



HAL
open science

Projet CHIMERE 21. CHIers - Meuse: Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle

Guillaume Thirel, Lila Collet, Fabienne Rousset, Olivier Delaigue, Didier François, Joël Gailhard, Matthieu Le Lay, Charles Perrin, Mathieu Reverdy, Raphaëlle Samacoits, et al.

► **To cite this version:**

Guillaume Thirel, Lila Collet, Fabienne Rousset, Olivier Delaigue, Didier François, et al.. Projet CHIMERE 21. CHIers - Meuse: Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle. [0] 17C08004, INRAE UR HYCAR; Météo-France; EDF-DTG; Université de Lorraine (Metz); INRAE UR-Riverly; Dreal Grand-Est. 2021, pp.152. hal-03206168

HAL Id: hal-03206168

<https://hal.inrae.fr/hal-03206168v1>

Submitted on 22 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet CHIMERE 21

CHlers - Meuse : Evolution du RégimE
hydrologique au 21^e siècle

Rapport final - 23/04/2021

Auteur et autrices principales :

Guillaume Thirel, chargé de recherche à INRAE, unité de recherche HYCAR, équipe Hydrologie des bassins versants, Antony. Email : guillaume.thirel@inrae.fr. Site web : <https://webgr.inrae.fr>.

Lila Collet, ingénieure de recherche en CDD à INRAE, unité de recherche HYCAR, équipe Hydrologie des bassins versants, Antony. Email : lila.collet@edf.fr.

Fabienne Rousset, ingénieure de la Météorologie à Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, équipe AVH, Toulouse. Email : fabienne.rousset@meteo.fr.

Contributeurs et contributrices:

Olivier Delaigue, ingénieur d'étude à INRAE, unité de recherche HYCAR, équipe Hydrologie des bassins versants, Antony.

Didier François, ingénieur de recherche à l'Université de Lorraine, laboratoire LOTERR, Metz.

Joël Gailhard, ingénieur à EDF, service DTG, Saint-Martin-le-Vinoux.

Matthieu Le Lay, ingénieur à EDF, service DTG, Saint-Martin-le-Vinoux.

Charles Perrin, ingénieur de l'agriculture et de l'environnement à INRAE, unité de recherche HYCAR, équipe Hydrologie des bassins versants, Antony.

Mathieu Reverdy, postdoctorant à INRAE, unité de recherche RiverLy, équipe Hydrologie des bassins versants, Lyon.

Raphaëlle Samacoits, ingénieure en CDD à Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, équipe AVH, Toulouse.

Morgane Terrier, doctorante à INRAE, unité de recherche HYCAR, équipe Hydrologie des bassins versants, Antony.

Jean-Philippe Vidal, chargé de recherche à INRAE, unité de recherche RiverLy, équipe Hydrologie des bassins versants, Lyon.

Jean-Pierre Wagner, ingénieur, DREAL Grand-Est, Metz.

Site web :

<https://webgr.inrae.fr/chimere-21>

Comment citer ce rapport :

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F., Delaigue, O. François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Perrin, C., Reverdy, M., Samacoits, R., Terrier, M., Vidal, J.-P., Wagner, J.-P., Projet CHIMERE 21. CHlers - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle. Rapport final. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, convention n° 17C08004. 23/04/2021. 152 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Résumé

Ce projet avait pour objectif de réaliser une évaluation des impacts futurs des changements climatiques sur les débits de la partie française de la Meuse, en utilisant les dernières simulations climatiques disponibles produites dans le cadre du cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Une approche multi-modèle (exploitant quatre modèles hydrologiques et un ensemble de paramètres) a été mise en place et utilisée avec un ensemble de projections issues de cinq couples de modèles climatiques, désagrégées et débiaisées par une méthode développée en France. Les impacts du changement climatique ont été quantifiés sur la base de divers indicateurs relatifs au régime hydrologique, aux crues et aux étiages. Une attention particulière a été donnée à la quantification des incertitudes associées à la chaîne de modélisation.

L'analyse des projections climatiques indique un futur plus chaud, et ce d'autant plus qu'on se situe dans un futur lointain et comportant plus d'émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP 8.5). En ce qui concerne les précipitations, le signal est moins homogène. On se dirige vers un futur plus humide à l'échelle annuelle. La déclinaison à l'échelle saisonnière est différente : on peut constater une tendance à des hivers plus humides mais la tendance sur les étés est plus incertaine, certaines projections indiquant des étés plus secs et d'autres indiquant des étés plus humides. Comparé à un projet plus ancien, Explore 2070, ces projections indiquent un futur plus chaud, mais aussi plus humide. Même si les projections plus récentes DRIAS-2020¹ n'ont pas pu être utilisées dans ce projet, une comparaison réalisée dans le cadre de CHIMERE 21 a montré que les projections CHIMERE 21 et DRIAS-2020 étaient cohérentes, et indiquaient un futur plus chaud et plus humide que celui d'Explore 2070.

L'analyse des débits futurs indique une probable augmentation des débits lors de la période hivernale ainsi qu'une évolution peu marquée des débits d'étiage l'été, même si certaines projections indiquent une baisse possible des débits durant cette période. On observe cependant des différences spatiales sur le bassin de la Meuse, l'augmentation des débits de crue étant notable en particulier en aval du bassin, et la diminution des débits d'étiage étant plus marquée notamment en amont.

Comparés à Explore 2070, ces résultats sont donc moins pessimistes concernant l'évolution des étiages et des débits moyens, mais plus pessimistes concernant l'évolution des crues. En effet, Explore 2070 avait montré sur la Meuse une forte pression sur les débits d'étiage et sur les débits moyens, qui étaient en baisse, ainsi qu'une évolution incertaine des débits de crue. Cette différence repose en majeure partie sur les nouvelles projections climatiques utilisées dans ce projet, qui indiquent désormais plutôt une augmentation des précipitations, au contraire d'Explore 2070. Ainsi, dans CHIMERE 21, nous avons pu bénéficier de projections climatiques plus récentes, reposant sur des modèles améliorés, cohérente avec l'ensemble plus large de projections appelé DRIAS-2020.

Ce rapport a pour objet de présenter les méthodes et les résultats principaux du projet CHIMERE 21. Deux rapports spécifiques, l'un lié à la naturalisation des débits observés et l'autre à la mise en place de prévisions de sécheresse hydrologique grâce à des indicateurs de sécheresse météorologique, ont aussi été produits. Enfin, des fiches synthétiques d'évolution du climat et des débits ont été produites pour les différentes sous-bassins de la Meuse modélisées dans ce projet.

¹ <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

Abstract

The goal of this project was to evaluate the impact of future climate change on streamflows of the French part of the Meuse basin, by using climate simulations recently produced within the fifth Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) report. A multi-model approach (using four hydrological models and an ensemble of parameters) was set up and used jointly with an ensemble of climate projections coming from five different climate models, which were downscaled and unbiased with a method developed in France. The impact of climate change was quantified through the calculation of diverse indicators relative to the hydrological regime, floods and low flows. A particular attention was given to the quantification of uncertainties associated with the modelling chain.

The analysis of climate projections indicates a warmer future, especially when we consider the far future and a future with high levels of greenhouse gas emissions (RCP 8.5 scenario). The signal is less homogeneous for precipitation. Precipitation seem to increase in the future at the annual scale. The seasonal pattern is different: while winters tend to become wetter, summer show an uncertain trend, as some projections indicate drier futures and others indicate wetter futures. Compared to a former French study, Explore 2070, these projections indicate a warmer and wetter future. Even if the more recent DRIAS-2020² projections could not be used for the CHIMERE 21 project, we performed a comparison that showed that CHIMERE 21 and DRIAS-2020 projections are consistent and both indicate a warmer and wetter future than Explore 2070.

The analysis of future streamflows indicate a likely increase of streamflows during winters as well as a low evolution of streamflows during summers, even if some scenarios indicate a possible decrease of streamflows during this period. However, spatial differences were noted over the Meuse catchment, as the increase of floods was perceived as more intense on its downstream part and the decrease of low flows was perceived as more intense for its upstream part.

Compared to Explore 2070, these results are therefore less pessimistic regarding the evolution of low flows and mean flows, but more pessimistic regarding the evolution of floods. Indeed, Explore 2070 lead to the projections of large decrease of summer and median streamflows and to an uncertain evolution of floods. This difference mainly relies on the use of new climate projections for CHIMERE 21, as they now rather indicate an increase of precipitation, conversely to Explore 2070. Therefore, within the CHIMERE 21 project, we could benefit from more recent climate projections, relying on improved models, which are consistent with a larger dataset named DRIAS-2020.

The present report aims at presenting the methods and main results of the CHIMERE 21 project. Two specific reports, one linked to the naturalisation of observed streamflows, the other one to low-flow forecasting with meteorological drought indicators, were produced in the frame of this project. Last, synthetic sheets presenting the evolution of climate and streamflows were produced for the different sub-catchments of the Meuse basin that were modelled during this project.

² <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

Table des matières

TABLE DES MATIERES	6
I. LES PARTENAIRES DU PROJET CHIMERE 21	8
I.1. ENTITES IMPLIQUEES DANS LE PROJET ET APPORTS RESPECTIFS	8
I.2. EMBAUCHE ET DEVENIR DE PERSONNELS TEMPORAIRES	8
II. CONTEXTE ET OBJECTIFS	10
II.1. CONTEXTE	10
II.2. OBJECTIFS DU PROJET CHIMERE 21.....	13
III. ZONE D'ETUDE ET DONNEES	14
III.1. LE BASSIN VERSANT DE LA MEUSE	14
III.2. LES DONNEES HYDROMETRIQUES	20
III.3. LES DONNEES CLIMATIQUES OBSERVEES.....	22
IV. NATURALISATION DES DEBITS	24
V. LES DONNEES CLIMATIQUES FUTURES	26
V.1. LA SELECTION DE PROJECTIONS CLIMATIQUES	26
V.2. LES DESCENTES D'ECHELLES ET METHODES DE DEBIASAGE TESTEES	28
V.3. ANALYSE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES FUTURES.....	29
V.3.1. EVOLUTION DES TEMPERATURES DE L'AIR SUR LE BASSIN DE LA MEUSE.....	29
V.3.2. EVOLUTION DES PRECIPITATIONS SUR LE BASSIN DE LA MEUSE	32
V.3.3. EVOLUTION CONJOINTE TEMPERATURES-PRECIPITATIONS	34
V.4. MISE EN PERSPECTIVE DES DONNEES CLIMATIQUES	35
VI. MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	40
VI.1. DE L'INCERTITUDE DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	40
VI.2. LES MODELES HYDROLOGIQUES UTILISES.....	40
VI.3. PERFORMANCE DES MODELES A L'EXUTOIRE (CHOOZ)	41
VII. ANALYSE DES PROJECTIONS HYDROLOGIQUES	46
VII.1. EVOLUTION DU REGIME INTERANNUEL DES DEBITS.....	46
VII.2. EVOLUTION DES DEBITS MOYENS, FAIBLES ET FORTS LE LONG DE LA MEUSE	50
VII.3. DECOMPOSITION D'INCERTITUDE POUR LES INDICATEURS HYDROLOGIQUES	54
VII.3.1. PROJECTIONS DES ETIAGES	54
VII.3.2. PROJECTIONS DES DEBITS MOYENS	56
VII.3.3. PROJECTIONS DES CRUES.....	58
VII.4. QUANTIFICATION DE LA PROBABILITE DES DIFFERENTES TENDANCES	61
VII.5. DISCUSSION DES RESULTATS.....	62
VIII. PREVISION DE SEUILS DE VIGILANCE SECHERESSE.....	65
IX. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	67
X. REFERENCES.....	69
ANNEXE A. LES METHODES DE DESCENTE D'ECHELLE	74
A.1. SCOPE	74
A.1.1. METHODOLOGIE	74
A.1.2. PERFORMANCE DE LA METHODE	75

A.2.	ADAMONT	79
A.2.1.	METHODOLOGIE	79
A.2.2.	PERFORMANCE DE LA METHODE	81
A.3.	PERSPECTIVES	87
ANNEXE B.	MODELISATION HYDROLOGIQUE	88
B.1.	CRITERES DE PERFORMANCE ET INDICATEURS D'ÉVALUATION DES MODELES HYDROLOGIQUES	88
B.2.	GRSD	89
B.2.1.	PRINCIPE DU MODELE.....	89
B.2.2.	CALAGE	91
B.3.	SIM2.....	92
B.3.1.	PRINCIPE DU MODELE.....	92
B.3.2.	ADAPTATION DES SORTIES DE DEBIT DE SIM2	94
B.4.	PRESAGES	96
B.4.1.	PRINCIPE DU MODELE.....	96
B.4.2.	CALAGE	97
B.5.	MORDOR.....	98
B.5.1.	PRINCIPE DU MODELE.....	98
B.5.2.	CALAGE	99
B.6.	PERFORMANCE SPATIALE DES MODELES HYDROLOGIQUES	100
B.7.	ROBUSTESSE TEMPORELLE DES MODELES HYDROLOGIQUES.....	103
ANNEXE C.	METHODE DE QUANTIFICATION D'INCERTITUDE.....	105
ANNEXE D.	PRODUCTIONS DU PROJET CHIMERE 21	108
D.1.	COMMUNICATION DANS DES CONFERENCES ET SEMINAIRES.....	108
D.2.	PUBLICATIONS DANS DES REVUES A COMITE DE LECTURE OU DANS DES ACTES DE CONFERENCES.....	108
D.3.	RAPPORTS.....	109
D.4.	REUNIONS DU PROJET.....	109
D.5.	DONNEES.....	109
D.6.	METHODES	110
ANNEXE E.	EVOLUTION DU CLIMAT POUR CHAQUE COUPLE GCM-RCM	111
ANNEXE F.	FICHES SYNTHETIQUES.....	122

I. Les partenaires du projet CHIMERE 21

I.1. Entités impliquées dans le projet et apports respectifs

Ce projet a été coordonné par l'équipe Hydrologie des bassins versants de l'Unité de recherche HYCAR à INRAE Antony³. Cette équipe a mené l'étude de naturalisation des débits, géré la mise au format de données climatiques, réalisé des modélisations hydrologiques, centralisé et analysé les calages des modèles hydrologiques et les projections de débits et réalisé l'étude sur les indicateurs météorologiques de sécheresse. Elle a aussi été le point de contact privilégié avec les gestionnaires et financeurs du projet. On désignera par la suite l'équipe coordinatrice **INRAE Antony**.

L'Unité de recherche RiverLy d'INRAE Lyon a été impliquée dans l'évaluation d'une méthode de descente d'échelle, ainsi que dans une expertise sur les indicateurs météorologiques de sécheresse. On appellera cette équipe **INRAE Lyon** par la suite.

Météo-France a contribué à ce projet via la mise en place d'une méthode de descente d'échelle sur la France entière, par son expertise sur les modèles climatiques et la mise à disposition des données climatiques et l'analyse des évolutions climatiques, par son expertise sur les indicateurs météorologiques de sécheresse et a réalisé des modélisations hydrologiques.

EDF a contribué par son expertise sur les indicateurs météorologiques de sécheresse et sur les données naturalisées à l'exutoire du bassin versant et a réalisé des modélisations hydrologiques.

L'**Université de Lorraine** a réalisé des modélisations hydrologiques et a apporté son expertise sur la connaissance du bassin versant de la Meuse.

La **DREAL Grand-Est** a contribué par sa connaissance des acteurs et des enjeux, par la fourniture de données, et par sa participation aux comités de suivi et de pilotage.

Toutes les équipes ont été impliquées dans la valorisation des résultats du projet.

L'Agence de l'Eau Rhin-Meuse a contribué par sa connaissance des acteurs et des enjeux et par sa participation aux comités de suivi. Par ailleurs, ce projet a bénéficié d'un financement de la part de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse à hauteur de 50% des coûts éligibles du projet.

Ce rapport final a été écrit et coordonné par INRAE Antony (Guillaume Thirel et Lila Collet) et Météo-France (Fabienne Rousset) avec des apports et relectures de partenaires de chacune des entités impliquées dans le projet.

I.2. Embauche et devenir de personnels temporaires

Trois embauches de personnels contractuels ont été effectuées durant le projet CHIMERE 21 :

- A INRAE Lyon, Mathieu Reverdy a été employé de début octobre 2017 à fin mai 2018. Il a eu pour tâche la mise en place de la méthode de descente d'échelle SCOPE en climats présent et futur, comme décrit dans l'Annexe A.1.

³ Au 1^{er} janvier 2020, Irstea et l'INRA ont fusionné pour devenir INRAE. Les personnels concernés par le projet n'ont pas changé, cette fusion n'a pas eu d'impact administrativement parlant sur le déroulement du projet.

- A Météo-France, Raphaëlle Samacoits a été employée de début octobre 2017 à fin juillet 2018. Elle a eu pour tâche la mise en place de la méthode de descente d'échelle ADAMONT en climats présent et futur, comme décrit dans l'Annexe A.2. Suite à ce CDD, Raphaëlle Samacoits a travaillé de septembre 2018 à mars 2019 sur le projet CLIMTOUR (projet Copernicus C3S), et depuis avril 2019 sur plusieurs projets concernant l'étude de l'impact du changement climatique en zone de montagne et les crues de l'Aude (projet FLAude), toujours à Météo-France.
- A INRAE Antony, Lila Collet a été employée de mai 2018 à août 2020 (et co-financée sur un autre projet). Elle a eu pour tâche la réalisation de la modélisation hydrologique avec GRSD, l'analyse des calages des modèles hydrologiques, l'analyse des projections hydrologiques, la quantification des incertitudes, la réalisation de l'étude sur les indicateurs météorologiques de sécheresse, ainsi que de la préparation d'éléments de communication des résultats aux gestionnaires. Suite à ce CDD, Lila Collet a été embauchée en CDI à EDF R&D dans le groupe Météo, Climat et Energies Renouvelables intermittentes.

II. Contexte et objectifs

II.1. Contexte

Le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)**, dans le rapport de synthèse rendu public en 2013 (IPCC, 2013⁴), a montré de manière claire les bouleversements en cours du système climatique mondial. La hausse quasi généralisée des températures va s'accompagner d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes climatiques, en particulier en termes de températures et de précipitations. Les conséquences sur les écosystèmes et nos sociétés vont être majeures. L'eau va devenir, encore plus qu'aujourd'hui, un élément central de préoccupations pour les gestionnaires et les décideurs, sur des aspects portant tant sur les risques liés aux crues et inondations, que sur la ressource en lien avec les sécheresses (et les impacts sur différents secteurs d'activité) ou encore sur la préservation de la qualité et de la biodiversité aquatique.

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 de la Meuse. 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. La plupart de ces études repose sur une chaîne de modélisation composée de plusieurs maillons (Figure 1). Cette chaîne se compose :

- des **trajectoires de forçage radiatif** (Radiative Concentration Pathways, RCPs⁵), c'est-à-dire des scénarios d'évolution des quantités de gaz à effet de serre émises au cours du 21^e siècle,
- des **modèles de circulation générale** (General Circulation Models, GCMs), c'est-à-dire des modèles climatiques simulant le climat sur la Terre entière sur des mailles de calcul grossières,
- des **modèles climatiques régionaux** (Regional Climate Models, RCMs), c'est-à-dire des modèles climatiques simulant le climat sur des zones plus restreintes et sur des mailles de calcul plus fines,
- de méthodes de **descente d'échelle** ou de **correction de biais**, qui visent à corriger les défauts des simulations climatiques en affinant la résolution spatiale et en corrigeant leurs erreurs,
- de **modèles hydrologiques**, qui viennent traduire les projections climatiques en projections hydrologiques.

Cette chaîne comporte des incertitudes sur chacune de ses étapes, résultant en une cascade d'incertitudes. L'ensemble des études mentionnées ci-dessous comporte un ou plusieurs éléments sur chacun des maillons de la chaîne de modélisation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie.

⁴ <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

⁵ Pour les études les plus anciennes, les trajectoires dites SRES, pour Special Report on Emissions Scenarios, étaient utilisées.

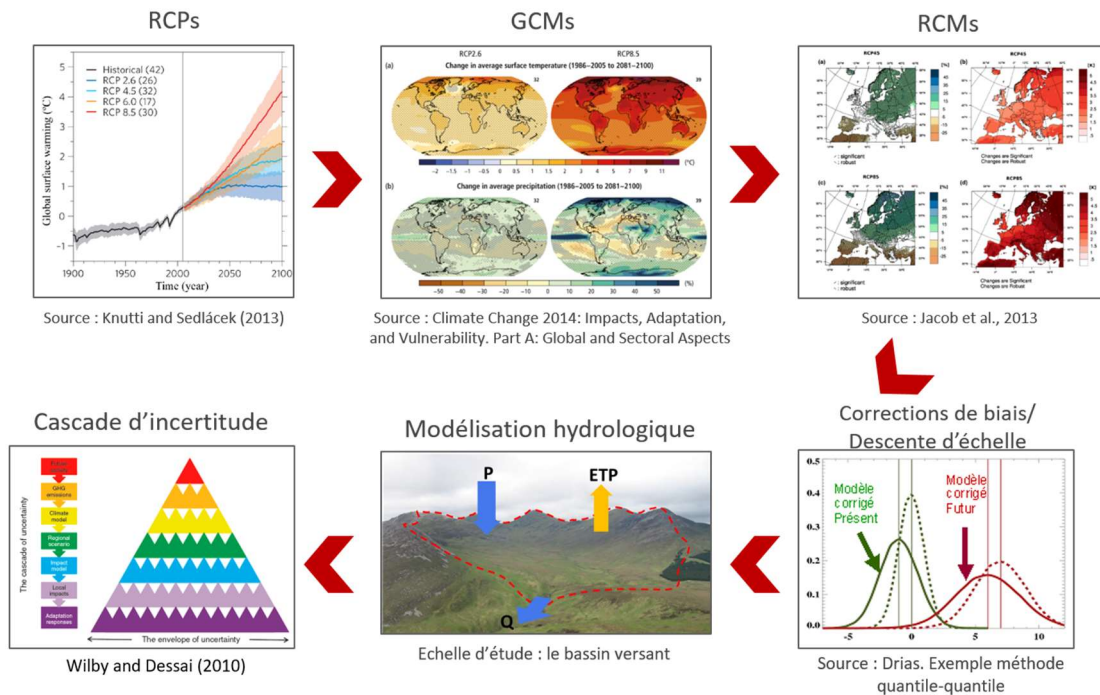


Figure 1 : Chaîne de modélisation de l'impact du changement climatique, d'après Lemaitre-Basset (2020).

Les diagnostics nationaux ou régionaux réalisés en France depuis une quinzaine d'années montrent des impacts potentiellement forts sur le cycle de l'eau à l'horizon du milieu ou de la fin du 21^e siècle. Des baisses des débits moyens de plus de 30%, des diminutions parfois de moitié des débits en étiage, une diminution marquée des couverts neigeux et des glaciers et une plus grande précocité des périodes de fonte, une augmentation de la fréquence des crues liées aux phénomènes pluviométriques extrêmes, telles sont quelques-unes des conclusions qui ressortent communément de ces études en France (e.g. Chauveau et al., 2013). L'évolution de la disponibilité en eau, tant en quantité que dans sa répartition spatiale et temporelle, pourrait entraîner des changements sociétaux majeurs, que ce soit sur les politiques agricoles, énergétiques, de transport ou d'aménagement du territoire et de protection de la vie aquatique. Les événements de crue atypiques survenus sur les bassins de la Loire et de la Seine en juin 2016 ou les températures extrêmes qu'a connues l'Hexagone durant les étés 2018 et 2019, même s'ils ne sont pas directement imputables au changement climatique, préfigurent ce que pourrait être le climat de demain.

Face à ces évolutions potentielles, des stratégies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre doivent être mises en place d'urgence. Hélas, les dynamiques actuelles enclenchées récemment par certains pays ne permettront pas de contenir les évolutions de la température mondiale en deçà d'une augmentation de 2°C par rapport aux températures de référence pré-1990, objectif affiché des accords de Paris⁶. Les gestionnaires doivent donc mettre en place des stratégies d'adaptation pour être prêts à faire face aux changements à venir. Or, il a été montré par Sauquet et al. (2019), après une enquête auprès des gestionnaires français locaux, qu'une étude nationale n'était pas satisfaisante, des déclinaisons locales des études d'impact, puis d'adaptation au changement climatique étant jugées nécessaires par ces acteurs locaux.

⁶ <https://unfccc.int/news/greater-climate-ambition-urged-as-initial-ndc-synthesis-report-is-published>

Le bassin de la Meuse ne semble pas devoir être épargné par les conséquences de ce changement global. Différentes études réalisées ces dernières années sur ou englobant le bassin, montrent également des changements importants à attendre au niveau de la dynamique hydrologique du bassin, en termes quantitatifs et qualitatifs, avec des conséquences notables sur différents secteurs (Booij, 2004 ; de Wit et al., 2007 ; van Vliet and Zwolsman, 2008 ; Commeaux et al., 2010 ; Drogue et al., 2010 ; François et al., 2011 ; Chauveau et al., 2013 ; Dewals et al., 2013 ; Krueger et al., 2013 ; Romgens, 2013 ; Detrembleur et al., 2015 ; Grelier et al., 2016 ; Pyka et al., 2016 ; Sjerps et al., 2017).

Deux études majeures ont concerné le bassin de la Meuse, le projet Explore 2070 mené à une échelle nationale et le projet AMICE mené à l'échelle du bassin.

Dans le projet **Explore 2070**, 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 (Chauveau et al., 2013). Les modèles Isba-Modcou de Météo-France et GR4J d'Irstea ont été appliqués sur un échantillon commun de 543 stations de mesure en France, tout d'abord en étant forcés par des observations météorologiques, puis par des projections climatiques (Chauveau et al., 2013). Une augmentation de la température moyenne de l'air dans le futur de 1,4 à 3 °C à l'horizon 2045-2065 est le résultat le plus robuste des projections climatiques pour la France. En ce qui concerne les précipitations moyennes, les tendances sont incertaines mais pourraient montrer une diminution d'environ 20 % l'été et aucune tendance pour le reste de l'année. Les deux modèles hydrologiques ont prédit une diminution d'environ 15 à 20 % des débits annuels pour la Meuse à Chooz (son exutoire à la frontière avec la Belgique). Les indicateurs hydrologiques utilisés dans ce projet sont principalement le débit mensuel minimum de période de retour 5 ans (QMNA5), caractéristique des bas débits, et le débit journalier maximal de période de retour 10 ans (QJXA10), caractéristique des hauts débits. Il est attendu que les bas débits diminuent fortement mais les intensités sont différentes pour les deux modèles hydrologiques : environ 20 % pour Isba-Modcou et jusqu'à 60 % pour GR4J. Cette différence montre l'utilité d'adopter une approche multi-modèle 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 et montrant une faible évapotranspiration), dont le signe est lui aussi incertain. Les crues pourraient légèrement augmenter pour la Meuse, mais la dispersion des résultats est grande.

Le projet **AMICE**⁷, financé par le programme européen Interreg IVB, était un projet international portant sur l'ensemble du bassin de la Meuse. Deux points stratégiques concernant le bassin international de la Meuse sont à souligner : d'une part, 7 millions de personnes dépendent aujourd'hui de ce fleuve pour l'approvisionnement en eau potable en Belgique et aux Pays-Bas, avec des restrictions d'eau de plus en plus fréquentes, particulièrement depuis 2017 (RIWA-Meuse, 2018). On observe donc récemment une vulnérabilité croissante de ce fleuve au risque sécheresse. D'autre part, la partie française de la Meuse contribue pour plus d'un tiers (36 %) au débit de la partie hollandaise de la Meuse pendant les étiages et près de la moitié (47 %) pendant les crues (RIWA-Meuse). Une diminution de la ressource en eau de la Meuse française peut donc entraîner des conséquences majeures sur la partie aval de ce bassin international. La partie française du bassin de la Meuse comporte aussi des enjeux importants, comme l'a illustré l'arrêt temporaire de la centrale de Chooz

⁷ <http://www.amice-project.eu/fr/index.php>

lors de l'étiage de 2020, conformément à l'accord transfrontalier entre la France et la Belgique⁸. Dans le projet AMICE, des scénarios sec et humide ont été créés (Drogue et al., 2010). Les indicateurs hydrologiques utilisés dans ce projet sont principalement le débit minimum moyen sur sept jours (MAM7) et le débit horaire maximal centennal (Q_{hx100}). Le projet a montré à la station de Chooz (exutoire de la Meuse française) une diminution des débits d'étiage d'environ 10 à 25 % selon le scénario envisagé en futur proche (milieu du 21^e siècle) et de 35 à 50 % en futur lointain (fin du 21^e siècle). L'évolution des débits de crues est, quant à elle, très incertaine, le scénario humide donnant une augmentation de 10 et 25 % en futurs proche et lointain, et le scénario sec une diminution de 5 et 10 % respectivement. Le projet n'a pas pu conclure sur les précipitations extrêmes et les crues rapides qui en résultent (Drogue et al, 2010).

II.2. Objectifs du projet CHIMERE 21

Dans ce contexte, le projet CHIMERE 21 (Chiers - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21^e siècle) a cherché à répondre aux préoccupations croissantes des gestionnaires de la partie française du bassin, avec l'objectif d'actualiser et d'affiner les diagnostics existants sur les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau de la Meuse (et de la Chiers, un de ses principaux affluents en France) durant le 21^e siècle. De fortes attentes existent notamment sur la quantification de l'évolution des basses eaux, qui pourrait être critique pour différents secteurs d'activité (navigation, production énergétique, industrie). Ces travaux doivent également permettre aux gestionnaires français d'avoir des éléments quantitatifs actualisés pour les discussions avec les autres partenaires internationaux du bassin, Belgique, Luxembourg, Allemagne et Pays-Bas, notamment dans le cadre de la Commission internationale de la Meuse⁹. Comparativement aux études présentées ci-dessus, CHIMERE 21 a réalisé une analyse plus poussée de l'incertitude de la chaîne de modélisation, notamment au niveau de la modélisation hydrologique et a fait usage de projections climatiques plus récentes.

Le projet CHIMERE 21 a donc eu pour objectif de réaliser une évaluation des impacts futurs des changements climatiques sur les débits de la partie française de la Meuse, en utilisant les dernières simulations climatiques disponibles produites dans le cadre du cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Une approche multi-modèle (exploitant quatre modèles hydrologiques et un ensemble de paramètres) a été mise en place et utilisée conjointement avec un ensemble de projections issues de différents modèles climatiques, désagrégées statistiquement par une méthode développée en France. Les impacts du changement climatique ont été quantifiés selon divers indicateurs relatifs aux régimes, aux crues et aux étiages. Une attention particulière a été donnée à la quantification des incertitudes associées à la chaîne de modélisation. Par ailleurs, une étude spécifique a été menée sur les possibilités d'utilisation des indicateurs météorologiques de sécheresse pour caractériser les situations d'étiage. Enfin, les résultats du projet ont été valorisés via des fiches synthétiques fournies aux gestionnaires ainsi qu'une synthèse courte.

Le présent rapport a pour objet de présenter les résultats principaux du projet CHIMERE 21. Pour alléger la lecture de ce rapport, les points méthodologiques les plus détaillés sont reportés en annexes.

⁸ <https://www.edf.fr/groupe-edf/nos-energies/carte-de-nos-implantations-industrielles-en-france/centrale-nucleaire-de-chooz/actualites/redemarrage-de-l-unite-de-production-ndeg1-de-la-centrale-de-chooz>

⁹ <http://www.meuse-maas.be/>

III. Zone d'étude et données

Dans cette partie, nous présentons le bassin versant de la Meuse concerné par cette étude, les données hydrométriques observées ainsi que les données météorologiques observées. Les projections climatiques utilisées seront détaillées dans une partie spécifique (Section V), conjointement aux méthodes de descente d'échelle.

III.1. Le bassin versant de la Meuse

Notre territoire d'étude correspond au bassin versant de la Meuse de sa source à Pouilly-en-Bassigny (Haute-Marne) jusqu'à la frontière franco-belge localisée à Givet (Ardennes). Il a une superficie de 10 120 km² dont environ 2 300 km² situées en Belgique et 140 km² au Luxembourg. Ces portions de bassins versants s'étendant à l'étranger concernent des affluents de la partie aval : une petite partie du bassin de la Chiers (Belgique et Luxembourg), et presque l'intégralité des bassins de la Semois et du Viroin (Belgique). Le bassin étudié dans le projet CHIMERE 21 représente 29 % de la totalité du bassin de la Meuse à son exutoire dans la Mer du Nord.

Dans sa partie française, la Meuse draine un territoire situé dans les départements (d'amont en aval) de la Haute-Marne, des Vosges, de la Meuse, de la Meurthe-et-Moselle et des Ardennes et couvrant 836 communes. D'après les données de population de 2017 (source INSEE), on peut estimer la population vivant dans le bassin versant français à environ 450 000 habitants ce qui représente une densité de population particulièrement faible : 57.6 hab./km². Par comparaison, à l'échelle de la France métropolitaine, on compte 120 hab./km² et pour la région Grand Est 97 hab./km². Les agglomérations les plus importantes se regroupent principalement à l'aval du bassin avec Charleville-Mézières (103 000 hab. dans l'aire urbaine), Longwy (74 000), Verdun (40 000), Sedan (29 000). Dans le sud du bassin, les aires urbaines de Neufchâteau, Commercy et Saint-Mihiel comptent 12 000, 7 000 et 5 000 habitants.

Pour les parties belge et luxembourgeoise, l'estimation¹⁰ de la population s'élève à 260 000 habitants soit une densité beaucoup plus élevée de 113 hab./km² (données 2018).

Le bassin est donc essentiellement rural avec de vieilles implantations industrielles dans le bassin de la Chiers et le long de la Meuse dans sa partie ardennaise. Nombre d'entre elles ont cessé leur activité notamment pour celles liées à la sidérurgie. Les usages de l'eau liés à l'activité économique sont abordés en Section IV. Le caractère rural du bassin apparaît clairement dans les statistiques d'occupation du sol (source Corine Land Cover) avec 21 % de la surface du bassin en terres arables, 25 % en prairies et plus de 40 % en forêts. Ces dernières se situent majoritairement en aval dans la partie ardennaise du bassin.

D'un point de vue topographique, le bassin comprend deux ensembles (Figure 2) :

- De sa source et jusqu'à sa confluence avec la Chiers, la Meuse possède un cours orienté sud-nord. Elle draine une région de plateaux avec des altitudes maximales qui peuvent atteindre 500 m dans le Bassigny et qui diminuent vers le nord pour atteindre environ 380 m à l'extrémité nord de la côte de Meuse. Elle prend sa source à 400 m d'altitude puis entaille

¹⁰ Pour cette partie du bassin, l'estimation est plus imprécise en raison de la taille des communes beaucoup plus étendues qu'en France et pour lesquelles il est difficile d'affecter la totalité de la population au bassin de la Meuse. Nous avons vérifié que les zones bâties étaient très majoritairement situées dans le bassin pour attribuer la population d'une commune au bassin.

assez profondément le plateau avec une altitude de 150 m à sa confluence avec la Chiers. Dans cette partie, le bassin a l'allure d'un long corridor drainé en son centre par la Meuse qui ne reçoit de fait aucun affluent important. Cet aspect du bassin est lié aux captures de la Moselle et de l'Aire respectivement par la Meurthe et l'Aisne.

- Les cours de la Chiers et de la Sormonne représentent la limite avec la partie nord. Celle-ci est dominée par la présence du Massif ardennais et de ses bordures. Les altitudes les plus élevées sont d'environ 500 m dans la partie est du bassin de la Semois et à l'extrémité aval de ce même bassin (région de Fumay). Le bassin est relativement compact avec un réseau hydrographique très encaissé dans le massif ardennais (plus de 250 m de commandement à l'aval de la Semois). Outre la Chiers, les principaux affluents de la Meuse sont la Semois et le Viroin. La Meuse elle-même ne draine ici qu'une petite partie du bassin.

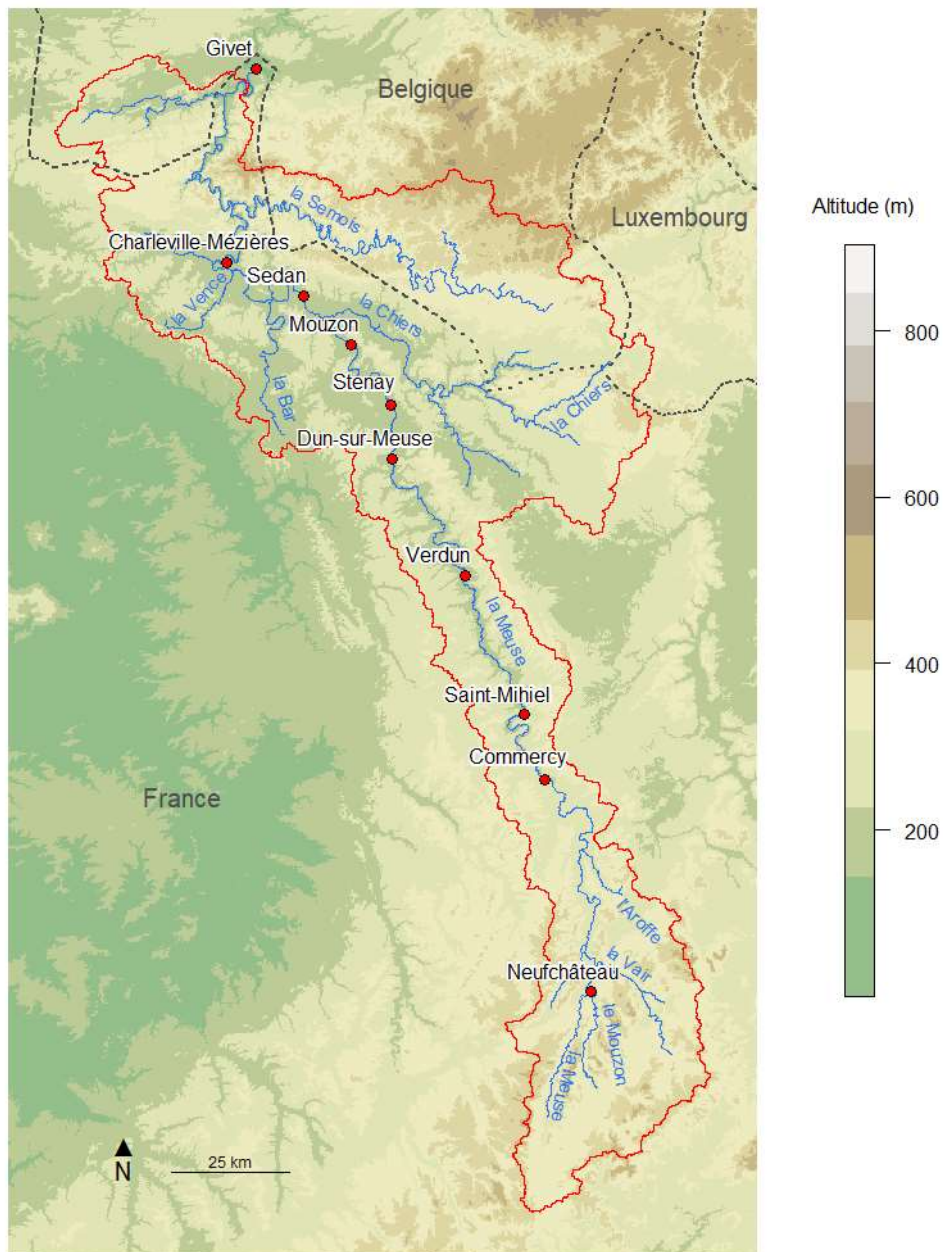


Figure 2 : Carte du bassin versant de la Meuse à Chooz, étudié dans le cadre du projet CHIMERE 21.

Cette dualité se retrouve également dans les caractéristiques géologiques du bassin (Figure 3). Ainsi la Meuse et ses affluents, en amont du massif ardennais, incisent les auréoles sédimentaires de l'est du Bassin Parisien s'échelonnant du Muschelkalk (Trias) au Kimmeridgien (Jurassique). Parmi elles, on retiendra différents niveaux qui constituent les principaux aquifères drainés par le réseau hydrographique de la Meuse :

- les calcaires du Muschelkalk supérieur à l'amont des bassins du Vair et du Mouzon,
- les calcaires du Bajocien très karstifiés qui affleurent en amont de Neufchâteau, dans le bassin de la Chiers et en rive gauche de la Meuse en aval de la confluence de la Chiers.
- les calcaires de l'Oxfordien qui arment le plateau entaillé par la Meuse entre les confluences du Vair et de l'Andon.

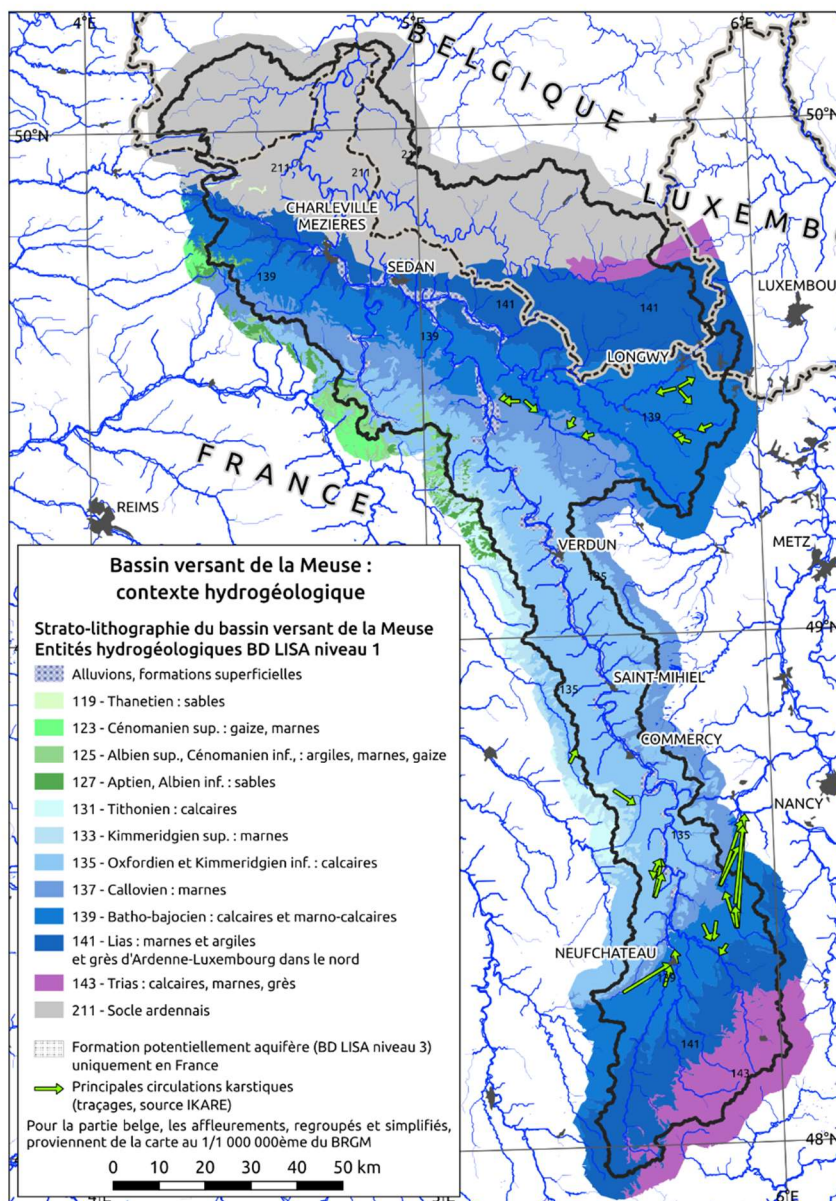


Figure 3 : Géologie du bassin versant de la Meuse.

Dans la partie aval, les grès d'Ardenne-Luxembourg représentent un aquifère important dont le faciès original n'apparaît que dans cette région entre les bassins de la Marche et de la Sormonne. Dans le massif ardennais proprement dit, les principales ressources d'eau souterraine apparaissent dans des poches d'altération des formations primaires.

L'influence de ces aquifères sur les écoulements de surface apparaissent sur les cartes des rendements des catalogues des débits d'étiage (AERM, DIREN Lorraine, 1999) où on retrouve des valeurs plus élevées dans les zones d'affleurements des niveaux mentionnés plus haut.

Le karst a une influence non négligeable dans l'organisation des écoulements avec comme principaux phénomènes :

- La perte de la Meuse située à Bazoilles. Si le débit du cours d'eau est inférieur à 2 m³/s le chenal est à sec en aval de la perte (Thomas, 1979). Des traçages ont permis d'identifier sept résurgences localisées dans la région de Neufchâteau à plus de 3.5 km en aval (Figure 4).
- Le bassin de l'Aroffe appartient topographiquement au bassin de la Meuse mais la partie amont de son bassin (plus de 40 km²) est drainée presque intégralement par la Moselle. L'Aroffe disparaît dans des pertes en aval de Gémonville et ses écoulements réapparaissent dans le Ruisseau des Bouvades et la source de la Rochotte dans le bassin de la Moselle. Le cours de l'Aroffe est en eau de manière continue, jusqu'à sa confluence avec la Meuse, uniquement lors de crues exceptionnelles. Le bassin amont de l'Aroffe est contrôlé par une station hydrométrique dont le module est de 370 l/s.
- De grosses sources apparaissent dans la vallée de la Meuse : la Vaise à Maxey-sur-Vaise, la Fontaine de Vacon à Void-Vacon, ou dans des vallées affluentes : le Trou Radel par exemple dans la vallée du Yoncq, celles-ci ont des aires d'alimentation qui peuvent déborder sur les bassins situés à l'Ouest (affluents de la Marne).



Figure 4 : Localisation de la perte (en aval de Bazoilles-sur-Meuse) et la résurgence (en amont de Neufchâteau) de la Meuse (Source : Géoportail).

Le climat du bassin versant de la Meuse (Figure 5) est océanique, avec une influence continentale qui se manifeste par des précipitations estivales soutenues et une amplitude thermique relativement importante. Les précipitations sur le bassin sont assez homogènes de l'ordre de 900 mm/an en moyenne à l'exception du massif ardennais où on peut atteindre 1300 mm/an sur la partie aval de la Semois. Son régime hydrologique est pluvial, avec des hautes eaux de décembre à avril et des basses eaux de mai à novembre. Le creux estival provient des valeurs d'évapotranspiration élevées pendant cette période. Les précipitations neigeuses sont limitées, avec parfois des couverts neigeux temporaires sur les reliefs. La neige peut cependant avoir un rôle important. La fonte combinée à des précipitations abondantes (tombant sur un sol enneigé d'où des coefficients de ruissellement très élevés) peut provoquer des crues importantes, comme par exemple la crue de décembre 2001-janvier 2002.

Comparée à des bassins voisins de tailles comparables, la Meuse à Chooz affiche les valeurs, en débits spécifiques, de module et de débits d'étiages les plus élevées (Cf. Tableau 1). Elle bénéficie donc d'une alimentation abondante par les précipitations et la lithologie de son substrat, relativement perméable et capacitive, lui assure un soutien en période d'étiage. Ce constat vaut pour l'ensemble du bassin à Chooz, mais il existe des nuances locales notamment pour la partie ardennaise qui participe davantage à cette relative abondance des ressources en eau.

Tableau 1 : Débits caractéristiques de la Meuse et de ses bassins voisins. Période 2003-2018

Cours d'eau	Meuse		Moselle		Oise		Saône	
Station	Chooz		Uckange		Creil		Pagny-la-Ville	
Surf. B.V. km ²	10 120		10 770		14 200		11 673	
Débits	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²	m ³ /s	l/s/km ²
Module	136	13.4	123	11.4	120	8.5	143	12.3
QMNA F. 1/5	28	2.8	22	2.0	30	2.1	19	1.6
VCN3 F. 1/5	23	2.3	16	1.5	24	1.7	14	1.2
QIX F. 1/10	810	80.0	1320	122.6	390	27.5	1000	85.7
QMJ Max	1000	98.8	1340	124.4	493	34.7	1200	102.8

Concernant les débits caractéristiques de crues (en débits spécifiques), la Meuse présente des valeurs inférieures à celles de la Moselle et plus proches de celles de la Saône. L'influence du Massif vosgien explique les valeurs élevées du bassin de la Moselle. Comparativement, l'Oise subit des crues très modérées.

B7200010 - La Meuse à Chooz [Ile Graviat]

Gestionnaire : DREAL Lorraine

Superficie : 10184.1 (10120) [km²]
X = 829408 (829403)
X = 777013 (777008)

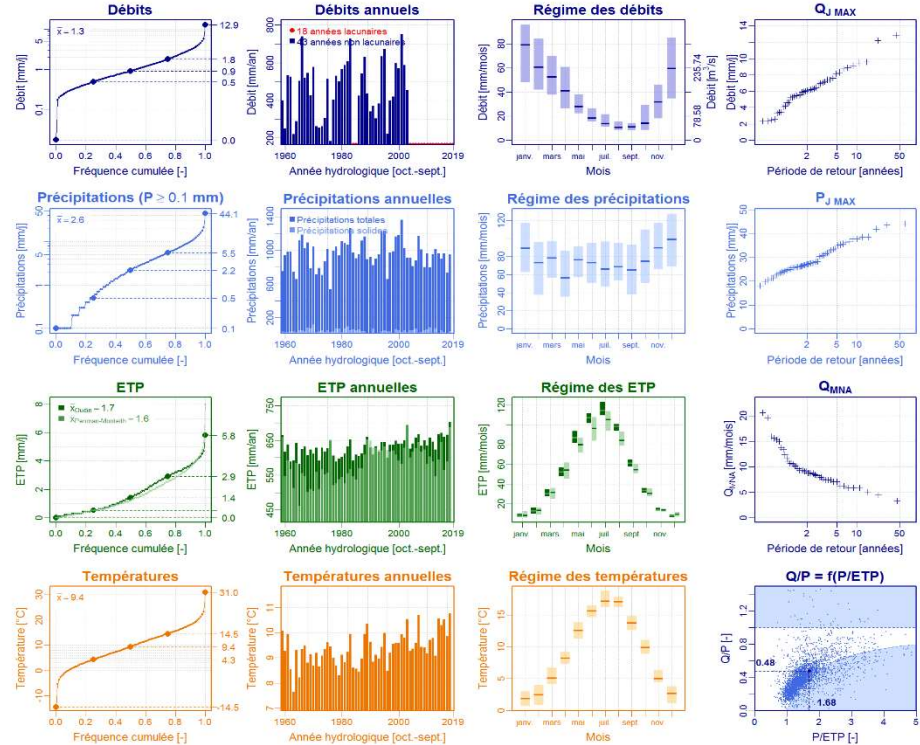
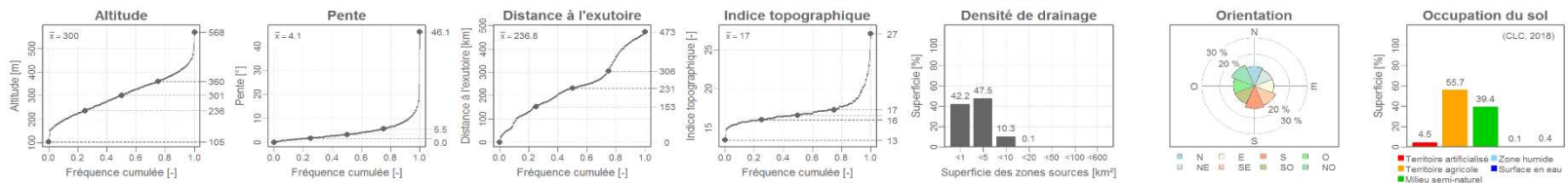
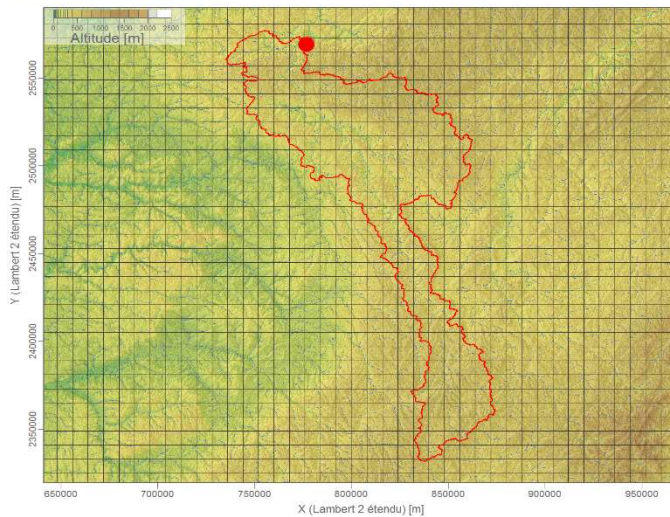
Altitude : 103 (99) [m]
Y = 7000813 (7000816) [m ; Lambert 93]
Y = 2569049 (2569052) [m ; Lambert II étendu]

INRAE (Banque Hydro)
INRAE (Banque Hydro)
INRAE (Banque Hydro)

Équipe HYDRO, UR HYCAR, INRAE, Antony
Conception : Brigode, P., Génot, B., Lobliqueux, F., Delaigue, O.
Contact : olivier.delaigue@inrae.fr
Version : 2020-08-04



Type	Source	Période	PdTemps
Débit	Banque HYDRO	1958-2019	Journalier
Climatique	SAFRAN (Météo-France)	1958-2019	Journalier
MNT 100 m	SRTM (NASA)	2011	-
Date extraction Banque Hydro		2020-01-14	
Moyennes interannuelles			
Débit		464 (150)	mm/an (m ³ /s)
Précipitations (totales / solides)		955 / 43.9	mm/an
ETP (Penman-Monteith / Oudin)		585 / 631	mm/an
Température		9.4	°C
Taux de lacune des débits			
		9.8	%
Valeurs extrêmes de la série			
QJ _{max}		12.9 (1519.4)	mm/j (m ³ /s)
PJ _{Jmax}		44.1	mm/j
QMNA _{min}		3.2	mm/mois
		1995-01-30	
		1998-10-28	
		1976-08	



Citation : <https://doi.org/10.15654/UD1P1>

Figure 5 : Fiche descriptive du bassin de la Meuse à Chooz, présentant différentes caractéristiques hydroclimatiques et physiques (Source : Brigode et al. (2020), INRAE Antony, https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/fiches/B7200010_fiche.png, lien consulté le 19/03/2021).

Les étiages les plus sévères de la Meuse sont apparus en : 1976 (QMNA de 12.5 m³/s), 2011 (17.7 m³/s), 2019 (20 m³/s), 2018 (22.3 m³/s), 1971 (22.6 m³/s), 2003 (22.9 m³/s). Les années récentes connaissent une succession d'étiages très marqués avec des valeurs de QMNA inférieures à 25 m³/s depuis 2017. En raison des débits particulièrement faibles de la Meuse, la centrale nucléaire de Chooz peut être mise à l'arrêt car « conformément à l'accord transfrontalier entre la France et la Belgique [...] Lorsque la moyenne sur 12 jours glissants du débit aval journalier de la Meuse descend en dessous de 22m³/s, une unité de production doit être arrêtée. Si le débit sur 12 jours glissants passe sous les 20 m³/s, les deux unités de production doivent être mises à l'arrêt »¹¹.

Les crues de référence sur le bassin sont celles de décembre 1993 et janvier 1995, qui avaient engendré des dégâts de plusieurs centaines de millions d'euros, ainsi que celles d'avril-mai 1983, décembre 2001-janvier 2002 et octobre 2006. Il y a quatre territoires à risques d'inondation (TRI) identifiés sur le bassin : ceux de Neufchâteau, Verdun et Sedan-Givet sur la Meuse, et celui de Longwy sur la Chiers, avec des enjeux importants.

III.2. Les données hydrométriques

Un échantillon initial de 17 stations cibles, réparties sur le bassin versant, a été sélectionné pour réaliser les simulations (voir liste au Tableau 2 et localisation en Figure 6). Pour cela, les données hydrologiques de la Banque HYDRO (Leleu et al., 2014) ont été extraites de la base de données de l'équipe HYDRO d'INRAE (Delaigue et al., 2019). Cette sélection a été réalisée sur la base de plusieurs aspects :

- Connaissance fine du bassin et de ses enjeux parmi les partenaires du projet (Université de Lorraine, DREAL Grand-Est),
- Qualité générale de la donnée à la station,
- Disponibilité en données sur la période 1970-2016,
- Couverture spatiale du bassin.

Cet échantillon comprend neuf stations sur le cours principal de la Meuse et huit stations réparties sur les affluents (Mouzon, Vair, Chiers, Vence et Semoy), dont quatre sur la Chiers, le principal affluent. Une station complémentaire, celle de Montcy-Notre-Dame sur la Meuse, apparaît également car il s'agira d'un point de sortie de résultats pour certains modèles hydrologiques (notamment SIM2, auquel on ajoutera GRSD même si celui-ci n'y sera pas calé). Cependant, les données à cette station étant jugées peu fiables en étiage comme en crue du fait de la configuration particulière du site et des ouvrages de navigation, elle ne sera pas utilisée comme station de calage et d'évaluation. La station de Verdun, initialement sélectionnée, ne présente pas de données exploitables en dehors des pointes de crues. Elle a donc été écartée et remplacée par la station de Belleville, sur la Meuse. Enfin, la station de Chooz à l'île de Graviat a été déplacée en 2004 sur le site du Trou du Diable car elle était très fortement influencée par les manœuvres du barrage des Quatre Cheminées situé en aval. Par ailleurs, la nouvelle station est désormais située en amont de la centrale nucléaire de production d'électricité (CNPE) de Chooz alors que l'ancienne station était située en aval. Les deux stations seront donc

¹¹ <https://www.edf.fr/groupe-edf/nos-energies/carte-de-nos-implantations-industrielles-en-france/centrale-nucleaire-de-chooz/actualites/redemarrage-de-l-unite-de-production-ndeg1-de-la-centrale-de-chooz>

considérées conjointement et les données mises en cohérence pour ne constituer qu'une seule série dans le cadre du projet. Les données observées sont disponibles sur la Banque Hydro au pas de temps journalier jusqu'en 2018, à partir des années 1950 pour les chroniques les plus longues, et des années 1990 pour les plus courtes. Une naturalisation des débits observés a été entreprise dans ce projet. Celle-ci est détaillée dans la Section IV.

Tableau 2 : Liste des stations hydrométriques considérées. O = Oui. Le taux de lacunes est indiqué sur la période complète d'étude (1970-2016) et après mise en lacune de données suite à l'analyse effectuée dans le cadre de la procédure de naturalisation des débits (voir Section IV).

#	Station	Cours d'eau	Code HYDRO	Superficie [km ²]	Période	Vigicrues	Station Onde	Crue CHIMERE 21	Etiage CHIMERE 21	Simul. SIM2	Simul. autres modèles	Taux de lacunes (%)
1	Goncourt	Meuse	B0220010	368	1971-2018	O			O		O	4
2	Villars/Circourt-sur-Mouzon	Mouzon	B1092010	401	1968-2018	O			O		O	2
3	Neufchâteau	Meuse	B1100000	865	1995-2018	O		O			O	57
4	Soulosse	Vair	B1282010	440	1969-2018	O			O		O	11
5	Chalaines	Meuse	B1340010	1728	1973-2018	O			O		O	10
6	Saint-Mihiel	Meuse	B2220010	2543	1968-2018	O	O		O	O	O	0
7	Belleville	Meuse	B3010010	3201	1993-2018	O		O			O	64
8	Stenay	Meuse	B3150020	3915	1963-2018	O			O	O	O	11
9	Longlaville	Chiers	B4001010	153	1996-2018	O			O		O	58
10	Montigny-sur-Chiers	Chiers	B4031010	285	1968-2018	O		O			O	4
11	Chauvency-le-Château	Chiers	B4601010	1706	1961-2018	O		O		O	O	8
12	Carignan	Chiers	B4631010	1978	1966-2018	O	O		O	O	O	1
13	Sedan	Meuse	B5020010	6516	1993-2018	O			O		O	54
14	La Francheville	Vence	B5322010	125	1968-2018	O	O		O		O	8
*	Montcy-Notre-Dame	Meuse	B5600010	7796	1972-2018	O		O		O	GRSD	100
15	Haulmé	Semoy	B6111010	1339	1965-2018	O			O	O	O	22
16	Chooz [Trou du Diable]	Meuse	B7200000	10181	2004-2018	O			O	O	O	2
	Chooz [Ile Graviat]	Meuse	B7200010	10181	1956-2004	O			O	O	O	

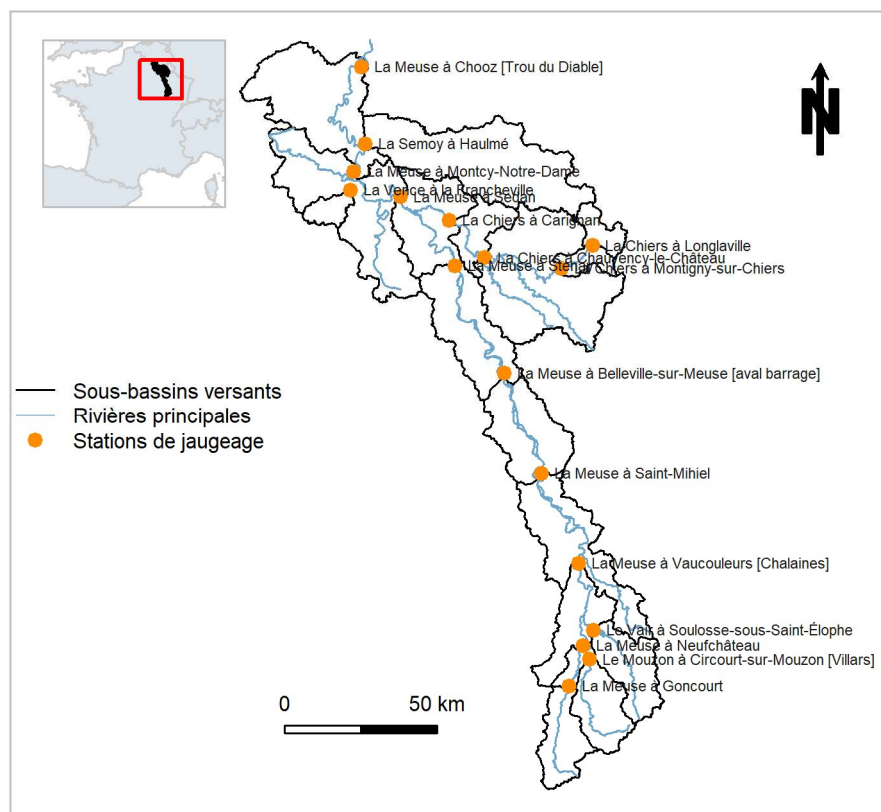


Figure 6 : Carte des stations utilisées dans CHIMERE 21.

La liste complète des stations est indiquée dans le Tableau 2. Il est à noter que le modèle hydrologique SIM2 ne pourra être appliqué qu'à une sélection de ces 17 stations. Les bassins associés à ces stations présentent des superficies de 125 à 10 180 km² (médiane de 1520 km²). Par ailleurs, sont présentes quatre stations pour lesquelles les données ne sont disponibles qu'à partir des années 1990 (Neufchâteau, Belleville et Sedan sur la Meuse, Longlaville sur la Chiers) et donc pour lesquelles la robustesse des modèles hydrologiques ne sera pas testée. La Section IV discutera de la qualité des débits observés. Le modèle hydrologique GRSD fournira des débits simulés sur les 17 stations (sans calage spécifique sur la station de Montcy-Notre-Dame). Les modèles hydrologiques MORDOR et PRESAGES fourniront des débits simulés sur toutes les stations sauf Montcy-Notre-Dame. Toutes les stations font l'objet d'un suivi pour la prévision des crues par le service de prévision des crues (SPC) Meuse-Moselle basé à Metz au sein du réseau Vigicrues (www.vigicrues.gouv.fr).

Trois stations, Saint-Mihiel sur la Meuse, Carignan sur la Chiers et La Francheville sur la Vence, font l'objet d'un suivi dans le cadre de l'Observatoire national des étiages (Onde ; <http://onde.eaufrance.fr/>). Deux colonnes du Tableau 2 indiquent les stations qui présentent un intérêt particulier sur les crues et les étiages.

III.3. Les données climatiques observées

SAFRAN (Vidal et al., 2010) est une réanalyse atmosphérique qui fournit des variables à un pas de temps journalier et à une résolution spatiale de 8x8 km² sur la France entière. Les variables disponibles sont : précipitations liquides et précipitations solides, température de l'air à 2 m, humidité spécifique, vitesse du vent à 10 m, rayonnement solaire descendant, rayonnement infra-rouge descendant. INRAE disposait dans sa base de données (Delaigue et al., 2019) de ces données de 1958 à 2016 lorsque la base de données a été partagée avec les partenaires. Ces données ont été utilisées comme entrée des modèles hydrologiques lors de leurs calages, ainsi que par les deux méthodes de descente d'échelle décrites par la suite. L'évapotranspiration de référence a été calculée à partir de la formule de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Lors du calage des modèles hydrologiques (voir Section VI.2), il a été noté une difficulté à représenter les débits observés, particulièrement pour les stations de la Semoy à Haulmé, la Chiers à Longlaville et Montigny-sur-Chiers, et la Vence à Francheville. Les bassins de la Semoy et de la Chiers amont sont localisés en majeure partie en Belgique. Or, la méthode de réanalyse SAFRAN s'applique uniquement à la France métropolitaine et, pour les mailles situées à l'extérieur du territoire de France métropolitaine, elle attribue les valeurs calculées sur les mailles les plus proches du côté français (en termes de distance et de similarité d'altitude). On sait pourtant que les Ardennes belges sont plus pluvieuses que les Ardennes françaises. Nous avons donc supposé que les chroniques de précipitations pour ces trois bassins étaient sous-estimées et un facteur correctif de +15 % (après plusieurs tests) a été appliqué afin de corriger ce biais. Concernant le bassin de la Vence à Francheville, ce bassin est en partie karstique et la zone d'alimentation de ce bassin en termes de précipitations est incertaine. Nous avons alors supposé que la superficie de cette zone était sous-estimée et un facteur correctif de +20 % a été appliqué à la taille du bassin versant pour corriger ce biais. Ces différentes valeurs de correction ont été suggérées par EDF sur la base de la minimisation d'un biais du modèle hydrologique MORDOR.

À retenir :

Les données météorologiques passées et hydrologiques observées ont été présentées dans cette section. On notera que trois des modèles hydrologiques fourniront des résultats sur les seize stations présentant des observations, le dernier modèle n'en fournissant que sur sept stations. Par ailleurs, les données climatiques ont été corrigées sur (1) la partie belge du bassin et (2) sur la Vence en amont de Francheville pour prendre en compte l'influence karstique. Enfin, l'influence anthropique sur les données hydrologiques observées a été étudiée, ce qui est présenté dans la section suivante.

IV. Naturalisation des débits

Les modèles hydrologiques sélectionnés pour le projet CHIMERE 21 ne prennent pas en compte les transferts et les utilisations de l'eau liés à des activités humaines et simulent des conditions naturelles. Leurs simulations doivent donc être comparées à des observations de débit naturel, c'est-à-dire hors influences de type prélèvements, rejets ou ouvrages pouvant exister en amont de la station cible. Dès lors, il convient de mettre en place des stratégies pour estimer les débits naturels, dont les mesures n'existent pas, par définition, sur la base des débits influencés observés et de la connaissance des influences. Les débits naturels estimés, aussi appelés débits naturalisés, serviront ensuite de référence pour la modélisation du cycle hydrologique naturel du bassin versant.

Un rapport complet sur la stratégie de naturalisation des débits, les influences considérées et les résultats, est joint à ce rapport final (voir Terrier et al., 2018). Nous ne présentons ici qu'un résumé des principaux points de ce rapport.

Le bassin apparaît comme présentant des influences modérées, avec notamment la quasi-absence de grands ouvrages de régulation. L'analyse a porté sur seize stations, réparties sur la Meuse et ses affluents, étant jugées comme ayant une signification hydrologique, sur une période allant de 1970 à 2016. Il s'agit des mêmes stations que dans le Tableau 2, Montigny-sur-Chiers exclue.

Plusieurs types d'influence ont été identifiés, parmi lesquelles on trouve les prélèvements et rejets liés à l'eau potable et aux eaux usées, à l'industrie, aux canaux de navigation et aux sites miniers. Les prélèvements pour l'agriculture sont modestes sur le bassin et ont été négligés. La confrontation de la somme des influences répertoriées par bassin et un seuil de significativité des influences (établi comme étant égal à 15% du VCN7₅) a permis d'identifier huit stations comme potentiellement influencées en étiage par les activités humaines. Parmi les prélèvements industriels, le site de la centrale de Chooz et la station d'épuration de Charleville-Mézières apparaissent comme les principaux points d'influence, mais à un niveau où la Meuse présente déjà des débits importants, avec donc un impact limité en étiage. Plus en amont sur le bassin, les industries, les prélèvements industriels ou les sorties de sites miniers sont apparus comme ayant un impact significatif sur des petits bassins amont (Meuse, Mouzon, Vair et Chiers).

Sur le site de Chooz, EDF disposait des séries de volumes d'eau consommés par évaporation et a pu produire des séries de débits corrigés de cette influence, de manière à obtenir une série homogène avant et après déplacement de la station en 2004. En dehors du site de Chooz, les données disponibles sur les influences restent très partielles, en termes de démarrage et d'évolution des influences, de profondeur des chroniques disponibles ou de pas de temps des séries. Sur cette base, il n'a pas été possible d'appliquer de manière fiable des procédures de naturalisation des débits sur les stations jugées influencées en étiage. A la place, les débits inférieurs au seuil d'étiage choisi ici ont été identifiés dans le projet comme potentiellement influencés et ont été placés en lacunes (voir taux de lacunes résultants identifiés dans le Tableau 2. L'analyse a été complétée par une critique visuelle des séries ayant permis de mettre en lacune des débits jugés douteux, principalement en période d'étiage.

Les séries expertisées seront utilisées pour la suite du projet, en particulier pour les exercices de modélisation hydrologique.

À retenir :

L'influence anthropique a été étudiée pour les seize stations hydrologiques disposant de données. Cette étude a abouti à la production d'une série naturalisée à la station de Chooz et à la mise en lacunes de valeurs de débits jugées significativement influencées, principalement en période d'étiage sur de petits bassins amont. Ces nouvelles séries de débits ont été utilisées pour caler et évaluer les modèles hydrologiques par la suite.

V. Les données climatiques futures

Comme on l'a vu précédemment, réaliser une étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie nécessite la mise en œuvre d'un certain nombre d'étapes. Dans cette section, nous allons nous intéresser aux quatre premières étapes (Figure 7). Dans la Section V.1, nous présentons les projections climatiques sélectionnées pour étudier l'impact du changement climatique sur les débits dans ce projet, ce qui correspond aux trois premières étapes de la Figure 7 (RCPs, GCMs, RCMs). Deux méthodes de descente d'échelle (4^e étape de la Figure 7) ont fait l'objet de travaux spécifiques dans CHIMERE 21, SCOPE et ADAMONT (Section V.2). Ces deux méthodes reposent sur des fondements méthodologiques différents et ne sont que brièvement abordées ici, leurs détails sont donnés en Annexe A. Ces quatre grandes étapes permettent de disposer de projections climatiques adaptées à l'utilisation de modèles applicatifs comme les modèles hydrologiques. Nous analysons ces données climatiques futures dans la Section V.3. Enfin, nous proposons une mise en perspective de ces projections climatiques dans la Section V.4.

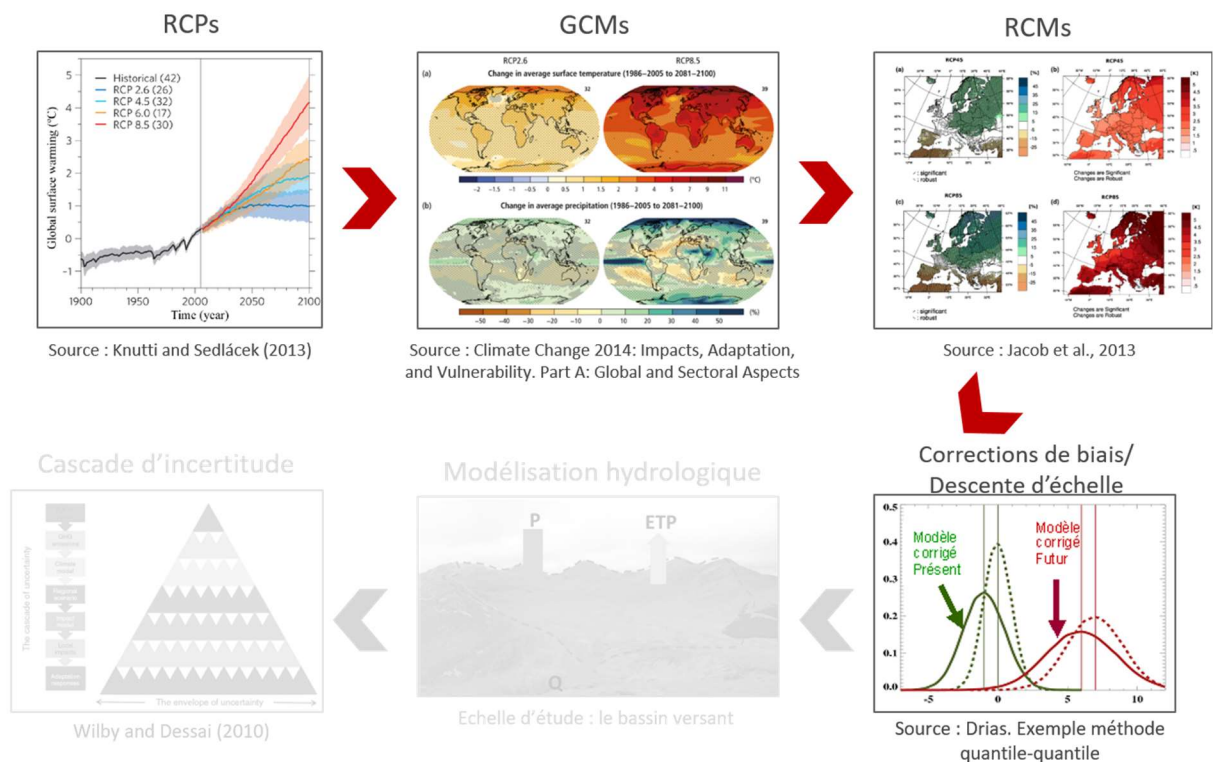


Figure 7 : Chaîne de modélisation de l'impact du changement climatique, d'après Lemaitre-Basset (2020). Focus sur les quatre premières étapes.

