



Rapport final du projet MOSARH21

Evolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en
contexte de changement climatique.

Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5^e rapport du GIEC

Thirel Guillaume, avec la participation de Kai Gerlinger, Charles Perrin, Gilles Drogue, Benjamin Renard et Jean-Pierre Wagner

16/11/2017

Résumé

Le projet MOSARH21 (Moselle-Sarre-Rhin au 21^e siècle) a eu pour objectif d'évaluer les impacts futurs des changements climatiques sur les débits des affluents français du Rhin. Pour cela, les dernières simulations climatiques disponibles produites dans le cadre du 5^e rapport d'évaluation (AR5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont été utilisées. La démarche s'appuie sur une approche multi-modèles (exploitant deux modèles hydrologiques, GRSD et LARSIM), qui est utilisée conjointement avec un ensemble de projections climatiques désagrégées statistiquement à l'échelle d'intérêt. Les impacts sont quantifiés à l'aide de divers indicateurs relatifs au régime des cours d'eau, aux crues et aux étiages. Une attention particulière est donnée à la quantification des incertitudes associées à la chaîne de modélisation.

Ce projet a montré que dans le cadre des projections climatiques issues de l'AR5, l'incertitude vient principalement des modèles climatiques et des scénarios radiatifs RCP. L'incertitude liée à l'échantillonnage semble d'un second ordre, alors que l'incertitude liée aux modèles hydrologiques semble faible.

Les évolutions des débits moyens indiquent une légère augmentation des débits moyens annuels, qui pourrait même devenir importante pour le scénario radiatif RCP 8.5 (amplement du réchauffement climatique). L'aléa de crue s'intensifie dans un futur proche (2021-2050). En revanche, dans un futur plus lointain (2071-2100), l'évolution des indicateurs de crue est très incertaine, les projections hydrologiques étant divergentes. Les débits d'étiages seraient à la baisse dans le futur proche. Leur évolution dans le futur lointain est également plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible.

Les résultats ont été comparés à ceux obtenus dans le cadre d'études d'impact antérieures réalisées sur le bassin (FLOW MS et Explore 2070). Compte tenu des différences méthodologiques et des résultats obtenus, on peut conclure que les études précédentes sont cohérentes avec les résultats obtenus dans le projet MOSARH 21.

Ce projet propose également des fiches représentant les évolutions climatiques attendues ainsi que leurs effets sur le régime, les crues et les étiages pour chacune des stations hydrométriques de la zone d'étude. Le présent rapport a pour objet de présenter de manière synthétique la méthodologie de travail et les résultats de ce projet.

Contenu

1.	Introduction.....	4
2.	Etudes antérieures	7
2.1.	Projet Rheinblick2050	8
2.2.	Projet VULNAR.....	8
2.3.	Projet Explore 2070	8
2.4.	Projet FLOW MS	9
2.5.	Travaux de Nicolas (2014)	9
2.6.	Thèse de Dayon (2015).....	10
3.	Zone d'étude, données et indicateurs hydrologiques.....	11
3.1.	Les bassins versants de la Moselle, de la Sarre et du Rhin.....	11
3.2.	Les données hydrométriques	12
3.3.	Les données climatiques sur la période de référence.....	13
3.4.	Les données climatiques disponibles en projection.....	14
3.5.	Les indicateurs hydrologiques	18
3.6.	Modèles hydrologiques	19
3.6.1.	Les critères d'évaluation ou de calage des modèles	19
3.6.2.	Le modèle semi-distribué conceptuel GRSD (Irstea).....	20
3.6.3.	Le modèle distribué à base physique LARSIM (HYDRON)	22
3.6.4.	Performance hydrologique des deux modèles.....	24
3.7.	Méthodologie	24
4.	Projections climatiques sur la zone d'étude du projet MOSARH21.....	26
4.1.	Scénarios SRES (AR4).....	26
4.2.	Scénarios RCP (AR5) CNRM2014 et IPSL2014	33
4.3.	Scénarios RCP (AR5) issus de l'Advanced Delta Change.....	38
4.4.	Résumé des résultats pour l'AR5.....	38
5.	Projections hydrologiques.....	40
5.1.	Evolution des débits futurs (module, crues et étiages).....	40
5.1.1.	Analyse conjointe de toutes les stations hydrométriques	40
5.1.2.	Analyse spatiale.....	42
5.2.	Evolution des régimes et fiches synthétiques	53
5.3.	Incertitudes liées au calage des modèles hydrologiques	57
5.4.	Incertitudes sur les calculs des indicateurs	58
6.	Comparaison aux projets antérieurs	66

7. Conclusions et perspectives	70
8. Communications et valorisations relatives au projet MOSARH21	72
9. Références.....	73
10. Annexes	75

1. Introduction

Le bassin versant du Rhin s'étend sur un peu moins de 200 000 km². Ce bassin a un rôle primordial à l'échelle européenne en termes de ressources en eau et de navigation, car il traverse de nombreux pays : Autriche, Liechtenstein, Italie, Suisse, Allemagne, France, Belgique, Luxembourg et Pays-Bas (Figure 1). Sa partie amont, située dans les Alpes, constitue un château d'eau alimentant l'aval du bassin, grâce à des précipitations abondantes, des stocks de neige et de glace alimentant l'écoulement au printemps et en été et de grands barrages situés dans la partie alpine. Le cours du Rhin est navigable jusqu'en Suisse, avec une douzaine de barrages de navigation le long de son cours. Malgré les ouvrages de régulation, ce bassin transfrontalier est impacté par les événements extrêmes, avec notamment des événements d'inondations présentant des enjeux socio-économiques forts au niveau des agglomérations. La Commission internationale de protection du Rhin (www.iksr.org/fr) permet de coordonner les efforts des pays riverains dans le domaine de la prévention des inondations et de la restauration de l'écosystème.



Figure 1 : Le bassin versant du Rhin. Par BS Encyclopédie <http://www.encyclopedie.bsditions.fr/article.php?pArticleId=11&pChapitreId=36132&pArticleLib=Introduction+%5BLe+Rhin%5D>

Le changement climatique impacte à la fois les températures et les précipitations, c'est-à-dire les deux facteurs climatiques ayant un impact de premier ordre sur régulant les débits des rivières. Cela

peut se répercuter, selon la rivière et la région, par des modifications de régimes de précipitations, par des précipitations neigeuses moins abondantes et par une fonte du manteau neigeux plus précoce. Ces facteurs peuvent modifier à la fois la ressource en eau, le régime des rivières et les aléas de crues et d'étiages.

La déclinaison de ce constat global à l'échelle locale ou régionale reste cependant délicate et entachée de fortes incertitudes, en raison notamment des difficultés à appréhender l'évolution fine des variables climatiques, mais également du caractère fortement non linéaire de la relation entre évolutions climatiques et hydrologiques. De simples analyses statistiques ne permettent pas d'établir des conclusions directes entre les variations des variables climatiques et les modifications du régime hydrologique de cours d'eau tels que ceux du bassin Moselle-Sarre ou des affluents du Rhin. Il est donc nécessaire de réaliser des modélisations du fonctionnement hydrologique des bassins versants en utilisant des scénarios climatiques futurs pour estimer l'impact potentiel du changement climatique.

Plusieurs études de ce type ont déjà été réalisées à ce jour pour les cours d'eau de la partie française du bassin du Rhin. L'expression « les affluents français du Rhin » utilisée par la suite se réfère à la partie française de la Moselle, à la partie française de la Sarre et aux affluents du côté français du Rhin formant la frontière avec l'Allemagne (Ill, Moder et Sauer). Ces études montrent globalement des évolutions plutôt à la baisse de la ressource et des étiages, et des évolutions incertaines sur les crues. Mais elles exploitent des outils de modélisation et se basent sur des hypothèses (scénarios et projections climatiques notamment) différentes, rendant les résultats délicats à comparer.

Ces études étaient basées sur des scénarios et projections climatiques issues du 4^e rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat (GIEC ou IPCC en anglais). Cependant, un 5^e rapport a mis à jour ces travaux : nous disposons désormais de scénarios et projections plus précis (IPCC, 2013¹). Par ailleurs, les modèles climatiques utilisés ont été améliorés par les équipes internationales de recherche sur le climat. Nous proposons donc dans le cadre du projet MOSARH21 (Moselle-Sarre-Rhin au 21^e siècle) de mettre à jour les projections hydrologiques sur les affluents français du Rhin en utilisant des projections climatiques plus récentes.

Pour cela, nous avons mis en œuvre une chaîne de modélisation classiquement utilisée dans les études d'impact hydrologique du changement climatique anthropique :

- des scénarios radiatifs ont été utilisés pour forcer des modèles climatiques,
- des méthodes de descente d'échelle ont été utilisées pour affiner la résolution spatiale de leurs projections,
- des modèles hydrologiques ont transformé ces projections climatiques en projections hydrologiques,
- et ces dernières ont été analysées grâce à des indicateurs.

Afin de ne pas négliger les incertitudes présentes à chaque étape, nous avons utilisé pour chacune d'elles plusieurs variantes (scénarios radiatifs, modèles climatiques, descente d'échelle, modèles hydrologiques et leurs calages). Les deux modèles hydrologiques utilisés, GRSD et LARSIM, ont été choisis car ils ont déjà été utilisés sur la zone d'étude pour des applications de changement

¹ <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>

climatique et de prévision de crues. Les résultats obtenus avec ces nouvelles projections ont été discutés par rapport à ceux obtenus dans le cadre des projets précédents.

Le présent rapport synthétise l'ensemble de la démarche adoptée et des résultats obtenus dans le cadre du projet MOSARH21. Dans la suite, nous présentons successivement un résumé des études antérieures, les données et les outils de modélisation utilisés, et les résultats détaillés des impacts sur le climat et l'hydrologie de la zone d'étude. Sont joints à ce rapport un second rapport complémentaire sur les travaux de calage des modèles hydrologiques (Annexe B), ainsi que les articles produits pendant le projet. Par ailleurs, trois types de fiches ont été réalisées pour chaque station hydrométrique du projet : pour le climat, pour les crues et pour les étiages.

2. Etudes antérieures

Dans cette section, plusieurs projets ayant étudié dans le passé l'impact du changement climatique sur les débits dans une zone comprenant la partie française du bassin du Rhin seront passés en revue (Tableau 1). Nous nous attacherons à donner les caractéristiques techniques des chaînes de modélisation mises en place, ainsi qu'à résumer brièvement les résultats de ces projets.

Tableau 1 : Résumé des caractéristiques des projets antérieurs ayant étudié l'impact du changement climatique futur sur les affluents français du Rhin avec les scénarios AR4 (MCG : modèle de circulation générale).

Projet	Rheinblick2050	VULNAR	Explore 2070	FLOW MS
Référence	Görgen et al. (2010)	Thierion et al. (2012)	Chauveau et al. (2013)	CIPMS (2013)
Dates du projet	2008-2010	2008-2011	2010-2012	2009-2013
Scénario d'émission de gaz à effet de serre	AR4 A1B	AR4 A1B, A2 and B1	AR4 A1B	AR4 A1B
Nombre de MCG	2	7	7	1
Méthode de descente d'échelle	Modèles climatiques régionaux	Approche statistique par type de temps [Boé et al., 2007]	Approche statistique par type de temps [Boé et al., 2007]	Modèle climatique régional
Modèle(s) hydrologique(s)	HBV (Bergström, 1976)	MODCOU (Ledoux et al., 1989) et HPP-inv (Lecluse, 2014)	GR4J (Perrin et al., 2003) et Isba-Modcou (Habets et al., 2008)	LARSIM (Ludwig et Bremicker, 2006)
Période de référence	1961-1990	1961-2000	1961-1990	1971-2000
Période(s) de projection	2021-2050 et 2071-2100	2046-2065 et 2081-2099	2046-2065	2021-2050

Des premières projections hydrologiques ont été réalisées sur la France entière, et donc sur la zone d'étude, avec les dernières projections climatiques AR5 par Nicolas (2014) puis par Dayon (2015) (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Résumé des caractéristiques des projets antérieurs ayant étudié l'impact du changement climatique futur sur les affluents français du Rhin avec les scénarios AR5.

Référence	Nicolas (2014)	Dayon (2015)
Scénarios radiatifs	AR5 RCP2.6 et 8.5	AR5 RCP2.6, 4.5, 6.0 et 8.5
Nombre de MCG	19 et 25, resp.	Entre 5 et 9
Méthode de descente d'échelle	Approche statistique (Advanced Delta Change)	Approche statistique par type de temps
Modèle hydrologique	GR4J (Perrin et al, 2003)	Isba-Modcou (Habets et al., 2008)
Période de référence	1971-2000	1960-1990
Période(s) de projection	2021-2050 et 2071-2100	2035-2065 et 2070-2100

2.1. Projet Rheinblick2050

Le projet Rheinblick2050 s'est déroulé sur la période 2008-2010 et a été réalisé à la demande de la Commission hydrologique du Rhin (CHR). L'objectif de ce projet était d'estimer les impacts du changement climatique futur sur les débits du Rhin et de deux de ses affluents (le Main et la Moselle). Ce projet a associé des institutions françaises, néerlandaises, suisses, luxembourgeoises et allemandes (Görger et al., 2010). Les caractéristiques de l'exercice de modélisation réalisé dans le cadre de Rheinblick2050 sont données dans le Tableau 1.

Les projections climatiques utilisées dans ce projet indiquent une augmentation des températures de l'ordre de 2.5°C sur la zone d'étude pour le futur proche et des 2.5 à 5.0°C pour le futur lointain. En revanche, il est peu probable que les précipitations moyennes changent significativement dans le futur proche, alors qu'elles devraient augmenter l'hiver et décroître l'été dans un futur plus lointain. Une légère augmentation des débits moyens est projetée pour le futur proche, alors que pour le futur lointain des changements opposés sont attendus entre l'hiver et l'été, en accord avec les changements projetés pour les précipitations et une modification des dynamiques nivales. Les étiages ont fait l'objet d'un intérêt spécifique par le biais du calcul du débit minimal annuel moyen sur une période de 7 jours consécutifs. L'unique changement notable pour les bas débits concernerait une augmentation pendant les hivers du futur proche, et une diminution pendant les étés de la fin du XXI^e siècle. Les estimations des hauts débits, basées sur une approche du type générateur de pluie, n'a pas abouti à l'identification de tendances significatives à cause d'incertitudes importantes.

2.2. Projet VULNAR

Ce projet a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) entre 2008 et 2012 (<http://www.cnrn.meteo.fr/spip.php?article278> ; Thierion et al., 2012). Son but était d'étudier les effets du changement climatique sur la nappe du Rhin supérieur (voir Tableau 1).

Une augmentation de la température de 3°C ainsi qu'une diminution des précipitations d'environ 15% sont attendues en comparaison à une période de référence définie entre 1961 et 1990. De plus, une diminution des précipitations neigeuses de l'ordre de 70% est anticipée. L'impact du changement climatique sur les niveaux de la nappe du Rhin supérieur est faible, avec une faible augmentation de l'infiltration en provenance des rivières et une diminution de la recharge en eau moyenne.

2.3. Projet Explore 2070

Dans ce projet, financé par le ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, l'impact potentiel du changement climatique sur les débits a été étudié à l'échelle nationale [Chauveau et al., 2013]. Les modèles Isba-Modcou et GR4J ont été appliqués sur un échantillon commun de 543 stations de mesure du débit en France, tout d'abord en étant forcés par des observations météorologiques, puis par des projections climatiques [Chauveau et al., 2013] comme on peut le voir dans le Tableau 1.

Une augmentation de la température de l'air dans le futur (2046-2065) de 1.4 à 3°C constitue le résultat le plus robuste de ces projections pour la France. En ce qui concerne les précipitations, les tendances sont incertaines mais pourraient montrer une diminution d'environ 20% l'été. Aucune tendance ne se dégage pour le reste de l'année. Sur les bassins communs à l'étude MOSARH21, les

deux modèles hydrologiques prédisent une diminution d'environ 10% des débits annuels pour la Moselle et la Sarre, et d'environ 20% pour le reste des affluents du Rhin. Il est prévu que les bas débits diminuent significativement pour tous les affluents du Rhin mais les intensités sont différentes pour les deux modèles : environ 20% pour Isba-Modcou et jusqu'à 60% pour GR4J. Cette différence montre l'utilité d'adopter une approche multi-modèles pour mieux quantifier l'incertitude issue de la modélisation hydrologique. Enfin, le signe de l'évolution des crues est très incertain, ce qui peut être directement lié au possible changement des précipitations l'hiver (saison pluvieuse) dont le signe est lui aussi incertain. Les crues pourraient légèrement augmenter pour la Moselle et la Sarre, et légèrement diminuer pour les autres affluents du Rhin, mais la dispersion des résultats est grande. Les indicateurs utilisés dans ce projet sont principalement le débit mensuel minimum annuel de période de retour 5 ans (QMNA5), et le débit journalier maximum annuel de période de retour 10 ans (QJXA10).

2.4. Projet FLOW MS

Le projet "Floods and low flows management of the Moselle and Sarre basins – FLOW MS" a commencé en 2009 et était coordonné par la Commission Internationale pour la protection de la Moselle et de la Sarre (CIPMS). FLOW MS a associé des équipes françaises, luxembourgeoises et allemandes. La chaîne de modélisation a été mise en place comme cela est décrit dans le Tableau 1. La zone d'étude de ce projet est le bassin de la Moselle, incluant sa partie luxembourgeoise et allemande, jusqu'à sa confluence avec le Rhin à Coblenz. Un échantillon de 37 stations hydrométrique a été choisi.

Les projections climatiques indiquent une augmentation de la température de 1°C d'ici 2050 sur le bassin, avec des étés plus secs et des hivers plus humides. D'un point de vue hydrologique, le projet FLOW MS conclut à des étés aux bas débits probablement plus faibles et à une augmentation significative des crues pendant l'hiver. Les indicateurs utilisés pour ce projet sont principalement basés sur des valeurs de débits moyens, minimum et maximums mensuels.

Comme on peut le voir dans le Tableau 1, les projections hydrologiques réalisées lors de ces quatre projets diffèrent grandement dans leur mise en œuvre : les MCG (Modèle de Circulation Générale), les méthodes de descente d'échelle, les modèles hydrologiques ainsi que les périodes de référence et de projection sont différents. De plus, les indicateurs utilisés pour estimer l'évolution des débits est très différent selon les projets. Par conséquent, le présent projet, MOSARH21, est nécessaire, à la fois pour mettre à jour ces résultats, mais aussi pour homogénéiser les projections hydrologiques et les critères (indicateurs, période de projection, etc.).

Une augmentation des températures de l'ordre de 1°C et une diminution des précipitations en été ainsi qu'une augmentation en hiver, ont été mis en évidence. Les étiages hivernaux sont évalués à la hausse et les étiages estivaux à la baisse. Les crues hivernales sont estimées à la hausse tandis que les crues estivales sont stables.

2.5. Travaux de Nicolas (2014)

Madeleine Nicolas a effectué un stage de Master à Irstea Antony en 2014. Elle devait utiliser le package R Advanced Delta Change (van Pelt et al., 2012) pour produire des projections climatiques à partir d'une méthode statistique à l'échelle de la France. Ces projections sont issues des Representative Concentration Pathways (RCP). Les résultats n'ont pas fait l'objet d'une

différenciation entre les différents RCP. La température de la zone de MOSARH 21 montre une augmentation de 1.5 à 2°C en futur proche à plus de 3°C en futur lointain. Les précipitations moyennes quant à elles semblent augmenter quel que soit le scénario. L'impact sur les débits, simulé avec le modèle conceptuel global GR4J, semble contrasté en termes de débits moyens annuels, mais indique une diminution conséquente du QMNA5 probable ainsi qu'une augmentation modérée du QJXA10.

2.6.Thèse de Dayon (2015)

Gildas Dayon a effectué son doctorat au CERFACS (2012-2015). Il a utilisé une méthode proche de celle de Boé et al. (2007) sur les scénarios radiatifs RCP. Ces scénarios ont par la suite été fournis au modèle à base physique Isba-Modcou.

Les projections climatiques montrent pour notre zone d'étude une légère augmentation des précipitations en hiver et une légère diminution en été, cette dernière étant plus marquée avec les scénarios RCP les plus pessimistes (RCP 6.0 et 8.5). Cela se reflète en termes de débits moyens en futur proche par une stagnation en hiver et une diminution en été, cette dernière étant plus marquée avec les scénarios RCP les plus pessimistes. Pour le futur lointain, une légère augmentation des débits hivernaux pourrait être observée, avec une diminution encore plus forte des débits estivaux. Les QMNA5 seraient alors en diminution forte et les QJXA10 en augmentation légère en futur lointain.

3. Zone d'étude, données et indicateurs hydrologiques

3.1. Les bassins versants de la Moselle, de la Sarre et du Rhin

Dans ce projet, nous nous intéressons à la partie française du Rhin. Par cette délimitation hydrographique, il faut comprendre les affluents du Rhin s'écoulant en France, à savoir la Moselle, la Sarre, ainsi que les affluents vosgiens rive gauche du Rhin. Nous n'incluons pas dans notre zone d'étude le Rhin en lui-même, dont les affluents en Allemagne et en Suisse sont trop prépondérants. Leur étude aurait nécessité de lourds efforts en termes de mise en place et d'homogénéisation de base de données climatiques. La zone d'étude est représentée sur la Figure 2. Il est important de noter la présence de deux affluents qui s'écoulent partiellement en Allemagne, à savoir la Lauter et la Blies.

Le climat de la zone d'étude est océanique dégradé, à influence continentale, et montagnard sur le massif des Vosges. Globalement, cette zone géographique est humide, en particulier dans les Vosges, et l'enneigement peut être important tout en ayant un rôle hydrologique très modéré à l'échelle d'intérêt.

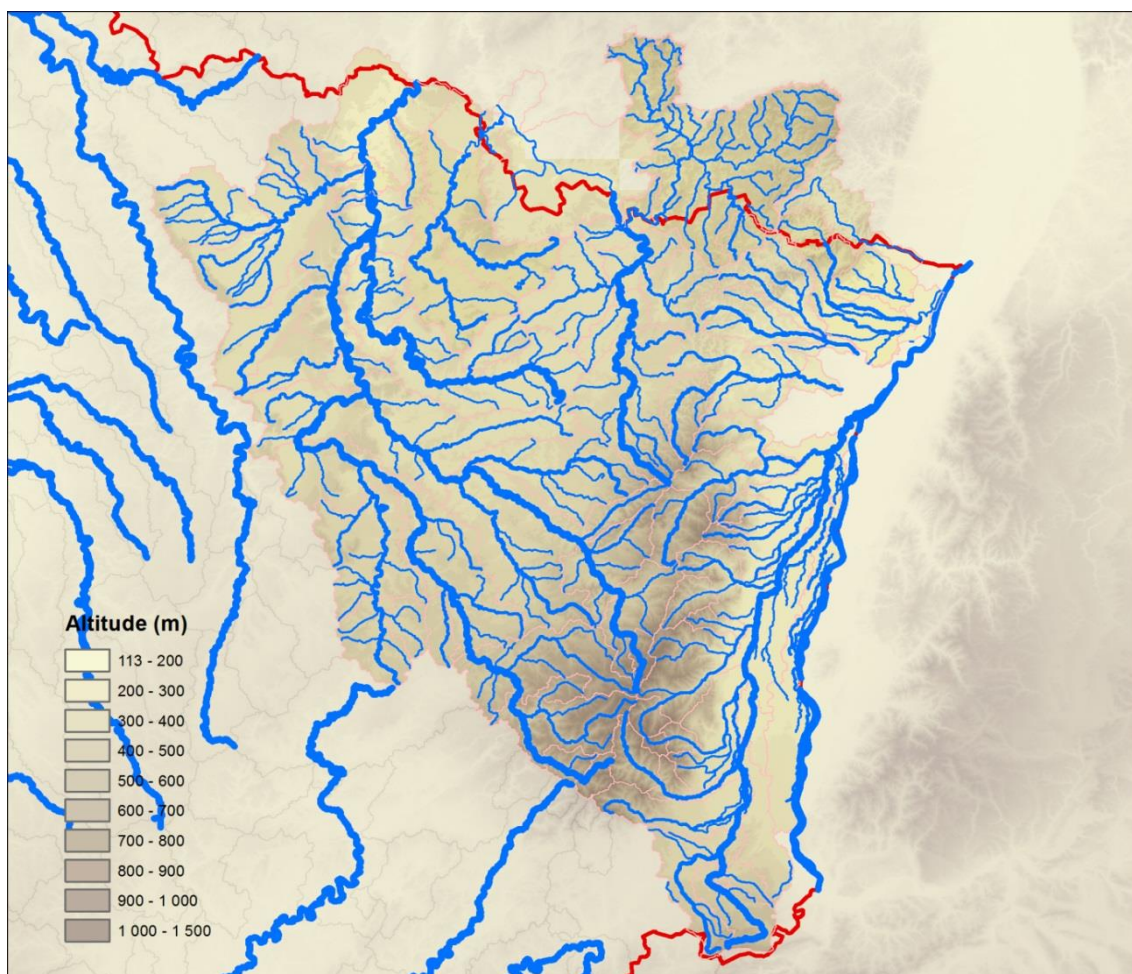


Figure 2 : Carte de la zone d'étude du projet MOSARH21.

3.2. Les données hydrométriques

Les données hydrométriques sont le carburant des modèles hydrologiques de surface (nous décrivons les modèles utilisés ultérieurement). Le choix a été fait d'implémenter des modélisations distribuées (avec LARSIM, voir partie 3.6.3) ou semi-distribuées (avec GRSD, voir partie 3.6.3.2). Ce choix implique de disposer de données de débits de bonne qualité, suffisamment bien réparties sur la zone d'étude, et si possible correspondant à des stations utilisées lors des études antérieures. De plus, il est nécessaire de disposer de chroniques d'une longueur suffisante ainsi que de données pas ou peu influencées, les modèles hydrologiques utilisés ne pouvant pas prendre en compte les influences d'origine humaine (éclusées, prélèvement, etc.). L'objectif est de disposer de données sur la période 1970-2000, qui servira de période de référence.

Une des premières tâches de ce projet a donc consisté à identifier des stations de mesure disposant de chroniques de débits respectant les critères précités. Une extraction de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) réalisée par Irstea a permis d'identifier des stations hydrométriques ayant une profondeur d'archive suffisante ainsi qu'une bonne qualité. L'expertise apportée par les experts locaux (Gilles Drogue, Jean-Pierre Wagner) a aussi permis de disposer d'informations complémentaires sur d'éventuelles influences sur les bassins visés. Afin de disposer d'une couverture suffisante de la zone d'étude, il a cependant été nécessaire de conserver certaines stations influencées. Il conviendra de garder cela présent à l'esprit lors de l'analyse des résultats.

GRSD peut facilement être mis en œuvre sur l'ensemble des stations. En revanche, l'utilisation de multiples stations pour caler LARSIM est plus difficile. Il a été convenu de produire des sorties avec LARSIM sur l'ensemble des stations, mais que seul un nombre limité d'entre elles seraient utilisées pour le calage. De plus, les stations non utilisées pour le calage ne feraient pas forcément l'objet d'une analyse approfondie. Nous avons donc réparti les stations en quatre catégories :

- Catégorie 1 : 22 stations pour lesquelles les deux modèles sont calés et les sorties analysées ;
- Catégorie 2 : 26 stations qui ont un intérêt pour le suivi des étiages ou des crues mais pour lesquelles seul GRSD est calé ;
- Catégories 3 et 4 : 22 stations qui n'ont pas un intérêt particulier si ce n'est de bien discrétiser le bassin ou ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée.

Toutes ces stations sont représentées sur la Figure 3 et sont détaillées dans l'Annexe A.

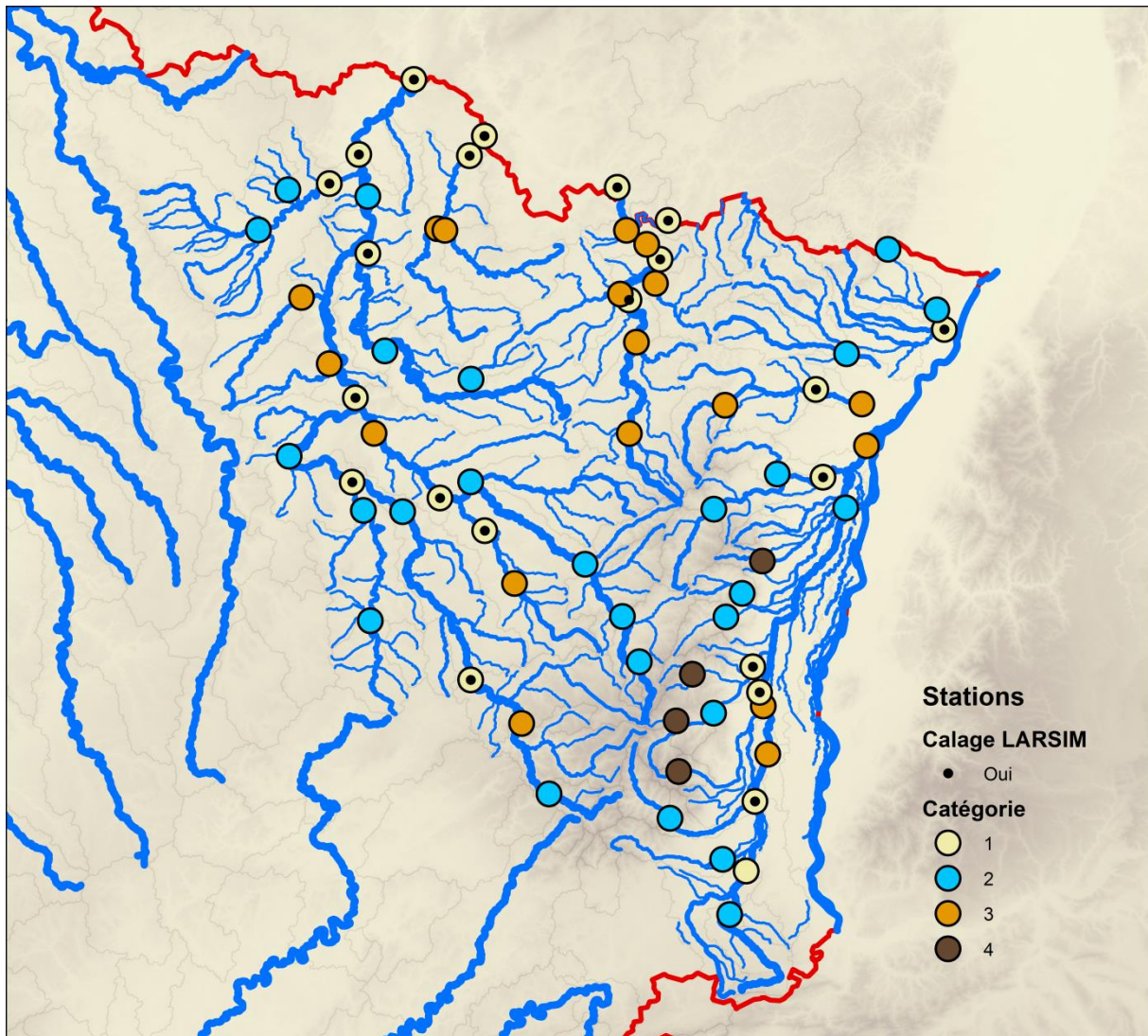


Figure 3 : Carte des stations utilisées dans MOSARH21, représentées selon la catégorie (1 à 4) à laquelle elles appartiennent. Voir ci-dessus pour la définition des catégories de stations.

3.3. Les données climatiques sur la période de référence

Deux jeux de données d'observations sont utilisés dans ce projet :

- SAFRAN² (Vidal et al., 2010) est une ré-analyse atmosphérique produite par Météo-France qui fournit des variables à un pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 8x8 km sur la France entière. Les variables disponibles sont : la précipitation liquide, la neige, la température de l'air moyenne, l'humidité spécifique, la vitesse du vent, et les radiations solaire et infrarouge. Les données étaient disponibles pour le projet de 1958 à 2013.
- HYRAS³ (Rauthe et al., 2013) est une base de données couvrant l'Allemagne ainsi que les bassins versants des pays voisins qui coulent en Allemagne, à une résolution de 5x5 km. Les données disponibles sont les précipitations, la température et l'humidité spécifique⁴.

² Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

³ HYRAS (HYdrologische RASterdaten)

⁴ [https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/download/rauthe_hyras_pdf.pdf? blob=publicationFile&v=](https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/download/rauthe_hyras_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=)

Une comparaison de ces deux jeux de données sur quelques bassins a montré une bonne correspondance des précipitations et températures moyennes et saisonnières. Nous avons donc pu utiliser SAFRAN pour LARSIM, ainsi que pour GRSD. Seul le modèle LARSIM calé manuellement sur la Moselle a utilisé les données HYRAS.

3.4. Les données climatiques disponibles en projection

Afin de réaliser les projections hydrologiques, plusieurs jeux de données de projections climatiques, provenant à la fois de l'exercice du Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) du GIEC (Assessment Report 4 - AR4) et du tout dernier exercice CMIP5 (AR5), ont été utilisés. Ces jeux de données sont présentés dans le Tableau 3 et la Figure 4.

Tableau 3 : Résumé des sources de données utilisées pour construire les projections climatiques de MOSARH21. (RCP : Representative Concentration Pathway)

Nom des projections	SCRATCH 08	COSMO-CLM	CNRM2014 IPSL2014	et	ADC
Origine du jeu de données	Explore 2070	Flow MS	Drias AR5		Advanced-Delta Change (package R)
Scénarios radiatifs	AR4 A1B	AR4 A1B	AR5 RCP 2.6, 4.5 & 8.5		AR5 RCP 2.6, 4.5, 6.0 & 8.5
Nombre de MCG	6	1	2		de 3 à 4 ⁵
Méthode de descente d'échelle	Approche statistique basée sur les types de temps	Modèle climatique régional	Modèles climatiques régionaux		Méthode statistique
Débiaisage	-	Linear scaling & quantile-quantile	Méthode « Distribution fitting »		-
Résolution spatiale	8x8 km	7x7 km	8x8 km		8x8 km
Période de référence dans MOSARH21	1971-2000	1971-2000	1971-2000		1971-2000
Période(s) future(s) dans MOSARH21	2046-2065	2021-2050	2021-2050 et 2071-2100		2021-2050 et 2071-2100

⁵ Seuls 3 à 4 projections ont été utilisées pour les projections hydrologiques de ce rapport et dans les fiches. En revanche, en ce qui concerne les projections climatiques, un ensemble plus important de MCG (de 15 à 26) est utilisé.

Projet	Rapport du GIEC	Scenarios	GCM	MDE	Débiaisage	GRSD			LARSIM							
						Période PST	Période 1 TFUT	Période 2 TFUT	Période PST	Période 1 TFUT	Période 2 TFUT					
<i>Explore 2070</i>	AR4	A1B	CCCMA-CGCM3	SCRATCH08	-	1961-1990	2045-2065	-	1961-1990	2045-2065	-					
			ECHAM5-MPI													
			CNRM-CM3													
			GFDL-CM2.1													
			GISS-MODEL-ER													
MRI-CGCM2.3.2																
<i>FLOW-MS Alsace</i>	AR4	A1B	ECHAM5-MPI	COSMO-CLM	linear-scaling quantile- quantile	1971-2000	2021-2050	-	1971-2000	2021-2050	-					
<i>FLOW-MS Moselle-Sarre</i>	AR4	A1B	ECHAM5-MPI	COSMO-CLM	linear-scaling quantile- quantile	1971-2000	2021-2050	-	1971-2000	2021-2050	-					
<i>Méthode ADC</i>	AR5	RCP2.5	CNRM-CM5	Advanced Delta Change		1971-2005	2021-2050	2071-2100	-	-	-					
		RCP4.5														
		RCP8.5														
		RCP4.5	IPSL-CM5B-LR													
		RCP8.5														
		RCP2.5	GFDL-CM3													
		RCP8.5														
		RCP4.5	GISS-E2-R													
		RCP2.5														
		RCP4.5	MRI-CGCM3													
RCP8.5																
<i>Portail DRIAS (CNRM2014 et IPSL2014)</i>	AR5	RCP2.5	CNRM-CM5	Aladin	Quantile- quantile	1971-2000	2021-2050	2071-2100	-	-	-					
		RCP4.5					2021-2050	2071-2100	-	-	-					
		RCP8.5					2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100					
		RCP4.5	IPSL-CM4				WRF	CDft	1971-2000	2021-2050	2071-2100	-	-	-		
		RCP8.5										2021-2050	2071-2100	1971-2000	2021-2050	2071-2100

Figure 4 : Représentation schématique des sources de données utilisées pour construire les projections climatiques de MOSARH21. GCM = MCG ; MDE = Méthode de descente d'échelle ; PST = climat en temps présent ; TFUT = climat en temps futur ; RCP = Representative Concentration Pathways.

- **La chaîne de modélisation**

La chaîne de modélisation mise en place pour réaliser les projections climatiques (Figure 5) que les hydrologues utilisent classiquement est la suivante :

- Des scénarios d'émission de gaz à effet de serre ou des profils d'évolution de leur concentration sont établis ;
- Ces scénarios radiatifs (RCP) servent à configurer les MCG que les climatologues développent. Ces MCG produisent des projections climatiques sur le globe entier à une résolution temporelle journalière (ou autre), et à une résolution spatiale très large (de l'ordre de 100 à 200 km).
- Cette résolution spatiale étant insuffisante pour mettre en place des modèles hydrologiques à l'échelle de bassins versants, une étape de descente d'échelle est nécessaire. Celle-ci peut-être dynamique, c'est-à-dire qu'on utilise alors un modèle à plus haute résolution, appelé modèle climatique régional (MCR), sur une zone plus restreinte, que l'on contraint par les sorties du MCG utilisé. Une seconde façon d'effectuer une descente d'échelle peut être d'utiliser une méthode statistique, c'est-à-dire qu'on établit des modèles mathématiques faisant le lien entre données à large échelle et données climatiques locales. Malgré ces

procédures de changement d'échelle spatio-temporelle, des biais peuvent subsister et on peut donc avoir besoin de méthodes de débiaisage.

Après ces étapes, nous disposons de données pouvant être utilisées en entrée de modèles hydrologiques.

