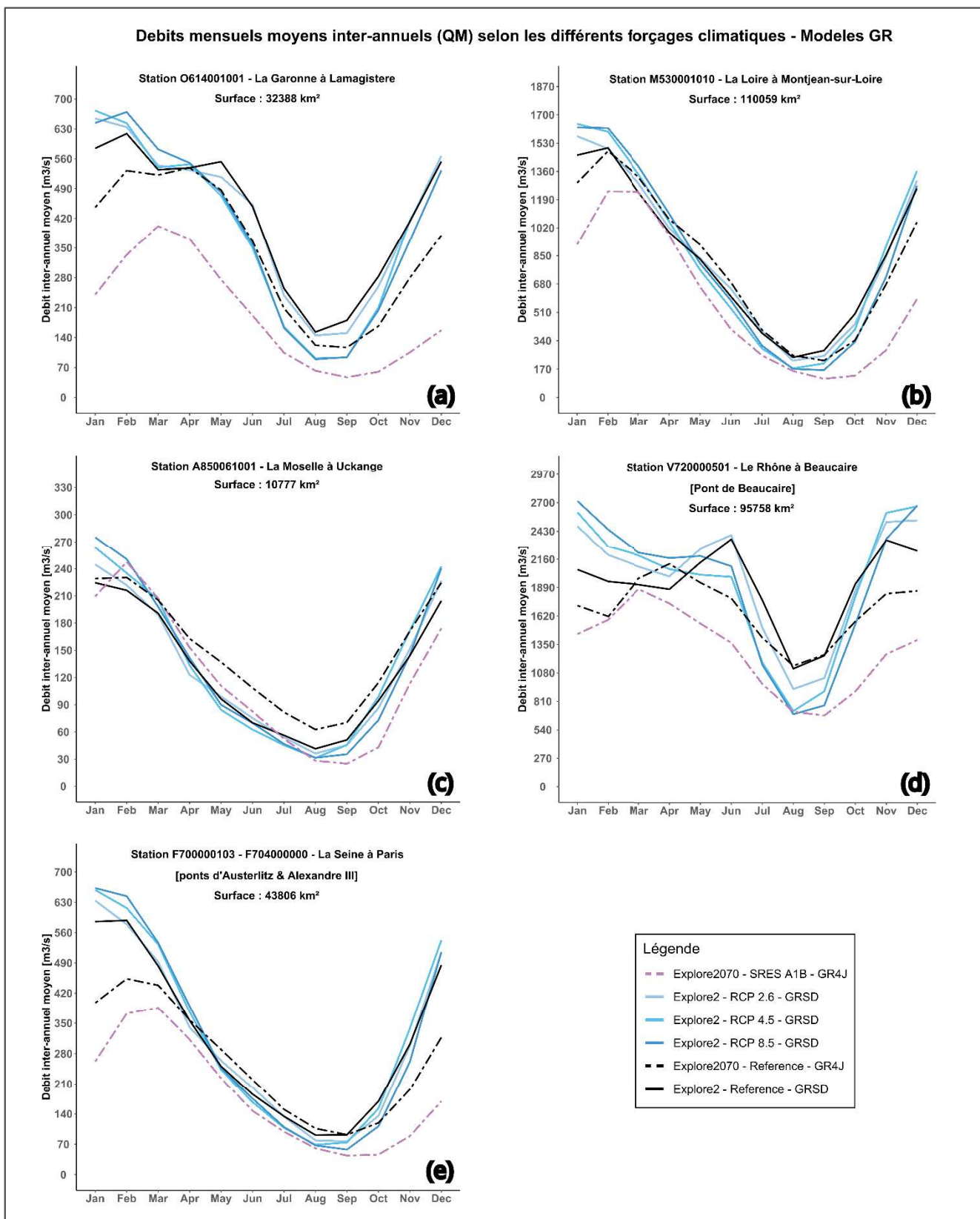


Figure 35 — Hydrogrammes interannuels pour les cinq stations considérées à l'horizon temporel 2046 – 2065 en sortie de modèles de type GR pour chacun des forçages climatiques ainsi que pour les périodes de référence des projets Explore2070 & Explore2.

Au niveau de la tendance globale des hydrogrammes, on remarque que les projections sous scénario RCP présentent des hydrogrammes similaires avec la référence Explore2, à l'exception peut-être du Rhône. Il en est globalement de même entre les projections sous scénario SRES A1B et la référence Explore2070.

3.5.2 Comparaison des hydrogrammes avec modèle SIM

Seules trois stations, parmi les cinq envisagées, ont pu être comparées via ce modèle en absence de modélisation SIM2 (Explore2) pour les stations de la Seine et du Rhône. Il n'a pas été possible d'utiliser d'autres stations Explore2 situées directement à l'amont ou l'aval de celles-ci qui auraient être considérées comme hydrologiquement semblables et sur lesquelles, une modélisation SIM2 aurait été réalisée.

Là encore, on peut remarquer que l'hydrogramme de référence Explore2070 (courbes noires discontinues) n'est pas systématiquement au-dessus de l'hydrogramme de référence Explore2 (courbes noires continues) et pour les trois bassins étudiés, on observe une disparité saisonnière. Dans chacun des cas, l'hydrogramme de référence Explore2070 est en-dessous de l'hydrogramme de référence Explore2 entre les mois d'avril et d'octobre. La position relative de ces hydrogrammes est inversée pour les mois de novembre et de décembre. La seule différence se situe pour les mois de janvier à mars où est l'hydrogramme de référence Explore2070 est au-dessus de l'hydrogramme de référence Explore2 dans le cadre de la Garonne et de la Loire (Figure 36 – (a) et (b)), tandis que les hydrogrammes de référence des deux projets sont semblables pour la Moselle (Figure 36 – (c)), toujours pour les mois de janvier à mars. On peut également noter que les hydrogrammes de référence sont différents entre les projets, ce qui suggère une influence des modèles hydrologiques sur les simulations (car les forçages climatiques sont identiques respectivement pour les deux projets).

Les projections sous scénario SRES A1B (courbes violettes discontinues) sont plus déficitaires que les projections sous scénario RCP (courbes avec trois teintes de vert continues) qui sont globalement semblables pour les stations étudiées. La seule exception ponctuelle étant pour le mois de février dans le cadre de la Loire et de la Moselle (Figure 36 – (b) et (c)). Les simulations sous scénario RCP 8.5 présentent un excès d'eau en hiver tandis que ce scénario d'émission est associé à un déficit en été, ce qui peut être expliqué par une fonte nivale hivernale plus prolongée dans le temps, en raison de la hausse moyenne de température plus élevée que pour les autres scénarios RCP. C'est vrai pour la modélisation sous SIM mais également pour la modélisation GR (paragraphe précédent). Ces constats traduisent, à nouveau, un faible recouvrement des valeurs simulées sous les scénarios SRES A1B d'une part et RCP d'autre part pour chacune de ces stations.