V.1. La sélection de projections climatiques

Afin d'estimer au mieux l'incertitude liée à la modélisation climatique, il est nécessaire d'utiliser un nombre suffisant de couples de modèles GCM-RCM. Toutefois, leur utilisation demande la manipulation d'un grand volume de données et nécessite un temps de calcul important à toutes les étapes du processus, de la descente d'échelle aux modèles applicatifs hydrologiques. Il est apparu qu'un nombre de cinq couples de modèles représente un compromis raisonnable dans le cadre de ce projet, permettant une analyse suffisamment pertinente de l'incertitude tout en permettant un travail cohérent avec les ressources et le calendrier du projet.

Le Tableau 3 présente les cinq couples de modèles GCM-RCM qui ont été retenus. Les deux premiers couples qui ont été sélectionnés pour le projet ont été privilégiés car il s'agit des deux modèles français ayant contribué à l'exercice international CMIP5 (Taylor et al., 2012), c'est-à-dire que ce sont les projections analysées dans le cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013). Par la suite, trois autres couples faisant partie de l'ensemble EURO-CORDEX¹², un ensemble de projections climatiques régionalisées sur l'Europe, ont été ajoutés au projet. La disponibilité à Météo-France de ces trois couples a conditionné leur sélection afin de respecter le calendrier du projet.

Tableau 3 : Les couples GCM-RCM utilisés dans CHIMERE 21.

	GCM	RCM
Couple 1	CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013)	ALADIN53
Couple 2	IPSL-CM5A	IPSL-INNERIS-WRF (Dufresne et al., 2013)
Couple 3	CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013)	RCA4
Couple 4	IPSL-CM5A	RCA4
Couple 5	MPI-ESM	RCA4

Dans CMIP5, plusieurs scénarios servent à orienter les GCMs dans leur simulation de l'évolution du climat : il s'agit des Representative Concentration Pathways (RCPs). Ces scénarios, reposant sur différentes hypothèses d'évolution des quantités de gaz à effet de serre émises au cours du 21^e siècle, permettent de décrire des futurs éventuels diversifiés. Dans CHIMERE 21, nous nous sommes concentrés sur les RCPs 4.5 et 8.5. Le premier est un scénario intermédiaire dans lequel le forçage radiatif obtenu en 2100 est de +4,5 W/m². Le scénario RCP 8.5 est quant à lui un scénario plus extrême, avec un forçage radiatif en 2100 de +8,5 W/m².

Les GCMs produisent usuellement des séries climatiques du début du 20^e siècle à la fin du 21^e siècle. La première partie de la période est la période dite « historique », elle est suivie de la partie de projections climatiques futures. Pour les cinq couples GCM-RCM du projet, la période historique sur laquelle on dispose de séries climatiques est la période 1976-2005. Ensuite, les projections climatiques couvrent la période 2005-2100, 2005 étant l'année à partir de laquelle les scénarios RCP viennent faire évoluer les GCMs de manière différenciée. Par la suite, deux types d'analyses des séries climatiques et hydrologiques seront effectuées : d'une part, des analyses en continu (de 1976 jusqu'à 2100), et d'autre part, des comparaisons relatives entre des périodes de 30 ans à divers horizons du futur (proche, moyen, lointain) et la période historique des modèles (1976-2005).

À retenir :

Cinq couples de modèles GCM/RCM ont été retenus pour les projections climatiques de ce projet, afin de prendre en compte l'incertitude relative aux modèles climatiques. Pour chaque couple, on utilise deux scénarios RCP, le 4.5 (scénario médian) et le 8.5 (scénario extrême). Ces projections nécessitent une descente en échelle qui est décrite ci-dessous.

¹² <https://euro-cordex.net>

V.2. Les descentes d'échelles et méthodes de débiaisage testées

Les projections climatiques produites par les modèles de circulation générale (General Circulation Models - GCMs) sont disponibles à des résolutions spatiales trop larges (au-delà de la centaine de kilomètres horizontalement) pour pouvoir être utilisées directement dans la modélisation hydrologique. C'est pour affiner la résolution spatiale de ces projections que des méthodes dites de descente d'échelle sont nécessaires. Deux grandes familles de descentes d'échelle existent : les méthodes statistiques et les méthodes dynamiques. Dans CHIMERE 21, deux méthodes de descente d'échelle, liées à chacune de ces deux catégories, ont été utilisées.

Les méthodes statistiques consistent en la mise en place de lois statistiques liant les évolutions à large échelle (tirées des GCMs) et les évolutions à échelle plus fine (qui sont d'intérêt pour la modélisation hydrologique). **Dans CHIMERE 21, l'approche SCOPE correspond à ce cas de figure.** Sur la Figure 7, cela revient à rassembler les étapes 3 et 4 en une seule étape, la méthode SCOPE. Le cas le plus courant, représenté par la Figure 7, est présenté ci-dessous.

Les modèles de climat régionaux (Regional Climate Models - RCMs) font partie de la catégorie des méthodes dynamiques. Il s'agit de modèles climatiques qui sont appliqués à des résolutions spatiales plus fines que les GCMs tout en utilisant les forçages de grande échelle fournis par les GCMs. Dans la Figure 7, cela correspond à l'étape 3. Cependant, comme tout modèle, les RCMs souffrent de biais, c'est-à-dire qu'ils produisent des sorties parfois éloignées de la réalité des observations lorsqu'on les compare sur une période connue. C'est pourquoi, bien souvent, des méthodes de débiaisage des projections issues des RCMs sont utilisées. **Dans CHIMERE 21, l'approche ADAMONT correspond à ce cas de figure. ADAMONT est une méthode statistique permettant de débiaiser les projections issues de couples de GCM-RCM.** La méthode ADAMONT correspond à l'étape 4 de la Figure 7.

Dans ce projet, nous avons mis en œuvre ces deux méthodes de descente d'échelle et de débiaisage grâce à des partenaires experts en la matière. Le but était d'appréhender les incertitudes inévitables qui découlent de la phase de descente d'échelle. **La description technique de ces deux méthodes est reportée en Annexe A.** Dans cette annexe, la performance en temps présent des deux méthodes est évaluée. Nous n'entrerons pas dans les détails des méthodes et des performances dans le corps principal de ce rapport. Cependant, il convient de noter qu'en raison d'une performance insuffisante de SCOPE, **seule la méthode ADAMONT a été retenue pour la suite du projet.** En conséquence, l'ensemble des projections climatiques analysées dans la suite de ce rapport seront issues de la méthode GCM + RCM + ADAMONT.

Les performances de la méthode ADAMONT sur la période historique sont détaillées en Annexe A.2.2. Les cinq couples de GCM-RCM présentent des biais de température moyenne assez faibles, souvent inférieurs à 0,5°C. Le cycle saisonnier est très bien reproduit par ces cinq couples et aucune période de l'année ne semble présenter un biais particulier par rapport au reste de l'année. Pour les précipitations, on constate une tendance pour les cinq modèles à la sous-estimation des précipitations en automne et en hiver, de l'ordre de 10 à 15 %. Cela est dû au fait qu'ADAMONT utilise les types de temps et que leur fréquence d'occurrence est mal représentée dans les GCM. On a choisi de ne pas

corriger cela car on estime que l'utilisation des types de temps¹³ est importante pour l'estimation du climat en temps futur.

À retenir :

Deux méthodes de descente d'échelle et de débiaisage, permettant de disposer de projections climatiques à échelle suffisamment fine, ont été évaluées dans le projet CHIMERE 21, issues des deux types principaux de méthodes. Cependant, en raison d'une performance insuffisante de l'une des méthodes, seule l'une d'entre elles, ADAMONT, a été retenue pour la suite du projet.

V.3. Analyse des projections climatiques futures

Dans cette section, nous présentons l'évolution du climat pour les cinq couples du Tableau 3 descendus en échelle par ADAMONT.

V.3.1. Evolution des températures de l'air sur le bassin de la Meuse

Le Tableau 4 présente l'évolution des températures de l'air annuelles moyennes sur le bassin de la Meuse proposée par chacun des couples GCM/RCM, aux différents horizons temporels, et pour les deux RCP 4.5 et 8.5. Pour tous les modèles, tous les horizons (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) et les deux RCPs, la température augmente dans les projections futures sur le bassin.

Tableau 4 : Evolution de la température moyenne annuelle à différents horizons du futur (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) pour les cinq couples GCM/RCM et les RCP 4.5 et 8.5, écart entre la projection et la période historique (1976-2005) pour chaque modèle.

Bassin de la Meuse		Evolution de la température annuelle (°C) par rapport à la période historique	
		RCP 4.5	RCP 8.5
ALADIN53/CNRM-CM5	Futur proche	+1,0	+1,0
	Futur moyen	+1,8	+2,3
	Futur lointain	+2,0	+3,8
IPSL-INERIS-WRF/IPSL-CM5A	Futur proche	+1,1	+0,9
	Futur moyen	+1,5	+2,1
	Futur lointain	+1,9	+3,1
SMHI_RCA4/CNRM_CM5	Futur proche	+0,9	+0,9
	Futur moyen	+1,6	+2,1
	Futur lointain	+1,8	+3,4
SMHI_RCA4/IPSL_CM5A	Futur proche	+1,3	+1,3
	Futur moyen	+1,8	+3,0
	Futur lointain	+2,4	+4,1
SMHI_RCA4/MPI_ESM	Futur proche	+0,8	+0,9
	Futur moyen	+1,1	+2,2
	Futur lointain	+1,8	+3,5

¹³ Un type de temps est une classification des situations atmosphériques en fonction de critères atmosphériques de grande échelle

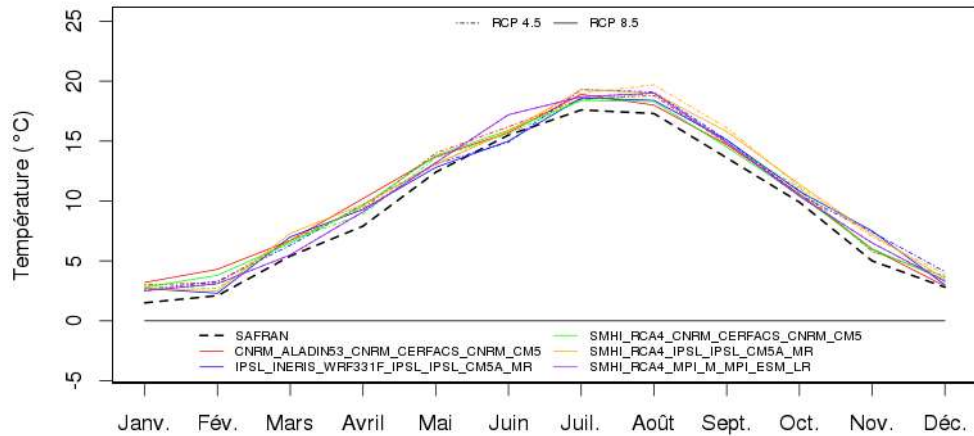
Pour le futur proche, l'évolution de la température est comprise entre +0,8 et +1,3 °C. Elle s'échelonne de +1,1 à +3,0 °C pour le futur moyen, et de +1,8 à +4,1 °C pour le futur lointain. L'incertitude sur l'évolution de la température est plus élevée aux échéances lointaines que pour le futur proche, avec une plage de variation plus grande.

Le RCP 8.5 donne globalement une augmentation de température plus élevée que le RCP 4.5, cette différence est faible pour le futur proche mais plus élevée aux échéances lointaines, avec jusqu'à environ 1,7 °C d'écart entre les deux RCP pour le futur lointain.

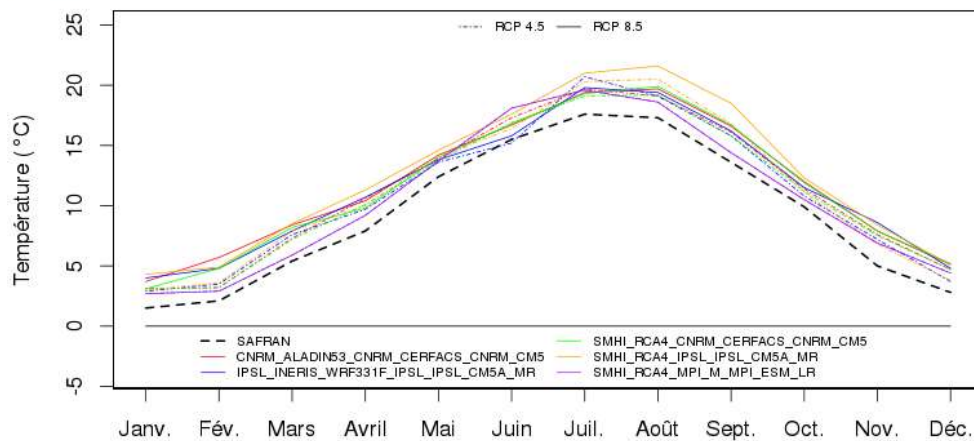
Les modèles donnent des résultats globalement plutôt proches, toutefois le couple SMHI_RCA4/IPSL_CM5A est plus chaud que les autres modèles d'environ 0,5 °C à toutes les échéances et pour les deux RCPs.

La Figure 8 montre que l'évolution de la température moyenne mensuelle est plutôt homogène sur l'année, toutefois en hiver l'augmentation des températures est un peu plus importante, et ce pour tous les couples GCM/RCM et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5. On observe aussi qu'à l'exception d'une projection, le RCP 8.5 indique logiquement des températures plus élevées.

Meuse - Température moyenne - Futur proche (2021-2050)



Meuse - Température moyenne - Futur moyen (2046-2075)



Meuse - Température moyenne - Futur lointain (2071-2100)

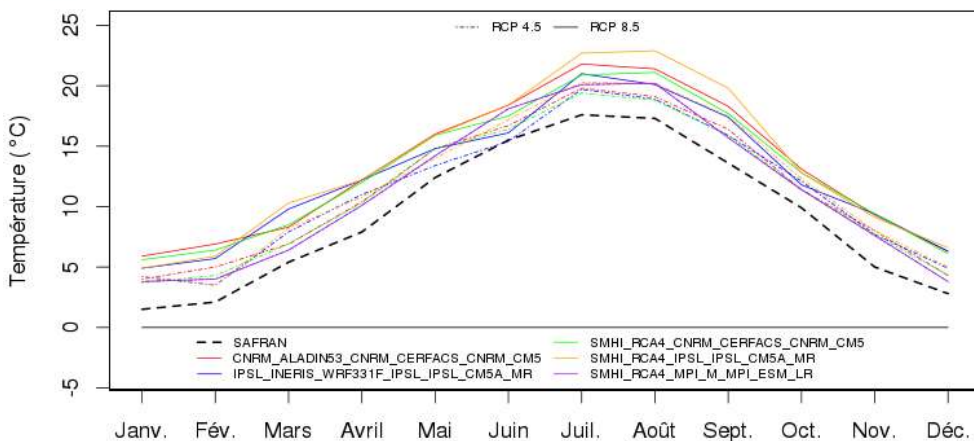


Figure 8 : Evolution des températures moyennes mensuelles (°C) aux trois horizons futurs (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) pour les cinq couples GCM/RCM et pour les deux RCP 4.5 et 8.5.

V.3.2. Evolution des précipitations sur le bassin de la Meuse

Le Tableau 5 présente l'évolution des précipitations annuelles moyennes sur le bassin de la Meuse proposée par chacun des couples GCM/RCM, aux différents horizons temporels et pour les RCPs 4.5 et 8.5. Pour tous les modèles, tous les horizons et les deux RCPs, les précipitations annuelles augmentent dans les projections futures sur le bassin, de façon plus ou moins marquée. Pour le futur proche, l'évolution de la moyenne annuelle des précipitations est comprise entre +3,1 % et +27,2 %. Elle s'échelonne de +1,2 % à +21,2 % pour le futur moyen et de +3,3 % à +31,1 % pour le futur lointain. La variabilité de la précipitation annuelle parmi les différents couples est forte à toutes les échéances futures, et ce notamment en raison des comportements saisonniers qui sont intégrés sur l'année, mais également en raison de la forte incertitude liée à la modélisation climatique (GCM-RCM) qui existe sur la France.

Le RCP 8.5 donne globalement une augmentation des précipitations plus élevée que le RCP 4.5. Toutefois les différences entre RCPs sont variables suivant le modèle et l'échéance future. L'écart est globalement le plus fort aux échéances lointaines.

Tableau 5 : Evolution des précipitations annuelles moyennes (%) à différents horizons du futur (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) pour les cinq couples GCM/RCM et les RCPs 4.5 et 8.5, écart entre la projection et la période historique pour chaque modèle.

Bassin de la Meuse		Evolution des précipitations annuelles (%) par rapport à la période historique	
		RCP 4.5	RCP 8.5
ALADIN53/CNRM-CM5	Futur proche	+14,9	+27,2
	Futur moyen	+16,0	+21,2
	Futur lointain	+22,9	+24,6
IPSL-INERIS-WRF/IPSL-CM5A	Futur proche	+11,1	+9,4
	Futur moyen	+10,0	+19,4
	Futur lointain	+14,2	+31,1
SMHI_RCA4/CNRM_CM5	Futur proche	+9,7	+20,1
	Futur moyen	+15,3	+18,4
	Futur lointain	+18,4	+20,9
SMHI_RCA4/IPSL_CM5A	Futur proche	+4,1	+3,1
	Futur moyen	+1,2	+9,3
	Futur lointain	+3,3	+15,8
SMHI_RCA4/MPI_ESM	Futur proche	+7,4	+7,5
	Futur moyen	+12,5	+9,9
	Futur lointain	+7,4	+16,8

La Figure 9 montre une évolution très contrastée des précipitations en fonction de la saison et en fonction du couple GCM/RCM. Si tous les modèles voient une augmentation plus ou moins marquée des précipitations hivernales et printanières, l'été et l'automne présentent plus de variabilité : certains couples comme SMHI_RCA4/IPSL_CM5A et SMHI_RCA4/MPI_ESM proposent une diminution des précipitations en été, SMHI_RCA4/CNRM_CM5 est plutôt neutre, alors que les deux autres couples de modèles voient une augmentation des précipitations. Ces différences saisonnières sont reprises dans la Section V.3.3.

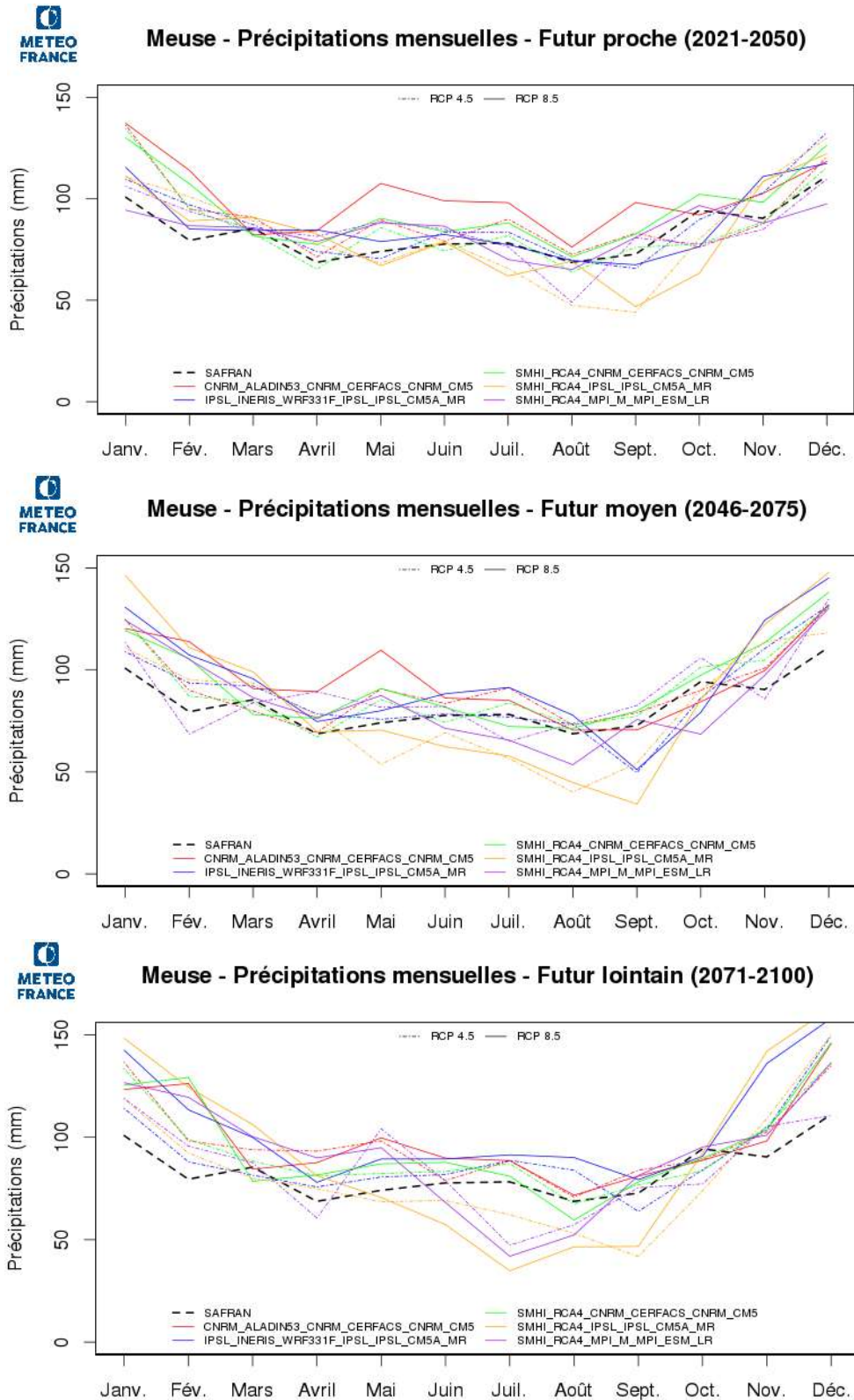


Figure 9 : Evolution des précipitations mensuelles moyennes (mm/mois) aux trois horizons futurs (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) pour les cinq couples GCM/RCM et pour les deux RCPs 4.5 et 8.5.

V.3.3. Evolution conjointe températures-précipitations

La Figure 10 (graphe du haut) présente la dispersion (évolution comparée des précipitations et des températures) de l'ensemble des cinq couples GCM/RCM, à l'horizon 2071-2100 et pour le RCP 8.5, en moyenne annuelle et pour chaque saison, sur le bassin de la Meuse.

En moyenne annuelle, on constate que les cinq couples sont relativement proches les uns des autres : ils proposent tous une augmentation de la température d'environ +3,5°C (entre 3,1 et 4,1 °C) et tous voient une augmentation des précipitations (de +15 à +30 %).

L'analyse saisonnière (Figure 10, quatre graphes du bas) permet de mettre en avant les comportements contrastés des modèles et offre une meilleure vue de la variabilité des températures et des précipitations proposées par ces cinq couples.

L'hiver voit une hausse légèrement plus marquée de la température que les autres saisons, ainsi qu'une augmentation des précipitations plutôt homogène entre les modèles : tous les modèles proposent des hivers plus doux et plus humides dans le futur, mais la variabilité entre les modèles est en hiver assez limitée.

Comparés à l'hiver, l'automne et le printemps montrent une augmentation de la température plus modérée mais assez homogène (autour de 3 à 4 °C), et une augmentation de la précipitation nette mais moins forte.

En été, l'augmentation des températures est plus variable : d'environ +2 °C à environ +4,2 °C. Concernant les précipitations, deux modèles voient une hausse (+15 et +20 % environ), un modèle est neutre, et les deux derniers proposent une baisse marquée des précipitations estivales (jusqu'à -40 %). Il est intéressant de noter qu'en été, ce sont les deux modèles qui évoluent le plus vers un climat plus sec qui vont dans le même temps le plus vers un climat plus chaud, ce qui aura bien évidemment des conséquences sur le comportement hydrologique du bassin de la Meuse. En été, ces cinq modèles, avec leurs comportements plus variés, témoignent de l'incertitude liée à la modélisation climatique.

Meuse - Spread annuel - Futur lointain (2071-2100) - RCP8.5

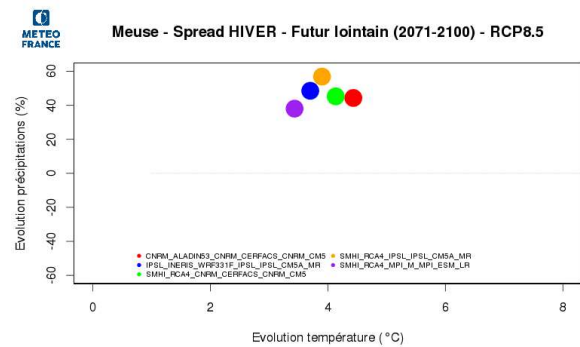
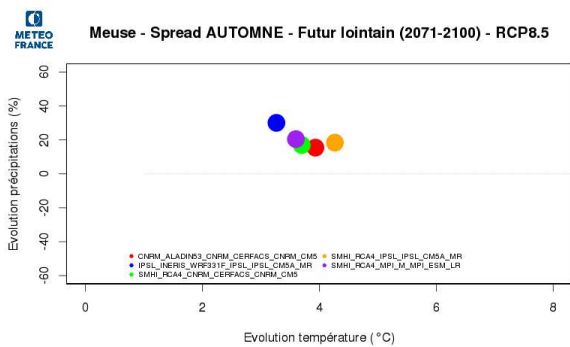
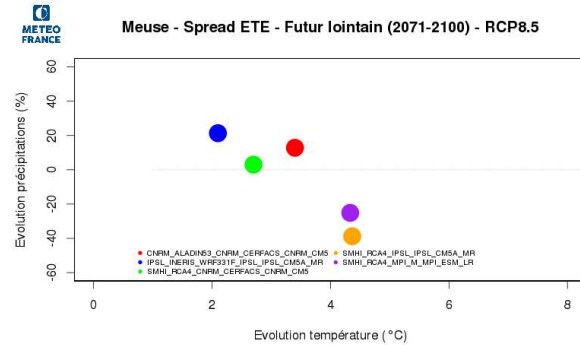
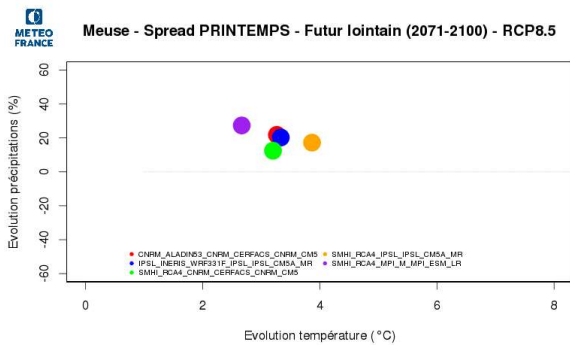
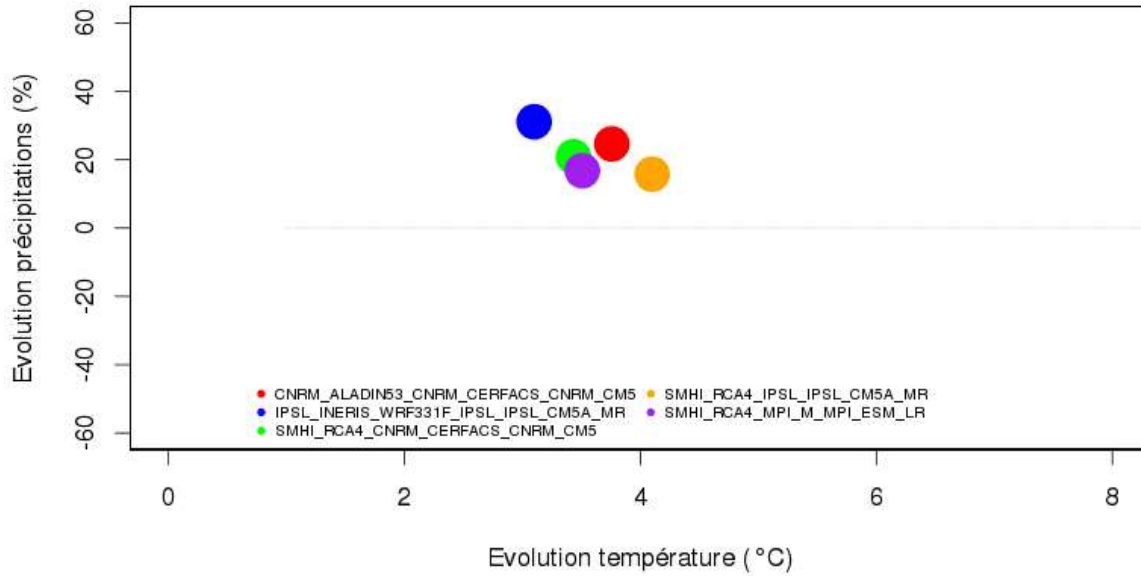


Figure 10 : Graphiques de dispersion (évolution des précipitations en fonction de l'évolution de la température) pour l'horizon futur lointain, pour le RCP 8.5, pour la moyenne annuelle et les moyennes de chaque saison météorologique (printemps = mars avril mai, été = juin juillet août, automne = septembre octobre novembre, hiver = décembre janvier février).

V.4. Mise en perspective des données climatiques

En 2020, Météo-France a développé un nouveau jeu de données composé de nouvelles projections climatiques issues d'EURO-CORDEX. Ce jeu de données, appelé DRIAS-2020, est composé de douze couples GCM-RCM et de trois RCPs (2.6, 4.5 et 8.5), débiaisés avec la méthode ADAMONT. Ces

nouvelles données sont accessibles sur le portail DRIAS depuis le début de l'année 2021 : <http://www.drias-climat.fr/>. Il convient de noter que ces projections n'étaient donc pas disponibles lorsque les travaux de débiaisage et de descente d'échelle de CHIMERE 21 ont été entrepris.

Les douze couples GCM-RCM de DRIAS-2020 ont été choisis suivant un certain nombre de critères, notamment celui d'échantillonner au mieux l'ensemble de la variabilité des températures et des précipitations parmi toutes les données présentes dans EURO-CORDEX. La distribution du jeu de données DRIAS-2020 sur la France est présentée sur la Figure 11. En moyenne sur la France et à l'échelle annuelle, à l'horizon fin de siècle et pour le RCP 8.5, l'ensemble DRIAS-2020 propose une augmentation de la température s'échelonnant de 3,1 °C à 5 °C, la médiane se situant à environ 3,9 °C. Pour les précipitations, une partie des modèles propose une baisse de précipitation allant jusqu'à -9 %, et une autre partie une hausse allant jusqu'à +10 %, la médiane se situe sur une légère hausse d'environ 2 %. De fortes disparités régionales existent dans l'ensemble DRIAS-2020, avec des régions sud de la France, en particulier en Méditerranée, concernées par des baisses notables de précipitations, surtout en été. Sur les régions plus au nord de la France dont le bassin de la Meuse, on a plutôt tendance à avoir une hausse des précipitations.

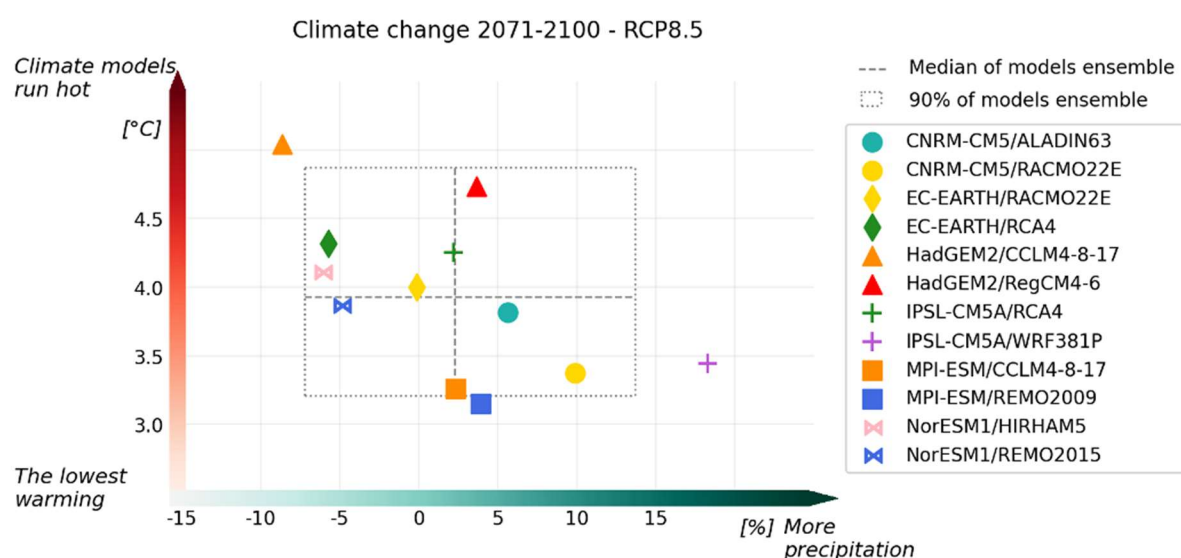


Figure 11 : Diagramme de dispersion annuelle de l'ensemble des douze couples GCM/RCM sélectionnés par Météo-France et disponibles dans le portail DRIAS, sur la France entière pour l'horizon futur lointain, pour le RCP 8.5. Source : rapport DRIAS-2020 <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>.

La Figure 12 permet de comparer les dispersions de l'ensemble DRIAS-2020 (12 points) et de l'ensemble CHIMERE 21 (5 points) pour chaque saison et sur l'ensemble de la France. Sur ces graphiques, les modèles climatiques utilisés pour CHIMERE 21 apparaissent cerclés de noir. Au printemps et en été, l'ensemble CHIMERE 21 représente plutôt bien la dispersion de l'ensemble DRIAS-2020, avec des couples de modèles situés dans toutes les zones du graphique, c'est-à-dire dans toute la plage de variation de l'ensemble DRIAS-2020. En revanche, à l'automne et en hiver, l'ensemble CHIMERE 21 est composé de modèles plutôt pluvieux, par rapport à l'ensemble DRIAS-2020. Cet effet d'échantillonnage porte le comportement du jeu de données CHIMERE 21 vers un ensemble

particulièrement pluvieux en hiver (ce qui impacte le comportement annuel), mais qui reste plutôt bien représentatif l'été.

En ce qui concerne la température, si en hiver l'ensemble CHIMERE 21 est plutôt plus chaud, aux autres saisons il propose un réchauffement un peu moins fort que l'ensemble DRIAS-2020. Au pas de temps annuel, l'ensemble CHIMERE 21 réchauffe très légèrement moins que l'ensemble DRIAS-2020.

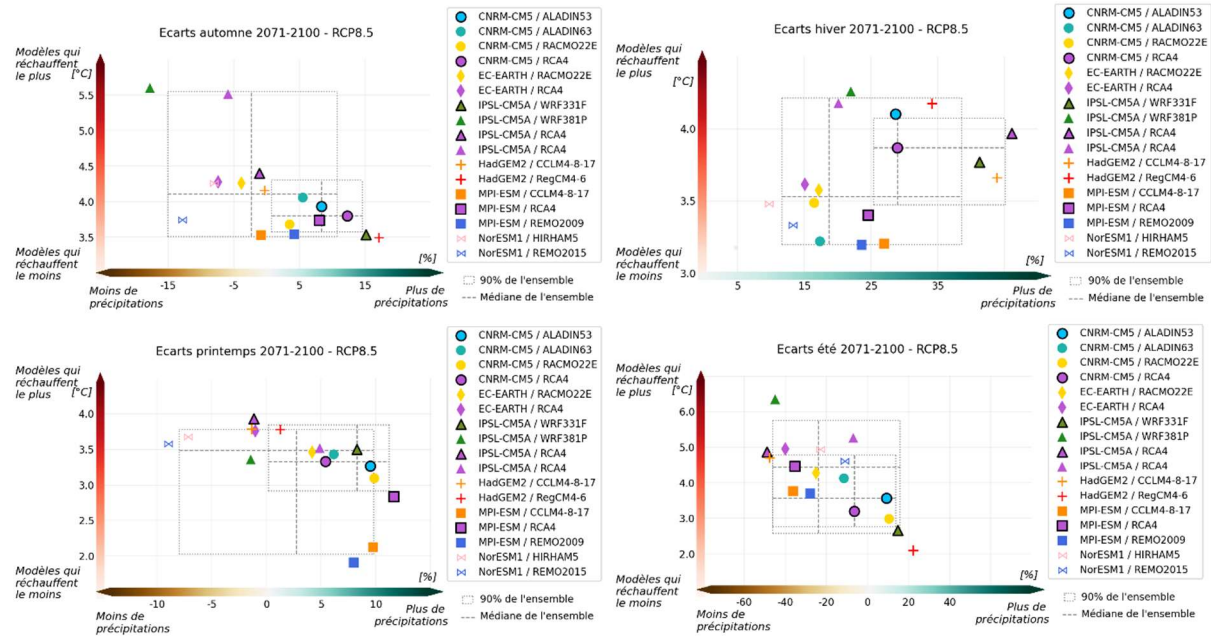


Figure 12 : Diagrammes de dispersion saisonniers sur la France entière de l'ensemble des douze couples GCM/RCM du jeu DRIAS-2020 et des cinq couples utilisés dans CHIMERE 21 (cerclés de noir). Attention, les versions des GCMs et RCMs ne sont pas les mêmes entre le jeu de données CHIMERE 21 et le jeu de données DRIAS-2020.

La Figure 13 présente une comparaison sur le bassin de la Meuse à Chooz des jeux de données récents CHIMERE 21 et DRIAS-2020 par rapport au jeu de données du projet Explore 2070 (Chauveau et al., 2013). Cette comparaison est menée sur la période 2047-2065, période cible du projet Explore 2070, et utilise la période de référence 1976-2005 (période de référence de CHIMERE 21, qui est plus représentative du climat actuel que la période de référence 1961-1990 d'Explore 2070). On a cependant corrigé les évolutions de précipitations et de température d'Explore 2070 aux évolutions climatiques observées entre les périodes 1961-1990 et 1976-2005. Cette figure permet de confirmer que sur le bassin de la Meuse comme sur l'ensemble de la France, l'ensemble CHIMERE 21 est à l'échelle annuelle plus pluvieux que l'ensemble DRIAS-2020, et également un peu moins chaud.

En mettant de côté ces différences, on note que les projections récentes, aussi bien CHIMERE 21 que DRIAS-2020, sont significativement plus pluvieuses mais aussi plus chaudes que les données Explore 2070. En effet, on passe d'un réchauffement médian de 1,7°C pour Explore 2070 à un réchauffement médian de 2,2 °C pour l'ensemble DRIAS-2020. La tendance sur les précipitations est très marquée : si dans Explore 2070 on avait sur la Meuse un ensemble de données ne proposant que des baisses de précipitations, avec une médiane à -10 %, on a dans le jeu DRIAS-2020 quasi uniquement des hausses de précipitations avec une médiane à +6 %.

Cette évolution dans le temps du comportement des ensembles de projections climatiques successifs apparaît être une tendance sur la France : une comparaison de l'ensemble DRIAS-2020 avec sa version précédente DRIAS-2014 montre également un réchauffement plus marqué, une tendance à une plus forte hausse des précipitations dans le nord de la France et à une plus forte baisse dans le sud de la France (ce qui conduit à un plus fort gradient nord-sud). (Source : rapport DRIAS-2020 <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>).

Cette modification de l'évolution des précipitations, si l'on compare les projets les plus anciens avec CHIMERE 21 et DRIAS-2020, ne doit pas être vue comme une remise en cause des projections. En effet, la France se situe dans une zone climatique intermédiaire, entre une zone méditerranéenne qui s'assèche et une zone sur le nord de l'Europe où les précipitations moyennes augmentent. Ainsi, grâce à l'amélioration continue des modèles climatiques, on parvient à mieux préciser la localisation de la zone intermédiaire et ainsi à mieux déterminer l'évolution pour le bassin de la Meuse, qui semble selon les dernières projections situé dans une zone où les précipitations annuelles devraient augmenter, même si des incertitudes demeurent.

Ainsi, même si l'ensemble CHIMERE 21 apparaît manquer de dispersion en hiver avec des modèles plutôt pluvieux, la tendance d'une évolution vers une hausse des précipitations en hiver par rapport aux données des simulations climatiques précédentes telles que celles issues d'Explore 2070 reste cohérente avec les travaux de DRIAS-2020.

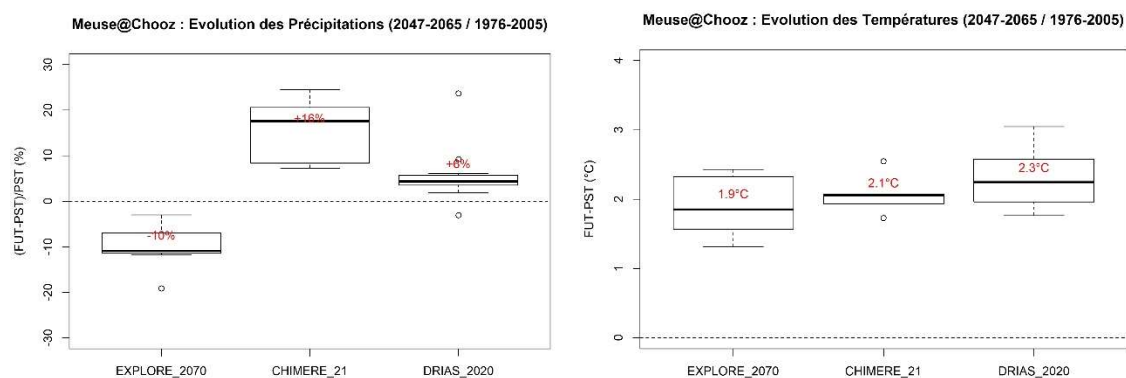


Figure 13 : Distribution des évolutions de précipitations et de température sur le bassin de la Meuse à Chooz, à l'horizon 2047-2065, par rapport à la période 1980-2009, pour trois jeux de données : Explore 2070, CHIMERE 21 et DRIAS-2020. Les jeux de données complets sont représentés.

À retenir :

Dans cette section, nous avons pu analyser l'évolution du climat sur trois périodes futures (proches, moyen, lointain) par rapport à la période historique (1976-2005). L'ensemble des cinq couples GCM/RCM utilisés dans CHIMERE 21 projettent une augmentation des températures, d'autant plus forte que l'on est dans un futur lointain ou sur le RCP 8.5. Concernant les précipitations, les projections indiquent une augmentation annuelle globale pour tous les scénarios, et une évolution contrastée l'été avec des hausses ou des baisses de précipitations.

On notera toutefois que ces cinq couples GCM/RCM ont tendance à sous-échantillonner toute la variabilité des précipitations, car l'ensemble CHIMERE 21 est composé de modèles plutôt pluvieux en hiver et en automne. En été, la variabilité des évolutions des précipitations est par contre mieux représentée dans CHIMERE 21.

En moyenne annuelle, les modèles utilisés dans CHIMERE 21 sont globalement plus pluvieux et un peu moins chauds que l'ensemble DRIAS-2020. Ces deux jeux de données sont issus des projections climatiques les plus récentes, et comparativement aux données d'Explore 2070, les nouvelles projections sont plus chaudes et significativement plus humides sur le bassin de la Meuse.

Des cartes détaillant les évolutions des températures et des précipitations pour chacun des couples GCM-RCM et pour chaque RCP sont présentées dans l'Annexe E.

VI. Modélisation hydrologique

Une fois les projections climatiques obtenues à une résolution satisfaisante (voir section précédente), **la chaîne de modélisation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie** nécessite l'utilisation de modèles hydrologiques afin de transformer les données climatiques en données hydrologiques (Figure 1). L'étape de modélisation hydrologique comportant elle aussi des incertitudes (Section VI.1), différents modèles hydrologiques ont été utilisés dans ce projet ainsi que plusieurs types et périodes de calage (Section VI.2). Les informations détaillées sur les modèles hydrologiques et leur calage, les critères d'évaluation utilisés, et leur robustesse spatiale et temporelle, ne sont détaillées qu'en Annexe B. En revanche, nous montrons dans la Section VI.3 la performance des modèles à l'exutoire du bassin versant de la Meuse.

VI.1. De l'incertitude de la modélisation hydrologique

Afin de quantifier les incertitudes liées à la structure et à la paramétrisation des modèles hydrologiques, quatre modèles hydrologiques sont utilisés. En effet, les sources des incertitudes liées à la modélisation hydrologique sont multiples et proviennent, comme dans tout exercice de modélisation, (1) des données utilisées en entrée des modèles (Engeland et al., 2016), (2) du choix du modèle (Mocker et al., 2016 ; Dayon et al., 2018) et (3) du jeu de paramètres choisi lors du calage du modèle (Hughes et al., 2010 ; Liu et al., 2017) (qui lui-même dépend de la période et des objectifs de calage). En France, dans le cadre du projet Explore 2070, un ensemble multi-modèle hydro-climatique a été mis en place pour évaluer les impacts possibles du changement climatique sur les écoulements (Chauveau et al., 2013). Les projections issues de deux modèles hydrologiques (SIM et GR4J) ont montré une divergence des résultats, renforçant la nécessité de tenir compte et de quantifier cette source d'incertitude. On a en effet noté une faible convergence des simulations issues de ces deux modèles, notamment concernant les changements des étiages (QMNA5), GR4J simulant des diminutions plus marquées que SIM.

L'utilisation d'un nombre plus important de modèles hydrologiques dans CHIMERE 21 permet donc de quantifier plus précisément l'incertitude liée au choix du modèle. De plus, on n'utilisera pas un unique jeu de paramètres, mais **deux jeux de paramètres**, ayant pour cible **l'un les bas débits et l'autre l'ensemble de la gamme de débits** et ce sur **trois périodes de calage** différentes, soit un total de **six jeux de paramètres** différents. La mise en œuvre de ces quatre modèles hydrologiques et de ces deux calages permet la mise en place d'une méthode d'analyse poussée des sources d'incertitude. L'analyse fine de l'incertitude de modélisation hydrologique n'a en effet, à notre connaissance, été que peu étudiée en France auparavant.

VI.2. Les modèles hydrologiques utilisés

Quatre modèles hydrologiques ont été utilisés (Tableau 6) : GRSD, développé par INRAE Antony, SIM2, développé par Météo-France, PRESAGES, développé par l'Université de Lorraine et enfin MORDOR-TS, développé par EDF-DTG. Ces quatre modèles présentent l'avantage de reposer sur des concepts différents, d'utiliser des distributions spatiales différentes, et d'avoir été utilisés à plusieurs reprises dans des études d'impact du changement climatiques et sur le bassin de la Meuse.

Tableau 6 : Caractéristiques principales des modèles hydrologiques utilisés. Se reporter aux Annexes B.2, B.3, B.4 et B.5 pour plus de détails.

Modèle	Type	Distribution	Calage	Nombre de paramètres à caler
GRSD	Conceptuel	Semi-distribué	Oui	6
SIM2	A bases physiques	Distribué	Non, mais débiaisage des débits simulés	-
PRESAGES	Conceptuel	Global	Oui	7
MORDOR-TS	Conceptuel	Semi-distribué	Oui	11

Le calage des paramètres (ou débiaisage des débits simulés) des modèles a été effectué sur trois périodes distinctes : 1970-2016, ainsi que deux sous-périodes, 1970-1993 et 1993-2016. La première période a été choisie en raison de la disponibilité de données de débits observés, mais aussi parce qu'elle couvre une période récente assez longue (46 ans). Les deux sous-périodes ont été choisies car elles permettent de tester la transférabilité temporelle des modèles hydrologiques (voir Annexe B.7) mais aussi de disposer de plusieurs jeux de paramètres pour obtenir les projections hydrologiques. Par ailleurs, deux types de calage, sur la totalité du régime et plus spécifiquement sur les étiages¹⁴, ont été utilisés afin de considérer cette incertitude.

VI.3. Performance des modèles à l'exutoire (Chooz)

L'analyse de performance et de robustesse des modèles est détaillée en Annexes B.6 et B.7. Dans cette section, nous nous intéressons à la qualité des simulations à l'exutoire du bassin, c'est-à-dire à Chooz. Les courbes de régime et de débits classés ont ainsi été analysées.

La Figure 14 présente ces deux courbes à l'exutoire du bassin de la Meuse (Chooz), pour les observations et les simulations des quatre modèles hydrologiques, calés sur le régime pour la période totale. On observe une très bonne adéquation entre les observations et les simulations, comme reflété par les critères de performance présentés en annexes. On observe néanmoins une légère sous-estimation des débits les plus forts pour GRSD et PRESAGES et une légère sous-estimation des étiages pour MORDOR. La courbe de remontée est aussi légèrement anticipée à l'automne par GRSD, PRESAGES et MORDOR. La courbe de débits classés confirme et précise ces performances, avec de plus le QXA10 sous-estimé principalement par PRESAGES et surestimé par GRSD et les QMNA5 et VNC7-5 sous-estimés par MORDOR. SIM2 semble produire les simulations les plus proches des observations, ce qui s'explique notamment par le débiaisage des sorties de ce modèle avec la méthode quantile-quantile, méthode non utilisée par les autres modèles hydrologiques.

¹⁴ Excepté pour SIM2, dont le débiaisage considère à la fois la gamme entière des débits mais aussi les bas débits.

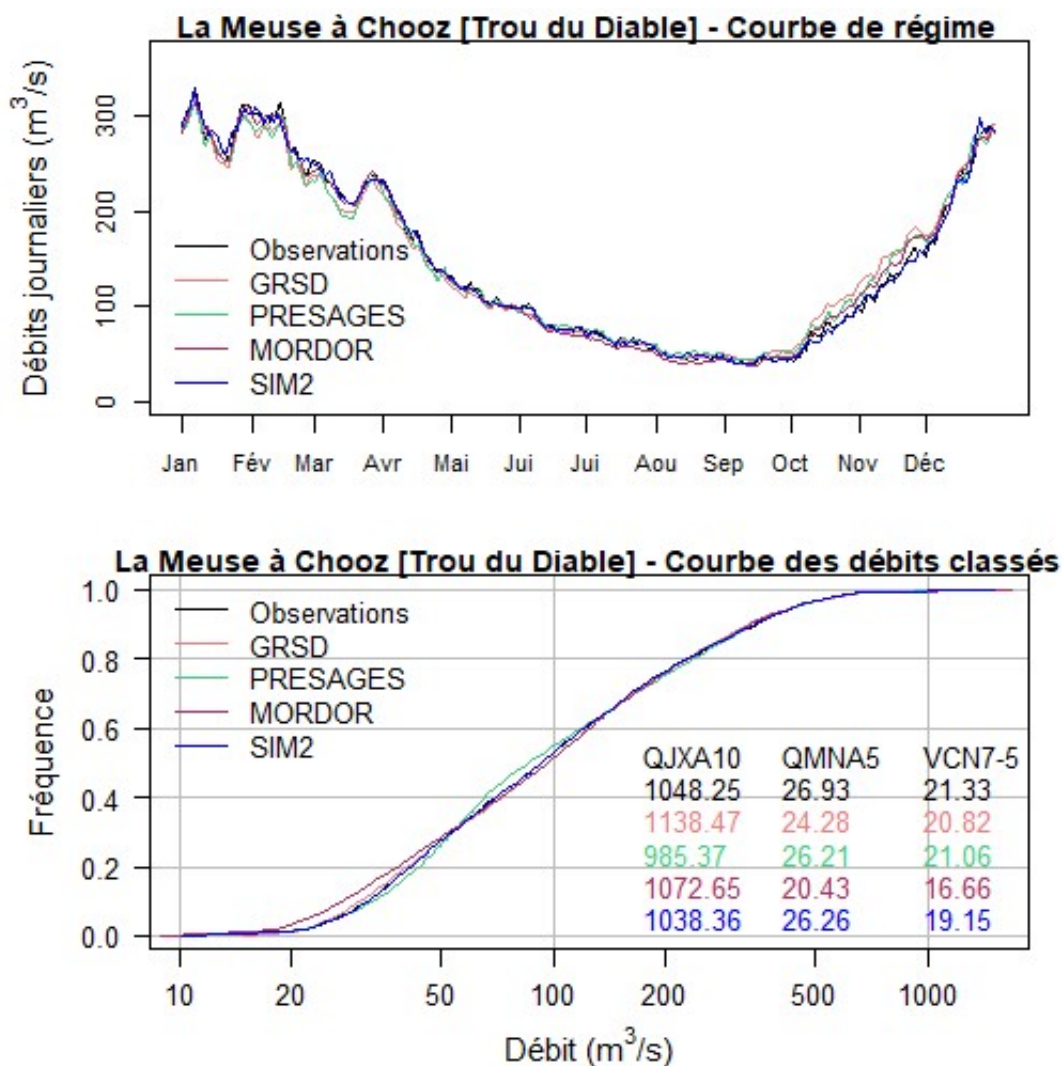


Figure 14 : Régime moyen interannuel (en haut) et courbe des débits classés (en bas) observés (en noir) et simulés (en couleur) par les modèles hydrologiques calés sur le régime pour la Meuse à Chooz. Les indicateurs hydrologiques observé (en noir) et simulés (en couleur) sont indiqués en bas à droite du graphe du bas : QJXA10, QMNA5, VCN7₅.

La Figure 15 montre les courbes de régime interannuel et de débits classés observées et simulées par GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 en calage sur les étiages sur la période totale, à l'exutoire du bassin de la Meuse. Avec ce calage, on peut voir sur la courbe de régime que les quatre modèles sous-estiment les débits les plus forts, particulièrement GRSD, mais sont plus proches des débits d'étiage observés que le calage sur le régime. La courbe de remontée est anticipée par les modèles, particulièrement GRSD, à l'exception de SIM2. La courbe des débits classés montre une excellente représentation des observations par les quatre modèles, avec une sous-estimation du QJXA10 la plus notable par PRESAGES et une surestimation par GRSD, et encore une fois une légère sous-estimation du QMNA5 et VCN7₅, la plus marquée par MORDOR.

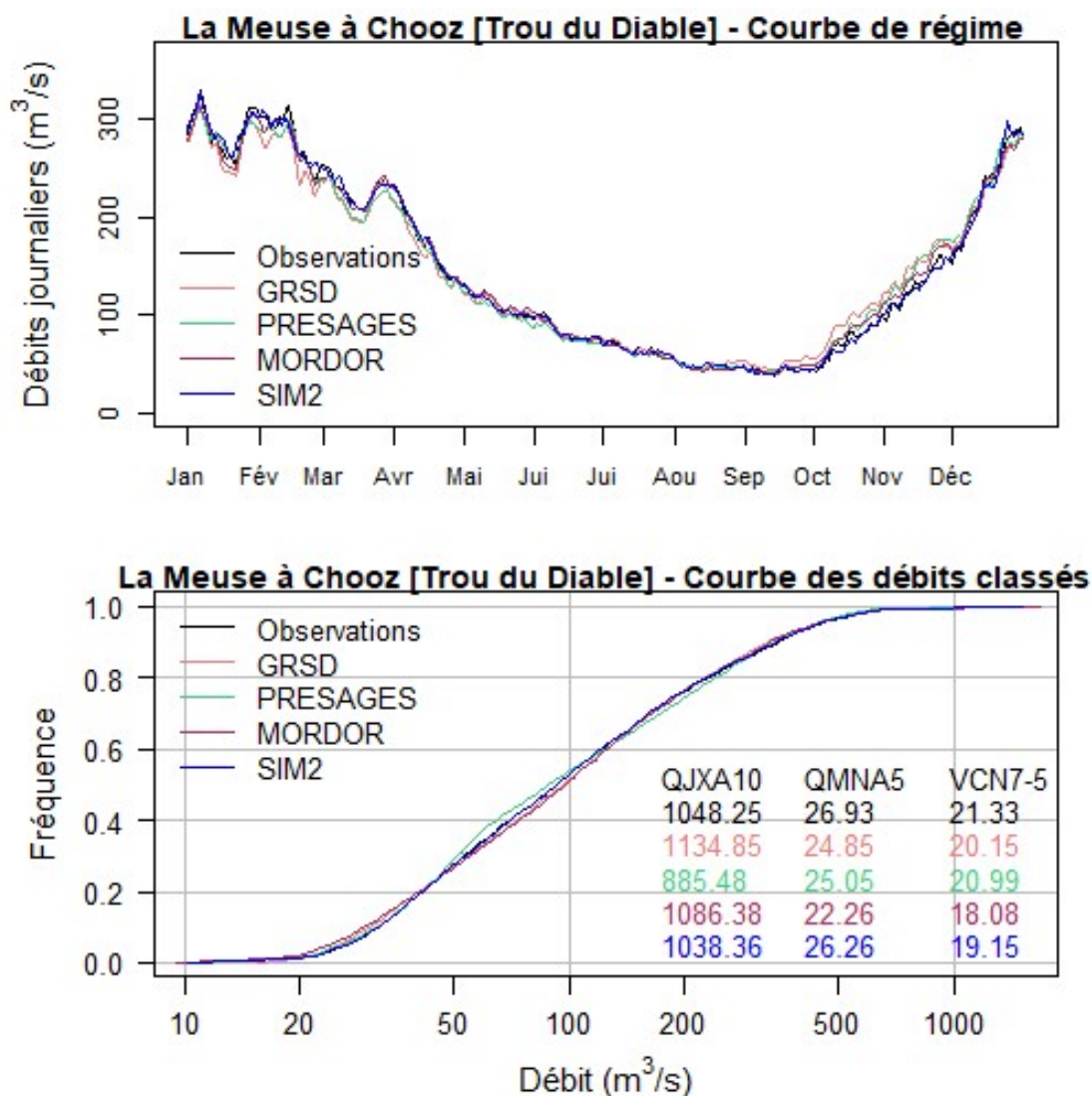


Figure 15 : Régime moyen interannuel (en haut) et courbe des débits classés (en bas) observés (en noir) et simulés (en couleur) par les modèles hydrologiques calés sur les étiages pour la Meuse à Chooz. Les indicateurs hydrologiques observé (en noir) et simulés (en couleur) sont indiqués en bas à droite du graphe du bas : QJXA10, QMNA5, VCN7₅.

La Figure 16 présente l'évènement de 1976. Cet évènement a fait état de débits observés passant sous le seuil rouge. On observe sur cette figure que l'ensemble des modèles semble disposer d'une dynamique comparable aux observations. Aucun modèle ne simule parfaitement les observations, dont on notera que celles-ci sont par nature incertaines. Cependant, les observations sont très bien encadrées par les différentes simulations, ce qui est un autre élément rassurant sur la qualité des modèles.

La sécheresse de 2003 était moins marquée (Figure 17), avec des débits observés situés entre les seuils orange et rouge. On note ici une légère sous-estimation des débits par les modèles, qui restent cependant dans une gamme acceptable de valeurs.

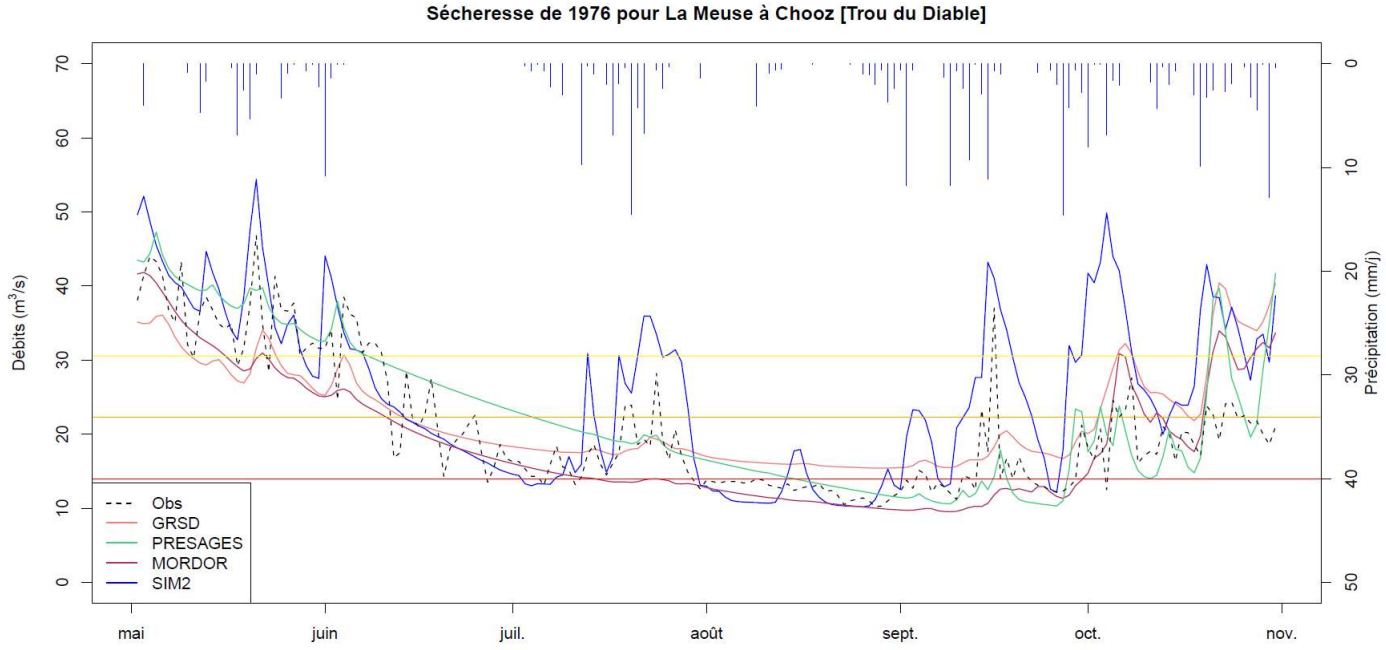


Figure 16 : Débits observés et simulés lors de la période de sécheresse de 1976 pour la Meuse à Chooz. Les modèles ont été calés sur les étiages pour la période entière.

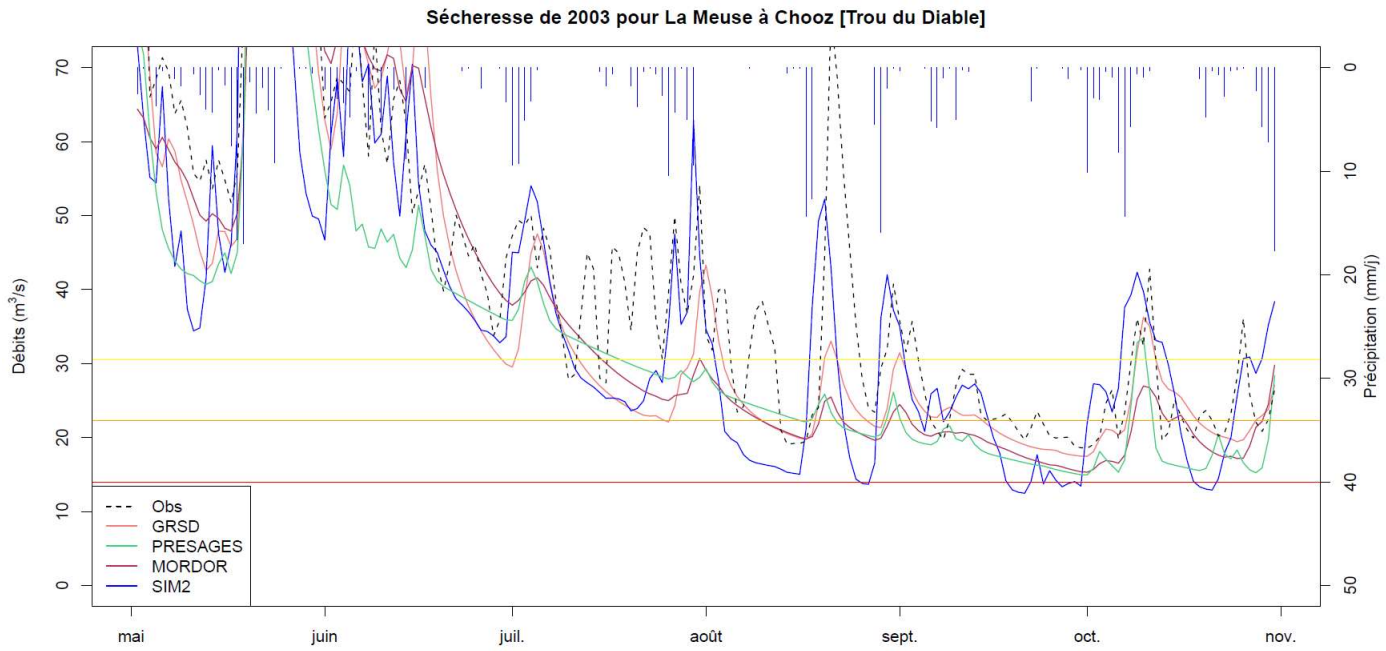


Figure 17 : Débits observés et simulés lors de la période de sécheresse de 2003 pour la Meuse à Chooz. Les modèles ont été calés sur les étiages pour la période entière.

À retenir :

L'analyse des courbes de régime moyen mensuel et des courbes de débits classés à l'exutoire du bassin de la Meuse a montré une excellente performance des modèles hydrologiques sur l'ensemble du régime hydrologique. De légères sous-estimations des pics de crue et des étiages par tous les modèles sauf SIM2, qui bénéficie d'un débiaisage quantile-quantile, sont toutefois à noter.

Les analyses complémentaires très poussées présentées en Annexe B montrent de très bonnes performances de l'ensemble des modèles hydrologiques utilisés, renforçant la confiance qui peut être placée en ce maillon de la chaîne de modélisation. En effet, l'ensemble des stations du bassin versant de la Meuse semble être simulé de manière très satisfaisante à la fois sur les étiages et sur le régime hydrologique. De plus, les modèles montrent des performances très correctes même lorsqu'ils sont appliqués sur des périodes indépendantes, ce qui est rassurant pour une application en contexte de changement climatique.

Par ailleurs, les événements extrêmes de sécheresse de 1976 et de 2003 sont correctement représentés par les quatre modèles hydrologiques.

VII. Analyse des projections hydrologiques

Les projections hydrologiques sur le bassin de la Meuse ont été obtenues avec les quatre modèles hydrologiques présentés précédemment (Section VI.2), calés sur trois périodes temporelles et deux fonctions-objectif (pour GRSD, PRESAGES et MORDOR) permettant de focaliser la modélisation sur les étiages pour la première fonction-objectif et le régime pour la seconde. Concernant SIM2, la méthode quantile-quantile a été appliquée sur l'ensemble de la gamme de débits, ce qui correspond à la fois au calage sur le régime et au calage sur les étiages. Il n'y a donc qu'un calage pour SIM2. Ces modèles ont été forcés par les projections climatiques décrites dans le Tableau 3 et analysées dans la Section V.3, issues de deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCPs 4.5 et 8.5), cinq couples GCM/RCM et une méthode de descente d'échelle et de débiaisage (ADAMONT). **Nous avons ainsi produit jusqu'à 210 projections hydrologiques journalières de 1976 à 2100** pour chaque station de jaugeage sélectionnée dans cette étude¹⁵. Par la suite, l'analyse de ces projections se fera soit sur l'ensemble de la chronique, soit par période temporelle caractéristique : la période de référence (1976-2005), l'horizon 2035 (2021-2050), c'est-à-dire le futur proche, et l'horizon 2085 (2071-2100), c'est-à-dire le futur lointain.

Afin de quantifier l'évolution du cycle hydrologique sous changement climatique dans un contexte d'incertitude, trois indicateurs ont été analysés : le VCN3, le module et le Q95. Le VCN3 correspond au débit minimum annuel calculé sur une moyenne glissante de trois jours ; c'est donc un indicateur de basses eaux. Le module correspond au débit moyen annuel. Le Q95 est calculé à partir de la distribution des débits journaliers sur une année et correspond au quantile 95, i.e. en-dessous duquel se trouvent 95 % des débits journaliers ; c'est donc un indicateur de hautes eaux.

Par ailleurs, les indicateurs classiques QMNA5 et QJXA10 ont été calculés pour tracer les profils hydrologiques de la Meuse.

VII.1. Evolution du régime interannuel des débits

La Figure 18 présente les régimes mensuels de la Meuse à Chooz observés et simulés pour les quatre modèles hydrologiques sur la période de référence et les horizons 2035 et 2085 pour le RCP 4.5. On remarquera une certaine sous-estimation des débits sur la période de référence en automne et en hiver. Cette sous-estimation est liée à la sous-estimation des précipitations par les projections climatiques, expliquée dans le Tableau 8 présenté en Annexe. La Figure 18 montre que, pour les projections climatiques utilisées, le régime hydrologique de la Meuse à Chooz sera principalement modifié pour la période présentant les débits les plus forts. En effet, les valeurs moyennes des étiages, pour les trois périodes de temps, se superposent. On observe cependant un élargissement de l'ensemble des débits à cette période, particulièrement à l'horizon 2085, et donc une plus grande incertitude. Les changements les plus nets concernent les débits de pointe, avec une augmentation croissante entre la période de référence et l'horizon 2085. A cet horizon, l'ensemble projeté dépasse l'ensemble simulé sur la période de référence, quel que soit le modèle hydrologique considéré. Similairement aux débits d'étiage, les débits de pointe montrent une plus grande incertitude (i.e. un ensemble plus large) à l'horizon 2085 qu'en période de référence.

¹⁵ Certaines stations n'étant pas simulées par l'ensemble des modèles et certaines sous-périodes de calage ne possédant pas de données suffisantes, ce nombre maximal peut être plus réduits pour ces stations.

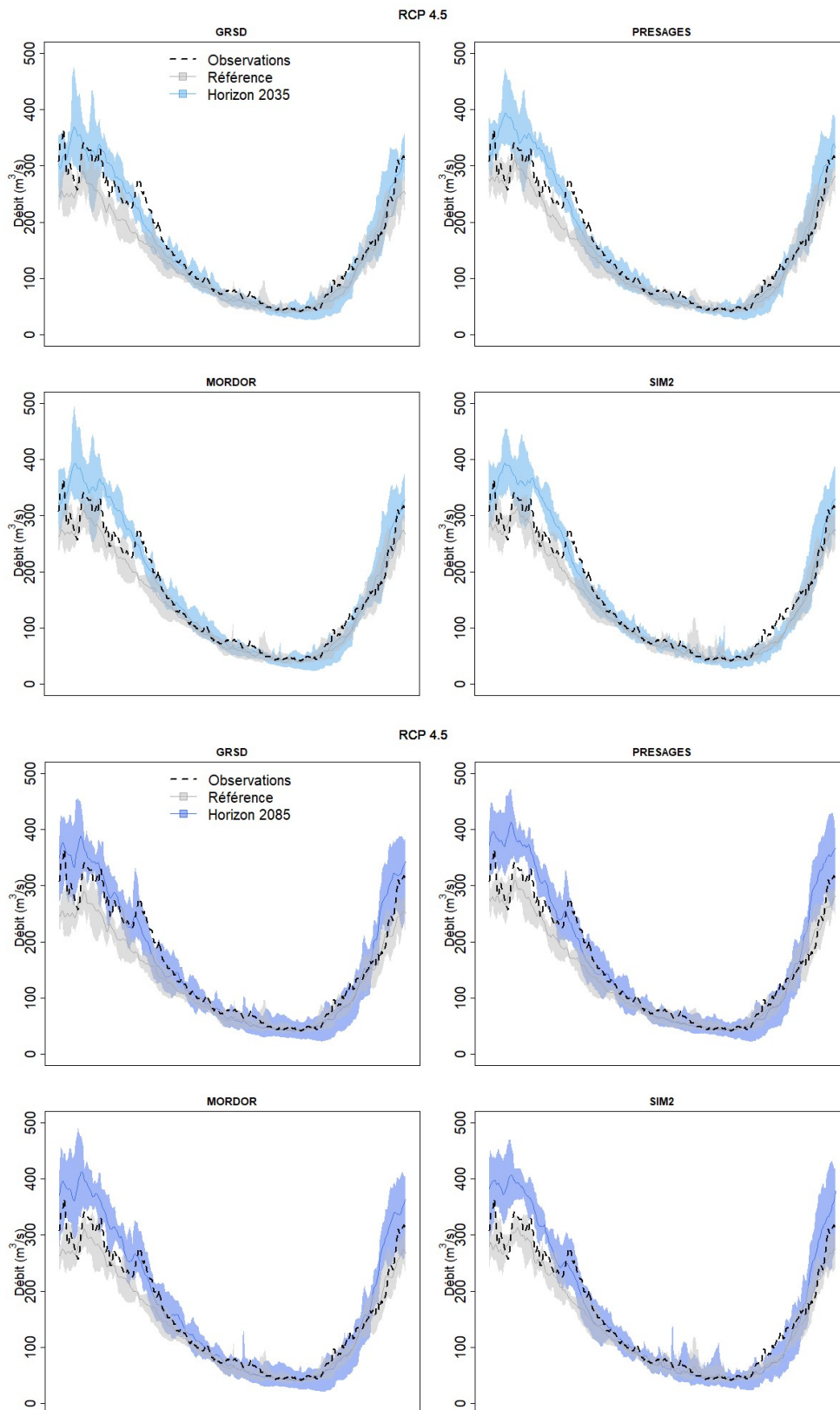


Figure 18 : Régimes interannuels des projections hydrologiques de la Meuse à Chooz obtenues avec les modèles GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 sur la période historique de référence (1976-2005) et les horizons 2035 (2021-2050, deux lignes du haut) et 2085 (2071-2100, deux lignes du bas) pour le RCP 4.5 : valeur moyenne (ligne) et enveloppe de l'ensemble (aire colorée). En pointillés noirs, l'observé. Se reporter à la Figure 14 et à la Figure 15 pour les régimes simulés avec les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN.