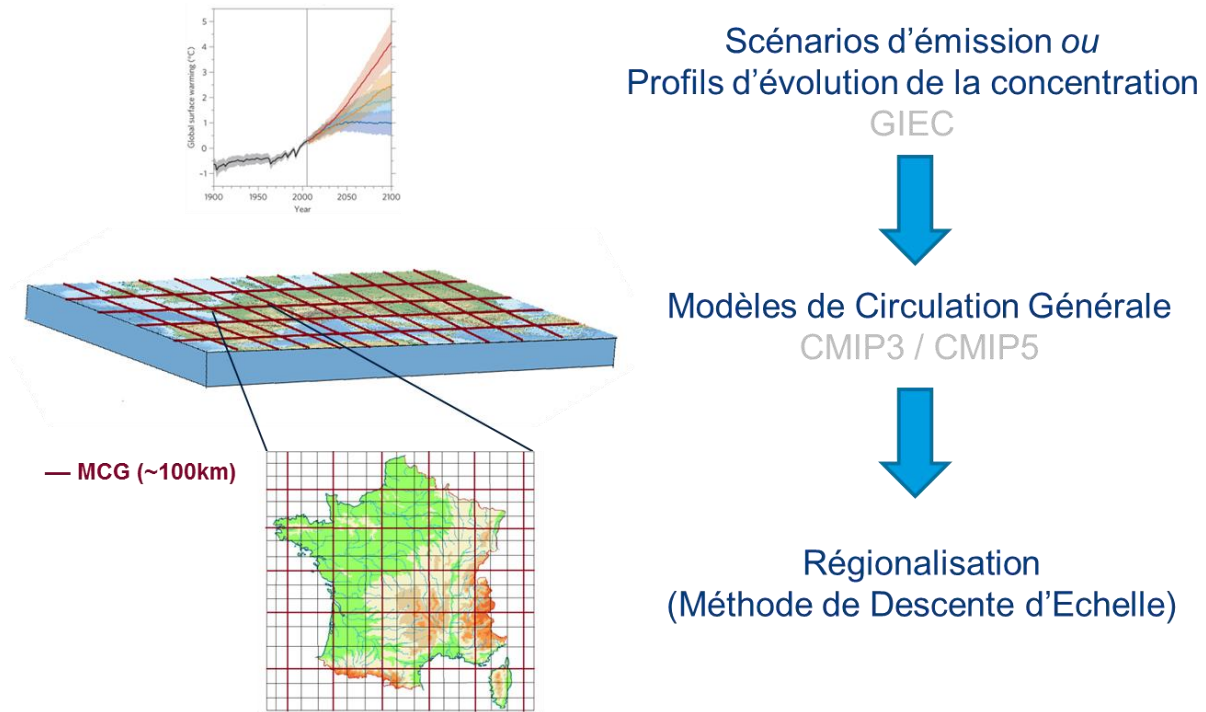


Figure 5 : Chaîne de modélisation mise en place par les climatologues permettant d'obtenir des projections climatiques régionalisées (tirée d'une présentation de Nicolas, 2014).

- **Les scénarios CMIP3 utilisés**

Nous allons présenter ici les projections climatiques utilisées dans MOSARH21. Rappelons que nous désirons analyser les nouvelles projections hydrologiques (basées sur CMIP5) au regard de celles de projets antérieurs (basées sur CMIP3). Les données CMIP3 correspondent à celles utilisées dans Explore 2070 et FLOW MS. Dans ces deux projets, le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B a été utilisé ; il s'agit d'un scénario intermédiaire, c'est-à-dire ni très pessimiste (l'émission de gaz à effet de serre augmenterait de plus en plus), ni très optimiste (très forts changements de la société menant à une prise de conscience drastique et la mise en œuvre de solutions pour limiter les émissions). Dans Explore 2070, 7 MCG ont été utilisés (Chauveau et al., 2013). Comme nous n'avons pu en récupérer que 6, un de ces MCG ne sera pas utilisé dans MOSARH21. La descente d'échelle a été effectuée par le CERFACS⁶ grâce à une méthode basée sur les types de temps, SCRATCH08 (Boé et al., 2007). Cette méthode consiste à identifier dans les projections des MCG des circulations atmosphériques de large échelle et à échantillonner dans une archive d'observations, des jours présentant une circulation atmosphérique analogue. Les données météorologiques correspondantes, observées à plus fine résolution spatiale, sont alors utilisées comme projections climatiques. En ce qui concerne FLOW MS (CIPMS, 2013), un seul MCG a été utilisé, et il a servi de contrainte à un MCR.

⁶ Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

Cependant, trois réalisations du MCG ont été utilisées : cela permet de représenter l'incertitude inhérente aux conditions initiales du MCG. Ensuite, une méthode linéaire et quantile-quantile a été utilisée afin de réduire les biais de ces simulations.

- **Les scénarios CMIP5 utilisés**

Les données dites Drias⁷ AR5⁸ correspondent aux données mises à disposition conjointement par Météo-France et l'IPSL⁹ sur le portail Drias (<http://drias-climat.fr/>). Ce portail a pour but de mettre à disposition des chercheurs, des bureaux d'études ainsi que des décideurs, certaines projections climatiques ainsi que des indices caractérisant les évolutions futures du climat. Nous avons donc collecté les données des deux MCG de deux instituts français, celui du CNRM¹⁰ et celui de l'IPSL, correspondant à l'exercice CMIP5. Les Representative Concentration Pathways RCP 4.5 et 8.5 sont utilisés par le modèle de l'IPSL, et les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 sont utilisés par le modèle du CNRM. Un MCR différent a été utilisé pour chaque MCG, et des méthodes de débiaisage de type « distribution fitting » ont ensuite été mises en œuvre. Les détails des modèles et méthodes utilisés sont disponibles aux liens suivants :

- <http://drias-climat.fr/accompagnement/section/180> pour l'IPSL,
- <http://drias-climat.fr/accompagnement/section/179> pour le CNRM.

Par la suite, nous appellerons ces projections respectivement IPSL et CNRM. Il est important de souligner que ces projections n'étaient initialement pas prévues dans le projet MOSARH21. Cependant, nous les avons ajoutées afin de disposer de projections obtenues avec une méthode dynamique de descente d'échelle.

Enfin, un package R a été utilisé pour produire des projections climatiques basées sur une méthode de descente d'échelle appelée Advanced Delta Change (Kraaijenbrink, 2013a, b). Cette méthode consiste en l'application d'une transformation mathématique simple à des données observées à haute résolution (dans notre cas, les données SAFRAN). Cette transformation, dont les coefficients ont été calés entre les sorties des MCG sur la période de référence (1971-2000) et des périodes futures (2021-2050 et 2071-2100) et sont fournis avec le package, permet d'obtenir des projections futures de manière simple. De nombreux MCG sont disponibles pour chacun des quatre RCP existants, mais nous n'en avons conservé qu'un nombre limité (de 3 à 4 selon le scénario). Ce package a déjà été utilisé sur le Rhin (van Pelt, 2012).

La Figure 6 permet de comparer le scénario A1B (SRES¹¹ - AR4) et les quatre RCP (AR5) que nous utiliserons dans ce projet en termes de réchauffement climatique planétaire. Le scénario A1B, majoritairement utilisé dans les projets antérieurs sur la zone d'études (voir Figure 6) est proche du scénario RCP 6.0. Le scénario B1, utilisé dans le projet VULNAR, est proche du scénario RCP 4.5 et le scénario A2, également utilisé dans ce projet, est intermédiaire entre les scénarios RCP 6.0 et 8.5. A

⁷ Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement

⁸ Assessment Report 5

⁹ Institut Pierre Simon Laplace

¹⁰ Centre National de Recherches Météorologiques

¹¹ Special Report on Emissions Scenarios

noter que les scénarios RCP étendent la gamme des possibles par rapport aux scénarios SRES, avec à la fois des scénarios plus optimistes et plus pessimistes d'ici la fin de siècle.

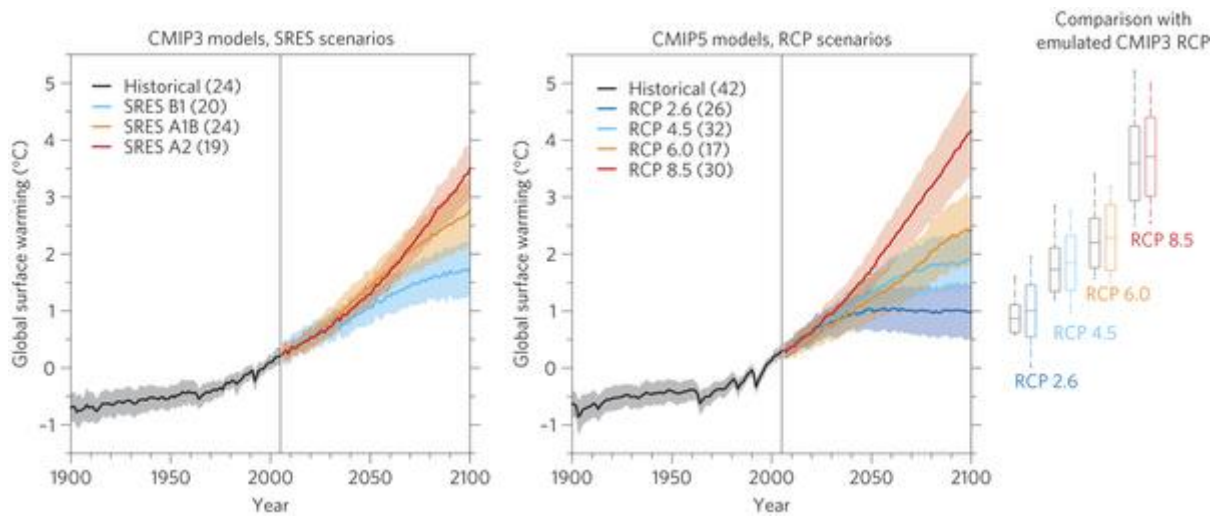


Figure 6 : Trajectoires des scénarios SRES (AR4) et RCP (AR5) en termes d'évolution de la température (d'après Knutti et Sedlacek, 2013).

3.5. Les indicateurs hydrologiques

Nous définissons ici les indicateurs hydrologiques calculés dans ce projet.

- Module annuel et mensuel

Il s'agit du débit moyenné à l'échelle de l'année civile ou bien de chacun des 12 mois.

- QJXA

Il s'agit d'un indicateur de crue désignant le débit journalier maximal sur l'année civile. On a notamment calculé le QJXA avec des périodes de retour de 2, 10 et 100 ans, en utilisant une loi de Gumbel.

- Quantiles

On a calculé les quantiles 95 et 99 de la courbe des débits journaliers classés, qui désignent les valeurs de débits sous lesquelles se trouvent respectivement 95 et 99% des débits sur une période donnée. Il s'agit d'un indicateur de crue.

- QMNA

Il s'agit d'un indicateur de bas débits désignant le débit mensuel minimal sur l'année civile. On a notamment calculé le QMNA pour un temps de retour de 5 ans.

- VCN

Il s'agit d'un indicateur de bas débits désignant le débit consécutif minimal sur une période donnée, rapporté à l'année. On a notamment calculé le VCN sur des périodes glissantes de 3 et 7 jours (VCN3

et VCN7). Ces indicateurs ont été estimés sur des périodes de retour de 2, 10 et 20 ans grâce à une loi log-normale.

3.6. Modèles hydrologiques

Dans cette section, nous décrivons les deux modèles hydrologiques. Leur calage et l'évaluation de leurs performances comparativement aux débits observés seront brièvement abordés ; en effet, une annexe complète cette description (Annexe B).

3.6.1. Les critères d'évaluation ou de calage des modèles

Nous avons utilisé pour caler ou évaluer les modèles hydrologiques des critères classiquement utilisés en modélisation hydrologique, à savoir le Kling-Gupta efficiency (Kling et al., 2012) et le bilan d'eau.

Le Kling-Gupta efficiency (KGE') est un critère quadratique proposé par Kling et al. (2012) afin d'évaluer la proximité globale de deux séries temporelles, l'une simulée, l'autre observée. Il permet de rendre compte de la corrélation entre les séries et de la proximité de leurs moyennes et écarts-types. Ce critère a été proposé pour palier le défaut du Nash-Sutcliffe efficiency (Nash et Sutcliffe, 1970), critère le plus utilisé en hydrologie, qui conduit à sous-estimer la variabilité des débits lorsqu'il est utilisé comme fonction objectif. La formule du KGE' est la suivante :

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

avec r le coefficient de corrélation, $\beta = \mu_{sim}/\mu_{obs}$, $\gamma = \frac{\sigma_{sim}/\mu_{sim}}{\sigma_{obs}/\mu_{obs}}$, σ l'écart-type et μ la moyenne des débits simulés ou observés sur la période considérée. Son optimum est 1, des valeurs plus faibles indiquant des performances plus faibles.

La formule de bilan d'eau utilisée est la suivante :

$$bilan = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

Son optimum est 1, des valeurs plus grandes indiquent une surestimation des débits moyens, des valeurs plus faibles indiquent une sous-estimation des débits moyens.

Par ailleurs, le KGE' utilisé tel quel donnant plus d'importance aux gammes de débits les plus hautes, nous avons voulu utiliser des critères donnant un poids plus fort aux gammes de débits plus faibles. Pour cela, nous avons utilisé deux transformations des séries temporelles de débits : en racine carrée, et en logarithme (log). Cela signifie qu'au lieu de calculer le KGE' en utilisant des séries temporelles de débits, on utilise des séries temporelles de racines carrées de débits et de log de débits. Cela a pour conséquence de donner un poids équivalent à l'ensemble de la gamme de débits (racine carrée) ou bien de donner un poids plus important aux débits les plus faibles (log).

Enfin, nous avons aussi utilisé le KGE' « double » (KGE_DOUBLE) qui est calculé en faisant la moyenne entre le KGE' et le KGE' appliqué à l'inverse des débits. Ce critère a été utilisé pour caler GRSD et pour évaluer les deux modèles en prenant en compte à la fois les forts débits et les faibles débits.

3.6.2. Le modèle semi-distribué conceptuel GRSD (Irstea)

3.6.2.1. Principe du modèle

Le modèle GRSD est la version spatialisée des modèles de simulation pluie-débit de la famille GR. Il s'agit d'un modèle conceptuel semi-distribué qui a été développé à partir des approches étudiées par Lobligois (2014) pour spatialiser les structures globales des modèles hydrologiques GR. Il s'agit d'un ensemble de modèles globaux GR reliés par un modèle de propagation hydraulique simplifiée. A la différence d'un modèle global qui considère le bassin versant comme une seule entité spatiale, le modèle semi-distribué GRSD représente le bassin versant comme un ensemble d'entités spatiales : les sous-bassins versants. Le maillage du bassin versant désigne la division du bassin versant en mailles (ou sous-bassins).

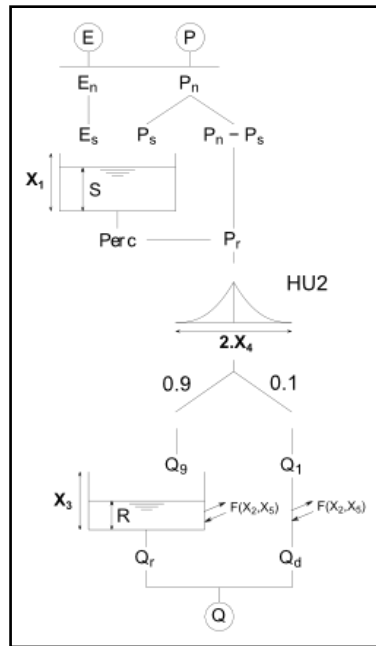
Dans GRSD, une modélisation hydrologique globale GR5J est appliquée à chaque maille du bassin versant. Le modèle pluie-débit GR5J est un modèle à réservoir, continu et global. C'est un modèle développé de manière empirique, dont la structure l'apparente à des modèles conceptuels pour représenter les processus hydrologiques à l'échelle du (sous-)bassin versant. La réponse à l'exutoire du sous-bassin est calculée à partir de données d'entrée moyennées spatialement sur le sous-bassin. Les stratégies de développement qui ont mené à la structure de ce modèle sont détaillées dans la thèse de Le Moine (2008). Le fonctionnement du modèle GR5J est brièvement présenté ci-dessous (Figure 7). Le modèle semi-distribué GRSD utilise aussi le modèle neige conceptuel à base d'une fonction degré-jour CemaNeige développé par Valéry (2010).

Le débit calculé à l'exutoire de chaque maille est ensuite propagé vers les exutoires des mailles en aval par un simple décalage temporel déterminé en fonction de la distance hydraulique entre les exutoires des mailles et le paramètre de célérité. Le modèle de propagation hydraulique utilisé pour router les débits produits par chaque maille vers la maille en aval est un simple décalage temporel. Le décalage temporel τ est déterminé en fonction de la distance hydraulique entre les exutoires des mailles et le paramètre de célérité :

$$Q_p(t) = a_0 \cdot Q_{amont}(t - INT(\tau)) + a_1 \cdot Q_{amont}(t - (INT(\tau) + 1))$$

$$\text{avec } \begin{cases} \tau = \frac{L}{c} \\ a_0 = 1 - INT(\tau) \\ a_1 = \tau - INT(\tau) \end{cases}$$

avec $INT()$ la partie entière, $Q_p(t)$ le débit (m^3/s) à l'exutoire du sous-bassin intermédiaire au pas de temps t résultant de la propagation du débit amont Q_{amont} pour un décalage temporel τ calculé en fonction du paramètre de célérité C (m/s) et de la longueur hydraulique L (m) du cours d'eau entre les exutoires du sous-bassin amont et intermédiaire.



X_1 (mm.)	Capacité du réservoir de production
X_2 (-)	Coefficient d'échange
X_3 (mm.)	Capacité du réservoir de routage
X_4 (h.)	Temps de base de l'hydrogramme unitaire
X_5 (-)	Seuil dans le réservoir de routage

Figure 7 : Schéma du modèle pluie-débit global GR5J (tiré de Le Moine, 2008).

L'ajout d'un modèle de propagation hydraulique entraîne une possible redondance avec les paramètres de routage du modèle hydrologique (Lerat, 2009; Saulnier and Le Lay, 2009) : le paramètre X_4 (temps de base de l'hydrogramme unitaire) qui contrôle le temps de réaction des sous-bassins versants aux pluies entre en interaction avec le paramètre de célérité C qui dimensionne le routage dans les cours d'eau. Afin de limiter les problèmes d'équifinalité entre ces deux paramètres, nous choisissons de fixer l'un des deux. Dans la configuration semi-distribuée, le paramètre X_4 est fixé à la valeur déterminée pour la configuration globale, qui ne bénéficie pas du module hydraulique de propagation. De cette manière, le routage sur les versants est déterminé en premier selon le rapport de surface et seule la célérité doit alors être estimée par optimisation. L'impact de ce paramétrage particulier a été analysé par Lobligeois (2014) : il améliore la robustesse du modèle semi-distribué sans dégrader ses performances.

Le paramètre X_4 est distribué sur les sous-bassins par la relation suivante :

$$x_{4i} = \left(\frac{S_i}{S_{bv}} \right)^{0.3} \cdot X_4 \quad \text{Eq. 1}$$

avec x_{4i} le paramètre de l'hydrogramme unitaire qui contrôle le temps de transfert de la réponse pluie-débit sur le sous-bassin i , S_i la surface du sous-bassin i , S_{bv} la surface totale du bassin versant et X_4 le paramètre calé sur le bassin versant.

3.6.2.2. Calage

Le calage du modèle GRSD est réalisé de manière séquentielle, c'est-à-dire que les paramètres des sous-bassins en amont sont calés en premier, puis on cale ceux des (sous-)bassins juste en aval, et ainsi de suite. Sur chaque sous-bassin, le calage est réalisé de manière automatique grâce à une méthode dite pas-à-pas (Perrin, 2000, chapitre 3.5.2) précédée d'un pré-filtrage des paramètres (Mathevet, 2005). Ces deux étapes dépendent de la définition par l'utilisateur d'une fonction-objectif, c'est-à-dire d'un critère numérique dont on cherche à optimiser la valeur. Dans notre cas, nous utiliserons un critère basé sur le critère modifié d'efficacité de Kling-Gupta (KGE', Kling et al, 2012). Ce critère quadratique est un bon substitut au critère classique de Nash-Sutcliffe, en ce qu'il n'est pas mathématiquement contraint à une gamme sous-optimale de valeurs dans sa composante « variabilité des débits ». Afin de ne pas donner un poids trop important aux débits les plus élevés, nous avons utilisé la moyenne entre un KGE' classique et un KGE' appliqué à une transformation de type inverse des débits.

Les paramètres de CemaNeige sont quant à eux fixés à des valeurs médianes déterminées par ailleurs (Valéry, 2010). En effet, la quantité de chute de neige sur les bassins versants étudiés est limitée, ce qui rend difficile leur détermination. Par ce moyen, le modèle est jugé plus robuste. Pour de plus amples détails sur la méthode de calage, se reporter à l'Annexe B.

3.6.3. Le modèle distribué à base physique LARSIM (HYDRON)

3.6.3.1. Principe du modèle

Le modèle de bilan hydrologique LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model ; Ludwig & Bremicker, 2006) est un modèle conceptuel, c'est-à-dire que les processus complexes du système naturel sont reproduits par des concepts de modèles simplifiés. Le modèle de bilan hydrologique LARSIM est souvent appliqué avec un maillage régulier carré d'un kilomètre de côté pour la représentation du réseau hydrographique réel (Figure 8). Alternativement, une structure basée sur des sous-zones hydrologiques est possible ainsi que sur n'importe quel autre maillage régulier autre que 1 km². Pour chaque maille, les sous-processus hydrologiques suivants sont décrits : interception, évapotranspiration, accumulation, compaction et fonte de la neige, renouvellement et stockage de l'eau du sol, transport latéral de l'eau et translation et rétention dans les canaux et les lacs (voir le schéma du modèle LARSIM, Figure 9).

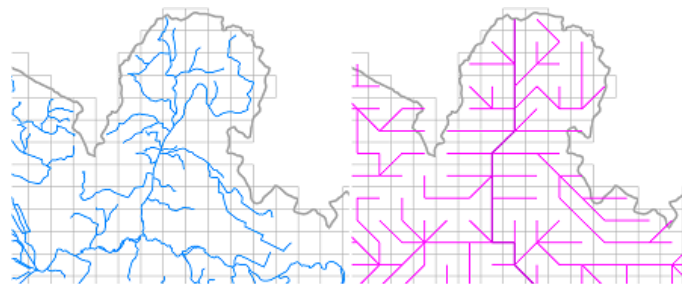


Figure 8 : Exemple du réseau hydrographique numérique (gauche) et du schéma de routage du modèle (droite).

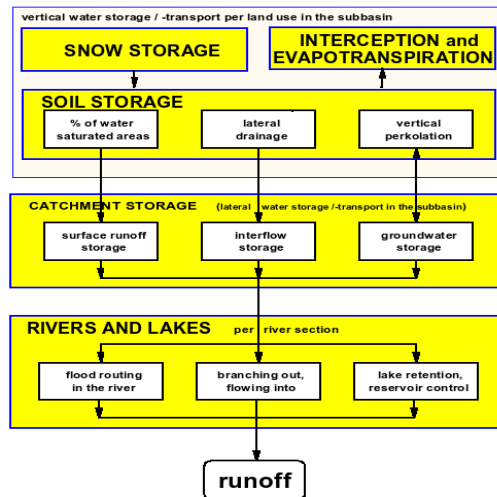


Figure 9 : Schéma du modèle de bilan hydrologique LARSIM (à noter que dans la version de LARSIM utilisée dans ce projet, quatre composantes sont utilisées pour le calcul du débit : débit de base, débit intermédiaire, débit direct lent et débit direct rapide).

LARSIM combine des composants bien éprouvés de modélisation hydrologique déterministe, qui sont autant que possible applicables de manière générale et sont basés sur des données facilement accessibles en ce qui concerne l'occupation du sol. L'accent est mis sur la détermination réaliste de l'évapotranspiration potentielle en utilisant la formule de Penman-Monteith. L'évapotranspiration et le bilan d'eau sont calculés séparément pour différentes utilisations et capacités au champ du sol, avec jusqu'à 16 utilisations du sol avec des propriétés d'évapotranspiration et de ruissellement spécifiques (Figure 9).

Le modèle LARSIM est largement utilisé par des centres opérationnels de prévision des crues [Bremicker et al., 2013]. LARSIM a été développé à l'origine pour les affluents français du Rhin pour des pas de temps de calcul horaires à des fins de prévision des crues pour les services de prévision des crues Meuse-Moselle et Rhin-Sarre de DREAL Grand-Est. LARSIM a par conséquent été adapté au pas de temps journalier pour les projets FLOW MS et MOSARH21. LARSIM au pas de temps journalier est aussi appliqué pour effectuer des simulations pour estimer l'effet de changements climatiques sur le débit (Gerlinger & Meuser 2013).

3.6.3.2. Calage

Le calage de LARSIM est habituellement réalisé de manière manuelle. Pour ce faire, différentes valeurs des paramètres sont testées et évaluées selon certaines composantes des débits simulés qui correspondent à leurs rôles (débit de base, débit intermédiaire, débit direct lent et débit direct rapide). Cette méthodologie est adaptée au but premier de LARSIM, qui est en général utilisé au pas de temps horaire à des fins de prévisions de crues.

Dans le cadre de MOSARH21, de multiples calages de LARSIM au pas de temps journalier étaient nécessaires, ceux-ci étant réalisés sur des périodes différentes. Cette approche n'était pas réalisable de manière manuelle. Une approche automatique adaptée de la méthode de calage de GRSD a donc été développée spécifiquement pour LARSIM dans le cadre du projet sur un nombre limité de paramètres. Cette méthodologie de calage est détaillée dans l'Annexe B. Elle permet d'obtenir des

résultats proches de ceux obtenus par calage manuel, que ce soit au niveau des valeurs des paramètres ou des performances.

3.6.4. Performance hydrologique des deux modèles

Les procédures de calage-contrôle sont une étape indispensable pour l'application de modèles hydrologiques pour des études de changement climatique. En effet, les conditions climatiques futures (températures plus élevées, régimes de précipitations modifiés) pourront être si différentes des conditions climatiques de la période d'apprentissage (calage, options de modélisation) qu'il est nécessaire d'essayer de reproduire ce fonctionnement sur des périodes climatiquement contrastées. Pour cela, la méthode la plus simple est d'utiliser des données passées sur des périodes assez longues (au moins 10 ans) et de diviser ces données en deux parties : la première pour effectuer le calage, la seconde pour effectuer une évaluation indépendante de ce calage. Cela permet d'éprouver la robustesse climatique du modèle dans des conditions qui diffèrent de celles utilisées pour le calage. Bien évidemment, l'exercice opposé (calage sur la 2^e période, évaluation sur la 1^e) permet de consolider cette analyse. Cette procédure a été mise en place pour GRSD et pour LARSIM. La période de référence de nos expériences (1971-2000) a ainsi été divisée en deux parties égales : 1971-1985 et 1986-2000. Une rupture climatique a été observée en 1987-1988 (la seconde période étant plus chaude que la première) ce qui coïncide quasiment avec le découpage adopté ici (Brulebois et al., 2015).

Les descriptions des périodes et les performances des modèles sur la période de référence, *i.e.* pour ces procédures de calage-contrôle, sont détaillées dans l'Annexe B. Elles ont permis de montrer le bien-fondé de la méthodologie adoptée, ainsi que la faible contribution du calage à l'incertitude globale des projections hydrologiques.

3.7.Méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude est caractéristique des études d'impact de changement climatique sur l'hydrologie fondée sur une approche descendante (Figure 10).

Tout d'abord, nous mettons en place une modélisation hydrologique via un calage des paramètres des modèles par rapport à des débits observés, en utilisant des données météorologique observées. Cette étape est entièrement présentée dans l'Annexe B.

Les projections climatiques peuvent présenter des biais, qui se reflètent sur les projections hydrologiques. C'est pour cela que l'on compare les projections hydrologiques sur la période de référence aux débits obtenus par les modèles en utilisant les observations météorologiques dans un premier temps. Cette étape n'est pas présentée dans ce rapport mais figure sur les fiches stations fournies.

Enfin, et seulement après ces étapes, on compare les projections hydrologiques sur une période de référence aux projections hydrologiques sur une ou des périodes futures. Ceci est l'objet de la section 5 de ce rapport.

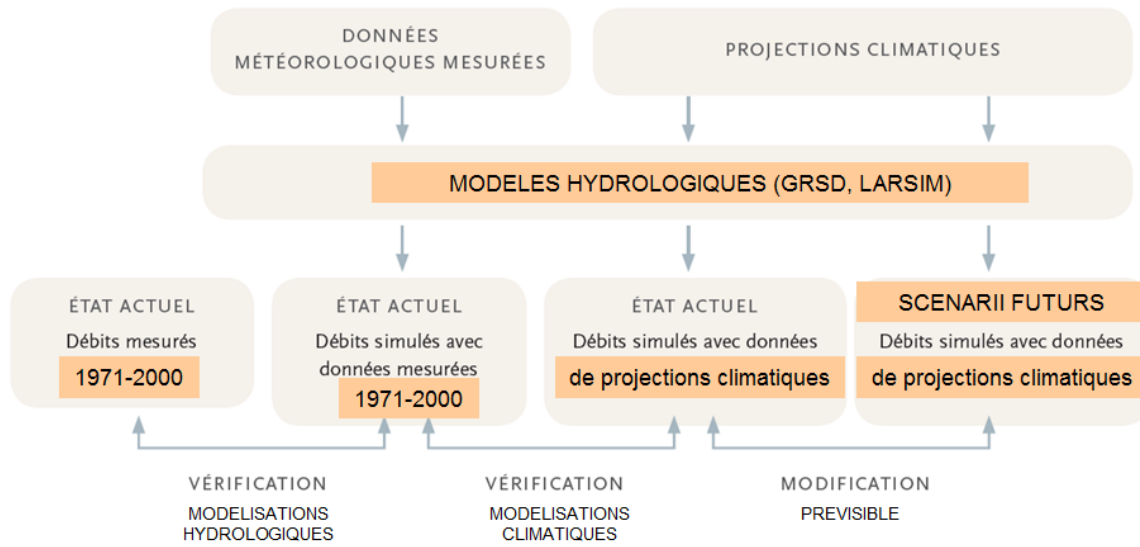


Figure 10 : Méthodologie de cette étude.

4. Projections climatiques sur la zone d'étude du projet MOSARH21

Dans cette section sont présentées les évolutions données par les projections climatiques de précipitations et températures des différentes sources utilisées dans MOSARH21. Il est à noter qu'un travail important de mise en forme des données climatiques a été nécessaire.

4.1.Scénarios SRES (AR4)

Les scénarios SRES (4^e rapport du GIEC) sont présentés ci-dessous. Nous présentons tout d'abord les projections SCRATCH08, avec la précipitation annuelle moyenne (Figure 11), l'évolution de cette précipitation entre les deux périodes futures et la période de référence (Figure 12), la température annuelle moyenne (Figure 13) et son évolution entre les deux périodes futures et la période de référence (Figure 14).

Nous voyons sur ces figures que la répartition spatiale de la précipitation et de la température est plutôt bien simulée sur la période de référence. De plus, la plupart des MCG présentent une diminution assez nette de la précipitation, en particulier sur les Vosges mais aussi sur le reste du bassin pour certains d'entre eux, alors que l'augmentation de la température est plus uniforme sur la zone d'étude.

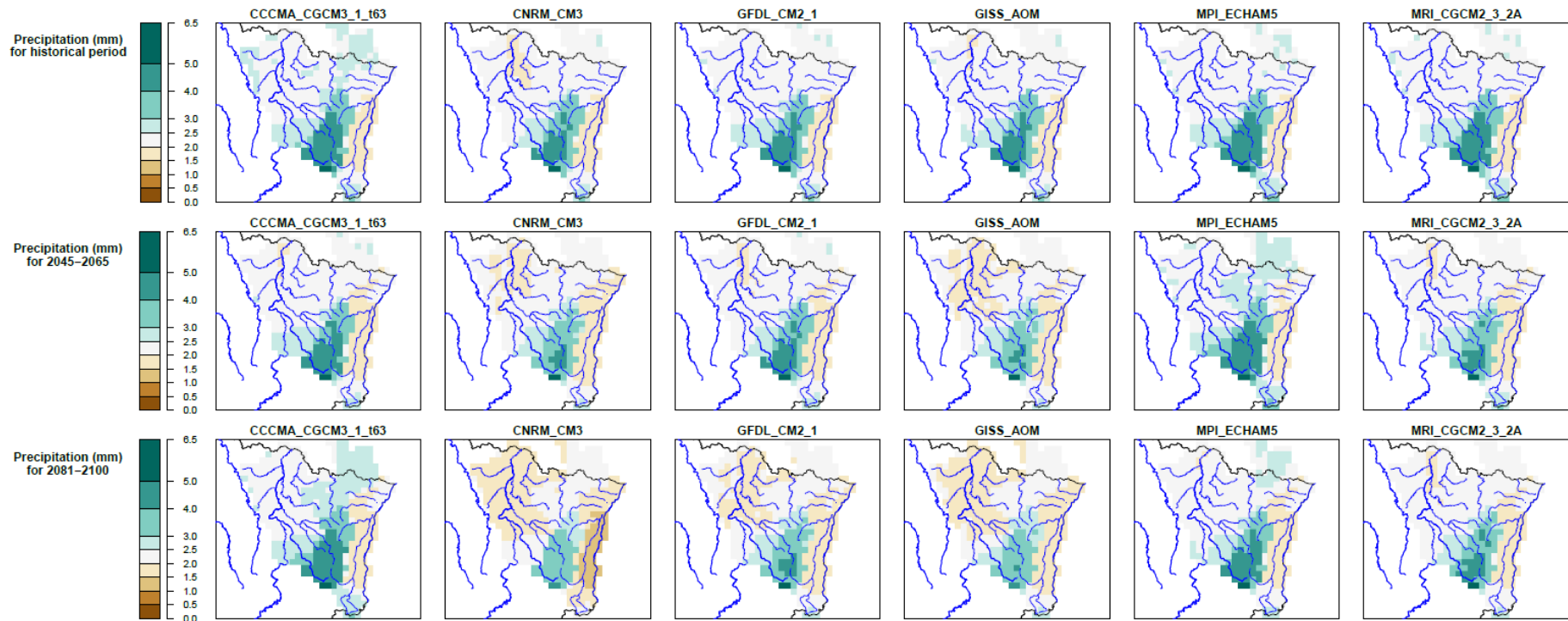


Figure 11 : Précipitations annuelles moyennes en mm/j pour les six modèles SCRATCH08, pour la période de référence (1971-2000) en haut, pour la période 2046-2065 au milieu, pour la période 2081-2100 en bas. Dans l'ordre, les modèles CCCMA_CGCM3_1_t63, CNRM_CM3, GFDL_CM2_1, GISS_AOM.

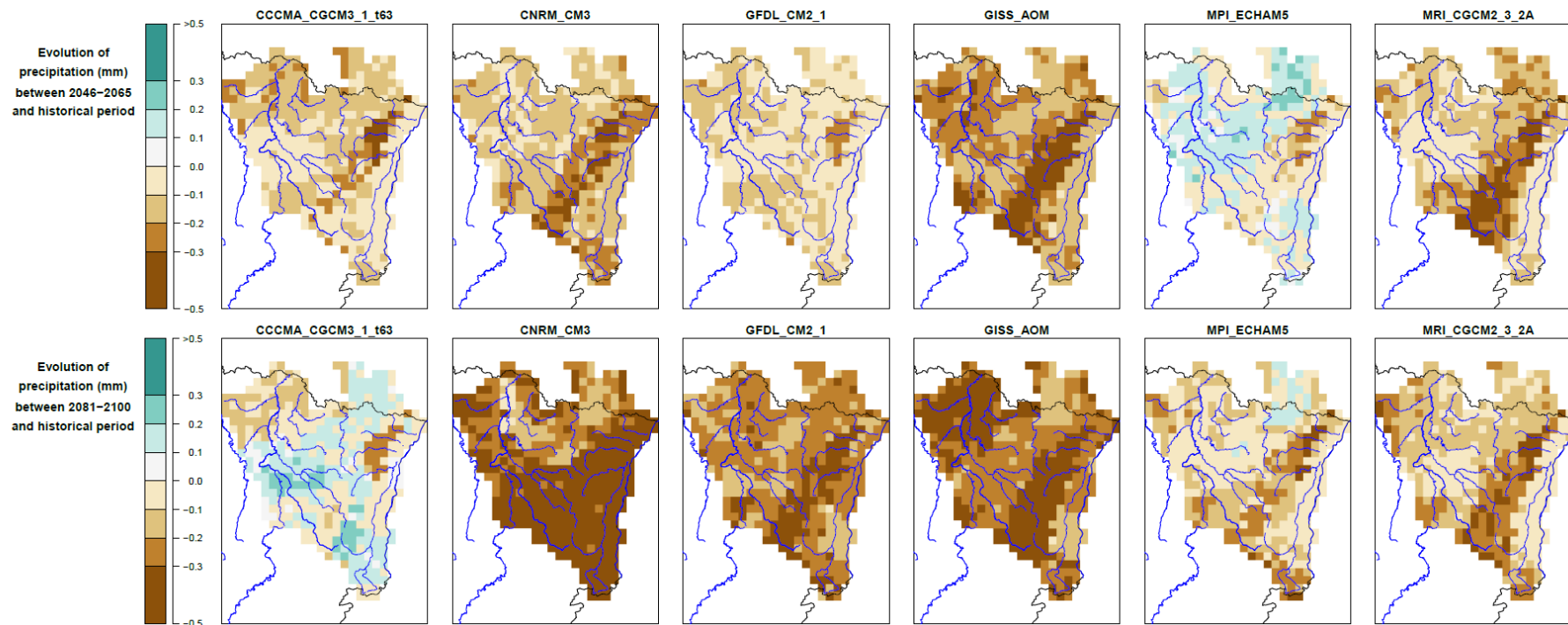


Figure 12 : Différence de précipitations annuelles moyennes en mm/j pour les six modèles SCRATCH08, entre la période 2046-2065 et la période de référence (1971-2000) en haut, entre 2081-2100 et la période de référence. Ordre identique à celui de la Figure 11.

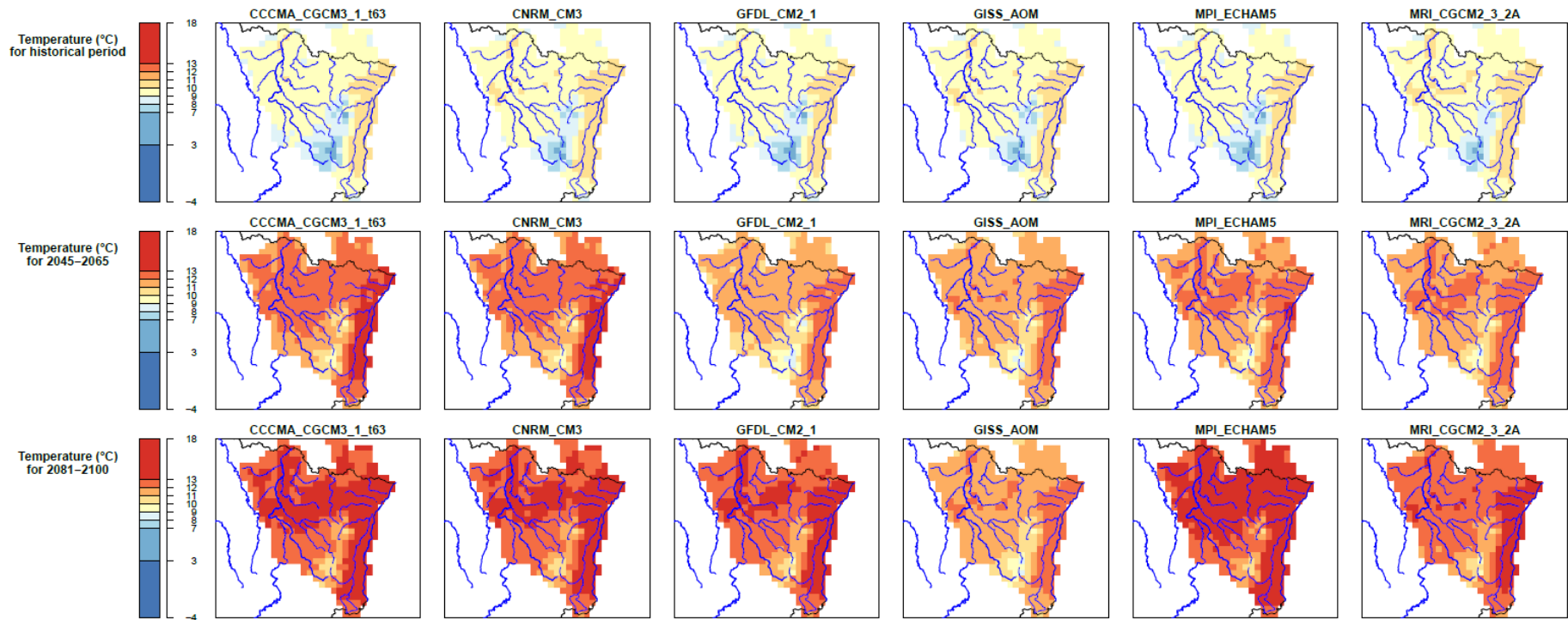


Figure 13 : Température annuelle moyenne (°C) pour les six modèles SCRATCH08, pour la période de référence (1971-2000) en haut, pour la période 2046-2065 au milieu, pour la période 2081-2100 en bas. Ordre identique à celui de la Figure 11.

