

Université Pierre et Marie Curie

**Master 1 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Spécialité Environnements Continentaux et Hydrosociences**

Impact du changement climatique sur les débits du XXI^e siècle en France :

Une estimation avec les nouvelles projections du GIEC
(CMIP5) et le modèle hydrologique de l'Irstea (GR)

Madeleine NICOLAS

Encadrant : Guillaume THIREL

Avant-propos

Ce rapport est le résultat d'un stage de 2 mois effectué à l'Irstea dans le cadre du Master 1 Environnements Continentaux et Hydrosciences à l'Université Pierre et Marie Curie.

L'Irstea, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, est un organisme de recherche qui travaille sur le développement d'une agriculture responsable, un aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés ainsi que les écosystèmes, la biodiversité et leurs interactions.

Ce stage s'est déroulé au sein de l'unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN) dans l'équipe Hydrologie des Bassins Versants (HYDRO), sous le thème de recherche ARCEAU (Aléas et Risques liés au Cycle de l'Eau), sous l'encadrement de Guillaume Thirel.

Remerciements

Pour avoir eu la chance d'effectuer un stage enrichissant sur un sujet très intéressant, je tiens à remercier, en premier lieu, mon tuteur Guillaume Thirel, pour sa disponibilité, sa patience et sa méthodologie, qui m'ont permis non seulement d'enrichir mes connaissances en informatique et en hydrologie, mais aussi d'approfondir un sujet passionnant, d'actualité, et d'importance croissante : le changement climatique et ses impacts sur l'eau.

Je tiens également à remercier l'Irstea pour m'avoir fait confiance et permis d'effectuer ce stage, ainsi que l'équipe Hydro pour leur aide, leur accueil chaleureux et leur gentillesse, qui ont permis que ce stage se déroule dans les meilleures conditions.

Enfin, je souhaiterais remercier Jules Beersma du KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) pour avoir fourni les outils nécessaires afin d'appliquer la méthode ADC.

Sommaire

AVANT-PROPOS	1
REMERCIEMENTS	1
INTRODUCTION	3
I. ÉTAT DE L'ART/BIBLIOGRAPHIE	4
I.1. CMIP	4
I.1.1 <i>Rapport d'évaluation 4 (2007)</i>	4
I.1.2 <i>Rapport d'évaluation 5 (2014)</i>	5
I.2. MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX.....	6
I.3. METHODES DE DESCENTE D'ÉCHELLE.....	7
I.4. MODELES HYDROLOGIQUES	7
I.4.1 <i>Modèles conceptuels</i>	7
I.4.2 <i>Modèles à base physique</i>	8
I.4.3 <i>Incertitude liée au calage</i>	9
I.5. ÉTUDES ET PROJETS EXISTANTS	9
I.5.1 <i>Le projet RExHySS (Ducharne et al., 2009)</i>	9
I.5.2 <i>Le projet Explore 2070 (Chauveau et al., 2013)</i>	10
I.5.3 <i>Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe (Forzieri et al., 2014)</i>	10
II. METHODOLOGIE & DONNEES	11
II.1. LA METHODE ADVANCED DELTA CHANGE (ADC).....	11
II.2. CHOIX DES PROJECTIONS CLIMATIQUES.....	12
II.3. CREATION DES PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LES BASSINS CONSIDERES	13
II.4. GR4J	14
II.5. DESCRIPTEURS HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES	17
II.5.1 <i>Descripteurs climatiques</i>	17
II.5.2 <i>Descripteurs hydrologiques</i>	17
III. RESULTATS	19
III.1. RESULTATS A GRANDE ECHELLE	19
III.1.1 <i>Variables climatiques</i>	19
III.1.2 <i>Variables hydrologiques</i>	21
III.2. RESULTATS SUR LES GRANDS FLEUVES FRANÇAIS.....	24
III.2.1 <i>Futur proche (2021-2050)</i>	25
III.2.2 <i>Futur lointain (2071-2100)</i>	29
III.2.3 <i>Différences entre les RCP</i>	31
III.3. COMPARAISON AVEC EXPLORE 2070.....	32
IV. CONCLUSIONS	33
ANNEXES	35
REFERENCES	38

Introduction

Les conséquences hydrologiques du changement climatique en France dans le siècle à venir seront potentiellement désastreuses, notamment en ce qui concerne les étiages. Ainsi, la quantification du devenir des eaux de surface est essentielle à la prise de mesures d'adaptation. Il existe déjà aujourd'hui nombreuses études visant à déterminer la répartition future de l'eau, à une échelle régionale, comme le projet RExHySS sur la Seine et la Somme (Ducharne *et al.*, 2009), nationale, comme le projet français Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013), européenne, comme l'étude réalisée par Forzieri *et al.* (2014), ou même mondiale, comme l'étude de McDonald *et al.* (2011).

Dans le cadre de ce rapport, nous allons nous intéresser, de façon analogue à ce qui a été effectué dans le projet Explore 2070, à l'évolution des eaux de surface en France au XXI^e siècle. Nous allons étudier deux périodes, le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100). Grâce au développement des modèles hydrologiques et l'augmentation de la capacité de calcul, les projections climatiques et hydrologiques se sont améliorées. Ainsi, depuis la création de ces plus récentes projections climatiques, de meilleure qualité, l'étude de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie peut permettre de savoir si les différents projets s'accordent sur le devenir des ressources en eau.

L'étude de l'impact du réchauffement climatique sur l'hydrologie en France requiert différentes étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de simuler les conditions climatiques du futur grâce à un modèle de circulation générale (MCG) en fonction d'un scénario d'émission ou d'un profil d'évolution des gaz à effet de serre pour le XXI^e siècle. Ensuite, puisque les MCG sont conçus pour fonctionner à une résolution grossière, la seconde étape consiste à régionaliser les scénarios climatiques, ce qui permet d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les MCG, tout en corrigeant les défauts statistiques pouvant être issus de ce processus. On parle alors de descente d'échelle. Une troisième et dernière étape est nécessaire afin de transformer ces projections climatiques (température, évapotranspiration potentielle, et précipitations) en débits, indicateurs du fonctionnement hydrologique du système. Pour cela, l'utilisation de modèles hydrologiques permet, suite à un calage de certains paramètres mis en jeu si besoin, d'estimer les impacts du changement climatique sur les bilans hydrologiques.

Dans ce stage, après une revue bibliographique, nous introduirons la méthode de descente d'échelle employée, l'Advanced Delta Change, pour régionaliser les scénarios climatiques issus de plusieurs MCG mis en place pour le dernier rapport du GIEC, et nous introduirons le modèle GR4J de l'Irstea. Les résultats des projections sur le XXI^e siècle seront analysés tant du point de vue climatique qu'hydrologique sur le territoire français ainsi que sur une sélection restreinte de grands bassins. Enfin, nous concluons.

I. État de l'art/Bibliographie

La simulation des conditions climatiques futures suit généralement une approche de haut en bas: des scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont introduits dans des simulations, qui sont ensuite régionalisées et débiaisées. Ces deux premières étapes reposent sur divers organismes. Le GIEC produit les scénarios d'émission, qui sont ensuite utilisés par différents groupes de modélisation qui vont joindre leurs résultats au sein du projet CMIP.