On notera que comparer les débits observés aux débits projetés, même sur la période de référence, n'est pas correct méthodologiquement parlant. Ce raccourci a été choisi afin de ne pas alourdir le graphe et en raison de la très bonne représentation du régime par les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN (Figure 14 et Figure 15).

La Figure 19 présente les régimes mensuels observés et simulés pour les quatre modèles hydrologiques sur la période de référence et les horizons 2035 et 2085 pour le RCP 8.5. Pour ce RCP, on observe une plus grande incertitude à l'horizon 2085 pour les étiages et les crues, par rapport au RCP 4.5. L'incertitude sur les étiages est plus importante pour SIM2, par rapport aux autres modèles, avec des valeurs comprises entre 50 et 120 m³/s, contre une gamme de 50 à 100 m³/s pour les autres modèles. De plus, l'augmentation des débits les plus forts est plus importante pour ce RCP pour le futur lointain, avec des valeurs de débits comprises entre 350 et 500 m³/s, contre des débits hivernaux projetés pour le RCP 4.5 de 300 à 450 m³/s, pour des débits de crue observés de 300 m³/s.

Ces différentes évolutions des régimes hydrologiques sont cohérentes avec les projections climatiques. On peut lier l'augmentation des débits durant l'hiver à l'augmentation des précipitations, avec dans les deux cas une forte dépendance au RCP et à l'horizon. De plus, on peut lier l'incertitude sur l'évolution des étiages estivaux à la coexistence de projections fortement plus sèches et plus chaudes avec des projections plus humides et avec une augmentation de la température plus modérée.

À retenir :

Dans cette partie, nous avons résumé les 210 projections hydrologiques de la Meuse à Chooz produites par deux scénarios de gaz à effet de serre (RCPs 4.5 et 8.5), cinq couples GCM/RCM, une méthode de descente d'échelle (ADAMONT), quatre modèles hydrologiques (GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM) utilisés avec six ou trois jeux de paramètres.

On observe que les débits sont sous-estimés en automne et en hiver sur la période de référence, en raison d'une sous-estimation des précipitations sur ces saisons par les modèles climatiques. Concernant le futur, les courbes de régime seront modifiées particulièrement pour les hauts débits, avec une tendance nette à la hausse entre la période de référence (1976-2005) et l'horizon 2085 (2071-2100) en automne et en hiver. Cette tendance est plus forte pour le RCP 8.5 que pour le RCP 4.5. Les débits d'étiages ne montrent pas de tendance nette. Pour les forts débits comme pour les faibles débits, l'incertitude liée à ces projections augmente vers la fin du 21^e siècle. L'ensemble des projections hydrologiques semble cohérent avec les projections climatiques analysées dans la Section V.3.

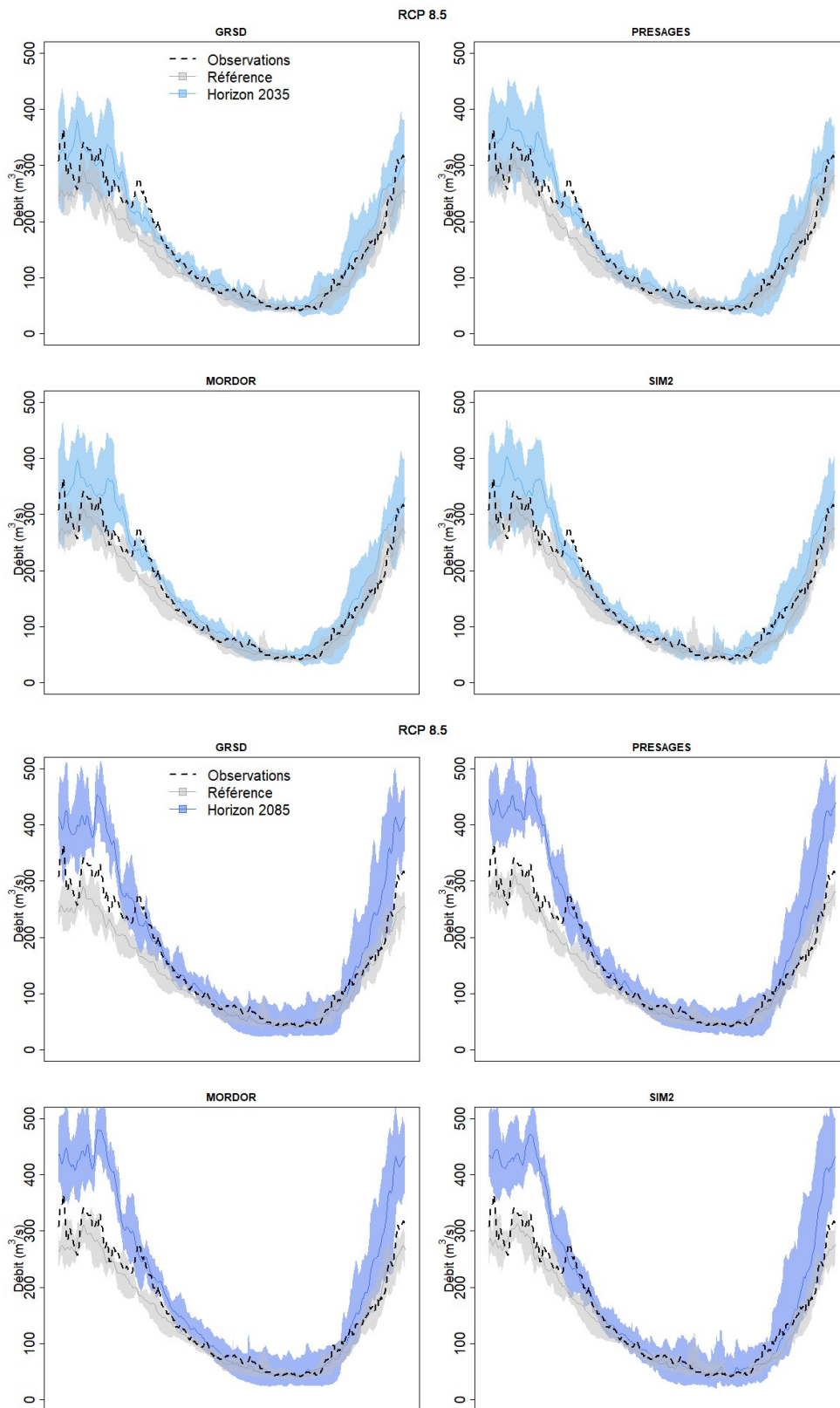


Figure 19 : Régimes interannuels des projections hydrologiques de la Meuse à Chooz obtenues avec les modèles GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 sur la période historique de référence (1976-2005) et les horizons 2035 (2021-2050, deux lignes du haut) et 2085 (2071-2100, deux lignes du bas) pour le RCP 8.5 : valeur moyenne (ligne) et enveloppe de l'ensemble (aire colorée). En pointillés noirs, l'observé. Se reporter à la Figure 14 et à la Figure 15 pour les régimes simulés avec les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN.

VII.2. Evolution des débits moyens, faibles et forts le long de la Meuse

Dans cette section, nous proposons une analyse des débits futurs le long de la Meuse selon une représentation en profil, de manière similaire à celle proposée dans le cadre du projet AMICE. Sur ces représentations en profil, les débits caractéristiques sur sept stations situées sur le cours d'eau principal de la Meuse sont illustrés, permettant de dégager des cohérences ou des différences amont-aval. Par ailleurs, les affluents principaux sont situés sur ces profils hydrologiques. Ces profils utilisent des échelles logarithmiques et présentent la surface du bassin versant en abscisse et les débits caractéristiques en ordonnée. Sur ces graphes, nous représentons les observations sur la période 1976-2005, ainsi que les projections de débits pour l'ensemble des modèles hydrologiques sur les trois périodes : 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100. La médiane ainsi que l'enveloppe de l'ensemble des projections sont représentées.

La Figure 20 présente les débits moyens projetés. Sur cette figure, nous observons que les débits moyens de la période historique tendent à sous-estimer les débits observés sur la même période, sur l'ensemble du cours de la Meuse, comme c'était déjà le cas à Chooz (section précédente). De plus, la figure du haut montre que pour le RCP 4.5, les débits moyens vont vers une augmentation de plus en plus importante au cours du temps. Cette augmentation semble la plus importante pour les stations de Stenay et de Sedan, alors que les autres stations continuent à montrer un chevauchement d'une partie des débits futurs avec une partie des débits de la période historique et des débits observés. Sur la figure du bas (RCP 8.5), on remarque une faible différence avec le RCP 4.5 concernant le futur proche (2021-2050). En revanche, le futur lointain montre une plus forte augmentation des débits moyens, notamment à l'aval du bassin.

La Figure 21 présente les débits de crue projetés grâce à l'indicateur QJXA10. Cette figure montre une légère sous-estimation des débits de crue sur la période historique par rapport aux observations, sous-estimation qui est plus forte pour les stations de Neufchâteau et de Chalaines. Les évolutions futures du QJXA10 semblent limitées pour le RCP 4.5 (figure du haut). En effet, seule la période du futur lointain (2071-2100) semble montrer une augmentation de cet indicateur ; cependant, cette augmentation reste limitée.

En revanche, cette augmentation semble plus forte concernant le futur lointain pour le RCP 8.5 (figure du bas). En effet, notamment en aval du bassin de la Meuse, l'augmentation du QJXA10 est importante.

La Figure 22 présente les débits d'étiage projetés grâce à l'indicateur QMNA5. Sur cette figure, on observe une nette sous-estimation des débits d'étiage en amont du bassin, et une légère sous-estimation en aval du bassin, sur la période historique par rapport aux débits observés. Par rapport à la période historique, les périodes futures montrent une diminution légère (RCP 4.5 et futur proche) à modérée (RCP8.5 et futur lointain) du QMNA5. Cette diminution est notamment très marquée en amont du bassin. Par ailleurs, on observe aussi une forte augmentation de l'incertitude sur la période du futur lointain.

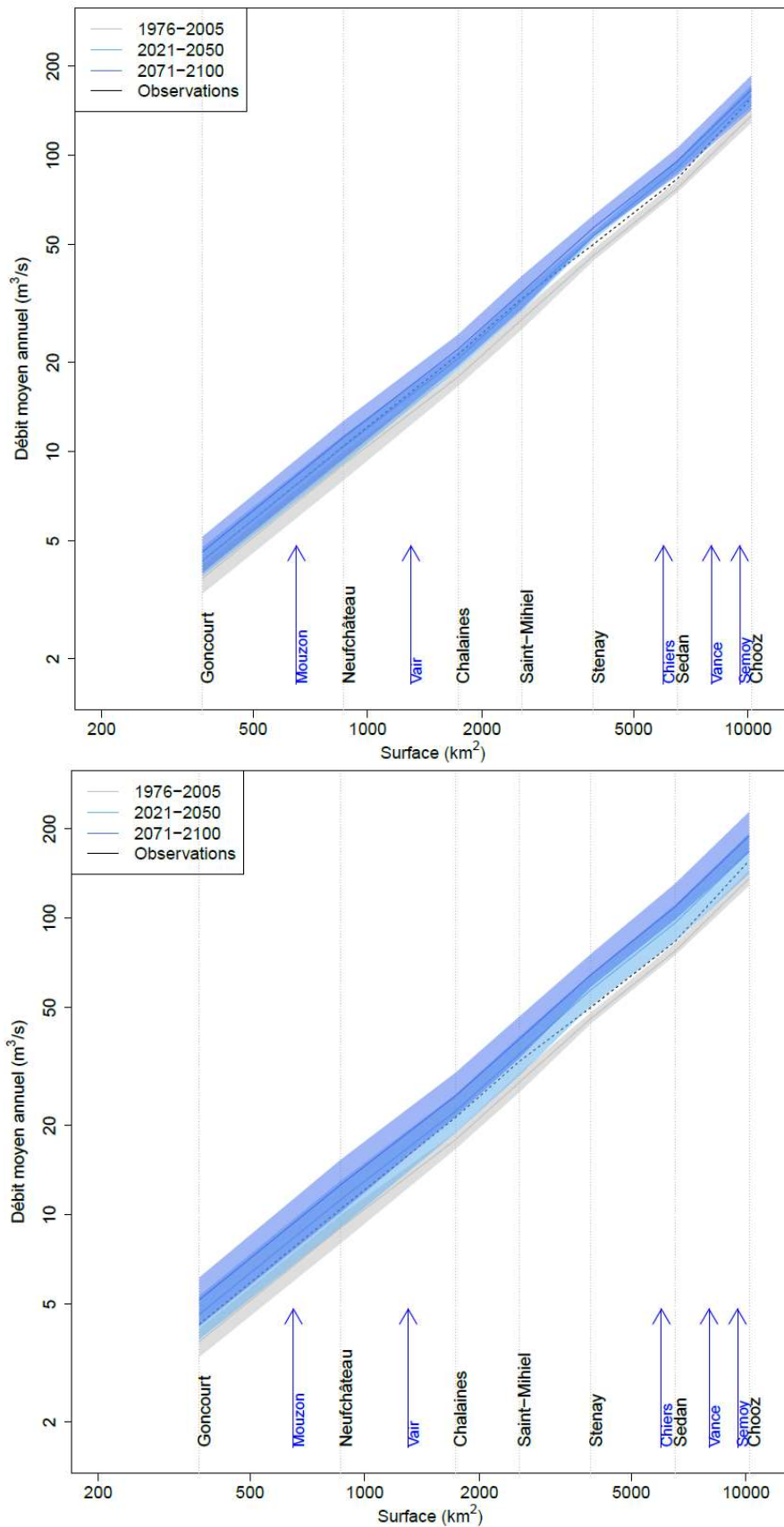


Figure 20 : Profil hydrologique de la Meuse représentant les débits moyens observés sur la période 1976-2005 et projetés sur trois périodes : 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100. En haut, le RCP 4.5, en bas, le RCP 8.5. Tous les modèles hydrologiques, calés sur la période totale et sur le régime, sont confondus.

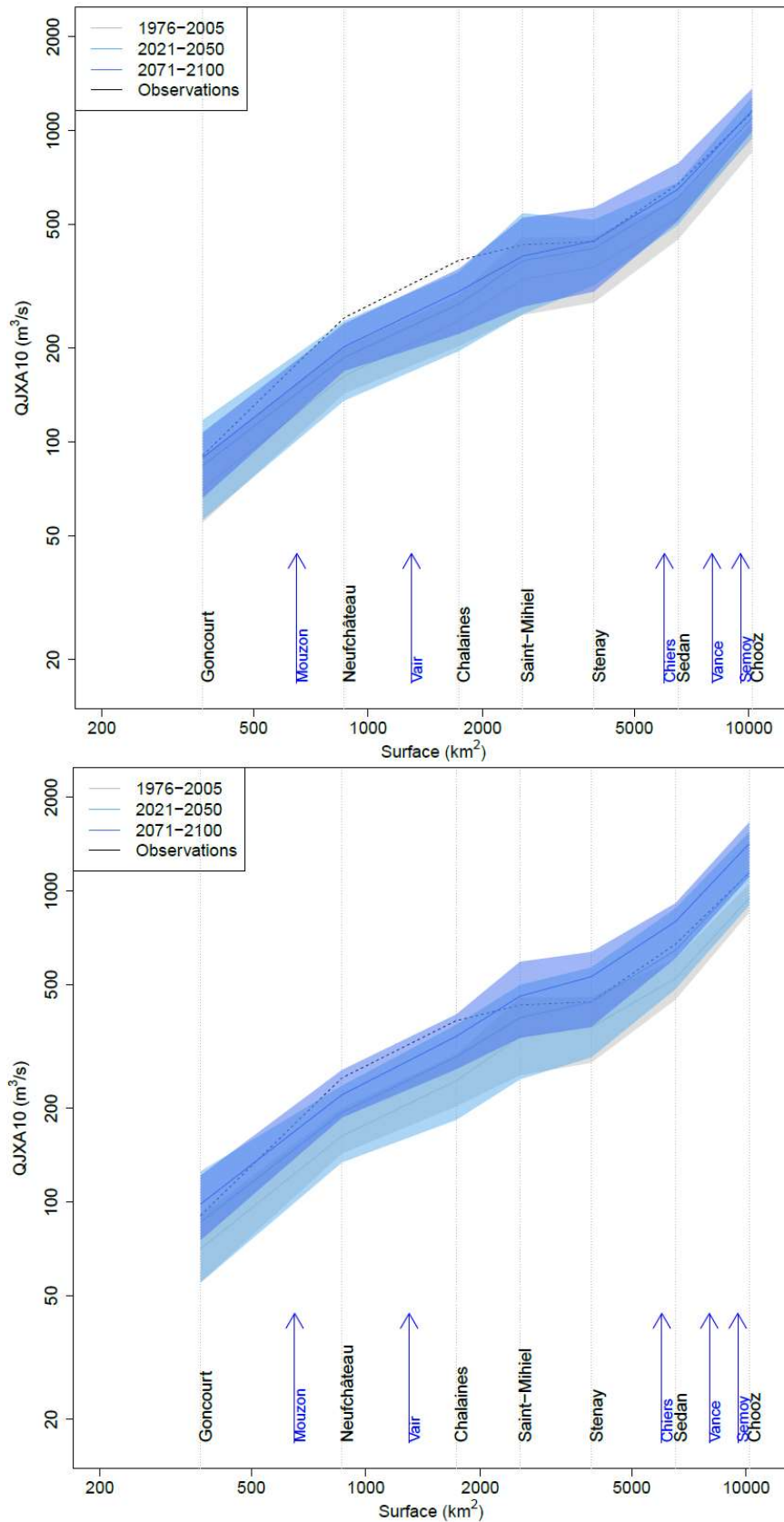


Figure 21 : Profil hydrologique de la Meuse représentant les débits de crue (QJXA10) observés sur la période 1976-2005 et projetés sur trois périodes : 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100. En haut, le RCP 4.5, en bas, le RCP 8.5. Tous les modèles hydrologiques, calés sur la période totale et sur le régime, sont confondus.

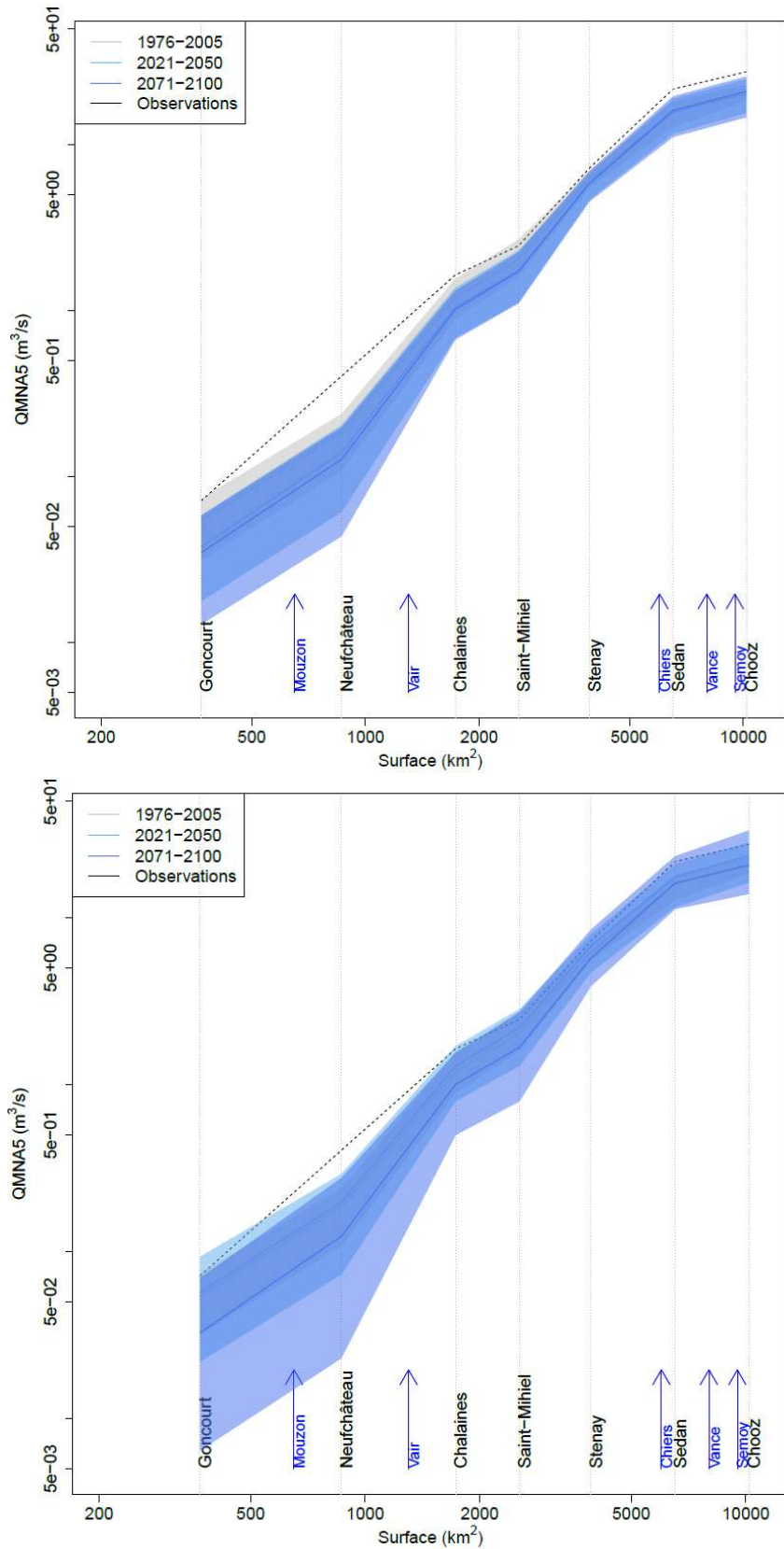


Figure 22 : Profil hydrologique de la Meuse représentant les débits d'été (QMNA5) observés sur la période 1976-2005 et projetés sur trois périodes : 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100. En haut, le RCP 4.5, en bas, le RCP 8.5. Tous les modèles hydrologiques, calés sur la période totale et sur les étés, sont confondus.

À retenir :

Dans cette partie, nous avons résumé les 210 projections hydrologiques sur le linéaire du cours d'eau de la Meuse produites par deux scénarios de gaz à effet de serre (RCPs 4.5 et 8.5), cinq couples GCM/RCM, une méthode de descente d'échelle (ADAMONT), quatre modèles hydrologiques (GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM). Nous nous sommes restreints au calage le plus proche de l'indicateur étudié.

Trois conclusions principales s'imposent : les débits moyens augmenteront dans le futur, d'autant plus qu'on sera dans un futur lointain ; les débits de crue vont augmenter, notamment en aval du bassin ; les débits d'étiage vont diminuer, notamment en amont. Ces disparités seront importantes à prendre en compte pour les stratégies d'adaptation. Par ailleurs, concernant les débits d'étiage, une forte augmentation de l'incertitude est à noter pour le futur lointain.

VII.3. Décomposition d'incertitude pour les indicateurs hydrologiques

Afin d'analyser en détail les projections et de quantifier les incertitudes liées aux différentes étapes de la chaîne d'impact, une analyse d'incertitude a été menée sur plusieurs indicateurs hydrologiques. Trois indicateurs, représentatifs de l'ensemble du régime hydrologique et couramment utilisés par les hydrologues de la DREAL Grand-Est, ont été sélectionnés : le VCN3 pour les étiages, le module pour les débits moyens et le quantile 95 (Q95) pour les débits de pointe. Pour chacun de ces trois indicateurs, une méthode de décomposition de variance, appelée QUALYPSO, a été utilisée pour quantifier et hiérarchiser les principales sources d'incertitude des projections hydrologiques liées à la chaîne de modélisation d'impact mise en place dans cette étude.

Dans cette étude, les sources d'incertitude considérées sont : les RCPs, les GCMs, les RCMs, les modèles hydrologiques (HMs) et la paramétrisation des modèles hydrologiques (HM Param.). La variabilité interne (Variab. Int.) du système ainsi que la variabilité résiduelle (i.e. celle qu'on ne peut pas expliquer, Var. Res.) complètent cette liste. Pour bien comprendre les graphes présentés, il est important de noter que l'anomalie (relative ou non) pour une année donnée représente l'anomalie de la période de 30 ans centrée sur cette année. Une présentation plus détaillée de la méthode est disponible dans l'Annexe C.

Dans cette section, ces deux analyses sont produites pour les trois indicateurs hydrologiques sélectionnés : les projections des anomalies d'une part et la hiérarchisation de l'incertitude de ces projections d'autre part. Ces résultats sont présentés pour les six stations modélisées en commun par les quatre modèles hydrologiques de ce projet sur le bassin de la Meuse.

VII.3.1. Projections des étiages

La Figure 23 présente la hiérarchisation des sources d'incertitudes liées aux projections d'étiage. En début de siècle, la variabilité interne (en orange) est prépondérante sur tout le bassin, expliquant entre 70 et 80 % de l'incertitude totale. Dès l'horizon 2030, les modèles climatiques GCMs (en jaune) et RCMs (en vert) induisent la plus grande part d'incertitude : jusqu'à près de 40 % et près de 60 % respectivement sur les bassins de tête de la Meuse et la Chiers, à part égale (environ 40 %) pour les bassins intermédiaires de la Meuse et la Chiers, et avec une dominante issue des GCMs (près de 60 %

contre environ 20 % pour les RCMs) pour la Meuse aval et la Semoy. La prédominance de ces deux sources d'incertitude reste présente jusqu'à la fin du siècle, avec, à l'horizon 2070, une part plus marquée des GCMs pour la Meuse amont, la Chiers et la Semoy (entre 40 % et 50 % de l'incertitude totale) et une part plus importante des RCMs pour la Meuse intermédiaire et aval (autour de 50 %).

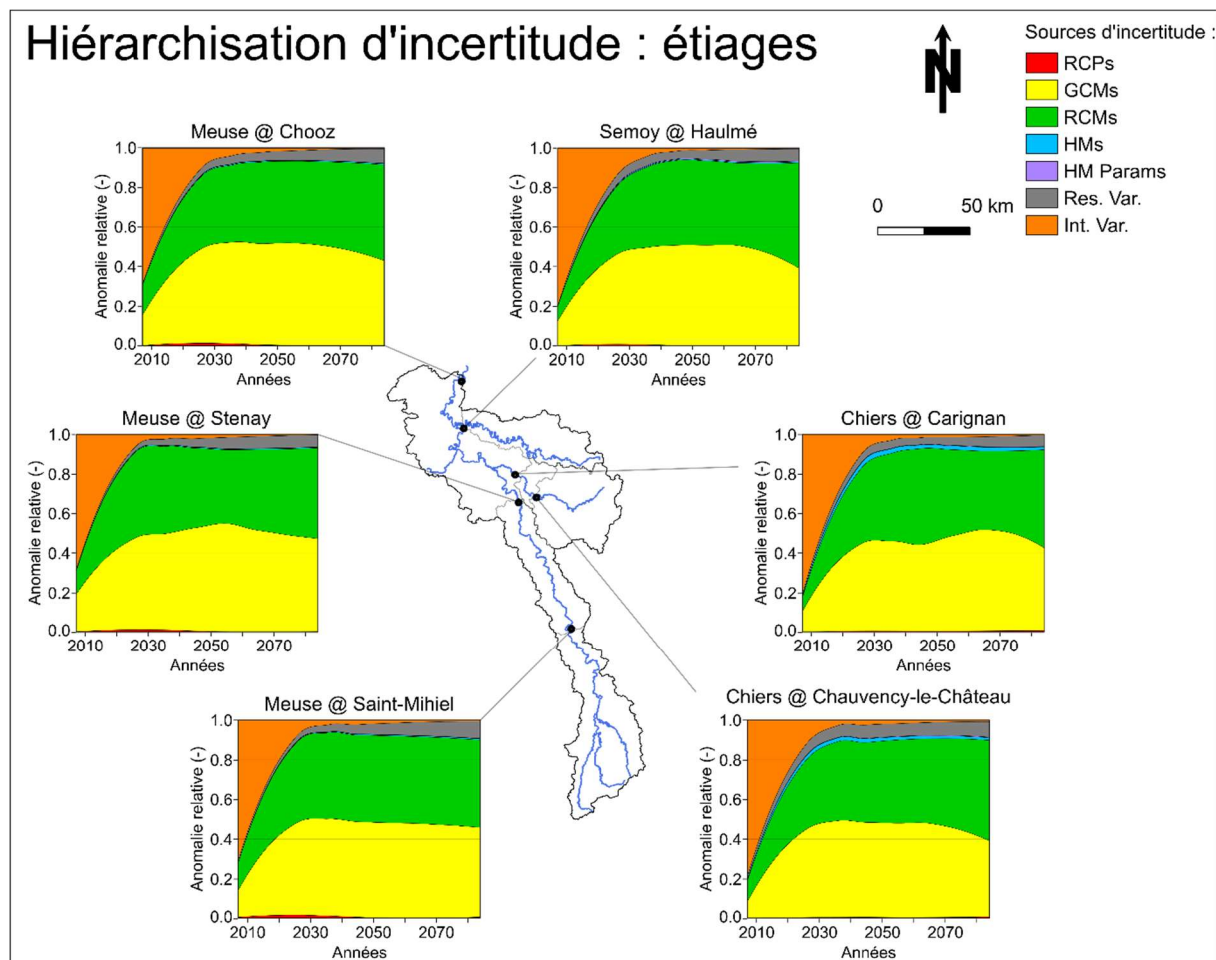


Figure 23 : Hiérarchisation des sources d'incertitude du débit d'étiage (VCN3) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

La Figure 24 présente l'évolution des anomalies de VCN3 (indicateur sur les étiages) entre 2006 et 2085 pour six stations du bassin de la Meuse française. Les ensembles d'anomalie sont contraints par sept sources d'incertitude identifiées et analysées dans ce projet. On observe une très légère tendance à la diminution des étiages, plus marquée à la fin du siècle, avec des anomalies moyennes comprises entre 0 et -10 % (cette anomalie moyenne est représentée par la partie centrale des enveloppes, qui sont centrées sur la moyenne de l'anomalie). L'incertitude liée à ces projections est croissante avec le temps. Elle est plus restreinte pour l'affluent de la Chiers (anomalie comprise entre -50 et +50 %) et plus marquée pour la Semoy (anomalie comprise entre -100 et +170 %). A l'exutoire, pour la fin du siècle, l'anomalie des étiages varie entre -90 et +80 %, avec une anomalie moyenne de -10 %.

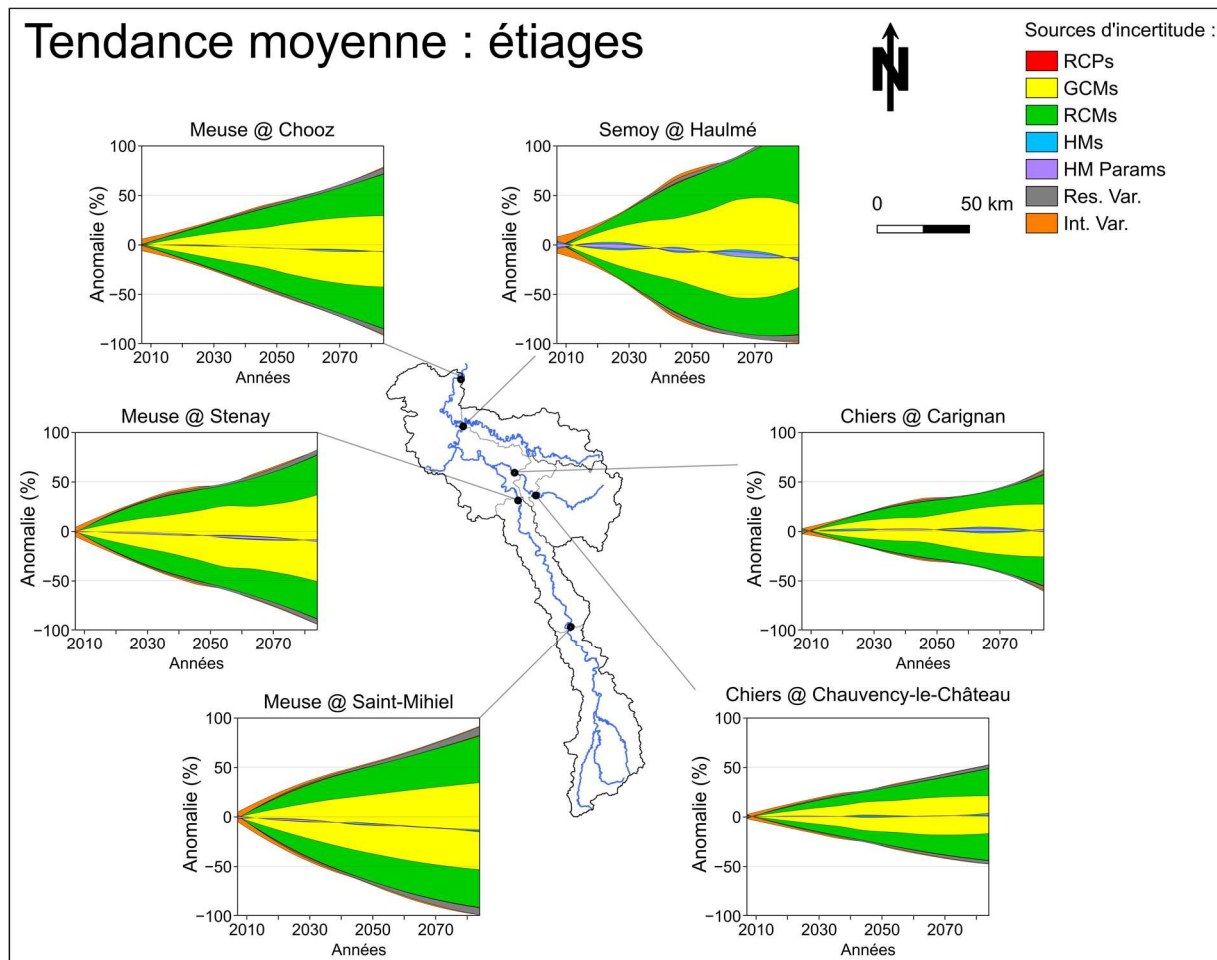


Figure 24 : Anomalies futures et sources d'incertitude du débit d'étiage (VCN3) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

VII.3.2. Projections des débits moyens

La Figure 25 présente la hiérarchisation des sources d'incertitudes liées aux projections du débit moyen. Encore une fois, en début de siècle, la variabilité interne est prépondérante sur tout le bassin, expliquant autour de 80 % de l'incertitude totale. Dès l'horizon 2030, les GCMs et RCMs induisent la plus grande part d'incertitude : les GCMs prédominent, expliquant 40 % de l'incertitude totale sur la Meuse et la Chiers amont et jusqu'à près de 60 % sur la Chiers aval et la Semoy. Les RCMs représentent une part plus faible de l'incertitude totale : entre 20 et 30 % sur la Meuse amont, la Chiers et la Semoy et jusqu'à 40 % sur la Meuse intermédiaire et aval. La prédominance de ces deux sources d'incertitude perdure jusqu'à la fin du siècle, avec, à l'horizon 2070, une part plus marquée des GCMs sur l'ensemble du bassin (autour de 40 %), sauf pour la Semoy où la part des RCMs sur l'incertitude totale est prépondérante (> 40 %). Cette source d'incertitude explique entre 30 et 40 % de l'incertitude totale sur tout le bassin. A cet horizon, on observe aussi une part non négligeable de l'incertitude issue des RCPs (en rouge, autour de 10 %), ainsi que de la variance résiduelle, c'est-à-dire non expliquée par la méthode QUALYPSO (en gris, entre 10 et 20 % de l'incertitude totale). La part d'incertitude liée aux RCPs peut être expliquée par la plus forte augmentation des précipitations avec le RCP 8.5 (Figure 9).

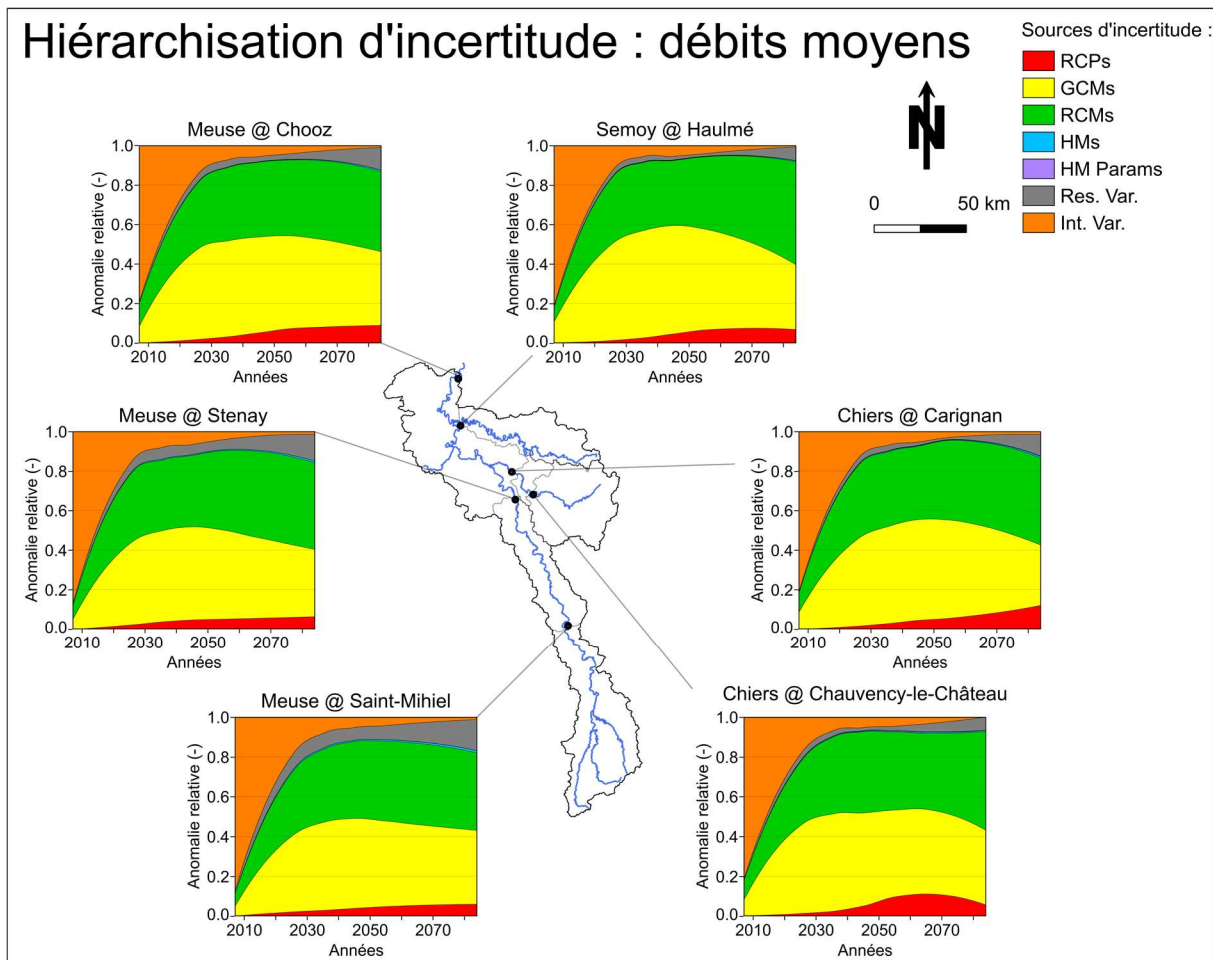


Figure 25 : Hiérarchisation des sources d'incertitude du débit moyen sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

La Figure 26 présente l'évolution des anomalies de débit moyen entre 2006 et 2085 pour les six stations du bassin de la Meuse. On observe pour cet indicateur une légère tendance à la hausse, plus marquée à la fin du siècle, avec des anomalies moyennes comprises entre +10 et +25 %. L'incertitude liée à ces projections est croissante avec le temps, et elle est du même ordre de grandeur sur tout le bassin (anomalie comprise entre -40 et +90 %). A l'exutoire, pour la fin du siècle, l'anomalie des débits moyens varie entre -30 et +60 %, avec une anomalie moyenne de +20 %.

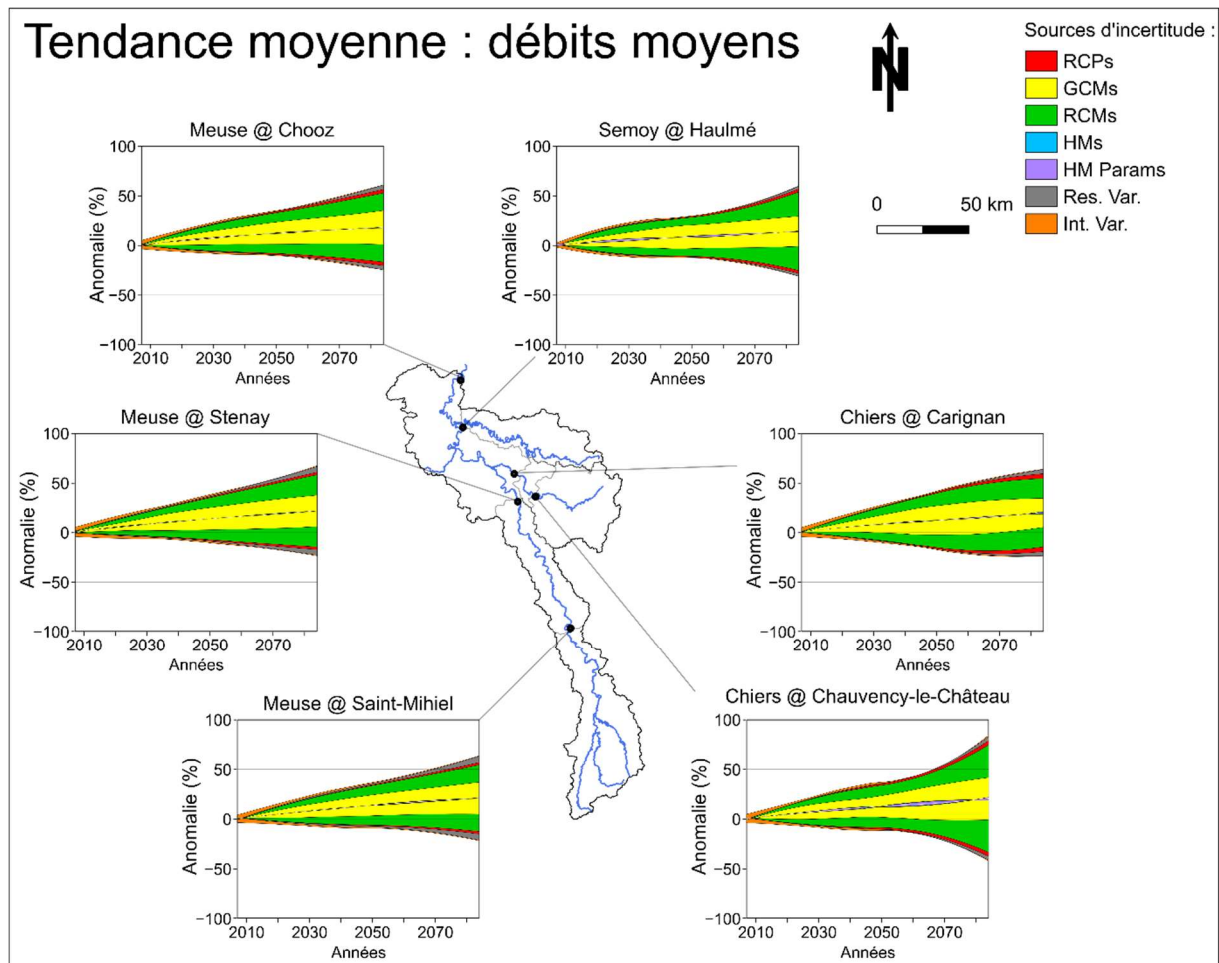


Figure 26 : Anomalies futures et sources d'incertitude du débit moyen sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

VII.3.3. Projections des crues

La Figure 27 présente la hiérarchisation des sources d'incertitudes liées aux projections du Q95. Encore une fois, en début de siècle, la variabilité interne est prépondérante sur tout le bassin, expliquant entre 70 % et 90 % de l'incertitude totale. Dès l'horizon 2030, les GCMs et RCMs expliquent encore une fois la plus grande part de l'incertitude totale : les GCMs prédominent sur tout le bassin (entre 50 et 60 % de l'incertitude totale contre 20 à 40 % pour les RCMs), sauf pour la Meuse intermédiaire (30 % pour les GCMs contre 40 % pour les RCMs). On observe aussi une part non négligeable de l'incertitude totale expliquée par la variabilité interne du climat (entre 5 et 20 %). La prédominance des GCMs et RCMs est aussi observée à l'horizon 2070, à parts équivalentes (entre 30 et 50 % pour ces deux sources). A cet horizon, on observe aussi une part non négligeable de l'incertitude issue des RCPs (autour de 10 %), ainsi que de la variance résiduelle (entre 5 et 20 % de l'incertitude totale). La part d'incertitude liée aux RCPs peut être expliquée par la plus forte augmentation des précipitations avec le RCP 8.5 (Figure 9).

Hiérarchisation d'incertitude : hauts débits

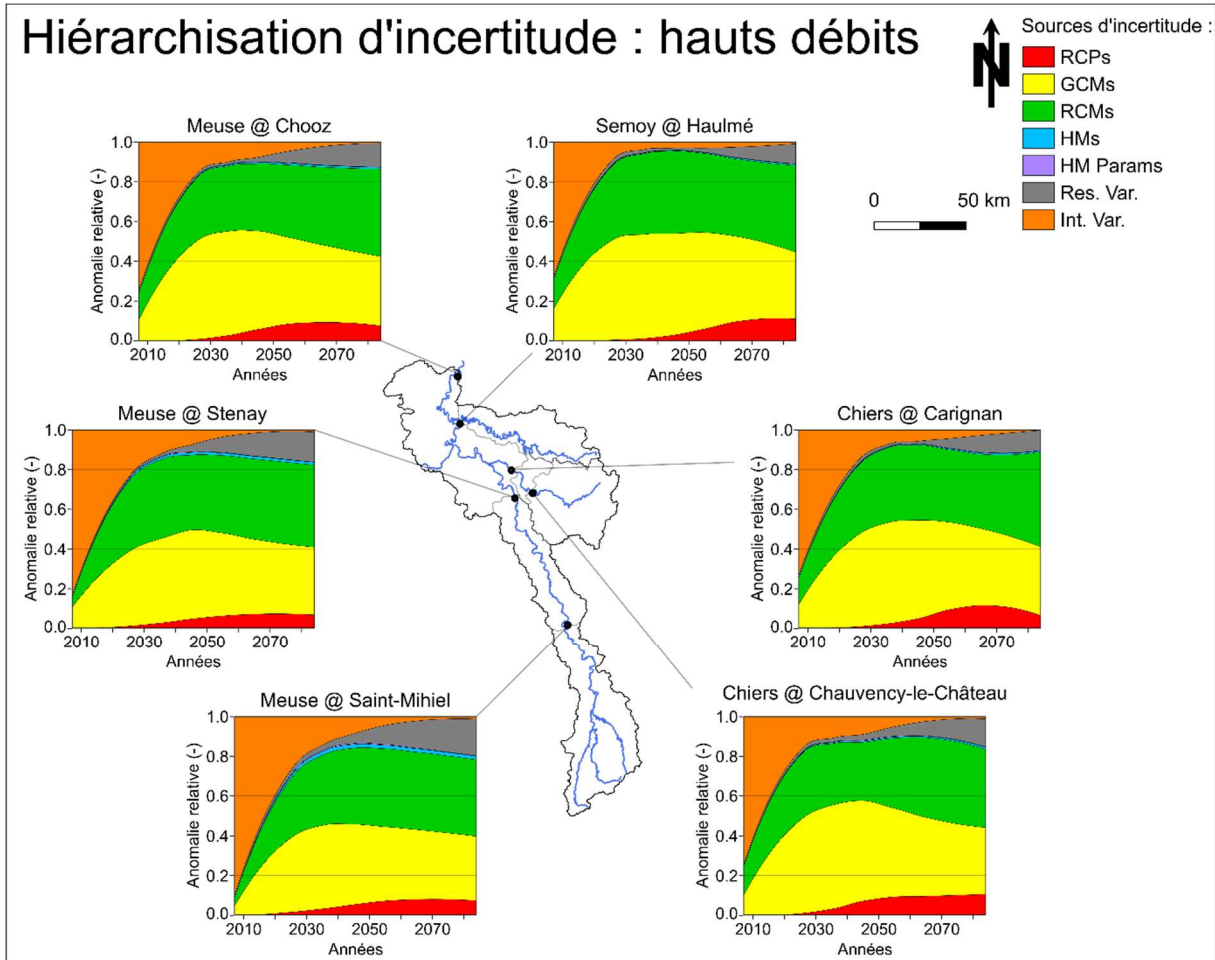


Figure 27 : Hiérarchisation des sources d'incertitude des hauts débits (Q95) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

La Figure 28 présente l'évolution des anomalies de Q95, caractérisant les débits de crue, entre 2006 et 2085 pour les six stations du bassin de la Meuse. On observe pour cet indicateur une tendance à la hausse, plus marquée à la fin du siècle, avec des anomalies moyennes autour de +30 %. L'incertitude liée à ces projections est aussi croissante avec le temps et elle est du même ordre de grandeur sur tout le bassin (anomalie comprise entre -50 et +100 %). A l'exutoire, pour la fin du siècle, l'anomalie des hauts débits varie entre -45 et +95 %, avec une anomalie moyenne de +30 %.

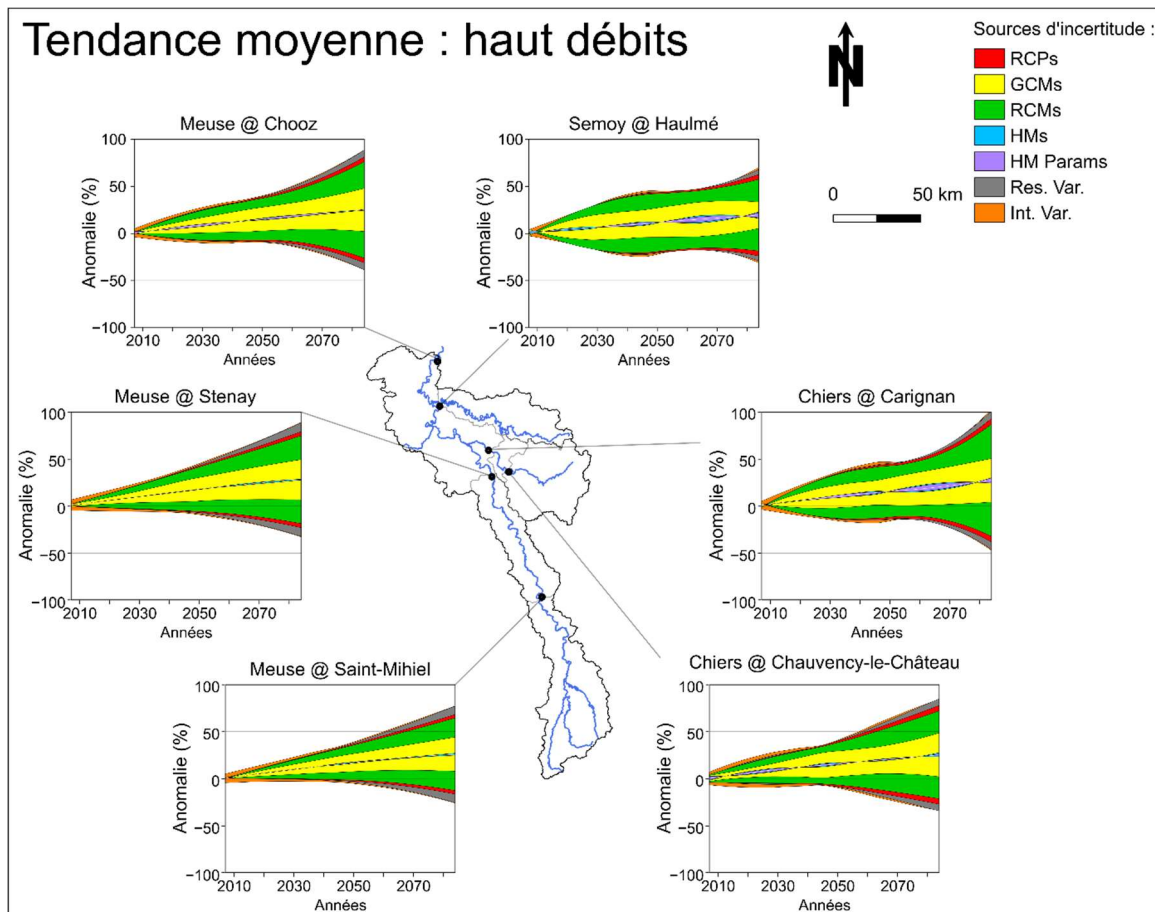


Figure 28 : Anomalies futures et sources d'incertitude des hauts débits (Q95) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

À retenir :

Nous avons présenté les tendances futures et la décomposition d'incertitude des débits d'étiage, moyen et de crue entre les horizons 2006 et 2085 pour six stations du bassin de la Meuse française.

On observe, si l'on s'intéresse aux scénarios moyens (i.e. moyenne de l'ensemble) une très faible tendance à la baisse des étiages d'ici la fin du siècle, une légère augmentation des débits moyens et une hausse des débits de crue. Dans les trois cas, l'incertitude est telle qu'une évolution nulle des indicateurs considérés est incluse dans l'incertitude des projections tout comme une évolution extrême.

Au début du siècle, l'incertitude est portée par la variabilité interne. Les modèles climatiques (GCMs et RCMs) expliquent la plus grande partie de l'incertitude totale, particulièrement pour les débits d'étiage à partir de l'horizon 2050. Cependant, les scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCPs) présentent une part de l'incertitude négligeable pour les étiages, et modérée pour les crues et les débits moyens pour la fin du 21^e siècle en raison de l'évolution différente des précipitations hivernales selon le RCP considéré. Enfin, la variance résiduelle porte aussi une part non négligeable de l'incertitude totale à partir de l'horizon 2050 pour les débits moyens et de crue.

VII.4. Quantification de la probabilité des différentes tendances

La Figure 29 présente l'évolution du pourcentage de membres de l'ensemble de projections présentant différents niveaux d'anomalie, pour les trois indicateurs hydrologiques choisis. Cette figure répond aux questions suivantes : « **Quelle est la probabilité qu'un indicateur change de X % sous contrainte climatique ?** » et : « **A quel horizon temporel cette tendance pourrait émerger ?** ». Le pourcentage de membres de l'ensemble s'accordant sur une tendance future peut alors être compris comme la probabilité que cette tendance soit observée dans le futur. Ainsi, les tendances qui rassemblent plus de 80 % des membres peuvent être considérées comme très probables, celles rassemblant entre 60 et 80 % comme probables, entre 40 et 60 % on peut considérer une tendance comme moyennement probable, peu probable pour 20 à 40 % de l'ensemble et très peu probable (mais pas impossible) pour 0 à 20 % de l'ensemble.

Par exemple pour les étiages à la station de la Meuse à Chooz (Figure 29a), à l'horizon 2080, un peu plus de 40 % des membres s'accordent sur une diminution au moins de 10 %, et seuls 20 % montrent une diminution au moins de 20 %. De même, 20 % de l'ensemble s'accordent sur une augmentation de 10 %. On peut donc conclure qu'à l'horizon 2085, il est moyennement probable que les étiages de la Meuse à Chooz diminuent d'au moins 10 % et qu'il est très peu probable qu'ils diminuent de plus de 20 % ou augmentent de plus de 10 %. De même, il est très probable que le débit moyen de la Meuse à Chooz augmente de 10 % dès l'horizon 2050, il est moyennement probable qu'il augmente de 20 %, et il est très peu probable qu'il augmente de plus de 30 % (Figure 29b). Enfin, il est probable que les hauts débits augmentent de 10 % dès l'horizon 2040, de 20 % dès l'horizon 2050, il est moyennement probable qu'ils augmentent de 30 % dès l'horizon 2075 et de 40 % à l'horizon 2085, et très peu probable qu'ils augmentent de plus de 50 % (Figure 29c). Cette figure est fournie sur les fiches de chacune des stations.

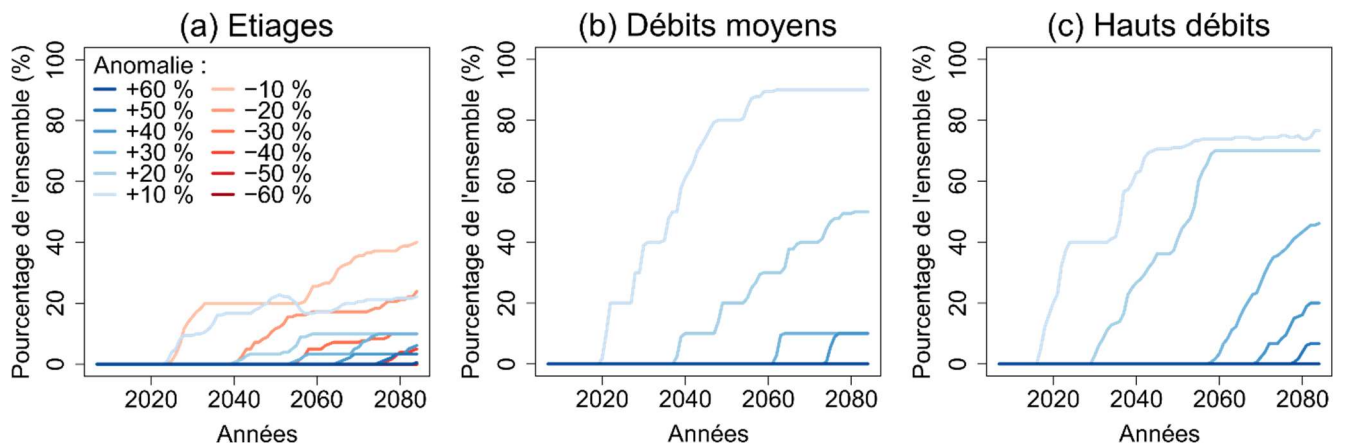


Figure 29 : Evolution de la proportion de membres de l'ensemble de projections présentant différents niveaux d'anomalie (de -60 % à +60 %) pour les horizons 2006 à 2085 pour les indicateurs de : (a) débits d'étiage (VCN3), (b) débits moyens et (c) hauts débits (Q95) pour la Meuse à Chooz.

À retenir :

Dans cette section, nous avons montré que, pour la Meuse à Chooz, et sous contrainte des projections climatiques utilisées dans ce projet, il serait moyennement probable que les débits d'étiages diminuent au moins de 10 % à l'horizon 2080 mais très peu probable qu'ils diminuent de 20 % et peu probable qu'ils augmentent de 10 %. Il serait très probable que les débits moyens augmentent au moins de 10 % dès l'horizon 2050 et il serait probable que les hauts débits augmentent au moins de 10 % dès l'horizon 2040 et de 20 % dès 2050.

VII.5. Discussion des résultats

Plusieurs points de ce travail méritent discussion. Tout d'abord, comme mentionné dans la Section V.4, les projections climatiques utilisées dans ce projet tendent à sous-échantillonner toute la variabilité des précipitations. En effet, en raison de la disponibilité de modèles climatiques lorsque cette étape du projet a été menée et malgré un objectif affirmé de représentativité de l'évolution du climat lors de cette sélection, l'ensemble CHIMERE 21 est composé de modèles plutôt pluvieux en hiver et en automne, même si cet ensemble de modèle évalue le signe de l'évolution des précipitations de manière cohérente avec un ensemble plus représentatif. En été, la variabilité des évolutions des précipitations est par contre mieux représentée dans CHIMERE 21.

Ainsi, en moyenne annuelle, les modèles utilisés dans CHIMERE 21 sont globalement plus pluvieux et un peu moins chauds que l'ensemble DRIAS-2020, jeu de données mis à disposition en 2021 par Météo-France. Ces deux jeux de données sont issus des projections climatiques les plus récentes, et comparativement aux données du projet plus ancien Explore 2070 (voir la fiche de Chooz produite dans le cadre du projet Explore 2070 sur la Figure 30), les nouvelles projections (utilisées dans CHIMERE 21 ou dans DRIAS-2020) sont plus chaudes et significativement plus humides sur le bassin de la Meuse.

Il en résulte que les projections hydrologiques obtenues dans le projet CHIMERE 21 ne tendent pas vers un futur où les sécheresses hydrologiques seront aggravées de manière importante, contrairement à Explore 2070 (Figure 30). Cependant, l'incertitude des projections hydrologiques produites dans CHIMERE 21 étant forte concernant les étiages, et l'augmentation des précipitations étant moindre (mais tout de même projetée) dans DRIAS-2020, une aggravation des sécheresses n'est pas à exclure.

De plus, nous avons pu montrer, pour la première fois sur le bassin de la Meuse, les parts relatives des incertitudes de la chaîne de modélisation des débits futurs. Si l'étape de descente d'échelle n'a pas pu être considérée faute de deux méthodes valides à notre disposition, nous pouvons tout de même observer des résultats instructifs. L'incertitude liée à la modélisation hydrologique semble assez faible. Cela peut être expliqué par le très bon comportement des modèles hydrologiques. L'incertitude liée aux GCMs et aux RCMs semble être l'incertitude principale excepté dans le futur proche. L'incertitude liée aux RCPs est en général faible, sauf pour le futur lointain et les débits moyens et de crue, pour lesquels on observe une augmentation modérée de cette incertitude. Toutefois, cela ne signifie probablement pas qu'aucune stratégie d'atténuation ne serait efficace en ce qui concerne l'évolution des étiages, mais simplement que leur impact potentiel est pour le moment difficile à estimer en raison de la forte incertitude sur les modèles climatiques.

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

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

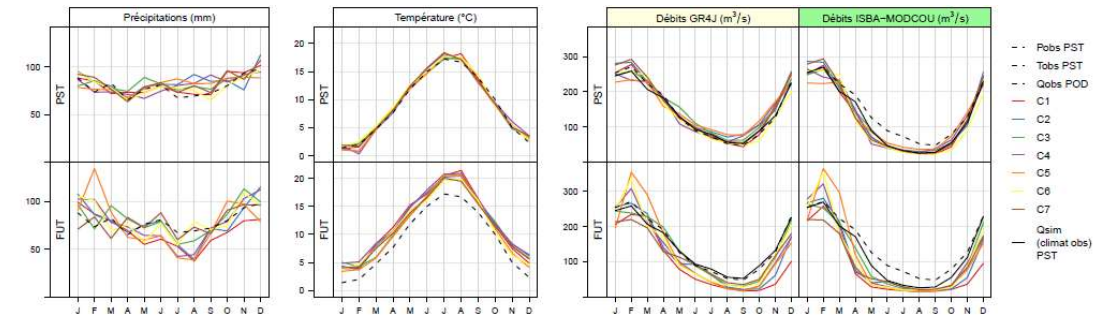
Nom **La Meuse à Chooz [Ile Graviat]**
 Identifiant Explore2070 **362**
 Code Banque Hydro **B7200010**
 Surface du bassin versant **10184 km²**
 Période d'observation des débits **POD : 1962-1991**
 Période de simulation temps présent **PST : 1961-1990**
 Période de simulation temps futur **FUT : 2046-2065**
 Modèles hydrologiques utilisés **GR4J ISBA-MODCOU**

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



CLIMAT													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Precipitations obs PST (mm)	88	74	83	65	77	81	68	69	72	80	94	98	950
Δ min (%)	-23	-16	-20	-7	-24	-24	-53	-57	-21	-29	-15	-20	-15
Δ med (%)	+14	+3	+6	+3	-18	-4	-30	-46	-15	-6	+12	-0	-5
Δ max (%)	+21	+76	+24	+32	-3	+6	-18	+5	+9	+14	+25	+19	+2
Température obs PST (°C)	1.4	2.0	4.8	7.7	11.9	15.0	17.2	16.7	13.9	10.0	5.0	2.3	9.0
Δ min (°C)	+2.1	+2.0	+0.8	+1.3	+1.3	+0.9	+1.6	+2.2	+1.6	+1.4	+1.0	+1.0	+1.8
Δ med (°C)	+2.6	+2.4	+2.7	+2.2	+1.7	+2.2	+2.7	+3.1	+2.5	+3.4	+2.1	+2.1	+2.4
Δ max (°C)	+3.4	+4.8	+3.7	+3.1	+2.8	+2.5	+3.3	+3.5	+3.0	+3.0	+3.5	+2.9	+2.9
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)	13	18	32	53	75	87	100	83	54	31	17	14	577
Δ min (%)	+9	+6	-0	+9	+11	+1	+12	+12	+20	+26	+15	+18	+18
Δ med (%)	+19	+17	+37	+14	+22	+13	+27	+30	+41	+54	+43	+39	+25
Δ max (%)	+48	+71	+49	+32	+31	+18	+33	+38	+55	+62	+48	+64	+34

DÉBITS													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Qobs POD (m ³ /s)	254	271	223	191	126	89.2	72.3	52.2	47.8	79.3	127	230	147
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	241	250	259	270	209	204	183	173	132	91	93.2	47	80.2
Δ min (%)	-23	-21	-25	-26	-19	-27	-27	-53	-38	-60	-49	-53	-54
Δ med (%)	-9	-3	-6	-1	-2	-17	-43	-25	-43	-24	-29	-31	-28
Δ max (%)	+1	+6	+51	+63	+28	+31	+14	-4	-8	-18	-4	+10	-14
Qobs POD (m ³ /s)	132	156	141	104	71.2	52.7	37.7	30.3	28.2	30.7	57.8	115	101
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	129	97.6	145	121	133	115	103	66.3	68	32.4	51.1	25.2	38.4
Δ min (%)	-66	-59	-42	-31	-28	-45	-31	-47	-38	-26	-45	-37	-50
Δ med (%)	-20	-10	+6	+31	-8	-9	-15	-29	-15	-28	-21	-24	-37
Δ max (%)	+8	+31	+36	+86	+33	+45	+17	+20	-2	-13	-18	-15	-19



PERFORMANCE DES MODELES HYDROLOGIQUES sur la période POD									
NSEQ	NSElnQ	NSEQ	R-QA	R-VCN30-2	R-QMNAS	R-QXA10			
0.91	0.08	0.92	-1.55	0.77	-33.71	0.99			
				0.86	0.92	0.49			
				0.82	0.58	1.18			
						0.89			

ÉTIAGES				
	VCN10	VCN30	QMNA	
Qobs POD (m ³ /s)	31.1	34.5	37	
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	28.2	14.3	31.8	17
Δ min (%)	-61	-13	-64	-28
Δ med (%)	-55	-9	-55	-19
Δ max (%)	-28	-3	-31	-8
Qobs POD (m ³ /s)	22.1	24.8	26.1	
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	18	12.6	19.9	13.8
Δ min (%)	-60	-13	-62	-19
Δ med (%)	-53	-9	-55	-11
Δ max (%)	-34	-3	-36	-8
Qobs POD (m ³ /s)	18.5	20.8	21.8	
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	14.2	11.8	15.6	12.4
Δ min (%)	-59	-10	-61	-15
Δ med (%)	-50	-0	-53	-6
Δ max (%)	-37	+8	-38	-1

FORTES PRECIPITATIONS			
	PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)	27	36	39
Δ min (%)	-1	-0	-11
Δ med (%)	+3	-0	-0
Δ max (%)	+14	+11	+10

CRUES					
	QJXA2	QJXA10	QJXA20		
Qobs POD (m ³ /s)	628	960	1087		
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	657	538	1129	854	1310
Δ min (%)	-17	-17	-15	-10	-15
Δ med (%)	-3	+1	+3	+7	+7
Δ max (%)	+11	+15	+34	+31	+39

OCCURRENCE DES ÉTIAGES		
Qsim (climat obs) POD	sept.	sept.
min (jours)	+5	-9
med (jours)	+30	+3
max (jours)	+46	+25

DÉBITS CLASSÉS			
	Q95	Q10	
Qobs POD (m ³ /s)	25.9	340	
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	21.7	13.6	306
Δ min (%)	-60	-10	-22
Δ med (%)	-54	-8	-7
Δ max (%)	-30	-4	+2

OCCURRENCE DES CRUES			
Qsim (climat obs) POD	janv.	janv.	
min (jours)	-8	-4	
med (jours)	+17	+12	
max (jours)	+28	+25	

Figure 30 : Fiche issue du projet Explore 2070 pour la Meuse à Chooz. Notez que les horizons temporels future et de référence sont différents ainsi que les modèles climatiques utilisés, et que les modèles hydrologiques ont évolué entre Explore 2070 et CHIMERE 21.

Enfin, nous avons analysé le pourcentage de projections hydrologiques passant au-dessus ou sous certains seuils d'évolution des débits d'étiage, de crue ou du module par rapport à la normale actuelle (anomalie par rapport à la période de référence). Cette manière de présenter les résultats devrait permettre aux gestionnaires d'anticiper et de quantifier un risque, particulièrement concernant les débits de crue, sur les échéances futures. En anticipant l'évolution possible de ces indicateurs en contexte de changement climatique, cela permettrait à terme de définir des seuils correspondant à des actions à mener pour la gestion des risques hydrologiques.

Un résumé de ces différents résultats est présenté dans des fiches synthétiques fournies pour chaque station hydrologique. On peut les visualiser dans l'Annexe F.

VIII. Prédiction de seuils de vigilance sécheresse

Les gestionnaires de la DREAL Grand-Est (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) ont besoin de nouveaux outils statistiques pour mieux anticiper les sécheresses et souhaitent utiliser les données climatiques spatiales existantes pour compenser des données hydrologiques parfois manquantes sur certains bassins. Contrairement aux sections précédentes où l'on s'intéressait à des projections à très long terme, on se place ici dans un cadre de gestion temps réel avec une anticipation jusqu'à quelques mois.

Météo-France fournit aux DREAL des cartes de différents indicateurs aux pas de temps décadaire, particulièrement des cartes de Standardized Soil Wetness Index (SSWI), un indicateur couramment utilisé dans la littérature pour quantifier l'humidité du sol. Les hydrologues de la DREAL Grand-Est aimeraient utiliser ces cartes fournies par Météo-France pour caractériser les sécheresses hydrologiques et mieux appréhender et s'adapter au risque sécheresse. En se basant sur ces données spatialisées, on a cherché à définir un modèle de prévision efficace pour différents niveaux de vigilance sécheresse et à en évaluer la robustesse temporelle et spatiale à différentes échéances de prévision. Pour cela, une régression logistique (glm) a été utilisée pour construire des relations statistiques simples entre des indices hydro-climatiques spatialisés observés et la probabilité d'atteindre un seuil de vigilance sécheresse à différentes échéances de prévision.

Un rapport complet sur le développement de ce modèle pour les seuils de vigilance jaune, orange et rouge est joint à ce rapport intermédiaire (voir Collet et al., 2020). Nous ne présentons ici qu'un résumé des principaux points de ce rapport. Ce travail est indépendant du travail sur l'impact du changement climatique présenté dans le reste de ce rapport.

Cette étude s'est tout d'abord concentrée sur le niveau de vigilance jaune pour une échéance d'un pas de temps en cherchant le modèle optimum, i.e. qui représente la chronique binaire observée de vigilance jaune. Ce modèle a été défini en fonction du jeu de données d'entrée, de la période de calage et du seuil de probabilité appliqué aux sorties du modèle de glm pour obtenir une chronique simulée binaire. L'utilisation des chroniques de vigilance jaune observée au pas de temps précédent la prévision, en plus des données spatialisées de SSWI, permet une nette amélioration des performances du modèle. De même, le calage de ce modèle sur une période de six mois d'été, qui concentre les événements de vigilance jaune, permet une meilleure performance du modèle glm. Le seuil de probabilité optimum est défini à 0,5 (50 %) pour ce niveau de vigilance. Le modèle optimum obtenu montre des performances satisfaisantes en termes de taux d'événements et de fausses alertes, qui sont cependant équivalentes au modèle naïf de persistance, particulièrement aux échéances courtes.

Similairement, les modèles optimaux pour les niveaux de vigilance orange et rouge impliquent l'utilisation des observations de vigilance (orange et rouge respectivement) au moment de la prévision, ainsi que le calage de ces modèles sur une période restreinte en été (six et trois mois respectivement). Les seuils de probabilité qui permettent d'atteindre les meilleures performances sont de 0,5 et 0,3 respectivement. Bien que les performances de ces deux modèles soient satisfaisantes pour les différents indicateurs étudiés, elles sont aussi équivalentes au modèle de persistance aux échéances courtes.

Les trois modèles optimaux montrent de bonnes performances à des échéances allant jusqu'à un mois (trois décades). L'évaluation de la robustesse spatiale et temporelle de ces modèles montre de

bonnes performances sur des échantillons contrastés dans le temps et l'espace, particulièrement pour les niveaux de vigilance jaune et orange.