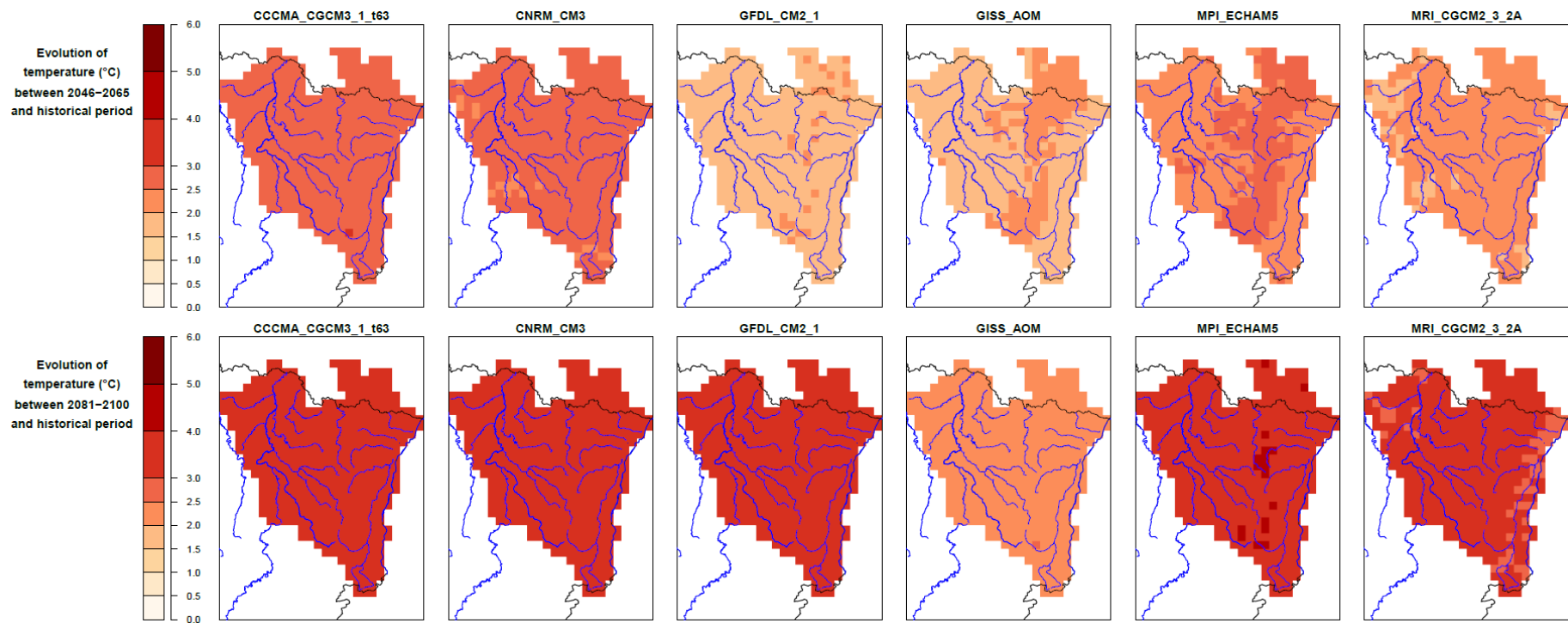


Figure 14 : Différence de température annuelle moyenne (°C) pour les six modèles SCRATCH08, entre 2046-2065 et la période de référence (1971-2000) en haut, entre 2081-2100 et la période Historique en bas. Ordre identique à celui de la Figure 11.

Par la suite, nous présentons pour les trois réalisations du modèle COSMO-CLM les précipitations annuelles moyennes (Figure 15 et Figure 11), l'écart entre les deux périodes de projection et la période de référence (Figure 16 et Figure 12), la température annuelle moyenne (Figure 17 et Figure 13) et l'écart entre les deux périodes de projection et la période de référence (Figure 18 et Figure 14).

Ici aussi, la répartition spatiale est bien reproduite (précipitations plus élevées sur le sud-ouest des Vosges que sur le reste du territoire). Cependant, nous observons que les précipitations des projections COSMO-CLM sont plus élevées. De plus, il est remarquable de noter que l'évolution de la précipitation indique soit une diminution faible (2 réalisations), soit une augmentation plus importante (1 réalisation) et que l'augmentation de température est plus mesurée. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de périodes futures différentes dans les deux jeux de projections (la période future des scénarios COSMO-CLM est plus proche de la période de référence que celle de SCRATCH 08).

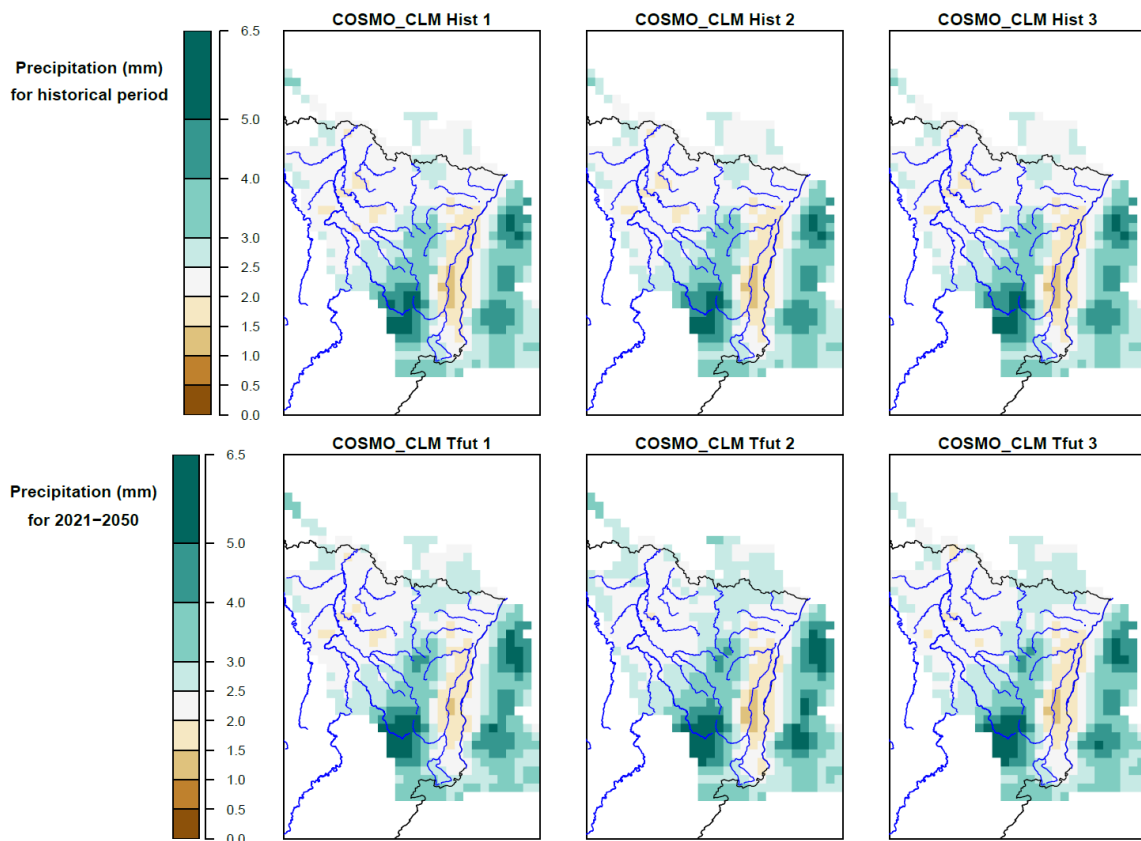


Figure 15 : Précipitations annuelles moyennes en mm/j pour les trois réalisations du modèle COSMO-CLM, pour la période de référence (1971-2000) en haut, pour la période 2021-2050 en bas.

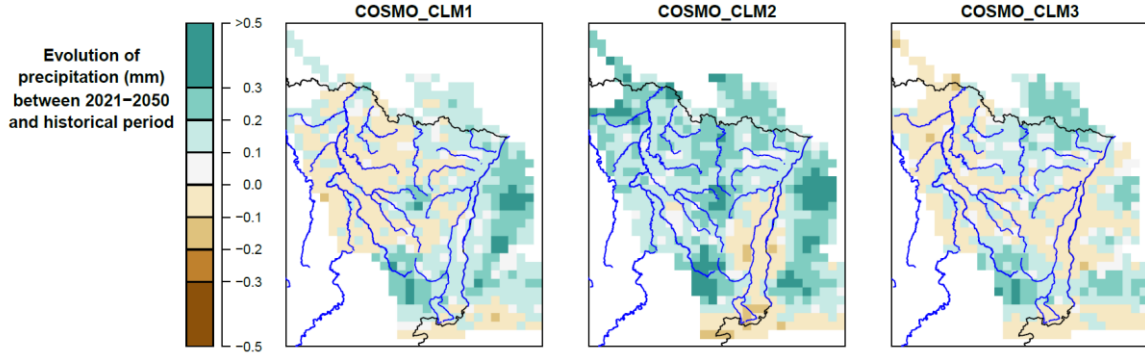


Figure 16 : Ecart de précipitation annuelle moyenne en mm/j pour les trois réalisations du modèle COSMO-CLM entre 2021-2050 et la période de référence (1971-2000).

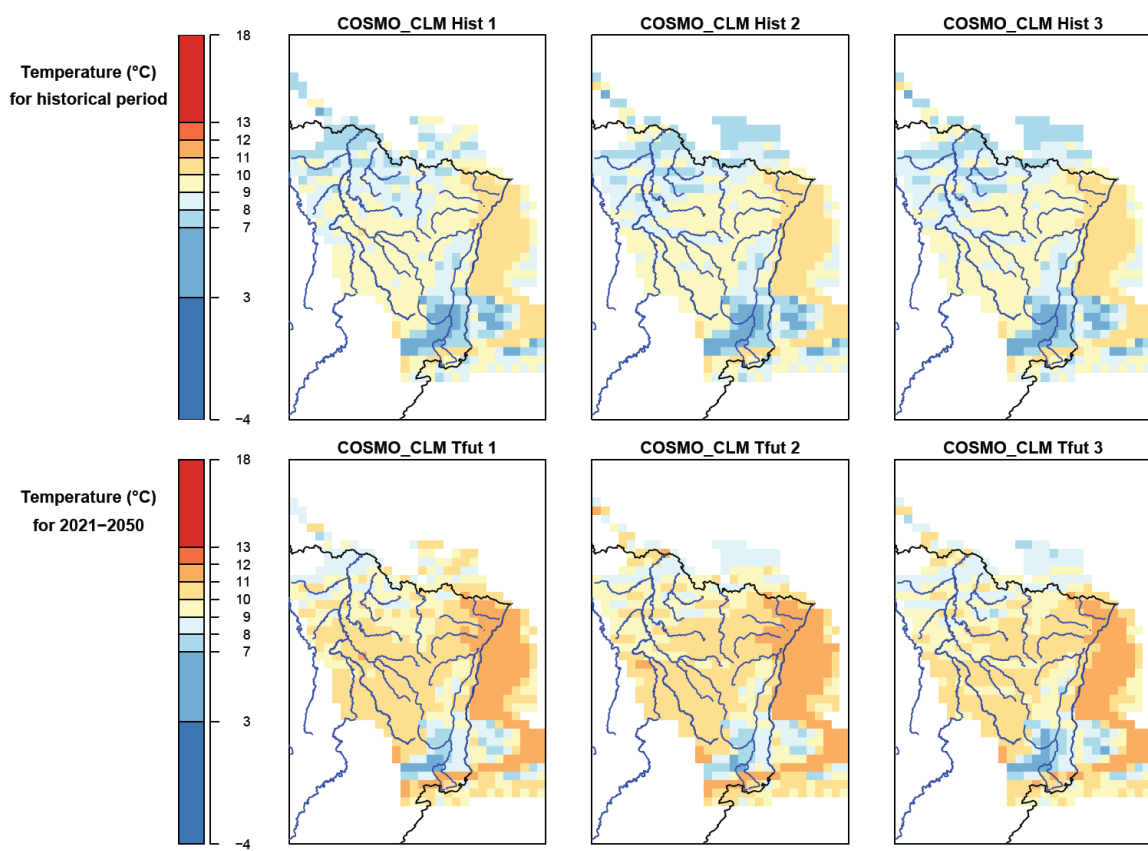


Figure 17 : Température annuelle moyenne (°C) pour les trois réalisations du modèle COSMO-CLM, pour la période de référence (1971-2000) en haut, pour la période 2021-2050 en bas.

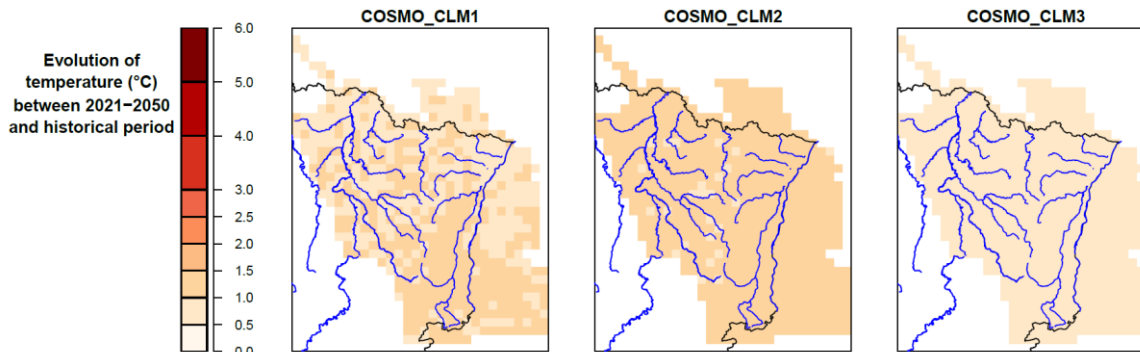


Figure 18 : Ecart de la température annuelle moyenne (°C) pour les trois réalisations du modèle COSMO-CLM entre 2021-2050 et la période de référence (1971-2000).

4.2.Scénarios RCP (AR5) CNRM2014 et IPSL2014

Nous présentons ici les scénarios RCP (5e rapport du GIEC), avec tout d’abord les projections Drias, avec les précipitations annuelles moyennes et la température annuelle moyenne pour la période de référence et le futur proche (Figure 19 et Figure 23) et leur évolution entre ces deux périodes (Figure 20 et Figure 24), les précipitations annuelles moyennes et la température annuelle moyenne pour la période de référence et le futur lointain (Figure 21 et Figure 25) et leur évolution entre ces deux périodes (Figure 22 et Figure 26).

Nous voyons sur ces figures une bonne représentation spatiale des précipitations et de la température sur la période de référence. En ce qui concerne les évolutions, pour le futur proche, le RCP 2.6 (atténuateur) donne une légère diminution des précipitations alors que les autres RCP donnent une nette augmentation. En revanche, pour le futur lointain, le modèle CNRM2014 donne plutôt une diminution, alors que le modèle IPSL 2014 donne une nette augmentation. Ceci n’est pas une surprise, ces deux modèles français, utilisés dans le rapport Jouzel (2015), donnant un aperçu de la dispersion de l’ensemble des MCG pris en compte par le GIEC dans ses expériences de modélisation. En ce qui concerne la température, les différences sont nettement moins importantes (IPSL2014 donne une augmentation un peu moins forte), mais plus le RCP se rapproche du pire scénario (RCP 8.5), plus l’augmentation est importante pour le futur lointain (c’est à cette échéance que les différents RCP divergent).

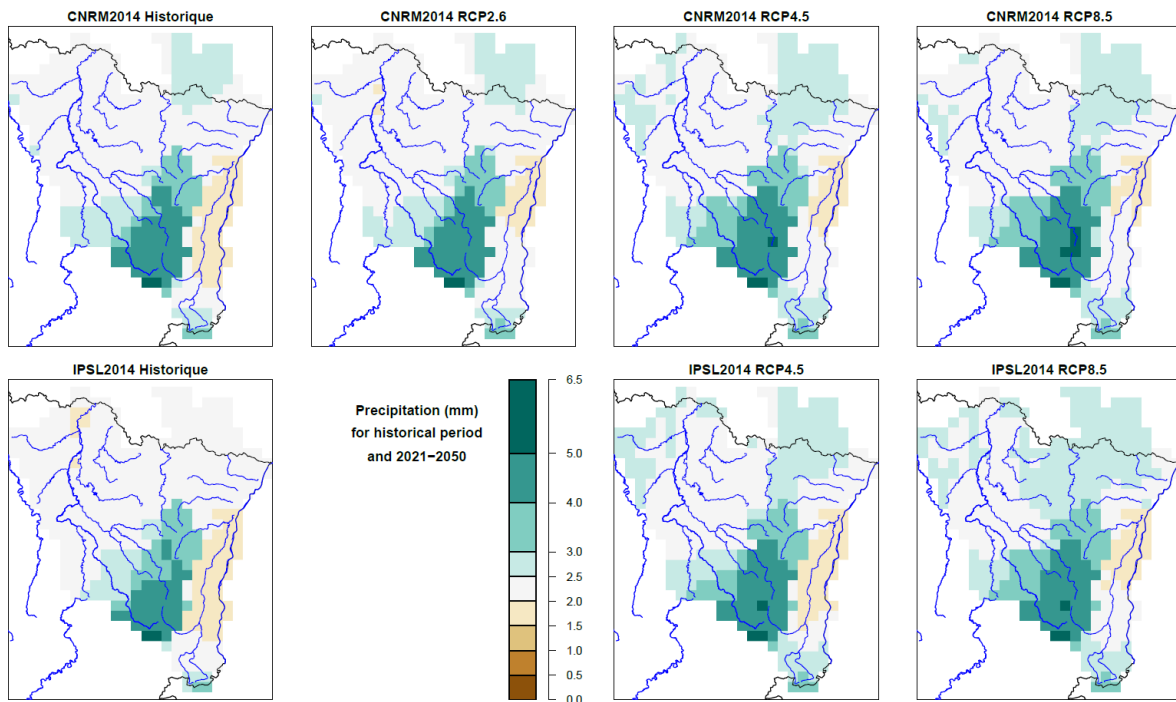


Figure 19 : Précipitations annuelles moyennes en mm/j pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), pour la période de référence 1971-2000 (gauche) et la période 2021-2050 pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

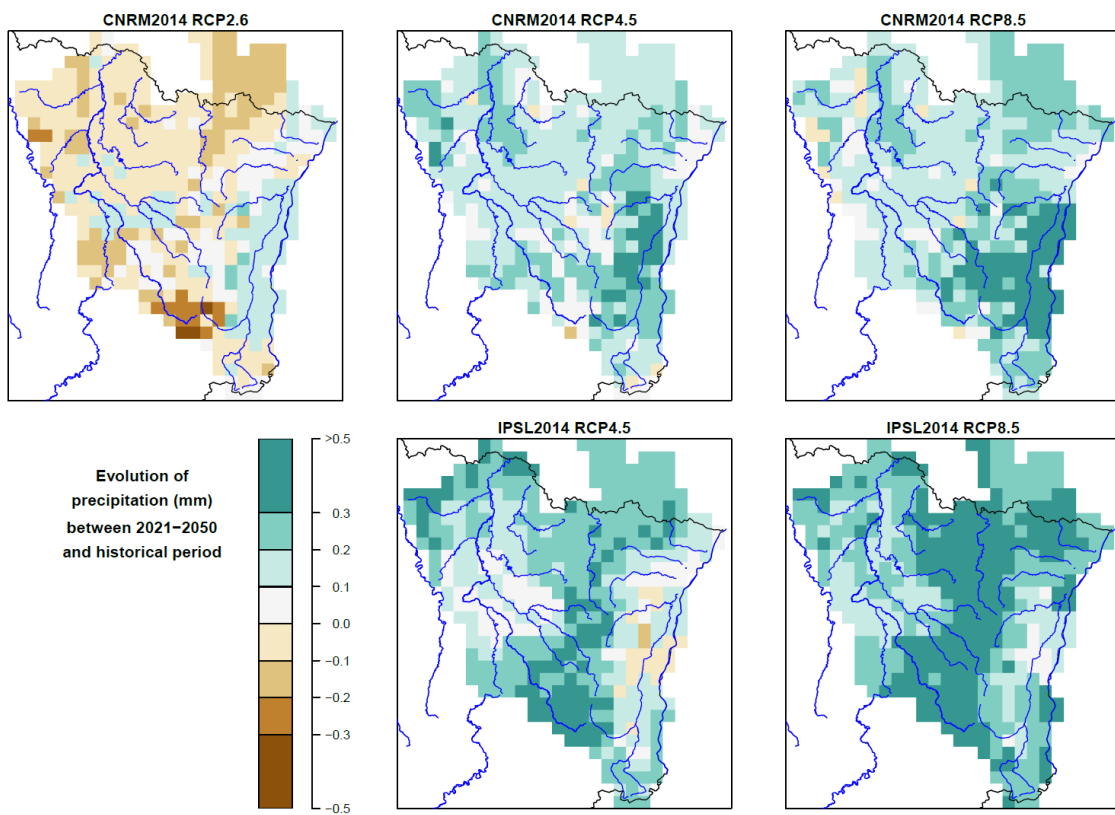


Figure 20 : Ecart de précipitation annuelle moyenne en mm/j pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), entre 2021-2050 et la période de référence (1971-2000) pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

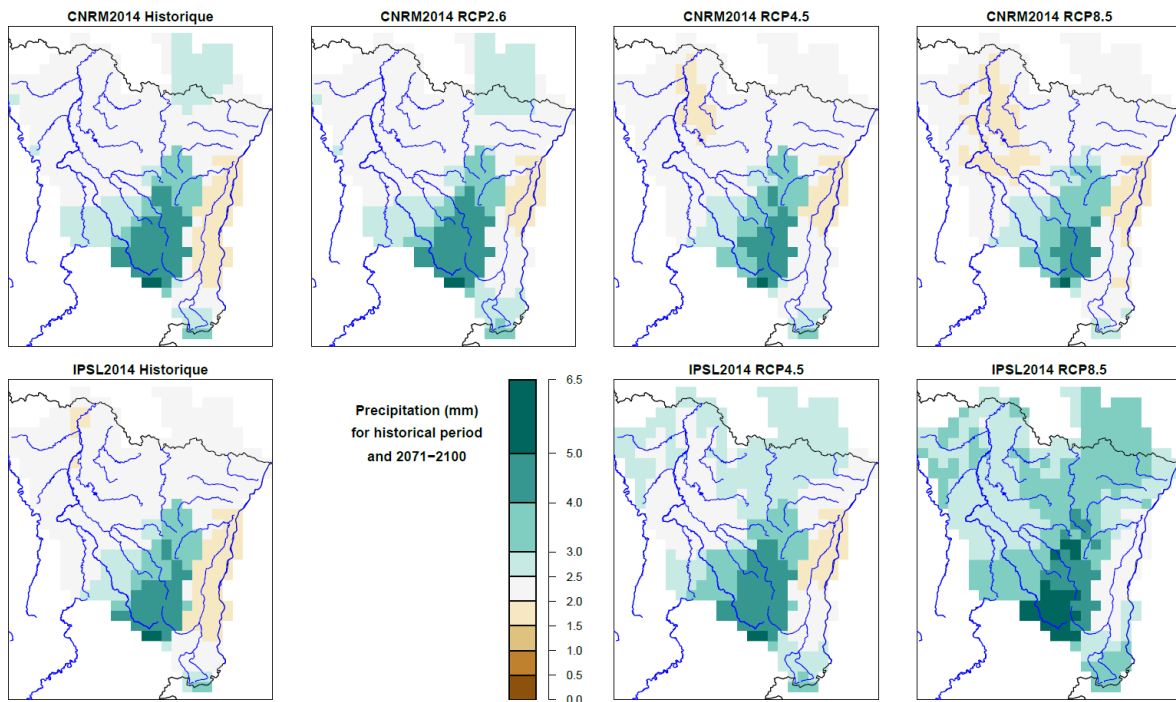


Figure 21 : Précipitations annuelles moyennes en mm/j pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), pour la période de référence 1971-2000 (gauche) et la période 2071-2100 pour les scénarios radiatifs RCP2.6, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

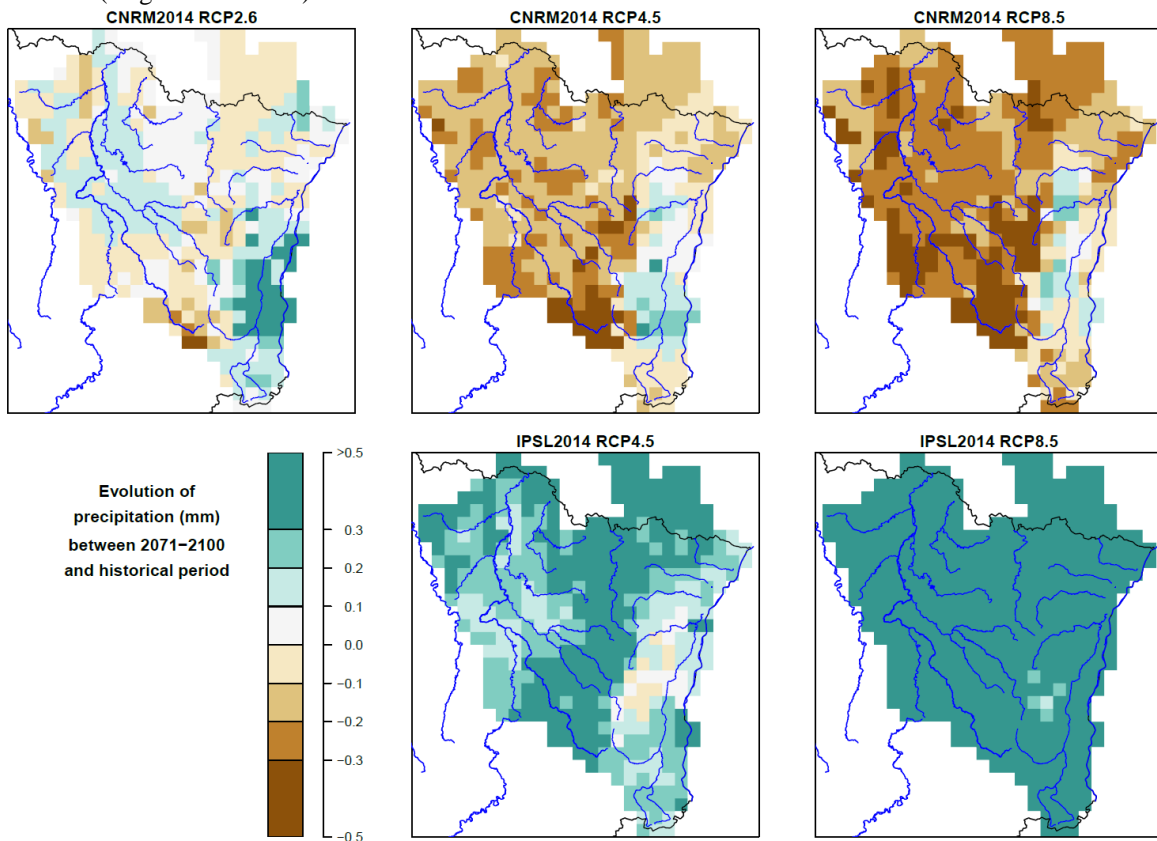


Figure 22 : Ecart de précipitation annuelle moyenne en mm/j pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), entre 2071-2100 et la période de référence (1971-2000) pour les scénarios radiatifs RCP2.6, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

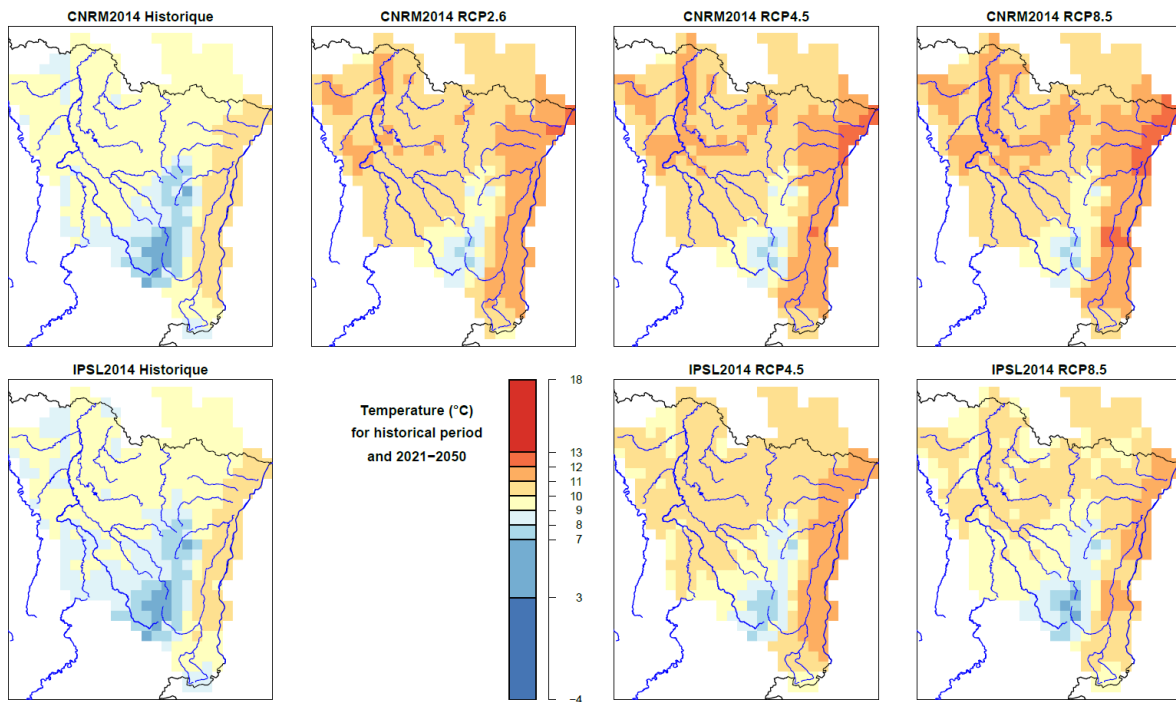


Figure 23 : Température annuelle moyenne (°C) pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), pour la période de référence 1971-2000 (gauche) et la période 2021-2050 pour les scénarios radiatifs RCP2.5, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

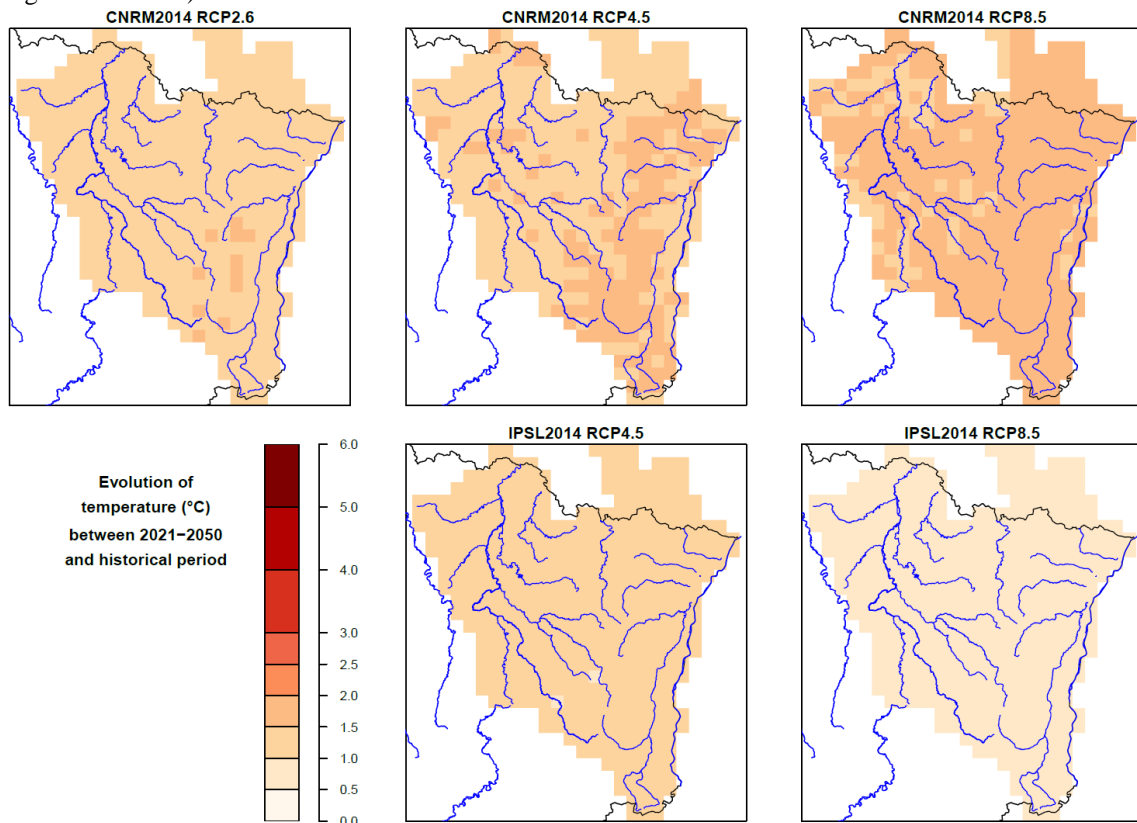


Figure 24 : Ecart de température annuelle moyenne (°C) pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), entre 2021-2050 et la période de référence (1971-2000) pour les scénarios radiatifs RCP2.5, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

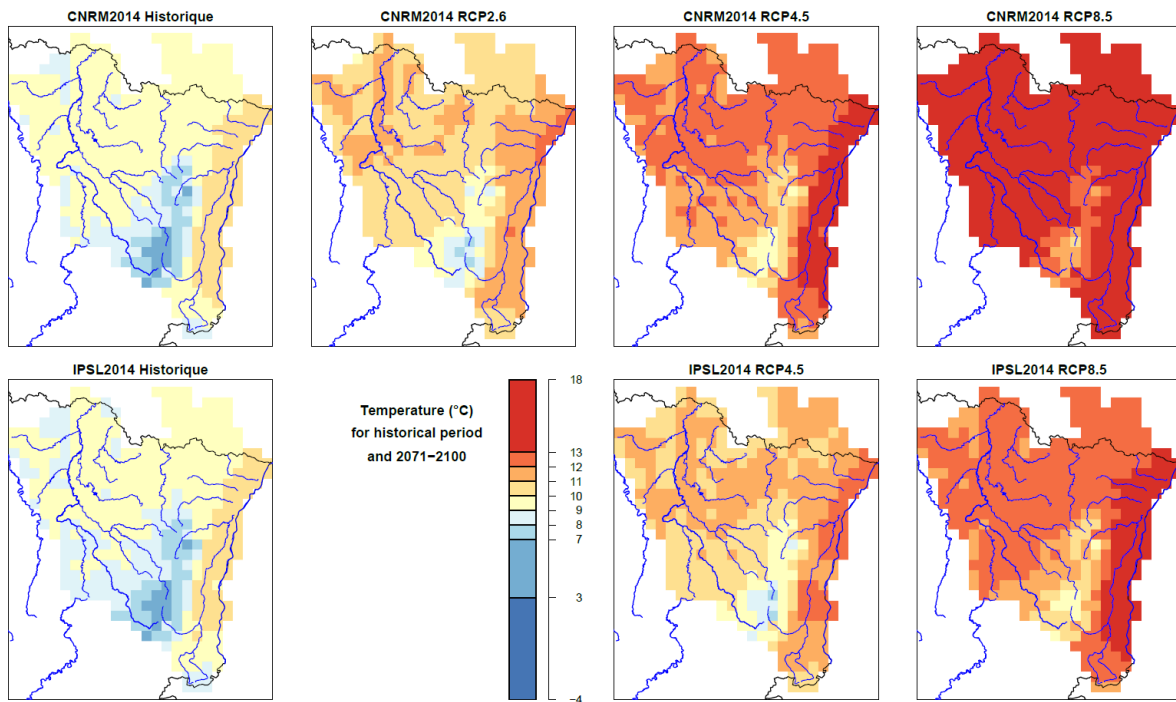


Figure 25 : Température annuelle moyenne (°C) pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), pour la période de référence 1971-2000 (gauche) et la période 2071-2100 pour les scénarios radiatifs RCP2.5, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

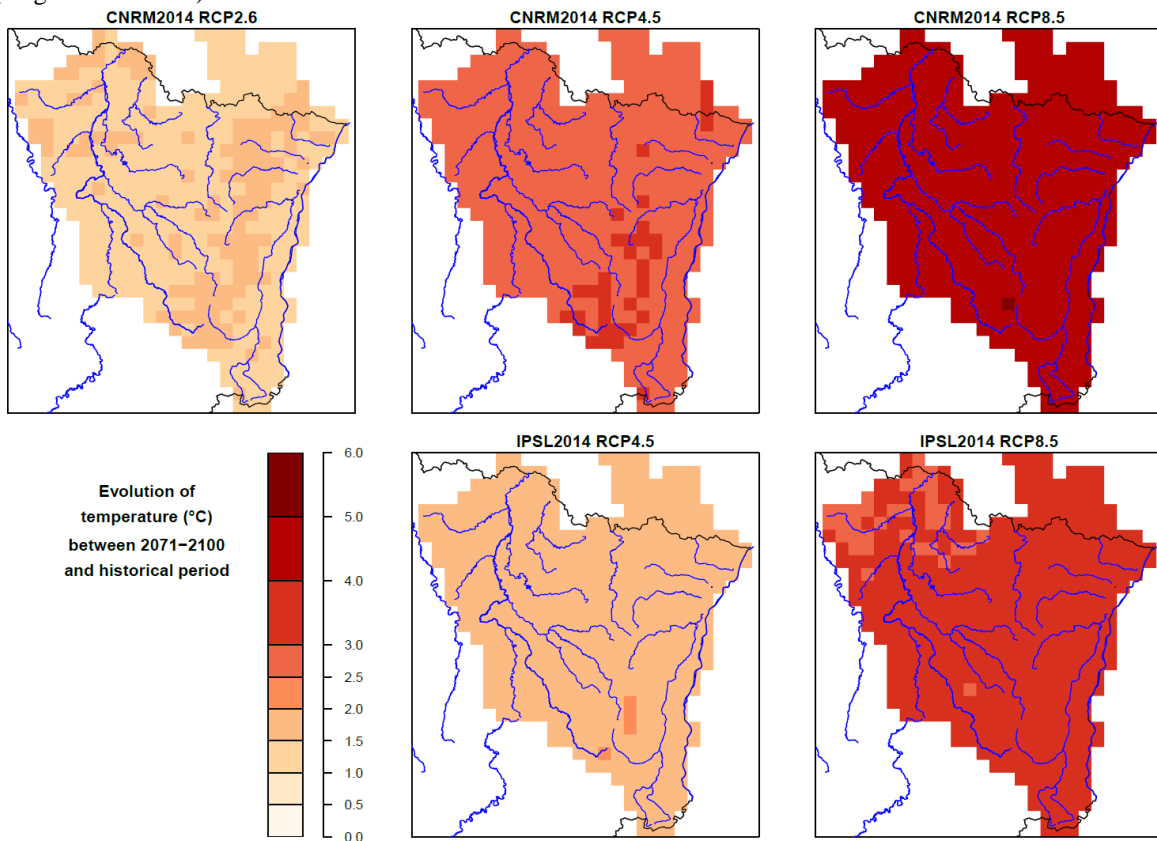


Figure 26 : Ecart de température annuelle moyenne (°C) pour les modèles CNRM2014 (haut) et IPSL2014 (bas), entre 2071-2100 et la période de référence (1971-2000) pour les scénarios radiatifs RCP2.5, 4.5 et 8.5 (de gauche à droite).