I.1. CMIP

En climatologie, le CMIP ou Climate Model Intercomparison Project, créé par le Programme Mondial de Recherches sur le Climat (en anglais WCRP, World Climate Research Programme) est un programme international consacré au diagnostic, la validation et la comparaison de la capacité des modèles atmosphériques à simuler le climat (WCRP, s.d.) Celui-ci permet la mise en relation de la grande majorité des centres de modélisation de l'atmosphère et du climat, ayant pour mission d'évaluer la performance des MCG. En effet, les projets dans lesquels plusieurs modèles climatiques sont utilisés sur la base de différents scénarios d'émission sont aujourd'hui une façon de produire des projections climatiques tout en permettant de mesurer l'incertitude dans les scénarios d'émission, les modèles en eux-mêmes ou les conditions initiales (Knutti et Sedláček, 2013). Si les projections issues de modèles différents s'accordent entre elles, alors la confiance associée à ces résultats augmente ; si, au contraire, les résultats varient largement entre les différents groupes, alors l'incertitude est importante.

Depuis 2008 le WCRP a entrepris la cinquième phase du projet CMIP (CMIP5), le projet le plus récent dans ce genre. Le CMIP5 se distingue des phases antérieures (comme CMIP3) puisque celui-ci prend en compte une contribution importante des utilisateurs potentiels de ce modèle, même ceux dont les activités ne relèvent pas directement de l'étude du climat, comme des responsables politiques ou des biogéochimistes. Cette phase est également améliorée par une meilleure résolution spatiale, et des stratégies différentes de partage des résultats (Taylor *et al.*, 2012).

Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) a été créé conjointement en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), ayant pour objectif d'étudier le changement climatique et ses conséquences environnementales et socio-économiques. Il a pour but de formuler des stratégies d'intervention réalistes (IPCC, s.d. – a). C'est pourquoi, depuis sa création, le GIEC a produit une série de rapports d'évaluation, les plus récents étant le quatrième (AR4, 2007) puis finalement le cinquième (AR5, 2013).

I.1.1 Rapport d'évaluation 4 (2007)

Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, visant à déterminer comment le climat mondial va évoluer dans le siècle à venir, décrit une série de scénarios d'émission de gaz à effet de serre détaillés dans le Rapport Spécial de Scénarios d'Emission (en anglais SRES, Special Report on Emissions Scenarios). Quatre canevas narratifs ont été élaborés, dépendant du développement des sociétés en termes de démographie et développement économique, ainsi que de l'évolution de la technologie, l'offre et la demande en énergies puis le changement d'utilisation du sol. Il est important de noter qu'aucun des scénarios ne tient compte de politiques générales futures d'intervention explicite au sujet du changement climatique (IPCC, 2000). Pour chaque canevas, plusieurs scénarios différents ont été élaborés en utilisant des approches différentes de modélisation, permettant ainsi par une approche multi-modèle d'englober l'éventail des incertitudes des émissions futures de gaz à effet de serre. Il existe au total six scénarios: A2, B1, B2, A1FI, A1T et A1B.

- La famille de scénarios A1 décrit un monde dans lequel la croissance économique est très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du XXI^{ème} siècle et l'introduction de nouvelles technologies plus efficaces sera rapide. Cette famille de scénarios s'appuie sur une homogénéisation entre régions, et donc le renforcement des interactions culturelles et sociales. Il existe trois groupes différents qui décrivent les directions possibles de l'évolution de l'utilisation des énergies. A1FI repose sur une forte intensité de combustibles fossiles, A1T sur des énergies autres que fossiles et A1B sur l'équilibre entre ressources.
- Le scénario A2 repose sur la préservation des identités locales. Cela a pour conséquence un accroissement continu de la population mondiale et une distribution hétérogène de la croissance économique par habitant, et de l'évolution technologique.
- Le scénario B1 ressemble aux scénarios A1 avec une population mondiale culminant au milieu du siècle, mais diffère par l'introduction de changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et donc une utilisation efficace des ressources.
- Le scénario B2 repose sur une mise en application de solutions locales. La population mondiale s'accroît de manière continue mais plus faible que pour A2 avec une évolution technologique moins rapide.

I.1.2 Rapport d'évaluation 5 (2014)

Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) considère des nouvelles preuves du changement climatique basées sur les plus récentes analyses scientifiques indépendantes à partir d'observations du système climatique, d'archives paléoclimatiques, d'études théoriques des processus climatiques et de simulations issues de modèles climatiques (IPCC, 2013). Il s'appuie sur le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (AR4) tout en intégrant les nouvelles découvertes de la recherche. Une des différences principales avec le rapport précédent est le développement des RCP ou Representative Concentration Pathways (en W/m^2) et non des SRES comme dans l'AR4. Les RCP, obtenus par une méthode de forçage climatique d'origine anthropique, sont basés sur une combinaison de modèles climatiques simples, l'étude de la chimie de l'atmosphère et un modèle global du cycle du carbone. Ces profils représentatifs de l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre, d'ozone et des aérosols, sont innovants puisque, contrairement aux SRES, ils ne visent plus à caractériser l'évolution de la société, l'économie et la démographie, mais sont définis comme des profils de référence. Quatre différents RCPs ont été considérés :

- RCP 2.6 : un scénario où les émissions de gaz à effet de serre sont considérablement réduites ; le forçage radiatif atteint un maximum en milieu du siècle à $3.1 W/m^2$ puis diminue pour atteindre $2.6 W/m^2$ vers 2100
- RCP 4.5 : un scénario de stabilisation où le forçage radiatif se stabilise avant 2100 grâce à la mise en application de politiques et technologies de réduction de gaz à effet de serre
- RCP 6.0 : un scénario de stabilisation où le forçage radiatif se stabilise après 2100
- RCP 8.5 : un scénario où l'émission de gaz à effet de serre augmente en fonction du temps atteignant ainsi de très fortes concentrations

En tenant compte les différences entre les scénarios, le changement climatique prévu sur la base des RCP est semblable à celui obtenu sur la base des scénarios du SRES au niveau de l'augmentation de la température (fig. 1). Cependant, l'incertitude des projections pour les RCP élevés est moins importante que pour les scénarios comparables utilisés dans le AR4, puisque les RCP utilisés dans le AR5 sont définis comme des profils de concentration et donc les incertitudes liées aux processus affectant les concentrations en CO_2 dans l'atmosphère ne sont pas prises en compte dans les simulations du CMIP5 (IPCC, 2013). Cependant, l'absence d'un scénario commun rend la comparaison directe CMIP3-CMIP5 difficile, certains travaux montrant, au contraire, une plus grande dispersion au niveau des résultats (Knutti et Sedláček, 2013).