À retenir :

Bien que nous ayons pu mettre en place des modèles statistiques simples, performants et robustes pour la prévision de différents niveaux de vigilance sécheresse, ces modèles montrent des performances similaires au modèle naïf de persistance, particulièrement à de courtes échéances. Pour les échéances plus lointaines où ces modèles optimums sont meilleurs que le modèle naïf, les indicateurs de performances ne sont globalement pas satisfaisants. Nous montrons ainsi que les performances d'un tel modèle restent faibles pour les différents seuils de vigilance puisqu'il n'apporte aucune information par rapport au modèle de persistance. Ces résultats tendent à indiquer que le pouvoir prédictif de ce type de modèle est vraisemblablement insuffisant pour des objectifs opérationnels et qu'il vaudrait mieux s'orienter vers d'autres types d'approches, par exemple basées sur de la modélisation hydrologique. Il pourrait donc être intéressant de considérer la plate-forme PREMHYCE par exemple, qui utilise des modèles hydrologiques afin de prévoir les débits d'étiage.

IX. Conclusions et perspectives

Le projet CHIMERE 21, co-financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, a rassemblé des scientifiques de divers instituts autour de l'estimation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Meuse française.

La chaîne de modélisation mise en place comporte les éléments suivants : deux scénarios futurs (RCPs 4.5 et 8.5) décrivant des évolutions des émissions des gaz à effet de serre différentes, cinq couple de modèles climatiques globaux et régionaux (GCM-RCM) permettant de produire des projections climatiques jusqu'à 2100, une méthode de descente d'échelle et de débiaisage permettant d'affiner et de débiaiser ces projections, quatre modèles hydrologiques permettant de transformer les projections climatiques en projections hydrologiques, trois périodes de calage et deux fonctions-objectif. Excepté la méthode de descente d'échelle et de débiaisage, chacune des étapes de cette chaîne de modélisation a été représentée par plusieurs configurations différentes, permettant de considérer les incertitudes inhérentes à ces modèles.

Grâce à des travaux de naturalisation des débits observés, nous avons pu disposer de chroniques de débits naturalisés (pour l'exutoire à Chooz) ou expertisés (débits jugés lacunaires si trop influencés) afin de caler les modèles hydrologiques en conditions naturelles. Ce travail a été entrepris sur seize stations hydrométriques d'intérêt sur le bassin de la Meuse.

De plus, deux méthodes de descente d'échelle des projections climatiques ont été mises en place. L'une d'entre elles, ADAMONT, a été retenue pour les simulations réalisées dans le cadre du projet. Son extension à l'échelle de la France a pu être réalisée dans le cadre de CHIMERE 21 et a permis d'alimenter le portail DRIAS de Météo-France au début de l'année 2021 avec des nouvelles projections climatiques (jeu de données DRIAS-2020), qui n'étaient cependant pas disponibles encore dans le cadre de CHIMERE 21. Cette méthode de descente d'échelle a été appliquée à cinq couples de GCM-RCM sur les deux RCPs, de 1976 à 2100.

L'analyse des projections climatiques indique sans surprise un futur plus chaud, et ce d'autant plus qu'on se situe dans un futur lointain et dans un futur comportant plus d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). En ce qui concerne les précipitations, le signal est moins homogène. On se dirige vers un futur plus humide à l'échelle annuelle. La déclinaison à l'échelle saisonnière est différente : on peut constater une tendance à des hivers plus humides mais la tendance sur les étés est plus incertaine, certaines projections indiquant des étés plus secs et d'autres indiquant des étés plus humides. Comparé à Explore 2070, ces projections indiquent un futur plus chaud, mais aussi plus humide. Même si les projections plus récentes DRIAS-2020 n'ont pas pu être utilisées dans ce projet, une comparaison réalisée dans le cadre de CHIMERE 21 a montré que les projections CHIMERE 21 et DRIAS-2020 étaient cohérentes, et indiquaient toutes deux un futur plus chaud et plus humide que celui d'Explore 2070. La principale différence entre CHIMERE 21 et DRIAS-2020 concerne une augmentation des précipitations moindre dans le jeu de données DRIAS-2020.

Les quatre modèles hydrologiques, GRSD, SIM2, MORDOR et PRESAGES représentent des modélisations différentes du bassin de la Meuse. Ils ont tous les quatre montré leur capacité à représenter de manière satisfaisante les débits observés sur le bassin de la Meuse, ainsi que leur bonne transférabilité temporelle (robustesse). Ainsi, ils ont pu être utilisés avec un degré de confiance élevé pour simuler les débits futurs.

L'analyse des débits futurs indique une probable augmentation des débits lors de la période hivernale ainsi qu'une évolution peu marquée des débits d'étiage l'été, même si certaines projections indiquent une baisse possible des débits durant cette période. On observe cependant des différences spatiales sur le bassin de la Meuse, l'augmentation des débits de crue étant notable notamment en aval du bassin et la diminution des débits d'étiage étant plus marquée notamment en amont.

Ces résultats peuvent paraître surprenants si on les compare à ceux de l'étude Explore 2070, qui est encore largement utilisée aujourd'hui. En effet, Explore 2070 avait montré sur la Meuse une forte pression sur les débits d'étiage et sur les débits moyens, qui étaient en baisse, ainsi qu'une évolution incertaine des débits de crue. Cette différence repose en majeure partie sur les nouvelles projections climatiques utilisées dans ce projet, qui indiquent désormais plutôt une augmentation des précipitations. Ainsi, dans CHIMERE 21, nous avons pu bénéficier de projections climatiques plus récentes, reposant sur des modèles améliorés. Si la représentativité des cinq couples GCM/RCM ne semble pas parfaite, l'évolution du climat et des débits associés est cohérente avec l'ensemble plus large de projections appelé DRIAS 2020.

Une analyse des sources d'incertitude poussée a été entreprise grâce à une méthode de type ANOVA. Cette analyse indique que la part relative d'incertitude reste principalement portée par la variabilité interne au début du siècle, ce qui est attendu. En revanche, elle devient portée par les modèles climatiques (GCM et RCM) à la fin du 21^e siècle, les RCPs présentant eux aussi une certaine part de l'incertitude. En revanche, les modèles hydrologiques semblent ne pas être primordiaux à cet égard, possiblement en raison de leurs très bonnes performances.

Enfin, des modèles statistiques simples ont été mis en place pour la prévision de différents niveaux de vigilance sécheresse, et montrent des performances similaires au modèle naïf de persistance, particulièrement à de courtes échéances. Pour les échéances plus lointaines les indicateurs de performances ne sont globalement pas satisfaisants. Ces résultats tendent à indiquer que le pouvoir prédictif de ce type de modèle est vraisemblablement insuffisant pour des objectifs opérationnels et qu'il vaudrait mieux s'orienter vers d'autres types d'approches, par exemple basées sur de la modélisation hydrologique.

Les évolutions de débits entrevues dans ce projet soulèvent des enjeux forts. En effet, l'augmentation des débits de crue notamment sur le secteur de Sedan, où l'on trouve un Territoire à Risques d'Inondations, pourrait mener à revoir les stratégies locales de gestion des risques d'inondation, afin de limiter leurs impacts sur l'activité économique et la santé humaine. De plus, même si les signaux concernant l'intensité des étiages ne semblent pas forcément forts, une évolution à la baisse des débits d'étiage pourrait avoir un impact fort sur le territoire de la Meuse, voire en aval.

Des fiches synthétiques ont été produites afin d'informer l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et les acteurs locaux des résultats du projet CHIMERE 21. Une prise en main de ces résultats semble en effet primordiale pour une appropriation et une utilisation des conclusions de ces travaux.

X. Références

- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., and Seibert, J., 2014. Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments, *Water Resour. Res.*, 50, 7541–7562, [doi:10.1002/2014WR015549](https://doi.org/10.1002/2014WR015549).
- AERM, DIREN Lorraine, 1999. Débits mensuels d'étiage et modules. 4-Bassin de la Meuse. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 165 p.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration -- Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
- Artinyan, E., Habets, F., Noilhan, J., Ledoux, E., Dimitrov, D., Martin, E., Le Moigne, P., 2008. Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12 (1), pp. 21-37. [doi: 10.5194/hess-12-21-2008](https://doi.org/10.5194/hess-12-21-2008).
- Ben Daoud, A., 2010. Améliorations et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie. Application à la prévision hydrologique sur les grands bassins fluviaux de la Saône et de la Seine. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble, 341 pp. <https://hal.inrae.fr/tel-02593227>.
- Ben Daoud, A., Sauquet, E., Bontron, G., Obled, C. & Lang, M., 2016. Daily quantitative precipitation forecasts based on the analogue method: Improvements and application to a French large river basin. *Atmospheric Research*, 169, Part A, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.015>.
- Booij, M. J., 2004. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions, *J. Hydrol.*, 303- 6, 176-198.
- Bourgin, F., Andréassian V., Perrin C., and Oudin L., 2015, Transferring model uncertainty estimates from gauged to ungauged catchments, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 2535-2546, [doi:10.5194/hess-19-2535-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-2535-2015).
- Brigode, P., Génot, B., Lobligeois, F., Delaigue, O., 2020, "Summary sheets of watershed-scale hydroclimatic observed data for France", <https://doi.org/10.15454/UV01P1>, Portail Data INRAE, V1
- Caillouet, L., 2016. Reconstruction hydrométéorologique des étiages historiques en France entre 1871 et 2012. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes, 586 pp. <https://hal.inrae.fr/tel-02605168>.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P.; Sauquet, E. & Graff, B., 2016. Probabilistic precipitation and temperature downscaling of the Twentieth Century Reanalysis over France. *Climate of the Past*, 12, 635-662. <https://doi.org/10.5194/cp-12-635-2016>.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Devers, A. & Graff, B., 2017. Ensemble reconstruction of spatio-temporal extreme low-flow events in France since 1871. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2923-2951. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2923-2017>.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Graff, B., and Soubeyroux, J.-M.: SCOPE Climate: a 142-year daily high-resolution ensemble meteorological reconstruction dataset over France, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 241–260, <https://doi.org/10.5194/essd-11-241-2019>, 2019.
- 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](https://doi.org/10.1051/lhb/2013027).
- Commeaux, F., Drogue, G., and François, D., 2010. Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique : sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission, *BAGF - Géographies*, 2, 178-193.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Mauerer, M., Mok, H. Y., Nordli, Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D. & Worley, S. J., 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 1-28. <https://doi.org/10.1002/qj.776>.
- Dayon, G., Boé, J., Martin, E., Gailhard, J., 2018. Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties, *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.03.001>.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.Y., 2019. Base de données hydroclimatique à l'échelle de la France. INRAE, UR HYCAR, Equipe Hydrologie des bassins versants, Antony, URL: <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.

- 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](https://doi.org/10.5194/piahs-373-87-2016), 2016.
- de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H., & Perrin, C., 2019. A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model. *Water Resources Research*, 55 (11): 8821-8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>.
- Detrembleur, S., Stilmant, F., Dewals, B., Erpicum, S., Archambeau, P., and Piroton, M., 2015. Impacts of climate change on future flood damage on the river Meuse, with a distributed uncertainty analysis, *Natural Hazards*, 77, 1533-1549, doi.org/10.1007/s11069-015-1661-6.
- Dewals, B., Drogue, G., Erpicum, S., Piroton, M., and Archambeau, P., 2013. Impact of climate change on inundation hazard along the river Meuse, *Transboundary Water Management in a Changing Climate*, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 19-27 pp.
- de Wit, M. J. M., van den Hurk, B., Warmerdam, P. M. M., Torfs, P. J. J. F., Roulin, E., and van Deursen, W. P. A., 2007. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse, *Climatic Change*, 82, 351-372, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9195-2>.
- Drogue, G., Fournier, M., Bauwens, A., Buiteveld, H., Commeaux, F., Degré, A., De Keizer, O., Detrembleur, S., Dewals, B., François, D., Guilmin, E., Hausmann, B., Hissel, F., Huber, N., Lebaut, S., Losson, B., Kufeld, M., Nacken, H., Piroton, M., Pontégny, D., Sohler, C., Vanneuville, W., 2010. AMICE report, Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin, WP1 report summary – Actions 1 & 3.
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.-P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Jousaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z. X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N. & Vuichard, N., 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40, 2123-2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>.
- Engeland, K., Steinsland, I., Johansen, S.S., Petersen-Øverleir, A., Kolberg, S., 2016. Effects of uncertainties in hydrological modelling. A case study of a mountainous catchment in Southern Norway. *Journal of Hydrology*, 536, 147-160, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.036>.
- Evin, G., 2019. QUALYPSO: Partitioning Uncertainty Components of an Incomplete Ensemble of Climate Projections. R package version 1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=QUALYPSO>.
- Evin, G., Hingray, B., Blanchet, J., Eckert, N., Morin, S., & Verfaillie, D., 2019. Partitioning Uncertainty Components of an Incomplete Ensemble of Climate Projections Using Data Augmentation. *Journal of Climate*, 32, 18. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1>.
- François, D., Drogue, G., and Commeaux, F., 2011. Évolution possible des débits d'étiage de la Meuse en France au cours du XXIème siècle, *Revue Géographique de l'Est* 51.
- François, D., 2018. Élaboration d'un code FORTRAN pour l'intégration du modèle PRESAGES dans la plateforme de prévision des débits d'étiage. Technical report, 12 juin 2018, 34 pp.
- Garavaglia, F., Le Lay, M., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., and Mathevet, T., 2017. Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from a lumped to a semi-distributed approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3937–3952, <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>.
- Garçon, R., 1996. Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche* (5) 71-76.
- Grelier, B., Drogue, G., Piroton, M., Archambeau, P., and Dewals, B., 2016. An alternate approach for assessing impacts of climate change on water resources: Combining hazard likelihood and catchment sensitivity, *4th IAHR Europe Congress*, Liège.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- Habets, F., et al., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, [doi:10.1029/2007JD008548](https://doi.org/10.1029/2007JD008548).
- Hingray, B., & Saïd, M., 2014. Partitioning Internal Variability and Model Uncertainty Components in a Multimember Multimodel Ensemble of Climate Projections. *Journal of Climate*, 27(17), 6779–6798. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00629.1>.

- Hingray, B., Blanchet, J., Evin, G., & Vidal, J.-P., 2019. Uncertainty component estimates in transient climate projections: Precision of estimators in a single time or time series approach. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04635-1>.
- Hughes, D.A., Kapangaziwiri, E., Sawunyama, T., 2010. Hydrological model uncertainty assessment in southern Africa. *Journal of Hydrology*, 387, Issues 3–4, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.010>.
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31 (1), pp. 13-24. DOI: [10.1080/02626668609491024](https://doi.org/10.1080/02626668609491024).
- Krueger, I., Ottow, B. T., de Keizer, O., and Buiteveld, H., 2013. Towards a roadmap to climate change adaptation in the Meuse river basin, with the focus on water quantity, Transboundary Water Management in a Changing Climate, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 69-74 pp.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., ... Shiklomanov, I., 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 3–10. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.3>.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Etchevers, P., Martin, E., Obléd, C., 2011. Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin, *Journal of Hydrology*, 403 (1-2), pp. 116-129. [doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.046](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.046).
- Lang, C., Gille, E., François, D., Auer, J.-C., 2006. PRESAGES: A collection of tools for predicting low flows [Le dispositif PRESAGES: Un ensemble d'outils pour la prévision des étiages]. IAHS-AISH Publication, (308), pp. 145-150.
- 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.
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M., Ndima, P.-O., 2014. La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche* (1) 25-32, [doi: 10.1051/lhb/2014004](https://doi.org/10.1051/lhb/2014004).
- Lemaitre-Basset, T. 2020. Présentation lors du comité de première année de thèse. Impact du changement climatique sur l'hydrologie et adaptation : Incertitudes liées à l'évapotranspiration potentielle. Sorbonne Université et INRAE. ED GRNE.
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F.: The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran–Isba–Modcou hydrometeorological model for France, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>, 2020.
- 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, <https://hal.inrae.fr/tel-02591478>.
- 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, <https://hal.inrae.fr/tel-02591889>.
- Liu, Y.R., Li, Y.P., Huang, G.H., Zhang, J.L., Fan, Y.R., 2017. A Bayesian-based multilevel factorial analysis method for analyzing parameter uncertainty of hydrological model. *Journal of Hydrology*, 553, 750-762. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.048>.
- 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, <https://hal.inrae.fr/tel-02600722>.
- Lobligeois, F., Andréassian, V., Perrin, C., Tabary, P., and Loumagne, C., 2014. When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 575-594, <https://doi.org/10.5194/hess-18-575-2014>.
- Lorenz, E. N., 1969. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 636-646. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)26<636%3AAPARB2.0.CO%3B2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)26<636%3AAPARB2.0.CO%3B2).
- Michel, C., 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- Mitchell, T. D., & Hulme, M., 1999. Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 23(1), 57–78. <https://doi.org/10.1177/030913339902300103>.

- Monteil, C., Zaoui, F., Le Moine, N., and Hendrickx, F., 2020. Multi-objective calibration by combination of stochastic and gradient-like parameter generation rules – the caRamel algorithm, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3189–3209, <https://doi.org/10.5194/hess-24-3189-2020>.
- 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. Part I. A conceptual models discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10, 282–290.
- 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.
- Pyka, C., Jacobs, C., Breuer, R., Elbers, J., Nacken, H., Sewilam, H., and Timmerman, J., 2016. Effects of water diversion and climate change on the Rur and Meuse in low-flow situations, *Environmental Earth Sciences*, 75, [10.1007/s12665-016-5989-3](https://doi.org/10.1007/s12665-016-5989-3).
- Radanovics, S., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Ben Daoud, A. & Bontron, G., 2013. Optimising predictor domains for spatially coherent precipitation downscaling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4189-4208. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4189-2013>.
- RIWA-Meuse, 2018. La Meuse : La sécheresse montre la vulnérabilité. Rapport annuel 2018 de l'Association de Sociétés des Eaux de Rivière, 192 p.
- Romgens, H., 2013. Climate change and the impact on drinking water supply in the Meuse river basin, *Transboundary Water Management in a Changing Climate*, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 37-43 pp.
- Rouhier, L., 2018. Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance. Thèse de doctorat. Sorbonne Université.
- Rouhier, L., Garavaglia, F., Le Lay, M., Michon, T., Castaings, W., Le Moine, N., Hendrickx, F., Monteil, C., and Ribstein, P., 2018. Tailor-made spatial patterns for hydrological model parameters combining regionalisation methods, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2018-342>.
- Santos, L., Thirel, G., and Perrin, C., 2018. Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4583-4591, <https://doi.org/10.5194/hess-22-4583-2018>.
- 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.
- Sauquet, E., Chatel, T., Martin E., 2019. Vers l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au niveau des bassins versants français. Rapport d'étude, AFB-Irstea, 63 pp.
- Sjerps, R. M. A., ter Laak, T. L., and Zwolsman, G., 2017. Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective, *Science of the Total Environment*, 601, 1682-1694, [10.1016/j.scitotenv.2017.05.250](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.250).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Terrier, M., Perrin, C., Thirel, G., 2018. Projet CHIMERE 21, rapport sur la naturalisation des débits. Vers une estimation des débits naturels sur le bassin versant de la Meuse. 12/09/2018. 54 pp.
- Thirel, G., Gerlinger, K., Perrin, C., Drogue, G., Renard, B., Wagner, J.-P., 2018. Evolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC. Rapport final du projet MOSARH21, <https://hal.inrae.fr/hal-02607383>.
- Thomas C., 1979. Etude hydrogéologique de l'aquifère karstique du bassin de la Haute Meuse. Etude géochimique des émergences de Neufchâteau (Vosges). Ministère Agric., SRAE Lorraine, INPL, ENSG, Serv. Hydrogéol. Rég. ; rapport SRAEL et thèse INPL, 246 p.
- 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 Vliet, M. T. H., and Zwolsman, J. J. G., 2008. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river, *J. Hydrol.*, 353, 1-17.
- van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. & Rose, S., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>.

- 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.
- Vidal, J.-P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., & Ducharne, A., 2016. Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3651–3672. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3651-2016>.
- Visser-Quinn, A., Beevers, L., Collet, L., Formetta, G., Smith, K., Wanders, N., Thober, S., Pan, M., Kumar, R., 2019. Spatio-temporal analysis of compound hydro-hazard extremes across the UK. *Advances in Water Resources*, 130, 77-90, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.05.019>.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valeke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L. & Chauvin, F., 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40, 2091-2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>.

Annexe A. Les méthodes de descente d'échelle

Dans cette annexe, nous présentons les deux méthodes de descente d'échelle testées, SCOPE et ADAMONT, ainsi que leur performance.

A.1. SCOPE

SCOPE (Spatially Coherent Probabilistic Extension method) est une méthode de descente d'échelle climatique – aussi appelée méthode de régionalisation climatique – basée sur le principe d'analogie introduit par Lorenz (1969). Ce principe fait l'hypothèse que deux situations atmosphériques comparables à l'échelle synoptique (par ex. localisation des dépressions/anticyclones) vont conduire à des effets locaux (par ex. quantité de pluie) comparables. Ce type de méthode transforme ainsi de l'information à grande échelle – à partir de variables appelées prédicteurs – en information à l'échelle locale – les prédicands. La méthode SCOPE est basée sur la méthode SANDHY (Stepwise Analogue Downscaling method for HYdrology) développée à l'origine dans un contexte de prévision quantitative de précipitations et utilisée de manière opérationnelle à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) pour des bassins versants spécifiques (Ben Daoud, 2010 ; Ben Daoud et al., 2016). SANDHY a été appliquée à l'ensemble de la France pour reconstruire des précipitations journalières à partir de prédicteurs atmosphériques synoptiques depuis 1958 (Radanovics et al., 2013). De nouveaux développements pour parvenir à la méthode SCOPE ont ensuite permis (1) d'étendre la méthode aux variables de température et évapotranspiration de référence, (2) de produire des champs spatialement cohérents sur la France entière et (3) d'effectuer des reconstructions météorologiques journalières à 8x8 km² de résolution depuis 1871 (Caillouet, 2016 ; Caillouet et al., 2016, 2017).

A.1.1. Méthodologie

L'approche mise en place dans le cadre du projet CHIMERE 21 a consisté à (1) adapter SCOPE dans un contexte de projections climatiques futures, via une étude de sensibilité à des prédicteurs dégradés selon la disponibilité des données et (2) appliquer la version dégradée de SCOPE pour régionaliser les projections climatiques issues des deux modèles de circulation générale (GCMs) français (voir Tableau 3). On notera que Scope produit des ensembles de données (25 membres), ce qui explique pourquoi les résultats sont présentés par la suite sous forme de faisceaux.

Sensibilité de SCOPE à des prédicteurs dégradés et à la longueur de l'archive

La méthode SCOPE a dû être dégradée pour pouvoir s'adapter aux données disponibles en sorties des GCMs, qui sont moins nombreuses que celles habituellement disponibles dans les réanalyses globales. Deux modifications principales ont été réalisées successivement :

1. Passage d'un pas de temps 6h à un pas de temps journalier pour les variables d'entrée de grande échelle (prédicteurs) fournies par les GCMs. Ces variables n'étaient en effet disponibles qu'au pas de temps journalier ;
2. Non prise en compte de la variable d'entrée « contenu en eau de la colonne d'atmosphère » (TCW). Cette variable n'était pas directement disponible en sortie des GCMs.

Des tests ont ainsi été réalisés pour apprécier la perte de performance de SCOPE suite à chacune de ces modifications, dans un contexte de climat observé sur la période 1982-2002 :

- Les prédicteurs sont issus de la réanalyse globale 20CR (Compo et al., 2011), comme dans les études précédentes. En particulier, les domaines d'analogie – domaines spatiaux sur lesquels est évalué le degré d'analogie entre situations atmosphériques – sont identiques à ceux

optimisés précédemment localement sur l'ensemble de la France sur la période 1982-2002 (Caillouet et al., 2019) ;

- La réanalyse SAFRAN est utilisée comme archive des prédictands : précipitation, température moyenne de l'air et évapotranspiration de référence, calculée à partir de la formule de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) ;
- La réanalyse SAFRAN est disponible comme jeu de données de référence.

Un test supplémentaire a été réalisé sur la longueur temporelle de l'archive nécessaire pour trouver de bons analogues, et ce pour chacune des versions étudiées. Les périodes considérées pour cette archive étaient 1982-2002 et 1958-2008.

Application de SCOPE aux projections des GCMs français

La version de SCOPE avec (1) un pas de temps journalier, (2) une non prise en compte de la variable « contenu en eau de la colonne d'atmosphère » et (3) une archive de 50 ans, a été forcée par les prédicteurs issus de simulations globales des deux GCMs français ayant contribué à l'exercice international CMIP5: CNRM-CM5 et IPSL-CM5A (Tableau 3). Les simulations considérées sont (1) la simulation historique (hist) sur la période 1950-2005 et (2) les projections sous scénarios de concentration en gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5 (van Vuuren et al., 2011) sur la période 2005-2100. Seul le run 1 de chaque GCM est considéré dans cette étude en raison de la disponibilité des données.

A.1.2. Performance de la méthode

Sensibilité de SCOPE à des prédicteurs dégradés et à la longueur de l'archive

La Figure 31 et la Figure 32 présentent le cycle saisonnier moyen de précipitations (en mm/mois) sur le bassin versant de la Meuse sur la période 1982-2002, calculé à partir de SAFRAN et de différentes versions de SCOPE forcé par la réanalyse 20CR. On peut noter que la surestimation des précipitations d'automne et d'hiver avec des prédicteurs dégradés pour une archive de 20 ans (Figure 31) est fortement corrigée par l'utilisation d'une archive de 50 ans (Figure 32). Par ailleurs, l'utilisation d'un pas de temps plus fin (6h) améliore grandement l'estimation des précipitations, alors que l'utilisation de TCW semble peu apporter.

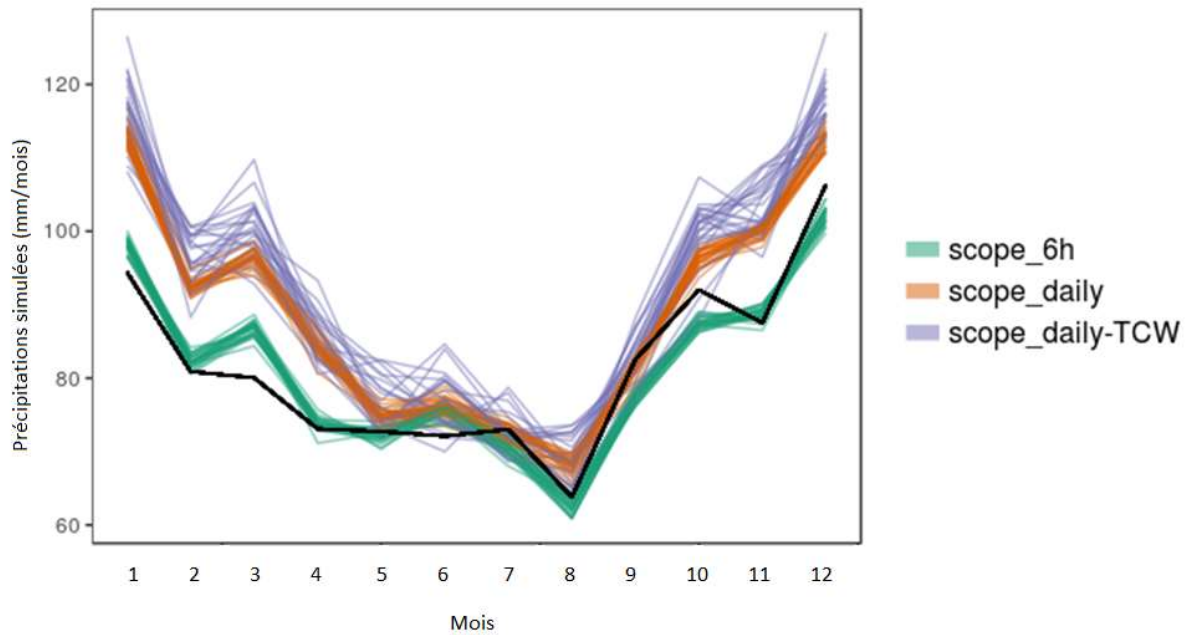


Figure 31 : Cycle saisonnier de précipitation moyenne (en mm) sur la période 1982-2002 et sur le bassin versant de la Meuse, avec une archive de 20 ans pour les analogues utilisés par SCOPE. La référence SAFRAN est représentée par la courbe noire et les différentes versions de SCOPE par des ensembles de courbes de différentes couleurs. TCW représente l'utilisation de la variable contenu en eau de la colonne d'atmosphère.

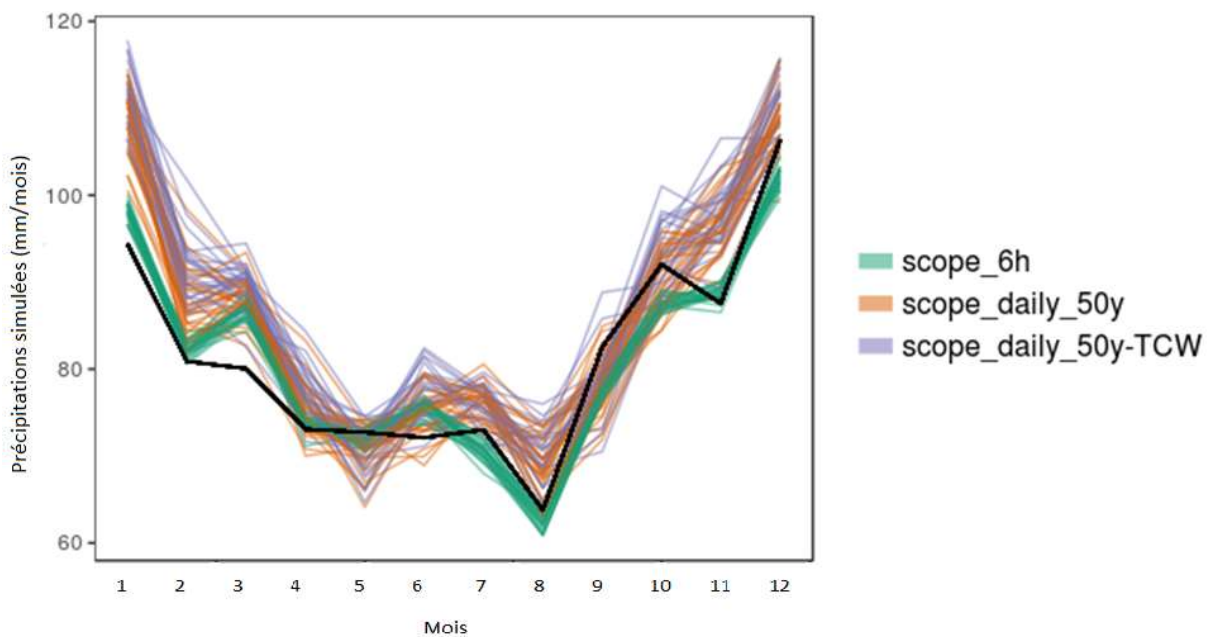


Figure 32 : Comme la Figure 31, mais avec une archive de 50 ans.

La Figure 33 et la Figure 34 présentent le cycle saisonnier moyen de température (en °C) sur le bassin versant de la Meuse sur la période 1982-2002. On peut noter que ce cycle est dans tous les cas relativement bien reproduit, avec cependant une sous-estimation des températures estivales et une surestimation des températures hivernales.

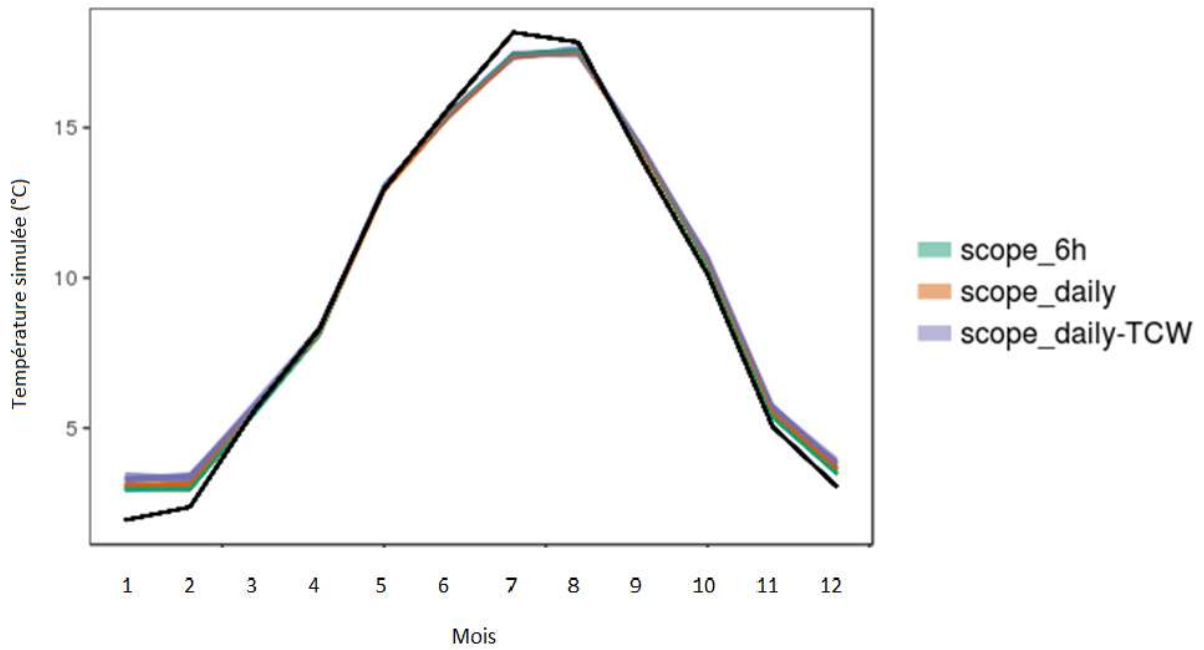


Figure 33 : Cycle saisonnier de température moyenne (en °C) sur la période 1982-2002 et sur le bassin versant de la Meuse, avec une archive de 20 ans pour les analogues utilisés par SCOPE. La référence SAFRAN est représentée par la courbe noire et les différentes versions de SCOPE par des ensembles de courbes de différentes couleurs.

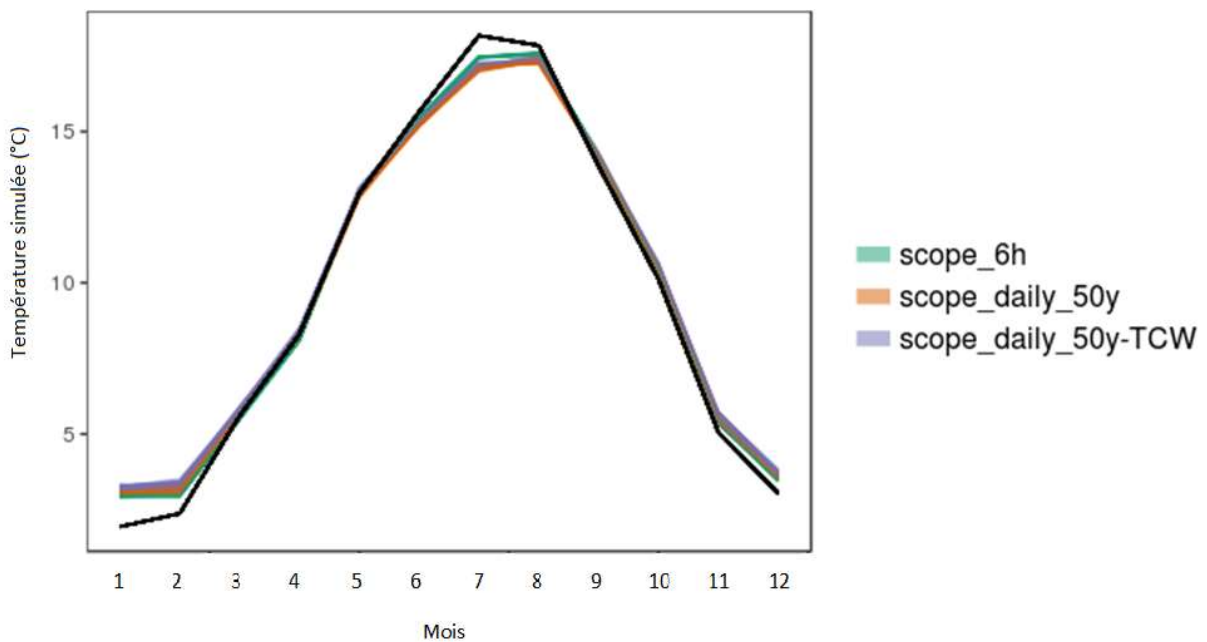


Figure 34 : Comme la Figure 33, mais avec une archive de 50 ans.

Application de SCOPE aux projections des GCMs français

La Figure 35 et la Figure 36 présentent les précipitations annuelles moyennes (en mm/jour) telles que simulées par SCOPE sous forçage des deux GCMs entre 1950 et 2100. La combinaison CNRM-CM5 + SCOPE (Figure 35) surestime légèrement les précipitations en climat présent et ne prévoit pas d'évolution au cours du XXI^e siècle, quel que soit le scénario de concentration de gaz à effet de serre. La combinaison IPSL-CM5A-MR + SCOPE (Figure 36), quant à elle, surestime largement les

précipitations en climat présent et prévoit une légère augmentation au cours du XXI^e siècle sous RCP 8.5.

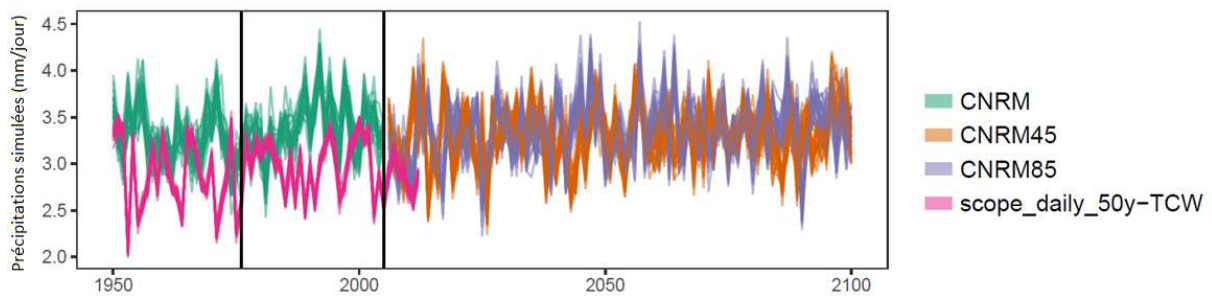


Figure 35 : Evolution des précipitations moyennes annuelles (mm/jour) sur le bassin de la Meuse simulées par CNRM-CM5 + SCOPE. La simulation de référence forcée par la réanalyse 20CR est indiquée en rose.

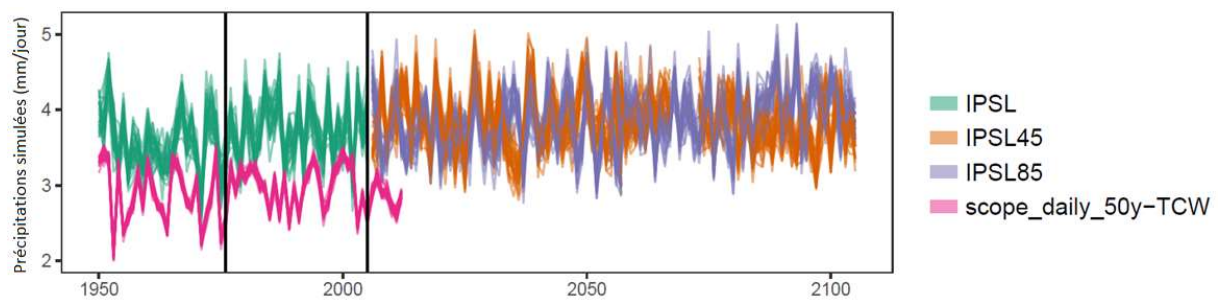


Figure 36 : Comme la Figure 35, mais pour IPSL-CM5A-MR + SCOPE.

La Figure 37 et la Figure 38 présentent la température annuelle moyenne (en °C) telle que simulée par SCOPE sous forçage des deux GCMs entre 1950 et 2100. La combinaison CNRM-CM5 + SCOPE (Figure 37) surestime les températures en climat présent, mais elle sous-estime largement le réchauffement de la fin du siècle sous RCP 8.5 (+2°C) par rapport à la simulation globale correspondante (+3°C). La combinaison IPSL-CM5A-MR + SCOPE (Figure 38) ne présente pas de biais en climat présent et ne prévoit pas une évolution différenciée selon le RCP considéré au cours du XXI^e siècle. Le réchauffement pour la fin du siècle sous RCP 8.5 (environ +2,5°C) est largement sous-estimé par rapport à la simulation globale correspondante qui prévoit +4°C.

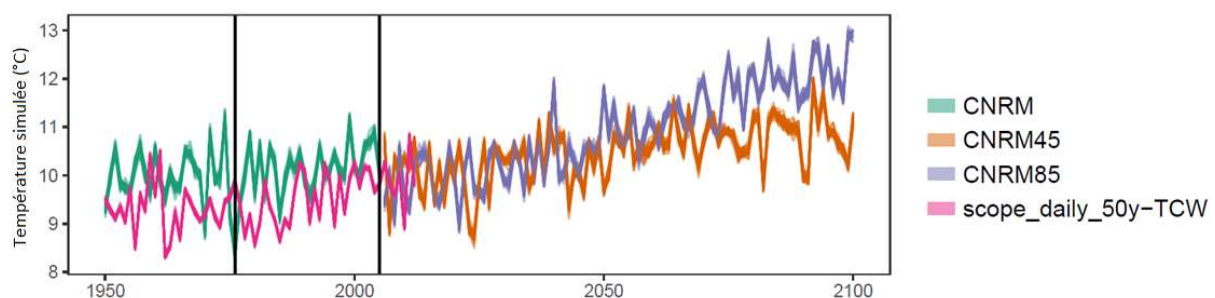


Figure 37 : Evolution de la température moyenne annuelle (°C) sur le bassin de la Meuse simulée par CNRM-CM5 + SCOPE. La simulation de référence forcée par la réanalyse 20CR est indiquée en rose.

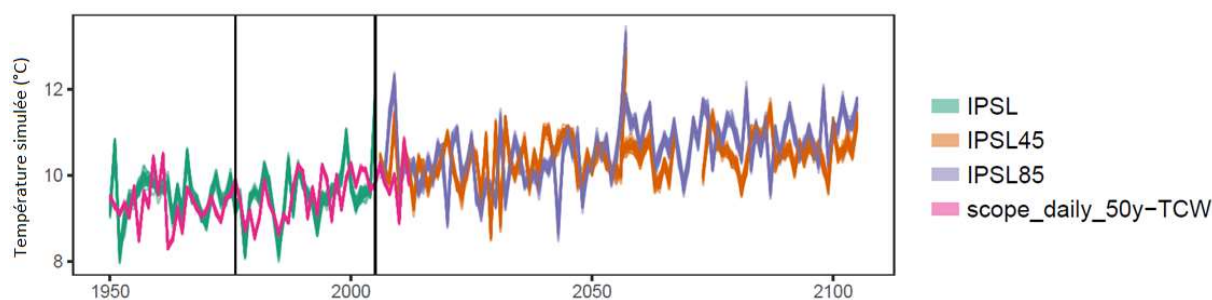


Figure 38 : Comme la Figure 38, mais pour IPSL-CM5A-MR + SCOPE.

À retenir :

On a vu dans cette partie la mise en œuvre de la méthode de descente d'échelle SCOPE. Si les résultats semblent satisfaisants en utilisant une réanalyse passée, on obtient au contraire des projections de mauvaise qualité. En effet, l'augmentation de la température est sous-estimée fortement par SCOPE du fait du peu de situations analogues sur lesquelles se baser pour reproduire la forte augmentation des températures dans le futur. Du fait de ces limitations, cette méthode ne sera pas conservée pour CHIMERE 21.

A.2. ADAMONT

A.2.1. Méthodologie

Cette méthode est une combinaison d'approche par types de temps, de quantile-quantile et de méthode des analogues. Le principe général de la méthode consiste dans un premier temps à corriger les projections des RCMs par rapport à SAFRAN, pour chaque variable, sur les quatre saisons et pour quatre régimes de temps différents définis pour chacune des saisons. Ensuite, des situations atmosphériques similaires aux projections des RCMs sont identifiées dans SAFRAN pour calculer une répartition horaire des variables et mieux discriminer la pluie et la neige. Les étapes mises en œuvre dans la méthode ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) sont détaillées dans la Figure 39.

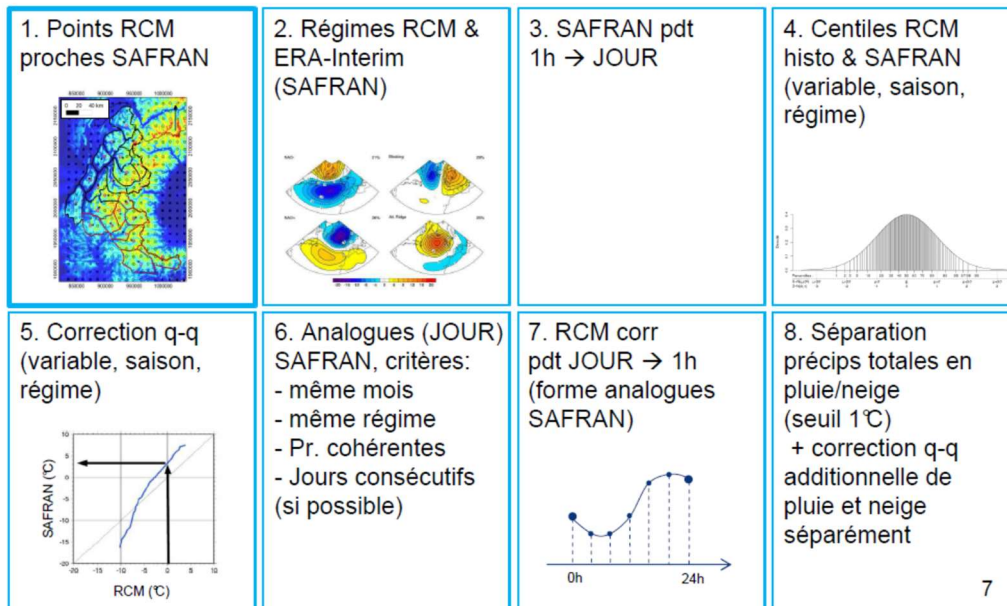


Figure 39 : Chaîne de traitement de la méthode ADAMONT (source Météo-France).

ADAMONT consiste en huit étapes :

1. Mise en correspondance des points de grille des RCMs et de SAFRAN.
2. Définition de quatre classes de régimes de temps pour chacune des quatre saisons en utilisant les données d'ERA-Interim (avec l'altitude du niveau isobare à 500 hPa (Z500)) ; classification des sorties des GCMs forçant les RCMs et de l'analyse SAFRAN dans ces régimes de temps.
3. Agrégation des données horaires SAFRAN au pas de temps quotidien.
4. Calcul des quantiles de référence côté SAFRAN et côté couple GCM/RCM sur une période de 30 ans au pas de temps quotidien.
5. Correction quantile-quantile des scénarios (couple GCM/RCM) au pas de temps quotidien par rapport à SAFRAN.
6. Recherche d'une journée analogue SAFRAN pour chaque donnée du couple GCM/RCM.
7. Désagrégation des données quotidiennes GCM/RCM au pas de temps horaire.
8. Traitement particulier de la désagrégation horaire des précipitations et de la séparation pluie/neige en deux étapes, avec une correction quantile-quantile additionnelle (pour la pluie et pour la neige indépendamment) par rapport à SAFRAN horaire.

Les sept variables nécessaires au modèle hydrologique SURFEX (schéma de surface de Météo-France qui contient le cœur de code ISBA de SIM2) et présentes dans SAFRAN sont traitées : précipitations liquides et précipitations solides, température de l'air à 2 m, humidité spécifique, vitesse du vent à 10 m, rayonnement solaire descendant, rayonnement infra-rouge descendant. Les données sont finalement réagrégées au pas de temps journalier pour trois modèles hydrologiques utilisés sur les quatre (SIM2 utilise des données horaires en entrée). Ces données sont traitées pour la période

historique (1976-2005) et pour les scénarios futurs (2005-2100). Des analyses sont présentées sur cette période historique ainsi que sur des sous-périodes futures (futur proche 2021-2050, futur moyen 2046-2075, futur lointain 2071-2100) pour les RCP 4.5 et 8.5.

A.2.2. Performance de la méthode

La méthode ADAMONT a en premier lieu été développée et validée sur les zones de montagne (Verfaillie et al., 2017). Dans le cadre du projet CHIMERE 21, elle a été étendue à l'ensemble de la France, puis testée et validée par Météo-France. Elle a notamment été appliquée à un jeu de données issu de la réanalyse globale ERA-Interim du CEPMMT¹⁶ sur la période 1979-2008. La réanalyse ERA-Interim a une résolution horizontale d'environ 80 km. Ces données ont été régionalisées par le RCM CNRM-ALADIN53. ERA-Interim est donc en quelque sorte utilisée en lieu et place d'un GCM. En comparant les données ERA-Interim - ALADIN53 débiaisées par la méthode ADAMONT à la réanalyse SAFRAN sur la France, on peut donc vérifier la bonne performance de la méthode ADAMONT lorsqu'un autre jeu de données est utilisé.

La Figure 40 montre que les biais de températures sur la période 1979-2008 sont très faibles. A l'échelle annuelle, ils vont de 0 à 0,2 % entre la réanalyse ERA-Interim débiaisée par ADAMONT et SAFRAN.

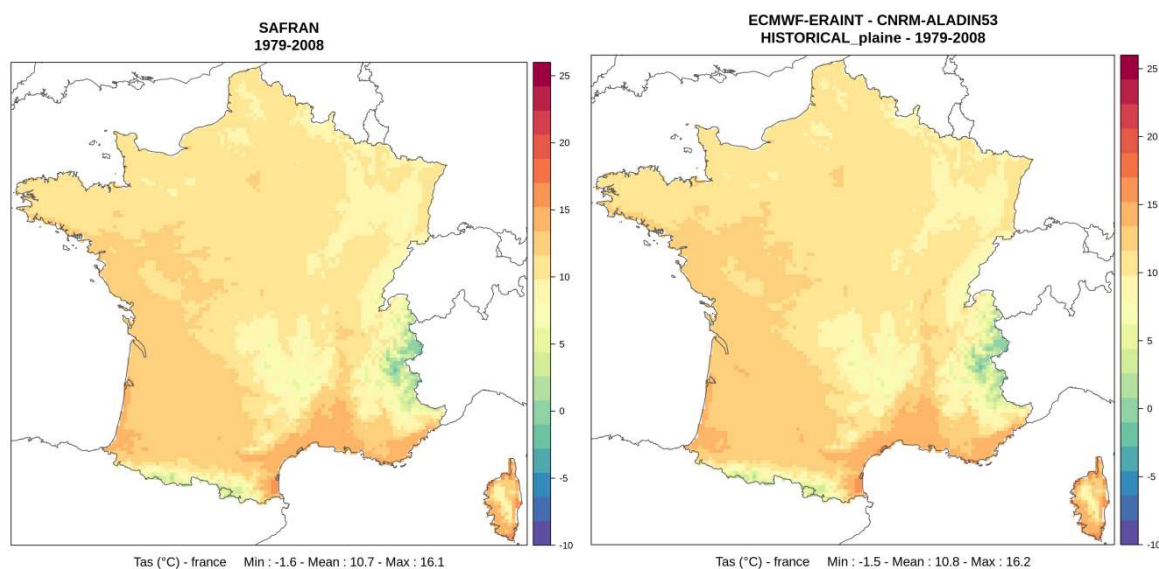


Figure 40 : Température annuelle moyenne (°C) sur la période 1979-2008 pour SAFRAN (gauche) et ERA-Interim (droite).

Comme le montre la Figure 41, pour les précipitations annuelles, le biais est également faible, allant de -6 à +2,3 % sur l'ensemble de la France, entre la réanalyse ERA-Interim débiaisée par ADAMONT et SAFRAN.

¹⁶ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

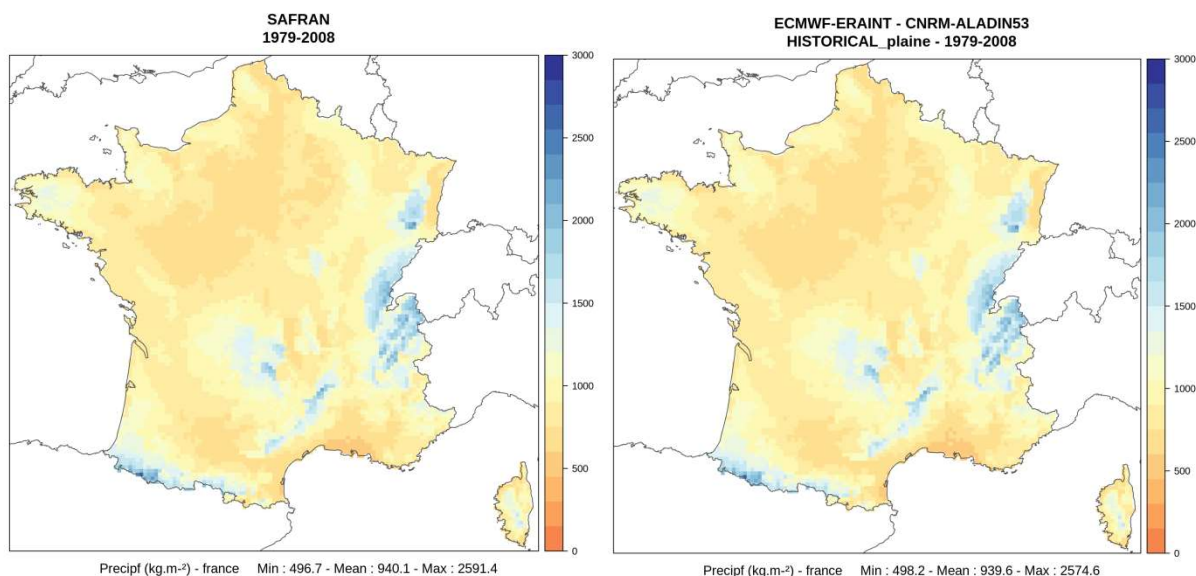
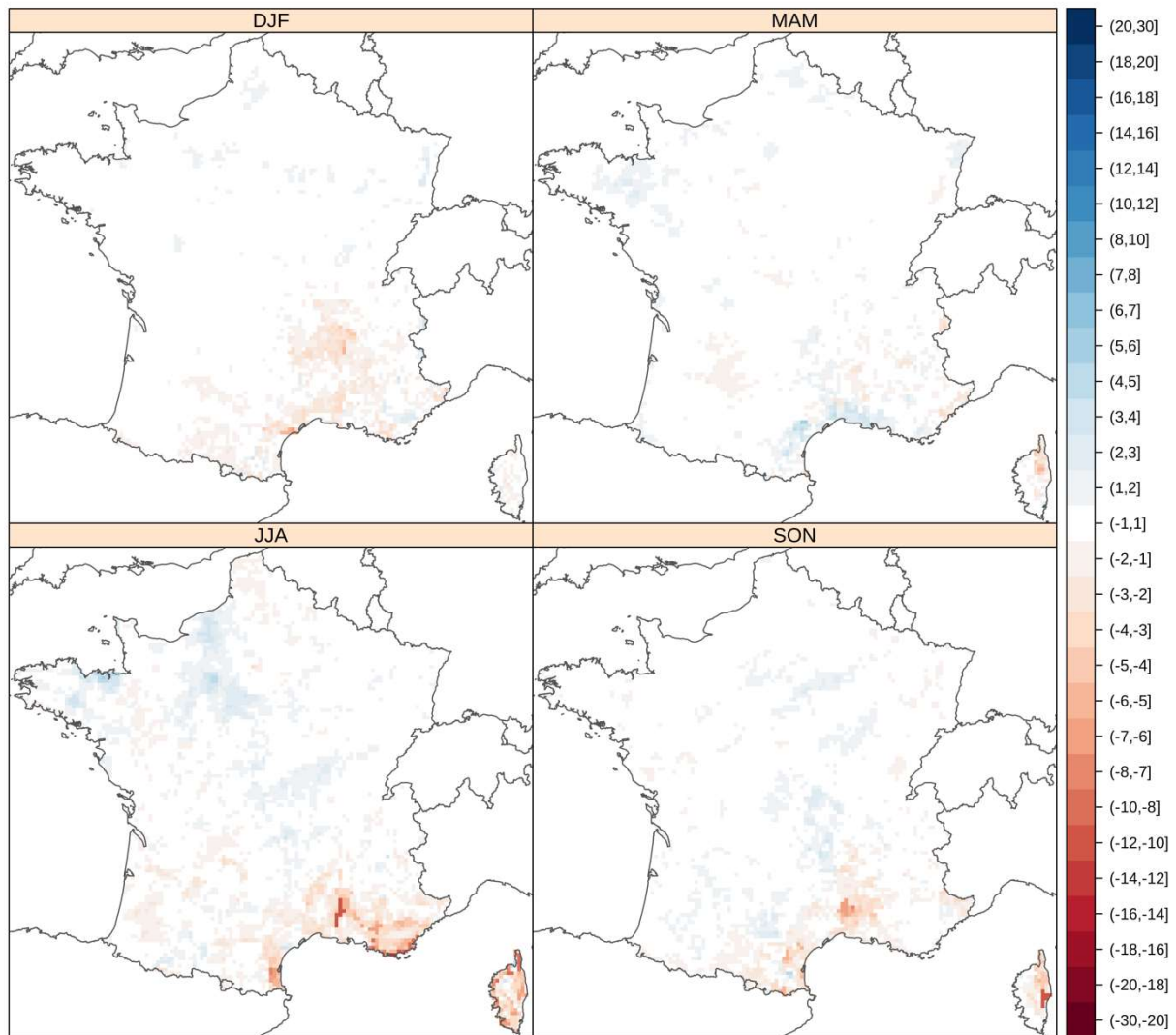


Figure 41 : Précipitations totales annuelles (mm) sur la période 1979-2008 pour SAFRAN (gauche) et ERA-Interim (droite).

Sur la Figure 42, on note qu'à l'échelle saisonnière, des contrastes régionaux plus importants sont observables concernant les biais de précipitations. Toutefois, ceux-ci restent limités avec des valeurs qui ponctuellement peuvent atteindre $\pm 10\%$, mais la moyenne à l'échelle de la France reste de l'ordre de $\pm 0,1\%$ pour chaque saison. Par ailleurs, les biais saisonniers les plus forts sont observés dans le Sud-Est et en Corse pour la période estivale (JJA), période habituellement marquée par des précipitations très faibles, ce qui signifie que les biais absolus sont de faible importance.

Ces différentes analyses ont mis en évidence le bon comportement de la méthode de descente d'échelle lorsqu'elle est appliquée avec un jeu de données indépendant et comparée à SAFRAN. Par la suite, la méthode ADAMONT a été appliquée sur la période historique (1976-2005) de chacun des cinq couples GCM-RCM sélectionnés dans le cadre du projet CHIMERE 21. Les données obtenues ont été comparées avec la réanalyse SAFRAN, les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

ECMWF-ERAINT - CNRM-ALADIN53
HISTORICAL_plaine - 1979-2008



Mean bias safran 1979-2008/model : Precipf (%) - france
 DJF - Min : -6.8 - Mean : -0.1 - Max : 4.9
 MAM - Min : -5.3 - Mean : 0.1 - Max : 5.7
 JJA - Min : -12.2 - Mean : -0.1 - Max : 6
 SON - Min : -11.2 - Mean : -0.1 - Max : 4.2

Figure 42 : Biais annuel (en %) entre les précipitations totales de SAFRAN et les précipitations totales d'ERA-Interim sur la période 1979-2008. DJF : décembre, janvier, février ; MAM : mars, avril, mai ; JJA : juin, juillet, août ; SON : septembre, octobre, novembre.

Résultats pour la période historique sur la France

Sur la France, le Tableau 7 et la Figure 43 montrent que les cinq couples de GCM-RCM présentent des biais de température moyenne assez faibles, souvent inférieurs à 0,5°C. Le cycle saisonnier est très bien reproduit par ces cinq couples et aucune période de l'année ne semble présenter un biais particulier par rapport au reste de l'année.

Tableau 7 : Biais (°C) entre les sorties des couples de GCM-RCM descendus en échelle par ADAMONT et SAFRAN pour la température moyenne sur la période de référence sur la France pour les cinq couples GCM/RCM.

Température Biais (°C)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
ALADIN53/CNRM-CM5	-0,3	-0,1	+0,1	+0,3	+0,4	+0,0	+0,5	+0,4	+0,5	-0,4	+0,3	-0,4
IPSL-INERIS-WRF/IPSL-CM5A	+0,0	-1,0	+0,5	+1,0	-0,5	-1,1	+0,6	+0,9	-0,1	-0,5	+1,1	+0,3
SMHI_RCA4/CNRM_CM5	-0,1	-0,3	+0,2	+0,2	+0,5	-0,4	+0,2	+1,0	+0,5	-0,4	+0,3	-0,2
SMHI_RCA4/IPSL_CM5A	-0,1	-0,9	+0,4	+1,1	-0,5	-0,8	+0,4	+1,1	+0,1	-0,4	+0,8	+0,3
SMHI_RCA4/MPI_ESM	-0,1	-0,2	-0,2	+0,8	+0,4	+0,6	+0,2	+0,2	+0,2	-0,2	+0,5	+0,2

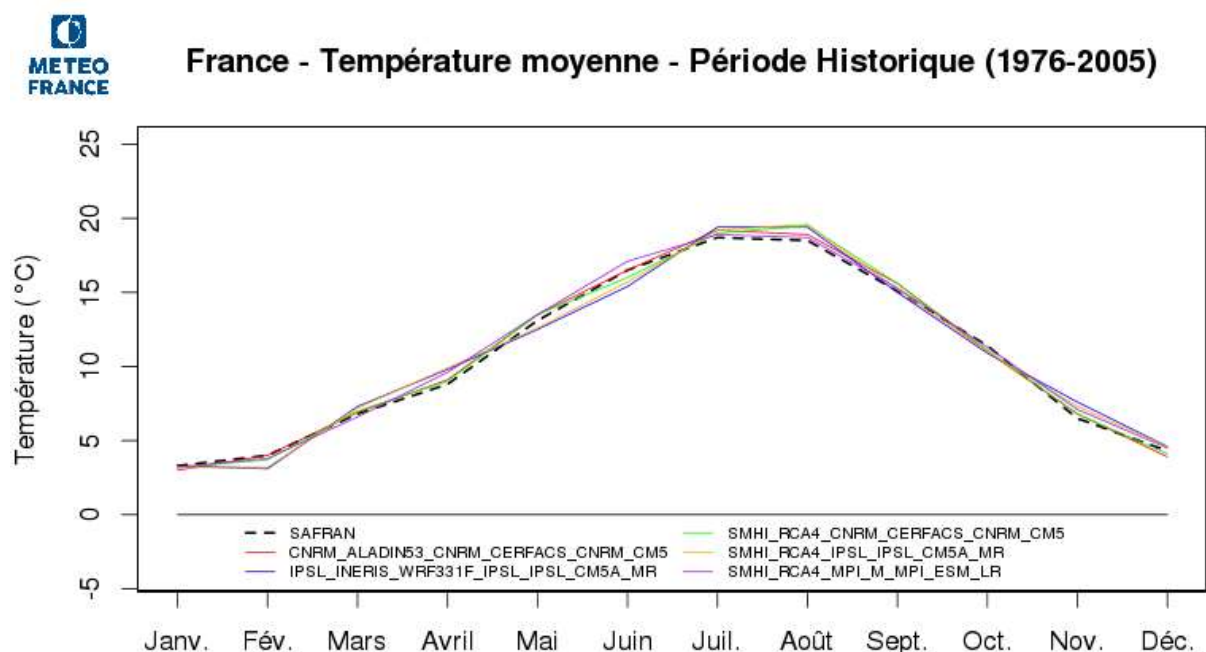


Figure 43 : Température moyenne mensuelle (°C) sur la France pour SAFRAN et pour chacun des couples de GCM-RCM descendus en échelle par ADAMONT sur la période historique (1976-2005).

Pour les précipitations, on constate dans le Tableau 8 et la Figure 44 une tendance pour les cinq modèles à la sous-estimation des précipitations en automne et en hiver, de l'ordre de 10 à 15 %. Cette sous-estimation s'explique par la différence de fréquence d'apparition de certains régimes de temps entre les GCMs et la réanalyse SAFRAN. En effet, la méthode ADAMONT discrimine les saisons et les types de temps lors du débiaisage. De plus, les GCMs ont une tendance connue à moins faire apparaître certains types de temps, les plus pluvieux en automne et en hiver notamment, ce qui explique le biais constaté. Ce biais de précipitation en automne-hiver ne vient pas de la méthode ADAMONT, mais bien d'un problème de fréquence de types de temps dans les modèles de climat, car on ne retrouve pas ce biais dans l'expérience utilisant la réanalyse ERA-Interim (qui présente les mêmes fréquences pour chaque type de temps que la réanalyse SAFRAN). Pour faire disparaître ce biais, il serait possible de baser le débiaisage ADAMONT uniquement sur la saison (tous types de temps confondus), car cette expérience montre alors un biais beaucoup plus faible sur les précipitations (similaire au printemps et à l'été). Toutefois, il semble important de conserver la discrimination par type de temps pour mieux prendre en compte l'impact de leur évolution fréquentielle dans le futur.

Tableau 8 : Biais (%) entre les sorties des modèles climatiques et SAFRAN pour les précipitations sur la période de référence sur la France pour les cinq couples GCM/RCM.

Précipitations Biais (%)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
ALADIN53/CNRM-CM5	-10,2	-6,3	-1,4	+1,6	-2,0	+4,3	+5,9	-10,5	+14,1	-12,3	-15,9	-8,2
IPSL-INERIS-WRF/IPSL-CM5A	+4,7	-11,4	+1,2	-9,1	+1,9	-1,9	+16,9	-11,1	-2,2	-17,9	+6,6	-12,7
SMHI_RCA4/CNRM_CM5	-6,4	-10,1	+7,0	-1,7	-7,6	+13,2	+1,1	-16,1	-2,0	-7,4	-8,4	-7,4
SMHI_RCA4/IPSL_CM5A	+2,7	-10,7	+17,3	-2,7	-19,4	+8,9	+3,1	-16,5	-13,7	-11,8	+11,9	-14,1
SMHI_RCA4/MPI_ESM	-3,9	-0,8	-0,8	-3,0	+0,4	-4,1	-7,2	+9,4	+2,9	-16,3	-6,1	-14,1

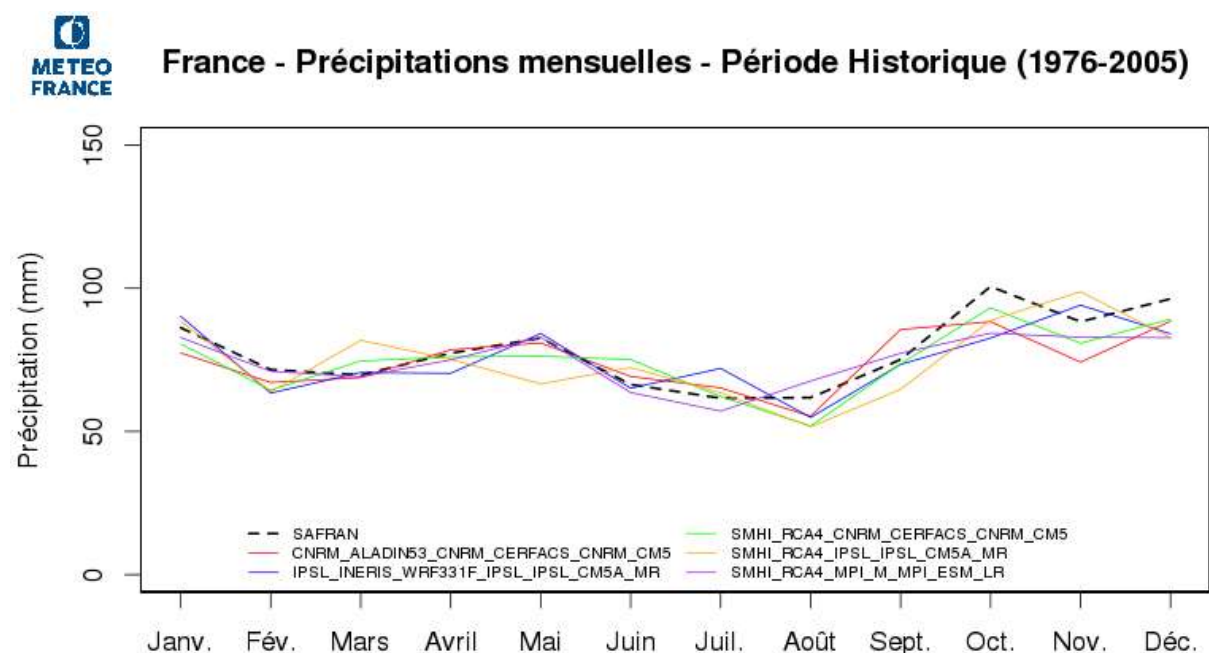


Figure 44 : Précipitation mensuelle moyenne (mm/mois) sur la France pour SAFRAN et pour chacun des couples GCM-RCM sur la période historique (1976-2005).

Résultats pour la période historique sur le bassin de la Meuse

Les résultats obtenus sur le bassin de la Meuse sur la période historique, présentés sur la Figure 45 et la Figure 46, sont comparables aux résultats concernant l'ensemble de la France : des biais de température globalement faibles et une tendance à la sous-estimation des précipitations en automne et en hiver, en lien avec une fréquence d'apparition des types de temps les plus pluvieux trop faible dans les modèles de climat globaux (voir explications fournies concernant la France entière ci-dessus).

Meuse - Température moyenne - Période Historique (1976-2005)

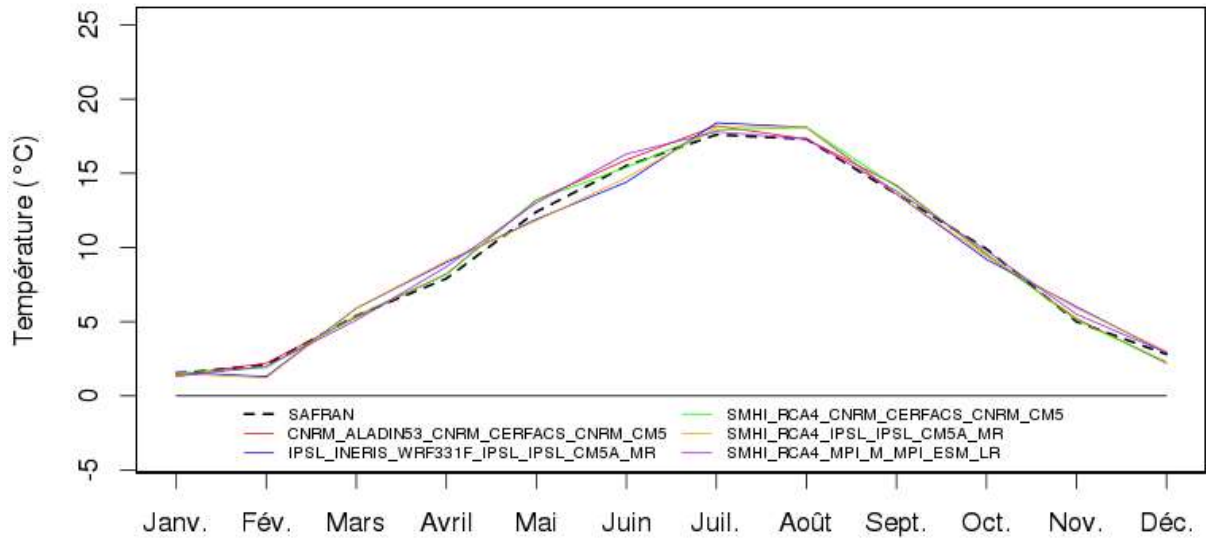


Figure 45 : Température moyenne mensuelle (°C) sur le bassin de la Meuse pour SAFRAN et pour chacun des couples GCM-RCM sur la période historique (1976-2005).

Meuse - Précipitations mensuelles - Période Historique (1976-2005)

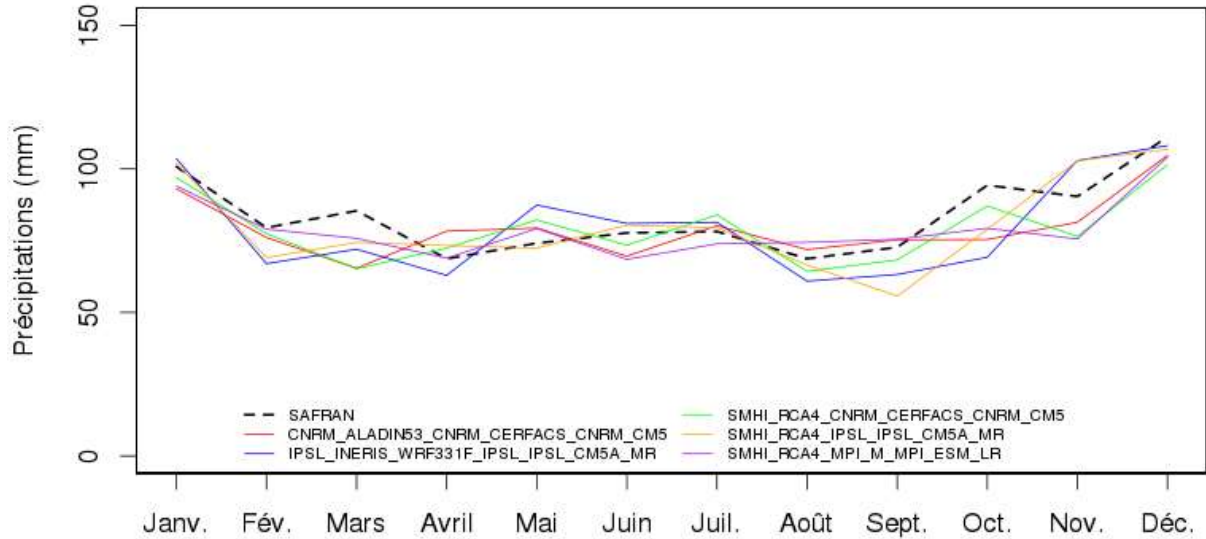


Figure 46 : Précipitation mensuelle moyenne (mm/mois) sur le bassin de la Meuse pour SAFRAN et pour chacun des couples GCM-RCM sur la période historique (1976-2005).