4.3.Scénarios RCP (AR5) issus de l'Advanced Delta Change

Il est impossible de présenter l'ensemble des cartes dans ce rapport. Nous les avons donc insérées en Annexe F à titre informatif. Dans la section suivante, nous présentons un résumé des évolutions obtenues avec la méthode ADC, conjointement avec les évolutions données par les projections CNRM et IPSL.

4.4.Résumé des résultats pour l'AR5

L'évolution des précipitations et de la température est résumée sur les figures suivantes. Nous retrouvons ici les évolutions décrites plus tôt, à savoir une augmentation des précipitations pour les scénarios Driads (excepté RCP 2.6) pour le futur proche (Figure 27 gauche), qui est en adéquation avec l'ensemble des scénarios ADC. L'augmentation de la température est, pour chaque projection étudiée (resp. CNRM, IPSL et ADC) du même ordre de grandeur pour tous les RCP pour le futur proche (Figure 28 gauche).

En ce qui concerne le futur lointain, nous observons que les deux modèles Driads (CNRM et IPSL) divergent pour l'évolution de la précipitation, mais restent dans la gamme de valeurs des modèles ADC (Figure 27 droite). Il en est de même pour la température (Figure 28).

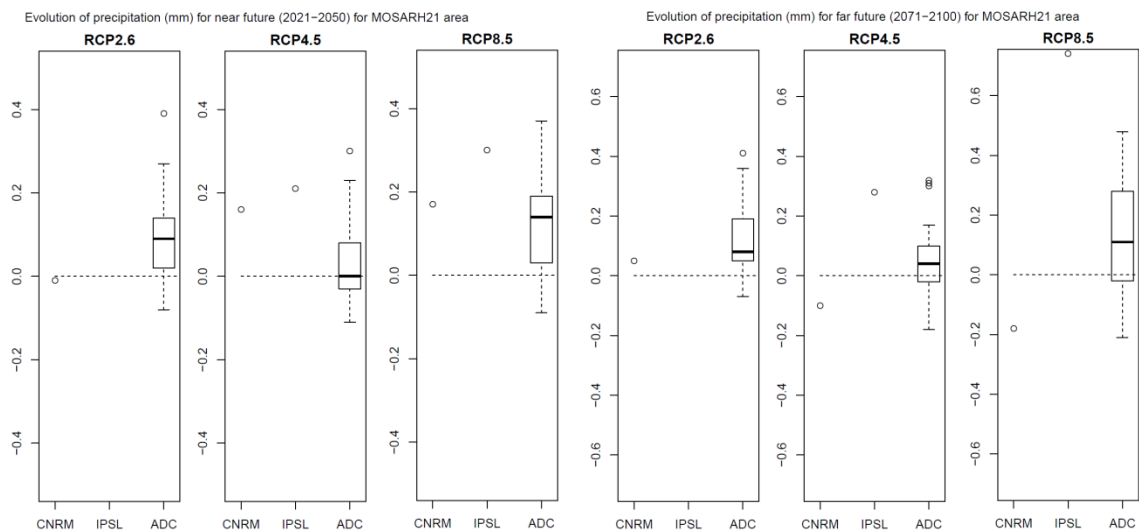


Figure 27 : Evolution des précipitations en mm/j pour le futur proche (gauche) et le futur lointain (droite) pour CNRM2014, IPSL2014 sous différents scénarios radiatifs RCP et de l'ensemble des scénarios ADC sur la zone d'étude de MOSARH21. Les boîtes à moustaches représentent la médiane (trait plein), les quartiles 25 et 75 (boîte) et les percentiles 5 et 95 (moustaches).

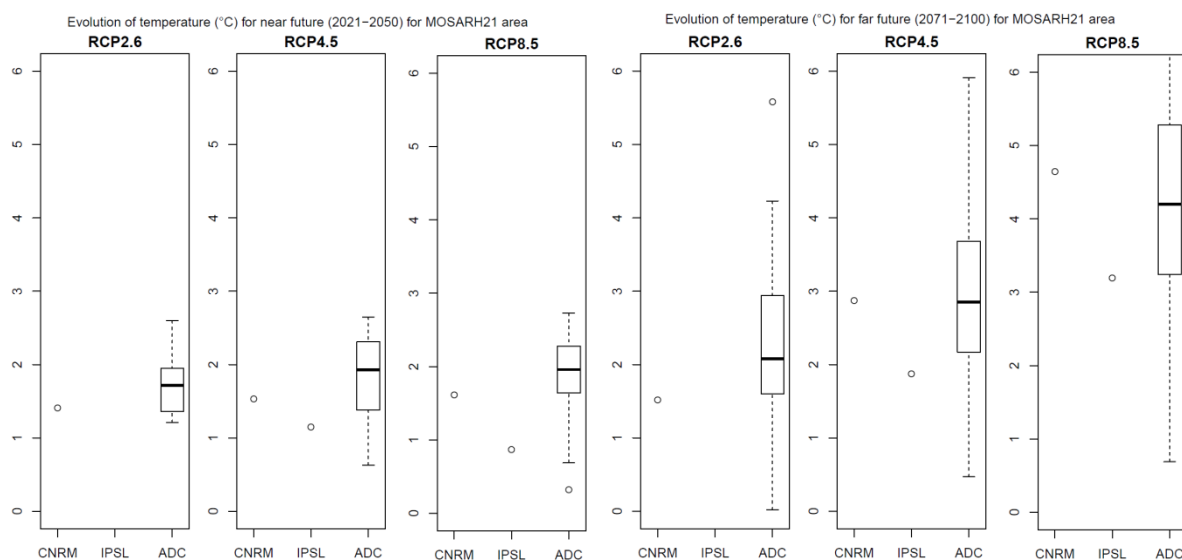


Figure 28 : Evolution de la température pour le futur proche (gauche) et le futur lointain (droite) pour CNRM2014, IPSL2014 sous différents scénarios RCP et de l'ensemble des scénarios ADC sur la zone d'étude de MOSARH21.

Ces évolutions des projections CNRM et IPSL très contrastées pour les précipitations se reflèteront sur les projections hydrologiques. Il conviendra donc d'analyser les projections hydrologiques en gardant cela à l'esprit.

5. Projections hydrologiques

5.1. Evolution des débits futurs (module, crues et étiages)

5.1.1. Analyse conjointe de toutes les stations hydrométriques

Nous donnons dans ce qui suit une vision générale des résultats sur l'ensemble du périmètre d'étude. Cela signifie que les 70 stations sont incluses dans les résultats qui suivent.

- **Débits moyens**

La Figure 29 présente l'évolution des débits annuels dans le futur pour les modèles calés sur la période complète. Cette évolution est exprimée en pourcentage par rapport aux débits simulés sur la période de référence (1971-2000). Ces débits simulés sont obtenus en utilisant comme forçage les projections CNRM et IPSL, respectivement, ainsi que SAFRAN pour les projections ADC. Les deux périodes futures sont représentées sur cette figure.

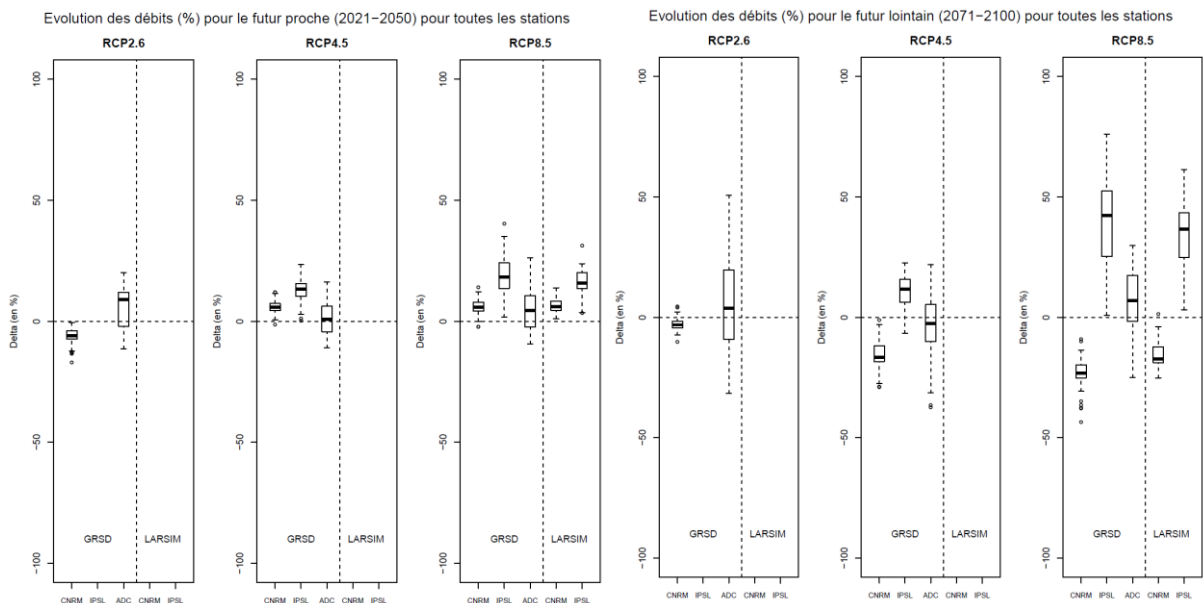


Figure 29 : Distributions des évolutions des débits simulés par les modèles GRSD et LARSIM pour les deux périodes de projection (2021-2050 à gauche ; 2071-2100 à droite) en utilisant trois projections climatiques (CNRM, IPSL et ADC) forcées par trois scénarios radiatifs RCP (2.6, 4.5 et 8.5), sur l'ensemble des bassins de la zone d'étude. Les évolutions en pourcentage de l'ensemble des stations sont agrégées dans les boîtes à moustaches. A noter que sont absents les scénarios radiatifs RCP 2.6 et 4.5 pour LARSIM ainsi que IPSL RCP 2.6.

Nous voyons sur cette figure que les évolutions montrent une faible augmentation ou une stagnation des débits annuels dans le futur proche (variation allant généralement de 0 à +15 % en médiane), excepté pour CNRM RCP2.6 qui présente une tendance médiane à la baisse de 5 %. Les projections IPSL conduisent à une augmentation plus significative que celles du CNRM ou d'ADC.

En revanche, les évolutions sont beaucoup plus contrastées dans le futur lointain : les projections CNRM montrent une diminution parfois forte des débits annuels, allant jusqu'à 25 % en médiane,

celles d'IPSL, une augmentation très forte, allant jusqu'à 40 % en médiane, notamment pour le RCP 8.5, alors que les projections ADC sont plus incertaines. Ces évolutions sont très liées aux évolutions de précipitations illustrées par la Figure 27 et la Figure 28. En effet, seule une augmentation de température permet de revoir à la baisse les évolutions déjà contrastées des précipitations futures. Si l'on compare les évolutions entre les modèles GRSD et LARSIM pour le RCP8.5, les tendances sont similaires, mais GRSD semble simuler des évolutions légèrement plus fortes en valeur absolue que celles produites par LARSIM. Par ailleurs, on constate bien une exacerbation des évolutions en allant du RCP 2.6 au RCP8.5, ce qui était attendu.

- **Débits de crue**

En ce qui concerne les débits les plus forts (ici la crue décennale journalière QJXA10), la tendance est à l'augmentation pour une majeure partie des scénarios climatiques (Figure 30) dans le futur proche (de 0 à +20 % pour la plupart des scénarios). De rares scénarios donnent une tendance à la baisse, tandis que certains scénarios peuvent donner des augmentations de plus de 50%.

Pour le futur lointain, on retrouve une forte différence entre CNRM (peu d'évolution ou baisse) et IPSL (forte augmentation). Les projections ADC donnent une augmentation mesurée ou bien une stagnation des forts débits. Le QJXA10 simulé par GRSD est similaire à celui de LARSIM pour la projection CNRM pour le futur proche, et légèrement plus fort dans les autres cas.

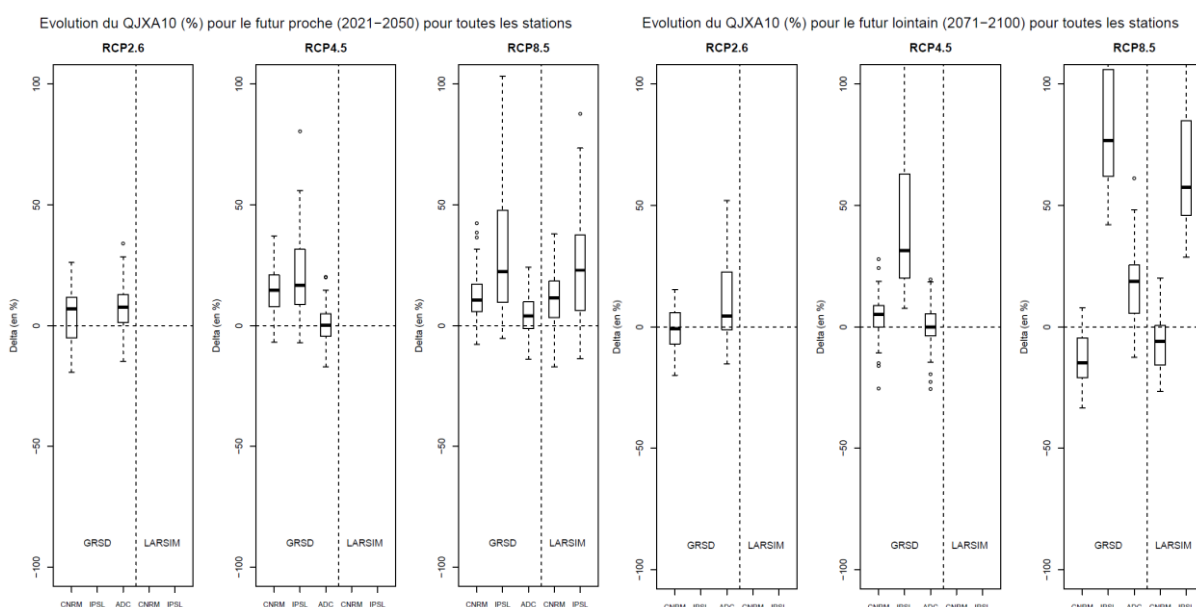


Figure 30 : Idem que la figure précédente pour le QJXA10.

- **Débits d'étiage**

En ce qui concerne les faibles débits (Figure 31), les tendances montrent plutôt une baisse du QMNA5 (*i.e.* une intensification des étiages) dans le futur proche pour les scénarios RCP2.6 et 4.5, alors que les évolutions sont faibles (CNRM et ADC) ou positives (IPSL) pour le RCP8.5. En revanche, à l'exception des projections IPSL, de fortes diminutions sont simulées pour le futur proche (-5 à -60% pour la plupart des scénarios). Les valeurs de QMNA5 semblent plus fortes pour LARSIM avec la projection IPSL, et plus faibles pour la projection CNRM, par rapport à GRSD, avec le RCP8.5.

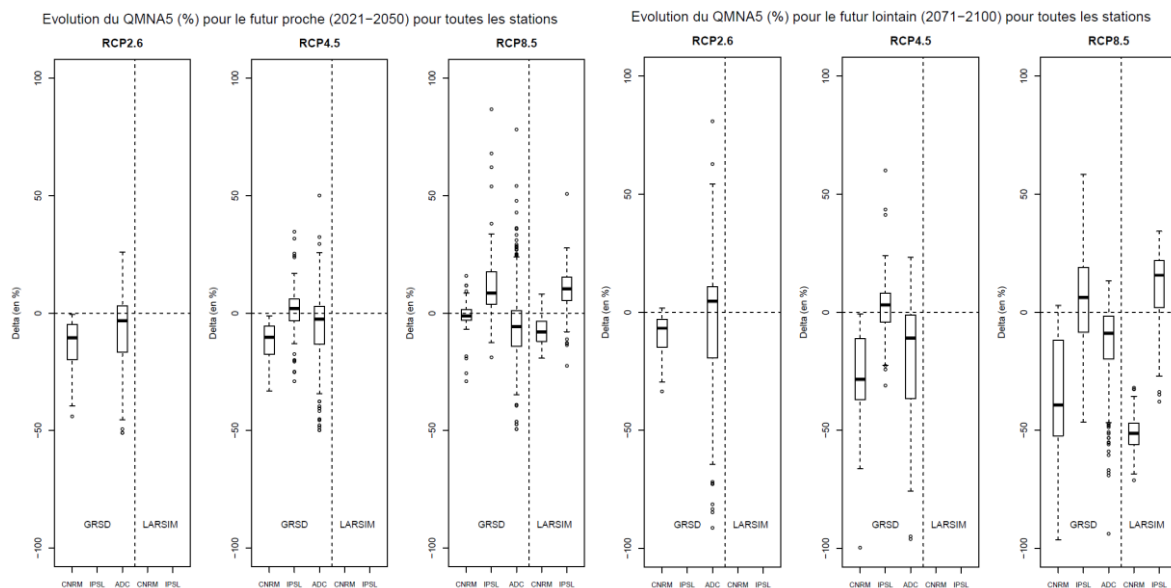


Figure 31 : Idem que la figure précédente pour le QMNA5.

L'analyse de ces projections montre une forte disparité entre les scénarios, avec en premier ordre les MCG et en second ordre les RCP. En revanche, quel que soit l'indicateur étudié, on observe que l'incertitude liée au modèle hydrologique semble faible : les deux modèles utilisés donnent des gammes d'évolution comparables.

5.1.2. Analyse spatiale

5.1.2.1. Scénario radiatif optimiste (RCP 2.6)

Les figures suivantes montrent une analyse spatiale des résultats pour le scénario RCP 2.6, c'est-à-dire le plus optimiste des scénarios en termes d'évolution du bilan radiatif terrestre. Les évolutions de débits aux stations sont reportées sur les sous-bassins respectifs. Nous ne disposons pour ce scénario que du seul modèle GRSD.

- **Débits moyens**

La Figure 32 montre que les débits annuels moyens seront en légère diminution (-5 à -15%) sur une large partie de la zone d'étude, et plutôt stables ailleurs (Vosges, Moselle amont) dans le futur proche. En ce qui concerne le futur lointain, ce sont les bassins situés dans le nord-ouest qui seront le plus impactés, les autres semblant épargnés. Ces résultats, couplés aux scénarios ADC (Figure 29) montrent qu'un scénario à faible émission de gaz à effet de serre nous dirige vers une modification faible de la ressource en eau annuelle.

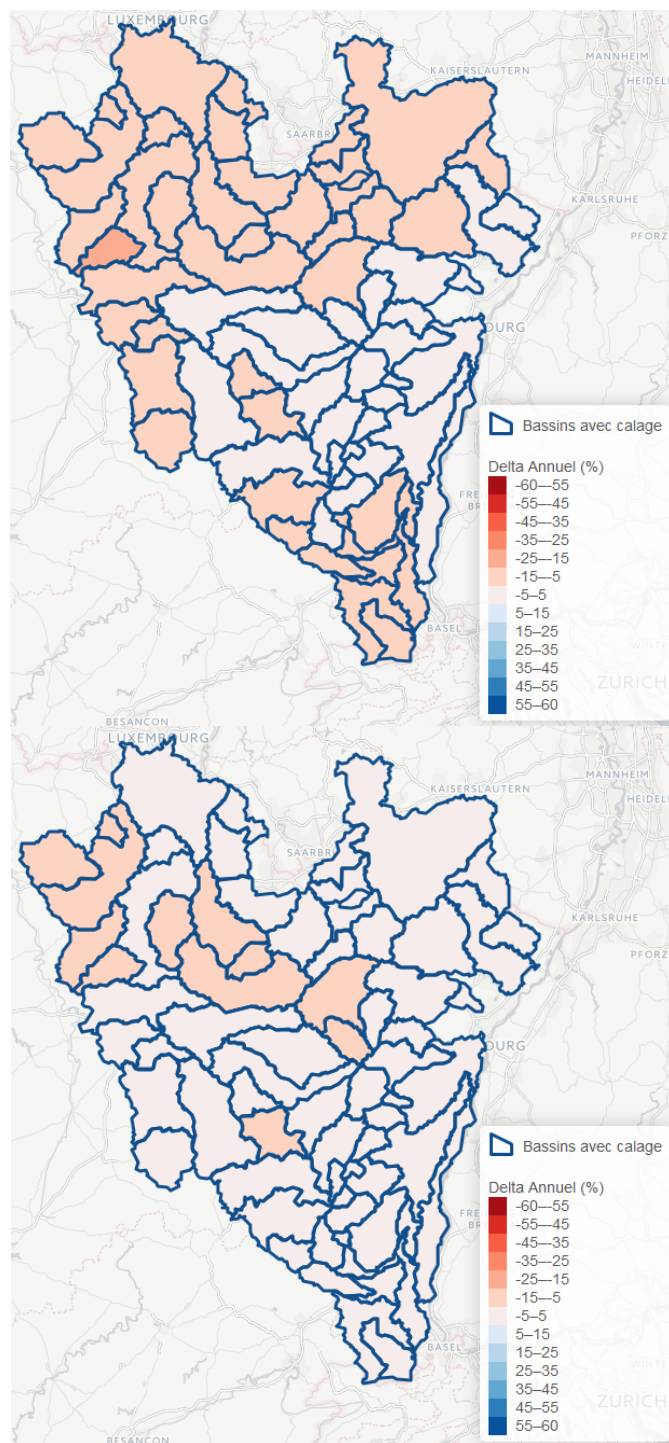


Figure 32 : Evolution du débit annuel pour GRSD en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas) pour la projection CNRM RCP 2.6 en futur proche.

- **Débits de crue**

L'évolution du QJXA10 (Figure 33) est spatialement très contrastée : diminution faible au nord et augmentation faible au sud pour le futur proche, stagnation ou augmentation faible à l'ouest et augmentation faible à l'est pour le futur lointain.

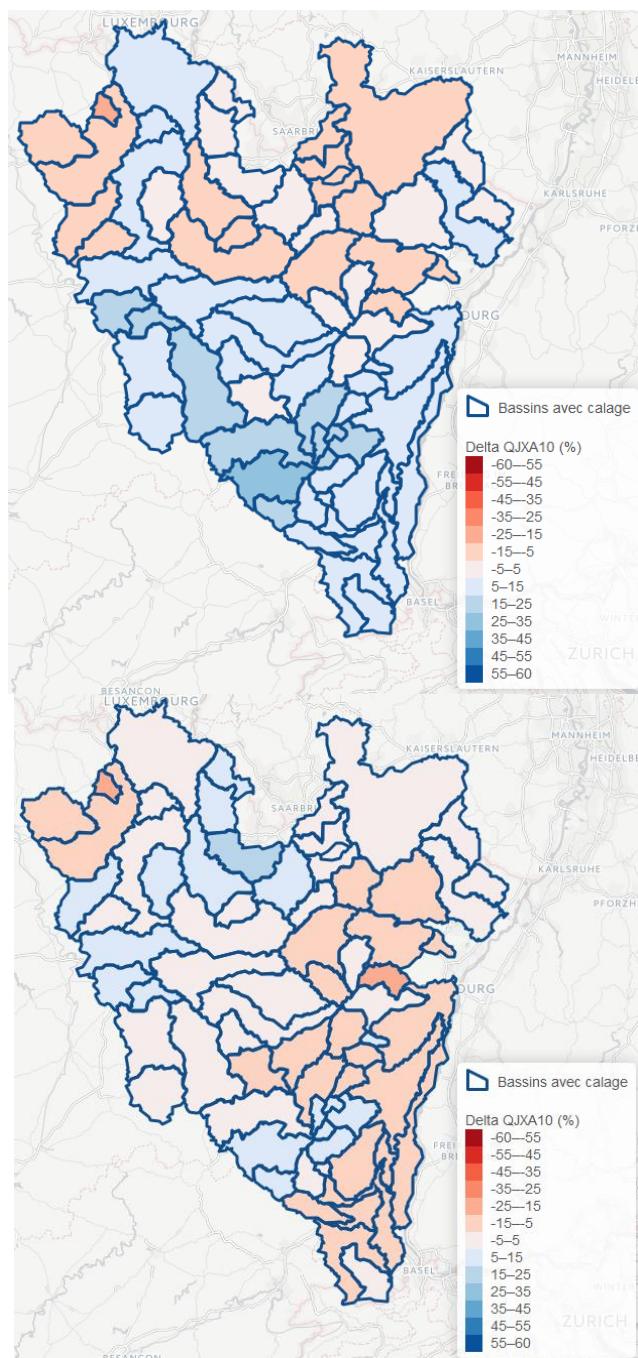


Figure 33 : Evolution du QJXA10 pour GRSD en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas) pour la projection CNRM RCP 2.6 en futur proche.

- **Débits d'étiage**

L'évolution du QMNA5 est à la baisse (Figure 34) et montre une différence très faible sur les deux périodes futures. Au niveau géographique, les bassins les plus touchés se situent surtout au niveau de la Moselle amont.

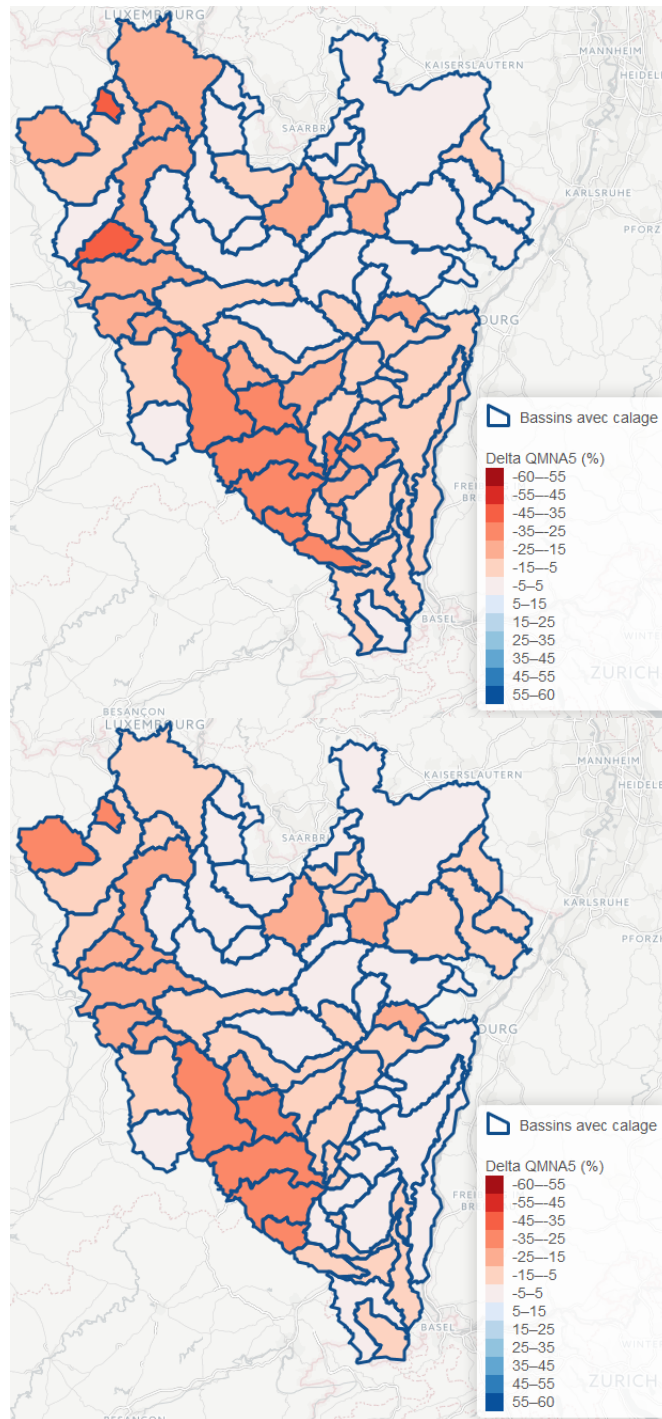


Figure 34 : Evolution du QMNA5 pour GRSD en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas) pour la projection CNRM RCP 2.6 en futur proche.

5.1.2.2. Scénario pessimiste (RCP 8.5)

Les figures suivantes montrent une analyse spatiale des résultats pour le RCP 8.5, c'est-à-dire le plus pessimiste en termes d'évolution du bilan radiatif terrestre.

- **Débits moyens**

La Figure 35 (gauche) montre l'évolution du débit annuel en pourcentage pour GRSD entre le futur proche et la période de référence de la projection CNRM RCP 8.5. Ces évolutions sont assez faibles ;

la moitié des stations présentent des évolutions situées entre -5 et +5 %, et l'autre moitié des augmentations inférieures à 15%. La Figure 35 (droite) montre le même indicateur pour LARSIM ; les résultats sont très similaires. La répartition spatiale semble montrer que le nord-ouest de la zone d'étude serait peu impacté, alors que le massif des Vosges subirait plutôt une augmentation du débit annuel.

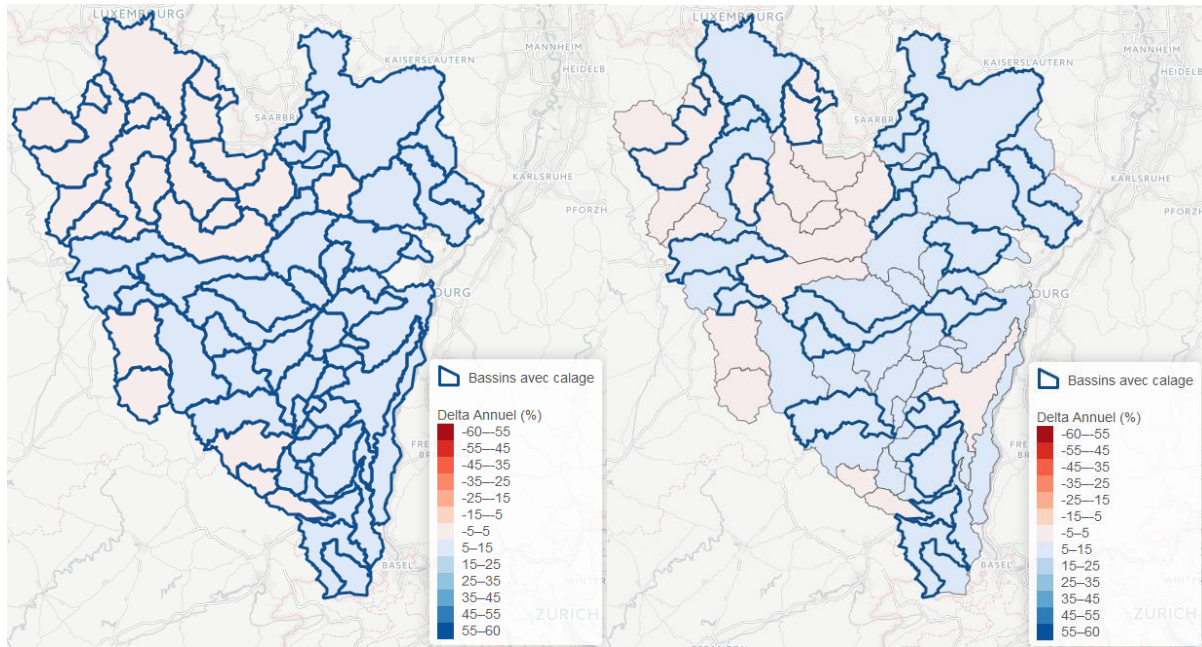


Figure 35 : Evolution du débit annuel pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection CNRM RCP 8.5 en futur proche.

Pour la période du futur lointain, la diminution du débit annuel est nette pour les deux modèles. Cependant, le modèle GRSD semble montrer une diminution plus importante que le modèle LARSIM (Figure 36). On remarque sur ces figures que les Vosges seront moins impactées que le reste de la zone d'étude.

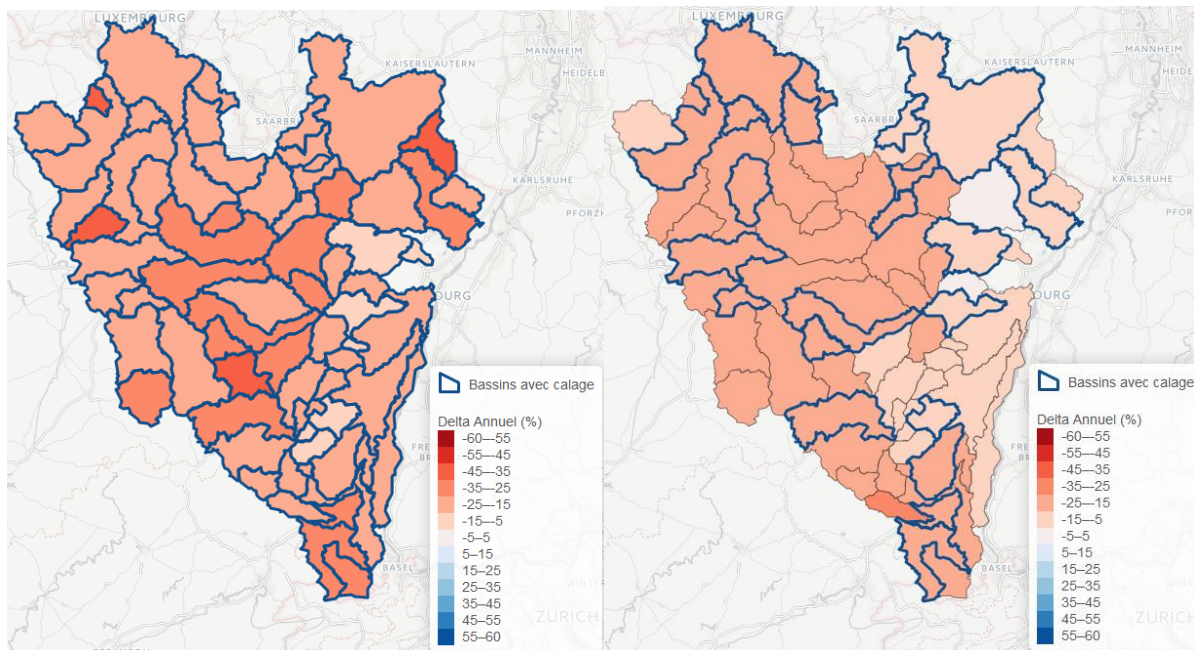


Figure 36 : Identique à la Figure 35 pour le futur lointain.

L'évolution des débits pour la projection IPSL RCP 8.5 est totalement différente : ici, les deux modèles hydrologiques indiquent une augmentation des débits moyens annuels (Figure 37). Cette évolution est conforme à l'évolution des précipitations (Figure 20 et Figure 22). L'augmentation des débits moyens annuels est particulièrement forte pour la partie nord de la zone d'étude ainsi que pour l'extrême sud.

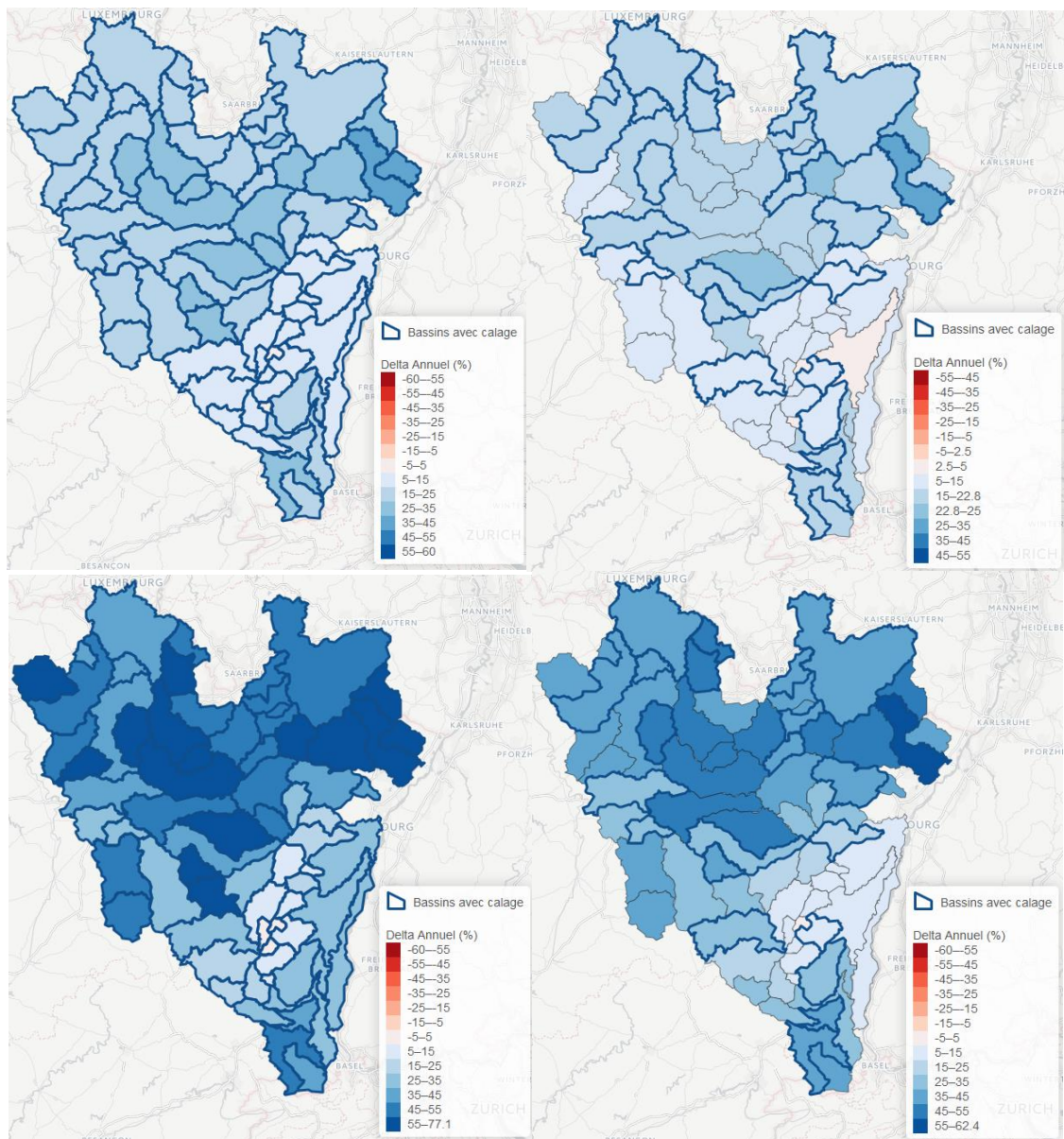


Figure 37 : Evolution des débits moyens annuels pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection IPSL RCP 8.5 en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas).