En ce qui concerne les projections par rapport à la référence, on remarque à nouveau, que les projections associées au scénario SRES A1B suggèrent un changement relatif à la baisse, à l'exception du mois de février pour la Moselle (Figure 36 – (c)), là où on observe à nouveau un contraste saisonnier pour les projections associées aux scénarios RCP, avec une hausse en hiver et une baisse en été. L'écart relatif⁵⁴ du débit annuel pour les projections associées au scénario SRES A1B par rapport à la référence Explore2070, est de l'ordre de -31% pour la Garonne, -19% pour la Loire et -13% pour la Moselle (Figure 36 – (a), (b) et (c)). Pour les projections associées aux scénarios RCP, la hausse hivernale la plus importante est constatée pour la Moselle avec un écart relatif du débit saisonnier⁵⁵ traduisant une hausse entre +6% (RCP

⁵⁴ De la même manière que pour les simulations avec modèle GR, l'écart est ici calculé en considérant la (Valeur du débit annuel moyen sous le scénario SRES A1B - Valeur du débit annuel moyen de la période de référence Explore2070) que divise la Valeur de débit annuel moyen de la période de référence Explore2070. Le débit annuel moyen est la moyenne des débits mensuels moyens interannuels.

⁵⁵ De la même manière que pour les simulations avec modèle GR, l'écart est ici calculé en considérant la (Valeur du débit saisonnier moyen sous un ou plusieurs scénarios RCP - Valeur du débit saisonnier moyen de la période de

2.6) et +16% (RCP 8.5). +3% pour la Garonne (tout scénario RCP confondu), et de +3% (RCP 2.6) à +10% (RCP 4.5) pour la Loire. En été, le changement relatif du débit saisonnier est cette fois plus impactant pour la Garonne avec un écart variant entre -5% (RCP 2.6) et -20% (RCP 4.5 et RCP 8.5), jusqu'à -7% (RCP 4.5) pour la Loire et -11% (RCP 4.5) pour la Moselle (Figure 36 - (a), (b) et (c)).

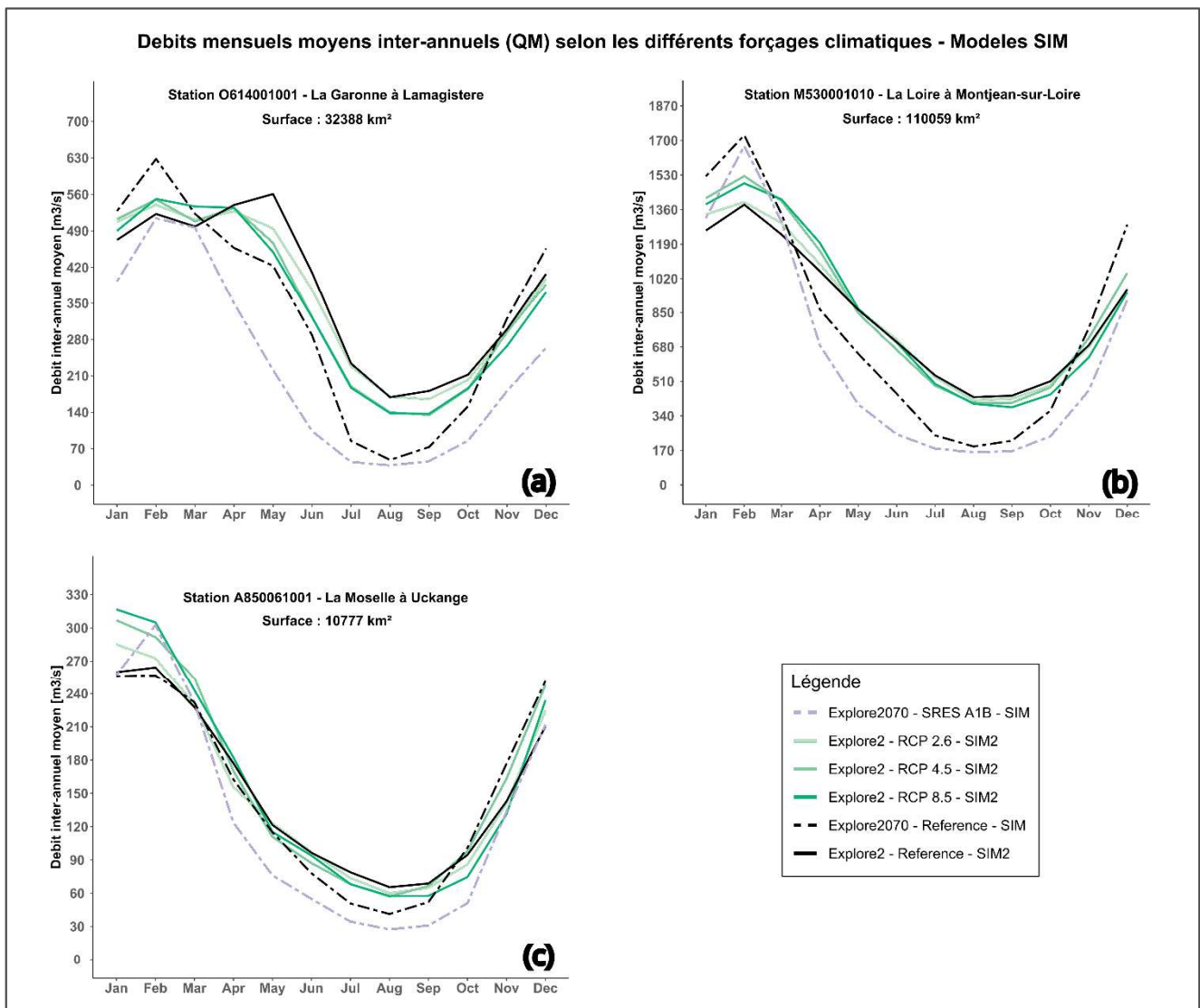


Figure 36 — Hydrogrammes interannuels pour trois des cinq stations considérées à l'horizon temporel 2046 – 2065 en sortie de modèles de type SIM pour chacun des forçages climatiques ainsi que pour les périodes de référence des projets Explore2070 & Explore2.

Au niveau de la tendance globale des hydrogrammes, on remarque que les projections sous scénario RCP présentent des hydrogrammes similaires avec la référence Explore2. Il en est de même pour les projections associées au scénario SRES A1B par rapport à la référence Explore2070.

3.5.3 Synthèse

Au regard de ces cinq stations, on peut dire pour celles-ci que :

référence Explore2) que divise la Valeur du débit saisonnier moyen de la période de référence Explore2. Le débit saisonnier est la moyenne des débits mensuels moyens interannuels pour la saison considérée. (paragraphe 3.2.2, p. 31 pour la définition des saisons météorologiques).