A.3. Perspectives

Comme on l'a vu, certaines améliorations des méthodes de descente d'échelle restent possibles.

En ce qui concerne SCOPE, un travail de ré-échantillonnage pourrait être entrepris afin de disposer de projections dont l'augmentation de température correspondrait plus à l'augmentation projetée par les GCMs.

En ce qui concerne ADAMONT, plusieurs améliorations de la méthode ont été proposées suite au projet CHIMERE 21. Ces améliorations concernent notamment une meilleure description de la côte (meilleure précision du masque terre-mer), ainsi que des contrôles des données permettant de supprimer les valeurs aberrantes de température et de précipitations qui existent dans les données brutes et se répercutent dans les sorties après l'utilisation d'ADAMONT.

À retenir :

Dans cette section, nous avons pu voir que la descente d'échelle ADAMONT permet de produire des projections climatiques correctement débiaisées sur la période historique, que cette méthode soit forcée par une réanalyse à large échelle (ERA-Interim) ou par les couples de GCM-RCM utilisés dans ce projet. Seule une sous-estimation des précipitations pendant l'automne et l'hiver est notable lorsque les couples de GCM-RCM sont utilisés, à la fois sur la France entière et sur la Meuse. On a choisi de ne pas la corriger car on estime que l'utilisation des types de temps est importante pour l'estimation du climat en temps futur.

La méthode de descente d'échelle ADAMONT sera donc conservée pour la suite des travaux de CHIMERE 21.

Annexe B. Modélisation hydrologique

Dans cette annexe, nous présentons les critères de performances utilisés dans le cadre de la mise en place de la modélisation hydrologique, nous introduisons les quatre modèles hydrologiques utilisés ainsi que le calage mis en place pour chacun d'entre eux, nous discutons la performance spatiale des modèles hydrologiques sur les stations disponibles sur le bassin de la Meuse, puis nous analysons la robustesse temporelle des modèles hydrologiques.

B.1. Critères de performance et indicateurs d'évaluation des modèles hydrologiques

Différents critères de performance et différents critères hydrologiques ont été utilisés dans cette étude. Leur rôle peut être triple :

- Fonction-objectif utilisée afin d'optimiser les paramètres des modèles lors du processus de calage,
- Critères de performance des modèles afin de déterminer leur capacité à reproduire l'hydrologie passée du bassin versant de la Meuse,
- Indicateurs dont l'évolution est analysée entre une période de référence et le futur, afin d'estimer l'impact du changement climatique.

Les fonctions-objectif utilisées lors du calage de chaque modèle hydrologique sont décrites dans les sections suivantes, car elles sont propres à chaque équipe de modélisateurs et résultent de leur expertise spécifique d'utilisation des modèles hydrologiques impliqués dans ce projet.

Les critères de performance des modèles hydrologiques ont été sélectionnés afin de vérifier la bonne représentation des débits d'étiage et du régime hydrologique dans son ensemble. Ces critères sont basés sur le KGE (Gupta et al., 2009) et le NSE (Nash and Sutcliffe, 1970) et sont les suivants :

- KGE : le critère de KGE appliqué aux débits,
- KGEI : le critère de KGE appliqué à l'inverse des débits,
- KGEreg : le critère de KGE appliqué au régime du débit moyen journalier,
- NSEreglog : le critère de NSE appliqué au régime des débits transformés logarithmiquement.

Les critères KGE et NSE sont définis par :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Eq. 1}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (Q_s(j) - Q_o(j))^2}{\sum_{j=1}^N (Q_o(j) - \mu_o)^2} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{Eq. 4}$$

avec N le nombre de jours évalués, $Q_s(j)$ le débit simulé pour le jour j , $Q_o(j)$ le débit simulé pour le jour j , σ_s l'écart-type des débits simulés, σ_o l'écart-type des débits observés, μ_s le débit simulé moyen, μ_o le débit observé moyen, r le coefficient de corrélation de Pearson.

Le KGE informe sur la capacité d'un modèle hydrologique à représenter l'ensemble des valeurs des débits observés, en mettant en relief trois aspects : le bilan hydrologique, la variabilité des débits et leur corrélation temporelle. Il donne toutefois plus de poids aux forts débits. Le KGEI fait un focus sur les débits d'étiage, en donnant plus de poids aux faibles débits, et permet d'analyser la capacité d'un modèle hydrologique à représenter les bas débits. Le KGEreg s'applique à analyser le régime moyen journalier des débits observés, tandis que le NSEreglog s'attache aux plus faibles débits du régime moyen journalier. A noter que le critère KGE ne peut pas être appliqué aux débits transformés par la fonction logarithme, comme montré par Santos et al. (2018), car la fonction utilisée pour le calcul du KGE implique une instabilité mathématique pour les débits proches de 0. L'analyse de la performance des modèles sur le régime tient alors compte des critères de KGE et KGEreg, tandis que la performance des modèles sur les étiages analyse les KGEI et NSEreglog.

Les indicateurs caractéristiques analysés décrivent la représentation des débits de crue et d'étiage de manière cohérente avec les habitudes des gestionnaires. Ils permettent d'évaluer la capacité des modèles à représenter des valeurs extrêmes dans la gamme des débits observés :

- Le QJXA10 est le débit journalier maximal de période de retour 10 ans,
- Le QMNA5 est le débit mensuel minimal de période de retour 5 ans,
- Le VCN7₅ est le débit journalier minimal calculé sur une moyenne glissante de 7 jours, de période de retour 5 ans.

B.2. GRSD

B.2.1. Principe du modèle

Le modèle hydrologique GRSD est la version spatialisée des modèles de simulation pluie-débit de la famille GR. Il s'agit d'un modèle semi-distribué conceptuel qui a été développé à partir des approches étudiées par Lobligeois (2014) pour spatialiser les structures globales des modèles hydrologiques GR. Ce modèle est suffisamment robuste pour être appliqué en contexte de changement climatique (de Lavenne et al., 2016, Thirel et al., 2018) et a montré son efficacité sur le territoire français (de Lavenne et al., 2019). Il s'agit d'un ensemble de modèles globaux GR reliés par un modèle de propagation hydraulique. A la différence d'un modèle global qui considère le bassin versant comme une seule entité spatiale, le modèle semi-distribué 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).

Une modélisation hydrologique globale GR5J est appliquée à chaque maille du bassin versant (Figure 47). Le modèle pluie-débit GR5J est un modèle à réservoir, continu et global (Figure 48). C'est un modèle développé de manière empirique, dont la structure s'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 sur la Figure 48. Il s'agit d'une amélioration du modèle GR4J qui avait été utilisé dans l'étude de référence Explore 2070 (Chauveau et al., 2013). Le modèle semi-distribué GRSD utilise aussi le module neige conceptuel à base d'une fonction degré-jour CemaNeige développé par Valéry (2010).

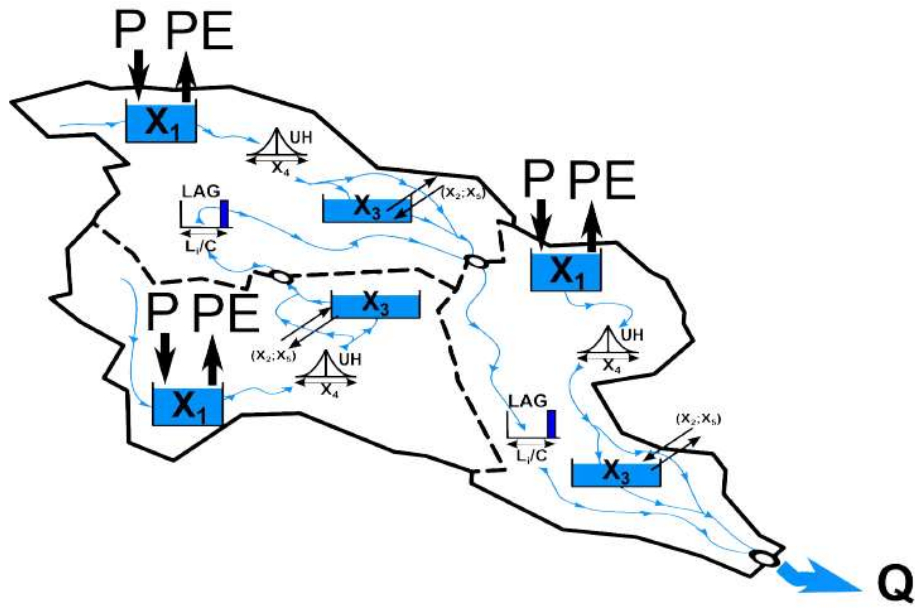
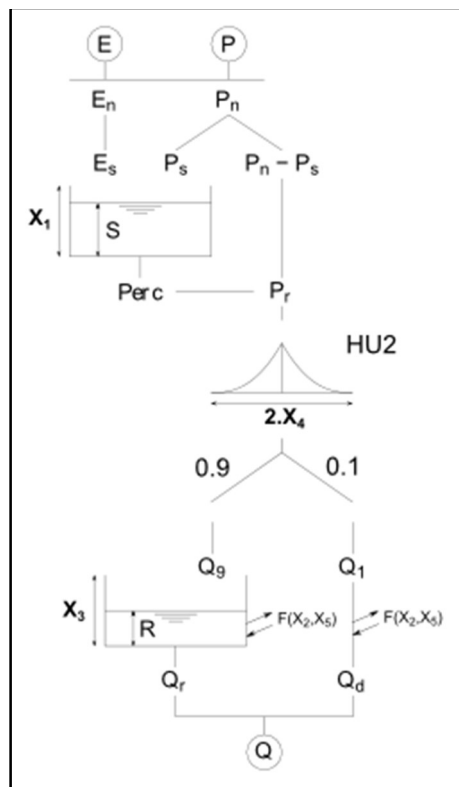


Figure 47 : Représentation schématique de GRSD. D'après Lobligeois et al. (2014).



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

Figure 48 : Schéma du modèle pluie-débit global GR5J (tiré de Le Moine, 2008).

Le modèle de propagation hydraulique utilisé pour router les débits produits par chaque maille vers la maille en aval est un simple décalage temporel, déterminé en fonction de la distance hydraulique entre les exutoires des mailles et le paramètre de célérité :

$$Q_p(t) = a_0 \cdot Q_{amont}(t - INT(\tau)) + a_1 \cdot Q_{amont}(t - (INT(\tau) + 1)) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \tau = \frac{L}{C} \\ a_0 = 1 - (\tau - INT(\tau)) \\ a_1 = \tau - INT(\tau) \end{cases} \quad \text{Eq. 6}$$

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.

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 X4 (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 X4 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 X4 est distribué sur les sous-bassins par la relation suivante :

$$x_{4_i} = \left(\frac{S_i}{S_{bv}} \right)^{0.3} \cdot X_4 \quad \text{Eq. 7}$$

avec x_{4_i} 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 X4 le paramètre calé sur le bassin versant.

B.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 calage du modèle GR5J global sur chaque sous-bassin afin de fournir un jeu de paramètre qui servira de point de départ au calage pas-à-pas (de Lavenne et al., 2019). Ce calage dépend de la définition par l'utilisateur d'une fonction-objectif, c'est-à-dire un critère numérique dont on cherche à optimiser la valeur. Dans notre cas, nous utiliserons un critère basé sur le critère d'efficacité de Kling-Gupta (KGE, Gupta et al, 2009). Ce critère quadratique est un bon substitut au critère classique de Nash-Sutcliffe (NSE), en cela qu'il n'est pas mathématiquement contraint à une gamme sous-optimale de valeurs en ce qui concerne sa composante de 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. Deux fonctions-objectif ont été utilisées, basées sur les

critères KGE et NSE : la première cherchant à optimiser le calage sur l'ensemble des valeurs des débits observés (FO_1 , Eq. 8), et la deuxième optimisant les débits d'étiage (FO_2 , Eq. 9) :

$$FO_1 = KGE + KGEI + KGEreg \quad \text{Eq. 8}$$

$$FO_2 = KGE + KGEI + NSEreglog \quad \text{Eq. 9}$$

La méthode pas-à-pas est une méthode locale développée à INRAE (Michel, 1989 ; Nascimento, 1995). Il a été montré que son rapport « qualité-prix » (avec la qualité étant la performance des modèles en évaluation, et le prix le coût en temps de calcul) est nettement supérieur à celui de méthodes globales qui explorent plus largement l'espace des paramètres. Le nombre de paramètres relativement limité de GRSD permet la mise en œuvre de cette méthode. Une description plus détaillée de cette méthode est disponible dans la thèse de Perrin (2000). Le processus est itératif et adopte une stratégie de déplacement, la plupart du temps, le long des axes de l'espace des paramètres, avec un pas de recherche pouvant varier d'une itération à l'autre.

B.3. SIM2

B.3.1. Principe du modèle

SIM2 (Le Moigne et al., 2020) est un modèle hydrométéorologique à bases physiques développé par Météo-France, en partenariat avec MinesParisTech et l'UPMC (et désormais l'ENS) pour la partie hydrogéologie. La chaîne SIM2 est utilisée en temps réel en opérationnel à Météo-France depuis le début des années 2000, pour le suivi temps réel hydrométéorologique de la France, la caractérisation hydro-climatique, la gestion de la ressource en eau, le suivi de la sécheresse, et permet à Météo-France de contribuer au Bulletin de Situation Hydrologique Mensuel^{17,18}.

La chaîne de modélisation SIM2 (Habets et al., 2008) est composée de trois modèles différents (Figure 49). Le module SAFRAN (Vidal et al., 2010) permet à partir d'observations météorologiques et d'analyses de modèles de produire des champs de variables atmosphériques sur une grille couvrant la France. Le modèle SURFEX (contenant le cœur du code ISBA) est le schéma de surface qui permet de modéliser l'évolution du sol et ses échanges avec la surface et le souterrain. Enfin, le modèle MODCOU (Ledoux et al., 1989) est un modèle hydrogéologique qui permet de simuler les écoulements de l'eau dans le réseau de surface et dans le souterrain et donne en sortie les débits pour environ 900 stations hydrométriques réparties sur l'ensemble de la France.

Actuellement, la chaîne est utilisée dans sa version SIM2, pour laquelle plusieurs améliorations ont été portées dans l'outil à différents niveaux, afin d'améliorer la qualité de la modélisation, par rapport à la version SIM précédente. Tout d'abord, dans le modèle SAFRAN, une amélioration de la qualité de la restitution du rayonnement infrarouge incident en fonction de la nébulosité et de l'altitude a été implémentée. De plus, les principales améliorations concernent le schéma de surface SURFEX. Tout d'abord, le mode de représentation de la physique du sol a évolué vers la mise en place d'une discrétisation du sol en quatorze couches avec une approche des échanges d'eau et d'énergie dans le sol basée sur l'utilisation d'équations de diffusion. Les quatorze couches sont utilisées pour le

¹⁷ http://www.eaufrance.fr/publications/bulletin-national-de-situation-233/?id_article=1

¹⁸ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2018/suivi-hydrologique-dernier-bilan>

calcul de l'évolution de la température dans le sol. Quant à l'évolution de l'eau du sol, elle est calculée sur une partie de ces quatorze couches, pour une profondeur totale variable selon la végétation (Figure 50).

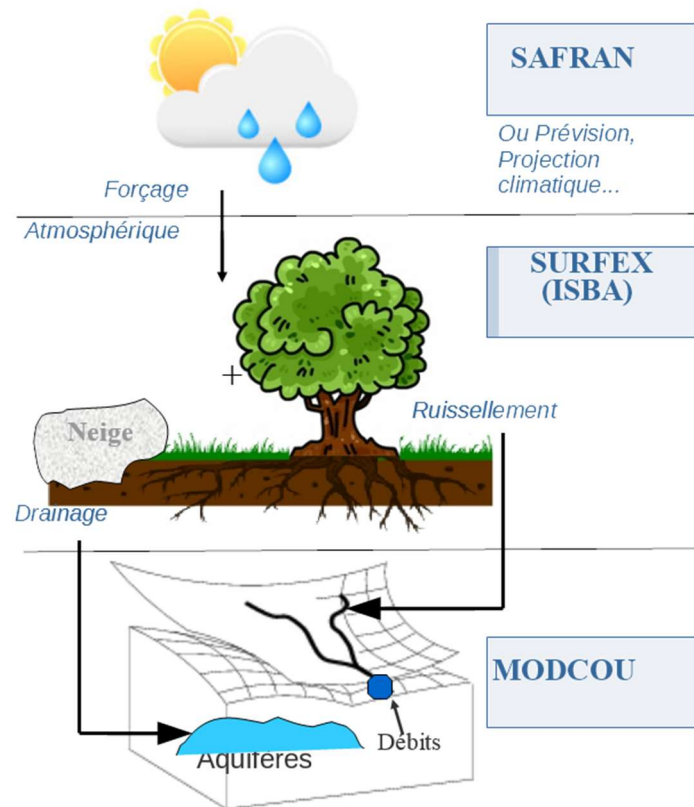


Figure 49 : La chaîne de modélisation SIM2 (source : Météo-France).

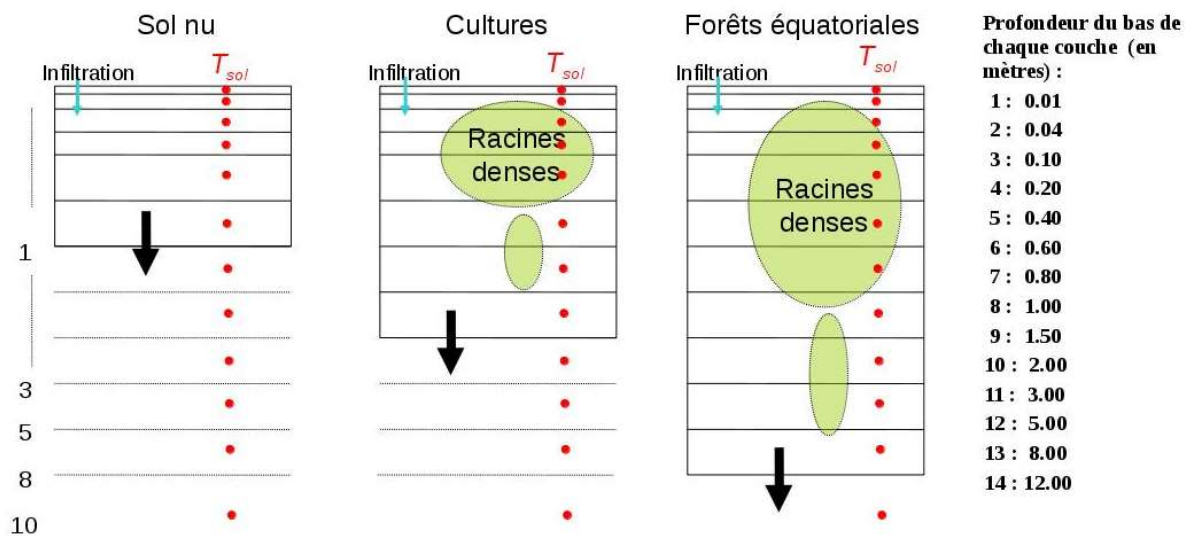


Figure 50 : La discrétisation du sol dans SIM2 (source Météo-France). Représentation des quatorze couches de sols modélisées dans SIM2, utilisées intégralement pour le calcul de la température du sol et exemples de couches utilisées pour le bilan d'eau selon le type d'occupation du sol : sol nu à gauche, cultures au centre et forêts équatoriales à droite.

SIM2 utilise un mode dit « patch », ce qui permet d’avoir pour chaque point de grille plusieurs types de végétation modélisés pour une meilleure prise en compte de la variabilité sous-maille de l’occupation des sols, et ce en utilisant une version actualisée des bases de données physiographiques.

Enfin, une dernière évolution dans la chaîne SIM2 concerne plus spécifiquement l’hydrologie, avec la mise en place d’un système de réservoirs conceptuels. Ceci permet de simuler un fonctionnement de nappe là où il n’y a pas de nappe modélisée explicitement dans MODCOU. Ces réservoirs sont de deux types : réservoirs à capacité infinie pour la montagne (Lafaysse et al. 2011) et réservoirs à capacité finie pour la plaine (Artinyan et al. 2008).

La chaîne SIM2 tourne sur la France entière et nécessite des capacités de calcul importantes en termes de volume de données et de temps/puissance de calcul. La chaîne est activée sur le supercalculateur de Météo-France en mode multi-processeurs.

B.3.2. Adaptation des sorties de débit de SIM2

SIM2 est un modèle à bases physiques qui ne nécessite pas de calage de ses paramètres. Cela veut dire qu’il n’y a pas d’optimisation des paramètres à l’échelle de chaque station, comme le font les autres modèles utilisés dans le projet. Toutefois, une calibration des débits en sortie de SIM2 est ajoutée afin de s’affranchir de certains biais de modélisation. Cette correction consiste en une calibration quantile-quantile, pour laquelle on utilise les données naturalisées produites dans le cadre du projet ainsi que les données modélisées sur une longue période et a été mise en place spécifiquement pour le projet CHIMERE 21.

La Figure 51 expose le principe de la calibration quantile-quantile. On dispose de deux séries de données, une série modélisée et une série de référence, dans notre cas les débits modélisés par SIM2 d’une part et les débits naturalisés d’autre part, et ce pour plusieurs stations. On réalise le quantile-quantile ponctuellement pour chaque station. L’idée est de corriger une valeur modélisée, en cherchant dans la série modélisée quelle est sa fréquence dans la distribution, puis en récupérant dans la série de référence la valeur correspondant à cette même fréquence. Cette valeur sera la valeur corrigée.

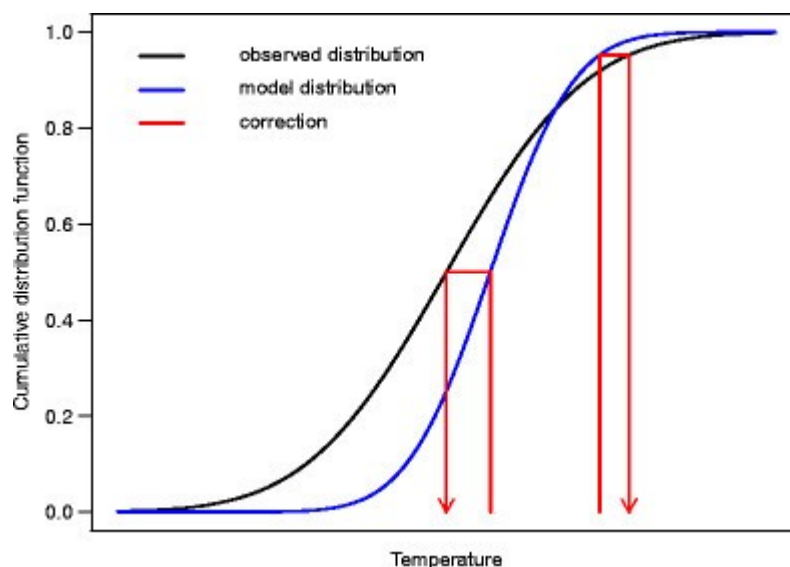


Figure 51 : Principe de la calibration quantile-quantile.

On applique cette méthode quantile-quantile au pas de temps journalier. Pour chaque jour de l'année, on dispose d'une série de débits modélisés, ainsi que d'une série de référence (les débits naturalisés), cette calibration quantile-quantile est donc optimisée pour chaque jour de l'année, quel que soit le régime hydrologique (crue, étiage). Contrairement aux autres modèles hydrologiques, un seul type de calage a été réalisé : il n'y a pas de différenciation entre un calage sur le régime et un calage sur les étiages, car par définition le quantile-quantile tend à coller à l'ensemble de la gamme des débits.

Par homogénéité avec les procédures de calage des autres modèles hydrologiques participants au projet, une procédure de calage-validation (split-sample test) a été effectuée (voir Annexe B.7). La calibration quantile-quantile a tout d'abord été mise en place en utilisant les données sur l'ensemble de la période 1970-2016. Ensuite, le split-sample test consiste à séparer la période en deux sous périodes, mettre en place la calibration sur une des deux sous-périodes et l'appliquer sur l'autre (en inversant ensuite les périodes), afin de juger de la robustesse (i.e. transférabilité temporelle) de la méthode. Les débits SIM2 corrigés par quantile-quantile sur l'ensemble de la période puis dans chacun des cas de split-sample test ont été analysés dans le cadre du projet (Annexe B.7).

Pour appliquer cette méthode à SIM2, différents tests ont été effectués pour obtenir la série corrigée de la meilleure qualité possible. Pour juger de la qualité de la série corrigée par rapport au débit naturalisé, des critères de performances similaires à ceux utilisés pour le calage des autres modèles hydrologiques ont été utilisés (notamment le critère KGE sur le débit, sur l'inverse du débit et sur le régime). Les tests ont concerné principalement deux points de la méthode. D'une part, afin de maximiser le nombre de données disponibles chaque jour, une fenêtre glissante a été mise en place (pour chaque jour de l'année, on utilise les données de la journée et les données des n jours avant et après pour avoir un échantillon plus fourni pour calculer la distribution) : la fenêtre glissante optimale qui a été sélectionnée est de 61 jours. D'autre part, la climatologie des séries modélisées et de référence peut se calculer via l'utilisation de déciles ou de centiles : ce sont les centiles qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats.

La Figure 52 présente le régime annuel moyen sur la période 1970-2016 de la Meuse à Chooz, avant et après correction quantile-quantile (sur toute la période). Avant correction, le score KGE est de 0,89 et le KGE_{reg} de 0,85. On constate un bon comportement de SIM2 sur les hauts débits, mais une tendance marquée à la sous-estimation des débits d'étiage (figure du haut). La correction quantile-quantile permet d'améliorer très nettement la simulation (figure du bas) : après correction, le KGE est de 0,95 et le KGE_{reg} de 0,99.

Des résultats similaires ont été obtenus pour l'ensemble des stations SIM2 du bassin (voir Annexe B.6 sur les performances des modèles hydrologiques).

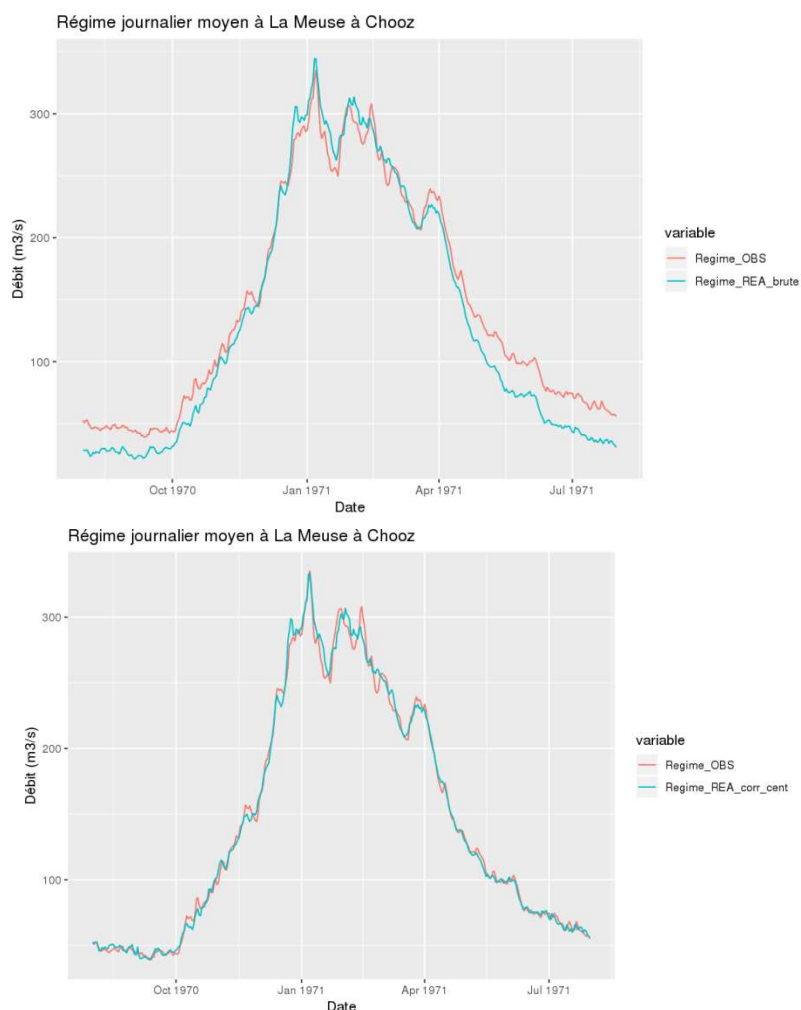


Figure 52 : Régime annuel moyen de la Meuse à Chooz, en haut avant correction quantile-quantile, en bas après application de la correction. Le débit naturalisé est en rouge et le débit SIM2 (brut, ou corrigé par quantile-quantile) est en bleu.

B.4. PRESAGES

B.4.1. Principe du modèle

Le modèle PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères ; Lang et al., 2006) est un modèle développé par l'Université de Lorraine. C'est un modèle conceptuel global qui comprend une composante de production et une composante de routage, de manière similaire aux modèles GR (voir Figure 53). Dans la version utilisée dans CHIMERE 21, il comprend sept paramètres :

- Cor P : coefficient de correction des précipitations (-),
- A : capacité à un jour du réservoir sol (mm)
- CEC : coefficient d'écoulement de crue (%),
- C : durée de l'hydrogramme unitaire (jours),
- CVN : coefficient de vidange de nappe (-),
- CVR : coefficient de vidange rapide supérieur à 1 (-),
- CP : constante de percolation (mm).

Une procédure de calcul automatique des coefficients de tarissement précède le calage. Celle-ci sélectionne toutes les phases de décroissance durant lesquelles les débits ne sont pas directement influencés par les précipitations et en détermine le coefficient de tarissement. Un traitement statistique en extrait les quantiles 25, 50 et 75%. Les valeurs 25 et 75% peuvent servir de contraintes pour le calage ou le modélisateur peut choisir d'imposer la valeur médiane et dans ce cas CVN n'est plus à caler. Ce mode de fonctionnement développé pour la prévision des étiages a montré ses limites pour ce type de simulations. Les performances de PRESAGES en calage se situant nettement en deçà des autres modèles, les contraintes appliquées au paramètre CVN ont été abandonnées.

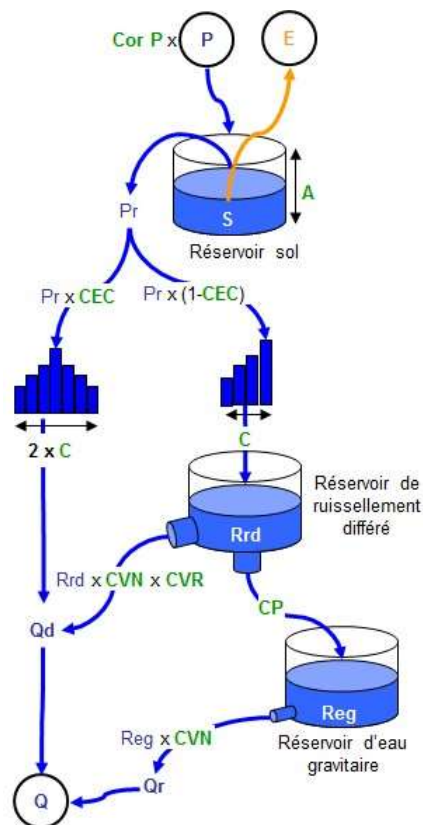


Figure 53 : Représentation schématique du modèle PRESAGES.

B.4.2. Calage

Pour ce projet, PRESAGES a été calé de deux manières :

- de manière simple avec le critère de Nash-Sutcliffe sur les débits à la puissance 0,2 afin d'accorder plus de poids aux valeurs de basses-eaux. Puis nous avons procédé à une correction des simulations selon la méthode exposée dans Bourgin et al. (2015).
- à la lumière des calages effectués pour GRSD et MORDOR, nous avons également utilisé un critère plus élaboré constitué d'une combinaison de valeurs de KGE. La moyenne de KGE, KGEI et KGEreg pour le calage global et $(KGE + 2 \times KGEI + KGE(Q \text{ basses eaux}) + KGEreg) / 5$ pour les étiages. KGE(Q basses eaux) utilise les débits pendant la période de basses-eaux.

Nous avons gardé les simulations issues des calages réalisés selon la deuxième manière car les critères sont plus satisfaisants, la procédure de calcul est plus courte et la correction a posteriori peut poser des questions d'ordre méthodologique notamment pour des classes de valeurs non observées pendant la période de calage. Le modèle et toutes ces procédures ont été développés avec Matlab®. L'optimisation du critère est réalisée avec la fonction *fmincon* de l'outil Optimization Toolbox avec l'algorithme *Interior-point*¹⁹ et 16 points de départ.

De plus amples détails sur les codes de PRESAGES sont disponibles dans François (2018).

B.5. MORDOR

B.5.1. Principe du modèle

Le modèle conceptuel MORDOR (Modèle à Réservoirs de Détermination Objective du Ruissellement ; Garçon, 1996) a été développé par EDF à des fins d'hydrologie opérationnelle (crues extrêmes, prévisions, hydrologie générale, changement climatique). Il a ces dernières années largement évolué, pour donner naissance à plusieurs versions : une version MORDOR-SD (« semi-distribué ») (Garavaglia et al. 2017), intégrant un découpage en bandes d'altitude ; une version MORDOR-TS (« totalement spatialisé »), qui y ajoute un découpage en mailles hydrologiques, i.e. en sous-bassins de superficie choisie. C'est cette dernière version qui est utilisée ici, sous le terme générique MORDOR. Le modèle est composé de cinq réservoirs associés à une variable d'état, à savoir le stock de neige, le stock superficiel, le stock évaporant, le stock intermédiaire et le stock profond (Figure 54). Les forçages météorologiques (précipitation et température) sont répartis sur chaque bande d'altitude via des gradients orographiques. Les modules neige et pluie-débit du modèle permettent de calculer la part nivale de l'écoulement, et distinguent trois composantes d'écoulement (ruissellement de surface, écoulements de versant et débit de base). Dans sa version « TS », cette modélisation est appliquée sur chaque maille du bassin versant, et le débit est ensuite propagé aux points d'intérêt par une fonction de transfert de type onde diffusante. Le calage de cette version distribuée fait l'objet d'une méthodologie propre, destinée à produire des simulations spatialement cohérentes à l'échelle d'une vallée par combinaison de différentes méthodes de régionalisation de paramètres (Rouhier, 2018 ; Rouhier et al, 2018).

¹⁹ <https://fr.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#brnpd5f>

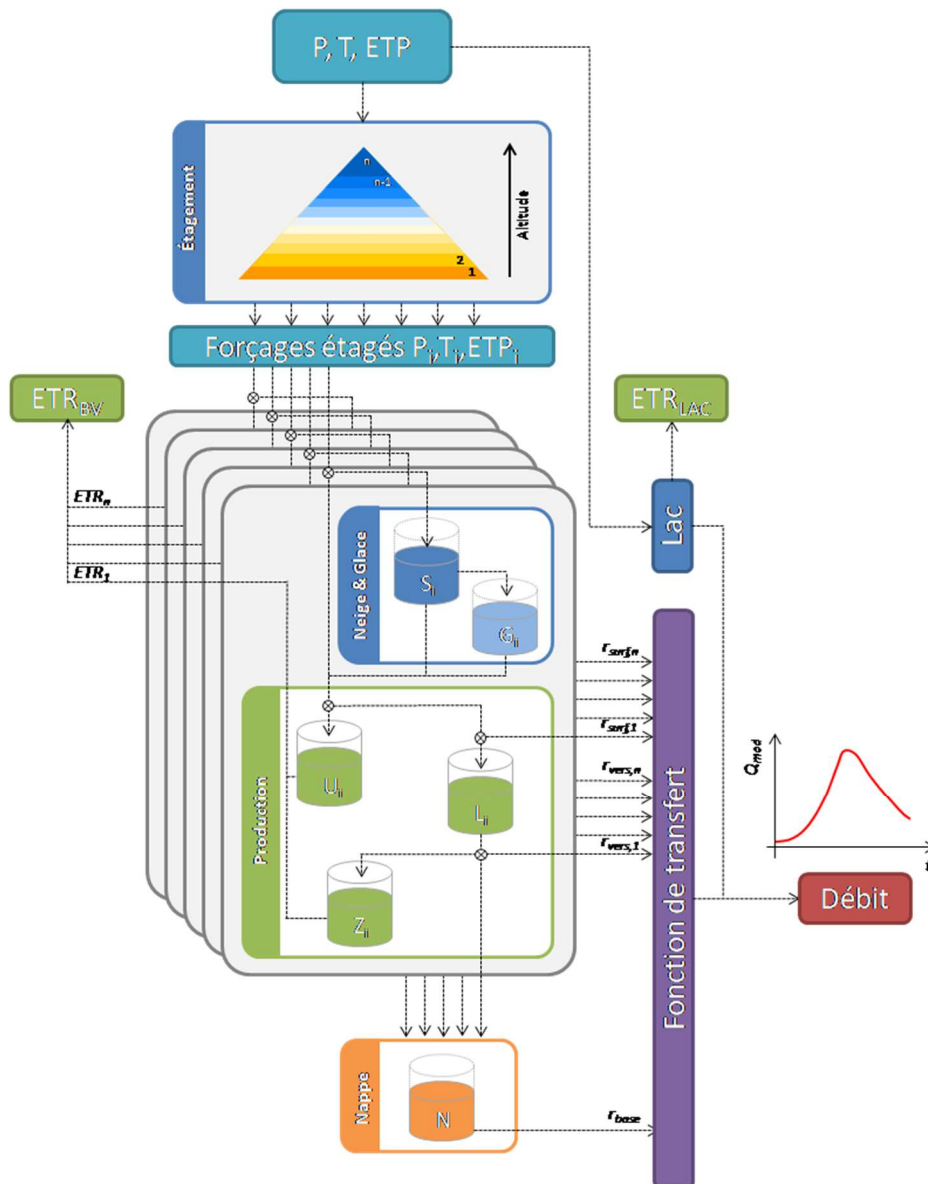


Figure 54 : Structure du modèle MORDOR

B.5.2. Calage

Dans le cadre du projet, le calage de MORDOR-TS a été réalisé de manière séquentielle : les paramètres des sous-bassins amonts ont été calés en premier, suivis des paramètres des sous-bassins aval, et ainsi de suite jusqu'à l'exutoire du bassin. Onze paramètres ont été calés (8 pour le module pluie-débit, 2 pour le module neige, 1 pour la fonction de transfert). Deux fonctions-objectif différentes ont été utilisées: la première cherchant à optimiser le calage sur l'ensemble des valeurs des débits observés (FO_1), et la deuxième plus orientée sur les débits d'étiage (FO_2). L'optimisation est réalisée via un algorithme multi-objectifs (CaRamel, Monteil et al. 2020) permettant d'identifier les fronts de Pareto dans l'espace des composantes de la fonction-objectif utilisée.

$$FO_1 = \text{comp}(KGE, KGE_{reg}, KGE(Q_{clmp}))$$

$$FO_2 = \text{comp}(KGE, NSE_{reglog}, KGE(Q_{clmp}))$$

Avec Q_{clmp} les débits classés mensuels pondérés. Le critère KGE mesure la qualité 'générale' du modèle, à la fois en terme de volume et de temporalité. Le critère KGE_{reg} s'intéresse à la reproduction

du régime hydrologique, et le critère NSEreglog zoome sur les bas débits de ce régime. Le critère KGE(Qclmp) s'intéresse enfin à la dimension fréquentielle, et plus particulièrement aux forts débits. L'objectif de ces formulations, régulièrement utilisées pour le modèle MORDOR, est de contraindre l'ensemble des paramètres du modèle et de construire une modélisation 'équilibrée' du cycle hydrologique.

À retenir :

Dans ces sections, nous avons présenté les quatre modèles hydrologiques utilisés dans ce projet, les procédures de calage associées, ainsi que les critères utilisés pour les évaluer.

Nous avons utilisé quatre modèles hydrologiques, GRSD, SIM2, PRESAGES et MORDOR, reposant sur des concepts différents, du conceptuel jusqu'à des bases physiques, et sur des discrétisations spatiales différentes, du global au distribué, en passant par du semi-distribué.

Il convient de noter que deux types de calage seront effectués, sur le régime des débits ainsi que sur les bas débits (sauf pour SIM2 qui n'a fait l'œuvre que d'un seul calage adapté à toute la gamme des débits). La mise en œuvre de ces modèles repose sur la longue expertise des quatre équipes de modélisation associées à ce projet.

B.6. Performance spatiale des modèles hydrologiques

La Figure 55 présente la performance des modèles hydrologiques en calage sur le régime sur les stations où les modèles ont pu être calés. Les performances sont présentées pour les stations présentant moins de 10 % de lacunes (neuf stations pour GRSD, PRESAGES et MORDOR et quatre stations pour SIM2, voir Tableau 2). Pour les quatre modèles, la performance est très satisfaisante, avec des KGE supérieurs à 0,75 pour SIM2 et à 0,85 pour les autres, ainsi qu'un KGEreg supérieur à 0,85 pour GRSD et PRESAGES, supérieur à 0,90 pour MORDOR et à 0,95 pour SIM2. On observe des performances légèrement moindres sur les bassins amont et d'excellents scores à l'exutoire, quel que soit le modèle.

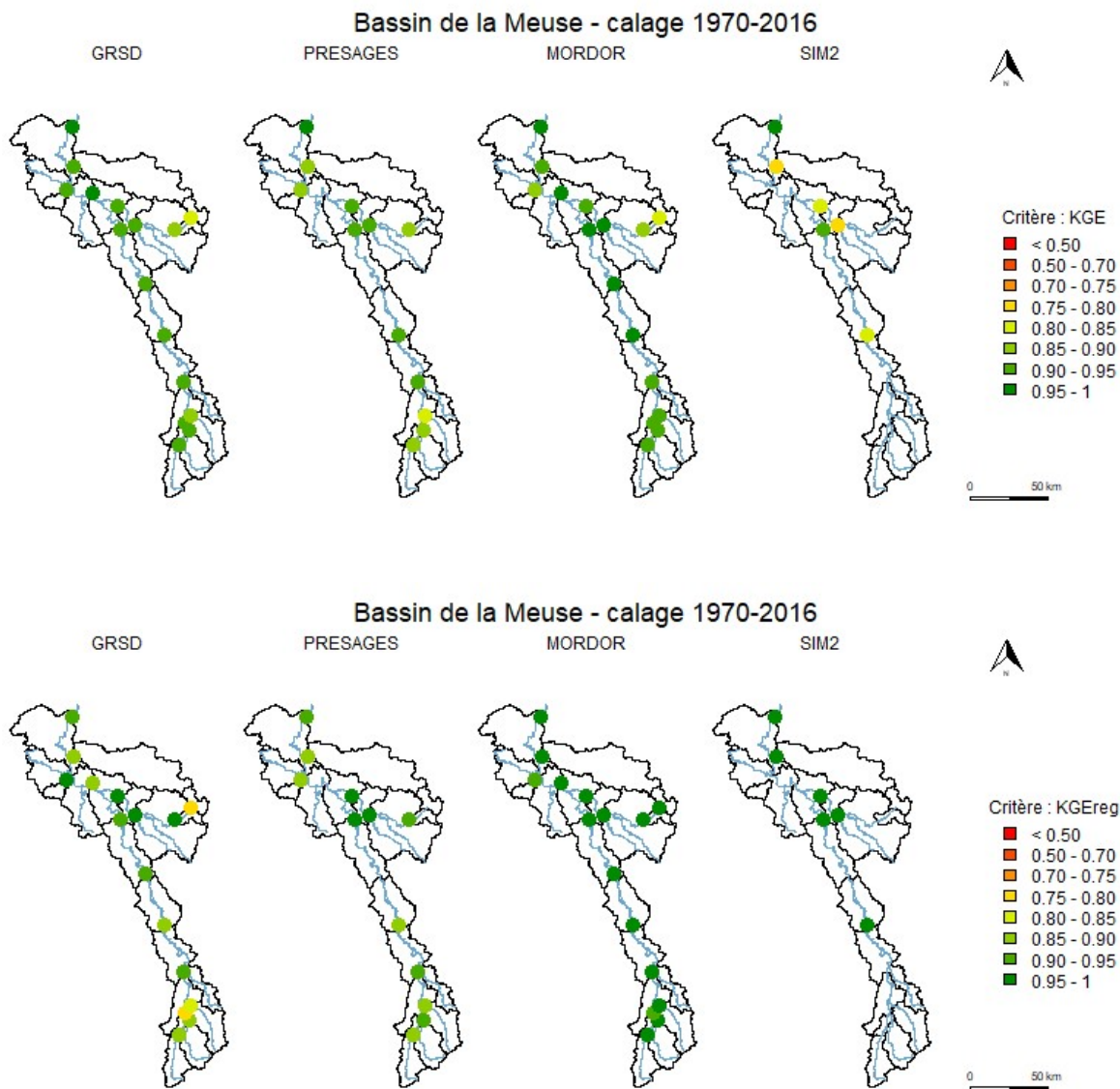


Figure 55 : Cartes de performance des modèles hydrologiques en calage sur le régime sur la période 1970-2016. Critères de performances : KGE (en haut) et KGEreg (en bas).

La Figure 56 présente la performance des modèles hydrologiques en calage sur les étiages (N.B. : SIM2 n'a pas été calé qu'une fois sur l'ensemble de la chronique, voir Annexe B.3.2, ainsi nous jugeons ici des performances des mêmes simulations que précédemment) sur toute la période de référence. Le critère KGEI montre de très bonnes performances pour GRSD et PRESAGES ($KGEI > 0,75$), avec les valeurs les plus faibles sur les bassins de tête, tandis que MORDOR présente de plus faibles performances, toujours satisfaisantes toutefois ($KGE > 0,5$ sur les bassins de tête et $> 0,70$ sur le reste du bassin). Le critère NSEreglog montre des performances très satisfaisantes pour les trois modèles ($NSEreglog > 0,85$), particulièrement pour MORDOR ($> 0,95$). La différence de performance entre ces deux indicateurs s'explique par la formulation de la fonction-objectif utilisée pour le calage de chacun de ces modèles : elle se compose du NSEreglog pour les trois modèles, mais pas du KGEI pour MORDOR, ce qui explique une plus grande difficulté de ce modèle à être très performant pour ce critère.

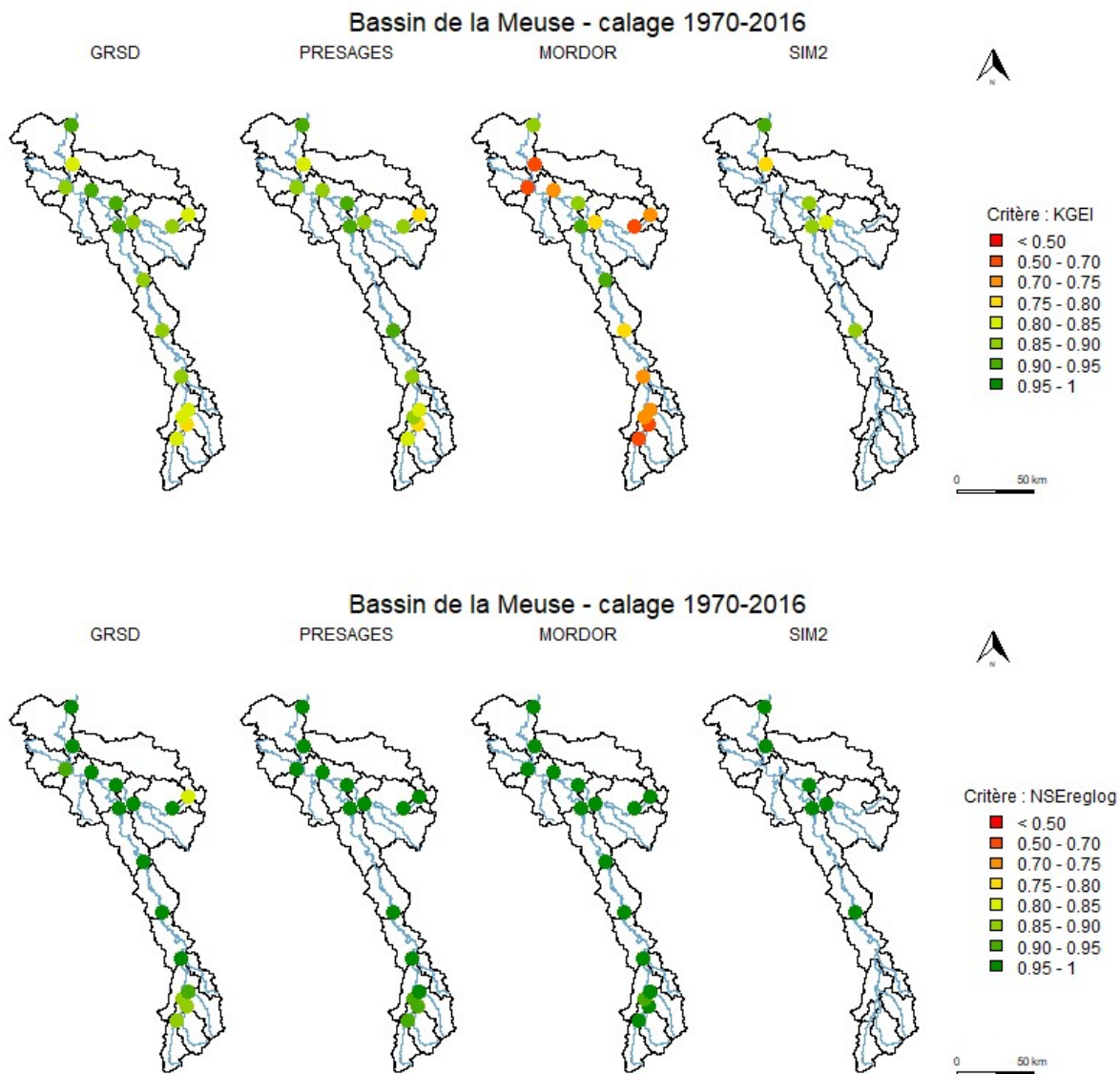


Figure 56 : Cartes de performance des modèles hydrologiques en calage sur les étiages sur la période 1970-2016. Critères de performances : KGEI (en haut) et NSEreglog (en bas).

À retenir :

Dans cette annexe, nous avons présenté la performance des modèles hydrologiques en calage sur la période de référence complète, avec deux approches : un calage sur le régime et un calage sur les étiages. Les quatre modèles hydrologiques se montrent performants à très performants, quel que soit le critère analysé. Des performances légèrement plus basses sont observées sur les têtes de bassin. La difficulté de MORDOR à être aussi performant que les autres pour le KGEI s'explique par l'absence de ce critère dans la fonction-objectif de ce modèle lors du calage, contrairement aux autres modèles.

B.7. Robustesse temporelle des modèles hydrologiques

La robustesse est une mesure de la transférabilité temporelle de ces modèles, caractéristique indispensable dans un contexte d'application sur un futur au climat très différent. Ainsi, dans cette section, nous évaluons cette robustesse en effectuant des calages sur des sous-périodes de la période totale. Par conséquent, la robustesse des modèles hydrologiques est analysée en comparant les critères de performance lors d'un calage-contrôle, ou Split Sample Test (SST, Klemeš, 1986), pour lequel la période totale a été divisée en deux : 1970-1993 et 1993-2016.

La Figure 57 présente les critères de performance obtenus par les quatre modèles calés sur le régime sur les stations du bassin de la Meuse présentant moins de 10 % de lacunes. Les critères de performance obtenus sont très satisfaisants puisqu'ils sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus en calage sur la période totale : quelle que soit la période de calage et de contrôle, le critère de KGE présente des valeurs supérieures à 0,7 et le KGEreg présente des valeurs supérieures à 0,8. En termes de KGE, tous les modèles semblent robustes, avec des valeurs similaires en calage et en contrôle. MORDOR montre les meilleures performances ($> 0,85$) en calage et contrôle et semble être le modèle le plus performant et robuste à la fois. Il en va de même en termes de KGEreg, avec d'excellentes performances ($> 0,95$) pour toutes les stations pour MORDOR et SIM2 en calage et en contrôle.

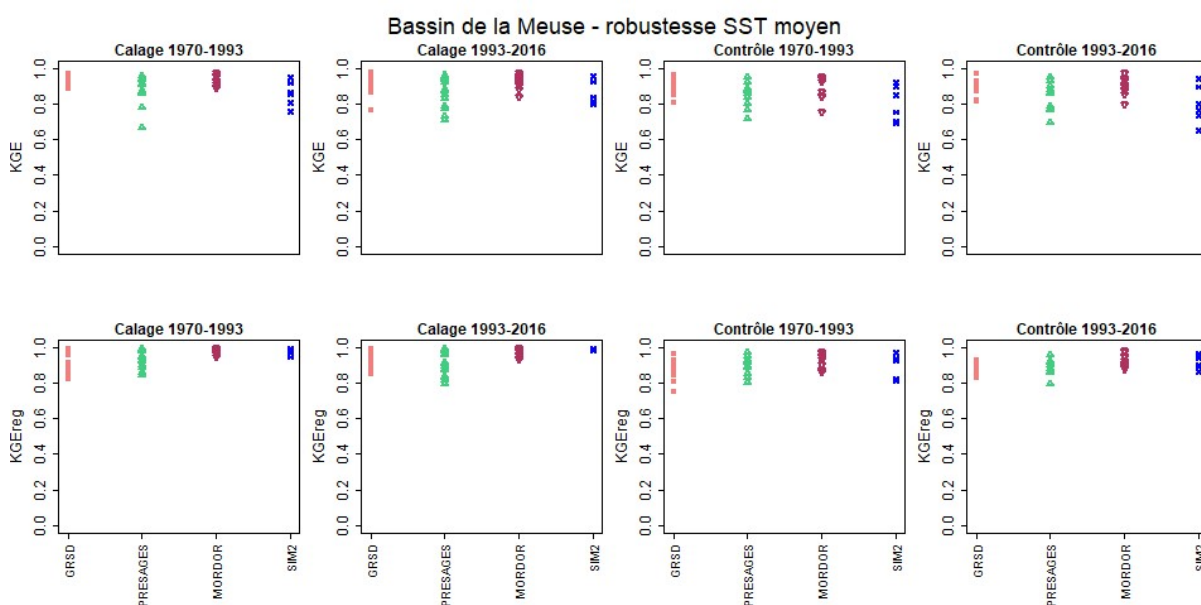


Figure 57 : Performance des modèles hydrologiques en calage et en contrôle sur le régime sur les périodes 1970-1993 et 1993-2016. Critères de performance : KGE (en haut) et KGEreg (en bas) ; chaque symbole représente une station de la Meuse utilisée pour le calage et présentant moins de 10 % de lacunes.

La Figure 58 présente la performance des modèles hydrologiques en calage-contrôle (SST) sur les étiages pour l'ensemble des stations du bassin de la Meuse. En termes de KGEI, GRSD et PRESAGES montrent d'excellentes performances ($> 0,7$) en calage et en contrôle, sans dégradation significative sur la période de contrôle. MORDOR présente des scores plus faibles ($> 0,5$), mais qui restent dans les mêmes gammes de valeurs en calage et en contrôle. En termes de NSEreglog, les trois modèles

montrent encore une fois d'excellentes performances ($> 0,85$), autant en calage qu'en contrôle, avec cette fois-ci les plus hauts scores pour MORDOR et SIM2 ($>0,9$). On en déduit une robustesse satisfaisante pour ces trois modèles concernant le calage sur les étiages.

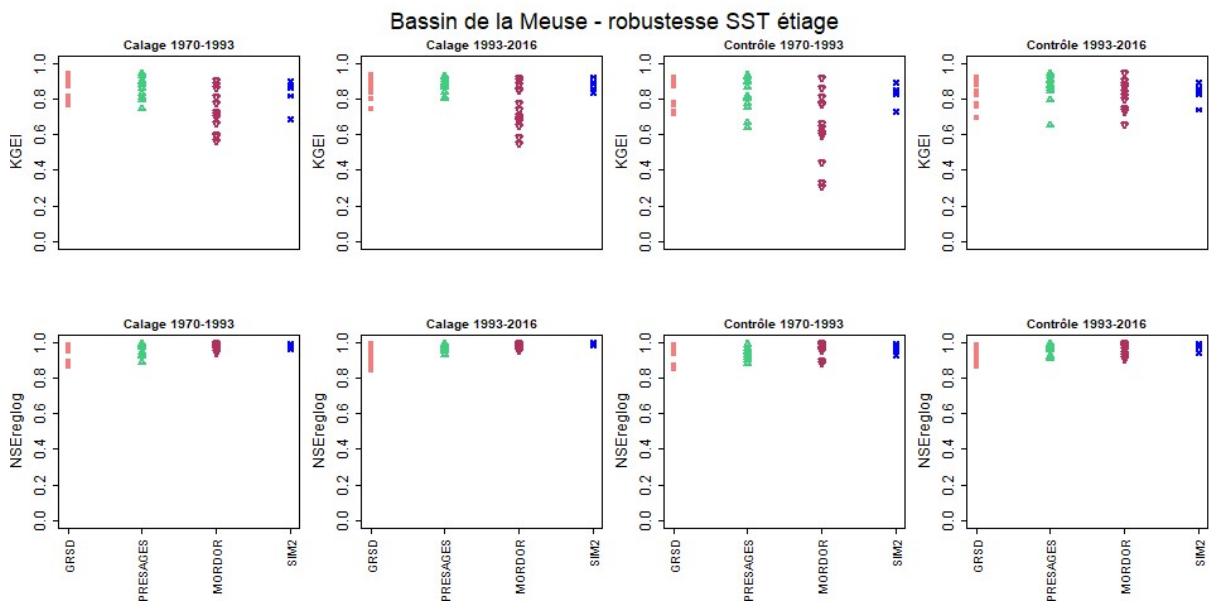


Figure 58 : Performance des modèles hydrologiques en calage et en contrôle sur les étiages sur les périodes 1970-1993 et 1993-2016. Critères de performance : KGEI (en haut) et NSEreglog (en bas) ; chaque symbole représente une station de la Meuse utilisée pour le calage et présentant moins de 10 % de lacunes.

À retenir :

La robustesse (transférabilité temporelle) des quatre modèles hydrologiques a été analysée par un calage-contrôle (Split Sample Test) sur deux sous-périodes de la période totale (1970-1993 et 1993-2016). Que ce soit concernant les calages sur le régime ou ceux sur les étiages, les modèles ont montré de bonnes performances pour les différents indicateurs utilisés, en calage et en contrôle. On en déduit une robustesse satisfaisante de ces modèles et leur utilisation possible avec des projections climatiques dans le cadre de cette étude d'impact.

Annexe C. Méthode de quantification d'incertitude

Afin d'analyser en détail les projections et de quantifier les incertitudes liées aux différentes étapes de la chaîne d'impact, une analyse d'incertitude a été menée sur plusieurs indicateurs hydrologiques. Trois indicateurs, représentatifs de l'ensemble du régime hydrologique et couramment utilisés par les hydrologues de la DREAL Grand-Est, ont été sélectionnés : le VCN3 pour les étiages, le module pour les débits moyens et le quantile 95 (Q95) pour les débits de pointe. Pour chacun de ces trois indicateurs, une méthode de décomposition de variance, présentée dans cette section, a été utilisée pour quantifier et hiérarchiser les principales sources d'incertitude des projections hydrologiques, liées à la chaîne de modélisation d'impact mise en place dans cette étude.

Tout exercice de modélisation génère de l'incertitude liée à trois composantes principales d'un modèle : les données d'entrée, la structure du modèle (i.e. les équations qui le définissent) et le choix des paramètres lors du processus de calage. Or une chaîne d'impact se compose de plusieurs modèles utilisés successivement pour analyser l'impact du changement climatique : (1) les modèles climatiques de circulation générale (GCMs) qui sont forcés par des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCPs), (2) les modèles climatiques régionaux (RCMs), (3) les modèles de descente d'échelle et de débiaisage et (4) les modèles d'impact, comme les modèles hydrologiques. Ainsi, dans une chaîne d'impact, les incertitudes liées à chaque étape de modélisation sont propagées d'une étape à la suivante. Les sorties des modèles d'impact, en bout de chaîne, comportent alors les incertitudes issues de l'ensemble des modèles de la chaîne d'impact. Ce concept, introduit par Mitchell and Hulme (1999), s'appelle la **cascade d'incertitude** (voir aussi Figure 1). Dans toute étude d'impact, il est maintenant admis dans la communauté scientifique que l'analyse de cette cascade d'incertitude est incontournable, afin de caractériser les étapes qui génèrent la plus grande part d'incertitude dans les projections d'impact, comme les projections hydrologiques (voir e.g. Kundzewicz et al., 2008).

La méthode de quantification d'incertitude sélectionnée dans ce travail, QUALYPSO, a été développée récemment par Evin et al. (2019) et est disponible dans un package du langage R (Evin, 2019). QUALYPSO est une méthode d'analyse de variance (ANOVA) qui permet de quantifier et de hiérarchiser les incertitudes issues des différentes étapes d'une chaîne d'impact. Elle se base sur une décomposition de la variance des sorties d'un modèle d'impact, la variance permettant en fait de quantifier l'incertitude liée à ces simulations. QUALYPSO est le résultat du développement de plusieurs approches successives d'ANOVA. Historiquement, l'analyse de variance se fait en comparant les sorties de modèles d'impact moyennées sur une période historique et sur des périodes futures (voir e.g. Addor et al., 2014). Une autre approche utilise l'ensemble des chroniques continues de projection (QE-ANOVA, Hingray and Said, 2014), permettant une estimation plus précise des composantes de l'incertitude (Hingray et al., 2019). Ce type d'ANOVA a déjà été utilisé dans des études d'impact en hydrologie (voir e.g. Vidal et al., 2016 ; Visser et al., 2019). Cependant, ces deux approches ne permettent pas de tenir compte de l'absence de certains couples GCM/RCM dans l'ensemble des modèles climatiques disponibles, rendant la matrice GCM – RCM incomplète et générant une part non négligeable d'incertitude additionnelle. C'est cette lacune que pallie QUALYPSO.

En analysant les sorties d'une chaîne multi-modèle et multi-scénario comme celle mise en place dans ce projet, il est alors possible de quantifier l'ensemble des futurs possibles pour les différents indicateurs hydrologiques de deux façons complémentaires (voir Figure 59) :

- en analysant les chroniques d'anomalie d'un indicateur annuel au cours du temps (Figure 59a), c'est-à-dire la différence de la valeur de cet indicateur entre une période de référence (ici 1976-2005) et chaque horizon de la période de projection (ici 2006-2085). Les anomalies sont calculées par une moyenne glissante sur une période de 30 ans afin de limiter les effets dus à la variabilité naturelle du climat (i.e. les fluctuations interannuelles). Cette première analyse permet de quantifier l'évolution d'un indicateur au cours du temps.
- en analysant les chroniques d'anomalie relative, c'est-à-dire la part de variance de chaque source d'incertitude dans la variance totale (Figure 59b). Cette deuxième analyse permet de hiérarchiser les sources d'incertitude et de caractériser l'évolution de cette hiérarchisation au cours du temps. Cela permet d'identifier les étapes de la chaîne d'impact générant le plus d'incertitude.

Pour bien comprendre ces graphes, il est important de noter que l'anomalie (relative ou non) pour une année donnée représente l'anomalie de la période de 30 ans centrée sur cette année.

Dans cette étude, les sources d'incertitude considérées sont : les RCPs, les GCMs, les RCMs, les modèles hydrologiques (HMs) et la paramétrisation des modèles hydrologiques (HM Param.). La variabilité interne (Variab. Int.) du système ainsi que la variabilité résiduelle (i.e. celle qu'on ne peut pas expliquer, Var. Res.) complètent cette liste.

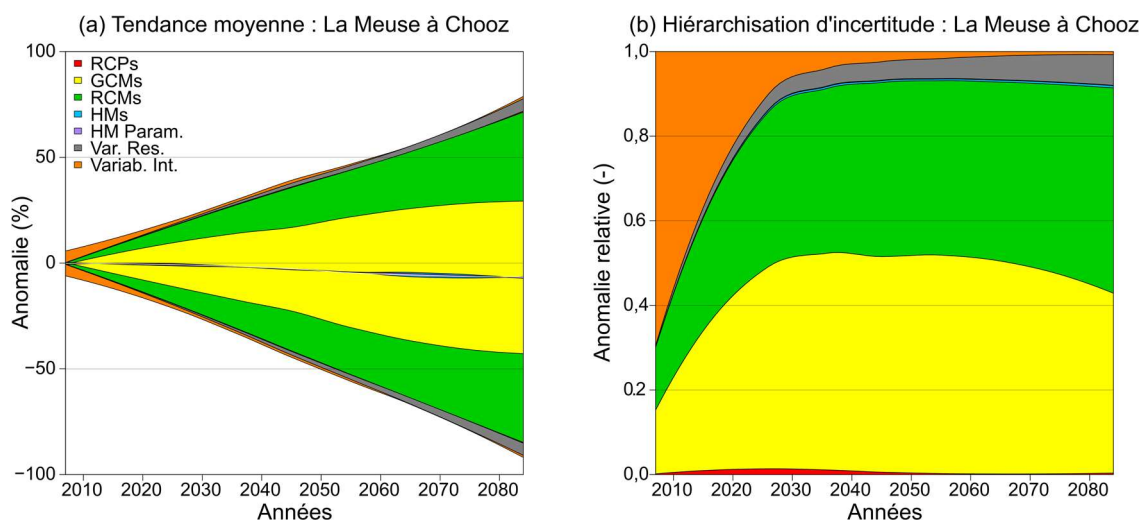


Figure 59 : Exemple de sorties de la méthode QUALYPSO pour les étiages de la Meuse à Chooz : (a) Ensemble des tendances d'anomalie relative de 2006 à 2085 par rapport à la période 1976-2005 ; (b) Hiérarchisation des sources d'incertitude. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : modèles hydrologiques, HM Param. : paramètres des modèles hydrologiques, Var. Res. : variabilité résiduelle, Variab. Int. : variabilité interne.

À retenir :

Dans cette annexe, nous avons présenté l'approche utilisée pour analyser les incertitudes liées aux projections hydrologiques issues d'une chaîne de modélisation d'impact : la méthode QUALYPSO. Cette méthode a été appliquée à trois indicateurs hydrologiques : le VCN3 pour les débits d'étiage, le débit moyen et le quantile 95 (Q95) pour les hauts débits pour chaque station hydrologique étudiée dans ce projet.

QUALYPSO permet (1) d'évaluer les tendances futures en termes d'anomalie entre la période de référence et les horizons futurs et (2) de quantifier et de hiérarchiser les sources d'incertitude les unes par rapport aux autres. Cette décomposition d'incertitude permet d'identifier au cours du temps les maillons de la chaîne de modélisation qui contribuent le plus à l'incertitude totale liée aux projections hydrologiques.

Annexe D. Productions du projet CHIMERE 21

Nous listons dans cette annexe l'ensemble des productions du projet CHIMERE 21, principalement obtenus dans le cadre de ce projet ou dont le développement a bénéficié du projet CHIMERE 21.

D.1. Communication dans des conférences et séminaires

Collet, L., Thirel, G., Wagner, J.-P., Gailhard, J., Rousset, F., Vidal, J.-P. Drought severity characterization based on hydrometeorological indices. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU2019-14475, 2019 EGU General Assembly, 2019.

Collet, L., Thirel, G., Wagner, J.-P., Gailhard, J., Rousset, F., Vidal, J.-P. Forecasting drought severity based on spatial hydro-meteorological indicators. 6th Symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. Liège, Belgium. 13/09/2019

Rousset, F., Le projet CHIMERE 21 : CHIers - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21^e siècle. Séminaire Météo-France. 24/02/2020.

Thirel, G., Collet, L., François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Rousset, F. Hydrological modelling in the French part of the Meuse in the CHIMERE 21 project. 6th Symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. Liège, Belgium. 13/09/2019.

Thirel, G., Collet, L., François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Rousset, F. Hydrological modelling in the French part of the Meuse in the CHIMERE 21 project. 6th Symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. Liège, Belgium. 27/11/2019.

Thirel, G., Collet, L., Etchevers, P., François, D., Gailhard J., Perrin, C., Reverdy, M., Rousset, F., Samacoits, R., Vidal, J.-P., Vincendon, B., & Wagner, J.-P. (2019). CHIMERE 21 : Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21^e siècle. Colloque UNESCO-SHF : Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019.

Thirel, G., Terrier, M., Perrin, C. The CHIMERE 21 project: a multi-hydrological model climate change impact assessment on the French Meuse. 4th Symposium on the hydrological modelling of the Meuse basin. Liège, Belgium. 13 October 2017.

D.2. Publications dans des revues à comité de lecture ou dans des actes de conférences

de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H., & Perrin, C. (2019). A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model. *Water Resources Research*, 55 (11): 8821-8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>

Thirel, G., Collet, L., Etchevers, P., François, D., Gailhard J., Perrin, C., Reverdy, M., Rousset, F., Samacoits, R., Vidal, J.-P., Vincendon, B., & Wagner, J.-P. (2019). CHIMERE 21 : Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21^e siècle. *Actes du colloque UNESCO-SHF : Sécheresses 2019*, Paris 11-12 et 13 décembre 2019.

D.3. Rapports

Collet, L., Thirel, G., Perrin, C., Gailhard, J., Vidal, J.-P., Rousset, F., Wagner, J.-P. CHlrs - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle, 2020. Préviation de seuils de vigilance sécheresse : tests de régression logistique avec des données hydro-climatiques. Rapport de recherche. INRAE. 2020. 25p. [hal-03121126](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03121126)

Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R. et Tocquer, F., 2020. LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE, 98pp., <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>. (extension d'ADAMONT à la France entière réalisée dans le cadre de CHIMERE 21, participation de R. Samacoits).

Terrier, M., Perrin, C., Thirel, G., 2018. Projet CHIMERE 21, rapport sur la naturalisation des débits. Vers une estimation des débits naturels sur le bassin versant de la Meuse. 12/09/2018. 54 pp.

Thirel, G., Collet, L., Etchevers, P., François, D., Gailhard, J., Perrin, C., Reverdy, M., Rousset, F., Samacoits, R., Terrier, P., Vidal, J.-P., Vincendon, B. Rapport intermédiaire du projet CHIMERE 21. CHlrs - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21^e siècle. 12/09/2018. 41 p.

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F., Delaigue, O. François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Perrin, C., Reverdy, M., Samacoits, R., Terrier, M., Vidal, J.-P., Wagner, J.-P., Projet CHIMERE 21. CHlrs - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle. Rapport final. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, convention n° 17C08004. 23/04/2021. 152 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

D.4. Réunions du projet

12 mai 2017 : réunion de lancement du projet entre partenaires scientifiques à INRAE Antony.

12 octobre 2017 : réunion de lancement du projet auprès de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

16 janvier 2018 : réunion d'avancement du projet entre partenaires scientifiques par visioconférence.

29 mai 2018 : réunion à mi-parcours du projet entre partenaires scientifiques à INRAE Antony.

8 octobre 2018 : réunion à mi-parcours du projet auprès de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

31 janvier 2019 : réunion spécifique sur la modélisation hydrologique entre les partenaires scientifiques par visioconférence.

3 septembre 2020 : réunion de clôture du projet entre partenaires scientifiques par visioconférence.

4 juin 2021 : séminaire de restitution auprès de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

D.5. Données

(en gras, les données disponibles librement et mises à disposition de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse)

Projections climatiques sur la France entière descendues en échelle par la méthode AdaMont²⁰.

Projections climatiques sur la France entière descendues en échelle par la méthode Scope-Climat (2 couples GCM/RCM).

Projections hydrologiques sur le bassin versant de la Meuse produites par les quatre modèles hydrologiques forcés par les projections AdaMont.

Indicateurs sur les projections climatiques.

Indicateurs sur les projections hydrologiques.

Relations statistiques (glm) entre indicateurs météorologiques de sécheresse et seuils de vigilance.

Fiches stations.

D.6. Méthodes

Adaptation de la descente d'échelle ADAMONT à la France entière.

Mise en place de SCOPE.

Mise en place d'une régression (glm) pour les indicateurs.

²⁰ Ces projections climatiques (mises à jour) sont rendues disponibles gratuitement sur le portail climatique DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>).

Annexe E. Evolution du climat pour chaque couple GCM-RCM

Dans cette annexe, nous présentons l'évolution du climat pour chacun des couples GCM-RCM (voir Tableau 3) descendus en échelle par ADAMONT entre une période de référence (1976-2005) et trois périodes futures : le futur proche (2021-2050), le futur moyen (2051-2070) et le futur lointain (2071-2100). Les évolutions sont présentées pour les deux RCPs (4.5 et 8.5) ainsi que pour les températures et les précipitations. Les quatre saisons sont représentées : hiver (DJF), printemps (MAM), été (JJA) et automne (SON).