- **Débits de crue**

L'évolution du QJXA10 est montrée pour la projection CNRM sur la Figure 38 et pour l'IPSL sur la Figure 39. La projection CNRM montre une augmentation en futur proche (généralement entre +5 et +25 %) et une diminution en futur lointain pour GRSD (entre -15 et -35 % à l'échelle de la zone d'étude) et des résultats contrastés pour LARSIM (légère augmentation au nord, légère diminution au sud). La projection IPSL montre une augmentation du QJXA10 très forte sur le nord-est de la zone, et modérée ailleurs, en futur proche. Pour le futur lointain, cette augmentation serait très forte partout. Ces observations sont cohérentes avec la Figure 30.

Si les évolutions du QJXA10 en futur lointain sont très différentes, conformément aux évolutions des précipitations, il semblerait qu'à plus brève échéance, on se dirige vers une augmentation des crues. L'intensité de cette augmentation semble en revanche très incertaine. Il est à noter que les

projections ADC nous indiquent elles aussi une augmentation raisonnable en futur proche, et plus importante en futur lointain (Figure 30).

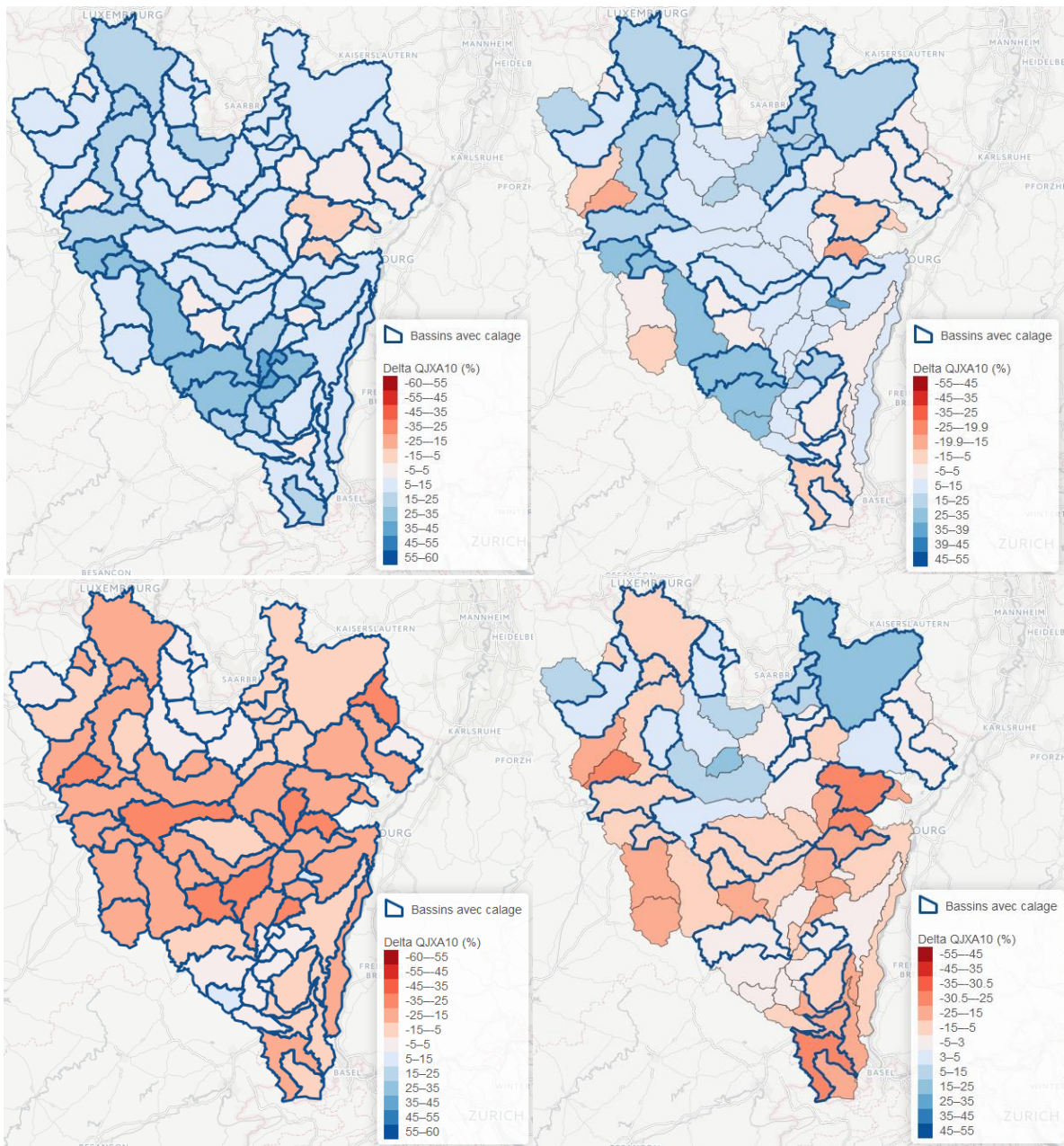


Figure 38 : Evolution du QJXA10 pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection CNRM RCP 8.5 en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas).

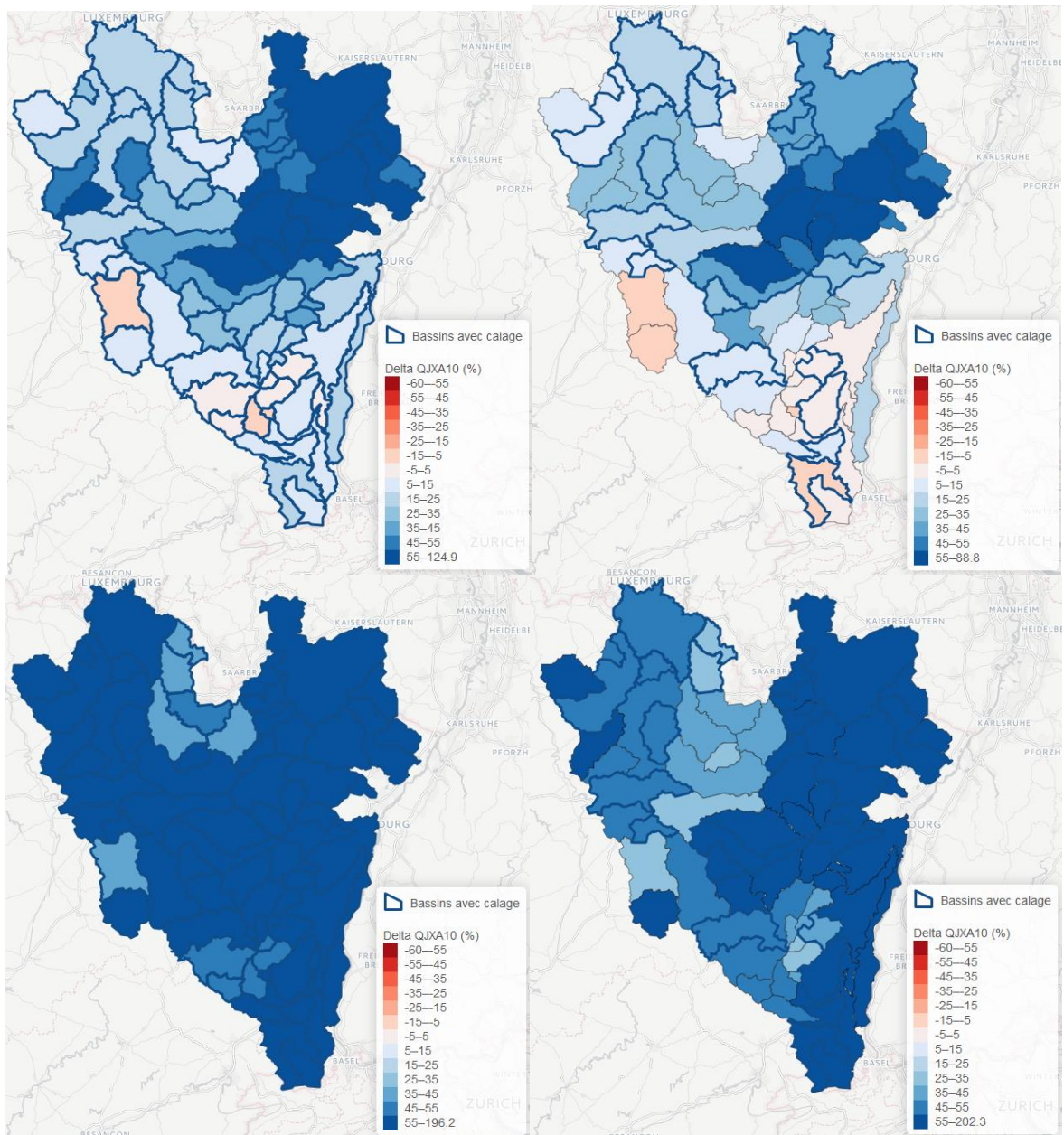


Figure 39 : Evolution du QJXA10 pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection IPSL RCP 8.5 en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas).

- **Débits d'étiage**

Les évolutions du QMNA5 sont très contrastées : diminution de ces valeurs ou stagnation en futur proche, diminution forte en futur lointain pour la projection CNRM (Figure 40) ; augmentation modérée en futur proche et en futur lointain sur la zone d'étude excepté les Vosges pour la projection IPSL (Figure 41). Nous remarquons que l'ensemble des projections indiquent une diminution faible à forte du QMNA5 en futur lointain sur la majeure partie des Vosges. Il est difficile de conclure sur une évolution la plus probable sur la base de ces seules projections. Les scénarios ADC quant à eux indiquent plutôt une diminution du QMNA5 (Figure 31).

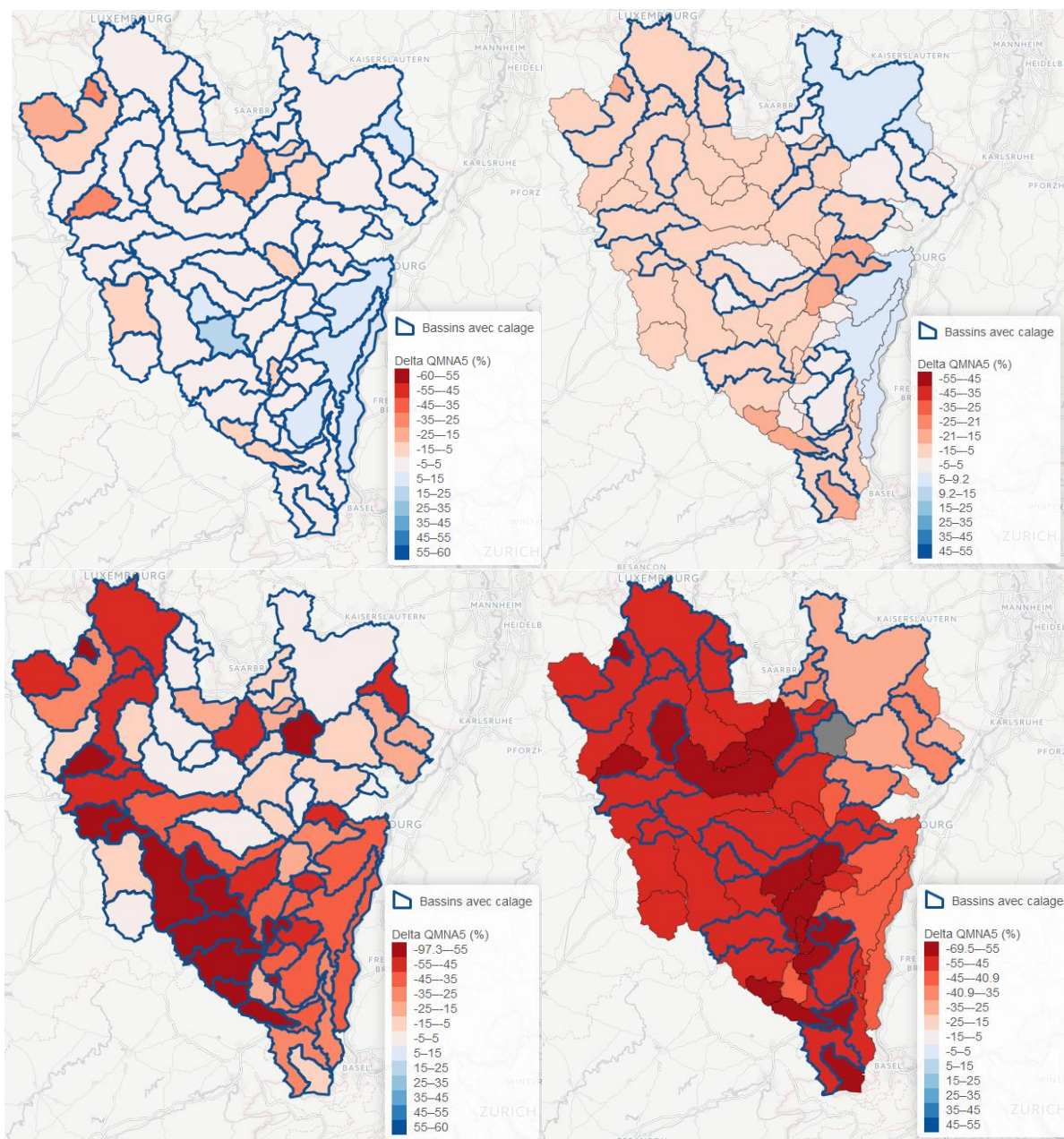


Figure 40 : Evolution du QMNA5 pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection CNRM RCP 8.5 en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas).

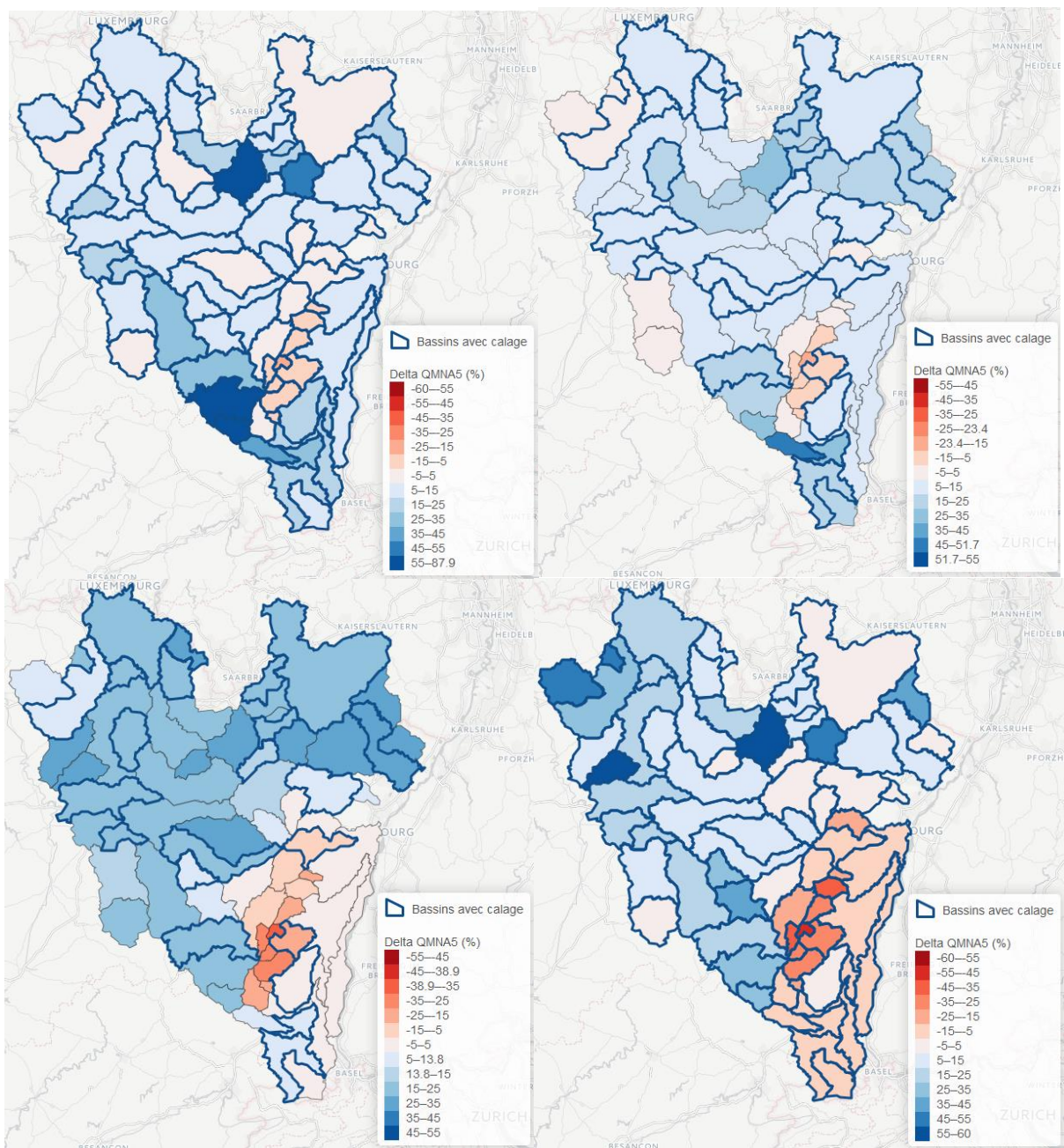


Figure 41 : Evolution du QMNA5 pour GRSD (à gauche) et LARSIM (à droite) pour la projection IPSL RCP 8.5 en futur proche (en haut) et en futur lointain (en bas).

5.2. Evolution des régimes et fiches synthétiques

Afin de faciliter l'appropriation des résultats par les gestionnaires de l'eau, des fiches synthétiques ont été créées pour chaque station hydrométrique du projet (Annexe E) :

- une fiche pour le climat,
- une fiche spécialisée sur les crues,
- une fiche spécialisée sur les étiages.

Ceci représente un total de $70 \times 3 = 210$ fiches-stations. Le but est de permettre l'accès à des résultats suffisamment détaillés sur chacune des stations, sans pour autant fournir l'ensemble des informations disponibles, ce qui rendrait les fiches peu lisibles.

Chacune des fiches est découpée en plusieurs parties et sous-parties de la manière suivante :

- Descriptif de la fiche et indications sur la station
- Situation de référence
- Evolution pour le futur proche
 - o Hypothèse optimiste (RCP 2.6)
 - o Hypothèse intermédiaire (RCP 4.5)
 - o Hypothèse pessimiste (RCP 8.5)
- Evolution pour le futur lointain
 - o Hypothèse optimiste (RCP 2.6)
 - o Hypothèse intermédiaire (RCP 4.5)
 - o Hypothèse pessimiste (RCP 8.5)

Les fiches illustrent les régimes climatiques et hydrologiques (sous forme de tableaux et de graphes) et les indicateurs sur la période de référence. Les évolutions de régimes sont exprimées en pourcentage et les indicateurs en valeurs brutes sur les périodes futures.

La Figure 42 montre la partie supérieure d'une fiche-climat. Le descriptif fournit des renseignements sur le bassin, les données utilisées et les périodes étudiées. Ensuite, la situation de référence est caractérisée par l'évolution mensuelle des précipitations, températures et évapotranspirations potentielles, ainsi que par leur valeur annuelle, pour les observations (SAFRAN) et les deux projections de référence (CNRM et IPSL). Les régimes mensuels sont représentés graphiquement et montrent une très bonne représentation de la courbe des températures et de l'évapotranspiration potentielle sur ce bassin, ainsi qu'une assez bonne représentation des précipitations, même si certains mois sont sous-estimés ou surestimés. Ceci est classique des MCG, le phénomène de précipitation étant plus difficile à représenter que la température. Cependant, les totaux annuels restent acceptables.

Ordre de grandeur des climats futurs possibles sous les scénarios du cinquième rapport du GIEC, les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP).

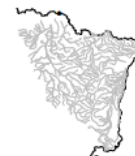
Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles.

Fiche climat - Moselle à Perl (DE)

Station	Perl (DE)
Rivière	Moselle
Code HYDRO	PERLXXXX
Surface	11556 km ²
Coordonnées Lamb. II (m)	892426, 2504755
Période de référence	1971-2000
Période futur proche	2021-2050
Période futur lointain	2071-2100

Les évolutions climatologiques sont calculées entre une période de référence en climat présent (1971-2000) et des périodes en climat futur proche (2021-2050) et futur lointain (2071-2100). Différents modèles climatiques désagrégés sont utilisés : les modèles du CNRM et de l'IPSL avec désagrégation dynamique, ainsi que de trois à quatre modèles avec désagrégation statistique grâce à la méthode de l'Advanced Delta Change (ADC). Les résultats peuvent être présentés sous forme de deltas entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P et ETP. Les valeurs minimales, médianes et maximales sont calculées pour les scénarios ADC.

Cette fiche fournit des indicateurs climatologiques. Pour les crues et les étiages, des fiches crues et étiages additionnelles sont disponibles. Le rapport final du projet MOSARH21 donne de plus amples détails sur la méthodologie et la configuration des modèles climatiques et hydrologiques.



Situation de référence (1971-2000)

Indicateurs des climats observés (SAFRAN) et simulés sur la période de référence. Les indicateurs obtenus avec les scénarios ADC, de par leur construction, sont identiques aux observations.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Annual
Préc. obs (mm)	88	75	75	64	88	88	75	68	77	89	95	106	981
Préc. CNRM (mm)	106	73	73	77	76	101	87	60	73	90	85	85	992
Préc. IPSL (mm)	94	64	71	64	92	87	87	61	69	80	94	101	968
Temp. obs (°C)	1.2	2.0	5.2	8.0	12.6	15.6	18.0	17.6	13.8	9.3	4.5	2.4	9.2
Temp. CNRM (°C)	1.8	1.2	5.2	7.9	12.1	15.1	17.5	17.8	14.1	9.7	4.6	1.8	9.1
Temp. IPSL (°C)	0.8	1.0	5.0	8.8	11.4	14.0	18.2	17.4	13.8	9.1	5.4	2.1	8.9
Evap. pot. obs (mm)	8	12	80	82	88	106	119	100	61	33	18	8	634
Evap. pot. CNRM (mm)	10	12	80	51	88	110	122	108	62	34	16	10	655
Evap. pot. IPSL (mm)	10	11	29	58	85	105	126	102	61	38	17	11	646

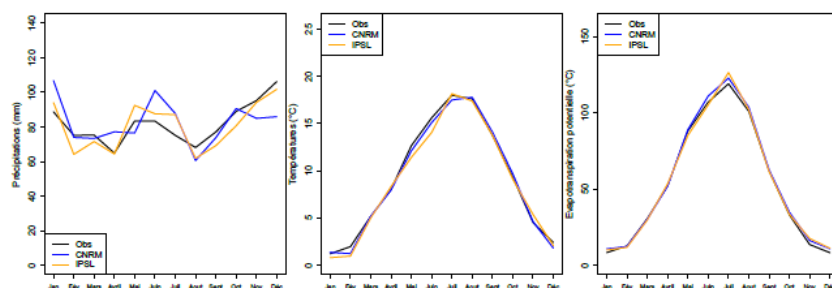


Figure 42 : Exemple de fiche climat pour la Moselle à Perl (partie supérieure, situation de référence).

La Figure 43 illustre un exemple de renseignements fournis pour une période de projection. Ici, les indices climatiques mensuels et annuels sont fournis en termes de valeurs brutes pour les projections CNRM et IPSL et de pourcentages pour les projections ADC. Par ailleurs, l'ensemble des valeurs mensuelles sont données sous forme de graphes pour tous les MCG. Cette partie de la fiche climat montre que les précipitations sont très incertaines (évolutions diverses selon le MCG) et que la moyenne annuelle sera stable à légèrement supérieure à la valeur de référence. En ce qui concerne les températures et l'évapotranspiration potentielle, l'augmentation est claire, même si l'intensité de celle-ci varie selon les MCG.

Hypothèse pessimiste (RCP 8.5)

Indicateurs des climats en futur proche avec le scénario RCP8.5.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuel
CNRM (mm)	99	90	80	72	86	116	85	61	61	98	100	100	1053
IPSL (mm)	102	80	79	86	88	97	87	77	74	77	113	111	1075
Δ min (%)	+ 4	+ 1	+ 2	- 3	- 9	- 12	- 8	+15	-10	- 5	+ 2	+ 2	- 0
Δ med (%)	+ 6	+ 5	+10	+10	+ 1	- 4	+ 4	+25	+ 1	- 1	+ 6	+ 7	+ 5
Δ max (%)	+11	+ 9	+19	+15	+10	+11	+19	+41	+15	+ 9	+ 8	+11	+13
CNRM (°C)	2.4	2.6	6.3	9.7	13.8	16.5	19.0	20.0	16.0	11.1	6.6	3.5	10.7
IPSL (°C)	2.1	1.5	6.2	8.6	12.3	14.5	18.5	17.9	14.9	10.5	7.3	2.4	9.8
Δ min (°C)	+ 0.3	+ 0.5	+ 0.5	+ 1.0	+ 0.9	+ 1.4	+ 1.7	+ 1.0	+ 1.1	+ 1.3	+ 1.6	+ 0.5	+ 1.1
Δ med (°C)	+ 1.4	+ 1.4	+ 1.0	+ 1.8	+ 1.6	+ 2.2	+ 1.9	+ 1.5	+ 2.0	+ 2.1	+ 2.0	+ 0.8	+ 1.6
Δ max (°C)	+ 1.7	+ 2.1	+ 2.0	+ 2.0	+ 2.1	+ 3.1	+ 2.8	+ 2.1	+ 3.4	+ 2.3	+ 3.2	+ 2.1	+ 2.3
CNRM (mm)	12	14	33	58	97	118	131	113	68	38	19	13	719
IPSL (mm)	11	12	33	54	89	108	128	104	65	36	20	11	676
Δ min (%)	+ 4	+ 7	+ 4	+ 7	+ 5	+ 6	+ 7	+ 4	+ 6	+ 9	+17	+ 6	+ 6
Δ med (%)	+19	+19	+ 9	+13	+ 9	+10	+ 8	+ 6	+10	+14	+21	+10	+10
Δ max (%)	+23	+29	+19	+15	+11	+15	+12	+ 9	+18	+16	+33	+27	+14

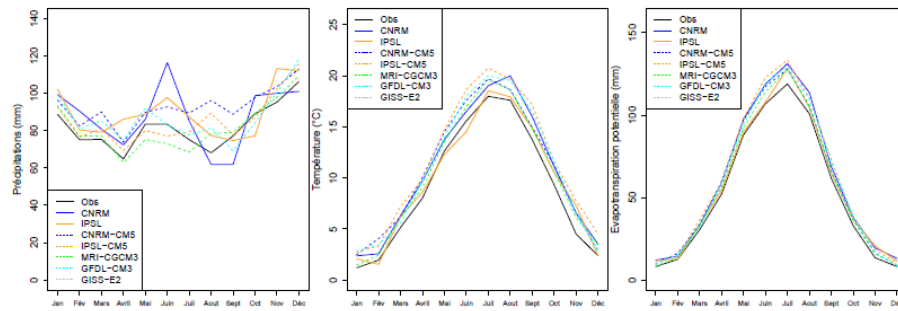


Figure 43 : Exemple de fiche climat pour la Moselle à Perl : extrait des indicateurs fournis pour une période future. Cas du RCP8.5 pour le futur proche.

Les fiches crues et étiages sont construites de manière similaire. Cependant, en plus de régimes, des indicateurs hydrologiques sont indiqués. Les fiches crues (Figure 44) indiquent ainsi les QJXA pour trois périodes de retour et les quantiles 95 et 99. Sur cette station précise, en futur proche les évolutions semblent faibles, si ce n'est pour la projection IPSL qui semble montrer une augmentation du débit et des indices de crue, notamment pour LARSIM (Figure 44 et Figure 45).

Ordre de grandeur des débits futurs possibles sous les scénarios du cinquième rapport du GIEC, les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP).

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.

Station	Perl (DE)
Rivière	Moselle
Code HYDRO	PERLXXXX
Surface	11556 km ²
Coordonnées Lamb. II (m)	892426, 2504755
Modèles hydrologiques	GRSD, LARSIM
Calage GRSD	Oui
Calage LARSIM	Oui
Période de calage	1971-2000
Période de référence	1971-2000
Période futur proche	2021-2050
Période futur lointain	2071-2100

Fiche crues - Moselle à Perl (DE)

Les évolutions hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1971-2000) et des simulations en climat futur proche (2021-2050) et futur lointain (2071-2100). Différents modèles climatiques désagrégés sont utilisés en forçage des modèles hydrologiques : les modèles du CNRM et de l'IPSL avec désagrégation dynamique, ainsi que de trois à quatre modèles avec désagrégation statistique grâce à la méthode de l'Advanced Delta Change (ADC). Les résultats futurs sont présentés sous forme de deltas entre présent et futur, (FUT-PST)/PST. Les valeurs minimales, médianes et maximales sont calculées pour les scénarios ADC. Selon les stations, les scénarios et les périodes, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés. Cette fiche fournit des régimes et des indicateurs hydrologiques liés aux crues. Pour les étiages et le climat, des fiches étiages et climat additionnelles sont disponibles. Le rapport final du projet MOSARH21 donne de plus amples détails sur la méthodologie et la configuration des modèles climatiques et hydrologiques.



Situation de référence (1971-2000)

Régimes et indicateurs des débits observés et simulés sur la période de référence. Tobs indique que les modèles ont été forcés par les observations SAFRAN, Tpst indique que les modèles ont été forcés par les sorties des modèles climatiques. Les débits et indicateurs obtenus avec les scénarios ADC, de par leur construction, sont identiques à Qsim Tobs.

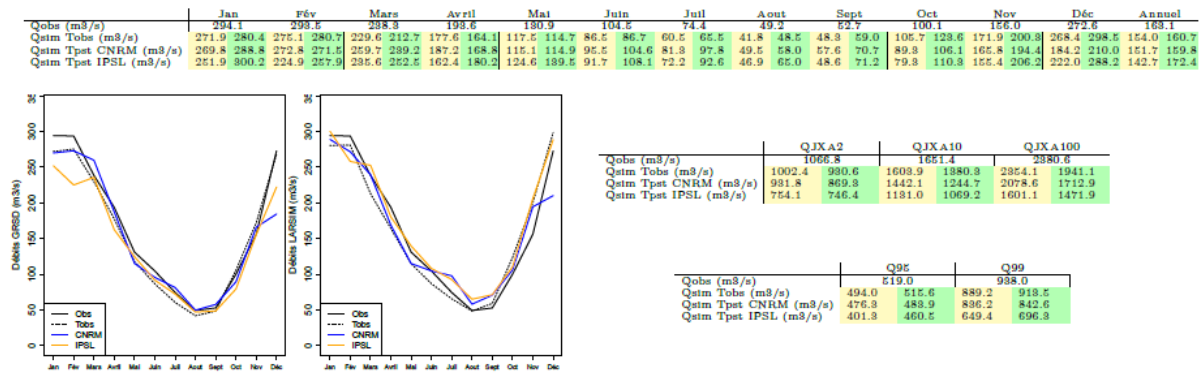


Figure 44 : Exemple de fiche crues pour la Moselle à Perl (partie supérieure, situation de référence).

Hypothèse pessimiste (RCP8.5)

Régimes et indicateurs des débits obtenus en forçant les modèles hydrologiques en futur proche avec le scénario RCP8.5.

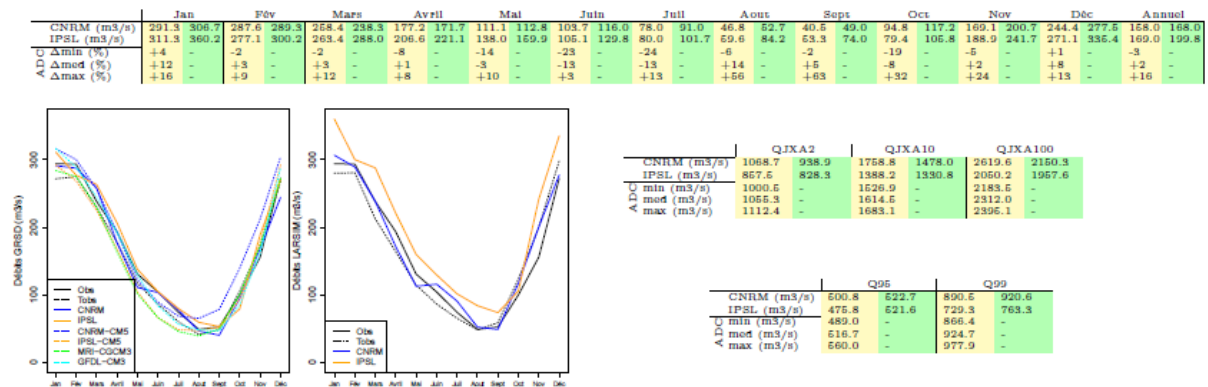


Figure 45 : Exemple de fiche crues pour la Moselle à Perl : extrait des indicateurs fournis pour une période future. Cas du RCP8.5 pour le futur proche.

Sur les fiches étiages, les indicateurs affichés sont le QMNA5, ainsi que des VCN3 et VCN7 sur différentes périodes de retour (Figure 46 et Figure 47). Nous remarquons ici aussi de faibles évolutions, si ce n'est une augmentation des débits d'étiage.

Ordre de grandeur des débits futurs possibles sous les scénarios du cinquième rapport du GIEC, les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP).

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.

Station	Perl (DE)
Rivière	Moselle
Code HYDRO	PERLXXX
Surface	11556 km ²
Coordonnées Lamb. II (m)	892426, 2504755
Modèles hydrologiques	GRSD , LARSIM
Calage GRSD	Oui
Calage LARSIM	Oui
Période de calage	1971-2000
Période de référence	1971-2000
Période futur proche	2021-2050
Période futur lointain	2071-2100

Fiche étiages - Moselle à Perl (DE)

Les évolutions hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1971-2000) et des simulations en climat futur proche (2021-2050) et futur lointain (2071-2100). Différents modèles climatiques désagrégés sont utilisés en forçage des modèles hydrologiques : les modèles du CNRM et de l'IPSL, avec désagrégation dynamique, ainsi que de trois à quatre modèles avec désagrégation statistique grâce à la méthode de l'Advanced Delta Change (ADC). Les résultats futurs sont présentés sous forme de deltas entre présent et futur, (FUT-PST)/PST. Les valeurs minimales, médianes et maximales sont calculées pour les scénarios ADC. Selon les stations, les scénarios et les périodes, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés. Cette fiche fournit des régimes et des indicateurs hydrologiques liés aux étiages. Pour les crues et le climat, des fiches crues et climat additionnelles sont disponibles. Le rapport final du projet MOSARH21 donne de plus amples détails sur la méthodologie et la configuration des modèles climatiques et hydrologiques.



Situation de référence (1971-2000)

Régimes et indicateurs des débits observés et simulés sur la période de référence. Tobs indique que les modèles ont été forcés par les observations SAFRAN, Tpst indique que les modèles ont été forcés par les sorties des modèles climatiques. Les débits et indicateurs obtenus avec les scénarios ADC, de par leur construction, sont identiques à Qstm Tobs.

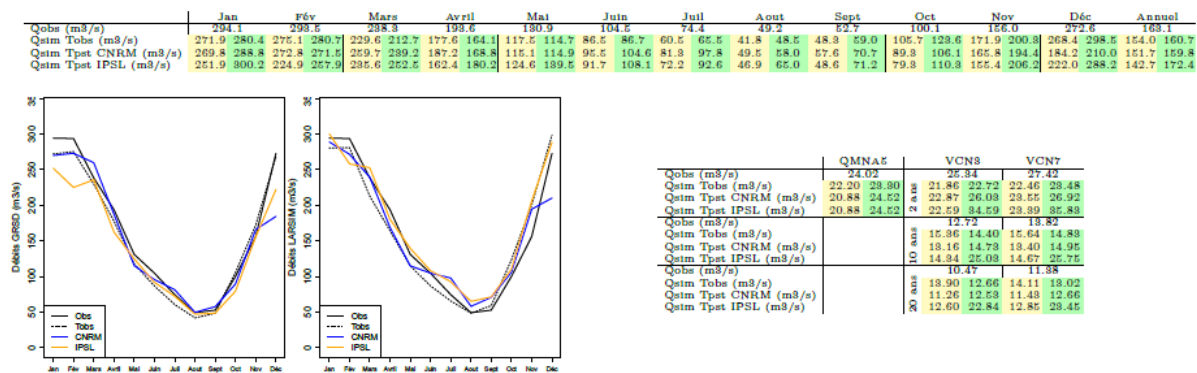


Figure 46 : Exemple de fiche étiages pour la Moselle à Perl (partie supérieure, situation de référence).

Hypothèse pessimiste (RCP8.5)

Régimes et indicateurs des débits obtenus en forçant les modèles hydrologiques en futur proche avec le scénario RCP8.5.

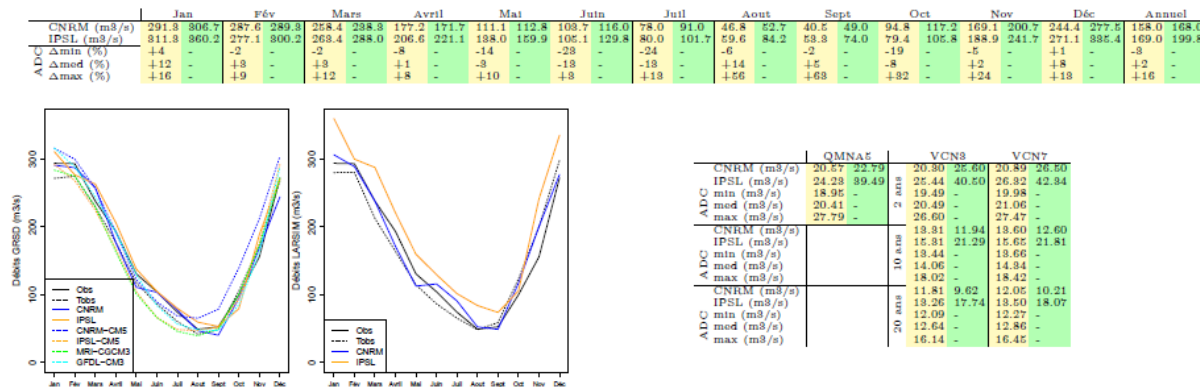


Figure 47 : Exemple de fiche étiages pour la Moselle à Perl : extrait des indicateurs fournis pour une période future. Cas du RCP8.5 pour le futur proche.