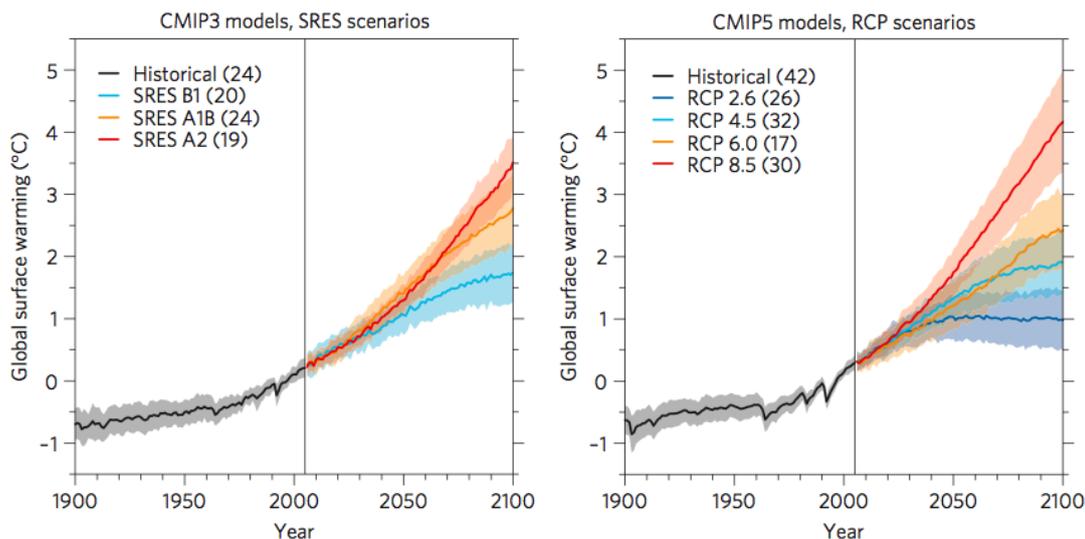


Figure 1: Changement global des températures et incertitudes (valeur moyenne avec ombrage représentant l'écart-type) en fonction des scénarios SRES du CMIP3 et des RCP du CMIP5. Le chiffre entre parenthèses représente le nombre de modèles utilisés (Knutti et Sedláček, 2013)

I.2. Modèles Climatiques Globaux

Une fois les scénarios d'émission ou les profils d'évolution des gaz à effet de serre établis, c'est par l'intermédiaire de Modèles de Circulation Générale (MCG ou GCM en anglais) que les projets CMIP obtiennent des projections climatiques. Les MCG sont des modèles numériques représentant des processus physiques dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la surface de la terre, et sont les outils les plus avancés actuellement disponibles pour simuler la réponse du système climatique mondial à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (IPCC, s.d. – b). Un MCG doit répondre à cinq critères (IPCC, s.d. – c) :

- Ils doivent être cohérents avec les projections mondiales, et donc simuler des températures comprises dans une certaine gamme : de 1,4 °C à 5,8 °C d'ici 2100.
- Ils ne doivent pas violer les lois fondamentales de la physique.
- Ils doivent être utilisables dans les études d'impact, et donc comprendre un nombre suffisant de variables (précipitations, température, humidité...) à une échelle spatio-temporelle compatible avec dites études.
- Ils doivent être représentatifs d'un certain éventail de changements climatiques potentiels.
- Leurs projections doivent être faciles à obtenir, interpréter et appliquer.

Les MCG représentent le climat en utilisant une grille en trois dimensions du monde entier, ayant typiquement une résolution horizontale comprise entre 250 et 600 km, de 10 à 20 couches verticales dans l'atmosphère et environ 30 couches dans les océans. La résolution de ces modèles, comparée à la résolution de la plupart des études d'impact climatique, est souvent trop grossière. De plus, de nombreux processus physiques se produisent à plus petite échelle, comme l'évolution des nuages, et ne peuvent être correctement modélisés, créant ainsi une source d'incertitude. À cela viennent s'ajouter des sources d'incertitude supplémentaires, liées à l'absence de simulation de mécanismes de rétroaction comme l'interaction entre le rayonnement et l'albédo ou encore la circulation océanique. Ainsi, les MCG peuvent parfois, à partir d'un même forçage, simuler des réponses très différentes (IPCC, s.d. – b).

Le tableau A-1 en annexe détaille les différents MCG desquels sont issus les projections climatiques que nous utiliserons, ainsi que les centres de modélisation qui les ont conçus.

I.3. Méthodes de Descente d'Échelle

La résolution des MCG est souvent de quelques centaines de kilomètres. Cependant, afin de modéliser correctement les variations de flux hydrologiques à l'échelle du bassin versant, une résolution plus fine est nécessaire. Ainsi, afin d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les MCG, il est nécessaire d'effectuer une descente d'échelle. Il existe plusieurs méthodes de descente d'échelle qui peuvent être statistiques ou dynamiques. Les méthodes dynamiques reposent sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux contraints par les conditions initiales et aux limites issues des MCG. Les méthodes statistiques reposent sur l'utilisation de lois statistiques, et permettent aussi un débiaisage des projections. En voici quelques-unes :

- La méthode dite des types de temps. Elle repose sur l'apparition reconnaissable et récurrente dans une zone donnée d'une situation météorologique associée à des caractéristiques déterminées (Boé *et al.*, 2007). Les types de temps peuvent être définis en fonction de la pression de surface au niveau de la mer P_{mer} et des précipitations. Une fois le régime météorologique déterminé, la seconde étape consiste à construire une régression multiple entre les précipitations et les paramètres décrivant la circulation à grande échelle. La limite de cette méthode est que les extrêmes journaliers ne peuvent être supérieurs à ceux observés durant la période de construction.
- La méthode des anomalies est la plus simple des méthodes de descente d'échelle (Ducharne *et al.*, 2009). Pour chaque variable climatique, les perturbations sont calculées mensuellement par le rapport $r = (x)_{\text{futur}} / (x)_{\text{présent}}$, avec x la variable en question qui est simulée par les MCG. Cette perturbation est ensuite appliquée à une base de données d'observations à plus haute résolution. Les limitations de cette méthode sont importantes : elle ne tient compte que du changement climatique moyen, et donc ne permet pas de rendre compte des changements de distribution des variables à l'échelle journalière.
- La méthode Advanced Delta Change ou ADC (Van Pelt *et al.*, 2012) que nous avons utilisée pendant ce stage, est une méthode non linéaire permettant d'obtenir des séries de températures et précipitations pour une période future à partir de données historiques. Pour cela, des coefficients de transformation déterminés à partir de MCG sont appliqués à des séries historiques. Une explication plus détaillée figure dans la partie II-1.

Les différentes méthodes de descente d'échelle ne fournissent pas exactement les mêmes résultats : il est donc important de remarquer qu'il existe une incertitude liée à cette étape de descente d'échelle et de débiaisage des simulations climatiques. Pour les précipitations, les moyennes annuelles sont assez ressemblantes, mais la distribution spatiale des précipitations varie. Pour les températures, il existe des différences importantes, notamment en été, ce qui affecte les processus hydrologiques (Quintana-Seguí *et al.*, 2010).

I.4. Modèles hydrologiques

Les simulations climatiques, après une descente d'échelle, vont alimenter un modèle hydrologique. Il existe plusieurs types de modèles qui sont souvent conçus de façon très différente.

I.4.1 Modèles conceptuels

Un modèle conceptuel cherche à représenter la relation pluie-débit sans essayer de définir les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle, construit autour de relations mathématiques, est généralement constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants. L'échelle de modélisation est le plus souvent le bassin versant.

GR4J (Perrin *et al.*, 2003) : Le modèle GR4J est un modèle conceptuel pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il est basé sur un ensemble de réservoirs avec 4 paramètres faisant l'objet d'une optimisation, permettant de caler le modèle pour chaque station hydrométrique où l'on dispose de suffisamment de données sur la période de référence. Par la suite, nous allons utiliser le modèle GR4J, puisqu'il s'agit d'un modèle simple mais robuste. GR4J peut être couplé à un module de neige Cemaneige (Valéry, 2010). Le fonctionnement de ce modèle sera détaillé dans la partie II-4.

GARDÉNIA (Thiéry, 2003) : Le modèle GARDÉNIA (Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères), reposant sur un logiciel, est un modèle qui, à partir de données météorologiques, permet de simuler les relations existant entre les débits et les niveaux piézométriques. Il repose sur un système de 3 à 4 réservoirs en cascade connectés par des fonctions de transfert non linéaires. Grâce à ce logiciel, il est possible d'établir le bilan hydrologique d'un bassin (évapotranspiration, ruissellement, infiltration...) et de réaliser une extension de données de débits et de niveaux piézométriques pour effectuer des prévisions.