- Les régimes hydrologiques associés à la modélisation de type GR sont sensiblement identiques entre la période de référence et la période de projection future pour les deux projets, à l'exception du Rhône. Il en est de même pour la modélisation de type SIM sur les trois stations considérées. Concernant le Rhône, cela peut être expliqué par le fait que c'est un fleuve fortement anthropisé (présence de barrages). Or, pour la station du Rhône (à Beaucaire), le modèle hydrologique GR4J (Explore2070) est calé sur des chroniques de débits réels mesurés à Beaucaire donc parfois influencées par la présence d'ouvrages hydrauliques en amont. Tandis que le modèle GRSD (Explore2) est calé sur des chroniques de débits en amont, en tête de bassin, et spatialise les paramètres de transformation pluie – débit dans une configuration naturelle ;
- Le débit annuel de référence Explore2070 n'est pas systématiquement plus élevé ou plus faible que le débit annuel de référence Explore2 alors qu'on aurait pu s'attendre qu'il soit systématiquement plus élevé, en raison d'une baisse du cumul de précipitation entre les deux périodes de référence des deux projets, à l'échelle métropolitaine, même si celle-ci est peu importante (note de bas de page n° 47 p.35). La réponse des bassins versants est non linéaire et la fonte du manteau neigeux prolongée sur l'année peut expliquer que la baisse des précipitations ne se traduit pas nécessairement pas une baisse de débit à l'exutoire. Qui plus est, ces évolutions de température et de précipitation ne sont pas non plus uniformes spatialement. Enfin, cela peut être également expliqué par un biais intrinsèque des modèles hydrologiques.
- La comparaison inter-modèles des hydrogrammes des périodes de référence pour chacun des projets suggère une influence des modèles hydrologiques ;
- Dans la plupart des cas, et sur les deux types de modèles, les projections associées au scénario SRES A1B traduisent un assèchement plus prononcé et à l'exception de la Moselle, la saisonnalité des débits mensuels n'est pas profondément modifiée (observée ponctuellement au mois de février pour cette station) ;
- À contrario, les projections associées aux scénarios RCP traduisent une distribution des débits modifiée, avec des débits saisonniers hivernaux en hausse, compensé annuellement en partie, par un étiage plus sévère en été. Cela est perceptible sur les deux types de modèles.

Les tendances d'évolution sont cohérentes avec l'analyse spatiale d'évolution des débits saisonniers (paragraphe 3.4.2, p. 43 et suivantes).

IV. Discussions et perspectives

4.1 Discussions des résultats obtenus

4.1.1 Évolution de la température et du cumul de précipitation

Quel que soit le scénario d'émission, tous les modèles climatiques, que ce soit pour Explore2 ou Explore2070, suggèrent une hausse de la température moyenne annuelle à l'échelle métropolitaine d'ici 2046-2065, de l'ordre de +2,2°C pour les projections associées au scénario SRES A1B, et de +1,3°C à +2,4°C pour les projections associées aux scénarios RCP. L'été est la saison météorologique où la hausse est la plus forte que ce soit pour les scénarios RCP ou SRES A1B (Tableau 2 et Tableau 3, p. 36).

Pour le cumul de précipitation annuel, les projections associées au scénario RCP 2.6 suggèrent une hausse annuelle tandis que c'est incertain pour les autres scénarios RCP. Toutefois, les modèles s'accordent sur une hausse du cumul de précipitation hivernal et un déficit sur la saison estivale (à l'exception des simulations associées au scénario RCP 2.6 pour l'été). Là, où les simulations associées au scénario SRES A1B suggèrent une baisse globale tout le long de l'année du cumul de précipitation, sauf en hiver où cela reste incertain (Tableau 4 et Tableau 5 p. 37).

Le déficit de précipitation, couplé à des températures globalement plus chaudes, dans le cadre du scénario SRES A1B, peuvent expliquer la tendance global à l'assèchement observé sur les projections hydrologiques, quelle que soit la saison, à l'horizon 2046-2065 . À l'inverse, des précipitations hivernales plus élevées, ou des précipitations estivales plus faibles, le tout couplé à un réchauffement global, peuvent expliquer en partie les tendances saisonnières respectives à la hausse et à la baisse des variables hydrologiques pour les simulations réalisées dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Le changement climatique ayant eu lieu entre les périodes de référence des deux projets n'explique pas complètement les écarts observés à l'horizon 2046-2065 entre les projections avec le scénarios SRES A1B et celles associées aux scénarios RCP. Aussi, il est vraisemblable qu'une partie trouve son explication dans les biais qu'induisent les chaînes hydroclimatiques et méthodes de modélisation utilisées.

Les tendances saisonnières de milieu de siècle projetées avec les scénarios RCP, sont confirmées par (Sauquet, Evin, et al., 2024) à l'horizon fin de siècle.

4.1.2 Évolution des débits annuels et saisonniers

Le Tableau 6 synthétise les accords à la hausse et à la baisse (paragraphe 3.1.3, p. 24 pour la définition de l'indice d'accord) sur les 970 points en commun entre les projets Explore2070 et Explore2 entre les périodes de référence des deux projets et l'horizon temporel 2046-2065. Les accords non significatifs ne sont pas comptabilisés ici. Il s'agit d'une infographie plus synthétique et non spatialisée des Figure 17, Figure 19, Figure 21, Figure 23, et Figure 25.

On remarque que les changements de débits sous le scénario SRES A1B sont en majorité pessimistes (indice d'accord $\leq -0,8$) et pour lesquels, il est suggéré une diminution du débit annuel pour presque la totalité du territoire métropolitain, des débits estivaux et des débits automnaux, avec un changement relatif médian qui va au-delà de -50% (paragraphe 3.4.1 p. 39 et 3.4.2 p. 43). Il en est de même pour les débits printaniers, avec des stations localisées

principalement en Occitanie et l'Île de France. Pour les débits hivernaux, cela concerne essentiellement l'Occitanie et l'Île de France.

En ce qui concerne les changements sous les scénarios RCP, les projections sont beaucoup plus incertaines et dans la majorité des cas, les indices d'accord restent dans l'intervalle $]-0,8 ; +0,8[$. On observe néanmoins que pour environ 15% des stations, il est suggéré une augmentation du débit hivernal (indice d'accord $\geq +0,8$), et cela concerne essentiellement les Alpes, le Jura et le grand Est pour les scénarios RCP 4.5 & 8.5 ou les Alpes et les Pyrénées pour le scénario RCP 2.6 (Figure 19 p. 45), traduisant une fonte nivale et un étiage hivernal moins sévère (aucun accord à la baisse). Pour 10% des points de simulations, il est suggéré un consensus à la baisse du débit estival sous les scénarios RCP 4.5 & 8.5 et cela concerne essentiellement les Alpes et les Pyrénées (Figure 23 p. 51). Enfin, dans le cas de l'automne et le scénario RCP 8.5, il est suggéré que 13% des points considérés verront leur débit automnal diminuer et cela concernera essentiellement les Pyrénées atlantiques, la Bretagne sud, l'ancien Limousin ainsi que la Côte d'Or. Ce qui traduit un étiage plus prolongé sur ces zones.