5.3. Incertitudes liées au calage des modèles hydrologiques

Un premier aperçu de l'incertitude liée au calage des modèles hydrologiques a été montré dans la section 3 de l'Annexe B. Cette analyse était donnée sur des périodes observées. Ici, nous voulons quantifier l'impact qu'ont les différents calages sur l'évolution des débits obtenus dans le futur. La Figure 48 donne un aperçu de l'incertitude liée au calage des modèles sur les projections hydrologiques. En effet, grâce aux paramètres obtenus en effectuant des calages sur chacune des

deux sous-périodes, nous avons pu réaliser des projections hydrologiques supplémentaires. Celles-ci, en bleu et en rouge sur cette figure, montrent des évolutions très proches de celles obtenues par le calage sur la période complète. Les graphes équivalents pour le QJXA et le QMNA donnent des conclusions équivalentes. Cela montre que l'incertitude liée au calage des modèles hydrologiques est d'une importance encore moins élevée que le choix du modèle hydrologique ou bien des scénarios ou MCG. Nous pouvons donc la négliger dans le cadre de ce projet.

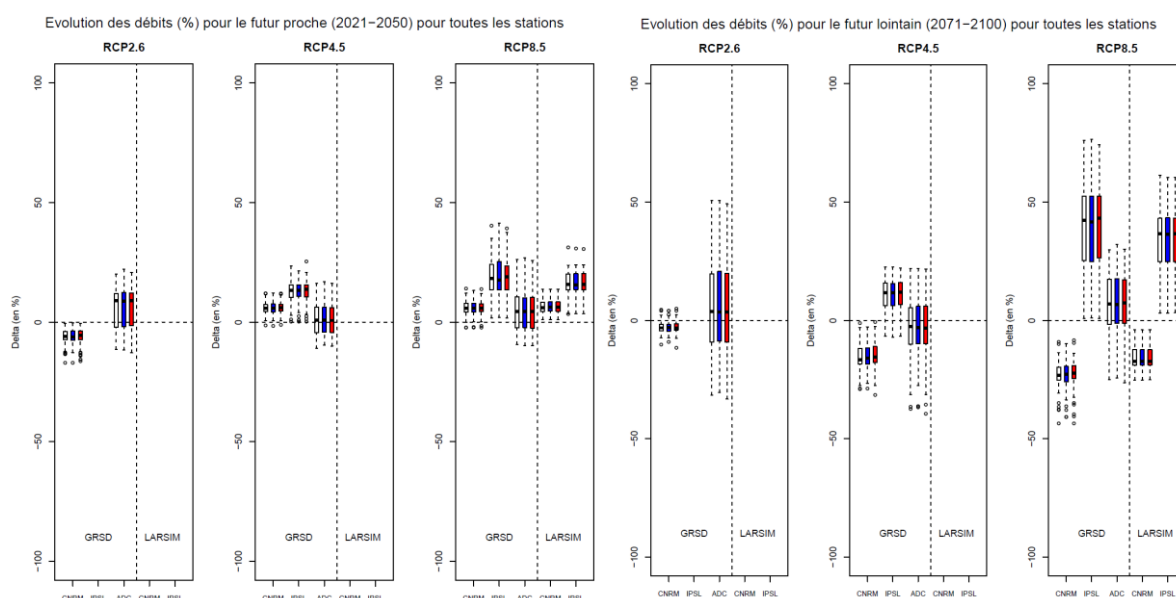


Figure 48 : Evolution des débits pour les deux périodes de projection. Par rapport à la Figure 29, nous avons ajouté ici les évolutions de débits pour les calages sur les deux sous-périodes (P1 en bleu et P2 en rouge).

5.4. Incertitudes sur les calculs des indicateurs

- **Incertitude d'échantillonnage**

De nombreux indicateurs, notamment les QJXA et QMNA pour diverses périodes de retour, sont soumis à ce que l'on appelle l'incertitude d'échantillonnage. Cette incertitude réside dans le fait que ces indicateurs sont estimés sur la base d'échantillons relativement courts (quelques dizaines d'années). L'incertitude d'échantillonnage est d'autant plus grande que la taille de l'échantillon est faible par rapport à la période de retour ciblée.

Il existe de nombreuses méthodes pour quantifier l'incertitude d'échantillonnage, et les outils opérationnels (par exemple le logiciel HYDRO2) opèrent cette quantification en routine. Dans ce projet, la méthode utilisée repose sur l'estimation Bayésienne (Gelman et al., 2004 ; Renard et al., 2013). Elle est détaillée par Renard et al. (2015), et elle est implémentée dans le logiciel JBay¹². Dans le cadre Bayésien, il est aisé et fréquent de représenter l'incertitude de manière ensembliste : pour chaque indicateur (QMNA5, ainsi que VCN et QJXA à diverses périodes de retour), l'estimation Bayésienne fournit N estimations possibles et équiprobables, qui permettent de représenter

¹² <https://forge.irstea.fr/projects/thebay/files>

aisément l'incertitude via un histogramme, un boxplot ou un intervalle à un niveau de crédibilité donné. Pour limiter les temps de calcul et les volumes de stockage, $N=100$ a été utilisé ici.

Sur les figures suivantes, nous comparons les valeurs de certains indicateurs calculés sur les projections hydrologiques aux distributions estimées en considérant l'erreur d'échantillonnage. Sur la Figure 49, nous avons représenté le QMNA5 pour la Moselle à Perl sur différents scénarios : les observations de débits, les débits simulés par chacun des deux modèles hydrologiques forcés par SAFRAN, les débits simulés en utilisant les scénarios RCP8.5 du CNRM et de l'IPSL sur les trois périodes. Nous voyons ici que les valeurs calculées sont le plus souvent incluses dans l'intervalle d'incertitude estimé. Par ailleurs, nous pouvons observer que les positions respectives des indicateurs pour les différents scénarios étudiés sont équivalentes, que l'on calcule ces indicateurs classiquement (croix rouges) ou que l'on considère leur incertitude (boxplots). Autrement dit, si le QMNA5 d'une projection a été estimé plus fort que le QMNA5 d'une autre projection, l'estimation de l'incertitude d'échantillonnage ne remet pas en cause ce classement. En revanche, l'ordre de grandeur de l'incertitude d'échantillonnage dépasse parfois la différence entre les projections.

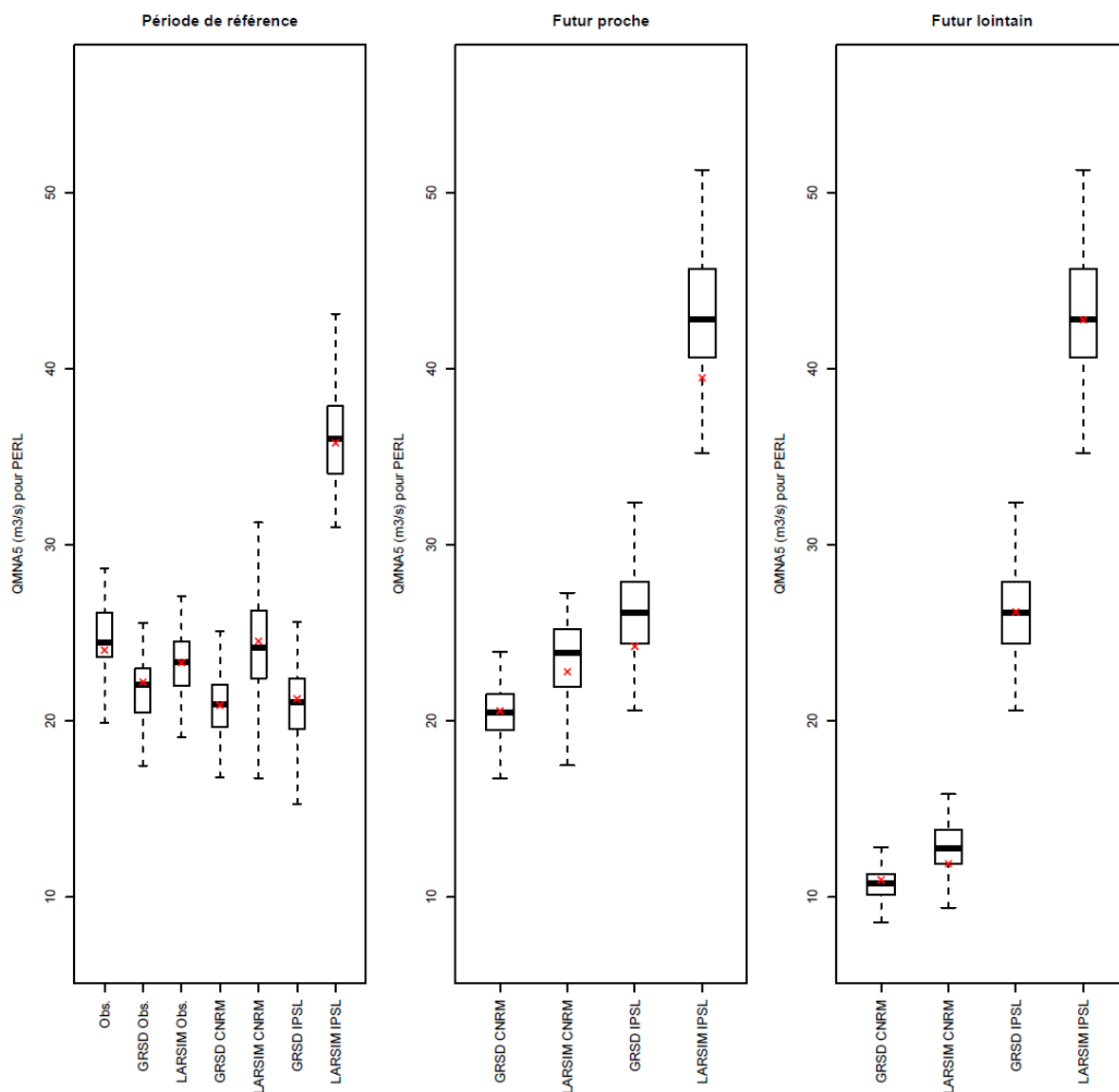


Figure 49 : Comparaison entre les valeurs de QMNA5 obtenues directement (croix rouges) et leurs distributions estimées (boîtes à moustaches). Cas de la Moselle à Perl, sur l'ensemble des combinaisons modèles hydrologiques / scénarios IPSL et CNRM RCP8.5 sur les trois périodes.

Les mêmes observations se répètent pour le QJXA10 sur cette même station (Figure 50). Seules les projections IPSL en futur proche semblent se détacher, c'est-à-dire que les QJXA10 calculés de manière classique ne sont pas compris dans l'enveloppe des boxplots (à noter toutefois que les valeurs extrêmes des boxplots ne sont pas représentées afin de garder le graphe lisible).

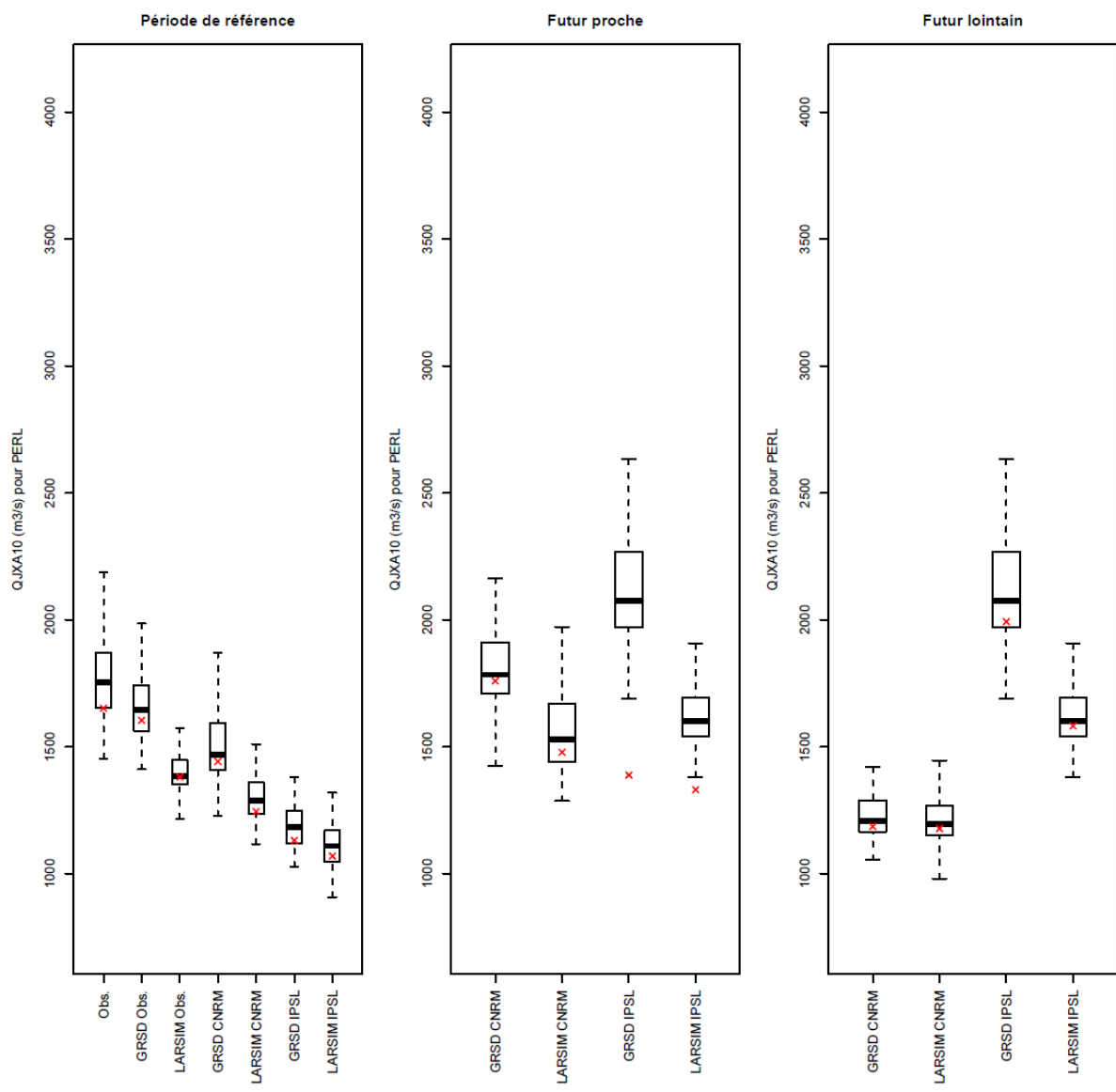


Figure 50 : Identique à Figure 49 pour le QJXA10.

La Figure 51 et la Figure 52 montrent les mêmes choses pour l'Il à Ensisheim. Là aussi, les indicateurs et leurs évolutions sont globalement bien déterminés. Même s'il ne faut pas sous-estimer l'incertitude d'échantillonnage affectant les indicateurs (caractérisée par l'étendue des boîtes à moustaches), ces résultats sont rassurants : les évolutions observées grâce aux calculs habituels d'indicateurs sont en général peu à-même de modifier les conclusions émises dans ce projet. Cependant, le degré de certitude des différences entre les projections peut être remis en cause sur certains scénarios.

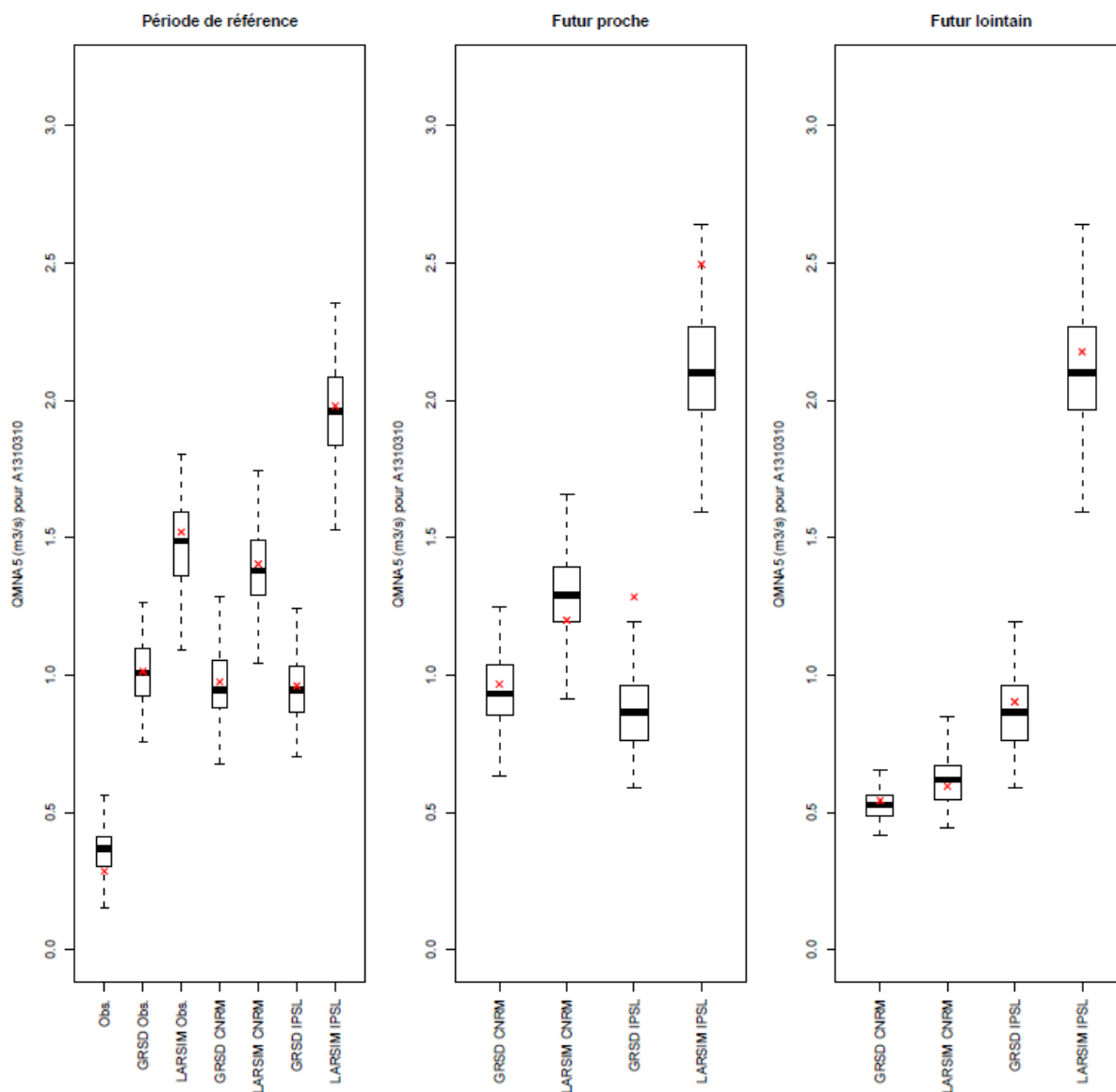


Figure 51 : Identique à Figure 49 pour l'III à Ensisheim.

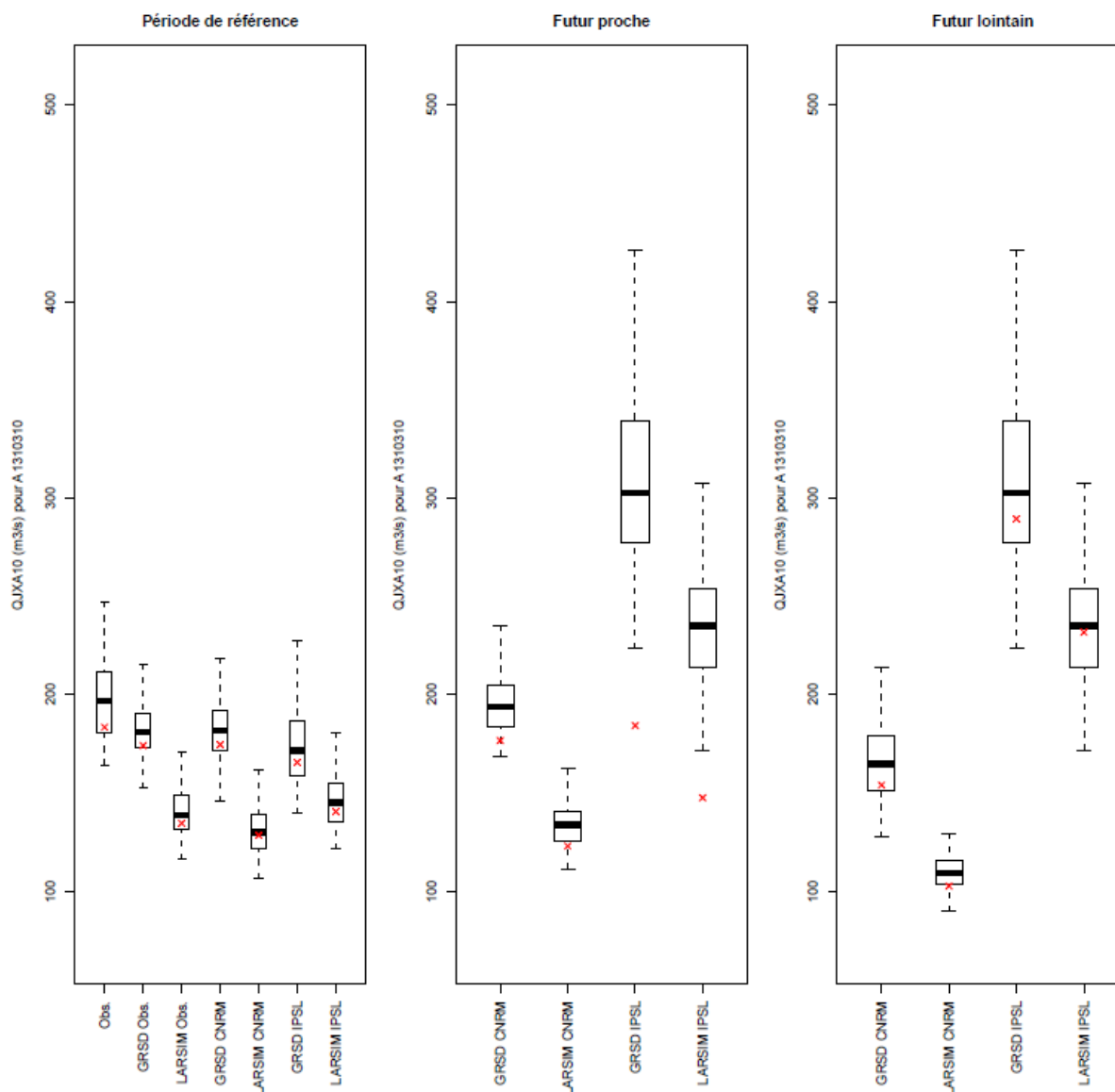


Figure 52 : Identique à Figure 50 pour l'III à Ensisheim.

- **Incertitude des lois d'ajustement des indicateurs de crues**

Le calcul du QJXA nécessite l'utilisation de lois d'ajustement. En effet, notamment lorsque l'on travaille sur des périodes de retours élevées, nous n'avons pas assez de données pour calculer le QJXA. On utilise alors une loi d'ajustement, qui sert à extrapoler les valeurs de débits. Pour le QJXA, on utilise classiquement la loi de Gumbel.

Une solution existe afin de rendre cette loi d'ajustement moins sensible aux outliers (valeurs extrêmes) : l'utilisation d'un générateur de pluie. Le générateur de pluie est une méthode qui consiste en la génération de chroniques de pluies très longues, présentant des caractéristiques statistiques proches de celles de la série de départ. Le générateur essaie alors de reproduire le comportement des pluies sur les bassins sur de longues périodes. Par ce procédé, on peut ainsi générer des séries de pluies proches de séries d'observations ou bien proches de séries simulées, par exemple issues de modèles climatiques, permettant notamment de reproduire le comportement de

conditions climatiques futures. L'intérêt d'un générateur est de pouvoir créer des conditions différentes de celles de la série de départ, par exemple en générant des conditions plus extrêmes.

Il existe différents types de générateurs de pluie. Certaines approches fonctionnent par ré-échantillonnage des séries, c'est-à-dire qu'elles vont piocher dans la série de départ des valeurs existantes, qui vont être ré-agencées temporellement. Ce procédé permet par exemple de générer des périodes plus pluvieuses ou plus sèches. Il ne permet cependant pas de générer des valeurs ponctuelles en dehors de celles de la série de départ. Une autre approche consiste à caractériser statistiquement la série de départ par des lois, et de tirer dans ces lois pour générer des événements. Un procédé courant est l'application des chaînes markoviennes, processus stochastique permettant d'enchaîner différentes conditions pluvieuses. Enfin, on peut noter qu'il existe des générateurs ponctuels, qui visent à reproduire une pluie sur un point (ou une pluie uniforme à l'échelle d'un bassin par exemple) et les générateurs spatiaux, qui vont simuler des champs de pluie en tenant compte de leur hétérogénéité spatiale. Les seconds sont évidemment bien plus complexes que les premiers, puisqu'ils doivent tenir compte de la cohérence spatiale des événements à modéliser.

Ici, nous avons utilisé un générateur stochastique de type markovien. Il s'agit d'un générateur ponctuel destiné à reproduire des pluies moyennes de bassin. Le générateur nécessite tout d'abord la détermination d'un certain nombre de paramètres :

- On distingue trois états : un état sans pluie, un état de pluie faible et un état de pluie forte ;
- On caractérise statistiquement les probabilités d'enchaînement d'un état à un autre. Ces probabilités sont évaluées mois par mois, de manière à tenir compte des effets saisonniers dans l'occurrence et l'enchaînement des différents états. Ce conditionnement d'un état par l'état antérieur est un processus markovien d'ordre 1 : on fait l'hypothèse que l'état pluvieux d'une journée est conditionné par celui de la veille ;
- Pour les pluies faibles et les pluies fortes, on cale deux lois statistiques différentes permettant de caractériser leur amplitude, dans lesquelles on ira prendre les valeurs de pluie. Ceci permet de ne pas limiter les séries simulées aux gammes de la série de départ en ce qui concerne les pluies les plus fortes.

Le processus de génération d'une série de pluie est ensuite réalisé de manière itérative :

0. On initialise la série par une valeur de pluie choisie au hasard pour une date de l'année. Cette pluie correspond à l'un des trois états pluvieux ;
1. On génère un nombre au hasard que l'on interprète comme une probabilité de transition d'un état à un autre. Ceci permet de déterminer l'état de la pluie du jour suivant ;
2. Dans le cas d'un état de pluie faible ou forte, on génère un second nombre au hasard, que l'on va interpréter comme une probabilité au non-dépassement. Utilisée avec la loi correspondant à l'état pluvieux considéré, cette probabilité va permettre de calculer l'amplitude de la pluie correspondante.

On répète ensuite les étapes 1 et 2 autant de fois que nécessaires pour atteindre la longueur de la série voulue. Pour MOSARH 21, nous avons généré des chroniques de pluies de 1000 ans reproduisant les caractéristiques des périodes historiques et futures issues des projections climatiques.

Malheureusement, les résultats sont peu concluants (non correspondance entre les indicateurs calculés avec et sans générateur de pluie). Nous ne savons pas encore à l'heure actuelle si ce problème est dû à une erreur de manipulation des données ou à une erreur méthodologique rendant l'utilisation de ce générateur de pluie impossible.

6. Comparaison aux projets antérieurs

Un des enjeux du projet MOSARH 21 est de fournir une base de connaissances actualisée par rapport à des études antérieures menées sur le même sujet. En effet, une telle comparaison est rarement faisable, compte tenu de méthodologies différentes. Par exemple, les périodes d'études, les modèles ou scénarios climatiques, les modèles hydrologiques et leurs conditions de calage (période, fonction objectif, données observées utilisées) et parfois même les indicateurs peuvent différer d'un projet à l'autre.

Pour pallier ces limitations, nous avons utilisé ici tout ou partie des projections climatiques des projets Explore 2070 et FLOW MS. Ainsi, nous pouvons comparer les résultats de MOSARH 21 avec des projections issues d'Explore 2070 et FLOW MS avec les mêmes modèles hydrologiques et les mêmes indicateurs. Cependant, il faut noter qu'il n'a pas été possible de disposer de périodes d'étude strictement identiques dans nos comparaisons, sauf pour FLOW MS. Ainsi, Explore 2070 a travaillé sur une période de référence identique à MOSARH 21 mais sur une période future 2046-2065. Cela rend toute tentative de conclusion délicate mais ce n'est pas évitable car les scénarios climatiques ne peuvent pas être obtenus sur d'autres périodes.

- **Débits moyens**

La Figure 53 nous permet de situer les projections hydrologiques des débits moyens annuels de ce projet par rapport à celles des projets précédents (scénarios AR4) sur les 70 stations de ce projet. Cette figure est une reprise de la Figure 29 (partie gauche) pour les trois scénarios radiatifs RCP. Tout d'abord, nous pouvons observer que les modèles GRSD et LARSIM donnent des projections équivalentes pour les scénarios AR4. Les projections COSMO-CLM semblent se situer dans le même ordre de grandeur que les RCP 4.5 et 8.5 de MOSARH 21 (augmentation modérée). Cependant, les projections Explore 2070 indiquent une diminution des débits moyens annuels (environ -10 % en médiane). Il faut noter que la période future d'Explore 2070 est plus lointaine que celle des autres projections ; on est peut-être déjà dans une seconde phase de l'impact du changement climatique où le réchauffement impacte négativement les débits, comme cela est le cas pour la projection CNRM RCP 4.5 et 8.5 (Figure 29 droite).

Evolution des débits (%) pour le futur proche pour toutes les stations

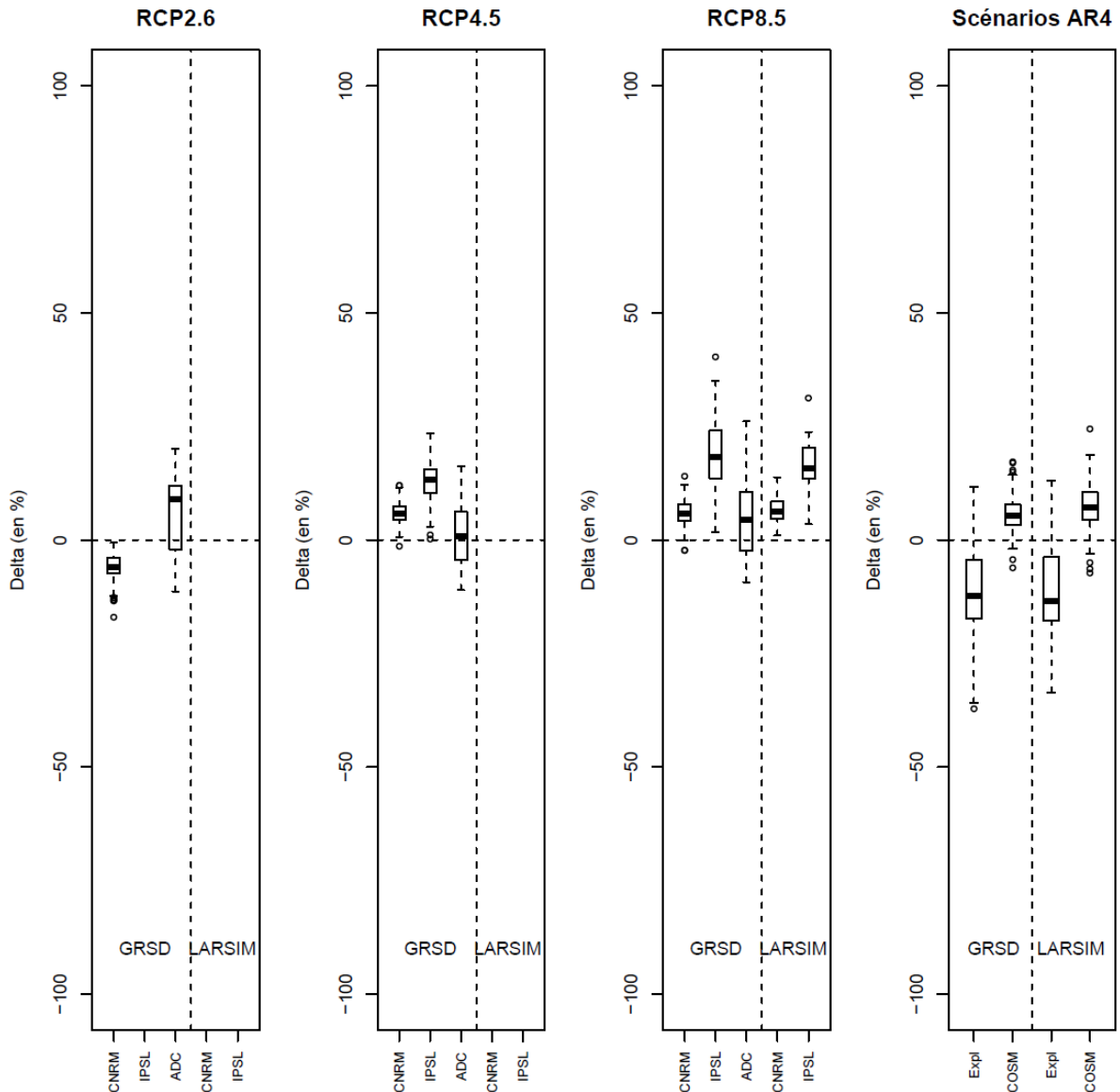


Figure 53 : Distributions des évolutions des débits simulés par les modèles GRSD et LARSIM pour le futur proche en utilisant trois projections climatiques AR5 (CNRM, IPSL et ADC) forcées par trois scénarios RCP (2.6, 4.5 et 8.5), et deux projections climatiques AR4 (issues d'Explore 2070 et COSMO-CLM), sur l'ensemble des bassins de la zone d'étude. 6 MCG sont inclus pour Explore 2070, et 3 réalisations pour COSMO-CLM. Les évolutions en pourcentage de l'ensemble des stations sont agrégées dans les boîtes à moustaches. A noter que ceci est une reprise de la Figure 29 (gauche) complétée avec les scénarios AR4.

- **Débits de crues**

La Figure 54 montre quant à elle les évolutions pour les forts débits, à savoir le QJXA10. Le projet Explore 2070 avait conclu à une grosse incertitude sur le signe de l'évolution des crues, ce que nous retrouvons ici. L'augmentation des crues estimée dans FLOW MS est ici aussi bien reproduite. Par rapport aux résultats de MOSARH 21, nous voyons qu'il existe une bonne correspondance entre les projets indiquant une évolution probable positive des crues. Cependant, une incertitude notable peut être présente sur certaines projections, que ce soit pour les anciens projets comme pour

MOSARH 21. Enfin, les projections utilisant les données d'Explore 2070 semblent encore une fois être à mi-chemin entre les résultats de MOSARH 21 en futur proche (Figure 30 gauche) et en futur lointain (Figure 30 droite).

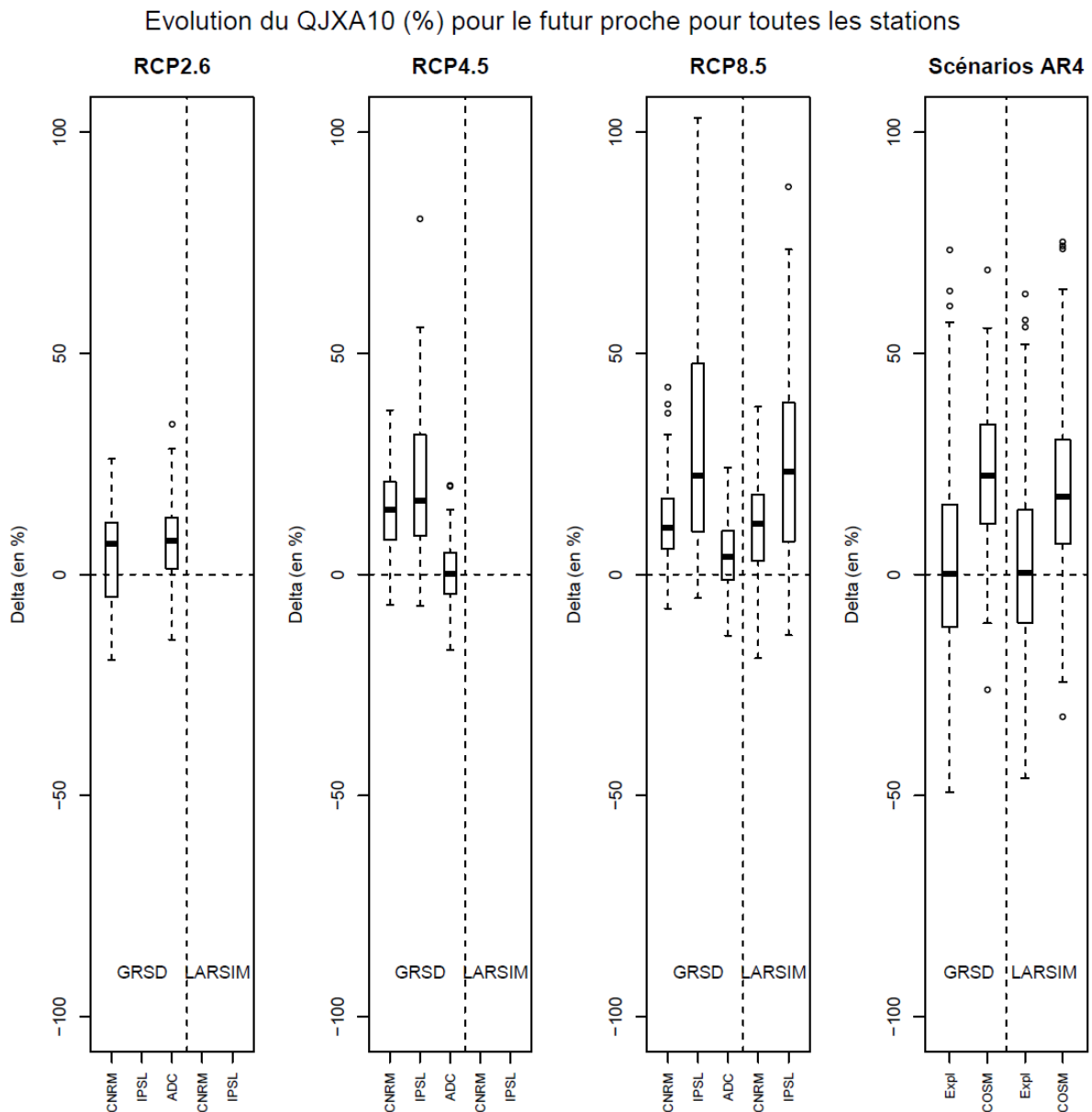


Figure 54 : Identique à la Figure 53 pour le QJXA10.

- **Débits d'étiages**

La Figure 55 illustre les évolutions des faibles débits (QMNA5). On note que les scénarios des précédents projets s'accordent sur une diminution de ces débits, avec des intensités variables. Les projections COSMO-CLM semblent bien correspondre aux projections CNRM et ADC. La projection IPSL quant à elle est très différente de toutes les autres projections. Enfin, la projection Explore 2070 semble plus proche des projections en futur lointain de MOSARH 21 (Figure 31 droite), le phénomène d'étiage s'aggravant.