MORDOR (Paquet, 2004) : Le modèle MORDOR est un modèle conceptuel qui permet d'anticiper les apports issus de la fonte des neiges. Ce modèle comprend 5 réservoirs et les échanges sont réglés par des fonctions simples et paramétrables. Un des réservoirs représente le stock nival qui a été étagé à différentes altitudes afin de faciliter la comparaison avec les mesures nivologiques. L'étude de l'accumulation et la fonte des neiges fait intervenir plusieurs fonctions comme des fonctions de transfert de température et de vitesse de fonte des neiges.

I.4.2 Modèles à base physique

Un modèle à base physique, à l'inverse des modèles conceptuels, s'appuie sur la définition de processus physiques sur des mailles de tailles diverses selon les modèles.

SAFRAN-Isba-Modcou (Habets *et al.*, 2008) : Le modèle SAFRAN-Isba-Modcou est composé de trois modules indépendants: l'analyse atmosphérique SAFRAN, le modèle de surface « Isba » ou Interaction Surface-Biosphère-Atmosphère, et le modèle hydrogéologique « Modcou » qui simule les transferts d'eau tout en tenant compte des rivières et nappes aquifères. L'analyse SAFRAN génère un forçage atmosphérique à un pas de temps horaire, ISBA calcule les bilans d'eau et d'énergie en surface, et Modcou simule le débit et le niveau de plusieurs aquifères. Les paramètres du modèle SAFRAN-Isba-Modcou ne font pas l'objet d'un calage pour chaque station hydrométrique.

CLSM (Ducharne *et al.*, 2000 ; Gascoïn *et al.*, 2009) : CLSM (Catchment Land Surface Model) est un modèle hydrologique à base physique développé par la NASA. Celui-ci tient en compte de nombreux paramètres (topographie, évapotranspiration, précipitations...) et permet, grâce au couplage avec un modèle de bassins versants (TOPMODEL, TOPography based hydrological MODEL), de simuler la production d'eau sur un bassin versant.

J2000 (Krause *et al.*, 2006) : J2000 est un modèle hydrologique modulaire qui implémente des processus hydrologiques simples. Outre les modules des différents processus intervenant dans la simulation du ruissellement et de l'écoulement, J2000 permet d'obtenir des données climatiques régionalisées et corrigées ainsi que de calculer des données supplémentaires comme le rayonnement solaire, l'évapotranspiration potentielle selon Penman - Monteith ou l'humidité absolue. La résolution temporelle de J2000 est en pas de temps journalier ou horaire.

Il existe donc de nombreux modèles hydrologiques dont les spécificités permettent de mettre l'accent sur certains processus afin de mieux modéliser les crues ou les étiages, ou encore de représenter au mieux un régime hydrologique distinctif (dans des conditions climatiques particulières par exemple). Ici, seuls certains des modèles utilisés par les groupes d'hydrologie français ont été énumérés.

I.4.3 Incertitude liée au calage

Le calage des modèles hydrologiques, c'est-à-dire l'optimisation des paramètres à partir d'une série de données observées sur une période dite de calage, a pour but d'améliorer la performance de ces modèles lors de simulations futures sous changement climatique. Pour cela, une fonction-objectif est choisie ; elle détermine ce que l'on veut représenter de manière optimale : les faibles débits, les forts débits, ou autres. Un problème souvent rencontré est l'équi-finalité des paramètres (Beven, 2006) : des jeux de paramètres différents peuvent obtenir des résultats similaires, ce qui implique qu'il existe plusieurs représentations acceptables ne pouvant pas être facilement rejetées et qui devraient être considérées dans l'évaluation de l'incertitude. De plus, si l'on obtient des paramètres optimaux pour une période donnée, il n'est pas garanti que pour une période différente la performance du modèle sera toujours présente. Cette limite des calages des modèles hydrologiques prend toute son importance pour les études de l'impact du changement climatique : on sait que les conditions climatiques seront différentes, mais on ne dispose pas de données de débits de validation pour juger de la capacité de nos modèles à simuler les débits futurs. Or, il a été montré (Coron, 2013) que la qualité des simulations des débits pouvait fortement dépendre des changements rencontrés sur les données climatiques.

Ainsi, Klemes (1986) a défini un protocole de calage/évaluation pour permettre d'évaluer les modèles de façon rigoureuse, sur des périodes contrastées (differential split-sample test) ainsi que sur des bassins voisins (proxy-basin test). La première méthode consiste à diviser la période de calage en plusieurs sous-périodes présentant des caractéristiques climatiques différentes, d'effectuer un calage sur une des sous-périodes et de comparer les résultats avec une autre sous-période. Si les résultats sont similaires, alors le modèle est robuste vis-à-vis des variations de climat. La seconde consiste à effectuer un calage sur au moins deux bassins versants voisins au bassin en question, et de comparer les résultats du calage du bassin A sur le bassin B et vice-versa, pour finalement appliquer les résultats sur le bassin C.

I.5. Études et projets existants

L'utilisation de modèles hydrologiques, qu'ils soient conceptuels ou physiques, couplés avec des modèles climatiques peut permettre, suite à une régionalisation des modèles climatique, d'estimer l'évolution des flux hydrologiques. Il existe aujourd'hui de nombreux projets visant à quantifier les ressources en eau en vue du changement climatique. Ces différents projets peuvent différer entre eux de par les scénarios d'émission, les MCG appliqués, les modèles hydrologiques utilisés, les régions étudiées ou les processus que l'on cherche à modéliser en priorité. Ici nous allons présenter 3 projets ou études différents, le premier effectué à une échelle régionale, le second effectué à une échelle nationale, et le dernier visant à représenter toute l'Europe.

I.5.1 Le projet RExHySS (Ducharne *et al.*, 2009)

L'objectif du projet RExHyss (Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme) est de modéliser l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, notamment sur les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine et de la Somme, avec, en parallèle, une quantification des incertitudes. Les scénarios climatiques proviennent du jeu de simulations multi-modèle du CMIP3, qui utilisent les scénarios d'émission de gaz à effet de serre du 4^e rapport du GIEC. Pour régionaliser ces données, plusieurs méthodes de descente d'échelle ont été appliquées, afin de pouvoir quantifier l'incertitude liée à la méthode de désagrégation. Finalement, plusieurs modèles hydrologiques calés dans chacun des bassins de la Seine et de la Somme ont été utilisés (CLSM, EROS, GARDENIA, GR4J, MARTHE, MODCOU et SIM).

Les incertitudes liées aux scénarios d'émissions anthropiques ont été prises en compte, ainsi que l'incertitude liée aux projections climatiques, aux méthodes de désagrégation, et aux modèles hydrologiques, en considérant au moins deux possibilités pour chacune de ces sources d'incertitudes. Les résultats de ce projet sont :

- Un réchauffement en moyenne annuelle de +1.5 à +3°C en milieu du XXI^e siècle et entre +2 et +4°C en fin de siècle
- Une baisse importante et systématique des précipitations estivales, ce qui se traduit par un nombre de jours sans précipitation plus grand et une augmentation de la persistance des épisodes secs. Les précipitations hivernales ne subissent par ailleurs pas d'effets de forte amplitude. Les cumuls annuels montrent également une tendance à la baisse, de -6% en milieu du siècle (valeur moyenne sur tous les scénarios) et -12% en fin de siècle (idem)
- L'étude des valeurs extrêmes, étant ciblée sur le QMNA5 (débit minimum quinquennal sec) et le QJXA10 (débit journalier maximal de période de retour 10 ans), montre une forte baisse du QMNA5 et un changement très faible du QJXA10. Le nombre de jours passés au dessous du QMNA5 actuel est augmenté de manière significative. Il y aurait donc plus de crises liées à la gestion et les restrictions d'usage de l'eau. Les variations du QJXA10 sont, à l'opposé, inférieures aux incertitudes pesant sur ce quantile.