Projet	Scénario d'émission	Débit	Accord à la hausse	Accord à la baisse
Explore2070	SRES A1B	QA	0	911
		Q _{DJF}	45	364
		Q _{MAM}	8	482
		Q _{JJA}	0	940
		Q _{SON}	0	871
Explore2	RCP 2.6	QA	0	0
		Q _{DJF}	128	0
		Q _{MAM}	7	0
		Q _{JJA}	0	0
		Q _{SON}	0	0
	RCP 4.5	QA	1	0
		Q _{DJF}	135	0
		Q _{MAM}	3	5
		Q _{JJA}	0	109
		Q _{SON}	0	3
	RCP 8.5	QA	0	7
		Q _{DJF}	158	0
		Q _{MAM}	31	1
		Q _{JJA}	0	83
		Q _{SON}	0	130

Tableau 6 — Statistiques sur les accords à la hausse et à la baisse des projections des débits annuels et saisonniers en fonction des différents scénarios d'émission, tous modèles hydroclimatiques confondus, à l'horizon temporel 2046-2065

Les résultats obtenus (paragraphes 3.4.1 et 3.4.2, p. 39 et 43) et suggérés à l'horizon 2046-2065, dans le cadre d'Explore2 et les scénarios RCP, s'inscrivent dans la dynamique des projections réalisées à la fin du siècle, toujours dans le cadre du projet Explore2 (Sauquet, Strohmenger, et al., 2024) :

- Pour la saison hivernale, les projections 2046-2065 suggèrent une fonte nivale sur le massif Alpin de plus en plus prononcée lorsqu'on considère les scénarios RCP de façon croissante, observable sur les projections à la fin de siècle 2070-2099. Ce phénomène est directement lié à l'augmentation de la température. Il est également observable en tête de bassin, sur les Pyrénées bien que plus incertain (observable uniquement sur les

projections associées aux scénarios RCP et absent des projections Explore2070 sous scénario SRES A1B). En revanche, les projections sous scénario RCP à horizon temporel milieu de siècle ne permettent pas de conclure sur le reste du territoire, là où les projections à l'horizon fin de siècle suggèrent des baisses du débit hivernal jusqu'à -10% en plaine. Seule la hausse sur le secteur des Alpes fait consensus entre les projets Explore2 et Explore2070 à horizon 2046-2065 ;

- Au printemps, les projections à l'horizon 2046-2065 suggèrent des baisses du débit essentiellement localisées sur l'Occitanie, la région PACA, le Massif central ainsi que sur les Vosges et le Jura, qui sont également observables sur les projections à la fin de siècle 2070-2099 et déclinées selon les trois scénarios RCP. Il y a similitude entre les projections des projets Explore2 et Explore2070 pour les Pyrénées, les Vosges, la région PACA ainsi que le cœur des Alpes mais ces dernières diffèrent par leur intensité du changement relatif ;
- Pendant l'été, la baisse du débit est généralisée sur l'ensemble de la France métropolitaine dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2046-2065 et il en est de même pour les projections à la fin de siècle. Cette baisse trouve son origine dans un cumul de précipitation plus faible que pour les autres saisons, ainsi qu'une température moyenne plus élevée qui favorise l'évapotranspiration (Figure 13 p. 33). Les projets Explore2 et Explore2070 suggèrent tous les deux une baisse mais d'intensité différente. Cette baisse est plus importante dans le cadre d'Explore2070, car les projections sous le scénario d'émission SRES A1B suggèrent un déficit de pluie plus important ;
- L'assèchement se poursuit en automne, en particulier au niveau du quart sud-ouest et la région PACA (en dessous d'une diagonale reliant la pointe de Corsen à Briançon) pour les projections sous scénario RCP 4.5 à l'horizon 2046-2065. Quant au scénario RCP 8.5, la diminution de la ressource y est générale sur l'ensemble de la France métropolitaine. Cela traduisant une période d'étiage plus longue sur les territoires considérés. Il en est de même à l'horizon fin de siècle. Les projets Explore2 (RCP 8.5) et Explore2070 s'accordent sur le grand quart sud-ouest ainsi que la région PACA, mais encore une fois avec des intensités différentes. ;
- Pour ce qui est du débit annuel, le territoire métropolitain peut être coupé en deux selon la diagonale pointe de Corsen – Briançon dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon temporel 2046-2065, avec au sud de cette démarcation, une baisse du débit et au nord, plutôt une hausse, notamment au niveau du Grand Est. On observe également cette tendance à l'horizon fin de siècle. Toutefois, il n'y a pas consensus à la baisse ou à la hausse et le changement relatif reste incertain, sauf exceptions : hausse pour le Grand Est pour le scénario RCP 4.5 et baisse pour les Pyrénées dans le cadre du scénario RCP 8.5. Les projets Explore2 et Explore2070 s'accordent uniquement sur une baisse de débit sur la partie sud mais avec néanmoins, encore une fois, une intensité d'assèchement différente.

4.1.3 Évolutions des extrêmes (crues et étiages)

Pour ce qui est de l'étiage, les projets diffèrent de nouveau en termes d'intensité qui cette fois-ci est plus disparate pour Explore2070 qu'Explore2 (sur les débits annuels ou saisonniers, les simulations Explore2070 suggèrent quasi-systématiquement un changement relatif à la baisse plus important que pour les simulations Explore2).

Dans le cadre des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, les QMNA5 projetés à l'horizon 2046-2065 vont diminuer et la baisse sera plus importante dans le sud du pays, notamment sur le Massif central, les Pyrénées et la région PACA. Cela est également vrai pour les QMNA2 sur les Pyrénées et la région PACA, ce qui laisse à penser que la fréquence et sévérité des étiages vont aller en augmentant sur ces régions. Pour la partie Nord, il n'est pas possible de se prononcer. Le constat à la fin de siècle concerne une dégradation sur l'ensemble de la partie sud (Sauquet, Evin, et al., 2024) Les projets Explore2 et Explore2070 présentent une concordance en termes de signe de changement notamment et d'intensité pour QMNA2, sur les Pyrénées et la région PACA,. Ils divergent cependant en termes d'intensité pour QMNA5, sur ces mêmes régions.

Pour ce qui est des crues, les projets diffèrent très fortement puisque sous scénario SRES A1B, il n'est pas possible de conclure en termes d'intensité du changement pour les QJXA10 et QJXA2 à l'horizon 2046-2065, là où les scénarios RCP projettent une hausse, avec consensus, sur le Grand Est. Bien ce constat amène à penser que la fréquence et la sévérité des crues « ordinaires » vont aller en augmentant sur ce secteur, il est à mettre en balance avec le fait qu'aucune analyse de la dispersion et de période de retour des pluies intenses (PJXA10 ou PJXA20) n'a été effectuée. Or ces deux phénomènes sont liés entre eux. Pour les autres zones géographiques, l'absence de consensus ou convergence des chaînes de modélisation et/ou un changement relatif médian proche de 0 ne permet pas de conclure. Quant à la fin de siècle, les projections Explore2 ne permettent pas non plus de conclure en raison d'une forte variabilité en termes de changements relatifs entre les modèles, i.e une non convergence de ces dernières (Sauquet, Evin, et al., 2024).