Evolution du QMNA5 (%) pour le futur proche pour toutes les stations

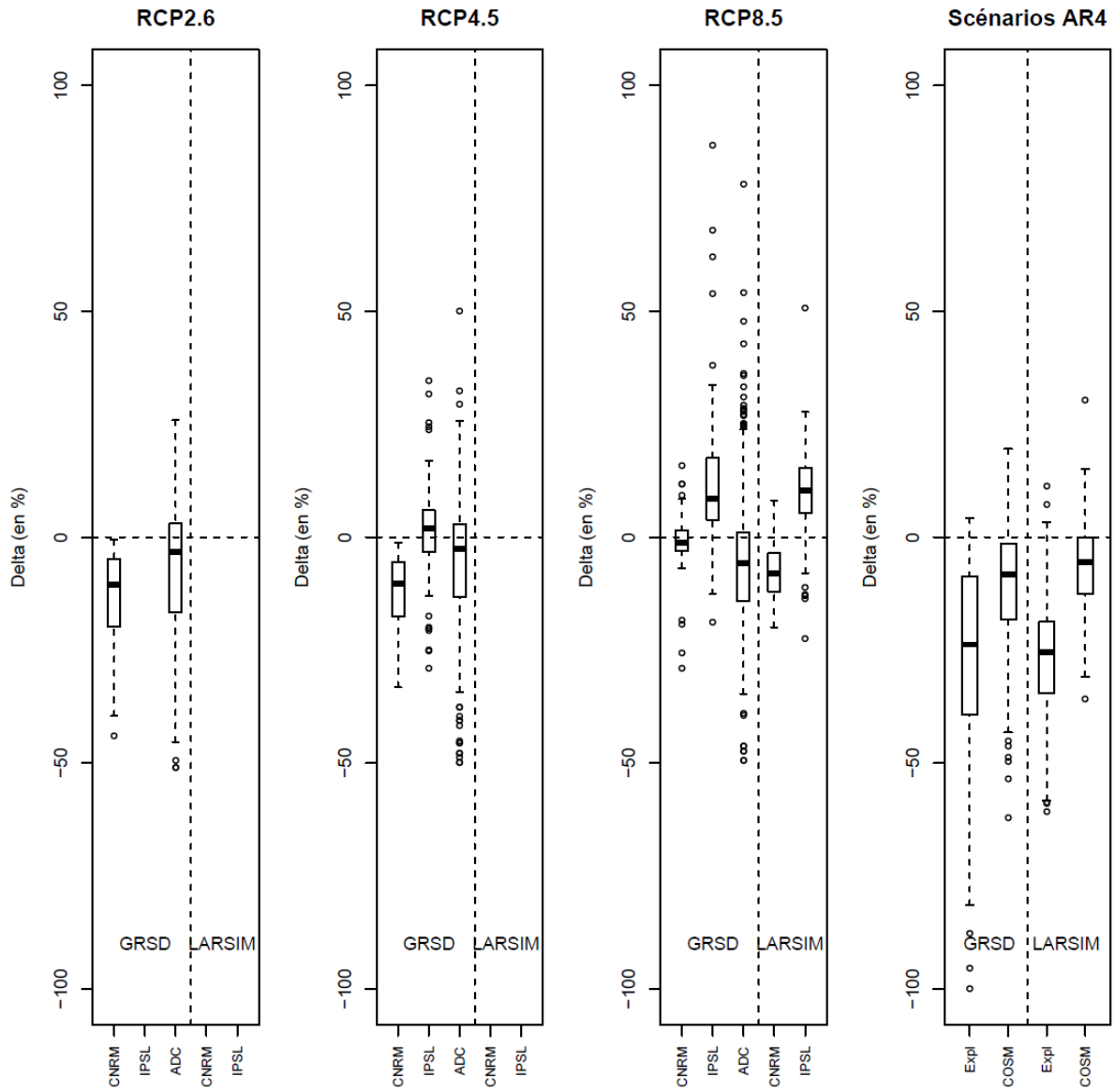


Figure 55 : Identique à la Figure 53 pour le QMNA5.

7. Conclusions et perspectives

- **Rappel du contexte et des objectifs**

Le bassin versant du Rhin a un rôle primordial à l'échelle européenne en termes de ressources en eau (sa partie amont constitue un château d'eau pour l'aval du bassin) et de navigation (il est navigable jusqu'en Suisse, avec une douzaine de barrages de navigation le long de son cours). Par ailleurs, malgré les ouvrages de régulation, ce bassin transfrontalier est impacté par les événements extrêmes, avec notamment des événements d'inondations présentant des enjeux socio-économiques forts au niveau des agglomérations. A ces forts enjeux s'ajoute l'impact du changement climatique, caractérisé par une augmentation des températures et une modification potentielle des régimes de précipitations et d'évapotranspiration, qui modifieront les débits.

Plusieurs études antérieures incluant la partie française du Rhin ou dédiées spécifiquement à cette zone ont conduit à des diagnostics parfois différents sur l'impact hydrologique du changement climatique anthropique. Le projet MOSARH 21 avait pour objectif de mettre à jour l'estimation des débits futurs de la partie française du bassin du Rhin avec les nouvelles projections climatiques produites dans le cadre du 5^e rapport d'évaluation (AR5) du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). De plus, nous avons voulu comparer les nouvelles projections hydrologiques ainsi produites avec celles produites dans des études antérieures, notamment Explore 2070 et FLOW MS. Pour cela, nous avons mis en place un cadre rigoureux (voir ci-dessous) et avons utilisé deux modèles hydrologiques, GRSD et LARSIM, afin de produire des projections hydrologiques traduisant l'effet des anciennes et des nouvelles projections climatiques sur le débit des rivières.

- **Méthodologie mise en place**

La méthodologie mise en place pour produire les projections hydrologiques est caractéristique de l'approche aléa-centrée et descendante : les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et les profils de concentration représentatifs (RCP) permettent de forcer les modèles climatiques. Les sorties des modèles climatiques sont affinées spatialement grâce à des méthodes de descente en échelle (ce sont des données en accès libre et qui n'ont pas été produites dans ce projet). Les deux modèles hydrologiques — GRSD et LARSIM — ont été alimentés par ces projections climatiques ce qui a permis de produire des projections hydrologiques. Ces dernières ont été analysées à l'aide d'indicateurs caractérisant les débits moyens, les crues et les étiages.

Afin de s'intéresser aux diverses sources d'incertitude, présentes à chaque étape de la chaîne de modélisation décrite ci-dessus, une approche ensembliste faisant intervenir plusieurs scénarios radiatifs, plusieurs modèles climatiques et deux modèles hydrologiques a été appliquée. Par ailleurs, nous avons effectué des calages des modèles hydrologiques sur différentes périodes afin de caractériser cette incertitude. Pour cela, un calage automatique de LARSIM a été implémenté spécifiquement pour ce projet et a montré son efficacité pour répondre aux objectifs du projet MOSARH 21. Enfin, l'incertitude d'échantillonnage dans l'estimation des indicateurs statistiques a également été quantifiée.

- **Principaux effets attendus sur l'hydrologie des cours d'eau**

Les évolutions des débits moyens indiquent une légère augmentation des débits moyens annuels, qui pourrait même devenir importante pour l'une des projections dans une hypothèse d'augmentation forte des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). En ce qui concerne l'aléa de crue, il pourrait être accru dans un futur proche (2021-2050). En revanche, dans un futur plus lointain, l'évolution des crues est très incertaine, les projections divergeant fortement. Les débits d'étiages seraient à la baisse dans le futur proche. Leur évolution dans le futur lointain (2071-2100) serait également plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible selon la projection climatique utilisée.

Nous avons montré que les incertitudes sont présentes à plusieurs niveaux dans les projections hydrologiques produites. Les modèles de circulation générale (MCG) et les scénarios radiatifs semblent être le principal facteur d'incertitude. Ensuite, des incertitudes au niveau du calcul des indicateurs sont présentes. Enfin, il apparaît que l'incertitude liée aux modèles hydrologiques est faible. Cette gradation des sources d'incertitude rejoint les conclusions de bon nombre d'études antérieures s'étant intéressées au poids relatifs des différents maillons de la chaîne de modélisation dans l'incertitude totale.

Les résultats ont été comparés à ceux obtenus dans le cadre d'études d'impact antérieures réalisées sur le bassin (FLOW MS et Explore 2070). Compte tenu des différences méthodologiques et des résultats obtenus, on peut conclure que les études précédentes sont cohérentes avec les résultats obtenus dans le projet MOSARH 21. Cependant, certaines différences existent, les projections Explore 2070 étant basées sur un futur entre notre période de futur proche et le futur lointain, les évolutions de débits observées sont parfois différentes de celles de MOSARH 21, mais pourraient correspondre à une situation intermédiaire entre nos deux périodes d'étude. Il semble donc important de se baser sur les dernières projections à des fins décisionnaires.

- **Perspectives**

Nous n'avons pas pu multiplier le nombre de projections climatiques utilisées dans le cadre de ce projet, notamment à cause de limitations en temps de calcul. Ceci impacte les résultats, puisque les deux principaux modèles climatiques utilisés divergent fortement. Il serait donc utile de compléter ces résultats avec d'autres projections climatiques. Par ailleurs, les débits observés sur la plaine d'Alsace sont fortement influencés. Cela impacte potentiellement la qualité des projections des débits.

Ce projet propose un catalogue de fiches synthétiques représentant les évolutions du climat, des crues et des étiages pour chacune des stations de la zone d'étude. Ces fiches sont à destination des décideurs et des « opérationnels ». Par ailleurs, ce projet peut contribuer au dialogue international au niveau du Rhin (CIPR), notamment au niveau franco-allemand, en vue d'améliorer la stratégie de gestion coordonnée des débits du Rhin et de ses affluents.

8. Communications et valorisations relatives au projet MOSARH21

Le projet a fait l'objet de diverses communications orales ou écrites. En voici une liste.

Communications :

<u>Manifestation</u>	<u>Date - Lieu</u>	<u>Type de participation</u>	<u>Intervenant</u>
Atelier LARSIM	19 mars 2015	Présentation orale	G. Thirel
CIPMS	mars 2015	Présentation orale	J.-P. Wagner
Conférence SHF « Water tensions in Europe and in the Mediterranean : water crisis by 2050 ? »	octobre 2015, Paris-Marne-la-Vallée	Présentation d'un poster Ecriture d'un article pour les actes de la conférence	G. Thirel
Atelier LARSIM	9 mars 2016	Présentation orale	G. Thirel
Assemblée générale de l'EGU 2016	avril 2016	Présentation d'un poster	G. Thirel
« 7 ^e International Water Resources Management Conference of ICWRS (AISH)	18-20 mai 2016, Bochum, Allemagne,	Présentation orale Ecriture d'un article pour les actes de la conférence	A. de Lavenne
Tag der Hydrologie	23 et 24 mars 2017, Trêves, Allemagne	Présentation d'un poster	K. Gerlinger
6 ^e colloque KLIWA	22 et 23 mai 2017, Baden-Baden, Allemagne	Présentation d'un poster	K. Gerlinger

Références des articles du projet :

Thirel, G., Perrin, C., Drogue, G., Gerlinger, K., Krumm, J., Wagner, J.-P. (2015). Evolution future des débits des cours d'eau dans le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques issues du 5^{ème} rapport du GIEC. Future evolution of river discharge for the French Rhine basin in a context of climate change. An updated evaluation based on the AR5 IPCC climate simulations. *Proceedings de la conférence SHF « Water tensions in Europe and in the Mediterranean : water crisis by 2050 ? »*, octobre 2015, Paris-Marne-la-Vallée.

de Lavenne, A., Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Ramos, M.-H., 2016. Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. *7th International Water Resources Management Conference of ICWRS, Bochum, May 2016, Proc. IAHS, 373, 87-94*, doi:10.5194/piahs-373-87-2016, 2016.

9. Références

- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, *SMHI Report RHO 7*, Norrköping, 134 pp.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*. 27(12) : 1643-1655.
- Bremicker M., Brahmer G., Demuth N., Holle F.-K. & Haag I., 2013: Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und weitere Anwendung. – *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6 (9), 509–519
- Brulebois, E., Castel, T., Richard, Y., Château-Smith, C., Amiotte-Suchet, P., 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *Journal of Hydrology*, 531, 3, 892-901.
- Chauveau, M., S. Chazot, C. Perrin, P.-Y. Bourgin, E. Sauquet, J.-P. Vidal, N. Rouchy, E. Martin, J. David, T. Norotte, P. Maugis et X. De Lacaze, 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? (What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070?). *La Houille Blanche*(4): 5-15, doi: 10.1051/lhb/2013027.
- CIPMS, 2013. Identification des impacts possibles du changement climatique dans le bassin versant de la Moselle et de la Sarre, *Commissions internationales pour la protection de la Moselle et de la Sarre*, 13 p,
- Dayon, G., 2015. Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse.
- de Lavenne, A., Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Ramos, M.-H., 2016. Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. *7th International Water Resources Management Conference of ICWRS, Bochum, May 2016, Proc. IAHS*, 373, 87-94, doi:10.5194/piahs-373-87-2016, 2016.
- Gelman, A., J. B. Carlin, H. S. Stern, and D. B. Rubin, 2004 Bayesian data analysis, 2 ed., 696 pp., *Chapman & Hall*.
- Gerlinger, K., Meuser, A., 2013. Modellierung des Wasserhaushalts unter Verwendung eines Klimaprojektions-Ensembles – methodisches Vorgehen und Ergebnisse. – In: *AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte*, S. 154-167 <http://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft19.pdf>
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. and Volken, D., 2010. Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project, *CHR report, I-23*, 229 pp., *Lelystad*, ISBN 978-90-70980-35-1.
- Habets, F., et al., 2008, The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.
- Jouzel, J. (Ed.), 2015. Le climat de la France au XXIe siècle - Volume 5 - Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. *Rapport DGEC*, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000211.pdf>
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M., 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425, pp. 264-277.
- Knutti, R. and Sedlacek, J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3, 369-373.
- Kraaijenbrink P., 2013a. Advanced Delta Change method: Extension of an application to CMIP5 MCGs, Mémoire de master, Royal Netherlands Meteorological Institute (Pays-Bas)
- Kraaijenbrink P., 2013b. KNMI Advanced Delta Change method: Application Manual, Royal Netherlands Meteorological Institute (Pays-Bas)
- Lecluse, S., 2014. Modélisation de l'influence du changement climatique sur la nappe phréatique du Rhin Supérieur. Thèse de doctorat. Univ. de Strasbourg. Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg. 292 p.
- Ledoux, E., G. Girard, G. De Marsily, and J. Deschenes, 1989, Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water, in *Unsaturated Flow Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, *NATO ASI Series C*, vol. 275, edited by H. J. Morel-Seytoux, pp. 435–454, Kluwer Acad., Norwell, Mass.
- Le Moine, N., 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris), Cemagref (Antony), 324 pp.

- Lerat, J., 2009. Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques? Vers un modèle intégré de simulation des crues. These. Ph.D. thesis, University of Pierre et Marie Curie, Paris.
- Lobligeois, F., 2014. Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 312 pp.
- Ludwig, K. et M. Bremicker, 2006. The Water Balance Model LARSIM - Design, Content and Applications, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., 130 p
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Michel, C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- Nascimento, N.O., 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles., *J. Hydrol.*, 10, 282-290,
- Nicolas, M., 2014. Impact du changement climatique sur les débits du XXIe siècle en France : Une estimation avec les nouvelles projections du GIEC (CMIP5) et le modèle hydrologique de l'Irstea (GR). Mémoire de Master 1 SDUEE, UPMC, Irstea, Antony, 40 pp.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 530 pp.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A., 2013. A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (3), pp. 235-256.
- Renard, B. ; Le Coz, J. ; Blanquart, B. ; Bonnifait, L., 2015. Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en hydrologie. Applications à la prédétermination et à l'hydrométrie. Rapport disponible sur <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00046563>.
- Renard, B., X. Sun, and M. Lang, 2013, Bayesian methods for non-stationary extreme value analysis, in *Hydrologic Extremes in a Changing Climate - Detection, Analysis & Uncertainty*, edited by S. Sorooshian, D. Easterling, A. AghaKouchak, S. Schubert and K. Hsu.
- Saulnier, G.M., Le Lay, M., 2009. Sensitivity of flash-flood simulations on the volume , the intensity , and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France). *Water Resour.* 45, 1–9.
- Thierion, C., Longuevergne, L., Habets, F., Ledoux, E., Ackerer, P., Majdalani, S., Leblois, E., Lecluse, S., Martin, E., Queguiner, S., and Viennot, P., 2012. Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem, *J. Hydrol.*, 424–425, 68-83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.028>.
- Thirel, G., Perrin, C., Drogue, G., Gerlinger, K., Krumm, J., Wagner, J.-P., 2015. Evolution future des débits des cours d'eau dans le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques issues du 5ème rapport du GIEC. Future evolution of river discharge for the French Rhine basin in a context of climate change. An updated evaluation based on the AR5 IPCC climate simulations. *Proceedings de la conférence SHF « Water tensions in Europe and in the Mediterranean : water crisis by 2050 ? »*, octobre 2015, Paris-Marne-la-Vallée.
- Valéry, A., 2010. Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.
- Van Pelt, S., J. Beersma, T. Buishand, 2012. Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 4517-4530
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyrou, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30 (11), pp. 1627-1644.

10. Annexes

Annexe A

Table 4 : Liste des 70 stations hydrométriques du projet MOSARH 21

Code	X (m)	Y (m)	Rivière	Station	Bassin versant	Pays	Surface (km ²)	Catégorie
A1050310	968612,88	2303249,25	Ill	Altkirch	Rhin	FR	238,19	2
A1080330	972612,88	2313749,25	Ill	Didenheim	Rhin	FR	668,47	1
A1310310	974712,88	2330549,25	Ill	Ensisheim	Rhin	FR	1030,08	1
A1320310	977812,88	2341949,25	Ill	Oberhergheim	Rhin	FR	1560,24	3
A1340310	976712,88	2353549,25	Ill	Horbourg-Wihr	Rhin	FR	1674,39	3
A1350310	975812,88	2356849,25	Ill	Colmar [Ladhof]	Rhin	FR	2105,43	1
A1432010	954212,88	2326449,25	Thur	Willer-sur-Thur	Rhin	FR	159,51	2
A1502040	956312,88	2337749,25	Lauch	Lintal	Rhin	FR	27,37	4
A2052020	974212,88	2363049,25	Fecht	Ostheim	Rhin	FR	457,08	1
A2250310	996612,88	2401349,25	Ill	Fegersheim [Nordhouse]	Rhin	FR	3438,44	2
A2280350	1001612,88	2416349,25	Ill	Strasbourg	Rhin	FR	5248,03	3
A2332110	967712,88	2375049,25	Lièpvrette	Lièpvre	Rhin	FR	106,6	2
A2512010	976512,88	2388549,25	Andlau	Andlau	Rhin	FR	42,25	4
A2860111	991112,88	2408749,25	Bruche	Holtzheim	Rhin	FR	676,27	1
A2732010	964812,88	2401049,25	Bruche	Russ [Wisches]	Rhin	FR	224,04	2
A2842010	980112,88	2409549,25	Mossig	Soultz-les-Bains	Rhin	FR	167,01	2
A3301010	996812,88	2438549,25	Moder	Schweighouse-sur-Moder	Rhin	FR	622,13	2
A3422010	967512,88	2426149,25	Zorn	Saverne	Rhin	FR	183,71	3
A3472010	989412,88	2429949,25	Zorn	Waltenheim-sur-Zorn	Rhin	FR	683,89	1
A3492020	1000512,88	2426449,25	Zorn	Hoerd	Rhin	FR	753,07	3
A3792010	1020412,88	2444449,25	Sauer	Beinheim	Rhin	FR	502,17	1
A3832010	1018612,88	2449149,25	Seltzbach	Niederroedern	Rhin	FR	204,1	2
A4050620	925012,88	2332349,25	Moselle	Rupt-sur-Moselle	Moselle-Sarre	FR	151,69	2
A4200630	918412,88	2349349,25	Moselle	Saint-Nabord	Moselle-Sarre	FR	626,91	3
A4250640	906112,88	2359849,25	Moselle	Epinal	Moselle-Sarre	FR	1218,22	1
A5110610	889712,88	2400449,25	Moselle	Tonnoy	Moselle-Sarre	FR	1976,52	2
A5261010	881912,88	2374149,25	Madon	Mirecourt	Moselle-Sarre	FR	382,98	2
A5431010	880212,88	2400749,25	Madon	Pulligny	Moselle-Sarre	FR	948,1	2
A5730610	862312,88	2413849,25	Moselle	Toul	Moselle-Sarre	FR	3345,73	2
A6001010	946812,88	2364249,25	Meurthe	Fraize	Moselle-Sarre	FR	66,86	2
A6051020	942712,88	2375149,25	Meurthe	Saint-Dié	Moselle-Sarre	FR	370,66	2
A6151030	933712,88	2387749,25	Meurthe	Raon-l'Etape	Moselle-Sarre	FR	727,1	2
A6571110	906112,88	2407649,25	Vezouze	Lunéville	Moselle-Sarre	FR	559,94	2
A6761010	898712,88	2403749,25	Meurthe	Damelevières	Moselle-Sarre	FR	2293,62	1
A7010610	878312,88	2427949,25	Moselle	Custines	Moselle-Sarre	FR	6834,88	1
A7122010	872012,88	2436149,25	Esch	Jezainville	Moselle-Sarre	FR	228,03	3
A7352010	865312,88	2452149,25	Rupt de Mad	Onville	Moselle-Sarre	FR	368,66	3
A7642010	906212,88	2432449,25	Petite Seille	Château-Salins	Moselle-Sarre	FR	150,21	2
A7821010	885412,88	2439249,25	Seille	Nomeny	Moselle-Sarre	FR	927,7	2
A7881010	881312,88	2462749,25	Seille	Metz	Moselle-Sarre	FR	1274,21	1
A7930610	881312,88	2476549,25	Moselle	Hauconcourt	Moselle-Sarre	FR	9384,39	2
A8071010	854912,88	2468449,25	Orne	Boncourt	Moselle-Sarre	FR	414,02	2
A8322010	862012,88	2478149,25	Woigot	Briey	Moselle-Sarre	FR	77,08	2
A8431010	872012,88	2479649,25	Orne	Rosselange	Moselle-Sarre	FR	1241,35	1
A8500610	879112,88	2486649,25	Moselle	Uckange	Moselle-Sarre	FR	10784,9	1
A9021050	944424,00	2419333,00	Sarre	Hermelange	Moselle-Sarre	FR	187,91	3
A9091050	944312,88	2451549,25	Sarre	Keskastel	Moselle-Sarre	FR	880,74	1
A9301010	951812,88	2461349,25	Sarre	Wittring	Moselle-Sarre	FR	1717,45	1

A9091060	946112,88	2441349,25	Sarre	Diedendorf	Moselle-Sarre	FR	716,89	3
A9132050	942212,88	2452949,25	Albe	Sarralbe	Moselle-Sarre	FR	405,24	3
A9221010	948612,88	2464949,25	Sarre	Sarreinsming	Moselle-Sarre	FR	1760,32	3
A9251050	943712,88	2468349,25	Sarre	Sarreguemines [Welferding]	Moselle-Sarre	FR	3746,67	3
A9352050	950712,88	2455549,25	Eichel	Oermingen	Moselle-Sarre	FR	279,58	3
A9752010	898112,88	2468749,25	Nied Française	Condé-Northen	Moselle-Sarre	FR	500,06	3
A9862010	899912,88	2468349,25	Nied Allemande	Varize	Moselle-Sarre	FR	367,35	3
A9942010	905812,88	2486349,25	Nied	Bouzonville	Moselle-Sarre	FR	1149,71	1
A2023030	955712,88	2349949,25	Petite-Fecht	Stosswihr	Rhin	FR	44,06	4
A2042010	964712,88	2351849,25	Fecht	Wintzenheim-La Forge	Rhin	FR	211,36	2
A2113010	959612,88	2361249,25	Béhine	Lapoutroie	Rhin	FR	38,66	4
A2312020	971612,88	2380749,25	Giessen	Thanvillé	Rhin	FR	113,01	2
A3902010	1006812,88	2463749,25	Lauter	Wissembourg- Weiler	Rhin	FR	275,18	2
A1252010	966912,88	2316549,25	Doller	Reiningue	Rhin	FR	181,94	2
PERLXXX	892426,00	2504755,00	Moselle	Perl	Moselle-Sarre	DE	11556	1
SanktArn	941484,00	2478748,00	Sarre	Sankt Arnual	Moselle-Sarre	DE	3944	1
Reinheim	953759,00	2470696,00	Blies	Reinheim	Moselle-Sarre	DE	1827	1
Niedaltd	909432,00	2491115,00	Nied	Niedaltdorf	Moselle-Sarre	DE	1322	1
A6701210	916712,88	2383149,25	Mortagne	Roville	Moselle-Sarre	FR	300	3
A6731220	909512,88	2395849,25	Mortagne	Gerbéville	Moselle-Sarre	FR	497,54	1
A5500610	877512,88	2407549,25	Moselle	Pont-Saint- Vincent	Moselle-Sarre	FR	3074,37	1
A6941020	882812,88	2419349,25	Meurthe	Malzeville	Moselle-Sarre	FR	2922,75	3

Annexe B

Calage automatique des modèles hydrologiques dans le cadre du projet MOSARH21. Se référer au fichier pdf joint.

Annexe C

Article figurant dans les proceedings de la conférence SHF « Water tensions in Europe and in the Mediterranean : water crisis by 2050 ? », octobre 2015, Paris-Marne-la-Vallée. Se référer au fichier pdf joint.

Annexe D

Article figurant dans les proceedings de la conférence 7^e International Water Resources Management Conference of ICWRS (AISH), mai 2016, Bochum, Germany. Se référer au fichier pdf joint.

Annexe E

Fiches climat, crues et étiages présentant des résultats détaillés pour chaque station.

Annexe F

Projections climatiques pour l'ADC.

i. RCP2.6

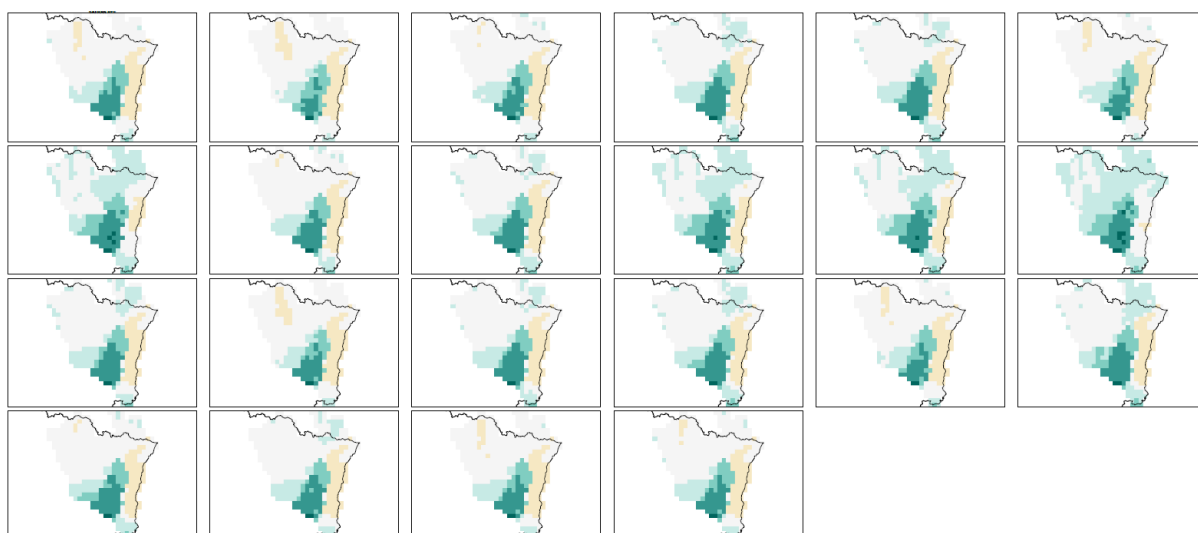


Figure 56 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 21 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP2.6 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

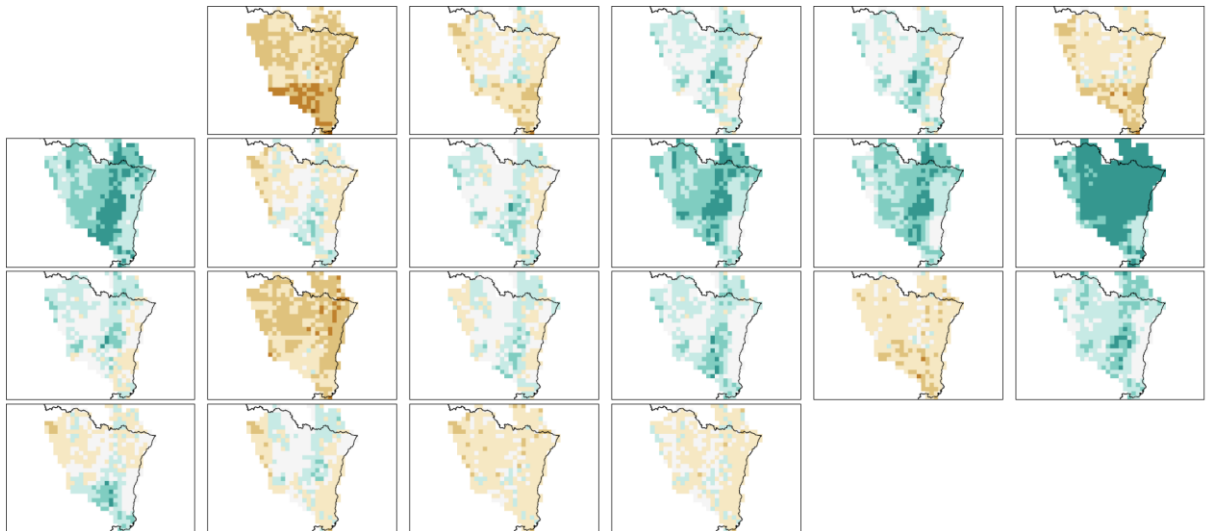


Figure 57 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 21 modèles entre 2021-2050 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP2.6.

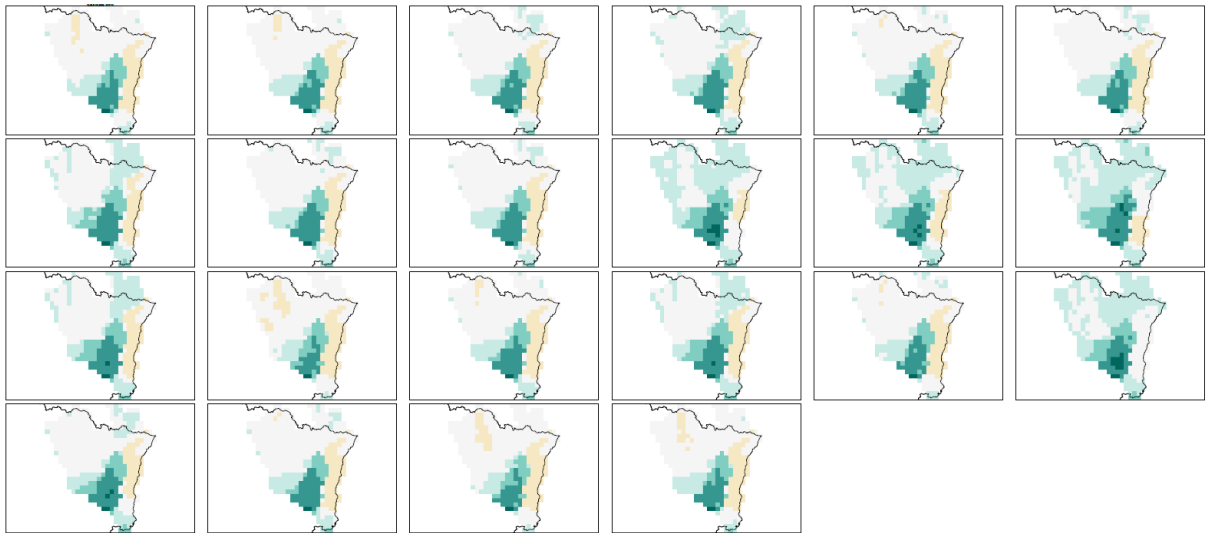


Figure 58 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 21 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP2.6 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

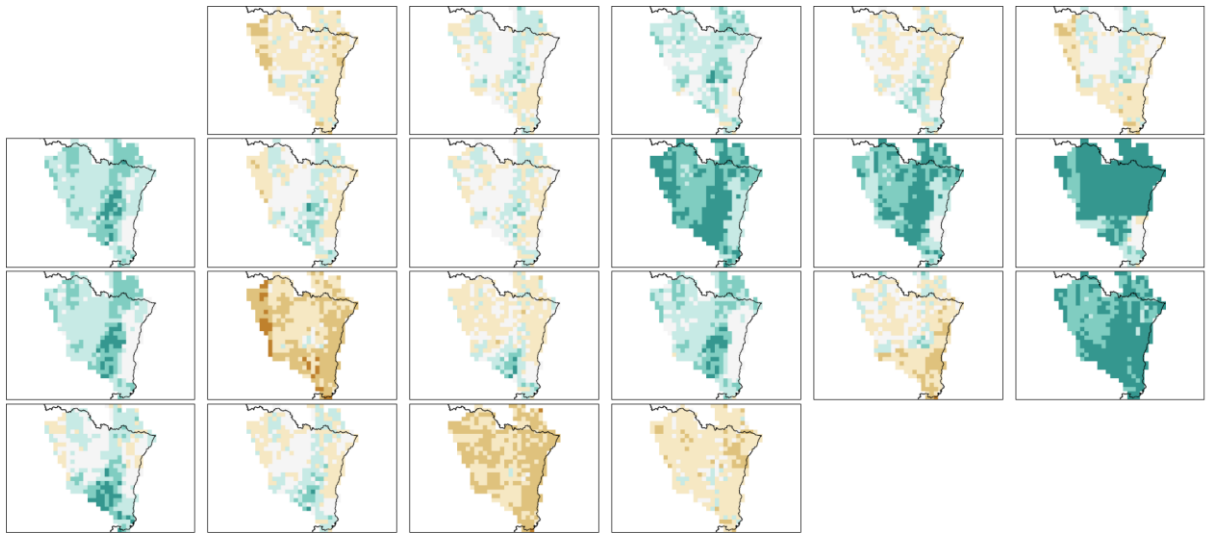


Figure 59 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 21 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP2.6.

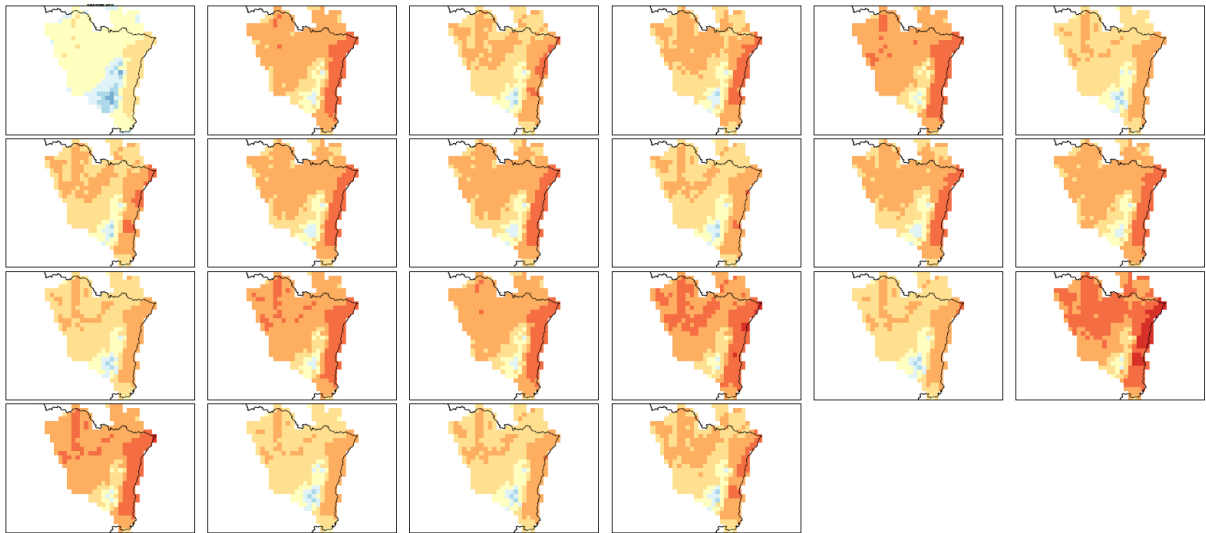


Figure 60 : Température annuelle moyenne (°C) pour 21 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP2.6 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

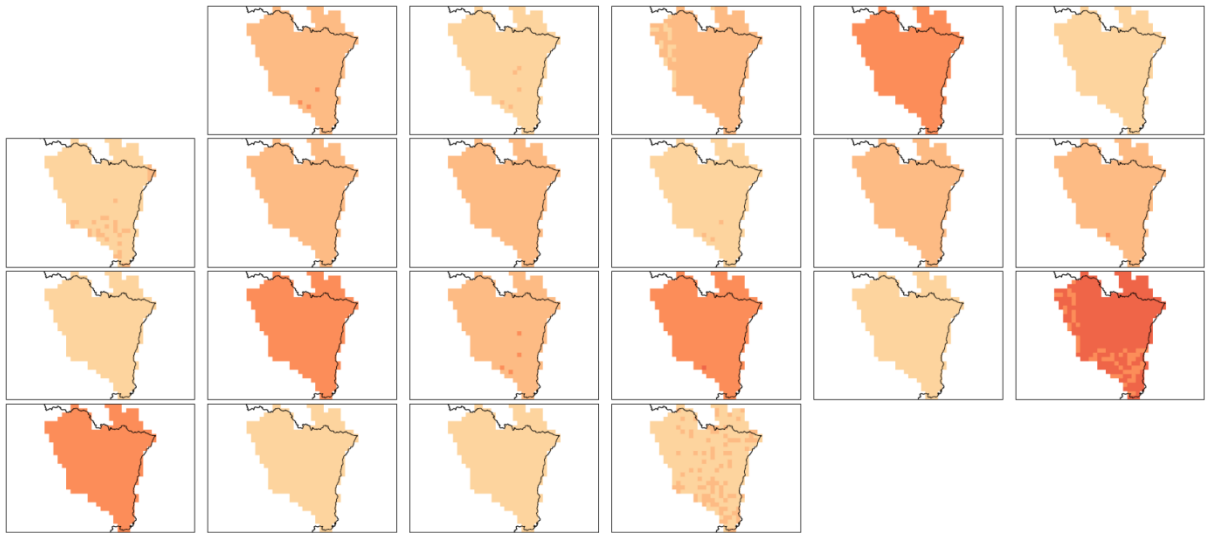


Figure 61 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 21 modèles entre 2021-2050 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP2.6.