GCM : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 ~ RCM : CNRM-ALADIN53

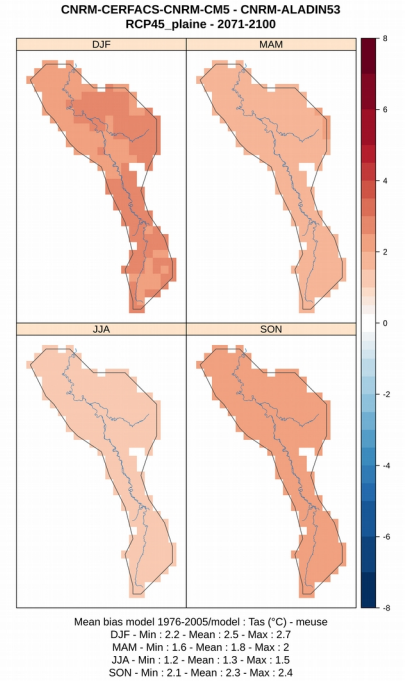
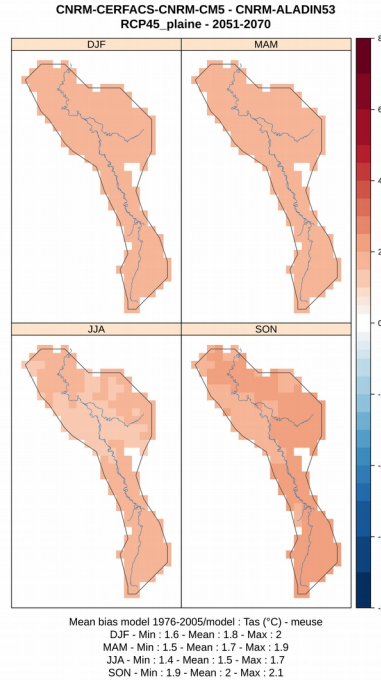
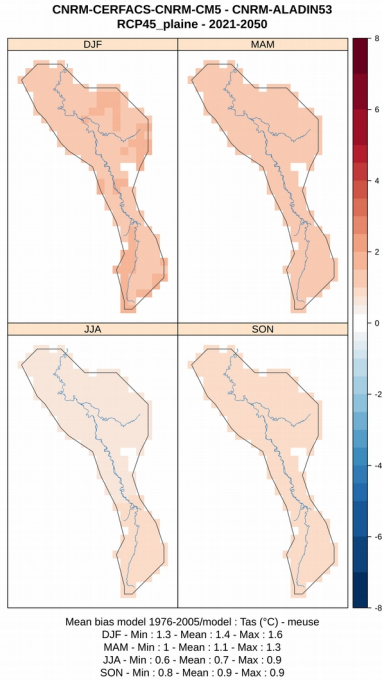
Paramètre : Température

Futur proche

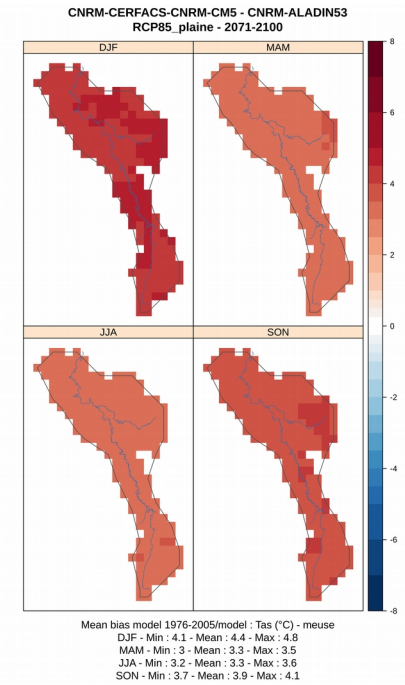
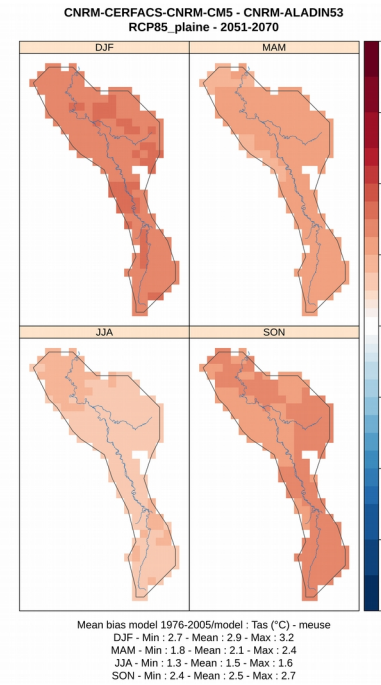
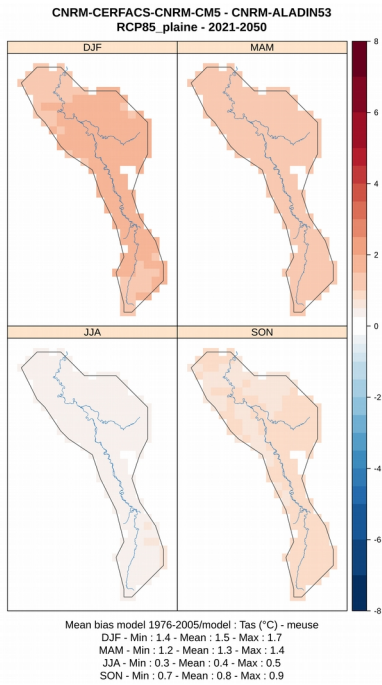
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 ~ RCM : CNRM-ALADIN53

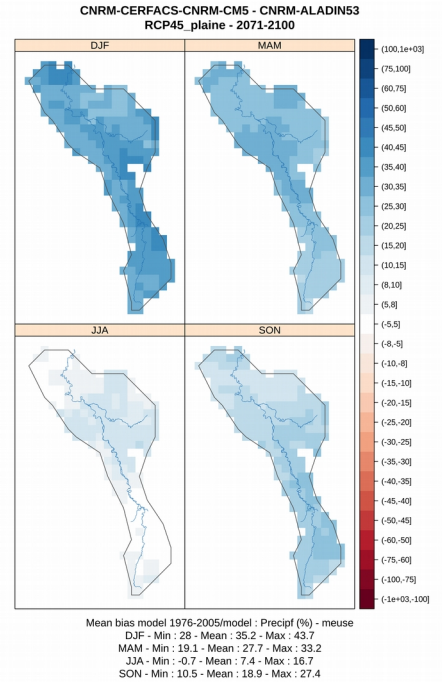
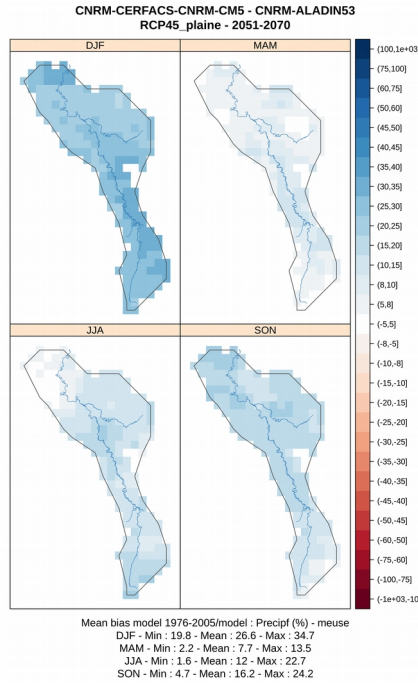
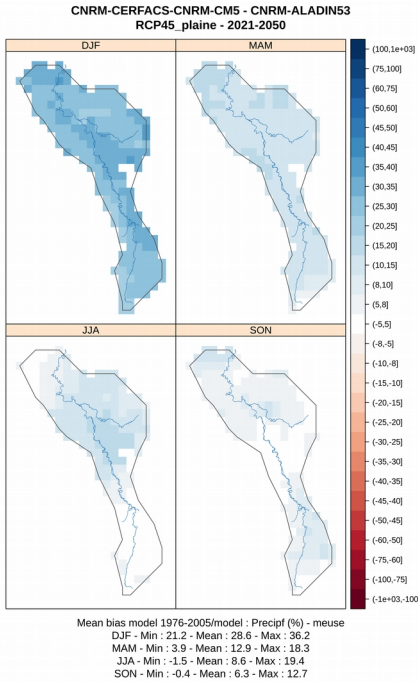
Paramètre : Précipitations

Futur proche

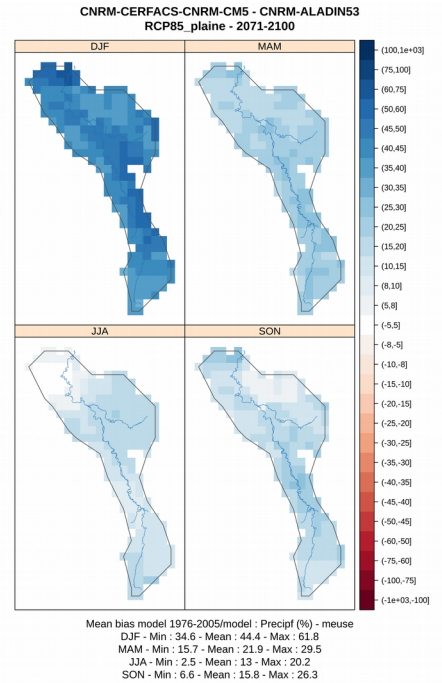
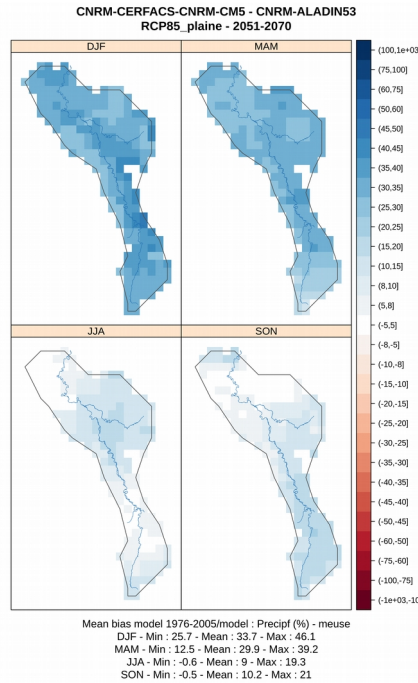
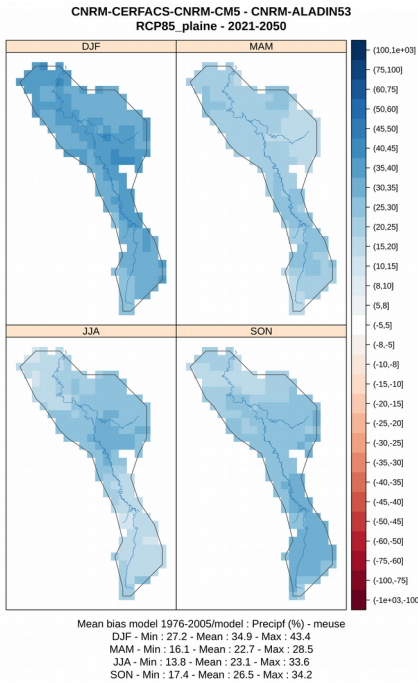
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : IPSL-CM5A-MR ~ RCM : IPSL-INERIS-WRF331F

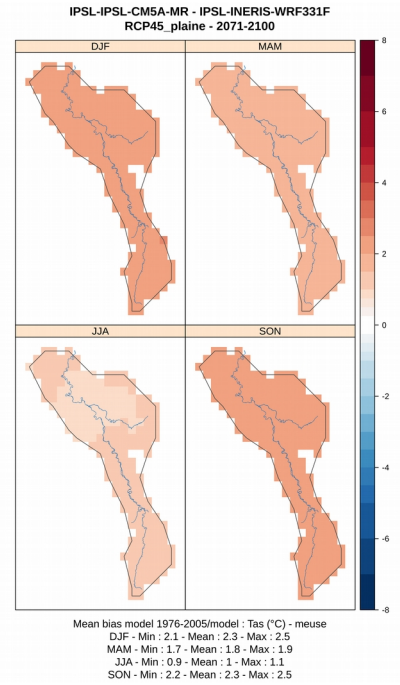
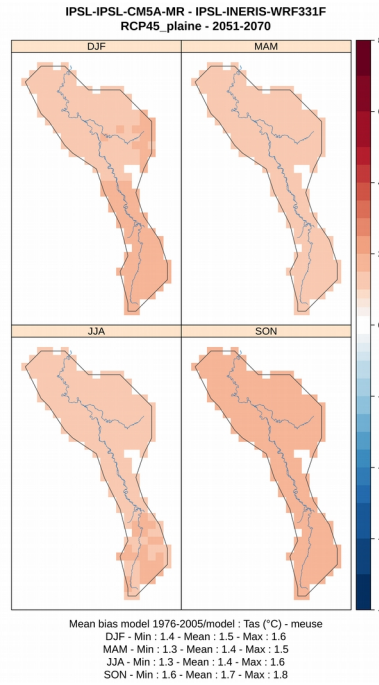
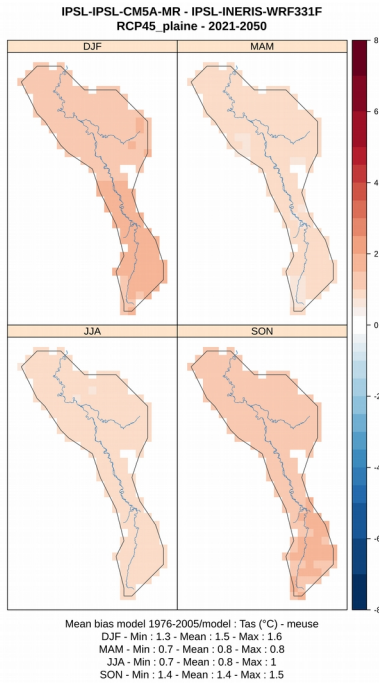
Paramètre : Température

Futur proche

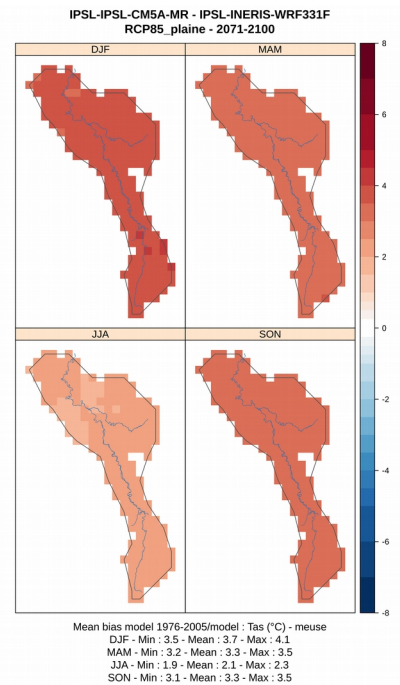
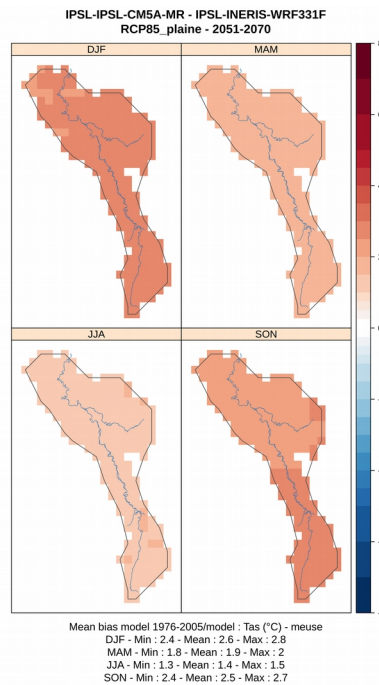
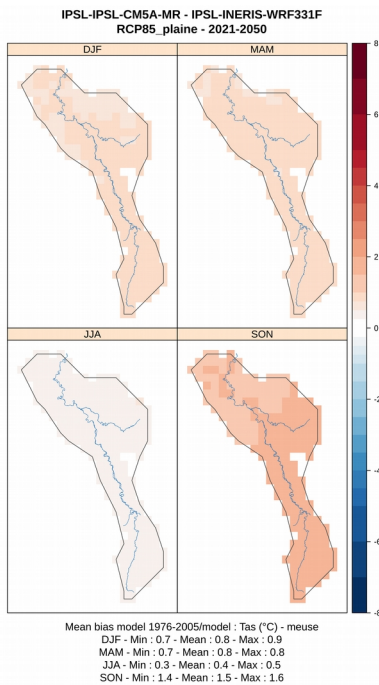
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : IPSL-CM5A-MR ~ RCM : IPSL-INERIS-WRF331F

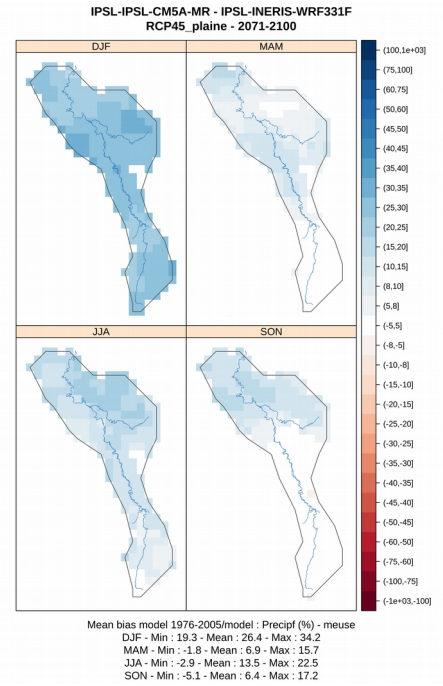
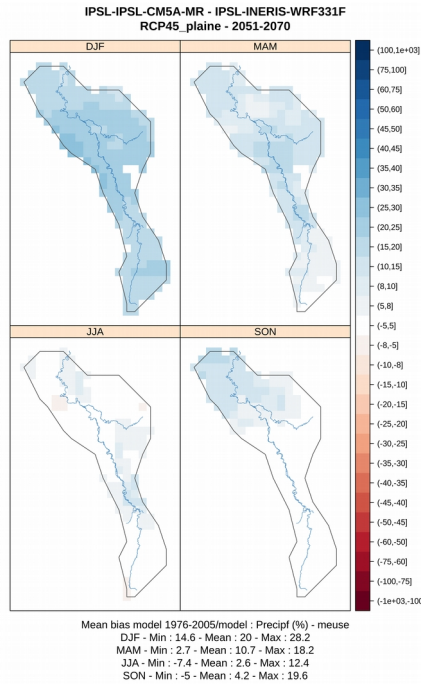
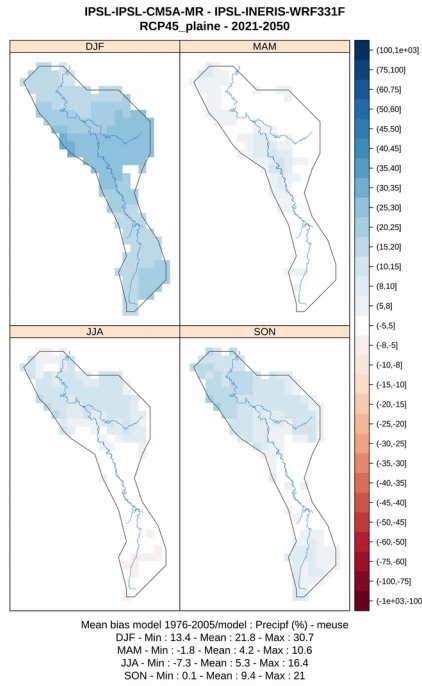
Paramètre : Précipitations

Futur proche

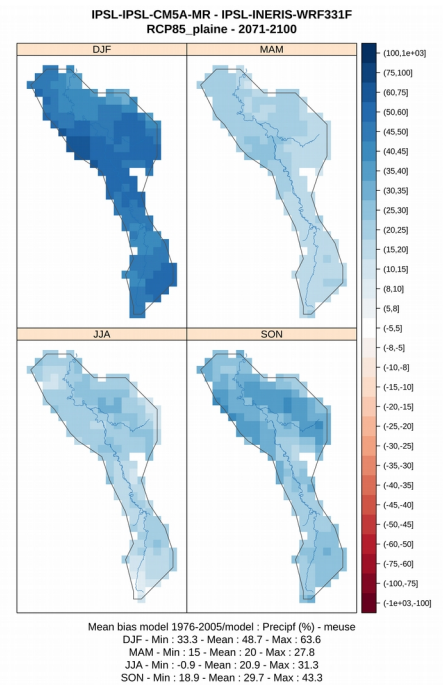
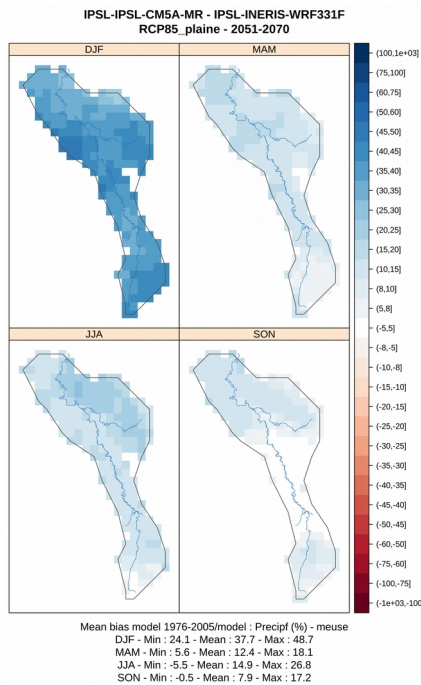
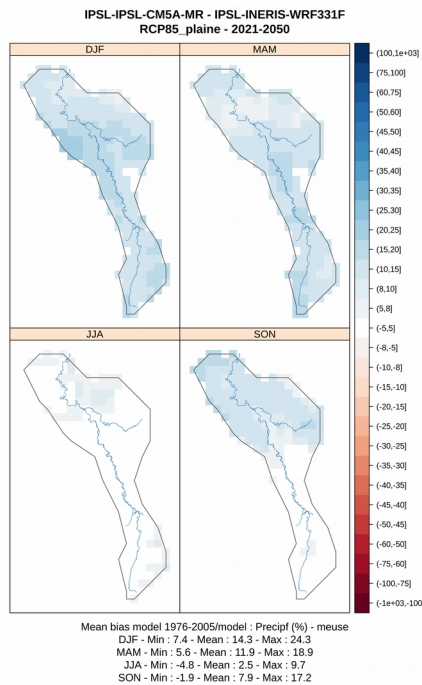
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 ~ RCM : SMHI-RCA4

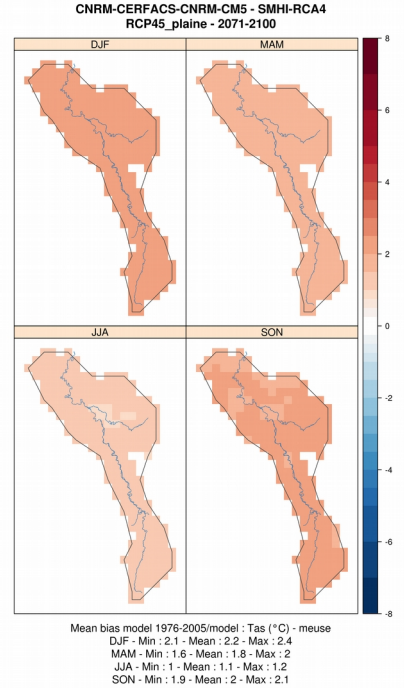
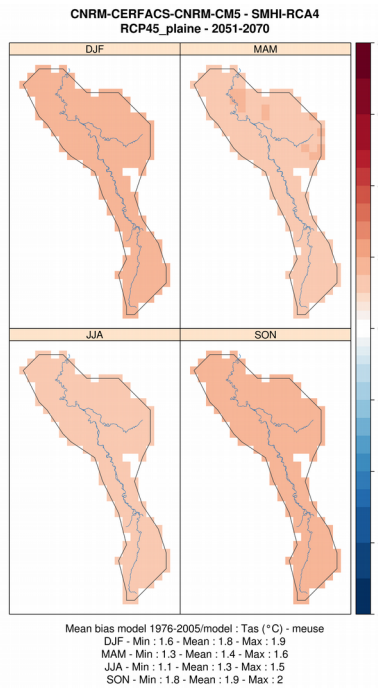
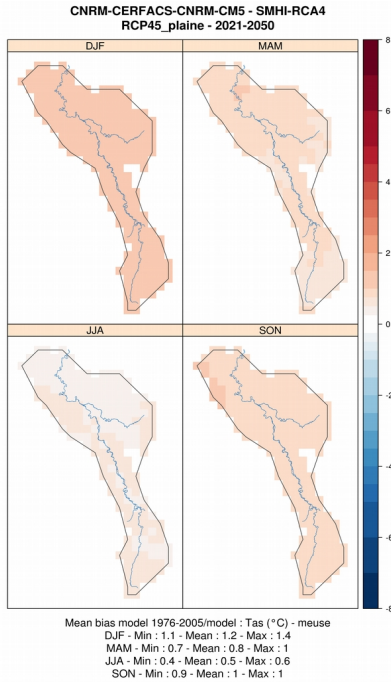
Paramètre : Température

Futur proche

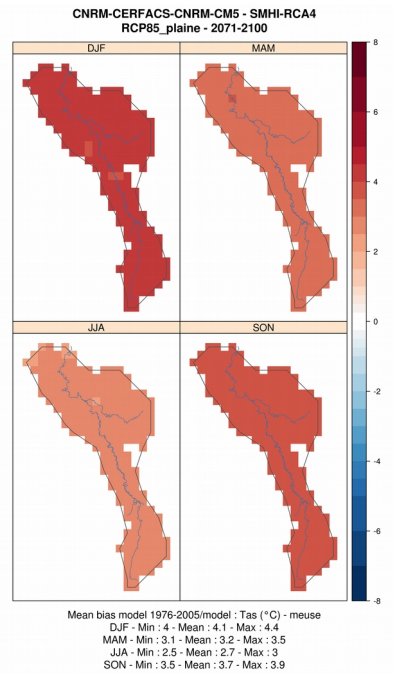
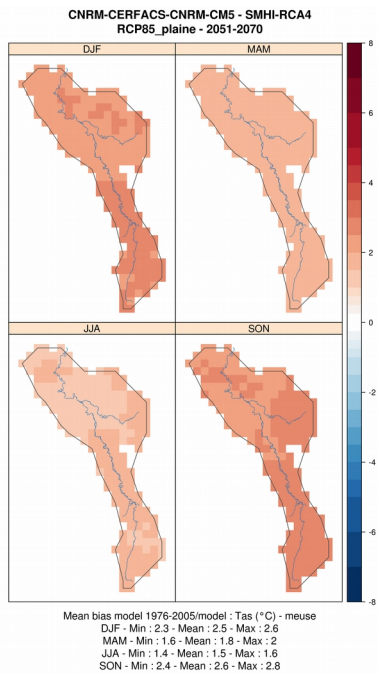
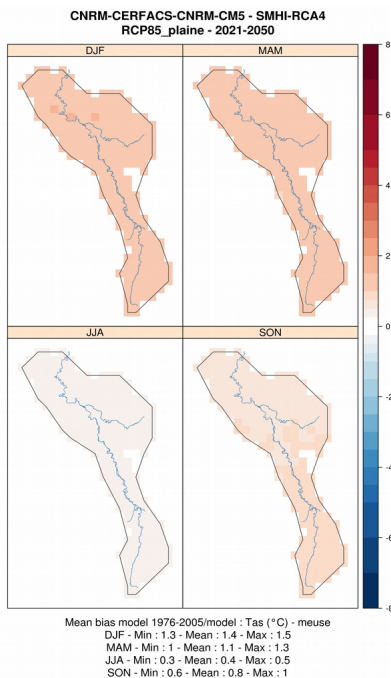
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 ~ RCM : SMHI-RCA4

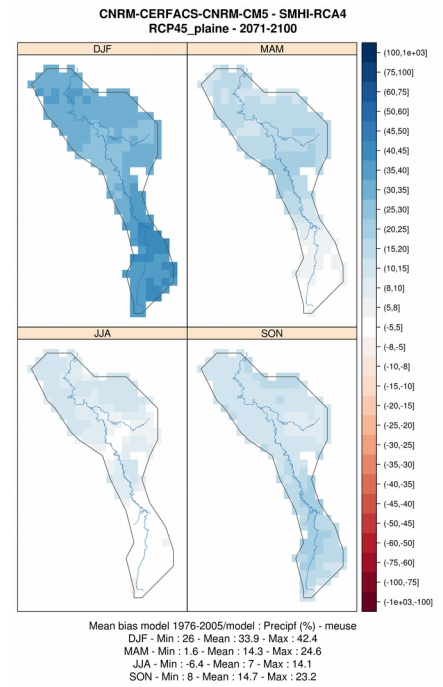
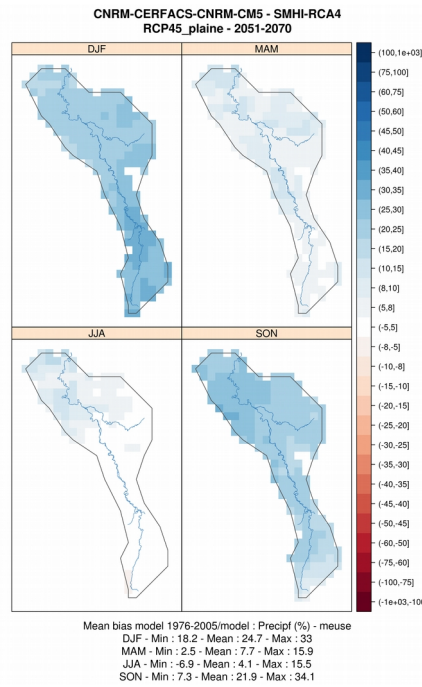
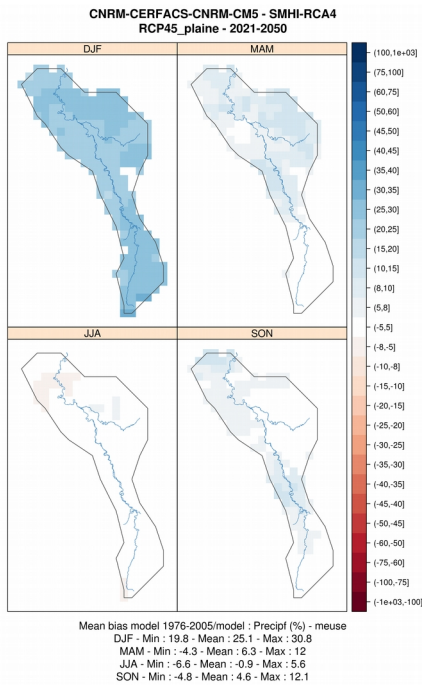
Paramètre : Précipitations

Futur proche

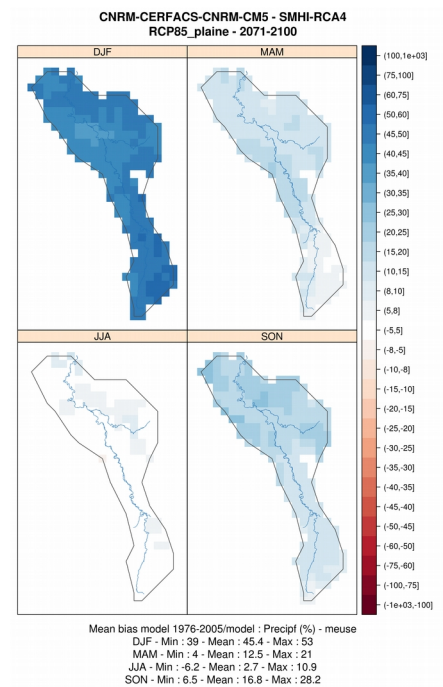
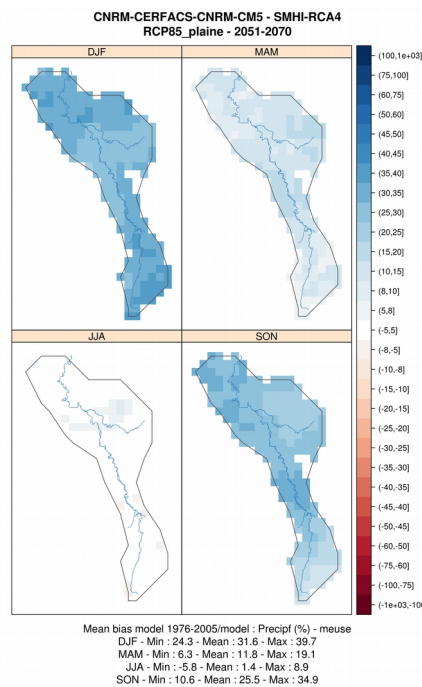
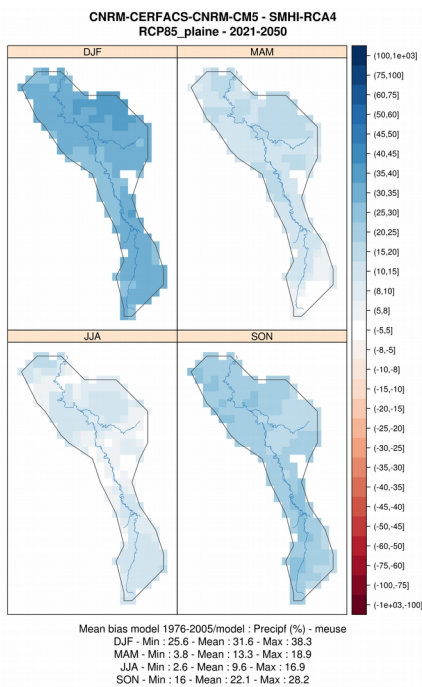
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : IPSL-CM5A-MR ~ RCM : SMHI-RCA4

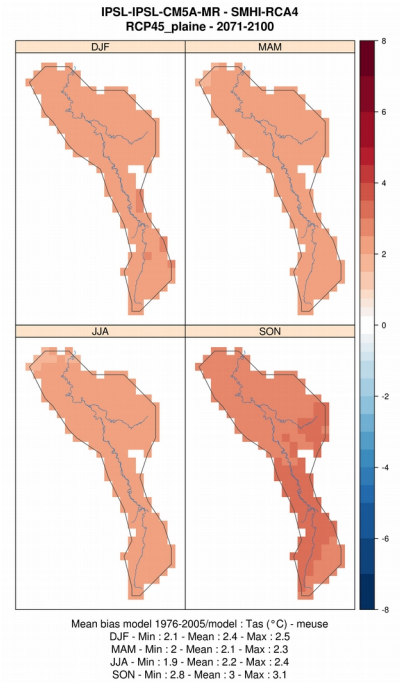
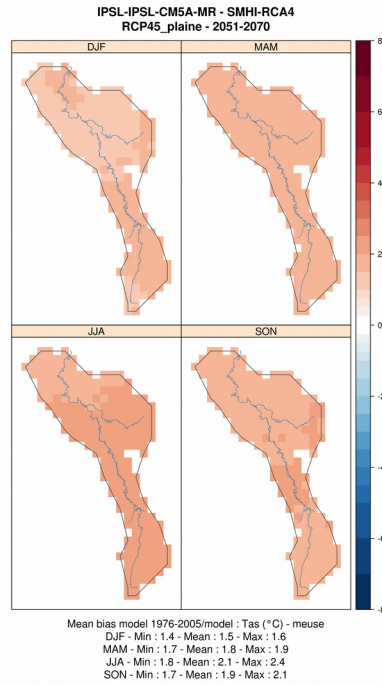
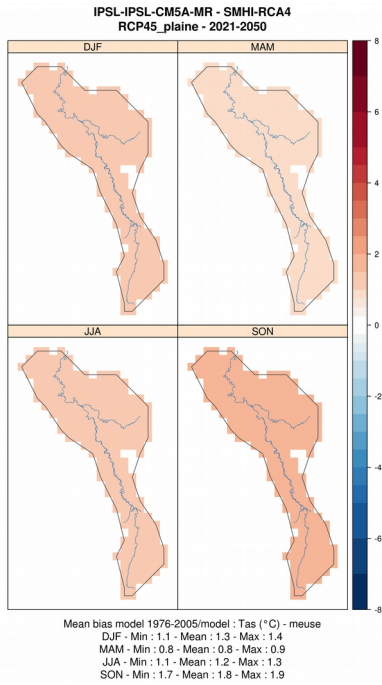
Paramètre : Température

Futur proche

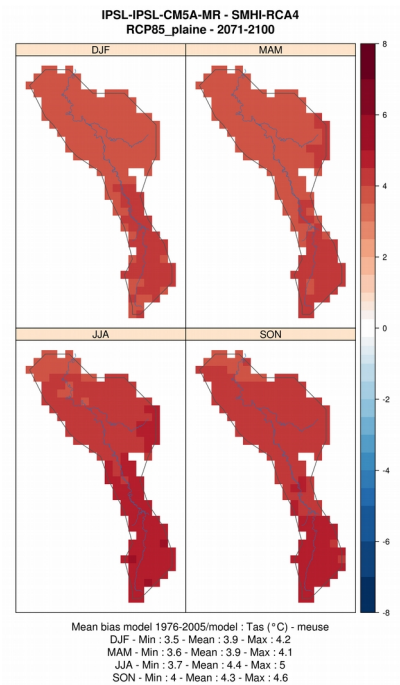
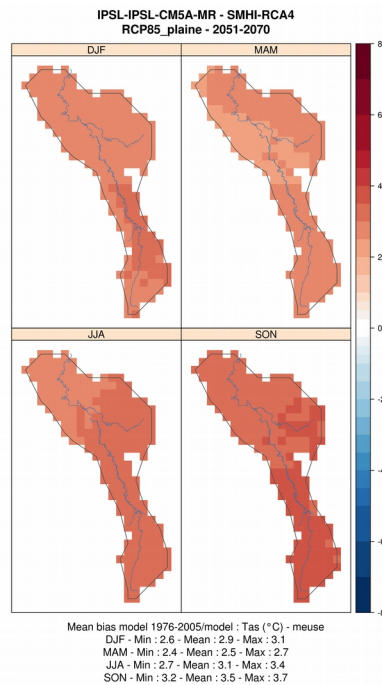
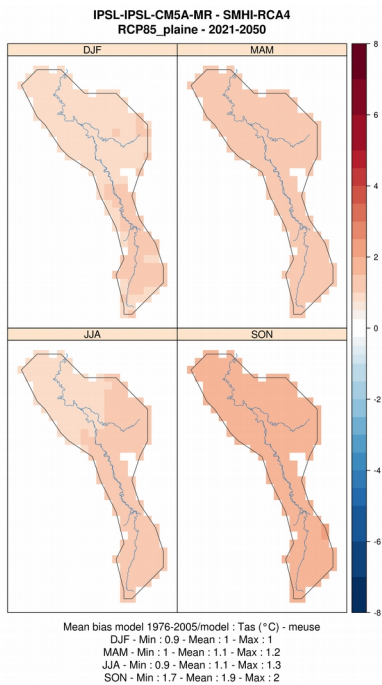
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : IPSL-CM5A-MR ~ RCM : SMHI-RCA4

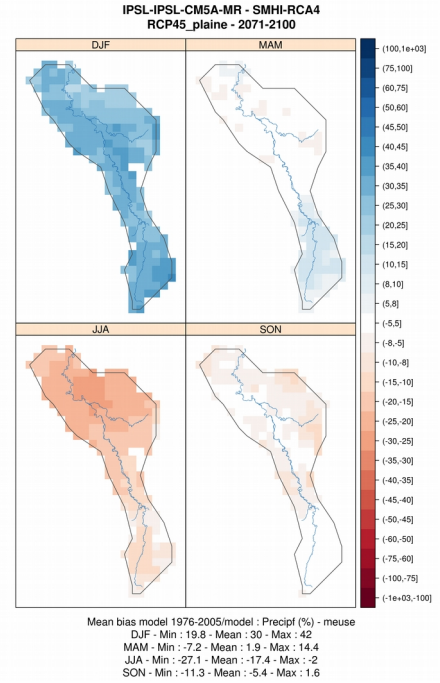
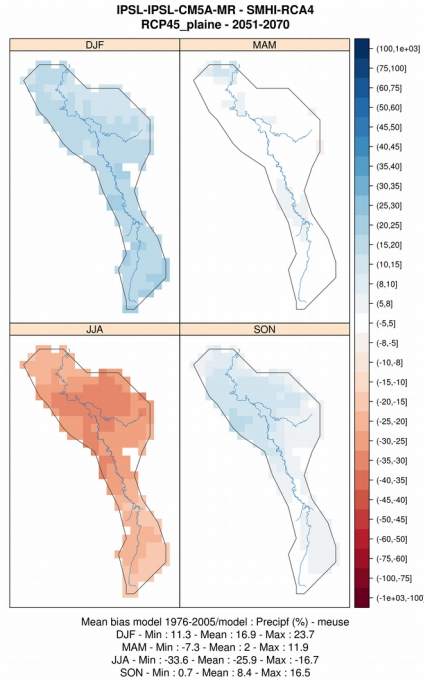
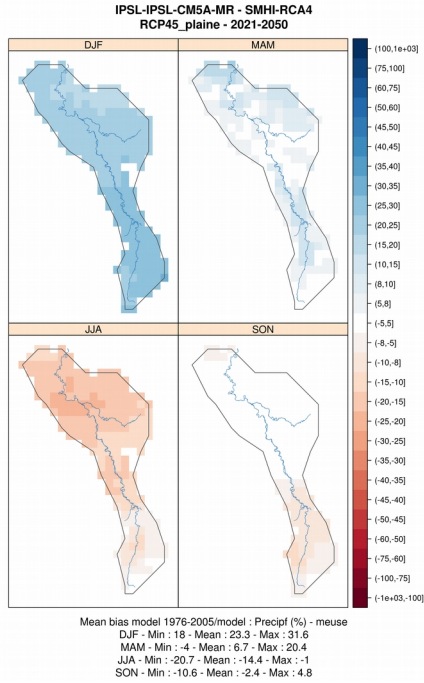
Paramètre : Précipitations

Futur proche

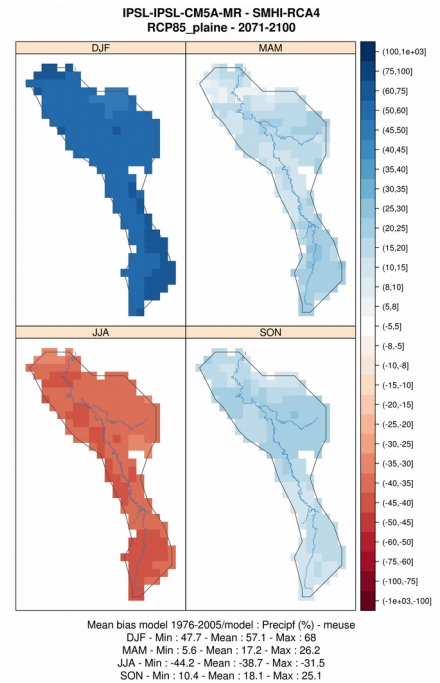
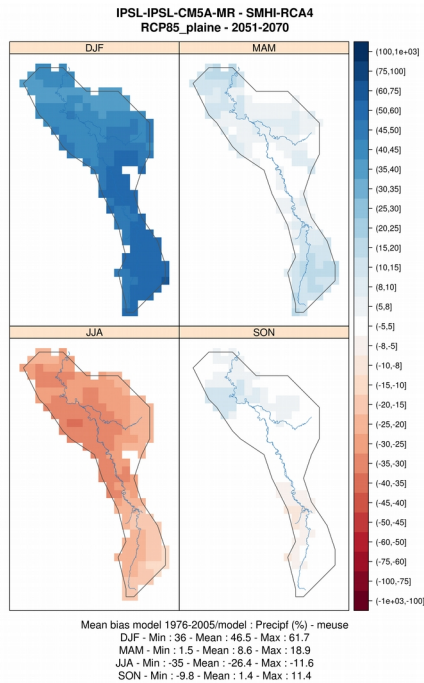
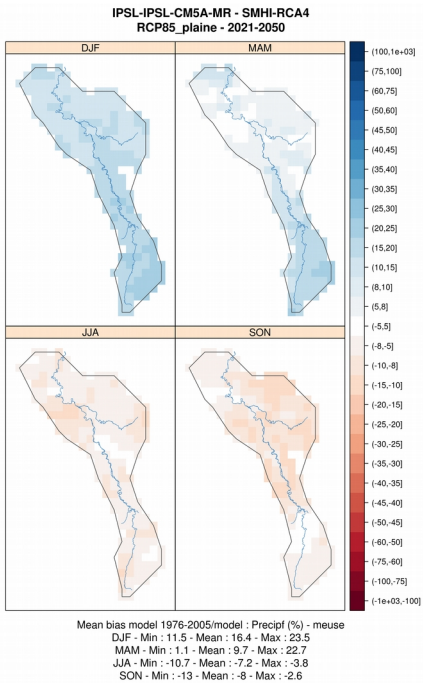
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : MPI-ESM-LR ~ RCM : SMHI-RCA4

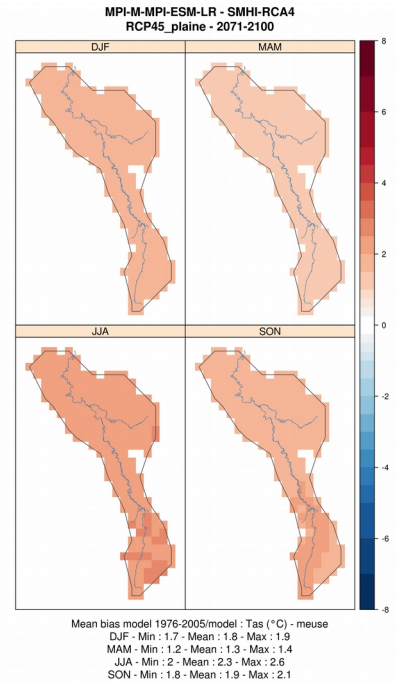
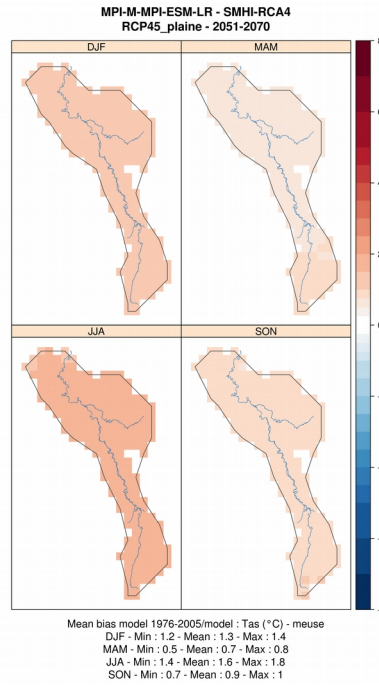
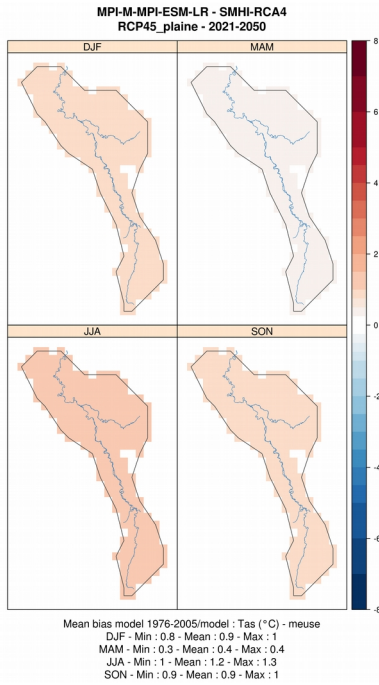
Paramètre : Température

Futur proche

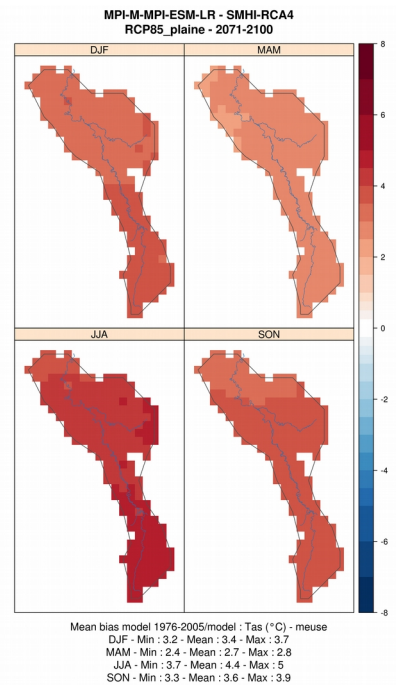
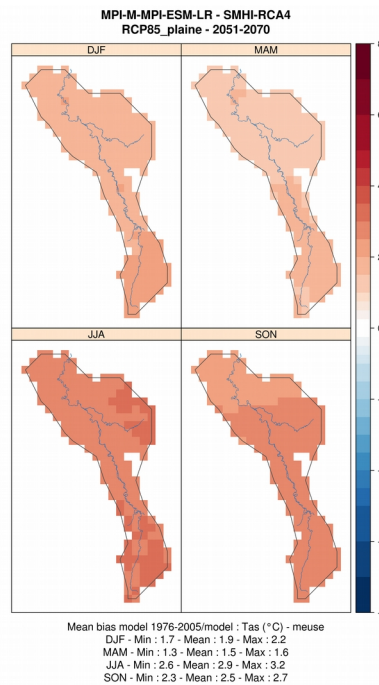
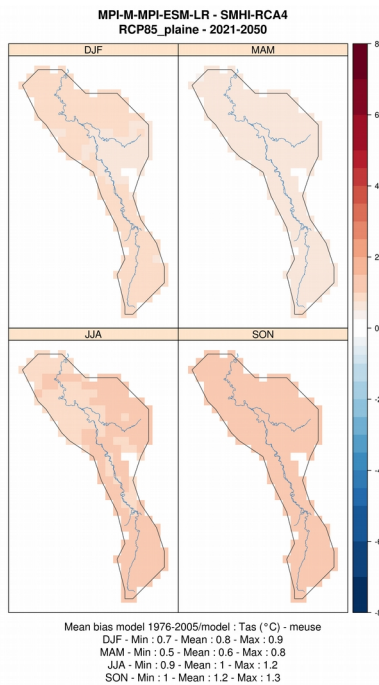
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



GCM : MPI-ESM-LR ~ RCM : SMHI-RCA4

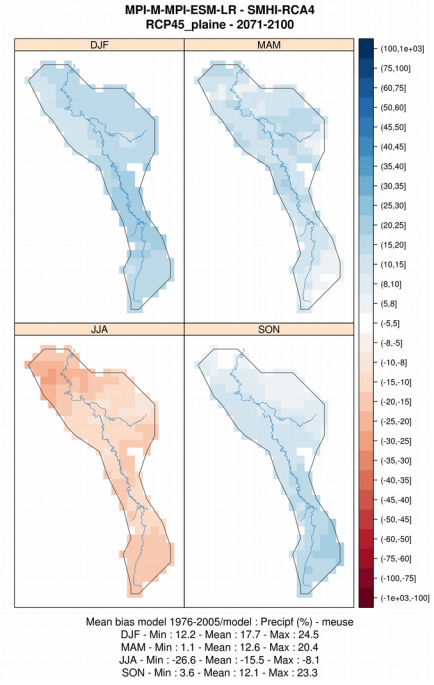
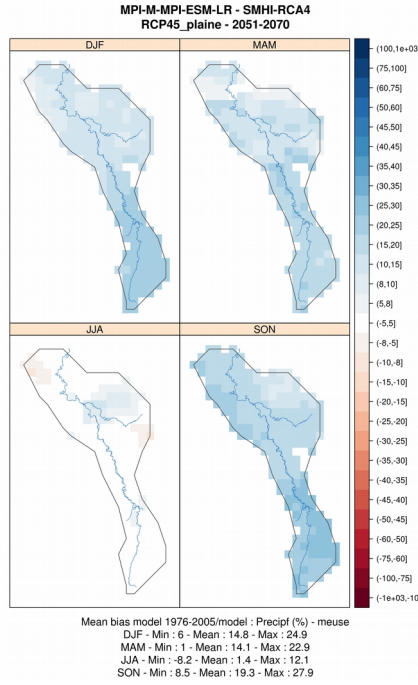
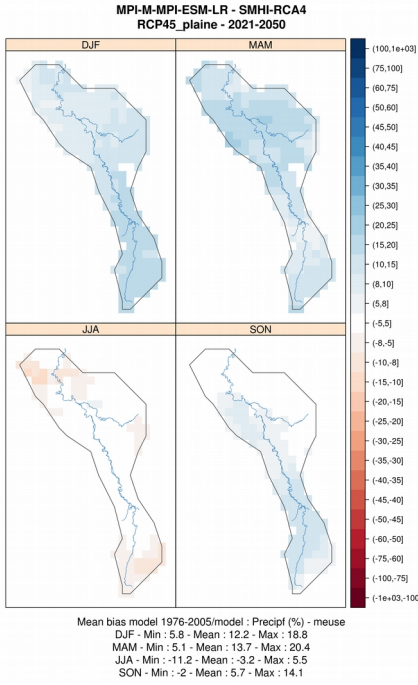
Paramètre : Précipitations

Futur proche

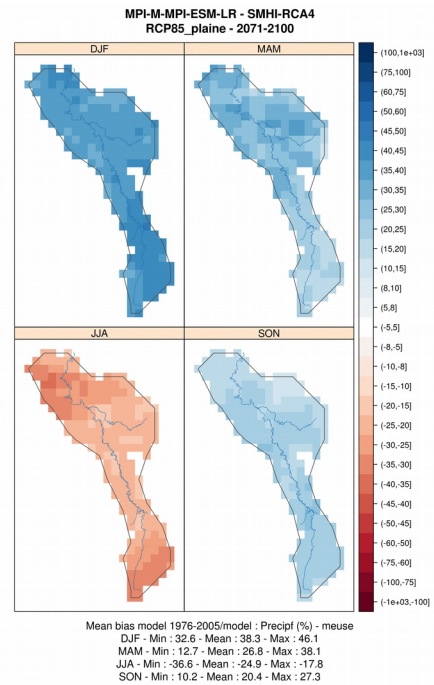
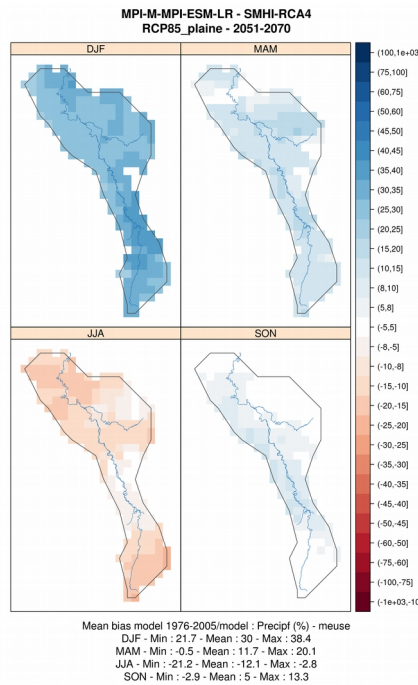
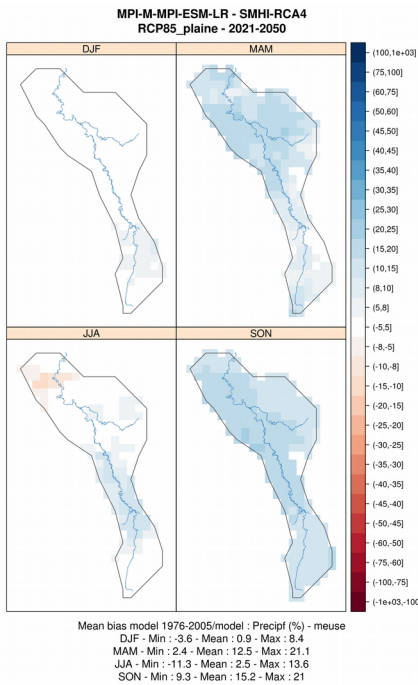
Futur moyen

Futur lointain

RCP 4.5



RCP 8.5



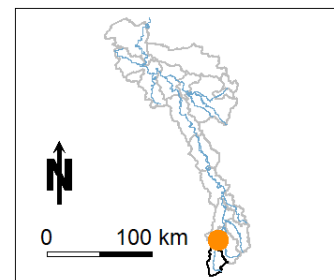
Annexe F. Fiches synthétiques

Dans cette annexe, nous présentons les fiches synthétiques qui ont été produites pour chacune des stations hydrologiques du projet CHIMERE 21 décrites dans le Tableau 3. Ces fiches de deux pages ont pour objet de présenter : 1) la performance des modèles hydrologiques pour les deux types de calages, 2) la robustesse des modèles hydrologiques sur les deux sous-périodes et 3) les projections de débits futurs en termes de régime hydrologique et d'indicateurs de bas débits, de débits moyens et de hauts débits avec quantification des incertitudes.

Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B0220010 – La Meuse @ Goncourt

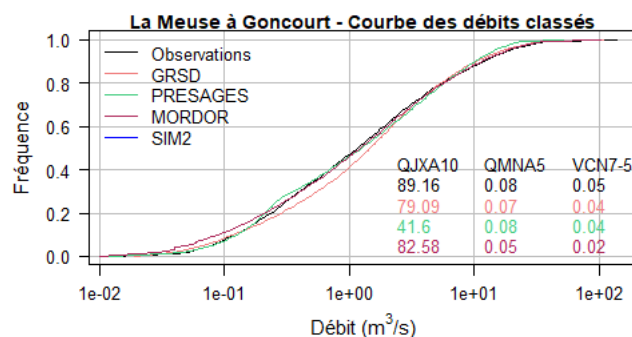
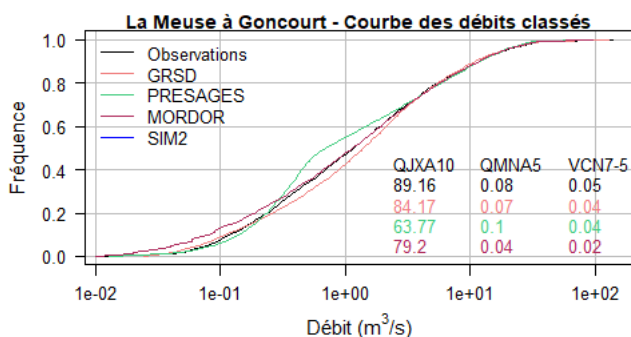
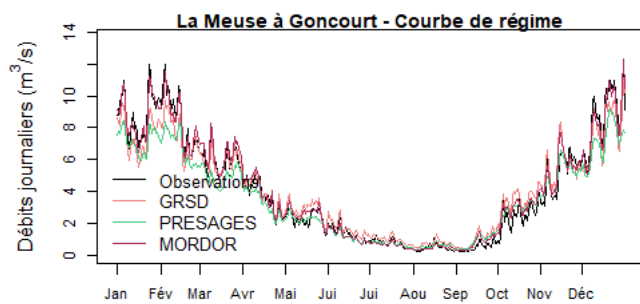
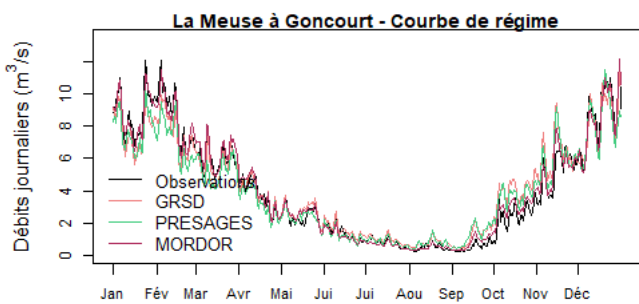


CALAGE DES MODELES

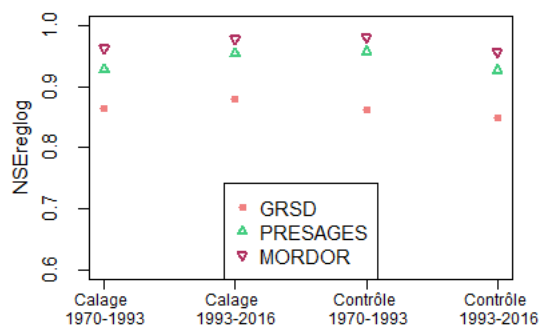
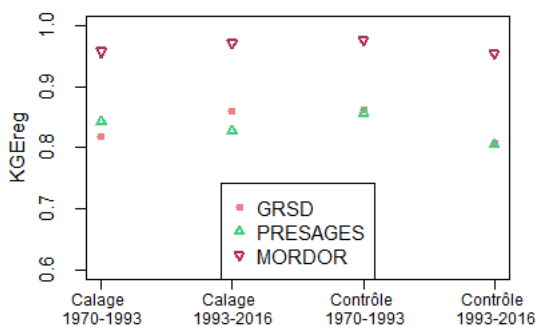
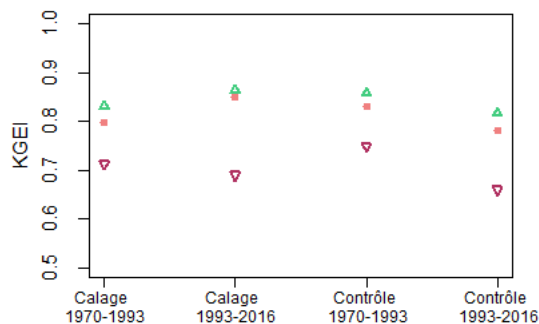
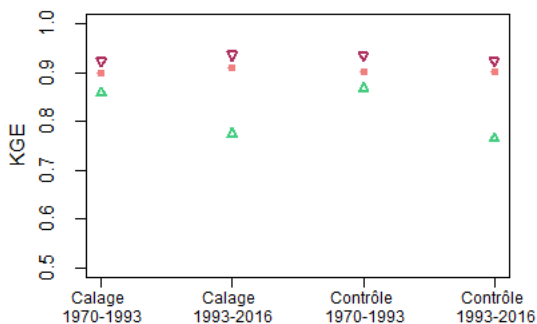
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

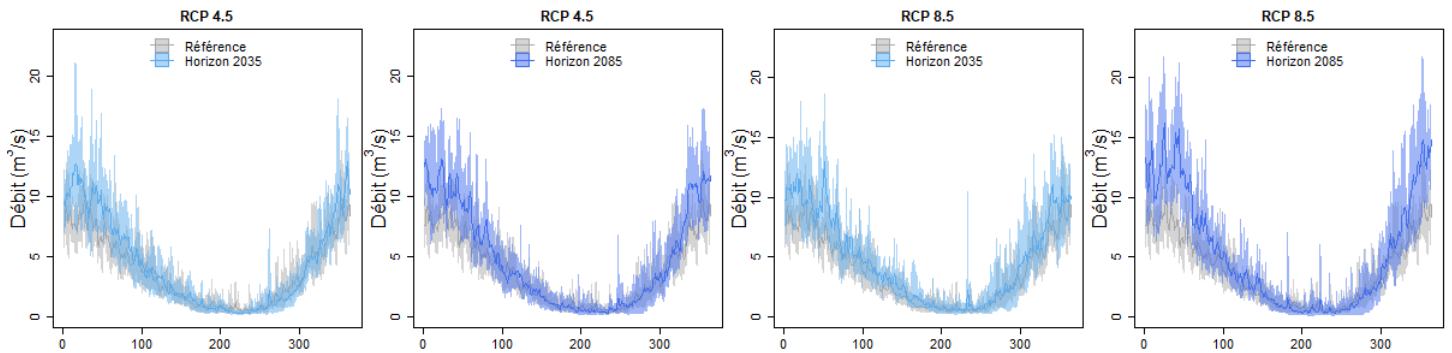


ROBUSTESSE

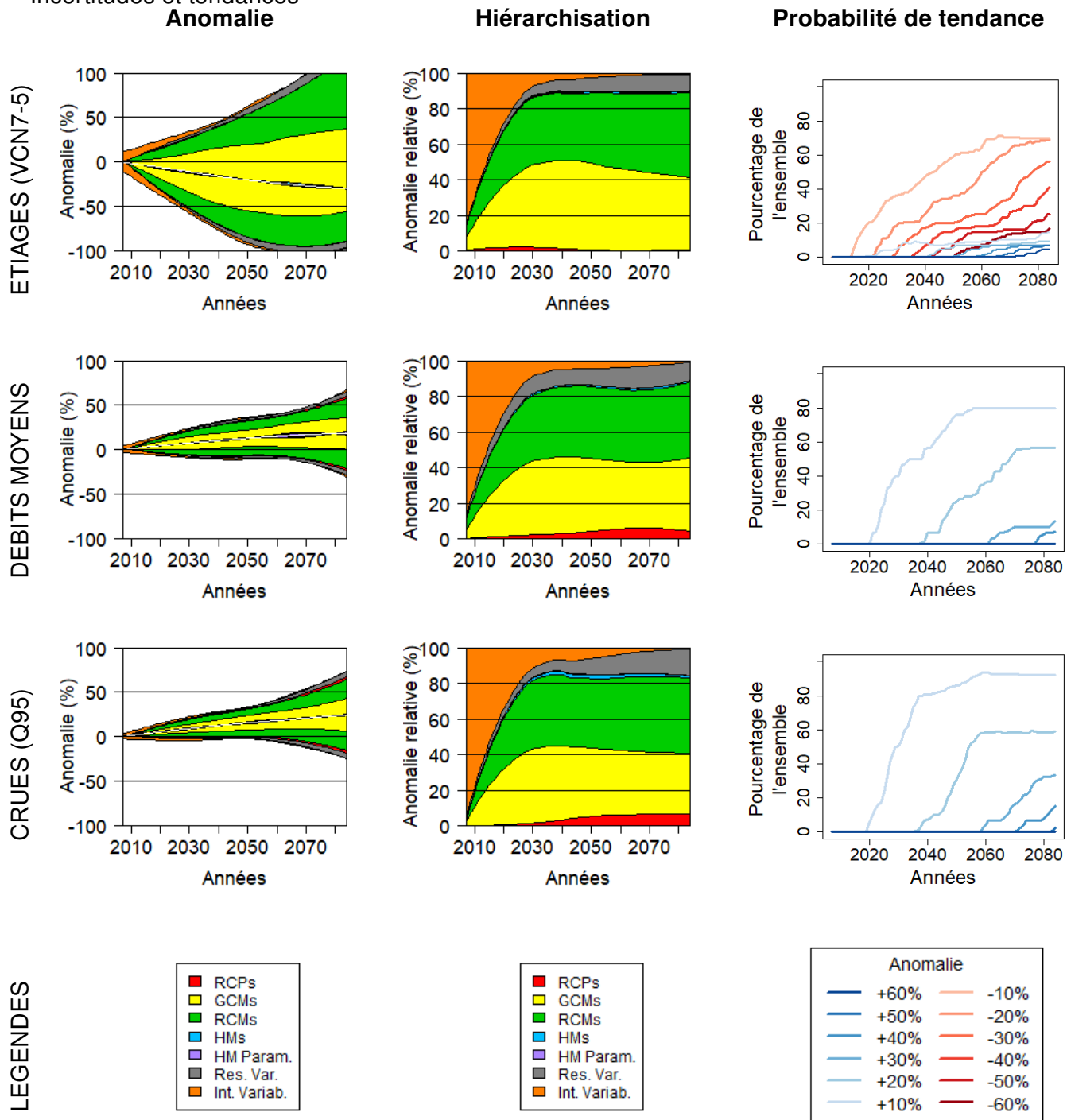


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



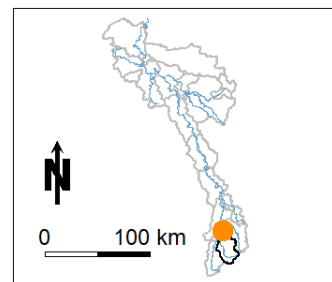
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B1092010 – Le Mouzon @ Circourt-sur-Mouzon [Villars]

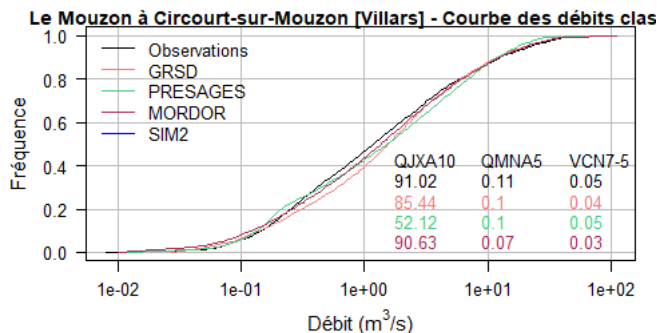
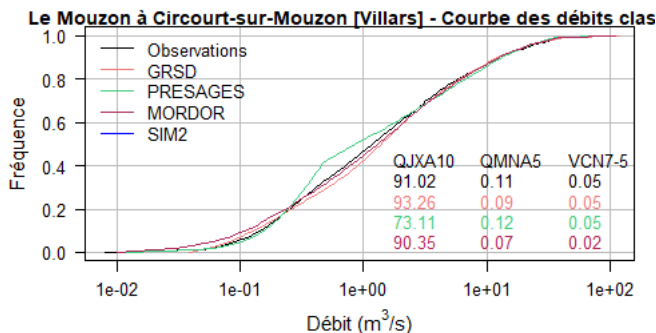
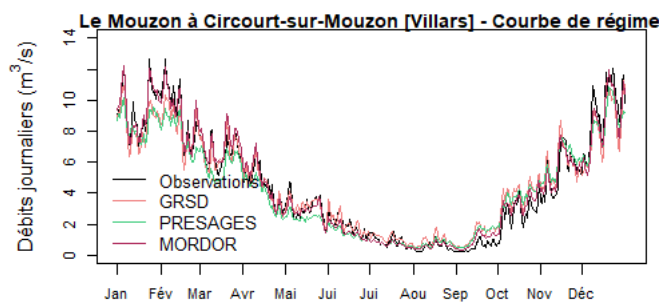
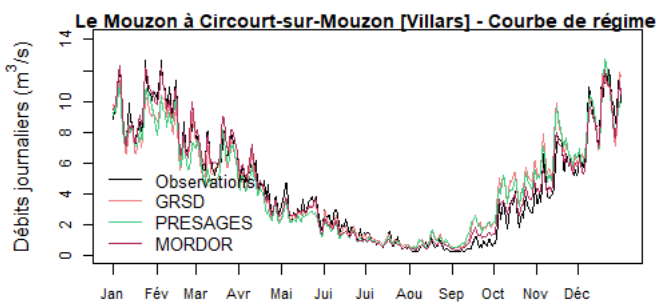


CALAGE DES MODELES

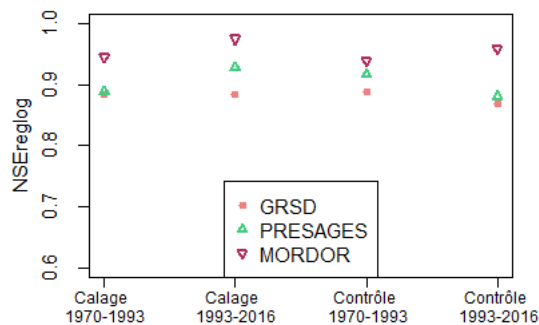
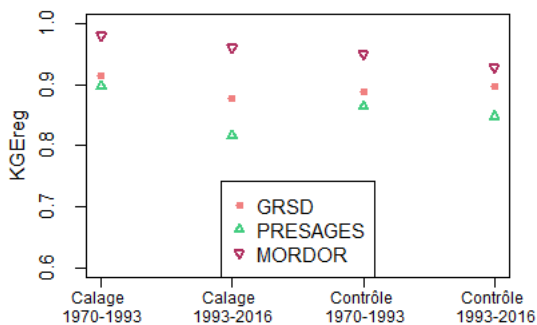
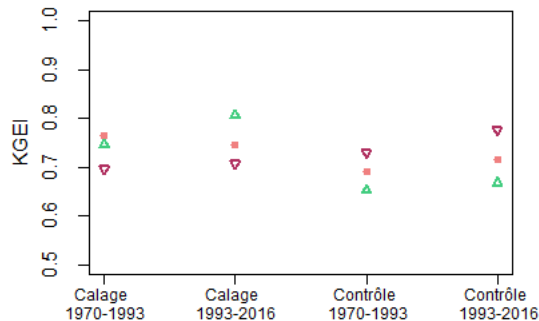
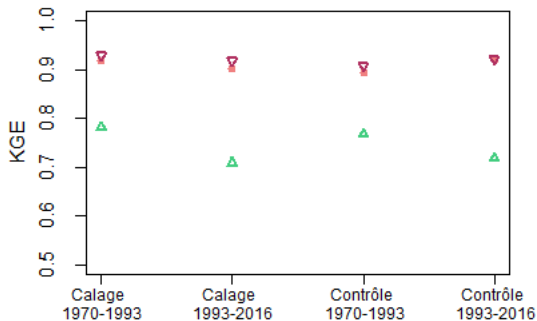
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

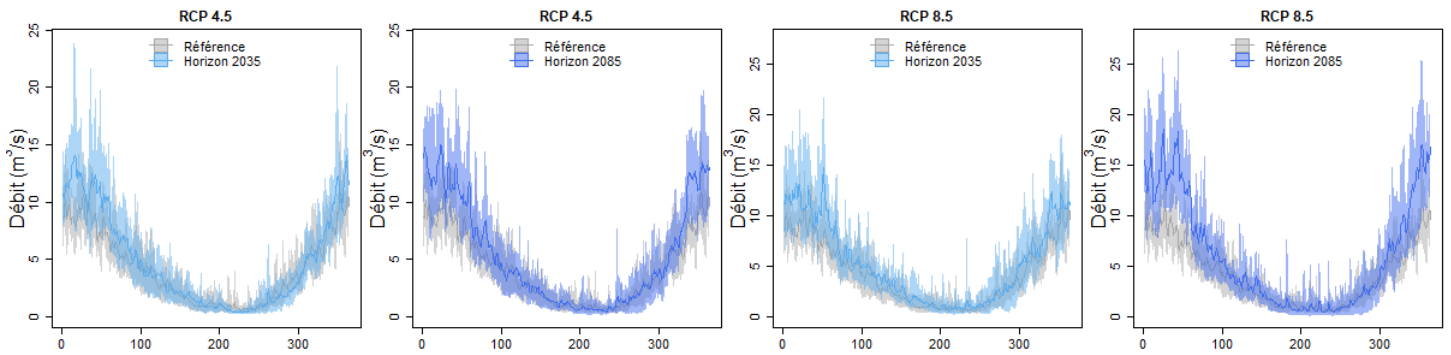


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



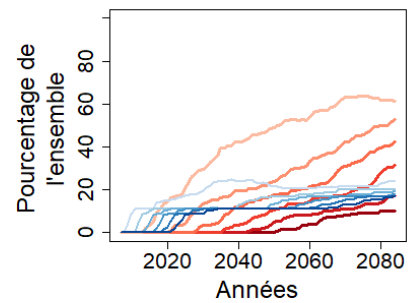
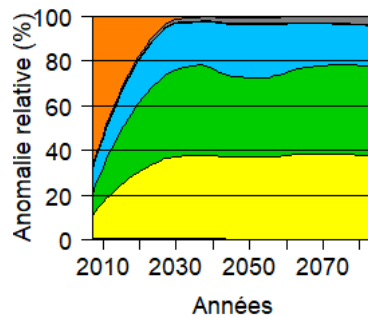
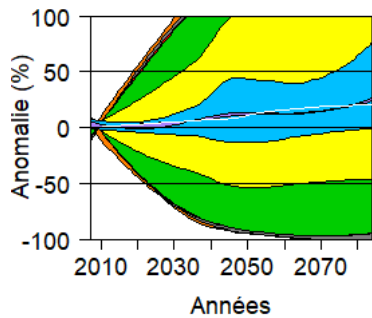
Incertitudes et tendances