4.1.4 Limites dans l'exercice de comparaison des projets Explore2070 et Explore2

Les projections réalisées dans le cadre de ces projets présentent des limites (notamment en raison d'une simplification dans la modélisation), tout comme l'exercice de comparaison en lui-même. Pour ce qui est de la comparaison des projets, les limites identifiées sont les suivantes :

- Les périodes de référence différentes entre les deux projets, qui de fait occasionnent un biais en termes d'intensité du changement et ne permettent pas de comparer directement les écarts entre les projets. En raison d'un problème de disponibilité des données, il n'y a pas été possible de se ramener à une période commune puisque dans le cadre d'Explore2, les chroniques de données ont pour point de départ l'année 1976. Quant au projet Explore1970, les chroniques « brutes » avant agrégation n'étaient pas disponibles. Il n'a donc pas été possible de quantifier la part imputable à l'évolution du climat entre les deux périodes de référence que sont 1961 – 1990 et 1976-2005, et si ce changement de référence explique à lui seul les différences dans les résultats obtenus, même s'il est probable qu'une partie de ces différences peuvent s'expliquer par un biais apporté par la modélisation en elle-même ;
- Seule une partie des variables disponibles ont été analysées et étudiées. Il n'a été possible que d'étudier des variables hydrologiques et climatiques communes aux deux projets et par simplification, seules les principales ont été considérées.
- Les chaînes hydroclimatiques ont évolué entre les deux projets, notamment la modélisation climatique entre les projets Explore2070 (CMIP3) et Explore2 (CMIP5). La méthode de descente d'échelle associée et nécessaire à la modélisation hydrologique est également différente entre les deux projets. Citons enfin les modèles hydrologiques même si les deux modèles hydrologiques utilisés dans Explore2070 (GR4J et SIM) ont leur équivalent dans Explore2 (GRSD et SIM2).

- Ces différences entre les chaînes hydroclimatiques des deux projets conduisent à des déclinaisons climatiques et hydrologiques différentes des scénarios SRES A1B et RCP 4.5, scénarios pourtant similaires en termes d'émission de GES.
- Le paramétrage de ces modèles hydrologiques, qui peut rendre compte, d'une occupation différente du territoire et leur calage, qui se base sur des chroniques de débits observés, sont différents entre les deux projets (paragraphe 3.5.3 p. 72) ;
- La réanalyse SAFRAN a évolué entre les deux projets puisqu'elle a été alimentée par les observations climatiques réalisées entre les deux projets ;
- L'étude des régimes hydrologiques sur cinq grands bassins versants ne permet pas de conclure sur les grandes tendances sur l'Hexagone ;
- Enfin, seuls les aspects climatiques et hydrologie de surface ont été comparés. L'aspect hydrogéologie n'a pas du tout été abordé dans ce document puisque l'impact sur la ressource en eau souterraine, le rechargement des nappes ou encore le rôle « tampon » des bassins versants en raison de l'assèchement des sols, n'ont pas été considérés dans le cadre de ce stage⁵⁶.

Il convient de rappeler que les projets Explore2070 et Explore2 sont des exercices de simulations et de projections hydroclimatiques à partir de scénarios d'émission de GES. Il ne s'agit en aucun cas de prédire le climat, ni la situation hydrologique à une date donnée : il s'agit de donner des tendances d'évolution à partir d'un ensemble de futurs possibles (ce sont des « projections d'ensemble » à partir de simulations multi-modèles). Ces projections constituent un outil d'aide à la décision auprès des décideurs à différents échelons territoriaux sur la gestion de la ressource dans les décennies à venir. Cette notion de « d'ensemble de projections » est également la raison pour laquelle on regarde la dispersion de ces projections au travers notamment des valeurs médianes (paragraphe 3.1.5 p. 26).

4.1.5 Synthèse

En conclusion, on peut donc retenir de cette partie que :

- Explore2 et Explore2070 sont des exercices de projections et non de prédictions hydroclimatiques. Il s'agit de donner des tendances d'évolution à différentes échéances temporelles. Les projets sont similaires dans leur philosophie (ce sont tous les deux des études d'impact) mais sont différents par les outils et les données disponibles ;
- Les projections hydrologiques sont très dépendantes des scénarios d'émission. Dans le cadre des scénarios RCP, au plus le scénario est émetteur, au plus on observe une tendance à l'assèchement, avec des périodes d'étiages estivaux prolongées, compensée par une fonte nivale sur les zones montagneuses. Dans le cadre du scénario SRES A1B, les simulations associées projettent la plupart du temps des situations hydrologiques plus dégradées que le scénario RCP 8.5, alors que celui-ci est pourtant intermédiaire en termes d'émission GES. On y retrouve cependant des concordances géographiques même si celles-ci diffèrent par leur intensité et la saison concernée. Ces résultats traduisent un fort contraste entre les projections réalisées dans le cadre d'Explore2070 et celles d'Explore2. In fine, les projections d'Explore2070 sont globalement plus chaudes et sèches, ce qui conduit à un état hydrologique plus dégradé.

⁵⁶ Il y a une représentation du souterrain dans les modèles hydrologiques de surface mais ce n'est pas comparable à de la piézométrie. Ces données n'ont donc pas été exploitées.

- Il est impossible de dire si cet assèchement plus important trouve son origine uniquement dans les périodes de référence différentes entre Explore2 et Explore2070 car il est vraisemblable qu'une partie de cet écart soit portée par les scénarios d'émission différents (RCP versus SRES), mais également par les chaînes hydroclimatiques différentes ;
- Qui plus est, ces projections sont associées à des incertitudes diverses et variées en raison d'hypothèses fortes et de simplification dans la modélisation ;
- Enfin, il convient de garder à l'esprit que l'exercice de comparaison des deux projets a été contraint principalement par la disponibilité des données dans un projet ou dans l'autre, que ce soit pour des questions d'agrégations géographiques ou temporelles, de format informatique, de points de simulation à disposition ou encore des variables hydrologiques ou climatiques disponibles et communes aux deux projets.

4.2 Perspectives

Dans la continuité de ce stage, il conviendrait de poursuivre le travail de comparaison avec d'autres variables communes aux projets (comme les PJXA). Cela pointe la nécessité de bien bancariser les données à disposition car ce travail est restreint par les données comparables et disponibles pour les deux projets.

Pour confirmer l'hypothèse que les biais des modèles portent une partie des différences de débit entre les périodes de référence et l'horizon analysé, il conviendrait de comparer les débits observés et simulés au temps présent, notamment au travers le calcul et la comparaison entre projets de nombre adimensionnels comme le critère de Nash, en particulier sur les modèles GR et SIM.

Une analyse plus poussée de comparaison et d'évolution des régimes hydrologiques, entre les périodes de référence et l'horizon temporel 2046-2065, pour les deux projets pourrait être menée, en l'occurrence sur plus de stations, au moyen notamment de la classification et des coefficients de Pardé.

Enfin, une valorisation des résultats obtenus dans le cadre de ce stage, auprès des différentes parties prenantes est envisageable.

V. Conclusion

Ce Travail de Fin d'Études a contribué à comparer les projections hydroclimatiques réalisées dans le cadre du projet Explore2070 (2010-2012) à l'horizon 2046-2065 avec celles réalisées dans le cadre d'Explore2 (2021-2024) afin de déterminer si ces dernières divergent ou non, et ce à l'échelle de la France métropolitaine. Cela a notamment nécessité de se placer à un horizon temporel commun, en l'occurrence 2046-2065, puisque les projections d'Explore2 concernent l'ensemble du XXI^{ème} siècle.

Ces projets, bien que différents sur certains aspects, notamment sur la modélisation hydroclimatique, le nombre de projections et la quantité de données disponibles, sont similaires dans leur philosophie, puisque ce sont tous les deux des études d'impact, à savoir l'impact du changement climatique sur la ressource naturelle en eau.

Ces projections constituent un outil d'aide à la décision pour les décideurs à différents échelons territoriaux dans le déploiement et l'application des différentes politiques publiques en matière de gestion de la ressource, mais n'ont pas vocation à prédire les réponses hydrologiques futures.