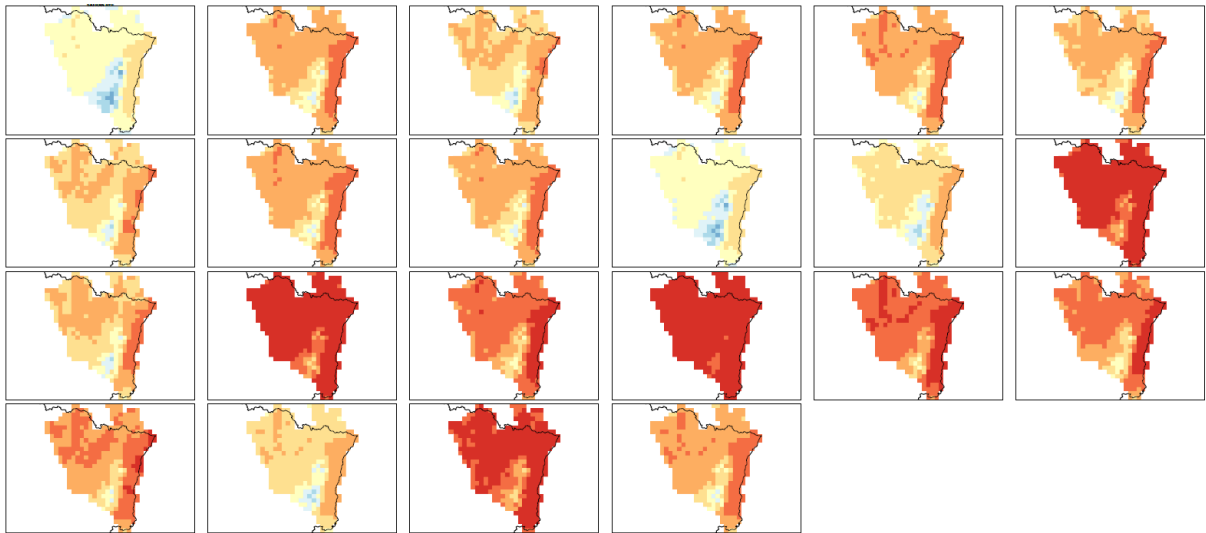


Figure 62 : Température annuelle moyenne (°C) pour 21 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP2.6 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

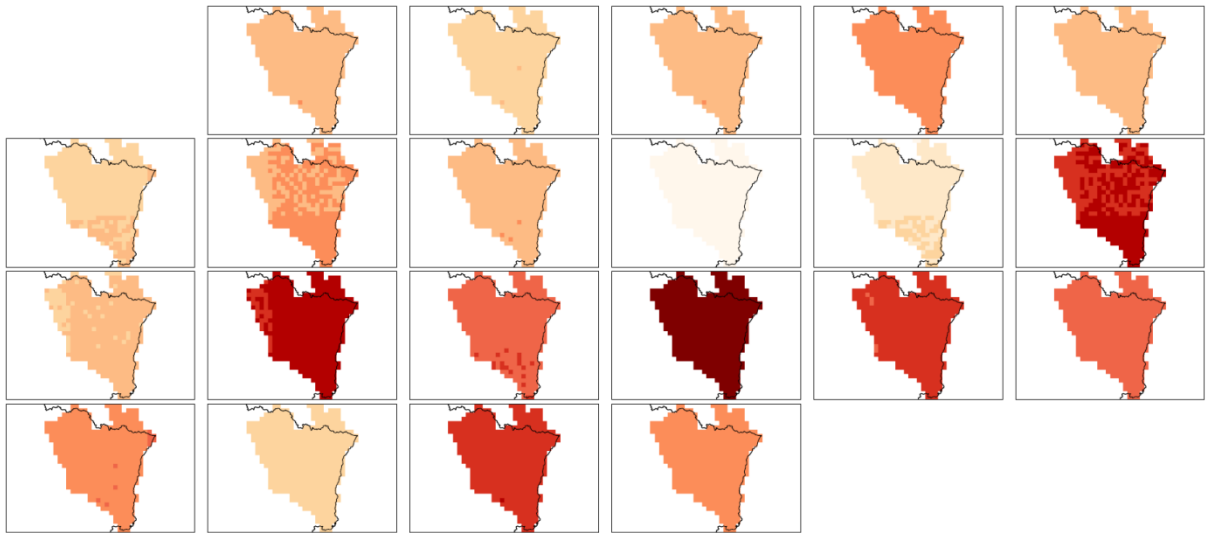


Figure 63 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 21 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP2.6.

ii. RCP4.5

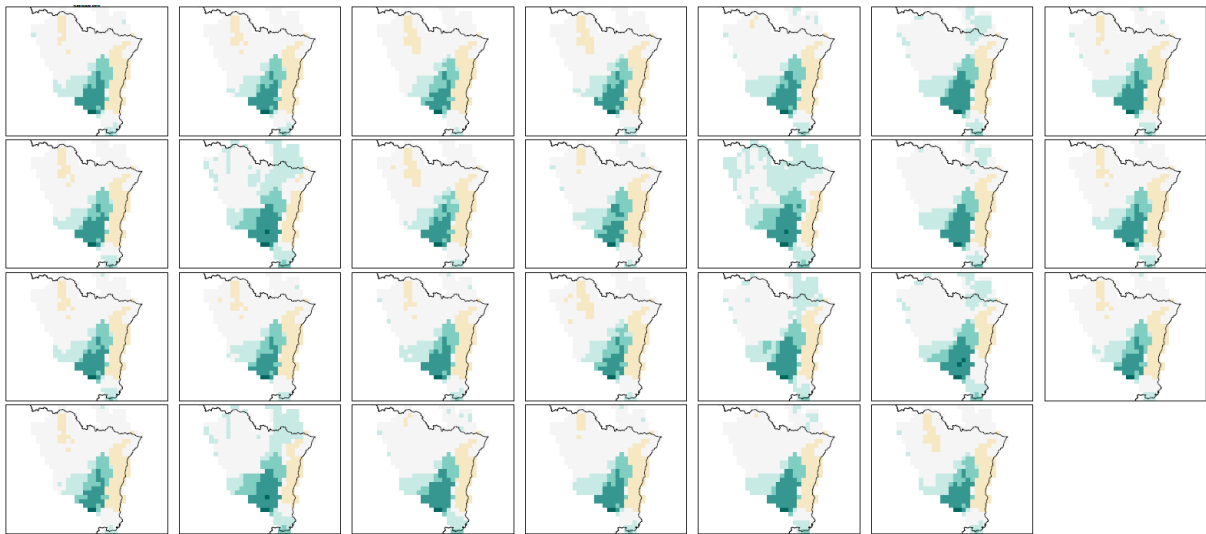


Figure 64 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

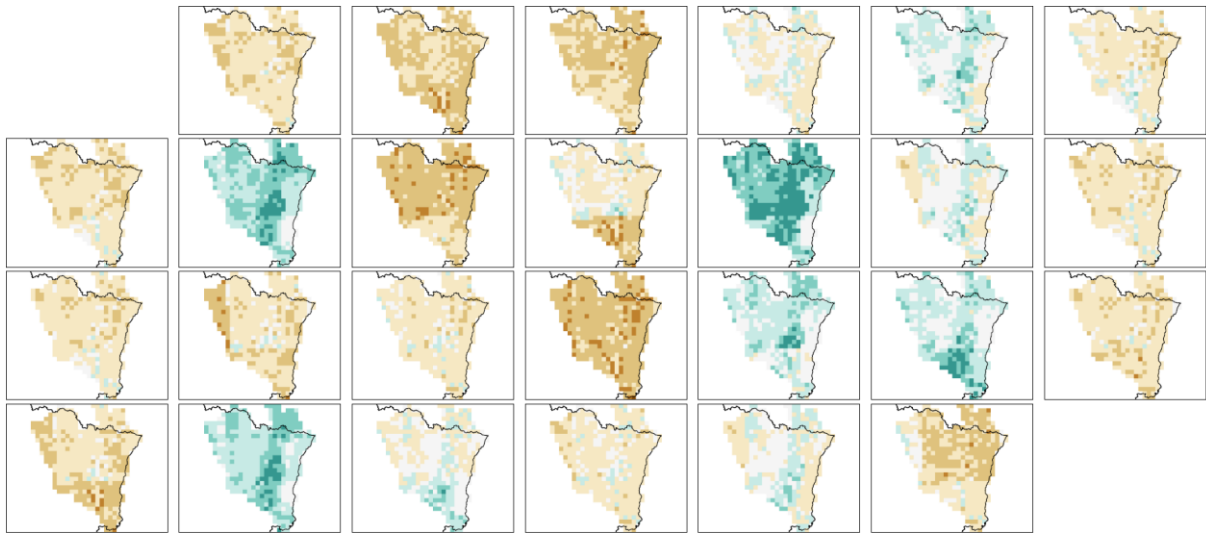


Figure 65 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

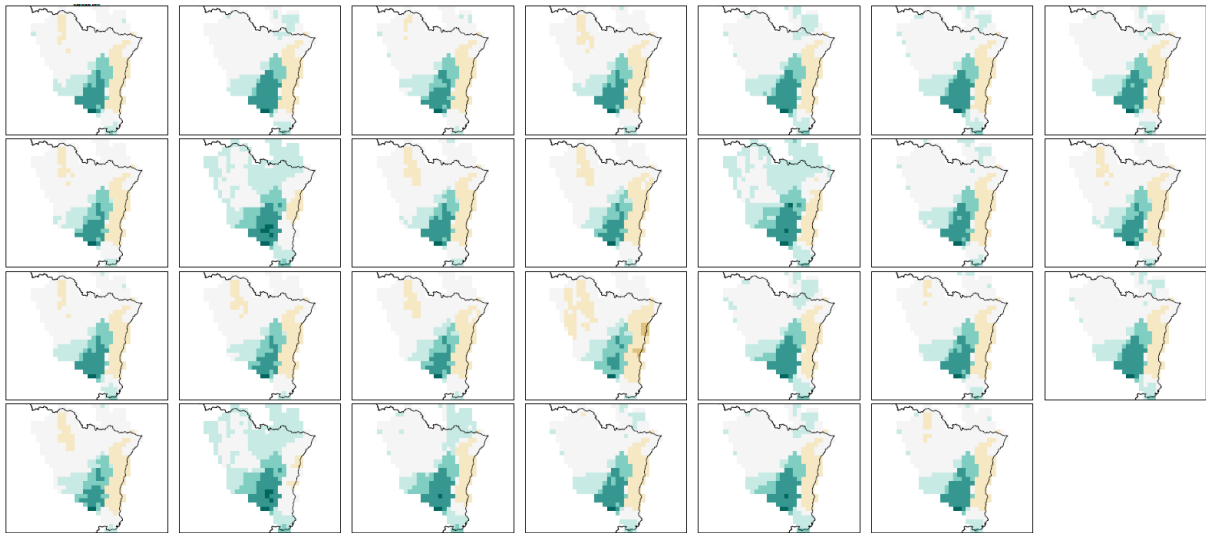


Figure 66 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

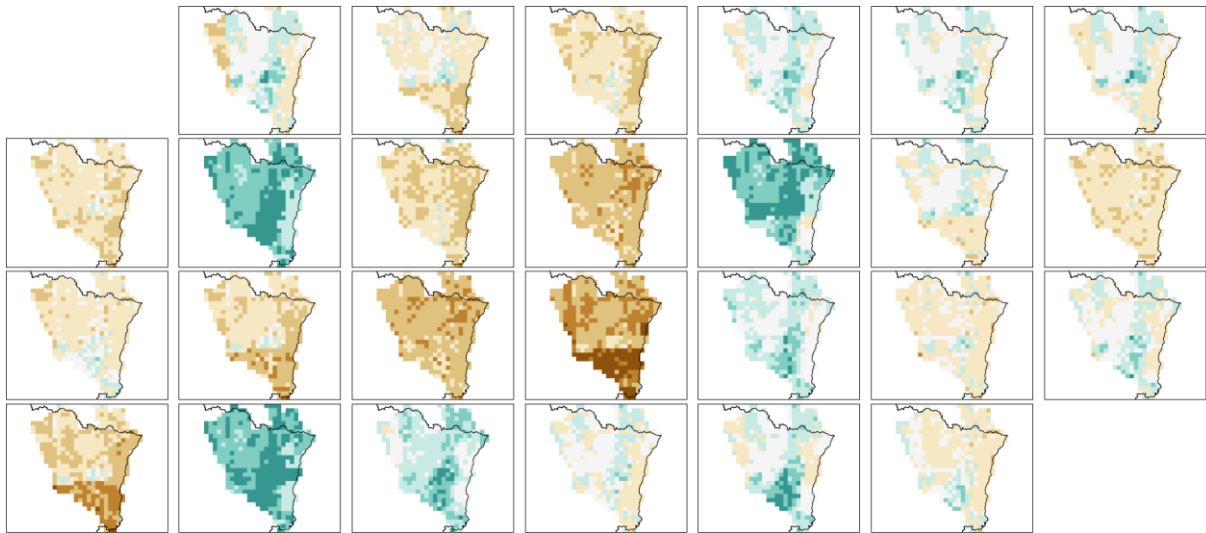


Figure 67 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

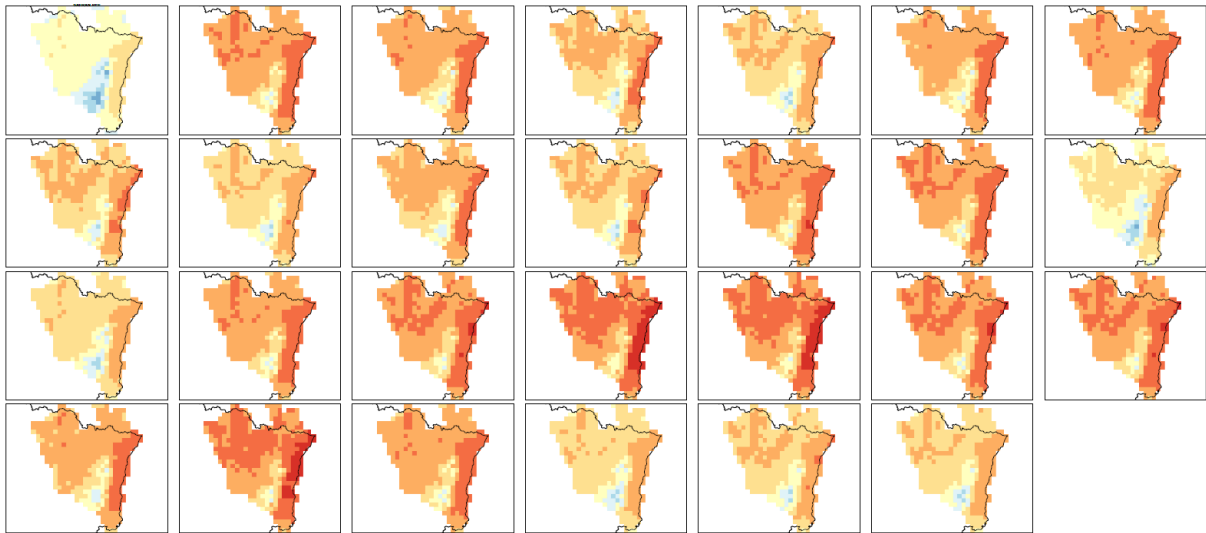


Figure 68 : Température annuelle moyenne (°C) pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

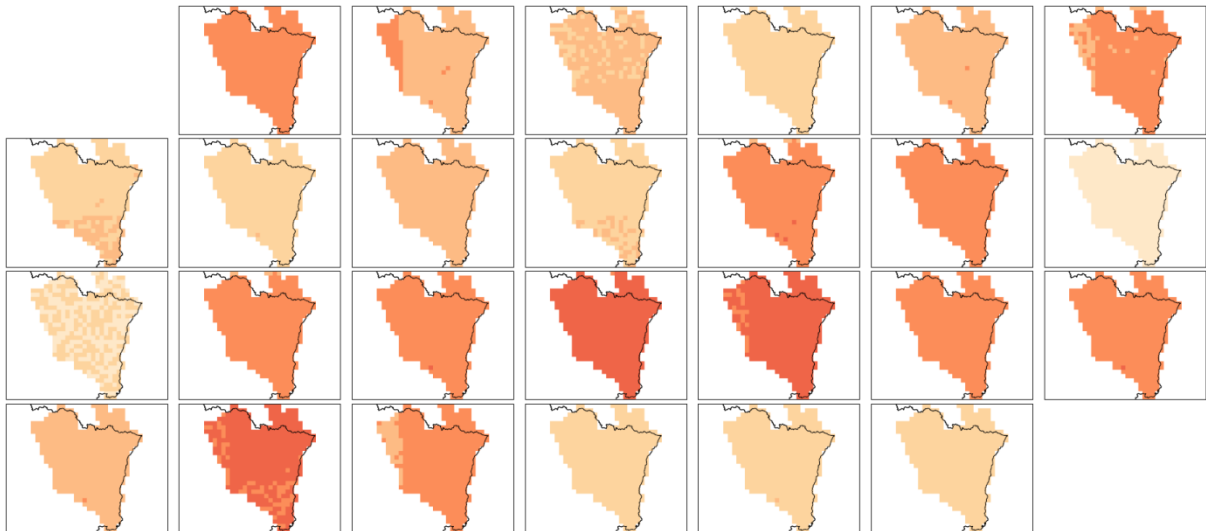


Figure 69 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 26 modèles entre 2021-2050 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP4.5.

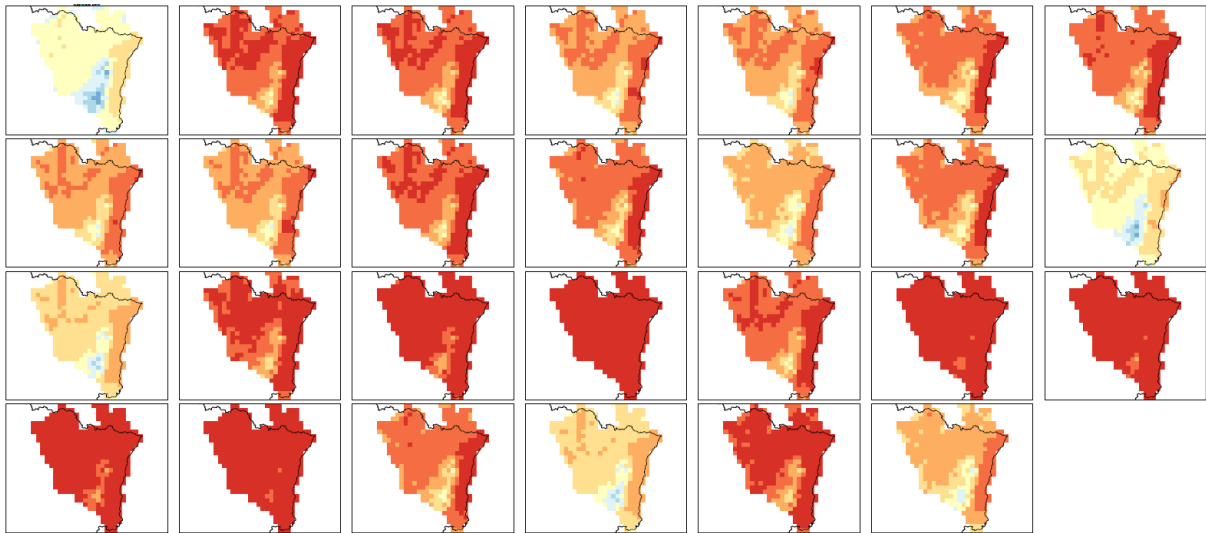


Figure 70 : Température annuelle moyenne (°C) pour 26 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP4.5 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

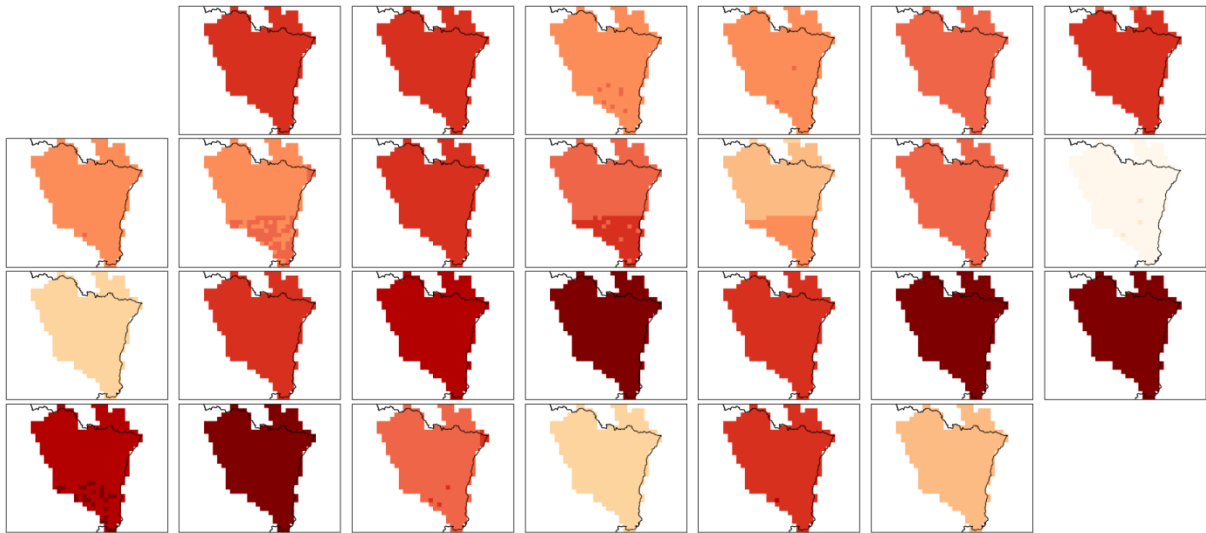


Figure 71 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 26 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP4.5.

iii. RCP8.5

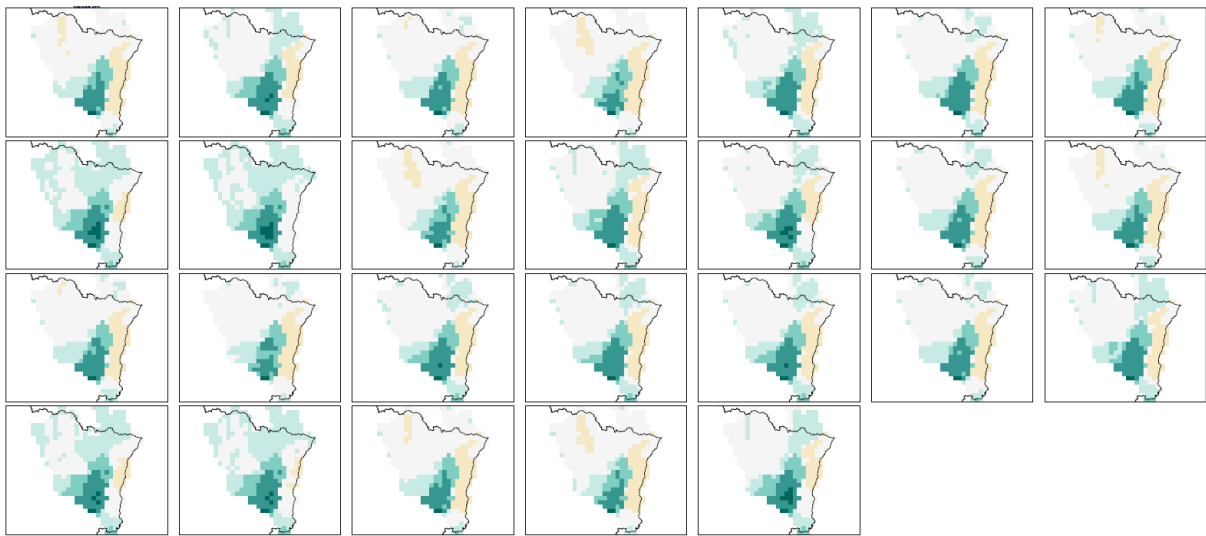


Figure 72 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 25 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP8.5 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

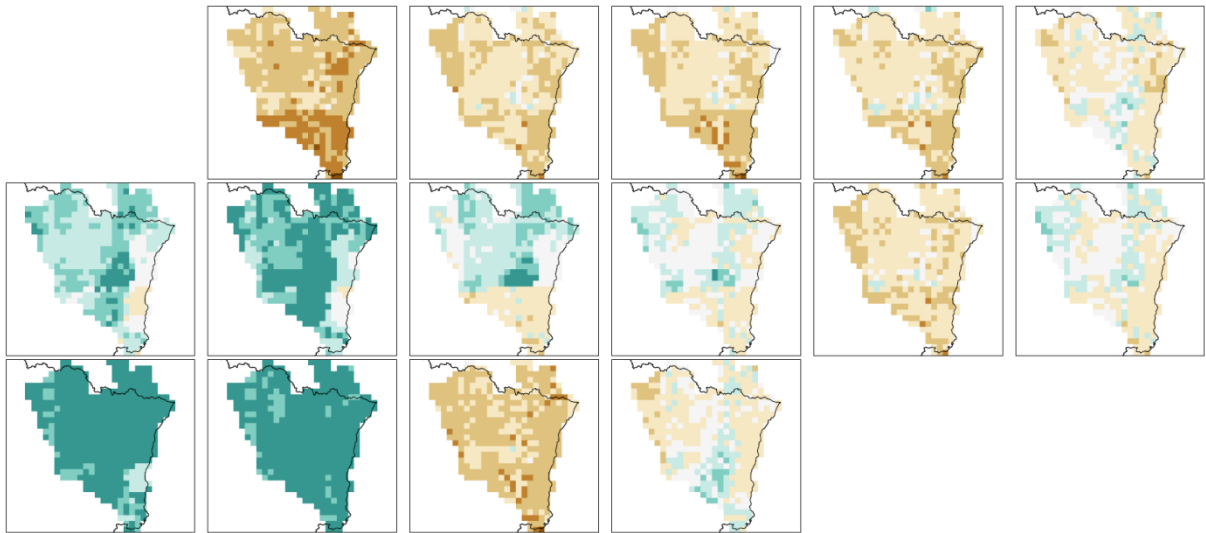


Figure 73 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 15 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP8.5.

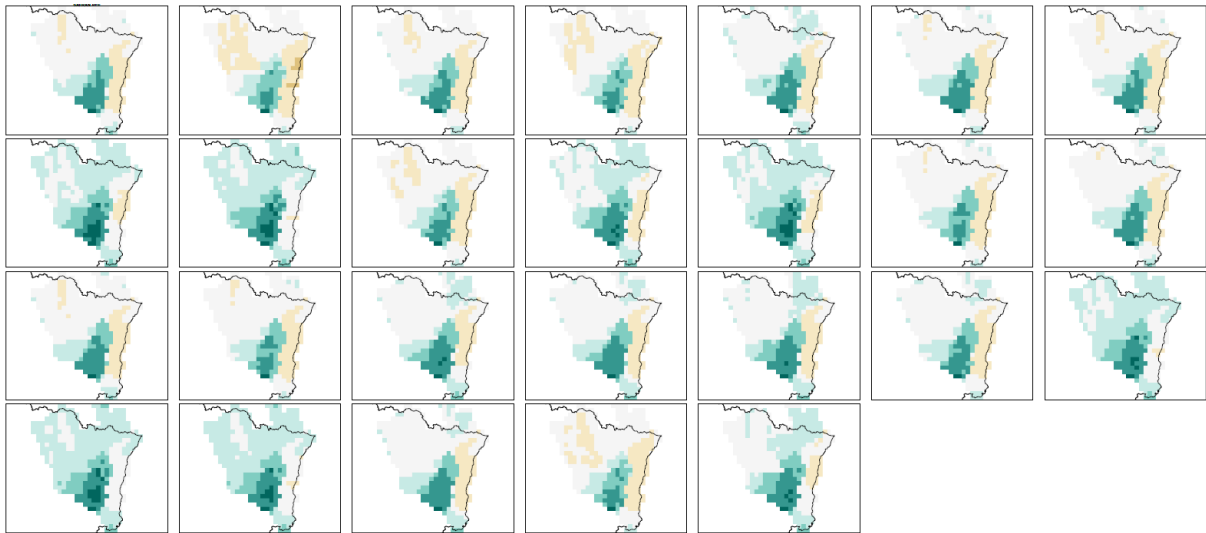


Figure 74 : Précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 25 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP8.5 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

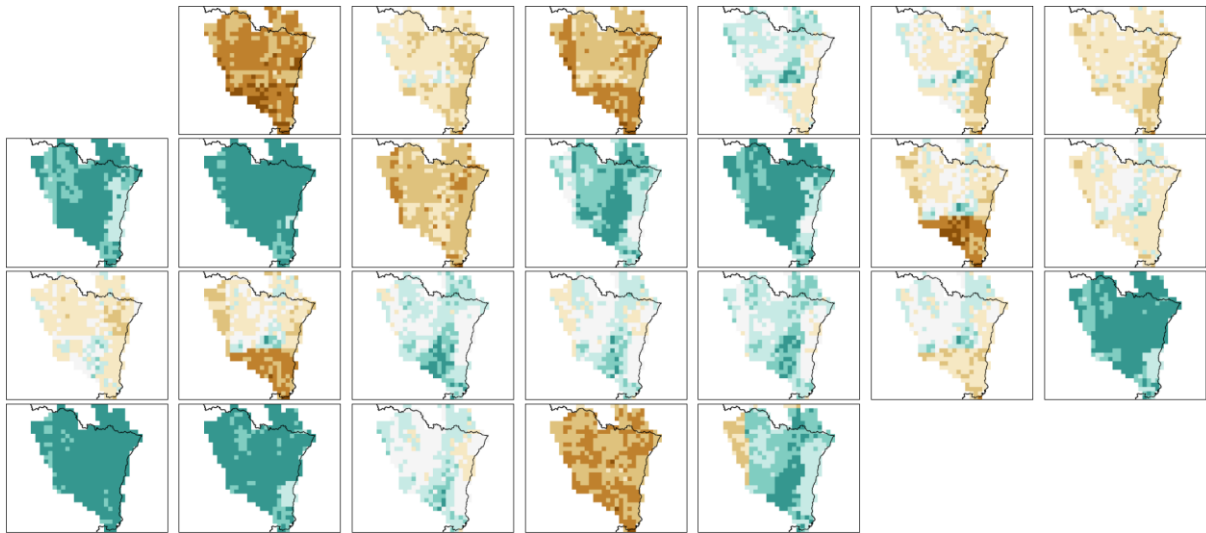


Figure 75 : Evolution de la précipitation annuelle moyenne en mm/j pour 15 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP8.5.

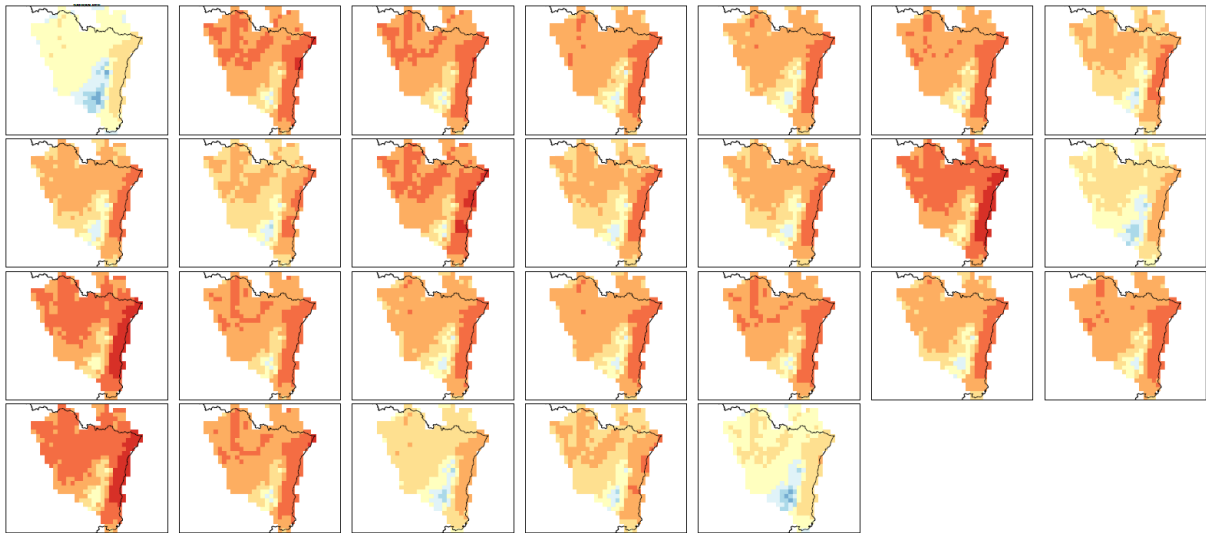


Figure 76 : Température annuelle moyenne pour 25 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP8.5 pour la période 2021-2050. En haut à gauche la référence SAFRAN.

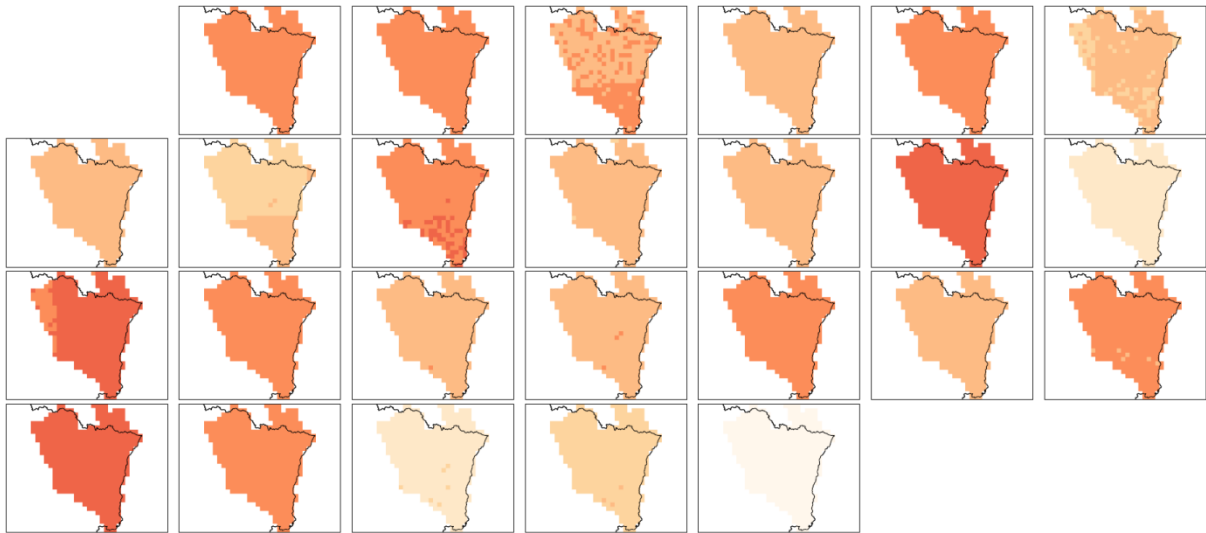


Figure 77 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 15 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP8.5.

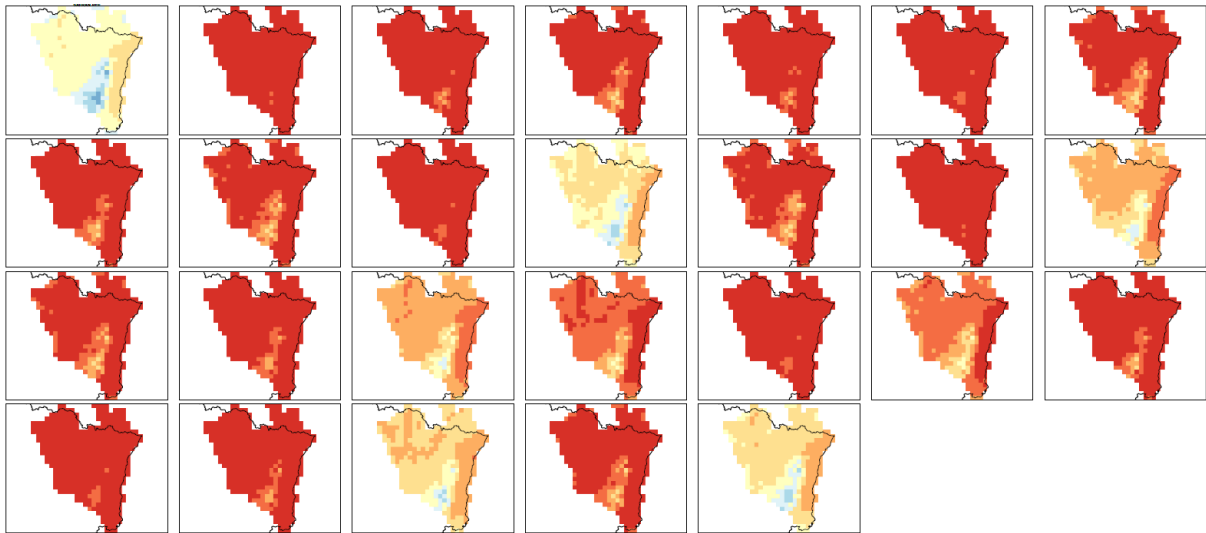


Figure 78 : Température annuelle moyenne pour 25 modèles, données issues de l'ADC pour le RCP8.5 pour la période 2071-2100. En haut à gauche la référence SAFRAN.

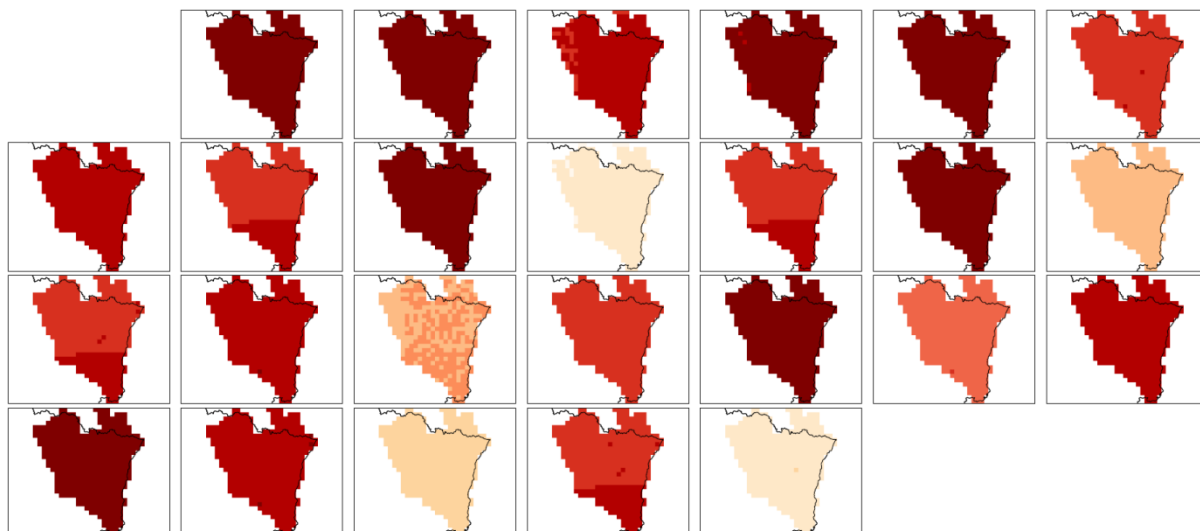


Figure 79 : Evolution de la température annuelle moyenne pour 15 modèles entre 2071-2100 et la période historique, données issues de l'ADC pour le RCP8.5.