Anomalie

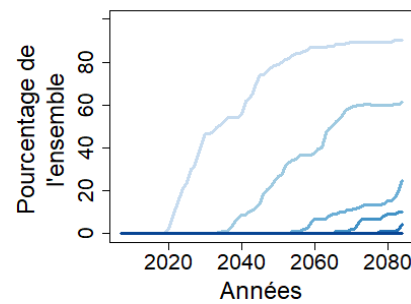
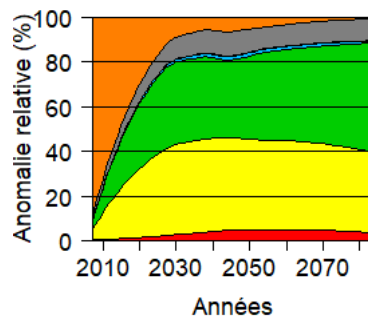
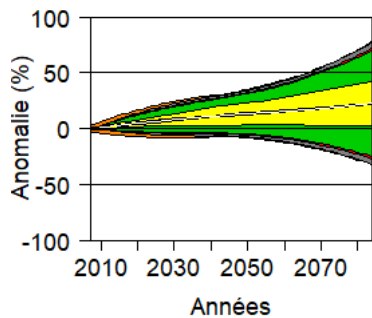
Hierarchisation

Probabilité de tendance

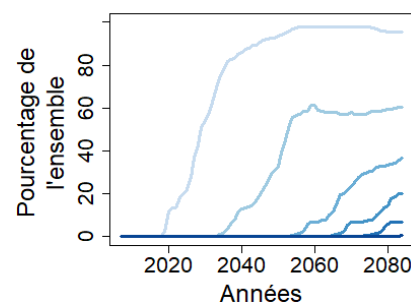
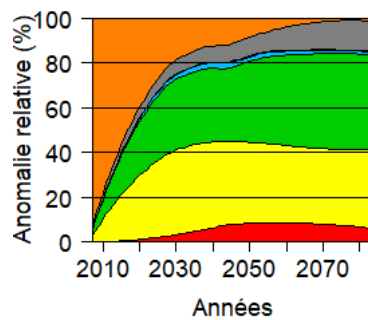
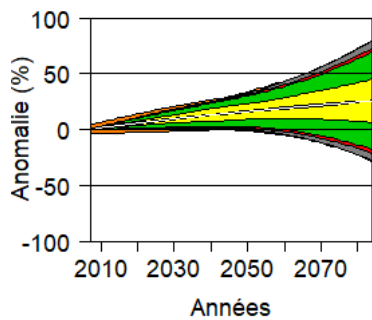
ETIAGES (VCN7-5)



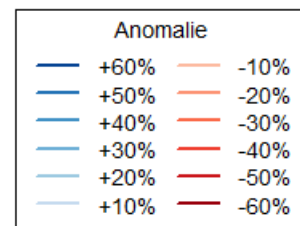
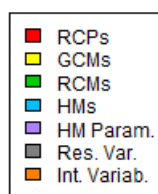
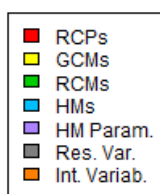
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



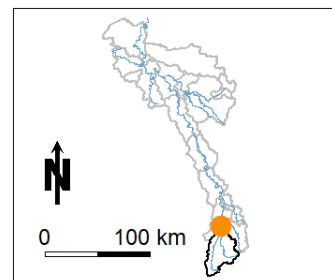
LEGENDES



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B1100000 – La Meuse @ Neufchateau

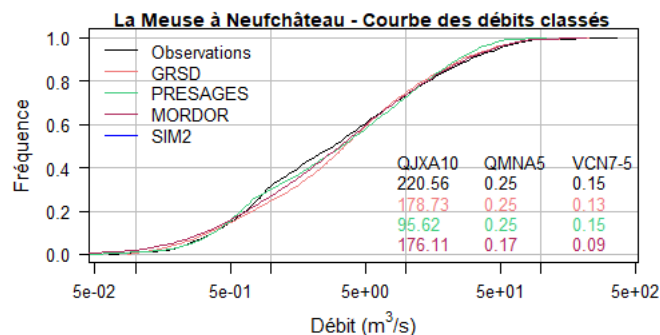
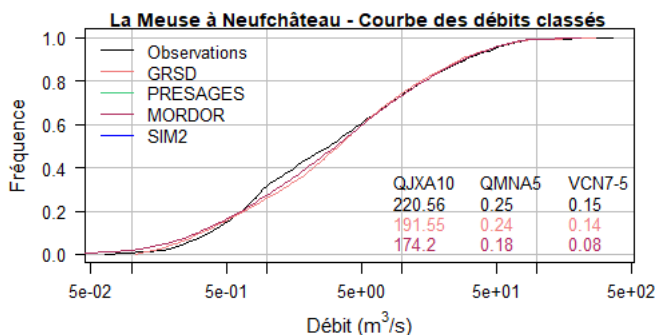
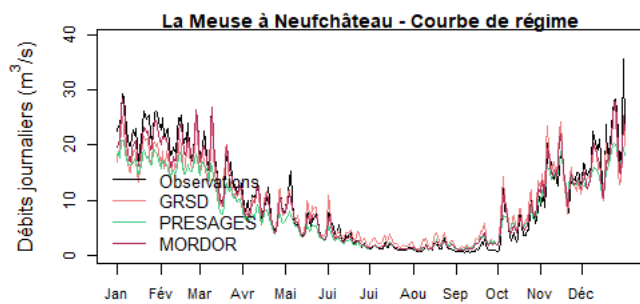
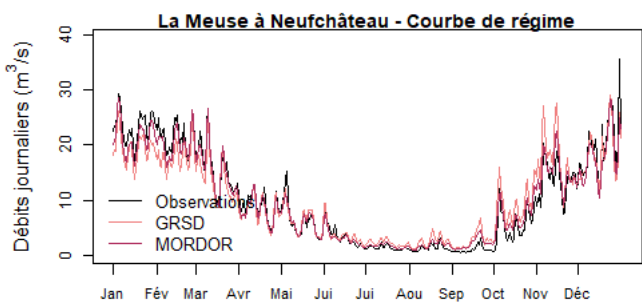


CALAGE DES MODELES

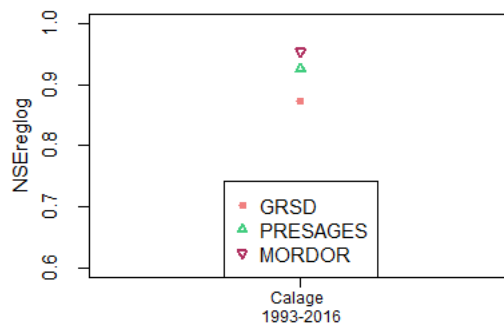
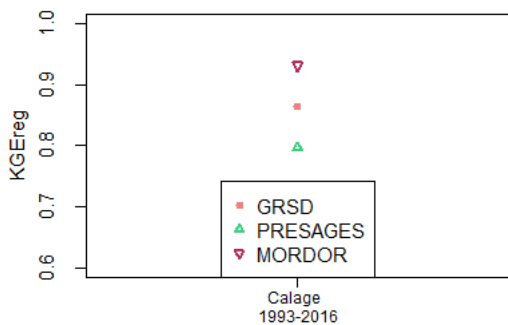
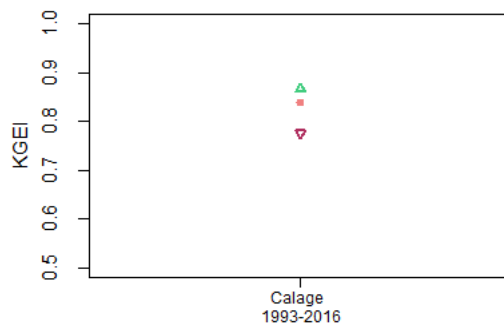
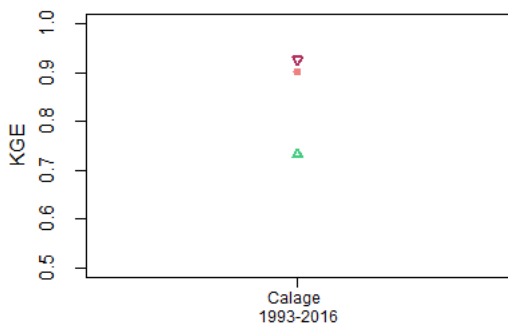
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

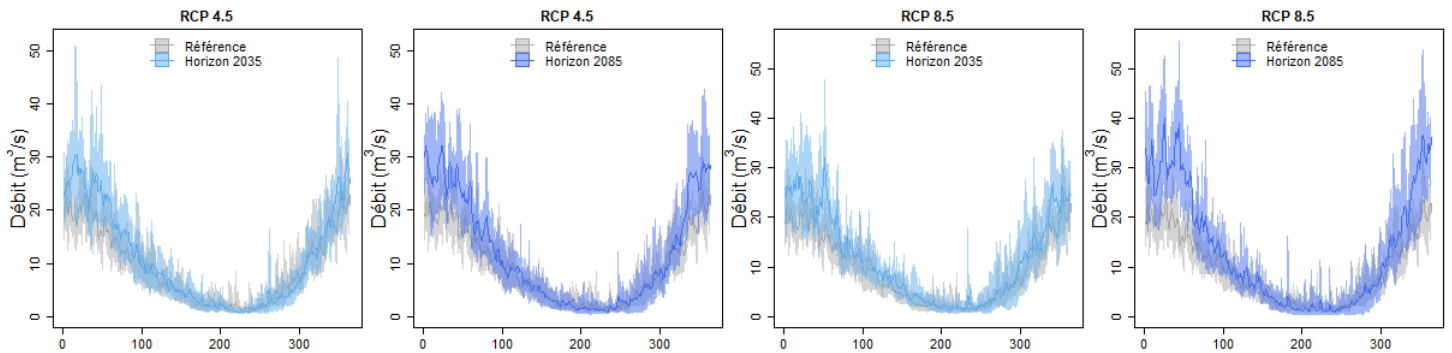


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



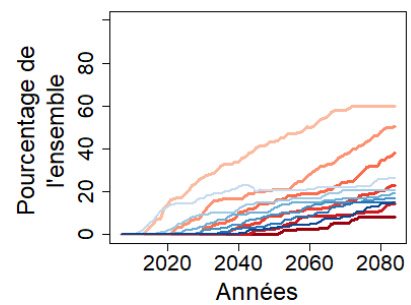
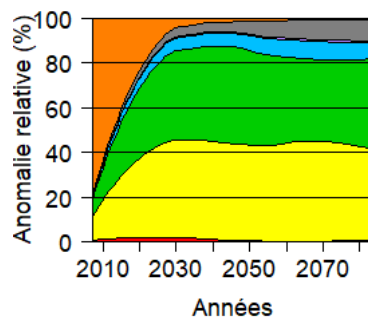
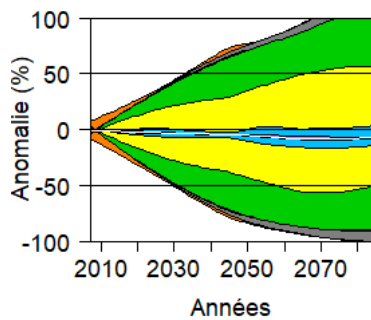
Incertitudes et tendances

Anomalie

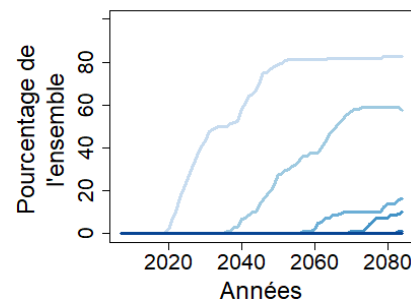
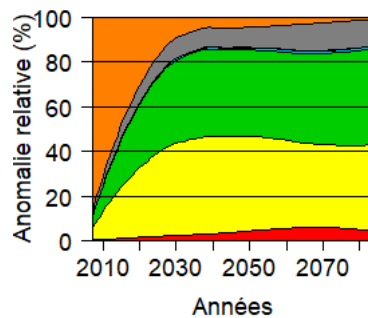
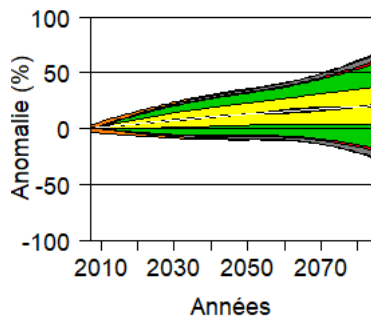
Hierarchisation

Probabilité de tendance

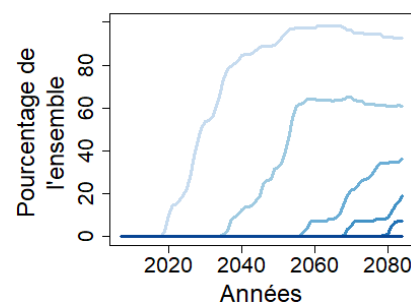
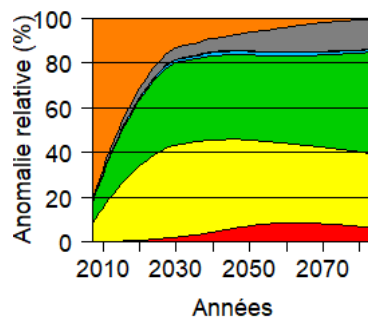
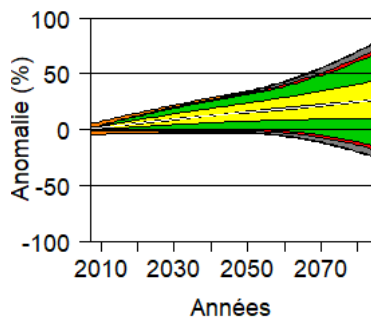
ETIAGES (VCN7-5)



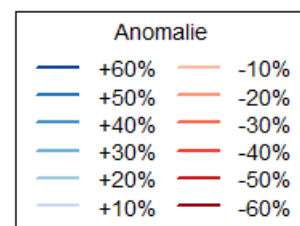
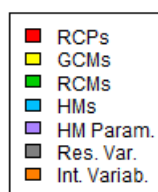
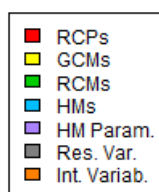
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



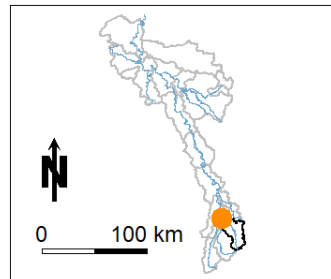
LEGENDES



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B1282010 – Le Vair @ Soulosse-sous-Saint-Elophe

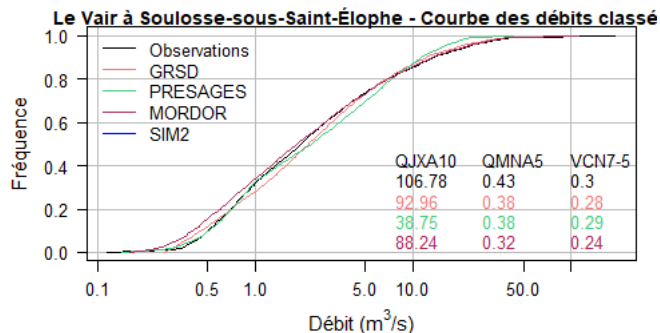
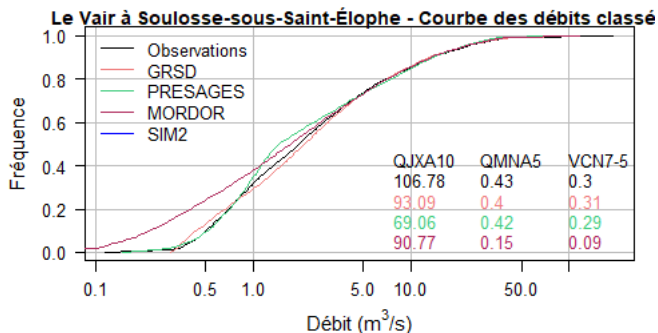
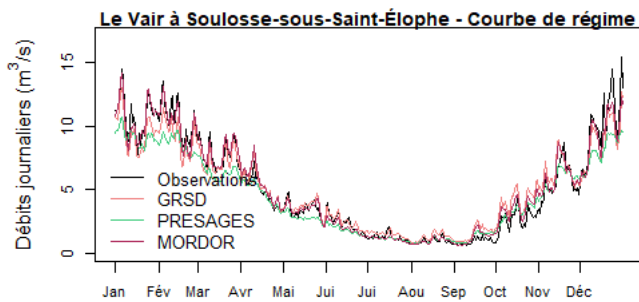
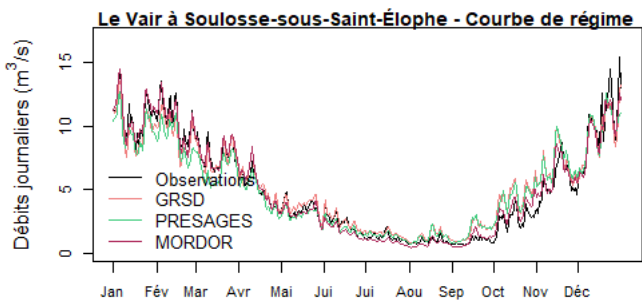


CALAGE DES MODELES

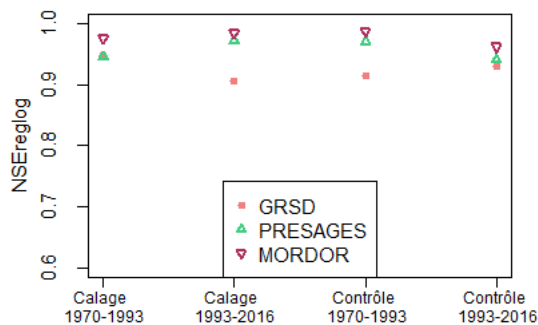
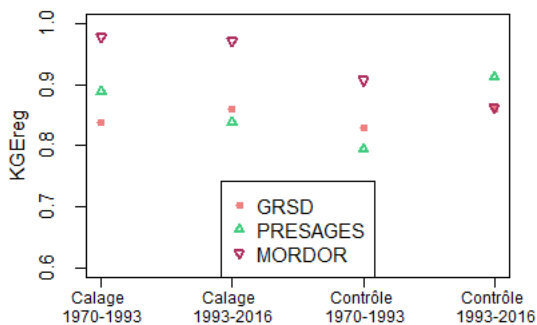
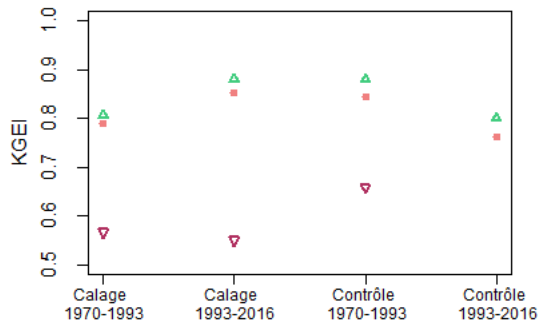
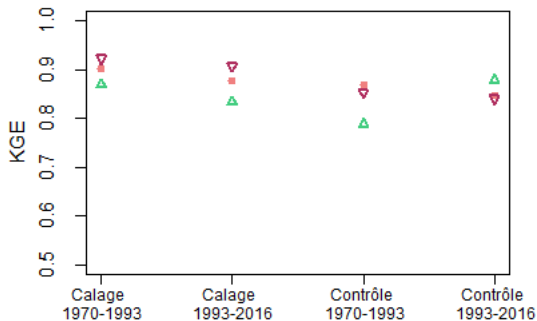
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

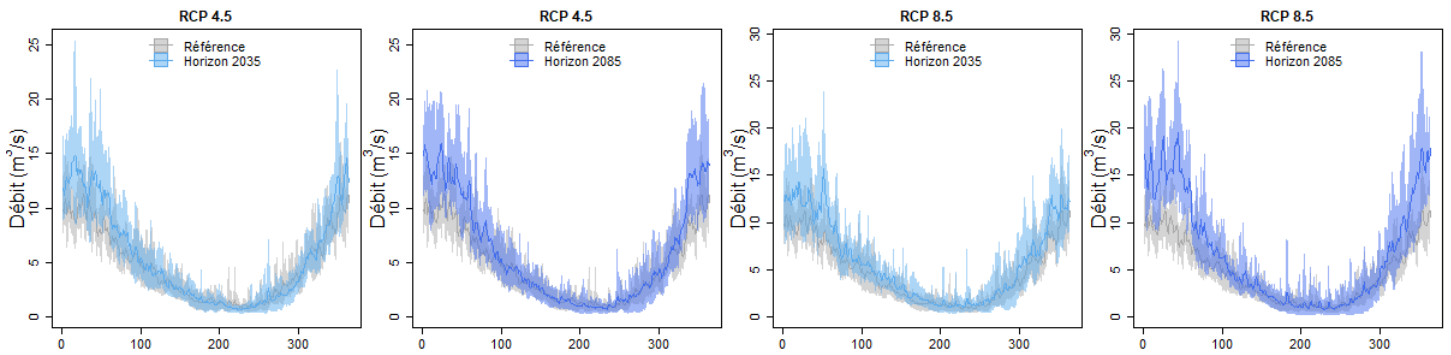


ROBUSTESSE

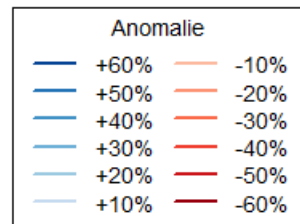
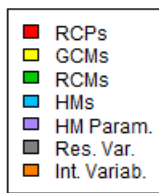
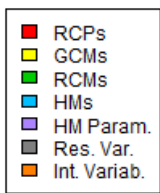
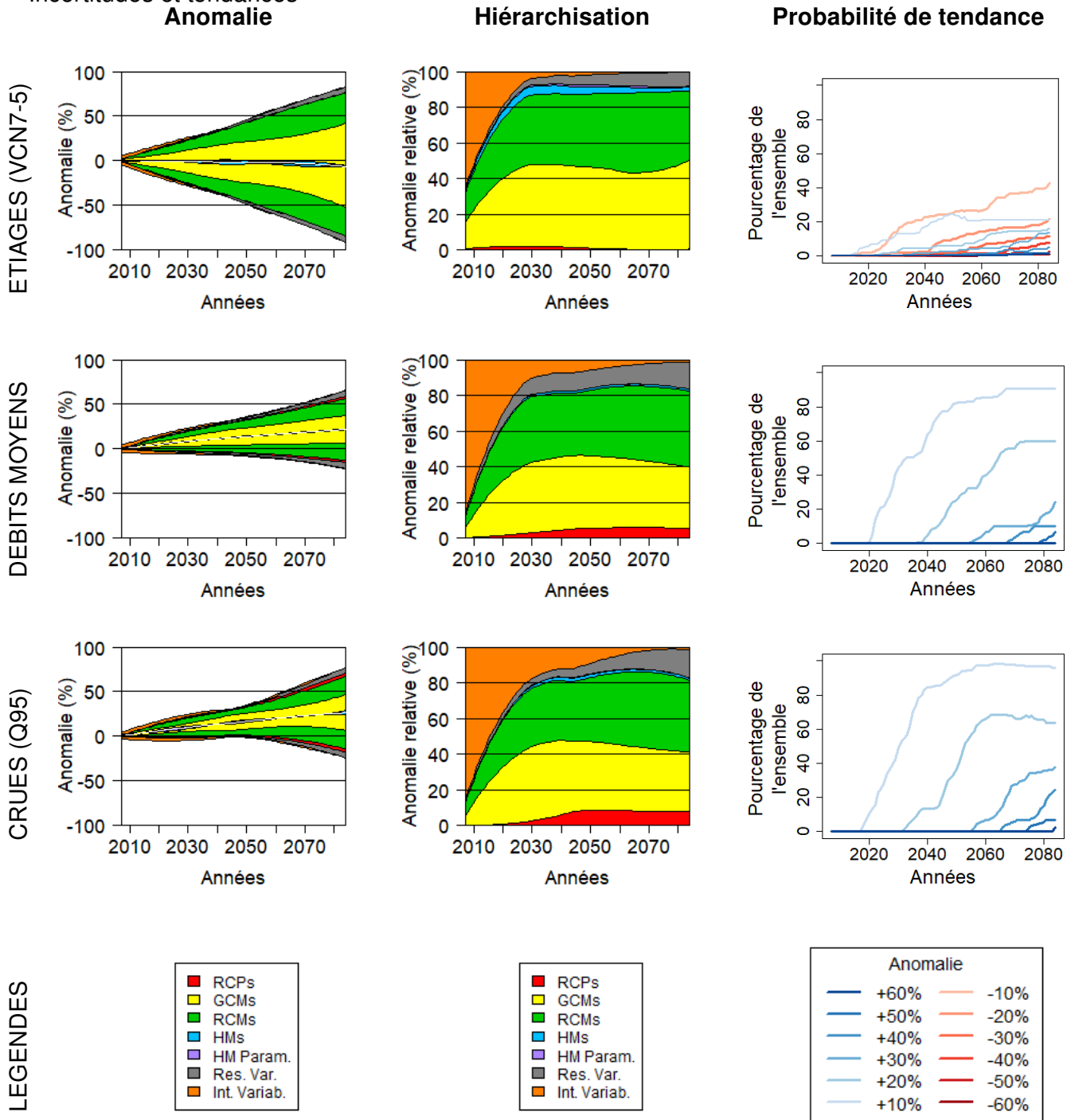


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



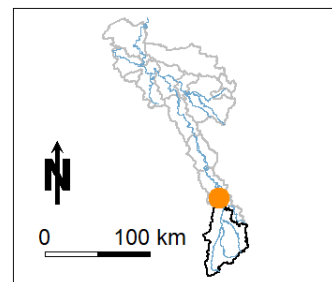
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B1340010 – La Meuse @ Vaucouleurs [Chalaines]

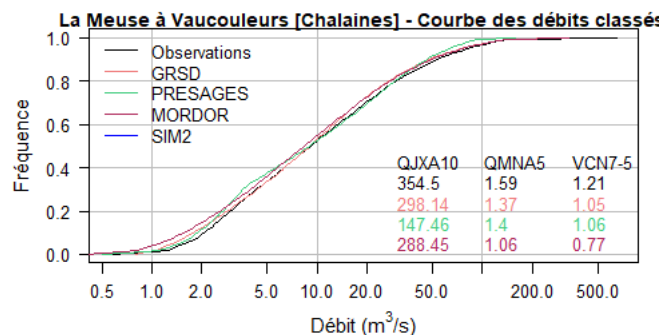
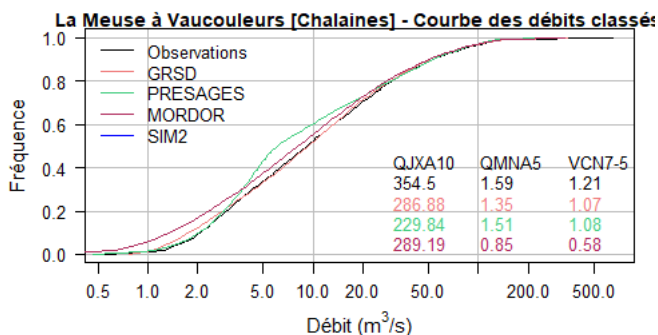
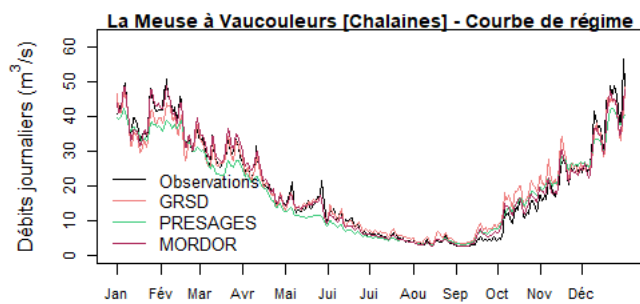


CALAGE DES MODELES

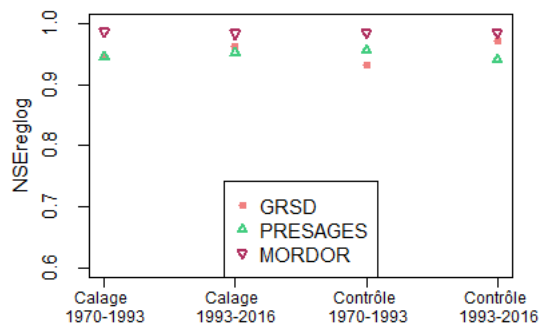
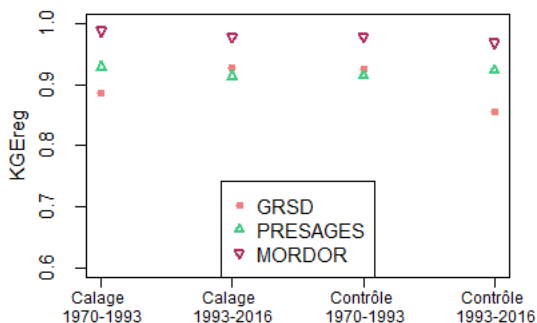
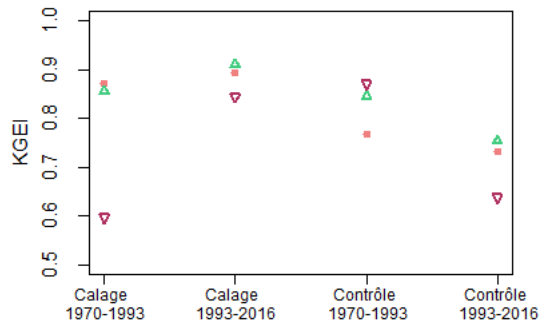
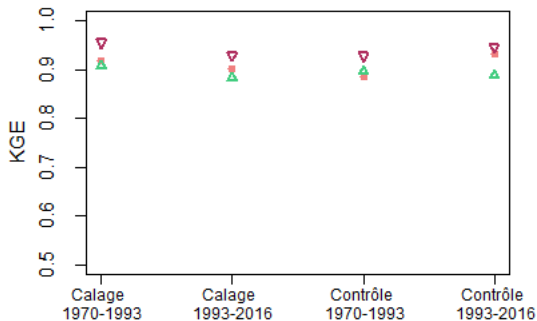
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

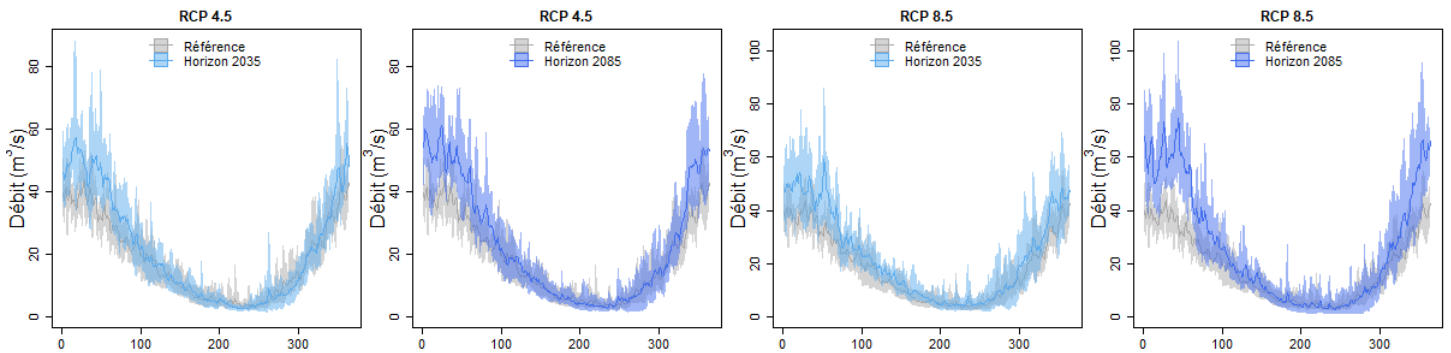


ROBUSTESSE

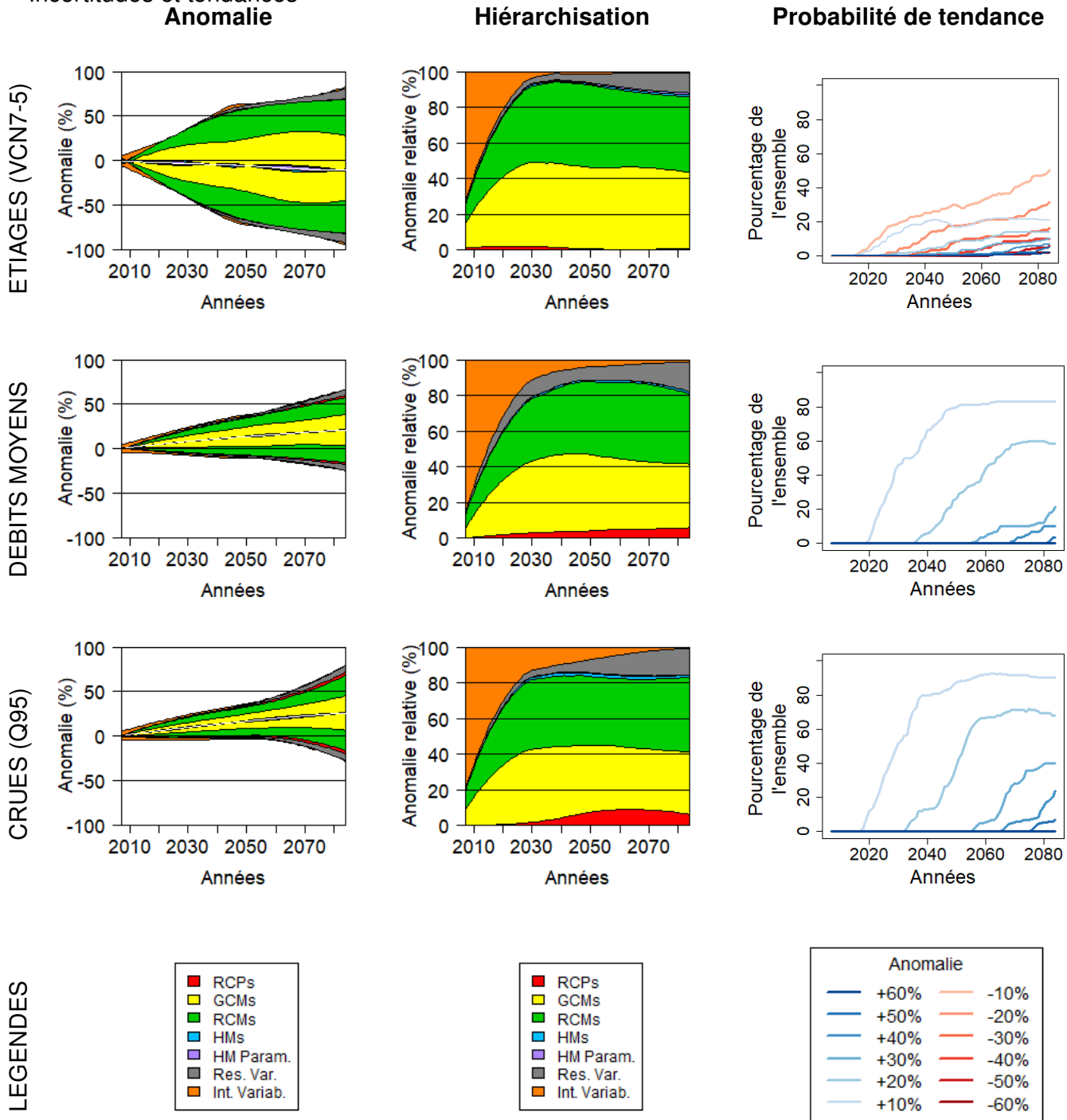


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



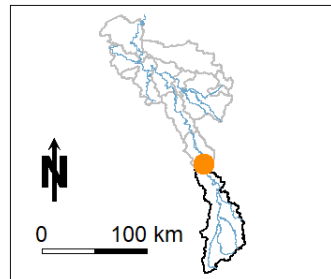
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B2220010 – La Meuse @ Saint-Mihiel

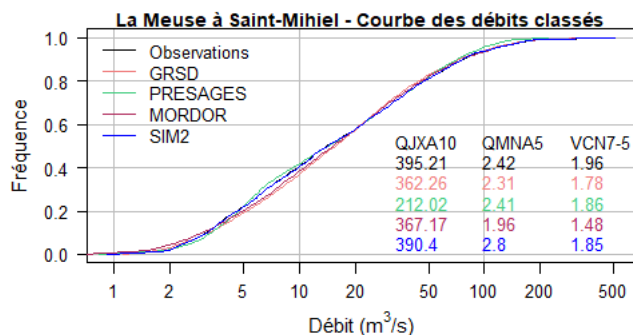
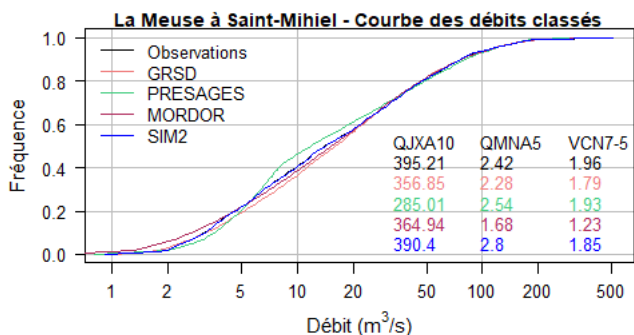
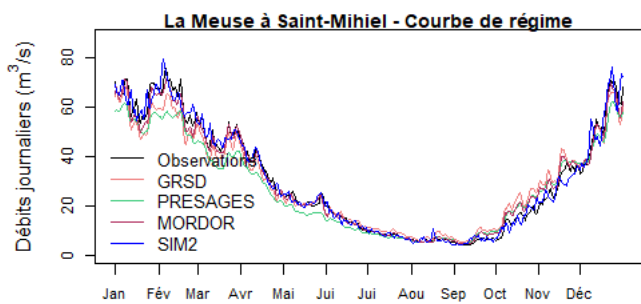
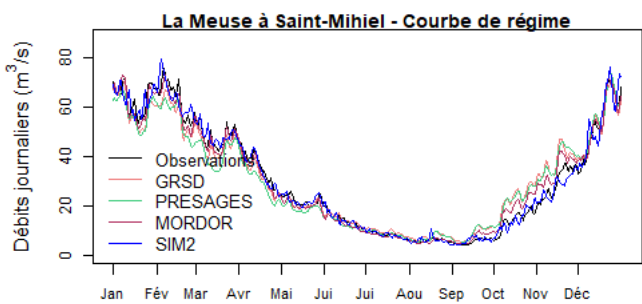


CALAGE DES MODELES

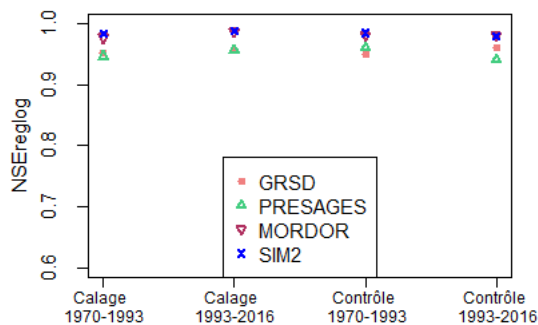
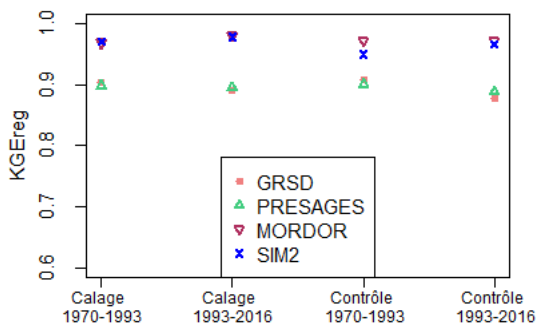
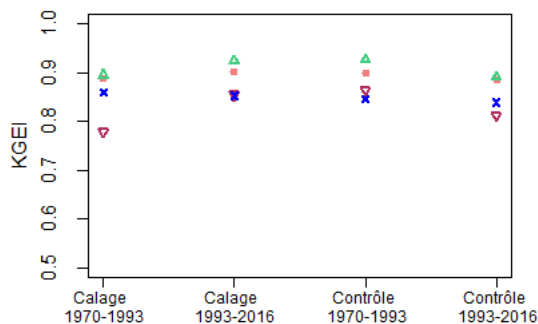
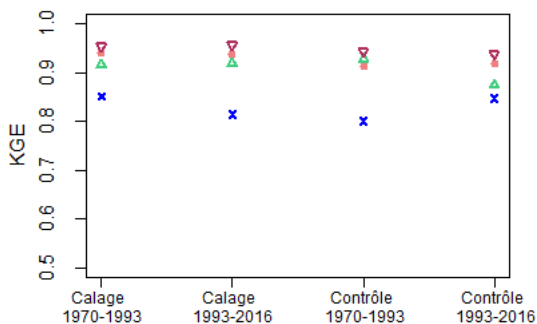
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

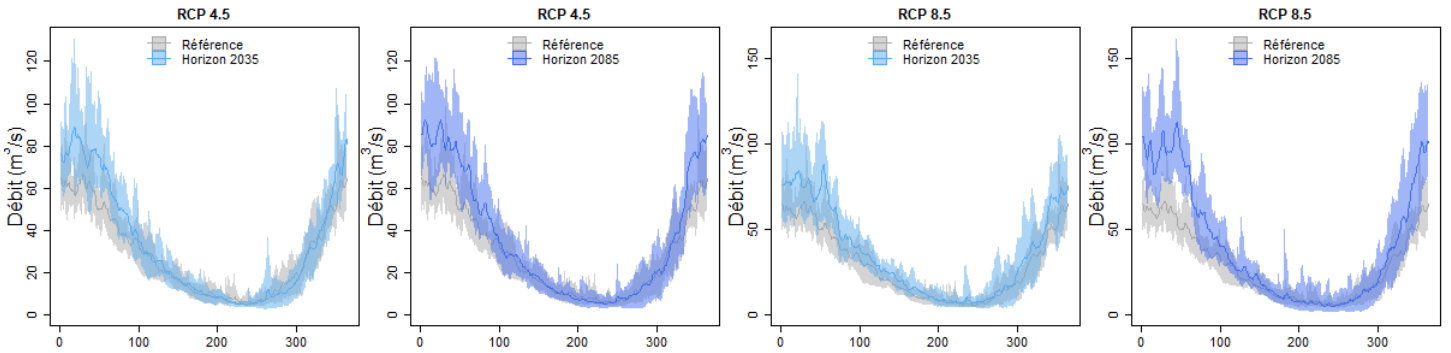


ROBUSTESSE

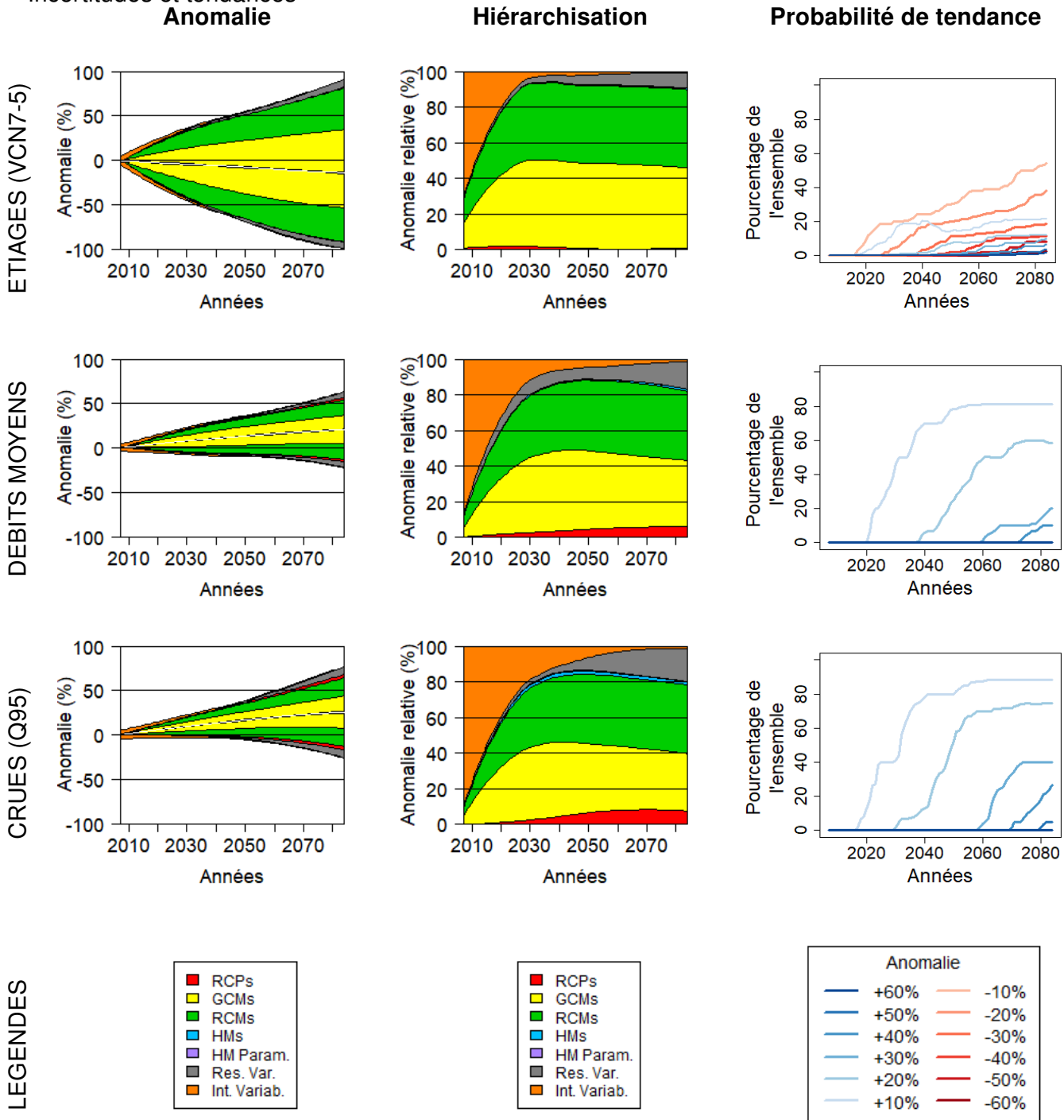


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



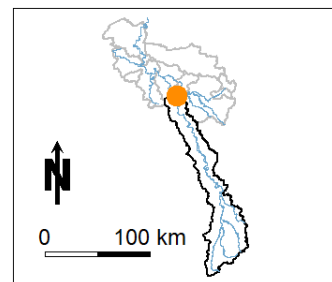
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B3150020 – La Meuse @ Stenay

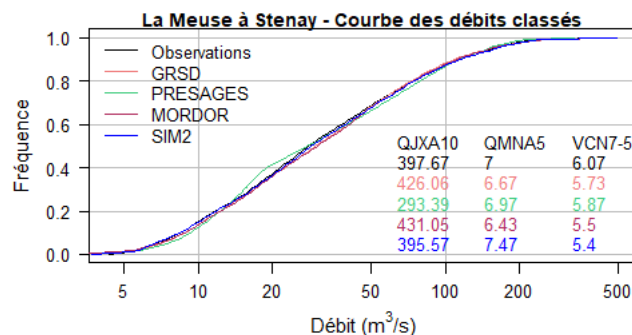
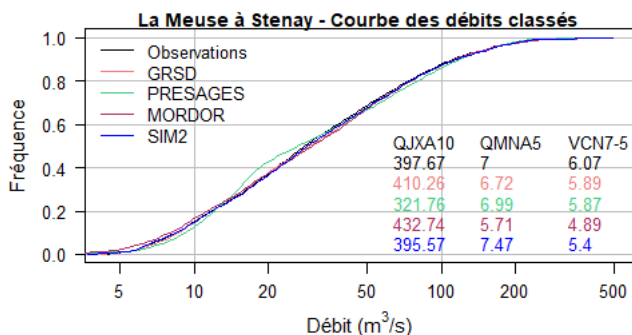
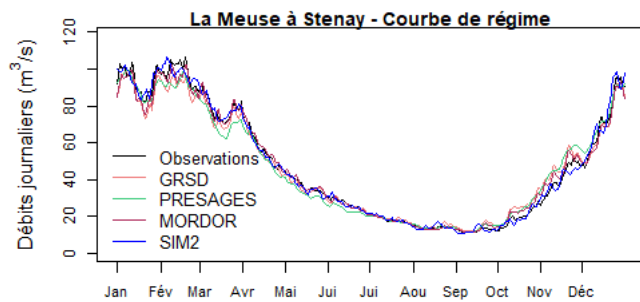
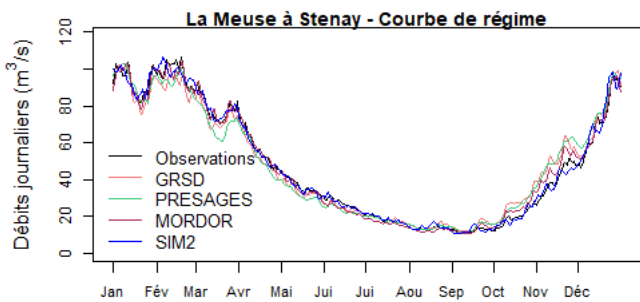


CALAGE DES MODELES

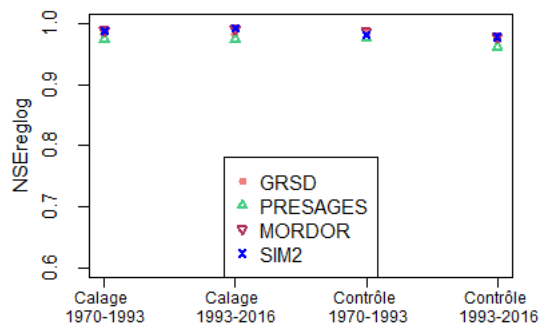
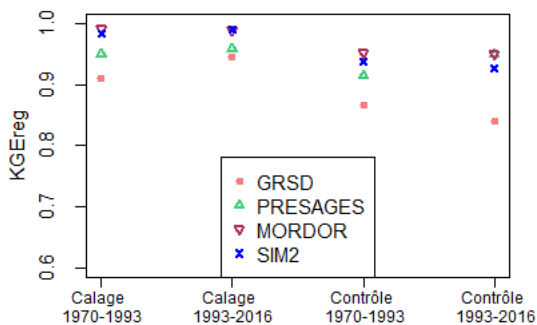
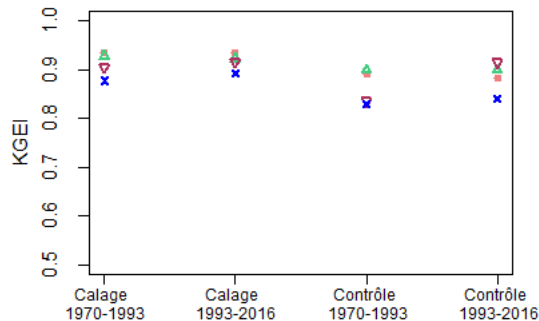
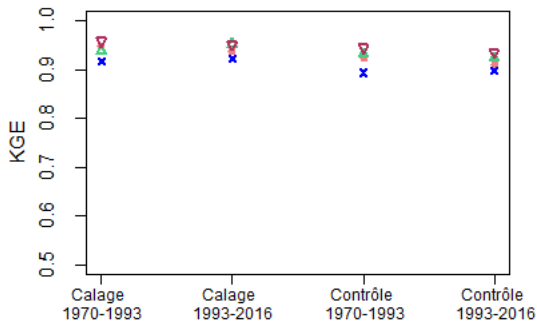
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

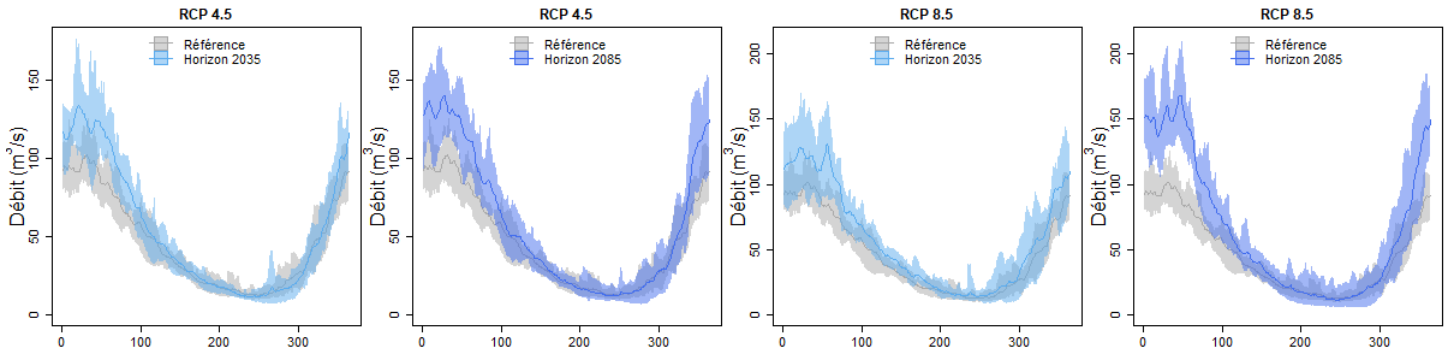


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



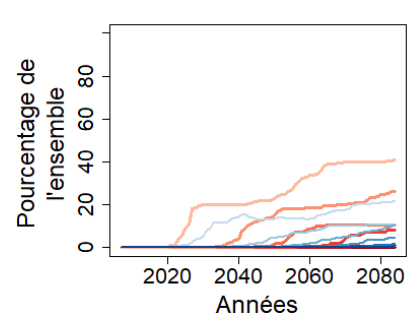
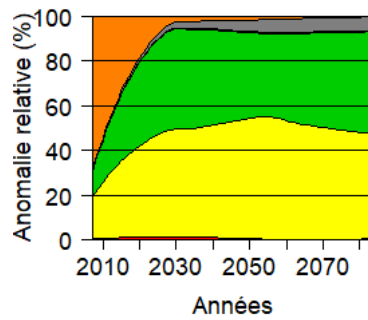
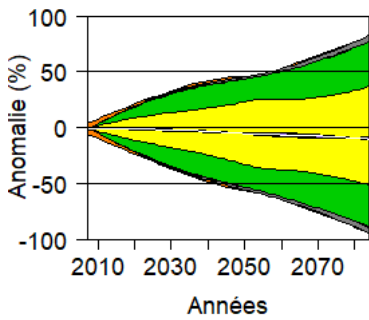
Incertitudes et tendances

Anomalie

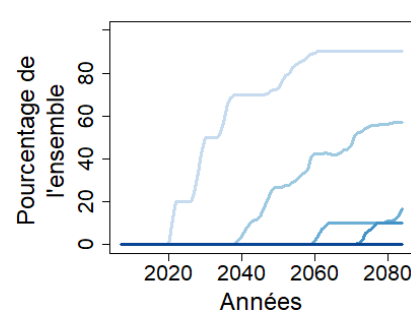
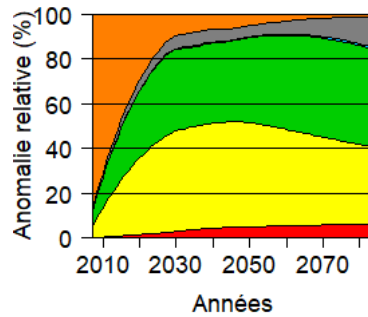
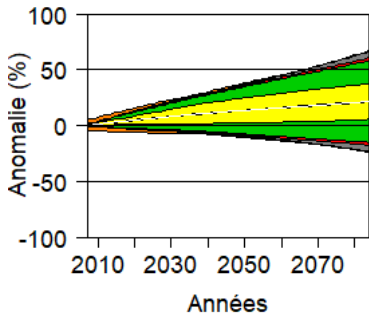
Hierarchisation

Probabilité de tendance

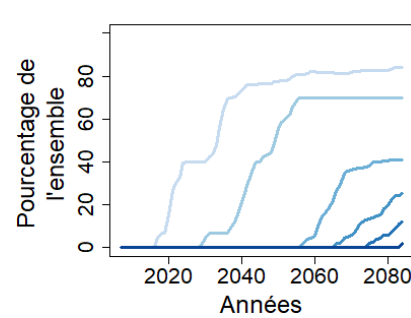
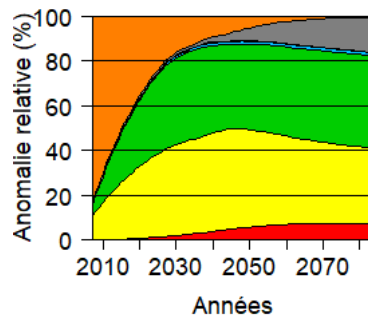
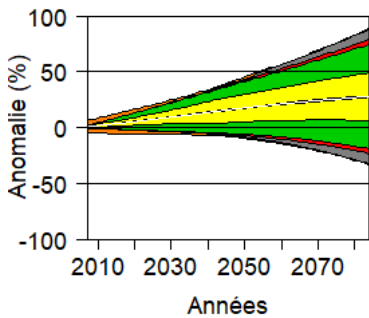
ETIAGES (VCN7-5)



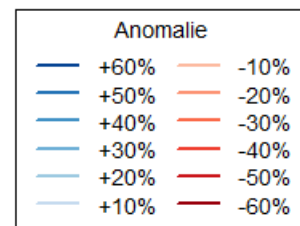
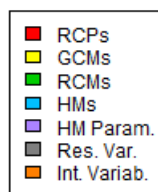
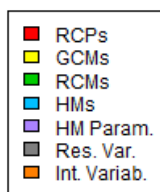
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



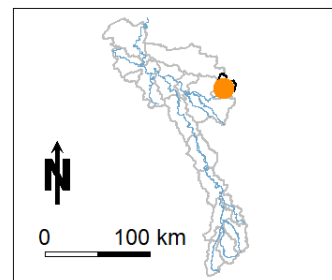
LEGENDES



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B4001010 – La Chiers @ Longlaville

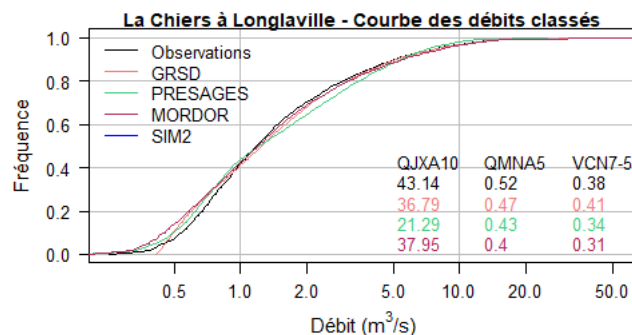
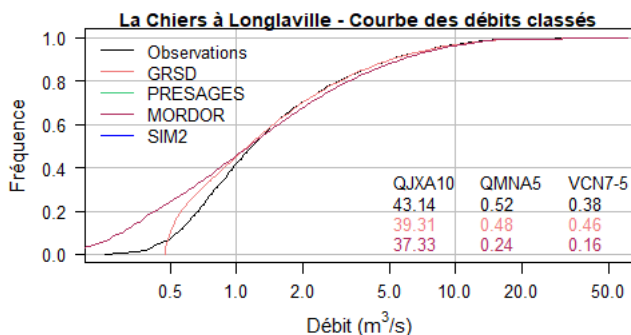
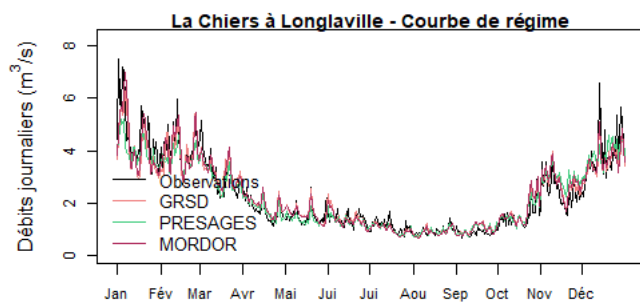
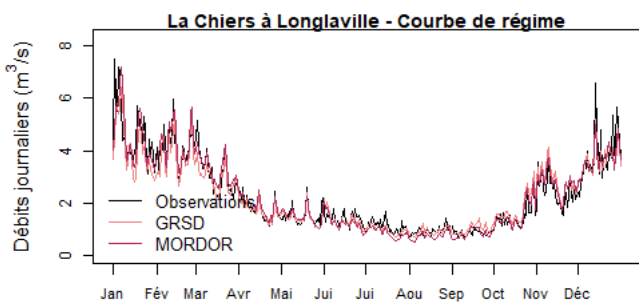


CALAGE DES MODELES

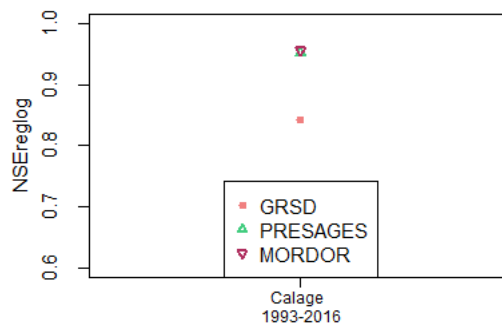
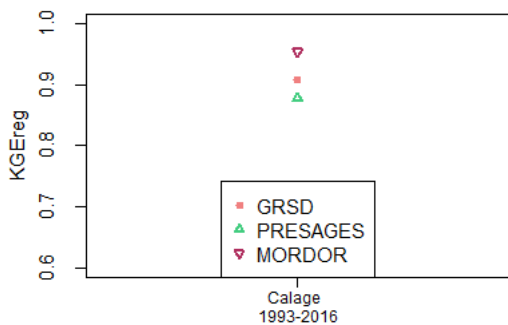
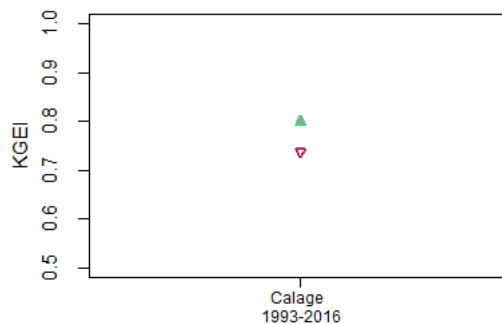
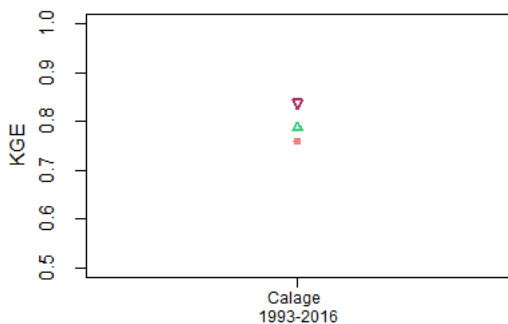
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

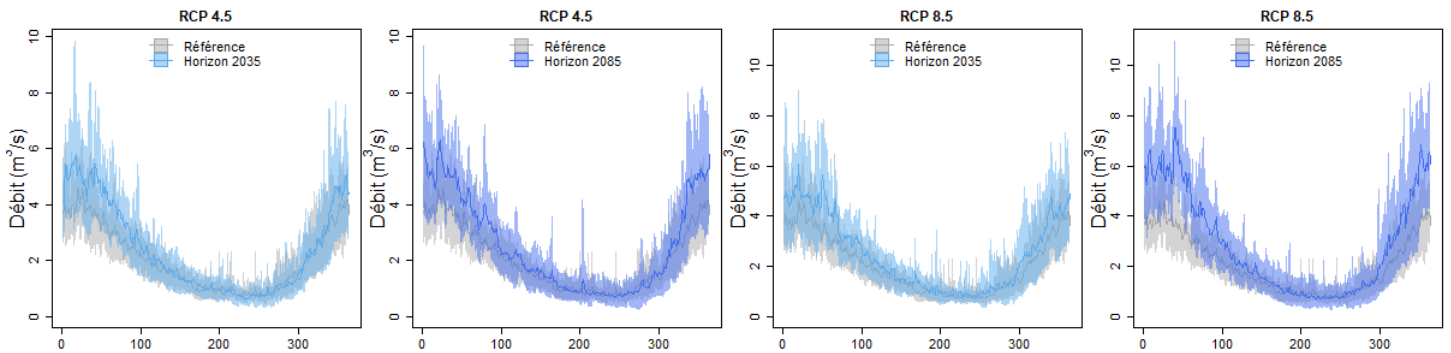


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



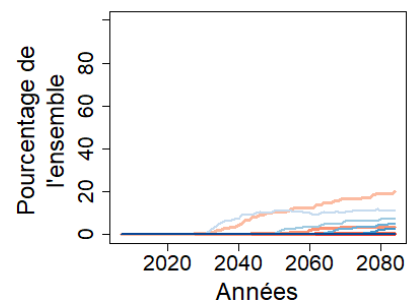
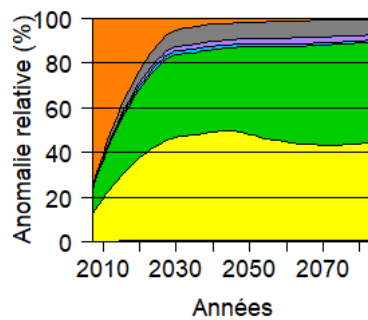
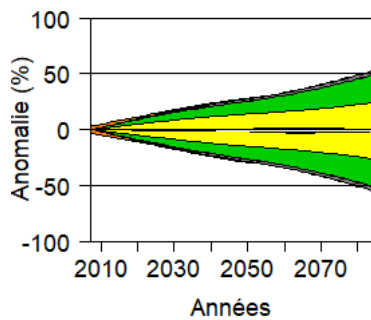
Incertitudes et tendances

Anomalie

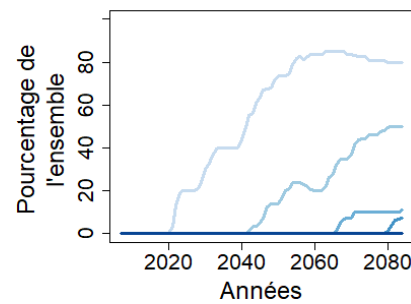
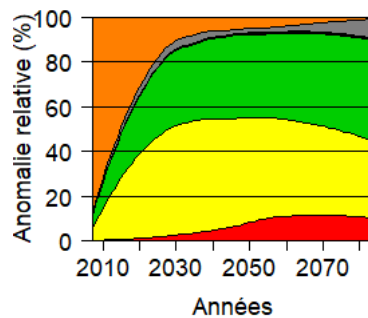
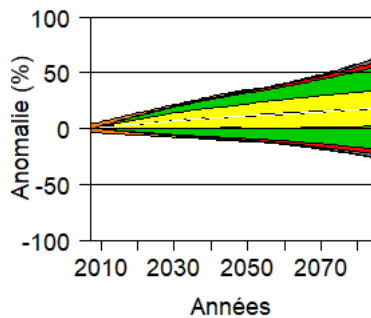
Hierarchisation

Probabilité de tendance

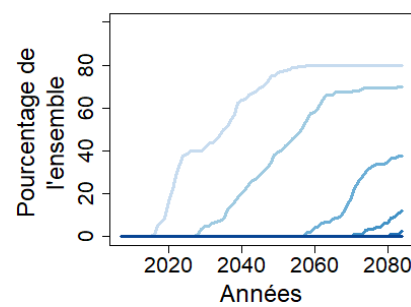
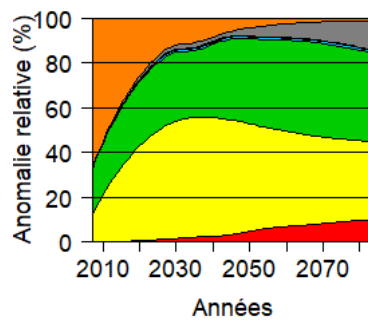
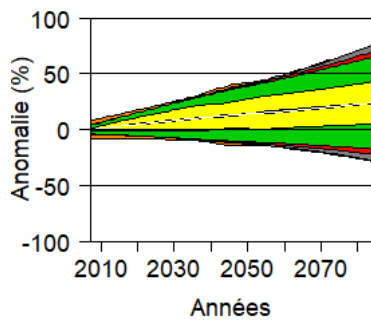
ETIAGES (VCN7-5)



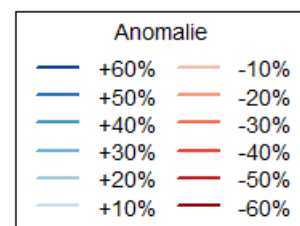
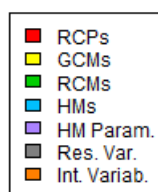
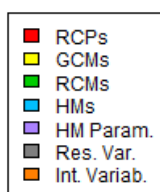
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



LEGENDES



Pour plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation des résultats,

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F. et al. (2021).