Il a été montré dans le cadre de ce rapport, que bien que le scénario d'émission GES SRES A1B (Explore2070), établi dans le cadre de l'AR4 (2007) du GIEC est similaire au scénario d'émission RCP 4.5 (Explore2), établi dans le cadre de l'AR5 (2014), leur implémentation au travers des chaînes hydroclimatiques respectives des deux projets conduisent à des réponses hydroclimatiques différentes, contrastées selon les saisons et les régions.

En effet, les projections sous le scénario SRES A1B sont plus chaudes, globalement plus sèches, et conduisent à des réponses hydrologiques beaucoup plus dégradées que les projections sous le scénario RCP 8.5, qualifié pourtant de scénario pessimiste en matière de changement climatique. Toutefois, les réponses hydrologiques présentent des similitudes, sur certains secteurs géographiques en termes de tendance d'évolution, et font même consensus (sur le sens d'évolution), bien que ces similitudes diffèrent très souvent en matière d'intensité.

Il a été relevé que la différence de période de référence temporelle, à savoir 1961-1990 pour Explore2070 et 1976-2005 pour Explore2, et par conséquent le changement climatique entre ces deux périodes, ne pouvait à lui-seul expliquer ces différences et que celles-ci sont en majorité portées par les modèles climatiques (et les variables climatiques obtenues en sortie de ces derniers) et qu'il y a très probablement un biais issu de la modélisation hydrologique, ce qui pourrait être confirmé en comparant les simulations et observations des chroniques de débits sur les périodes de référence.

La principale limite de ce travail de comparaison a été la disponibilité des données et celle-ci a conditionné les calculs, la comparaison et les analyses réalisées ainsi que la nécessité de se ramener à des échelles temporelles ou spatiales communes. Cela met de plus en exergue l'importance de bien bancaiser les données associées à ces projets.

Enfin, notons que bien que les résultats à horizon 2070 de ces deux projets soient différents avec des similitudes, ils s'inscrivent dans la dynamique des projections réalisées à la fin du siècle dans le cadre d'Explore2.

Bibliographie

- Article L229-26—Code de l'environnement—Légifrance. (2023, mars 12). https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000047303191
- Boudevillain, B., Payraastre, O., & Fromental, A.-M. (2023, 2024). *Cours d'Hydrométéorologie*. ENTPE.
- CERFACS - Code de calcul—Traitement des données climatiques. (2013). Cerfacs. <https://cerfacs.fr/autres-outils-et-logiciels/>
- Chazot, S., Perrin, C., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Chauveau, M., & Rouchy, N. (2012). *Explore 2070—Lot Hydrologie de Surface—A1—Rapport de Synthèse*.
- COP28, sommet de la Terre... 7 questions sur les conférences du climat | *vie-publique.fr*. (2023, novembre 27). <https://www.vie-publique.fr/questions-reponses/272070-cop28-sommet-de-la-terre-7-questions-sur-les-conferences-du-climat>
- De nouvelles normales pour qualifier le climat en France | *Météo-France*. (2022, juin 27). <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/de-nouvelles-normales-pour-qualifier-le-climat-en-france>
- DRIAS, *Les futurs du climat*. (s. d.). Consulté 17 juin 2024, à l'adresse <https://www.drias-climat.fr/>
- DRIAS, *Les futurs du climat—Les scénarios RCP*. (s. d.). Consulté 16 mai 2024, à l'adresse <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>
- Earth's Energy Budget | *My NASA Data*. (2022, octobre 1). [Basic page]. My NASA Data. <https://mynasadata.larc.nasa.gov/basic-page/earths-energy-budget>
- Herrera, E., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (2007). Méthodes de désagrégation appliquées aux Modèles du Climat Global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des sciences de l'eau*, 19(4), 297-312. <https://doi.org/10.7202/014417ar>
- L'effet de serre | *Météo-France*. (2020). <https://meteofrance.com/comprendre-climat/monde/leffet-de-serre>
- Les catastrophes naturelles en France | *Bilan 1982-2022—Catnat—Liferay DXP CCR* (p. 112). (2023). <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/les-catastrophes-naturelles-en-france-%7C-bilan-1982-2022>
- Marson, P., Corre, L., Soubeyroux, J.-M., & Sauquet, E. (2024). *RAPPORT DE SYNTHÈSE SUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES*. Recherche Data Gouv. <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/file.xhtml?persistentId=doi:10.57745/99X4CD>
- Missions et organisation du Sandre | *Sandre—Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau*. (s. d.). Consulté 20 juin 2024, à l'adresse <https://www.sandre.eaufrance.fr/missions-et-organisation-du-sandre>
- MTE - Cahier des charges PAPI 3. (2021). https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Cahier%20des%20charges%20PAPI%203%202021_0.pdf
- Mukherji, A., Thorne, P., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Simpson, N. P., Totin, E., Blok, K., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hermans, T., Ley, D., Lewis, J., Nicholls, Z., ... Yassaa, N. (2023). *SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Pachauri, R., Reisinger, A., & Bernstein, L. (2007). *IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf

- Pourquoi les saisons météorologiques diffèrent-elles des saisons astronomiques ?* (s. d.). Consulté 21 juin 2024, à l'adresse <https://meteofrance.com/magazine/meteo-questions/pourquoi-les-saisons-meteorologiques-different-elles-des-saisons-astronomiques>
- Quels sont les gaz à effet de serre ? – Jean-Marc Jancovici.* (s. d.). Consulté 17 juin 2024, à l'adresse <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>
- Qu'est-ce qu'une COP ?* | *vie-publique.fr.* (2022, octobre 10). <https://www.vie-publique.fr/fiches/274834-quest-ce-quune-cop>
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., & Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Renard, B. (2018). *Probabilités et Statistiques appliquées à l'Hydrologie.*
- Repères de référence géodésiques en France Conversions et transformations de coordonnées.* (2022). IGN. <https://geodesie.ign.fr/contenu/fichiers/documentation/pedagogiques/TransformationsCoordonneesGeodesiques.pdf>
- Reports—IPCC.* (2024). <https://www.ipcc.ch/reports/>
- Sauquet, E., Evin, G., Siauve, S., Bornancin-Plantier, A., Jacquin, N., Arnaud, P., Berel, M., Bernus, S., Bonneau, J., Branger, F., Caballero, Y., Colleoni, F., Collet, L., Corre, L., Drouin, A., Ducharne, A., Fournier, M., Gailhard, J., Habets, F., ... Vrac, M. (2024). *Messages et Enseignements du projet Explore2.*
- Sauquet, E., Strohmenger, L., Thirel, G., & Le Lay, M. (2024, juin 17). *Quelles évolutions des régimes hydrologiques en France hexagonale ?*
- SCHAPI - HydroPortail.* (2024). <https://hydro.eaufrance.fr/>
- Structure of the IPCC.* (2024). <https://www.ipcc.ch/about/structure/>
- Villemin, G. (s. d.). *Calcul de distance avec latitudes et longitudes.* Consulté 19 avril 2024, à l'adresse <http://villemin.gerard.free.fr/aGeograp/Distance.htm>
- WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP).* (2024). <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- Wikhydro.* (s. d.). Consulté 16 avril 2024, à l'adresse <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Portail:Wikhydro>