I.5.2 Le projet Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013)

Le projet Explore 2070 est une évaluation des impacts possibles des changements climatiques sur les eaux de surface en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-Mer à l'horizon 2046-2065 par rapport à une période de référence 1961-1990. Les variations climatiques ont été basées sur sept modèles de circulation générale (MCG) forcés par le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B issues du 4^e rapport (2007) du GIEC. Ces simulations climatiques ont ensuite été utilisées pour alimenter deux modèles hydrologiques différents, Isba-Modcou (Habets *et al.*, 2008) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003). En amont de toute simulation, une étape d'évaluation des deux modèles en conditions actuelles a été menée, afin de déterminer l'incertitude liée à ces modèles et de donner une indication de leur performance.

Pour caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et une période future, un ensemble de descripteurs a été choisi : les débits moyens annuels et mensuels, le débit minimum quinquennal sec (QMNA5) et le débit journalier maximal de période de retour 10 ans (QJXA10). Suite à la comparaison de performance de ces deux modèles à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970), il s'est avéré que le modèle GR4J était globalement plus précis, fournissant des résultats satisfaisants en temps présent. Le modèle Isba-Modcou est moins performant, avec des difficultés notamment dans le calcul des basses eaux.

Les résultats obtenus en métropole suite aux projections climatiques indiquent tout d'abord une hausse des températures moyennes annuelles de l'air de l'ordre de +1,4°C à +3°C, une baisse des précipitations en été de -16% à -23% sur l'ensemble du territoire. Concernant les ressources en eau annuelles, il y aura une baisse globale du débit moyen annuel de -10% à -40%, conséquence d'une forte hausse de l'évapotranspiration et d'une baisse des précipitations. Tous les modèles projettent une aggravation générale des étiages, avec des résultats cependant très hétérogènes entre les différents MCG. Finalement, compte tenu des divergences entre les projections en période de hautes eaux, aucun changement significatif des débits journaliers maximaux annuels de période de retour 10 ans (QJXA10) n'a été observé.

I.5.3 Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe (Forzieri *et al.*, 2014)

Dans cette étude, la question abordée est l'évolution des débits et des sécheresses (en durée et sévérité) à travers l'Europe. Grâce au couplage d'un modèle hydrologique, un ensemble de simulations climatiques (forcées par le SRES A1B) corrigées et débisaisées et un scénario d'utilisation d'eau (Economy First), Forzieri et ses collaborateurs ont généré des prévisions à long terme (1961-2100) pour les débits en Europe afin d'estimer l'effet du changement climatique tout en prenant en compte

l'évolution de la demande en eau. L'ensemble des simulations climatiques comprend 4 MCG différents. Les données climatiques ont été corrigées grâce à la méthode quantile-quantile. Les simulations hydrologiques ont été obtenues en utilisant un modèle distribué à base physique nommé LISFLOOD.

Cette analyse montre que les sécheresses vont devenir plus sévères et persistantes dans de nombreuses parties de l'Europe en raison du changement climatique, à l'exception des régions du nord et du nord-est de l'Europe. Les régions du sud en particulier devront faire face à de fortes réductions des débits. De plus, l'utilisation plus intensive de l'eau va aggraver la situation en Europe du Sud ; dans certaines régions d'Europe occidentale, centrale et orientale une tendance à l'augmentation des débits se verra tout de même inversée en raison d'une consommation plus importante en eau.

II. Méthodologie & données

De façon analogue aux différentes études présentées, nous avons suivi pour ce stage une série d'étapes afin de modéliser correctement l'évolution des débits. Tout d'abord, nous avons régionalisé et débiaisé les données issues de MCG (en tant qu'hydrologues, il ne nous est pas possible de réaliser nous-mêmes les projections climatiques). Ensuite, nous avons introduit les données obtenues dans un modèle hydrologique sur les bassins versants qui nous intéressent.

II.1. La méthode Advanced Delta Change (ADC)

La première étape avant de pouvoir estimer les variations de flux hydrologiques en France est de régionaliser les modélisations climatiques de grande échelle afin de pouvoir obtenir des données futures de précipitations et de température débiaisées et représentant une hétérogénéité spatiale suffisante à la mise en œuvre d'une modélisation hydrologique.

La méthode de descente d'échelle utilisée pendant ce stage s'appelle Advanced Delta Change et a été développée par Van Pelt *et al.* (2012). L'ADC est une amélioration de la méthode Delta Change. Tout comme elle, elle repose sur une transformation de séries de données climatiques passées permettant d'obtenir des séries de données représentatives du climat futur. En effet, la méthode classique « Delta Change » est basée sur une transformation linéaire des précipitations moyennes et des températures, ce qui entraînait une distribution peu réaliste des précipitations en comparaison avec les changements se produisant dans les modèles climatiques (Kraaijenbrink, 2013a). C'est pourquoi Van Pelt (Van Pelt *et al.*, 2012) a développé la méthode dite « Advanced Delta Change », permettant d'améliorer la qualité de la modélisation des événements extrêmes en utilisant une transformation non-linéaire basée sur les quantiles 60% et 90%. Les coefficients nécessaires à cette transformation sont obtenus à partir de modèles climatiques globaux.

Cependant, comme énoncé auparavant, les données historiques et celles issues des modèles climatiques sont souvent présentes sur des échelles spatiales très différentes, il est donc nécessaire d'établir un lien entre les deux échelles. Pour cela, les données sont agrégées sur une maille commune et les données climatiques font ensuite l'objet d'une interpolation. La méthode ADC n'agit pas directement sur les valeurs journalières, mais sur les sommes sur 5 jours. Deux équations différentes sont utilisées, pour les précipitations inférieures ou supérieures au quantile 90% (P_{90}). Ce quantile est déterminé par mois et par maille sur la période de référence, il existe donc 12 quantiles pour chaque maille. Les équations, dont une explication plus détaillée figure dans les travaux de Kraaijenbrink (2013a), sont les suivantes :

$$(1) \quad P^* = aP^b \text{ pour } P^O < P_{90}^O$$

$$(2) \quad P^* = \frac{\overline{E^F}}{\overline{E^C}} \cdot (P^O - P_{90}^O) + a(P_{90}^O)^b \quad \text{pour } P^O > P_{90}^O$$

avec P^* les sommes transformées, P les valeurs observées, P_{90} le quantile 90% et a et b les coefficients de transformation. Les superscripts O , C et F dénotent si celles-ci sont des valeurs appartenant respectivement à la série observée, la période de contrôle ou les données futures.