Rapport final du projet CHIMERE 21, 152 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Contact : guillaume.thirel@inrae.fr

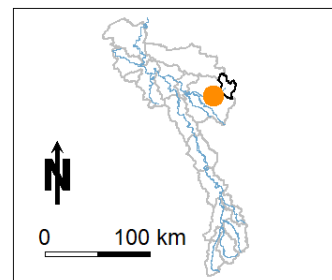
Produit par : Lila Collet et Guillaume Thirel

Le 23 avril 2021

Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B4031010 – La Chiers @ Montigny-sur-Chiers

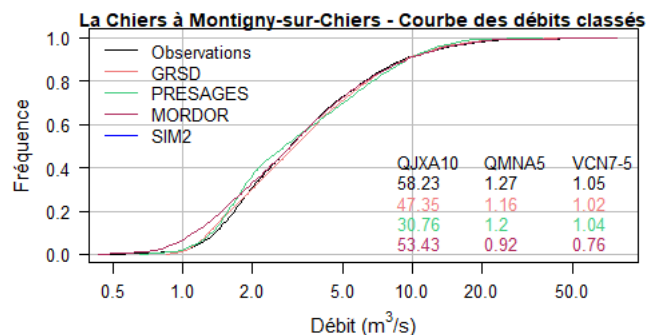
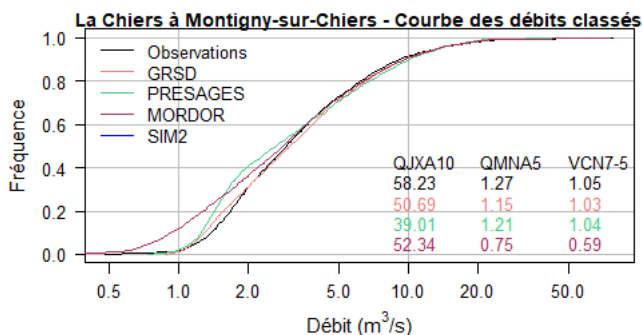


CALAGE DES MODELES

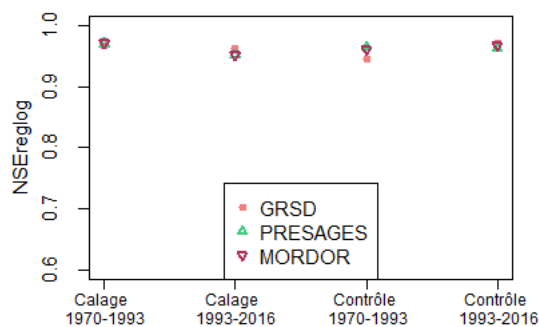
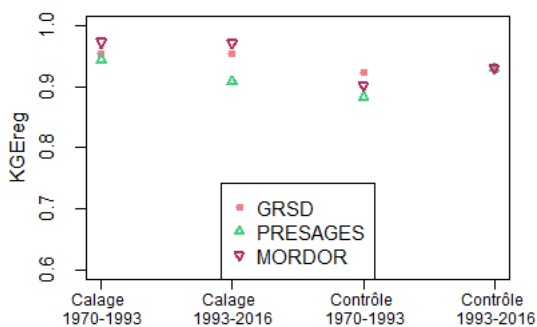
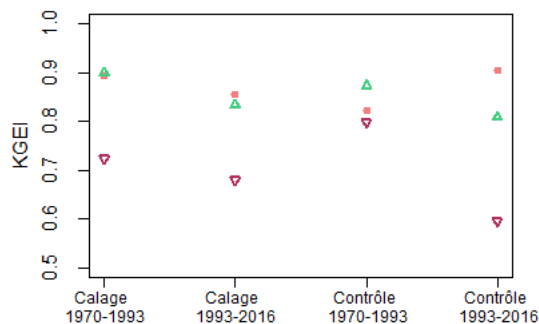
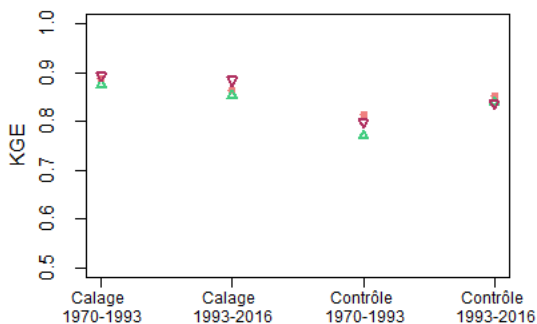
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

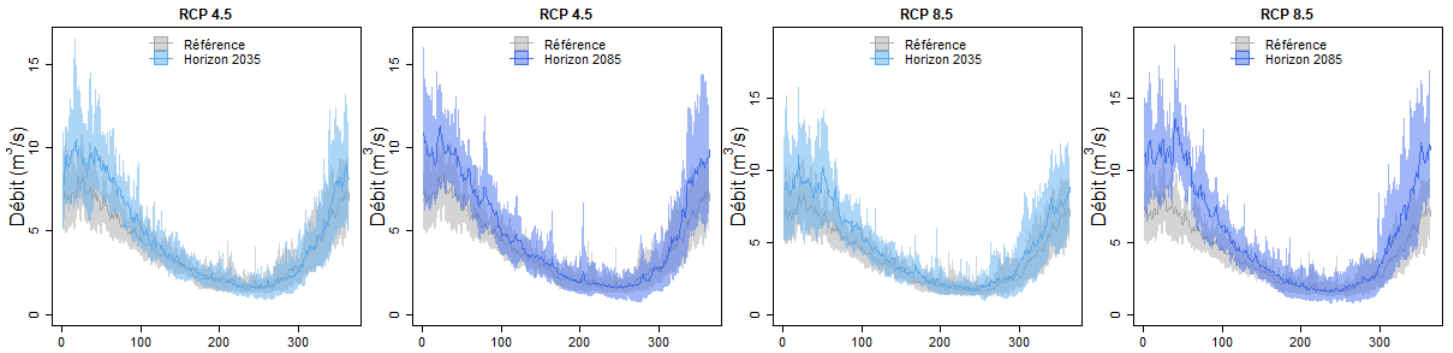


ROBUSTESSE

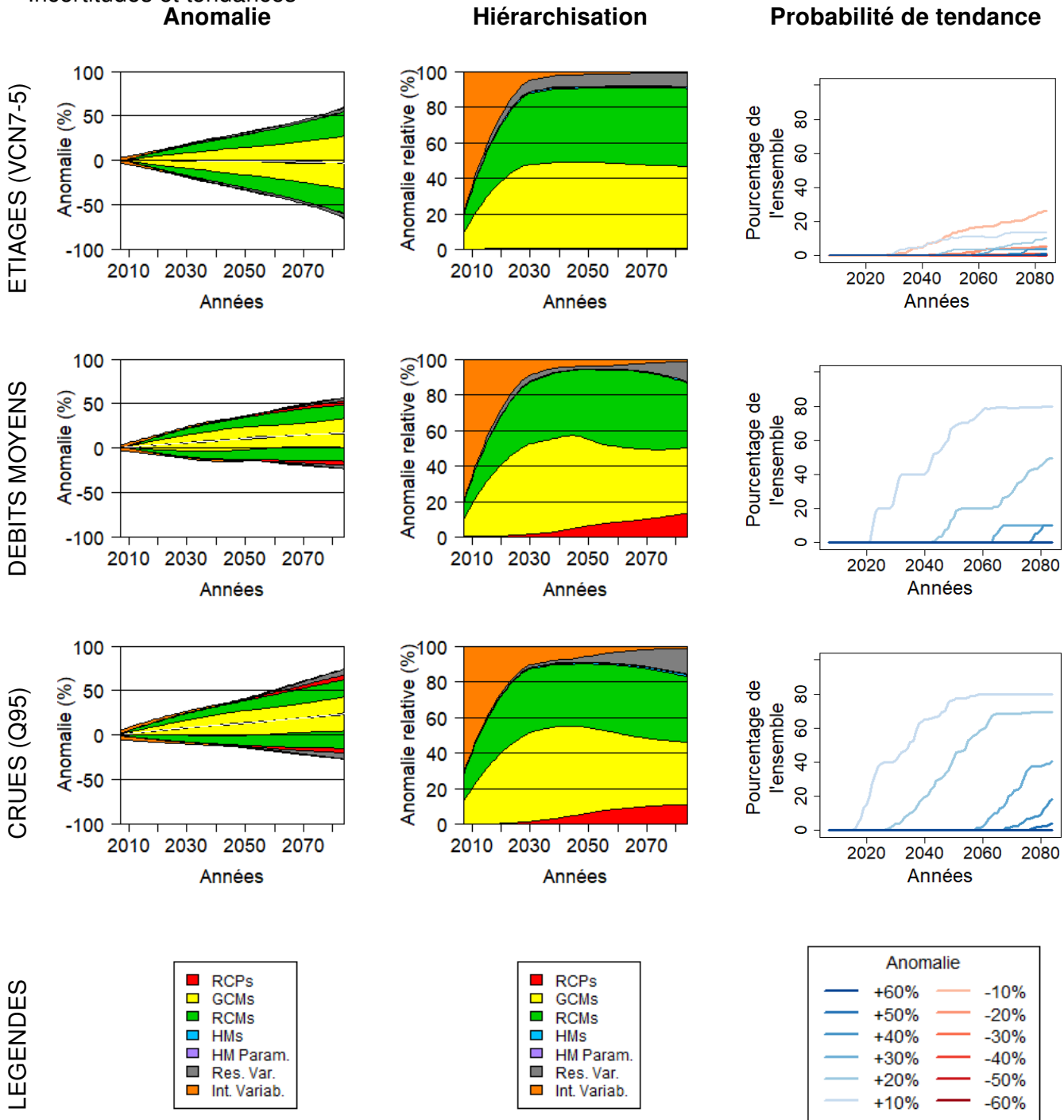


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



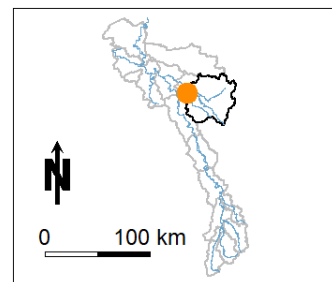
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B4601010 – La Chiers @ Chauvency-le-Chateau

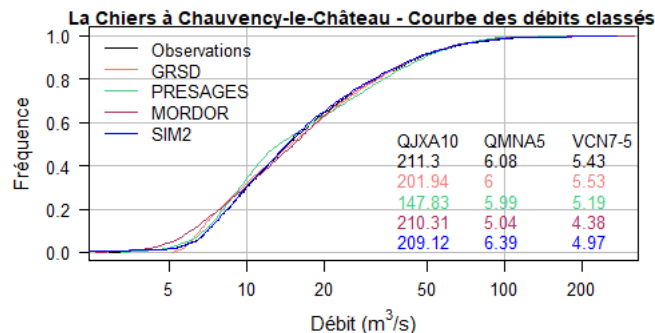
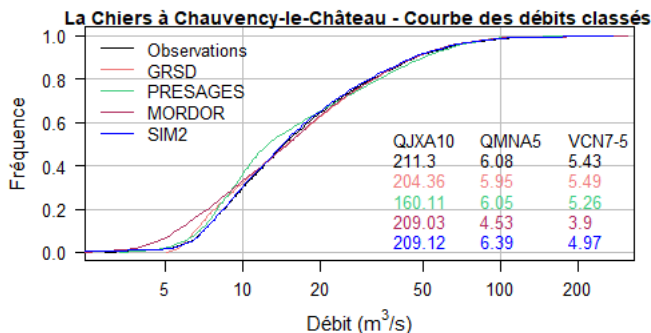
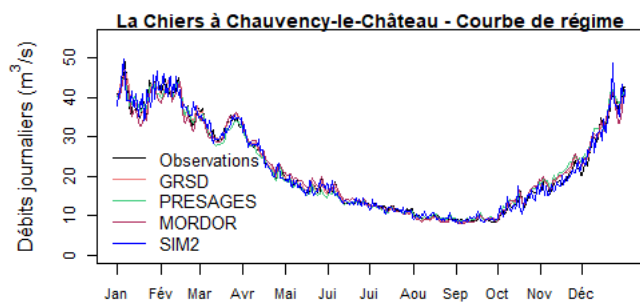
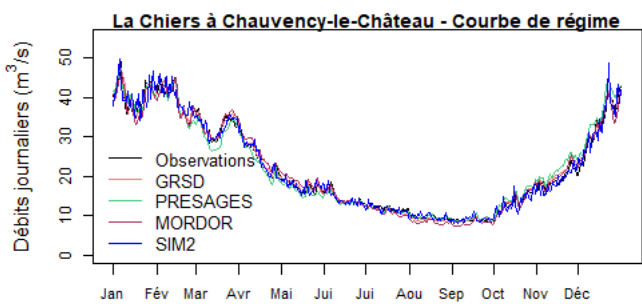


CALAGE DES MODELES

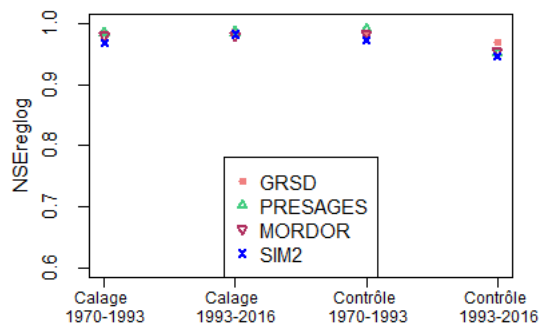
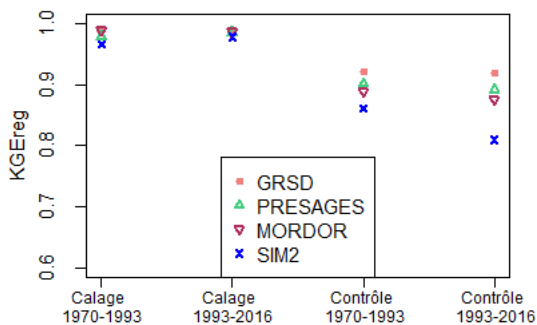
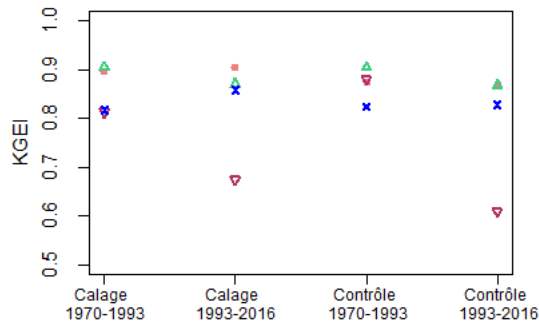
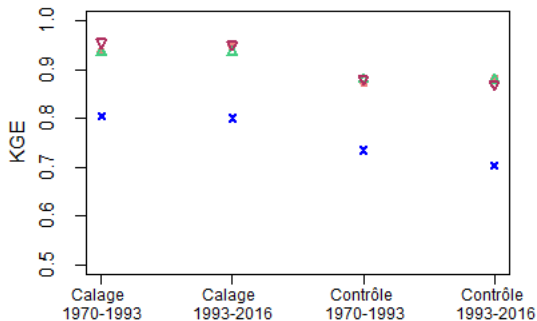
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

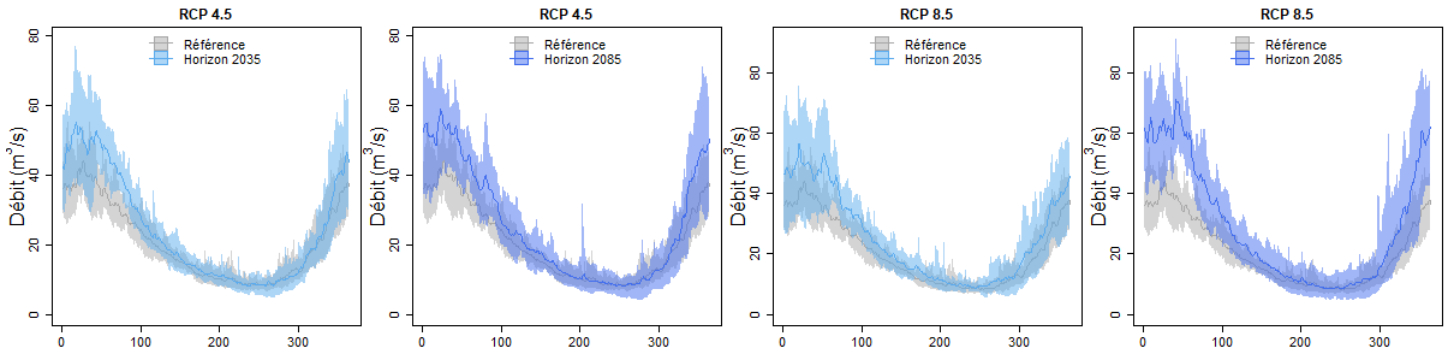


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



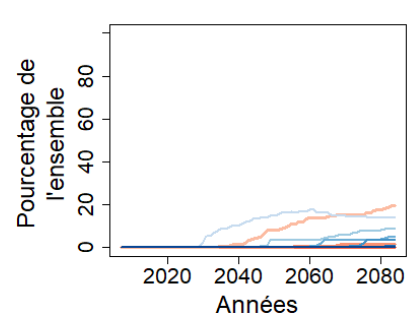
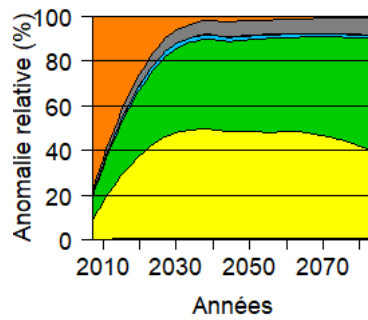
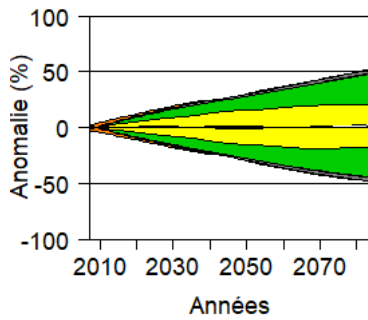
Incertitudes et tendances

Anomalie

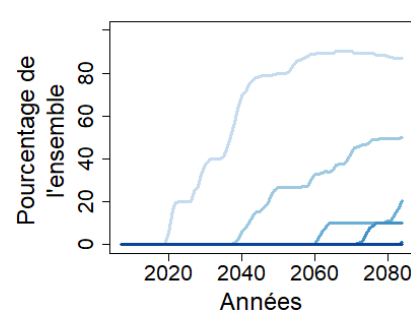
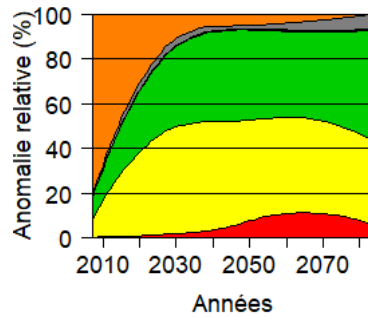
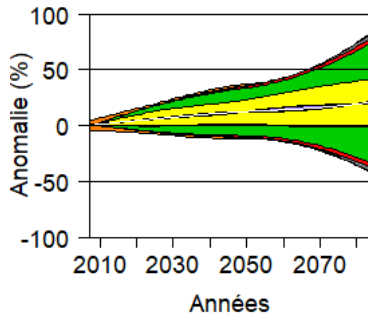
Hierarchisation

Probabilité de tendance

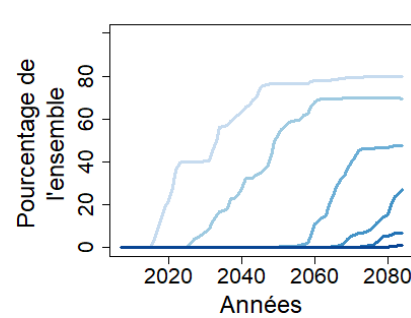
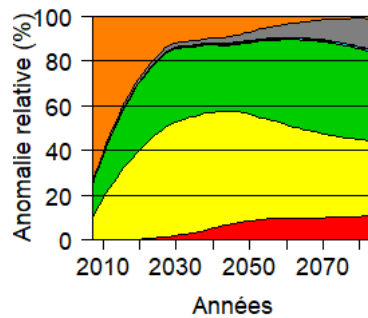
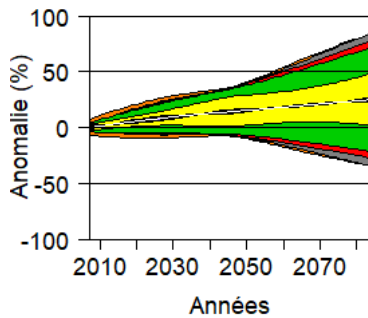
ETIAGES (VCN7-5)



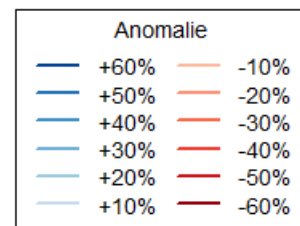
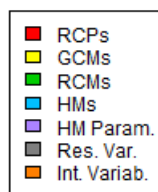
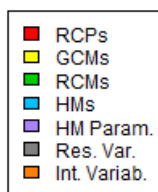
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



LEGENDES



Pour plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation des résultats,

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F. et al. (2021).

Rapport final du projet CHIMERE 21, 152 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Contact : guillaume.thirel@inrae.fr

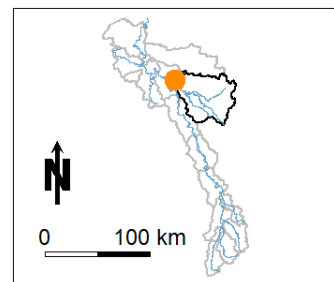
Produit par : Lila Collet et Guillaume Thirel

Le 23 avril 2021

Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B4631010 – La Chiers @ Carignan

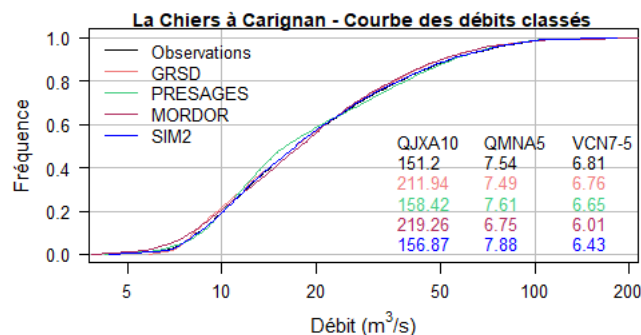
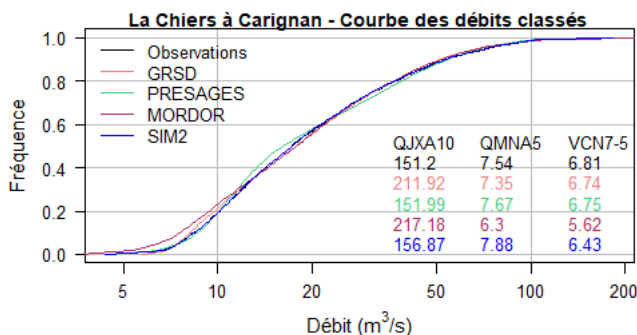
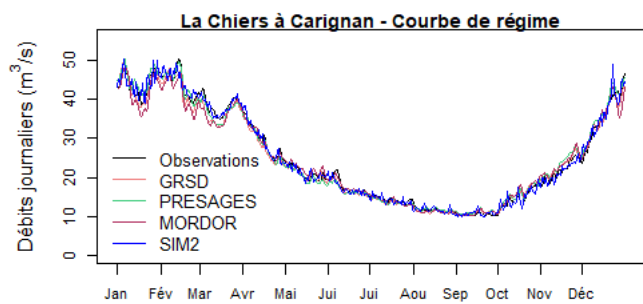
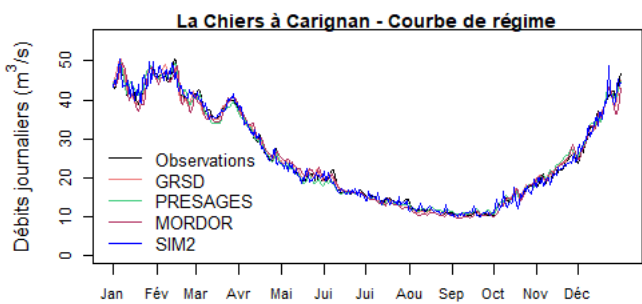


CALAGE DES MODELES

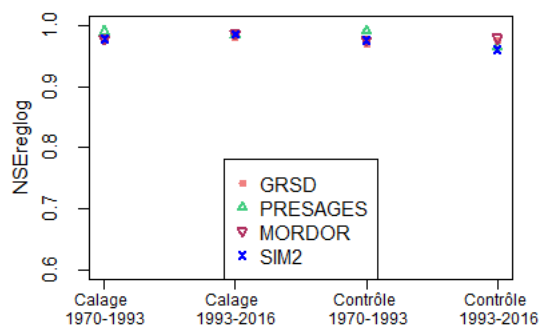
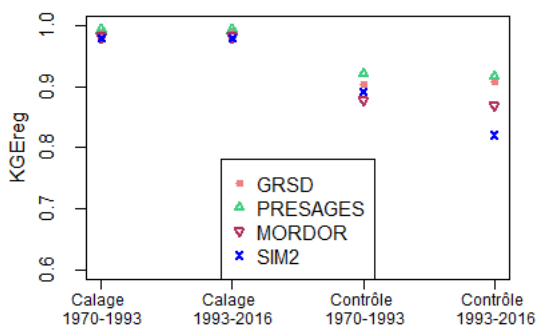
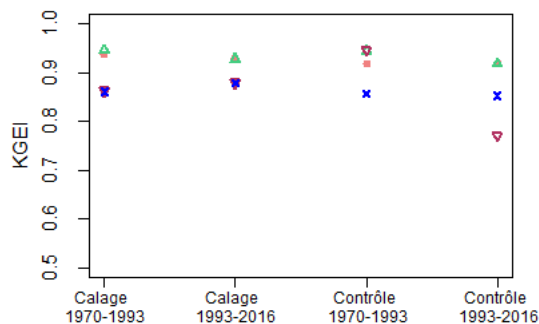
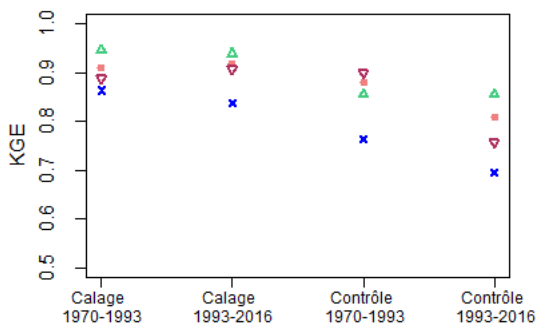
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

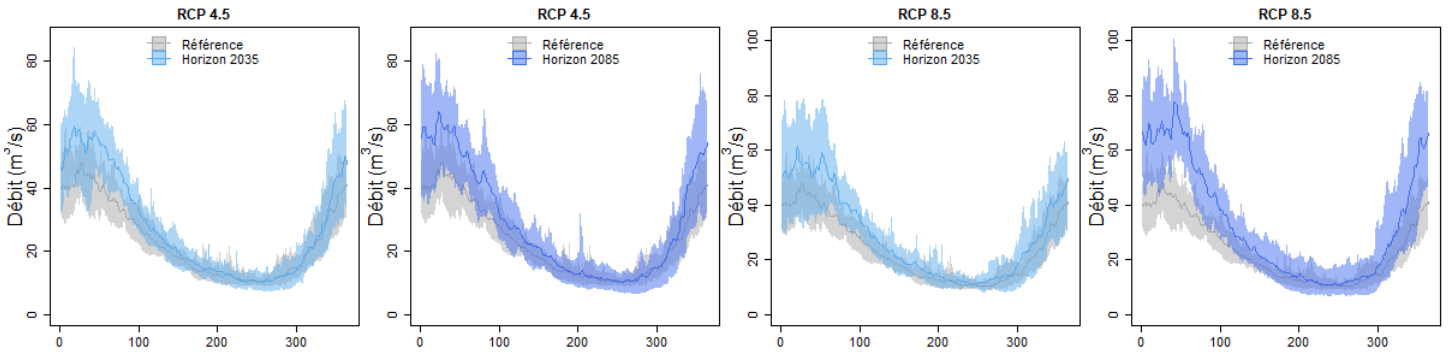


ROBUSTESSE

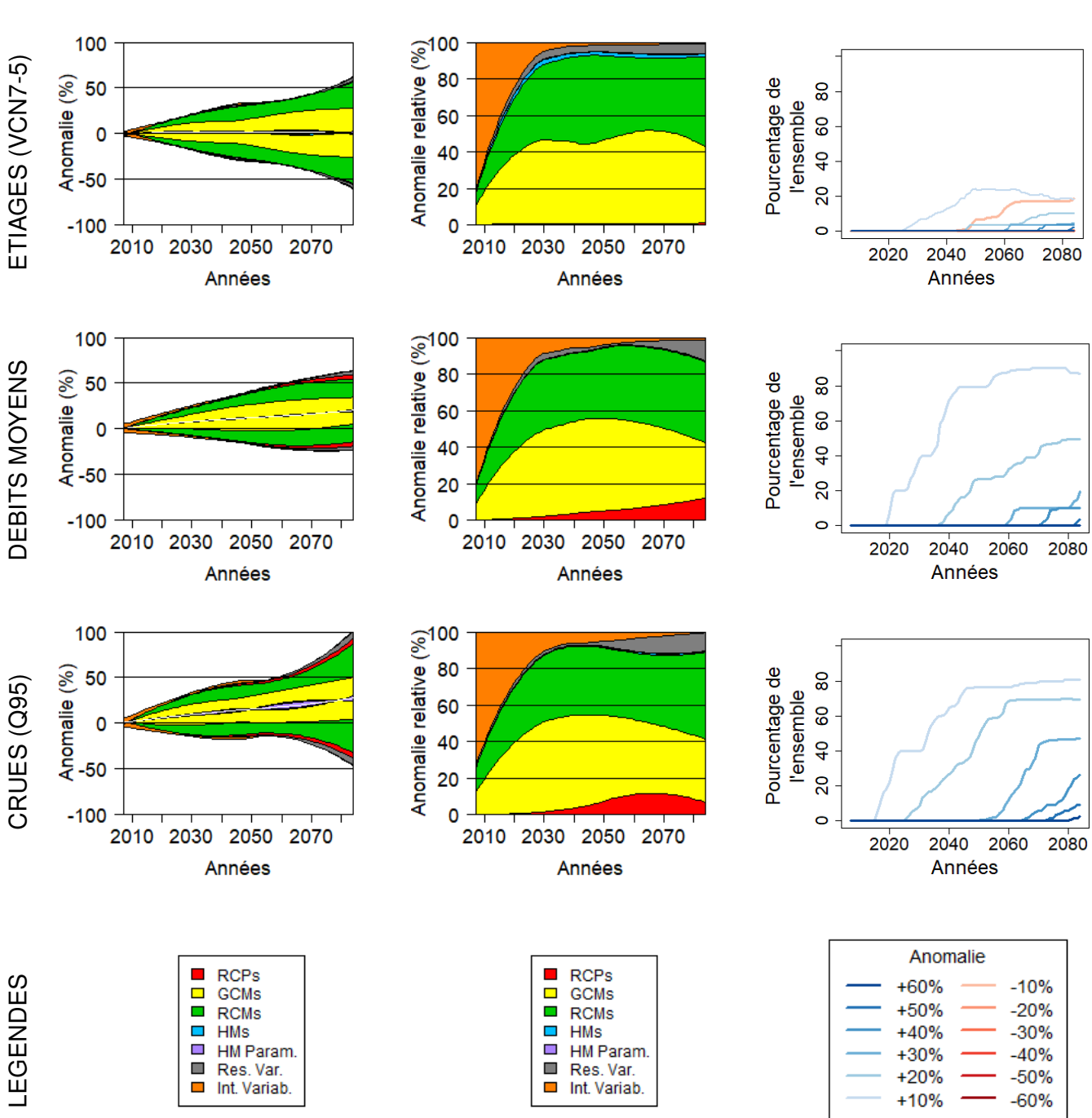


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



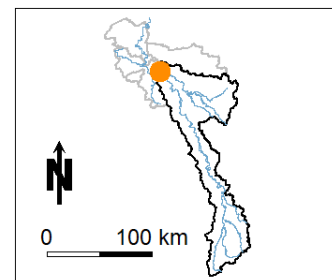
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B5020010 – La Meuse @ Sedan

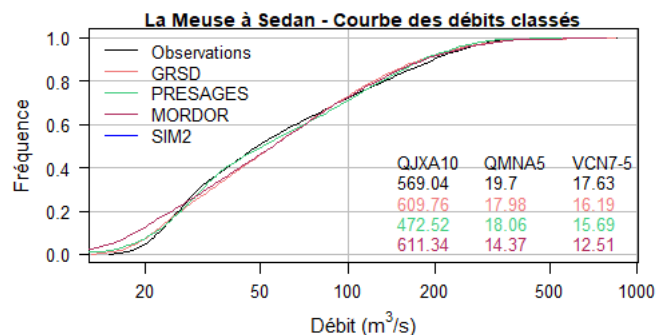
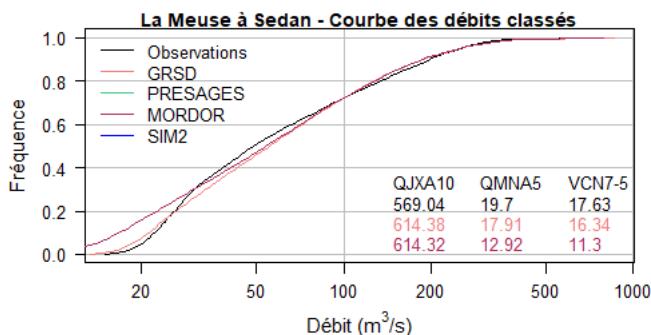
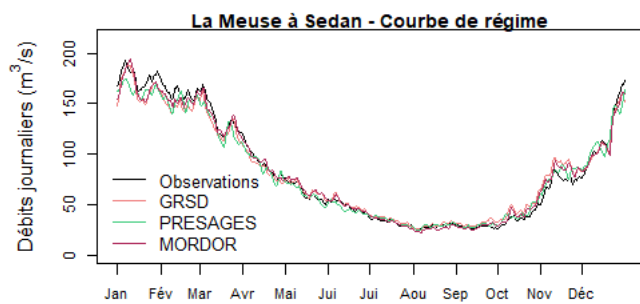
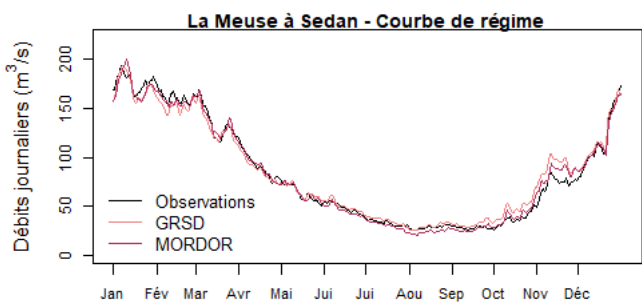


CALAGE DES MODELES

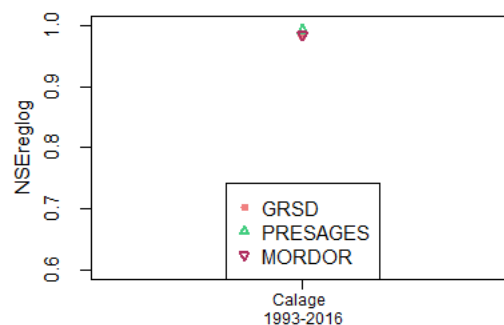
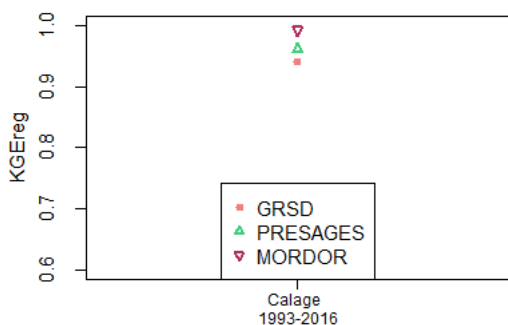
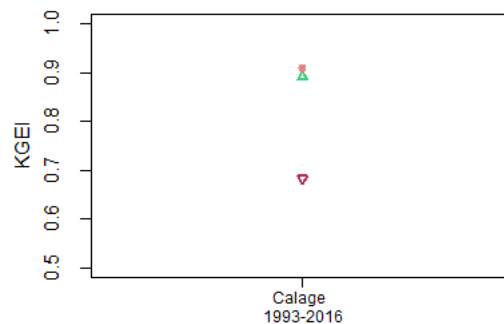
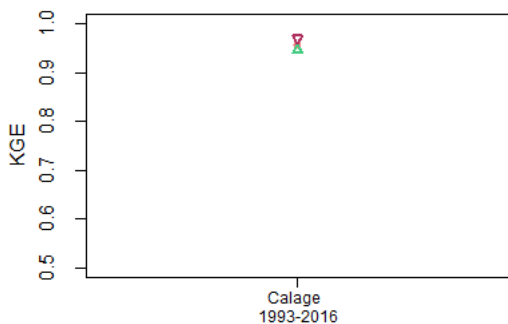
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

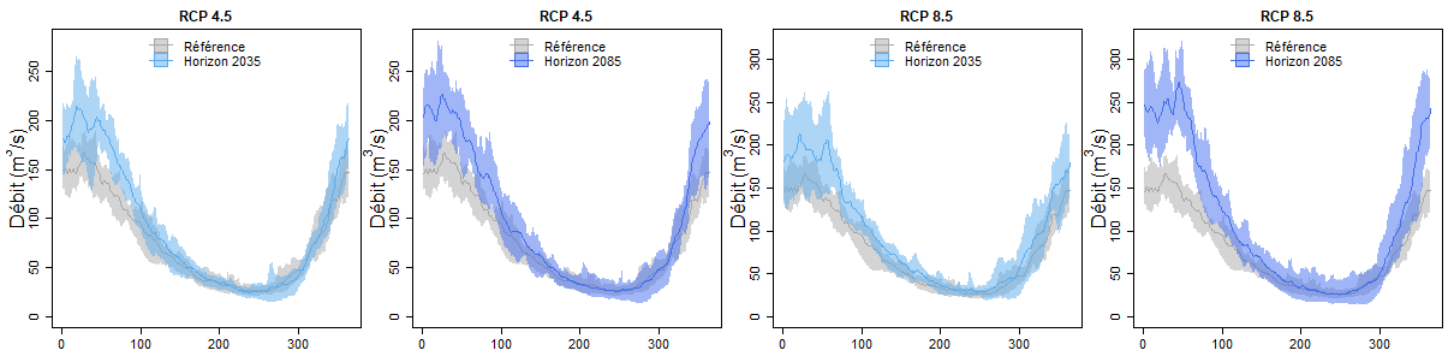


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



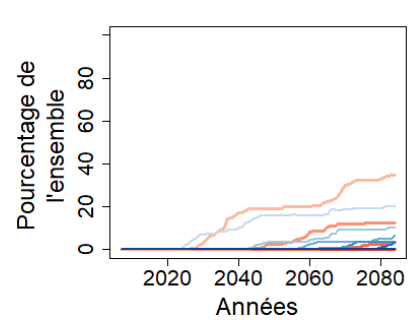
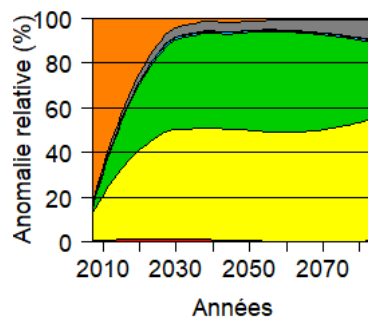
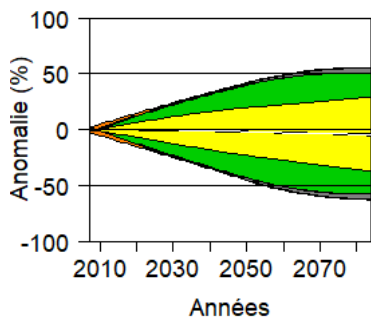
Incertitudes et tendances

Anomalie

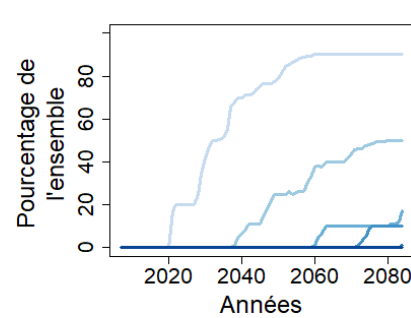
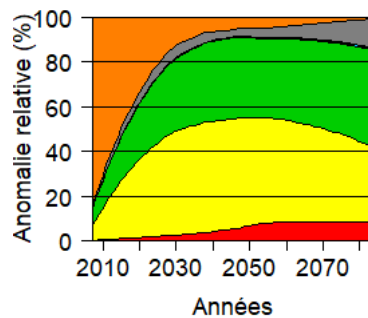
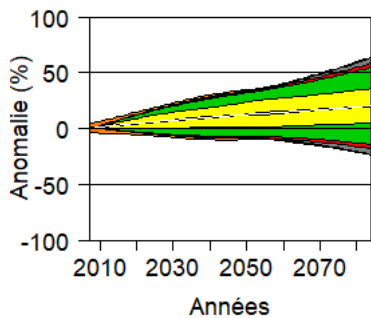
Hierarchisation

Probabilité de tendance

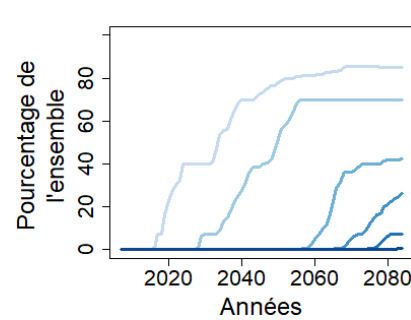
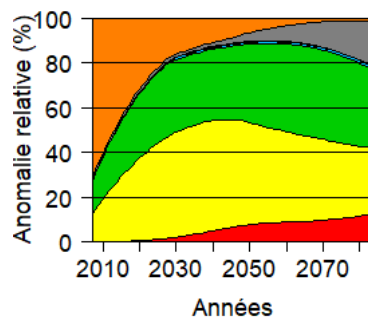
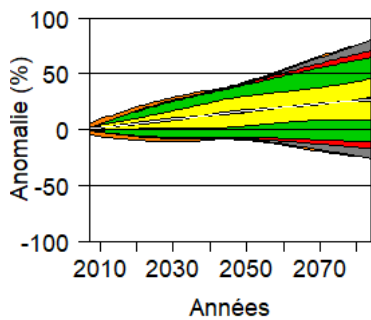
ETIAGES (VCN7-5)



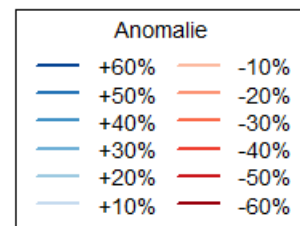
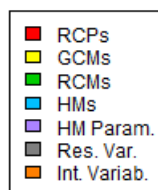
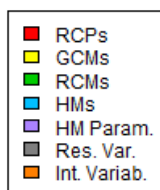
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



LEGENDES



Pour plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation des résultats,

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F. et al. (2021).

Rapport final du projet CHIMERE 21, 152 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Contact : guillaume.thirel@inrae.fr

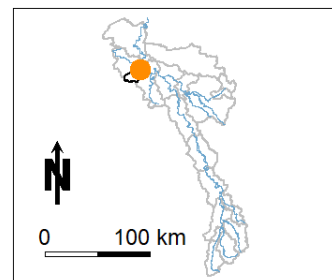
Produit par : Lila Collet et Guillaume Thirel

Le 23 avril 2021

Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B5322010 – La Vence @ la Francheville

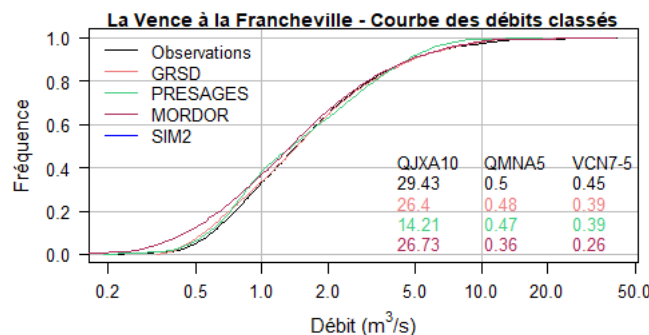
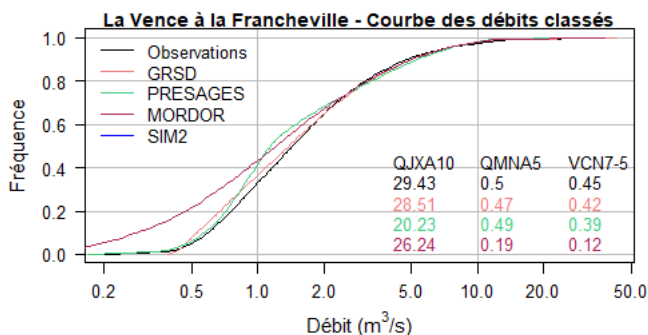
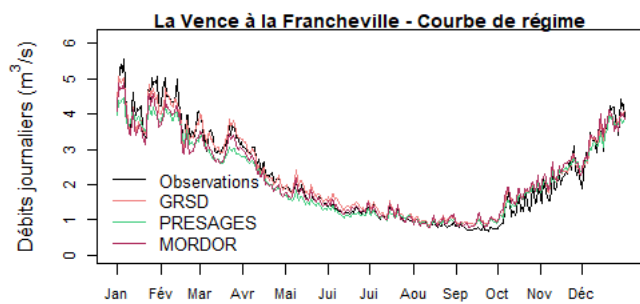
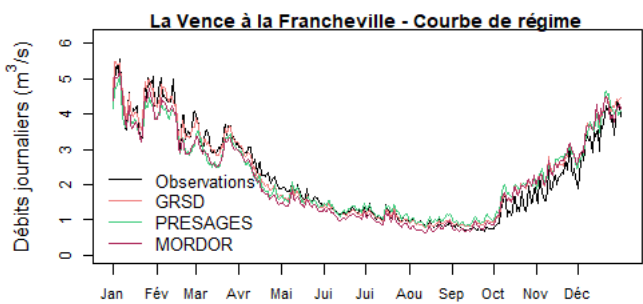


CALAGE DES MODELES

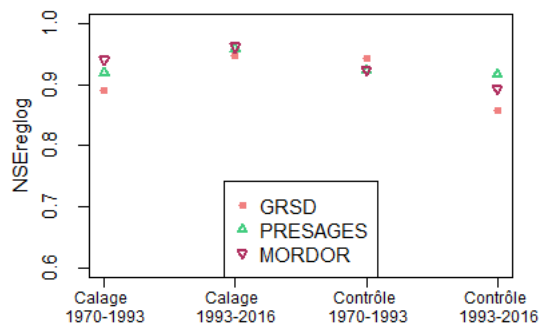
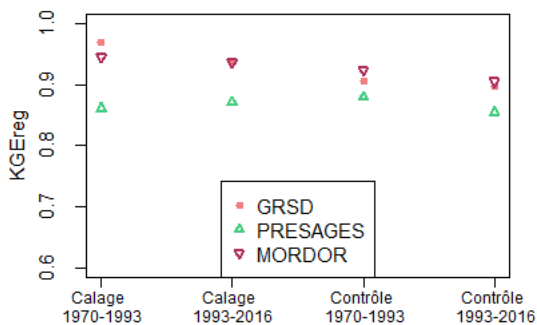
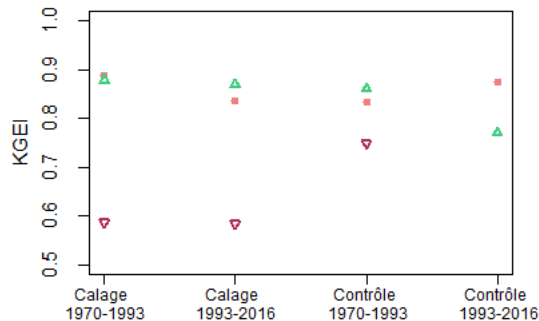
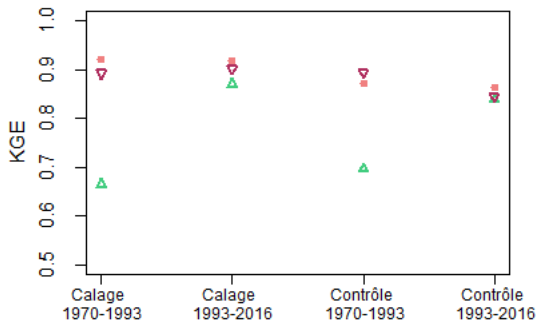
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

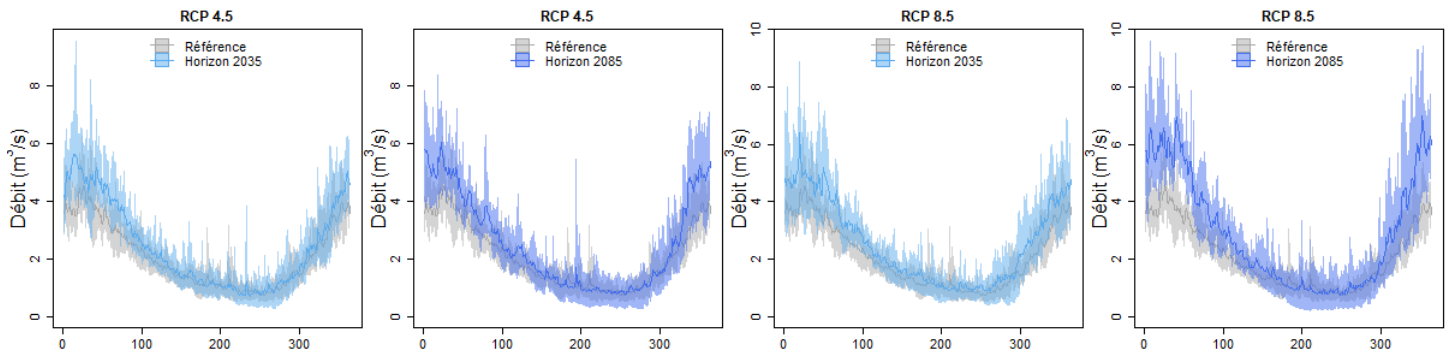


ROBUSTESSE

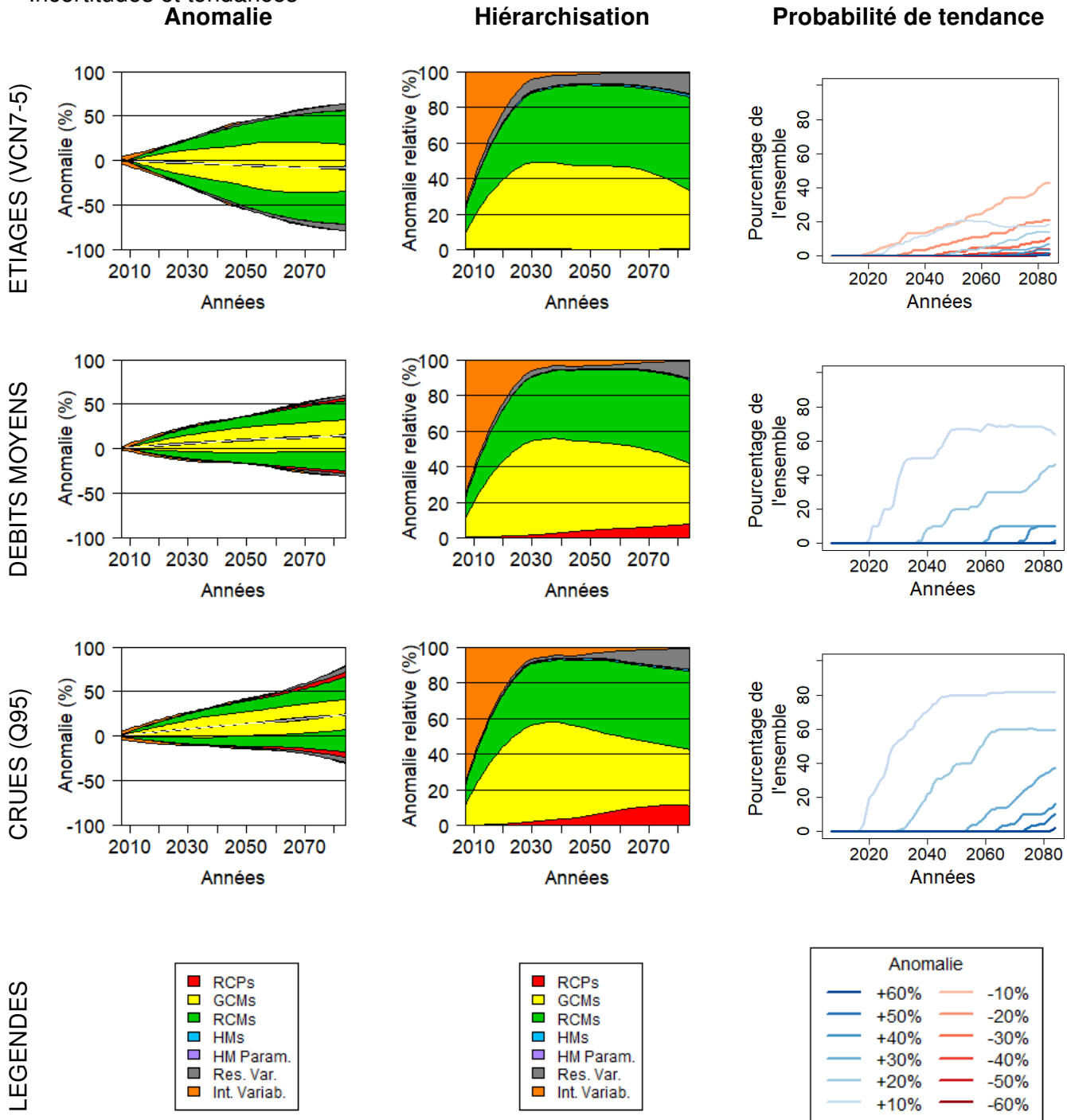


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



Incertitudes et tendances



Pour plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation des résultats,

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F. et al. (2021).

Rapport final du projet CHIMERE 21, 152 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Contact : guillaume.thirel@inrae.fr

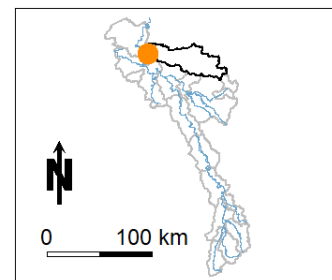
Produit par : Lila Collet et Guillaume Thirel

Le 23 avril 2021

Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B6111010 – La Semoy @ Haulme

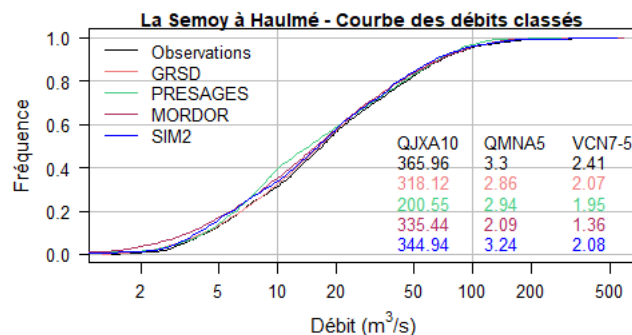
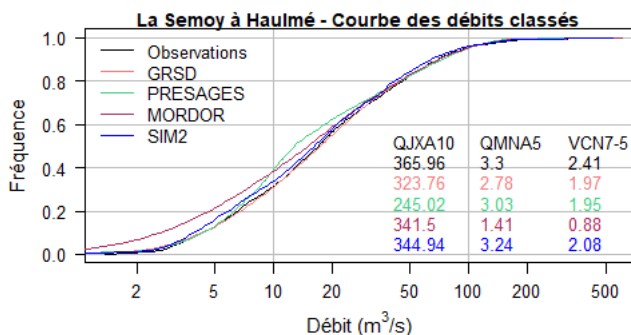
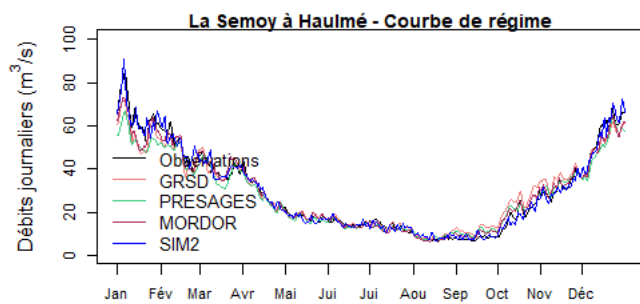
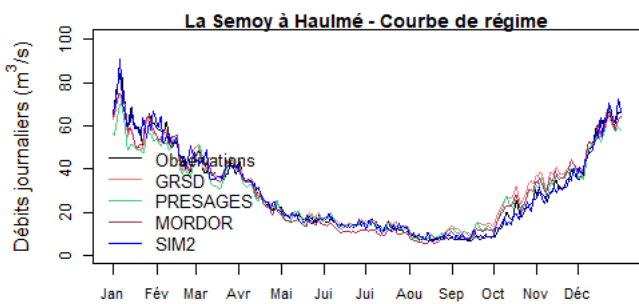


CALAGE DES MODELES

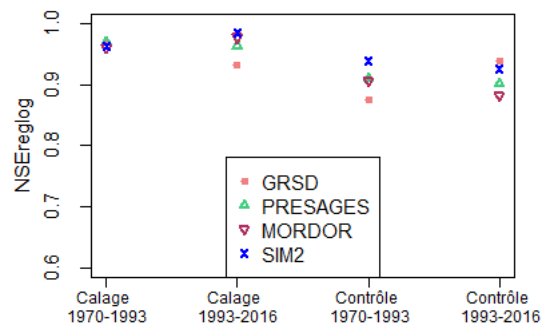
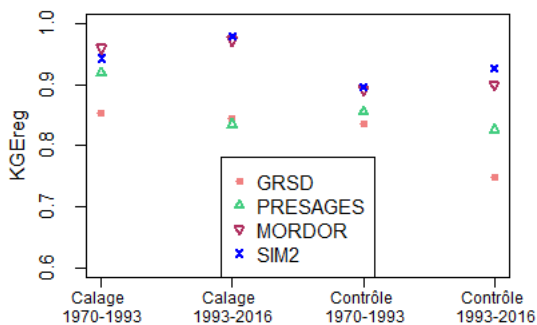
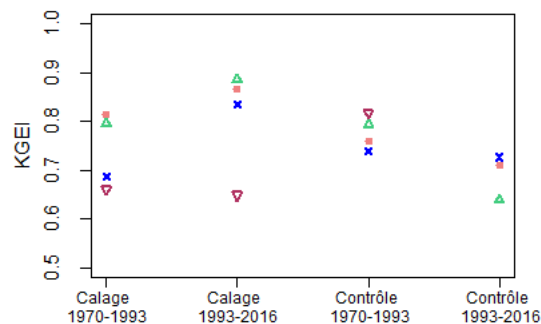
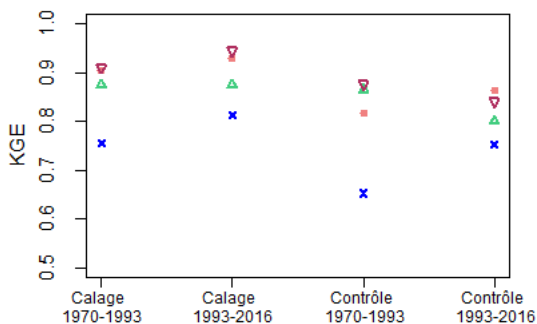
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

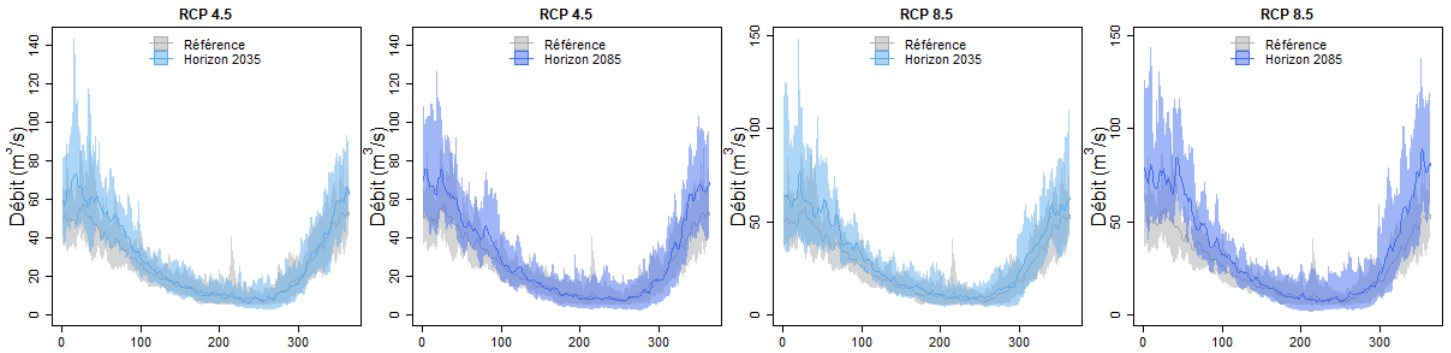


ROBUSTESSE

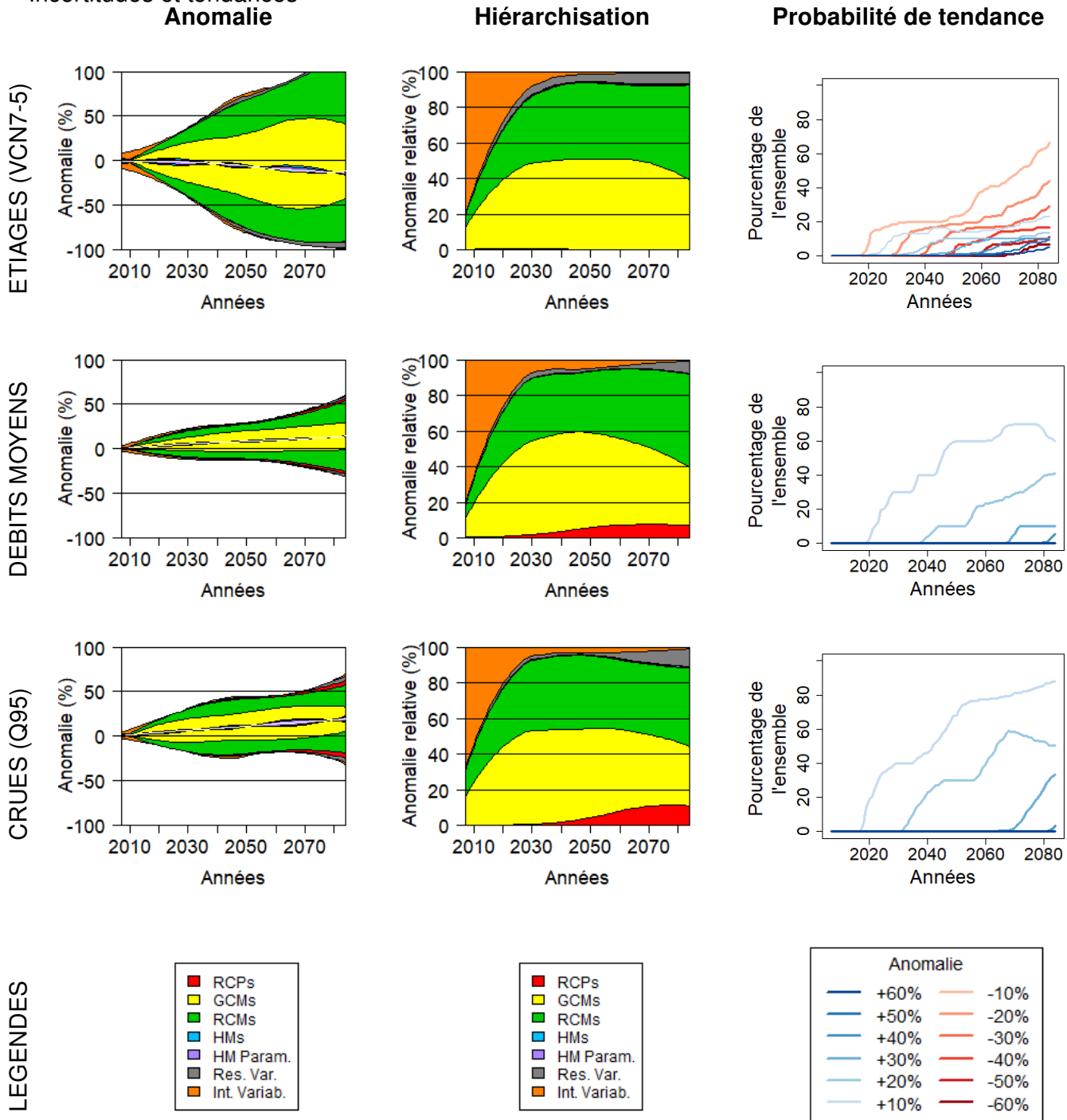


PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



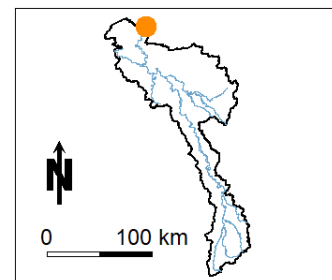
Incertitudes et tendances



Projet CHIMERE 21

Fiche synthétique

B7200000 – La Meuse @ Chooz [Trou du Diable]

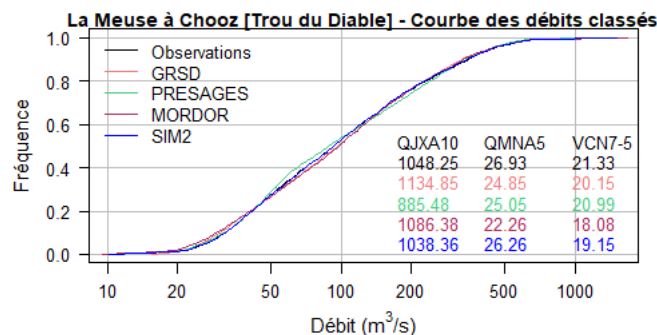
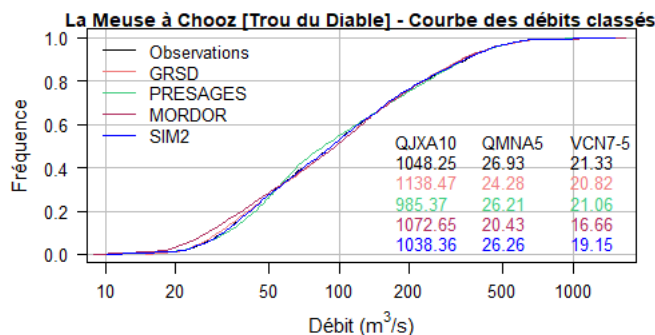
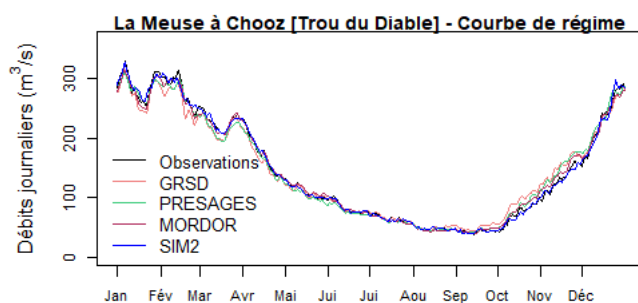
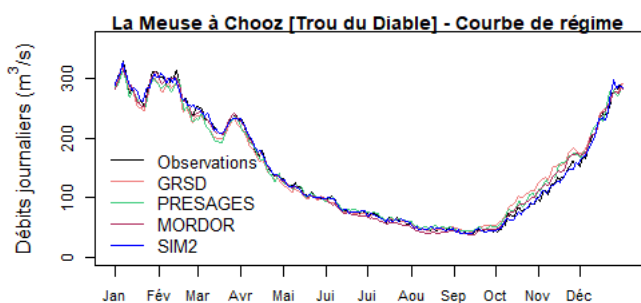


CALAGE DES MODELES

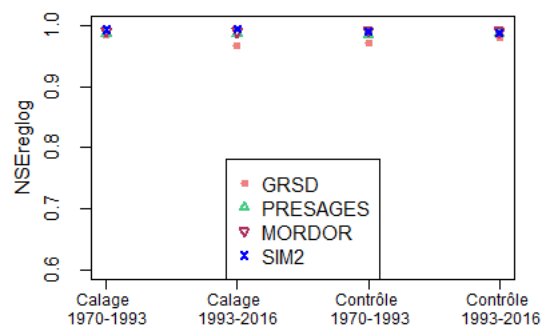
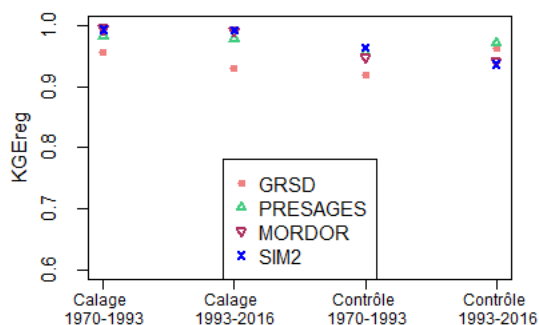
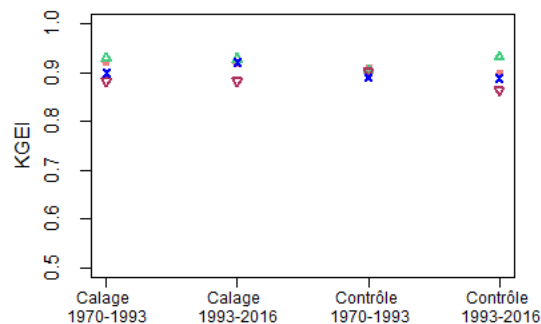
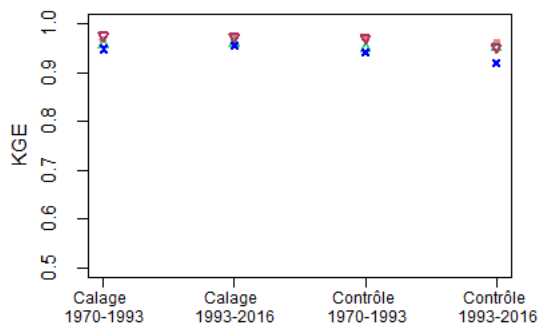
Calage régime

Calage étiages

PERFORMANCE SUR 1970-2016

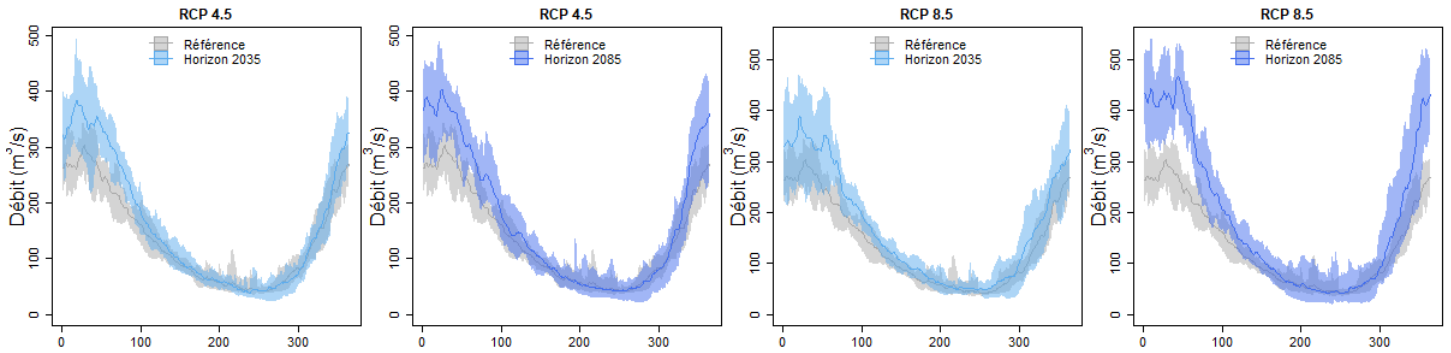


ROBUSTESSE



PROJECTIONS FUTURES

Régimes interannuels projetés, tous modèles hydrologiques confondus : période de référence = 1976-2005, périodes futures = 2021-2050 (horizon 2035) et 2071-2100 (horizon 2085)



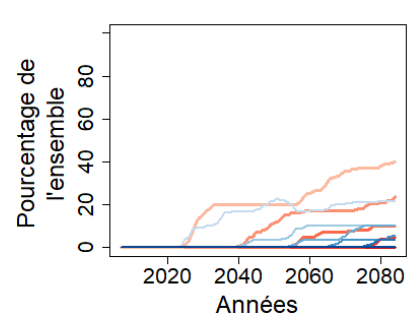
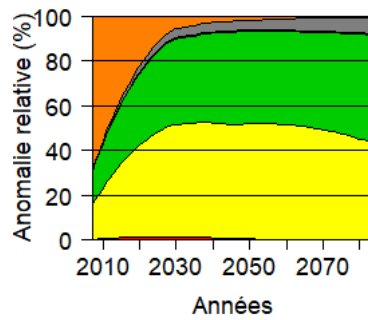
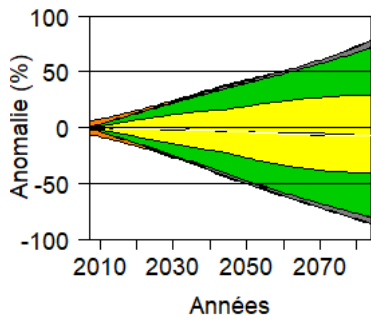
Incertitudes et tendances

Anomalie

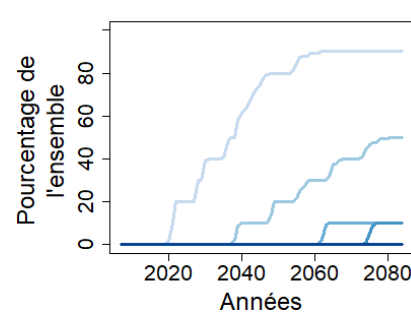
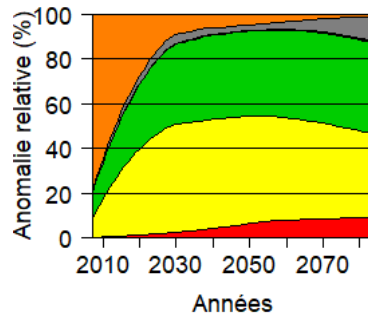
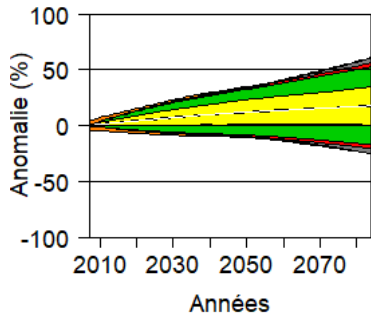
Hierarchisation

Probabilité de tendance

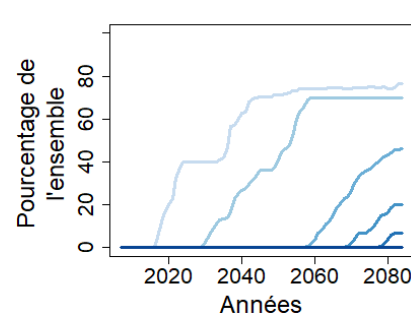
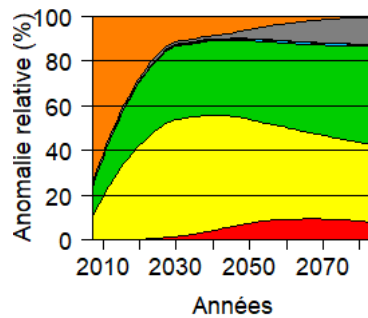
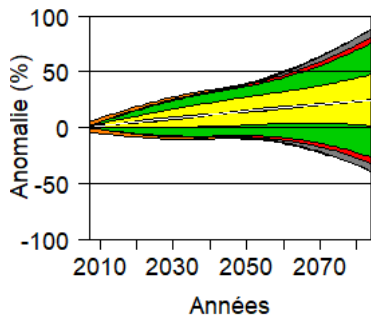
ETIAGES (VCN7-5)



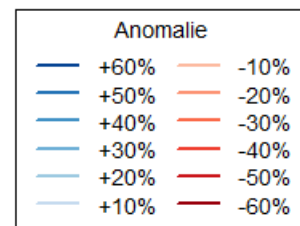
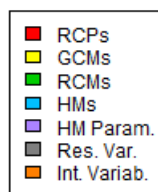
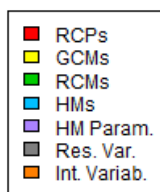
DEBITS MOYENS



CRUES (Q95)



LEGENDES



Pour plus de détails sur la méthodologie et l'interprétation des résultats,

Thirel, G., Collet, L., Rousset, F. et al. (2021).

Rapport final du projet CHIMERE 21, 152 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.

Contact : guillaume.thirel@inrae.fr

Produit par : Lila Collet et Guillaume Thirel

Le 23 avril 2021