Annexes

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO AIB D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

Nom **Le Gardon de Saint-Jean à Corbès [Roc Courbe]**

Identifiant Explore2070 **1359**

Code Banque Hydro **V7135010**

Surface du bassin versant **262 km²**

Période d'observation des débits **POD : 1967-1991**

Période de simulation temps présent **PST : 1961-1990**

Période de simulation temps futur **FUT : 2046-2065**

Modèles hydrologiques utilisés **GR4J**

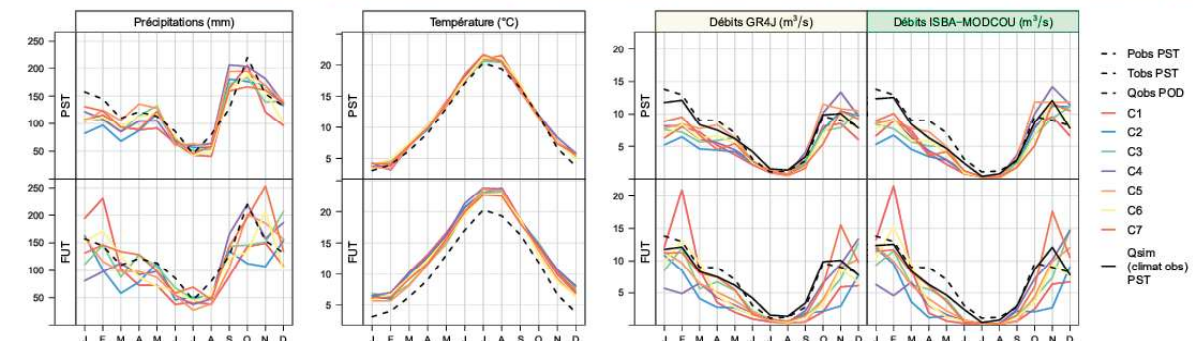
ISBA-MODCOU

Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de Δ entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q. Δ minimum, Δ médian et Δ maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.



CLIMAT													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Précipitations obs PST (mm)	158	145	110	122	113	86	45	80	127	219	154	132	1491
min (%)	-34	-10	-15	-28	-41	-42	-57	-32	-46	-36	-37	-1	-10
Δ med (%)	+45	+19	+9	-12	-20	-16	-7	-11	-22	-20	+10	+12	+1
max (%)	+98	+99	+44	+44	-4	+10	+51	+11	-10	+17	+58	+46	+13
Température obs PST (°C)	3,1	4,0	6,3	9,0	13,1	17,0	20,3	19,3	16,3	11,8	6,6	3,8	10,9
min (°C)	+1,8	+1,7	+1,0	+1,3	+1,2	+1,5	+1,1	+1,6	+1,7	+1,4	+1,2	+0,9	+1,7
Δ med (°C)	+2,3	+2,2	+2,1	+2,0	+1,9	+2,3	+2,3	+2,2	+2,5	+2,6	+2,3	+1,8	+2,2
max (°C)	+2,7	+3,8	+3,3	+3,1	+2,5	+3,1	+2,7	+3,2	+2,9	+3,3	+3,2	+2,2	+2,7
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)	30	34	53	69	90	114	151	126	86	52	35	30	872
min (%)	-9	-1	+13	+8	+8	+12	+3	+2	+18	+25	+5	+6	+11
Δ med (%)	+6	+7	+15	+23	+17	+13	+10	+11	+28	+40	+14	+11	+17
max (%)	+27	+35	+32	+28	+23	+24	+19	+18	+39	+55	+26	+21	+23

DÉBITS																										
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel													
Qobs POD (m ³ /s)	13,8	13	9,02	8,96	7,08	3,04	1,08	1,22	2,78	9,63	9,02	8,2	7,22													
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	12,3	12,9	11,7	12,6	7,78	7,35	5,91	6,66	5,25	3,74	1,88	1,48	0,387	1,09	0,553	3,15	2,75	9,82	8,56	9,09	10,9	8,04	8,14	6,83	6,41	
min (%)	-30	-27	-40	-50	-17	-21	-39	-67	-49	-71	-56	-70	-48	-57	-52	-42	-88	-83	-75	-74	-72	-76	-21	-19	-23	-22
Δ med (%)	+47	+36	+32	+42	+6	+10	-32	-44	-36	-50	-33	-38	-22	-39	-15	-45	-34	-54	-45	-17	-22	+1	+2	-2	+0	
max (%)	+108	+126	+162	+141	+58	+63	+65	+70	+1	-12	-20	-6	-20	+13	-6	-0	-33	-15	+14	+16	+48	+52	+37	+33	+19	+20
Qobs POD (m ³ /s)	2,69	4,51	3,5	4,43	3,21	1,35	0,501	0,396	0,596	1,32	1,98	2,79	4,54													
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	2,86	1,63	3,98	3,69	3,22	1,8	3,81	2,02	2,78	1,04	1,37	0,299	0,705	0,154	0,452	0,168	0,369	0,205	1,06	0,691	1,64	1,09	2,74	2,17	3,99	3,64
min (%)	-20	-40	-10	-13	-20	-34	-30	-59	-44	-67	-49	-45	-42	-38	-46	-33	-68	-66	-72	-70	-64	-69	-46	-46	-21	-16
Δ med (%)	+18	+44	+20	+32	-2	-19	-6	-27	-29	-44	-27	-24	-25	-18	-30	-18	-53	-48	-58	-49	-31	-37	+4	-7	-0	-1
max (%)	+67	+175	+111	+236	+62	+92	+64	+186	+22	-17	-17	+1	-10	-2	-10	+8	-30	-13	-21	+25	+122	+232	+78	+58	+23	+31



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD														
	NSEQ	NSEInQ	NSEQ	R-QA	R-VCN30-2	R-QMNA5	R-QXA10							
	0,84	0,63	0,85	-0,03	0,44	-15,86	0,95	0,89	0,99	0,29	0,81	0,30	0,89	0,41

ÉTIAGES						
	VCN10	VCN30	QMNA			
Qobs POD (m ³ /s)	0,403	0,506	0,591			
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	0,428	0,109	0,5	0,145	0,562	0,195
min (%)	-46	-6	-48	-19	-52	-30
Δ med (%)	-35	-3	-37	-12	-40	-23
max (%)	-20	-2	-22	-8	-21	-5
Qobs POD (m ³ /s)	0,267	0,348	0,396			
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	0,26	0,106	0,294	0,103	0,32	0,119
min (%)	-42	-6	-45	-14	-43	-24
Δ med (%)	-26	-3	-28	-8	-30	-14
max (%)	-19	-2	-20	+2	-17	-0
Qobs POD (m ³ /s)	0,216	0,286	0,322			
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	0,201	0,104	0,223	0,0863	0,239	0,0924
min (%)	-42	-5	-46	-14	-44	-21
Δ med (%)	-29	-3	-30	-6	-30	-9
max (%)	-17	-2	-17	+10	-15	+3

FORTES PRÉCIPITATIONS			
	PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)	102	166	191
min (%)	-13	-1	-9
Δ med (%)	+1	-1	-2
max (%)	+20	+17	+17