Pour les sommes de précipitations excédant le quantile P_{90} mensuel, une valeur d'« excès » E est déterminée par $E = P - P_{90}$. La valeur moyenne traduisant l'excès est calculée pour la période de contrôle et la période future suivant les équations :

$$(3) \quad \overline{E^C} = \frac{\sum P^C - P_{90}^C}{n^C} \quad \text{et} \quad (4) \quad \overline{E^F} = \frac{\sum P^F - P_{90}^F}{n^F}$$

avec n le nombre de sommes sur 5 jours. Les coefficients de transformation et a et b , dérivés des quantiles P_{90} et P_{60} sont calculés comme suit :

$$b = \frac{\log\{g_2 \cdot P_{90}^F / (g_1 \cdot P_{60}^F)\}}{\log\{g_2 \cdot P_{90}^C / (g_1 \cdot P_{60}^C)\}} \quad g_1 = P_{60}^O / P_{60}^C$$

$$(5) \quad a = P_{60}^F / (P_{60}^C)^b \cdot g_1^{1-b} \quad \text{et } g_1 \text{ et } g_2 \text{ des facteurs de correction} \quad (6) \quad g_2 = P_{90}^O / P_{90}^C$$

Pour les températures la transformation est linéaire, sous la forme :

$$(7) \quad T^* = \frac{\sigma^F}{\sigma^C} (T - \overline{T^O}) + \overline{T^O} + \overline{T^F} - \overline{T^C}$$

avec T^* les températures transformées, T les températures observées et $T[\text{barre}]$ les valeurs moyennes de température. σ^C et σ^F représentent les écarts-types des températures journalières calculées par mois. Les écarts-type sont calculés pour chaque maille par agrégation des valeurs observées suivie d'une interpolation bilinéaire.

Pour mettre cette méthode en application, nous avons utilisé le logiciel R (R Development Core Team, 2008), plus particulièrement un package R, fourni par le service météorologique néerlandais (KNMI) et développé par Kraaijenbrink en 2013. Les paramètres que l'on doit apporter sont : les données SAFRAN de températures et précipitations sur un maillage régulier de 8x8 km couvrant toute la France, ainsi que les données pour chaque maille (aire, altitude, coordonnées). L'application informatique de la méthode ADC est composée essentiellement de deux étapes. La première est la détermination des coefficients permettant d'obtenir les prévisions, et la seconde est l'application de ces coefficients aux plages de données historiques. Lors de ce stage, les coefficients de transformation ont été prédéterminés et fournis dans le package R, et donc seulement l'application des paramètres a été mise en œuvre. L'ADC permet d'obtenir des projections climatiques sur deux périodes : le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100).

II.2. Choix des projections climatiques

Les différents RCP issus du 5^e rapport du GIEC sont introduits dans les MCG. Au total, en combinant les 4 RCP et 31 MCG ainsi que les différentes réalisations, nous obtenons 199 projections différentes pouvant être utilisées dans la méthode ADC (tab. 1), qui va nous permettre d'obtenir l'évolution des précipitations et des températures.

Compte tenu de la durée du stage, et au vu du temps de calcul nécessaire à la préparation des données, nous avons sélectionné uniquement le RCP 2.6 et 8.5, c'est-à-dire les deux scénarios les plus extrêmes. Nous n'avons par ailleurs conservé que la première réalisation de chacun des MCG retenus. Certains modèles présentant des irrégularités suite à l'exécution de la méthode ADC ont été écartés.

Les modèles utilisés figurent avec une étoile dans le tableau 1. Nous disposons de 45 MCG au total, 19 pour le RCP 2.6 et 25 pour le RCP 8.5.

Modèles (n=31)	Réalisations des modèles	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	Exécutions totales
ACCESS1-0	1	-	1	-	1*	2
ACCESS1-3	1	-	1	-	1*	2
bcc-csm1-1	1	1*	1	1	1*	4
bcc-csm1-1-m	1	1*	1	1	1*	4
BNU-ESM	1	1*	1	-	1*	3
CanESM2	5	5*	5	-	5*	15
CCSM4	3	3*	3	3	3*	12
CMCC-CESM	1	-	-	-	1*	1
CMCC-CM	1	-	1	-	1	2
CMCC-CMS	1	-	1	-	1*	2
CNRM-CM5	1	1*	1	-	1*	3
CSIRO-Mk3-6-0	10	10*	10	10	10*	40
FGOALS-s2	3	1	3	1	3	8
GFDL-CM3	1	1*	-	1	1*	3
GFDL-ESM2G	1	1*	1	1	1*	4
GFDL-ESM2M	1	1*	1	1	1*	4
GISS-E2-R	1	-	1	-	-	1
HadGEM2-CC	3	-	1	-	3*	4
HadGEM2-ES	4	4*	4	4	4*	16
inmcm4	1	-	1	-	1*	2
IPSL-CM5A-LR	4	4*	4	1	4*	13
IPSL-CM5A-MR	1	1*	1	1	1*	4
IPSL-CM5B-LR	1	-	1	-	1*	2
MIROC-ESM	1	1*	1	1	1*	4
MIROC-ESM-CHEM	1	1*	1	1	1*	4
MIROC5	3	3*	3	1	3*	10
MPI-ESM-LR	3	3*	3	-	3*	9
MPI-ESM-MR	3	1*	3	-	1*	5
MRI-CGCM3	1	1*	1	1	1*	4
NorESM1-M	1	1*	1	1	1*	4
EC-EARTH	8	-	-	-	8	8
Total	69	46	57	30	66	199

Tableau 1 : Liste des MCG utilisés dans cette méthode, et le nombre de réalisations effectuées pour chaque RCP (Kraaijenbrink, 2013b) (*MCG utilisés pour la suite du stage)

II.3. Création des projections climatiques sur les bassins considérés

Les données SAFRAN (Quintana-Seguí *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010), que nous avons utilisées en tant que référence sont des données journalières couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue, produites par Météo-France. Les variables observées sont, entre autres, les précipitations et la température grâce à laquelle nous pouvons calculer l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Oudin (Oudin *et al.*, 2005) :

$$13 \quad (8) \quad ETP = \frac{R_e \cdot T_a + 5}{L\rho \cdot 100}$$

Avec R_e : Radiation extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau (MJ.kg^{-2})

ρ : densité de l'eau

T_a : température moyenne journalière

Ces données SAFRAN, disponibles de 1958 à nos jours, nous ont permis de fixer une période de référence, à partir de laquelle nous avons pu mettre en place le calage du modèle hydrologique, et obtenir les projections de précipitations et température pour le futur proche et lointain. Nous avons appliqué l'ADC à chacune des mailles de 8kms. Les données futures d'ETP ont été obtenues en appliquant la formule d'Oudin aux températures futures.

Une fois les précipitations, températures et ETP calculées pour une maille régulière de 8x8km sur toute la France, il a fallu agréger ces données sur différents bassins versants, l'échelle spatiale du modèle hydrologique. Les bassins versants ainsi choisis sont les mêmes que pour le projet Explore 2070, à l'exception des points ayant été utilisés uniquement pour le modèle Isba-Modcou. La figure 2 illustre la position des 902 points de calcul considérés. Veuillez noter que certains des 902 bassins étaient en fait inclus deux fois. Par conséquent, la liste finale utilisée pour ce stage comprend 884 bassins.

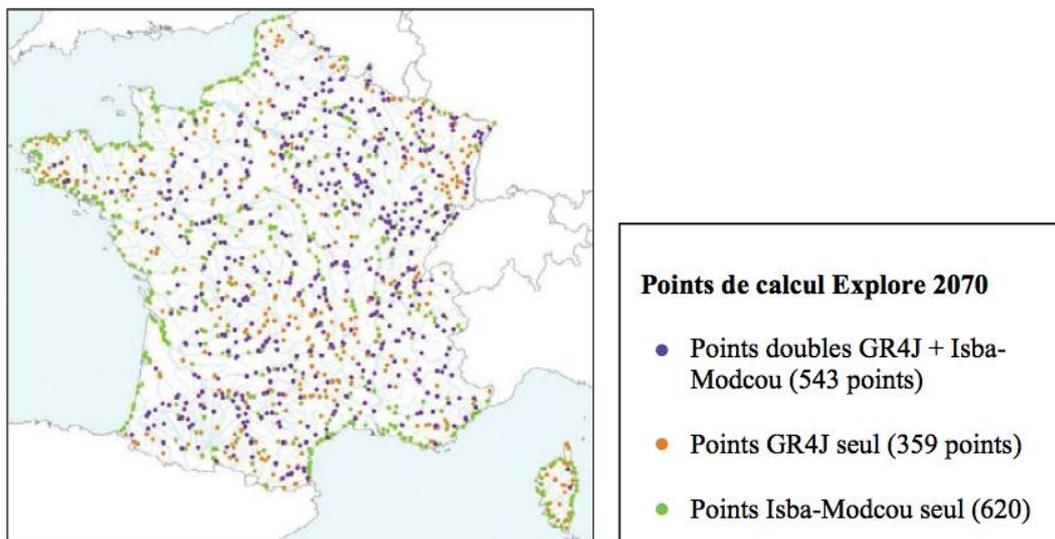


Figure 2 : Localisation des 1522 points de calcul hydrologiques retenus dans Explore 2070, distingués en fonction des modèles hydrologiques appliqués. Lors de ce projet seuls les points doubles et GR4J seuls ont été retenus (Chauveau *et al.*, 2013)

II.4. GR4J

Le modèle GR4J, Génie Rural à 4 paramètres Journalier (Perrin *et al.*, 2003), est un modèle parcimonieux simulant les relations pluie/débit à un pas de temps journalier à l'échelle du bassin versant. Il repose sur un ensemble d'équations mathématiques obtenues de façon empirique avec quatre paramètres à optimiser. Il est le résultat de l'amélioration et l'affinage d'autres modèles hydrologiques, comme GR3J (Edijatno *et al.*, 1999), permettant d'obtenir un modèle qui, tenant compte du niveau de complexité, a une performance satisfaisante.

Le schéma suivant permet de résumer le fonctionnement de ce modèle:

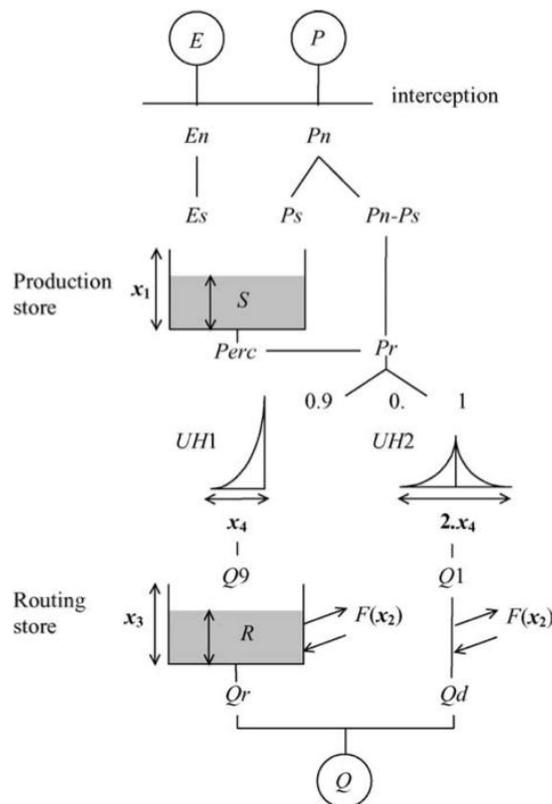


Figure 3 : Diagramme du modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003)

Les données en entrée du modèle sont : les précipitations journalières pour un bassin P , l'évapotranspiration potentielle journalière E , et la température journalière T .

En amont de ce modèle, un module d'accumulation et de fonte de la neige simple, Cemaneige (Valéry, 2010) est utilisé. Il repose sur le principe du degré-jour et est nécessaire pour les bassins montagneux notamment puisqu'il permet d'améliorer la modélisation des débits à l'exutoire des bassins versants influencés par la neige. En entrée, ce modèle nécessite uniquement les précipitations et températures. Les précipitations solides et liquides sont ensuite différenciées suivant l'altitude médiane du bassin versant considéré, et la neige est stockée au sein d'un réservoir conceptuel représentant le manteau neigeux. Le calcul de la lame de fonte écoulee s'appuie sur une fonction de transfert dépendante de l'état thermique du manteau. Cette lame d'eau s'ajoute aux précipitations liquides qui vont ensuite être intégrées dans un modèle hydrologique.

Une fois la fraction liquide totale déterminée, il est possible d'appliquer le modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003). Il faut tout d'abord déterminer la pluie nette P_n en soustrayant E à P (si $P \geq E$; E_n est alors nul) ou la capacité d'évapotranspiration nette E_n en soustrayant P à E (si $E \geq P$; P_n est alors nul).

Si P_n est non-nul, une partie P_s de P_n entrera dans le réservoir de production (alimentant l'évapotranspiration ou la percolation) caractérisé par son niveau S . P_s est calculé grâce à la formule suivante, avec x_1 la capacité maximale du réservoir de production :

$$(9) \quad P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh\left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh\left(\frac{P_n}{x_1} \right)}$$

Si E_n est non-nul, le taux d'évaporation réelle E_s est obtenu d'après l'équation suivante :

$$(10) \quad E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}$$

Les formules (9) et (10) résultent de l'intégration sur un pas de temps d'équations différentielles de forme parabolique. Le niveau d'eau dans le réservoir de production (alimentant l'écoulement) vaut donc $S = S - E_n + P_s$. Un taux de percolation $Perc$ peut ensuite être calculé en fonction du niveau S :

$$(11) \quad Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S}{x_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient alors $S = S - Perc$. La quantité d'eau Pr atteignant le réservoir de routage ayant un niveau R d'eau vaut $P_r = Perc + (P_n - P_s)$. Pour simuler la distribution des pluies (discrètes) en débits (continus) Pr est ensuite divisé en deux ensembles, 90% suivant un hydrogramme unitaire HU1 et le 10% restant suivant un hydrogramme unitaire HU2. Les deux hydrogrammes dépendent d'un paramètre temporel x_4 en jours. Afin de simplifier le calcul du taux d'eau écoulé, il est possible de manipuler les intégrales des HU (et donc les proportions cumulées sur le temps), aussi appelées S-curves.

SH1 se définit comme suit:

Pour $t \leq 0$, SH1(t)=0

Pour $0 < t < x_4$, SH1(t)=(t/x₄)^{5/2}

Pour $t \geq x_4$, SH1(t)=1

Et SH2 :

Pour $t \leq 0$, SH2(t)=0

Pour $0 < t \leq x_4$, SH2(t)=0.5(t/x₄)^{5/2}

Pour $x_4 < t < 2x_4$, SH2(t)=1-0.5(2-t/x₄)^{5/2}

Pour $t \geq 2x_4$, SH2(t)=1

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées :

HU1(j)=SH1(j)-SH1(j-1)

HU2(j)= SH2(j)-SH2(j-1)

Les débits en sortie des HU1 et HU2 sont, respectivement, Q₉ et Q₁.