CRUES						
	QJXA2	QJXA10	QJXA20			
Qobs POD (m ³ /s)	141	294	352			
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	118	60	262	317	144	
min (%)	-23	-16	-30	-26	-31	-28
Δ med (%)	+24	+12	+14	+1	+12	-0
max (%)	+38	+32	+62	+52	+65	+57

OCCURENCE DES ÉTIAGES		
Qobs POD	sept.	
Qsim (climat obs) POD	sept.	août
min (jours)	-4	-22
Δ med (jours)	+8	-6
max (jours)	+20	+14

DÉBITS CLASSÉS				
	Q95	Q10		
Qobs POD (m ³ /s)	0,419	16		
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	0,352	0,11	14	20
min (%)	-45	-9	-24	-21
Δ med (%)	-32	+0	+0	+5
max (%)	-17	+0	+30	+19

OCCURENCE DES CRUES		
Qobs POD	janv.	
Qsim (climat obs) POD	janv.	déc.
min (jours)	-30	-41
Δ med (jours)	+16	+20
max (jours)	+32	+41

7.6 Distribution log-normale

Utilisée pour une variable aléatoire réelle Y strictement positive. Appelée aussi loi de Galton.

Notation : $Y \sim \text{LogN}(\mu, \sigma)$

Paramètres : log-moyenne μ (correspond à l'espérance de $\log(Y)$)

Log-écart-type $\sigma > 0$ (correspond à l'écart-type de $\log(Y)$)

Densité de probabilité: $f(y) = \frac{1}{y\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{\log(y) - \mu}{\sigma}\right]^2\right]$

Fonction de répartition: $F(y) = \int_{-\infty}^y f(x)dx$ (pas d'expression analytique)

Fonction quantile: $q(p) = F^{-1}(p)$ (pas d'expression analytique)

Espérance / variance : $E(Y) = e^{\mu + \sigma^2/2}$; $Var(Y) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}$

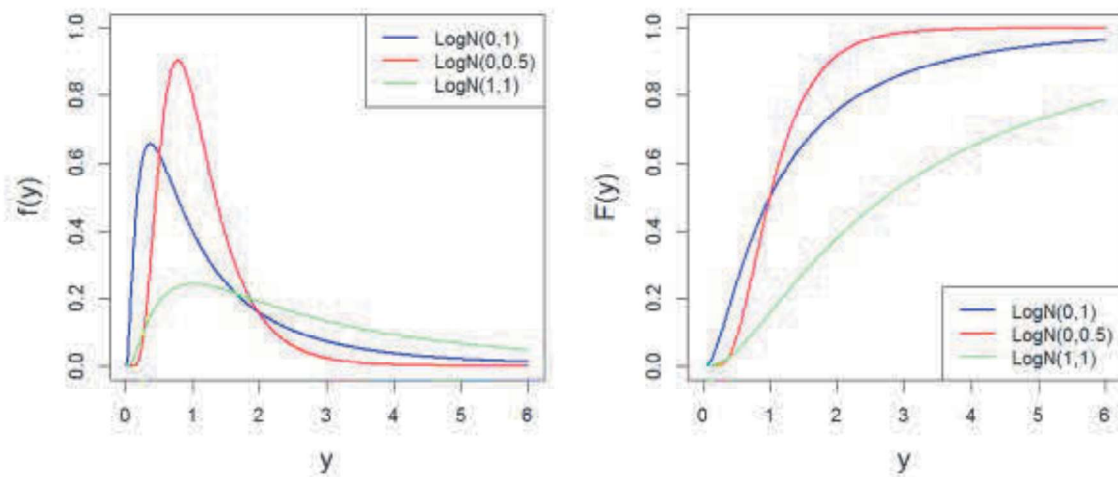


Figure 7-6. Exemples de densités (gauche) et de fonctions de répartition (droite) pour la distribution log-normale.

7.8 Distribution de Gumbel

Utilisée pour une variable aléatoire réelle Y .

Notation : $Y \sim Gu(\mu, \lambda)$

Paramètres : paramètre de position μ

Paramètre d'échelle $\lambda > 0$

Densité de probabilité: $f(y) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{y-\mu}{\lambda} - \exp\left(-\frac{y-\mu}{\lambda}\right)\right)$

Fonction de répartition: $F(y) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{y-\mu}{\lambda}\right)\right)$

Fonction quantile: $q(p) = \mu - \lambda \log(-\log(p))$

$E(Y) = \mu + \gamma\lambda$, avec $\gamma \approx 0.5772$ (constante d'Euler-Mascheroni)

Espérance / variance : $Var(Y) = \frac{\pi^2}{6} \lambda^2$

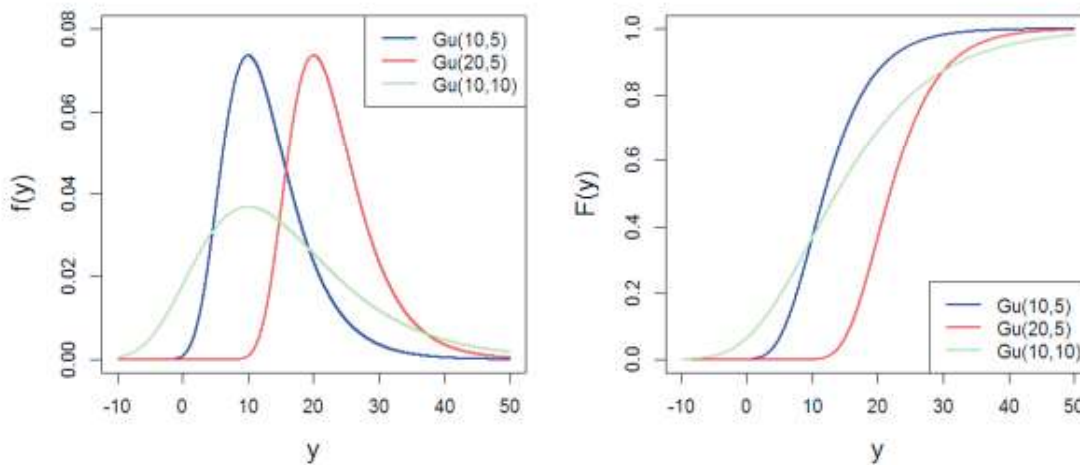


Figure 7-8. Exemples de densités (gauche) et de fonctions de répartition (droite) pour la distribution de Gumbel.

Estimateurs usuels via la méthode des moments :

- \bar{y} désigne la moyenne empirique de la série sur laquelle l'ajustement est effectué.
- S_y désigne l'écart-type empirique de cette même série.

Loi Log Normale (QMNA) :

- $\hat{\mu} = \log(\bar{y}) - \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{S_y^2}{\bar{y}^2}\right)$ (Log moyenne ou moyenne de $\log(Y)$)
- $\hat{\sigma} = \sqrt{\log\left(1 + \frac{S_y^2}{\bar{y}^2}\right)}$ (Écart type de $\log(Y)$)

Loi Gumbel (QJXA) :

- $\hat{\lambda} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_y$ (paramètre d'échelle)
- $\hat{\mu} = \bar{y} - \gamma \cdot \hat{\lambda}$ où $\gamma = 0.5772$ (paramètre de position)

Annexe 4 - Estimateurs usuels des lois log normale & Gumbel (Renard, 2018)