Finalement, le terme F représente les échanges souterrains, avec x_3 la capacité de référence de R et x_2 le coefficient d'échange (négatif ou positif selon s'il s'agit d'un apport ou d'un export d'eau).

$$(12) \quad F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2}$$

Le niveau d'eau dans R dépend de Q_9 (en sortie du HU1) et de F selon la fonction $R = R + Q_9 + F$ (avec $R \geq 0$). Le flux en sortie du réservoir de routage Q_r vaut alors, le niveau dans R valant $R = R - Q_r$:

$$(13) \quad Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$$

Le débit en sortie du HU2 est également influencé par F, ce qui nous fait obtenir un débit $Q_d = QI + F$.

Le débit total vaut finalement $Q = Q_r + Q_d$.

Il y a donc 4 paramètres à optimiser :

x_1 : la capacité maximale du réservoir de production (mm)

x_2 : le coefficient d'échange souterrain (mm)

x_3 : la capacité maximale du réservoir de routage (mm)

x_4 : la base de temps de l'hydrogramme unitaire (j)

Dans Explore 2070, une étude de la robustesse des paramètres de GR4J selon la période de calage (1961-1991) a été menée sur les débits ainsi que les logarithmes des débits (ce qui permet de mettre l'accent sur les basses eaux). Nous avons par conséquent conservé les paramètres utilisés lors du projet Explore 2070. La fonction de calage est le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) calculé sur la racine carrée des débits. Plus ce critère est proche de 1, plus la plage de données observée ressemble à la plage de données simulée, et donc meilleure est la simulation. Ce critère donne par ailleurs une importance équivalente aux forts débits et aux faibles débits. Les résultats de la fonction de calage obtenus dans Explore 2070 sont les suivants :

	NS(Q)	NS(lnQ)
Quantile 10%	0.67	0.62
Médiane	0.83	0.80
Quantile 90%	0.90	0.89

Tableau 2 : Critères de Nash-Sutcliffe (NS) calculés sur les débits et les logarithmes de débit sur 543 sous-bassins (Chauveau *et al.*, 2013)

Les résultats montrent que le modèle GR4J donne des résultats globalement satisfaisants (puisque NS est proche de 1).

II.5. Descripteurs hydrologiques et climatiques

Après avoir obtenu les débits et données climatiques pour le futur proche et lointain, nous avons calculé une série d'indicateurs nous permettant de mieux comprendre l'évolution du climat et des flux hydrologiques (étiages, crues).

II.5.1 Descripteurs climatiques

Pour mieux illustrer les variations de température qui auront lieu dans les années à venir, nous avons calculé un ΔT absolu, c'est-à-dire les différences de température entre les simulations en temps futur et les données observées sur la période de contrôle, $T^F - T^O$. Concernant l'évapotranspiration et les précipitations, nous avons préféré un Δ relatif, nous obtenons alors $\Delta ETP = (ETP^F - ETP^O) / ETP^O$ et $\Delta P = (P^F - P^O) / P^O$.

II.5.2 Descripteurs hydrologiques

Pour décrire les évolutions des eaux de surface, nous avons aussi calculé un ΔQ relatif. Cependant, à la différence des données climatiques, nous n'avons pas comparé les données simulées directement avec les observations, mais avec des débits simulés en temps présent à partir des données climatiques

connues sur la période de contrôle. Ceci permet de s'affranchir en partie du biais potentiellement créé lorsqu'il existe des différences entre les données *réelles* et les données issues du modèle GR4J. Nous avons donc calculé $\Delta Q = (Q^F - Q^{STP}) / Q^{STP}$ (avec l'exposant ^{STP} signifiant Simulé en Temps Présent). Nous avons également calculé les débits moyens annuels et mensuels, le débit minimum mensuel quinquennal sec (QMNA5) et le débit journalier maximal de période de retour 10 ans (QJXA10). L'évolution de la variation relative de tous ces indicateurs permet une analyse plus approfondie des résultats.

III. Résultats

Dans cette partie nous allons vous présenter en premier lieu les résultats que nous avons obtenu sur l'ensemble du territoire Français (les DOM-TOM exclus) pour l'ensemble de 45 MCG, avec par la suite une étude plus détaillée de certains grands bassins versants.

III.1. Résultats à grande échelle

III.1.1 Variables climatiques

Température

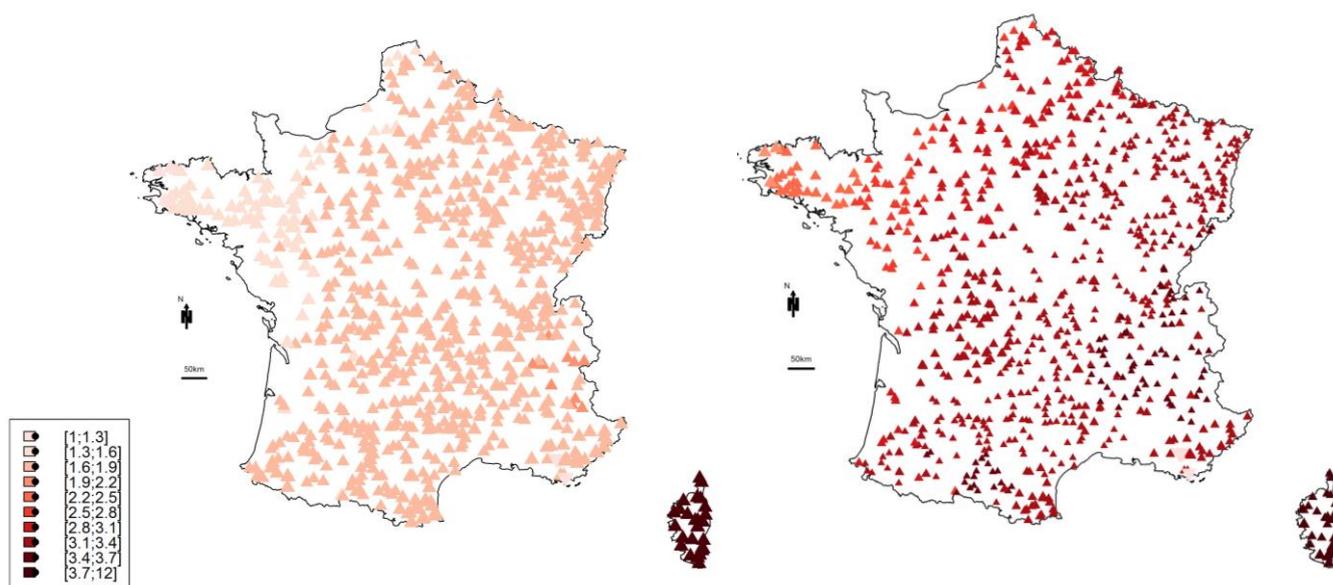


Figure 4 : Évolution des températures annuelles (en °C) projetées par 45 MCG entre 1961-1991 et 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite); la taille des triangles est proportionnelle à l'écart-type entre les différents MCG : plus le symbole est grand plus l'écart-type est faible donc plus fiable est le résultat

Sur l'échelle de la France, nous observons tout d'abord une nette augmentation de la température sur tout le territoire (fig. 4). Les projections s'accordent entre elles : le réchauffement climatique est sans équivoque. Nous observons par ailleurs que l'évolution de la température semble zonée. En effet, nous observons un gradient décroissant de température du sud-est vers le nord-ouest. L'augmentation la plus importante (Corse exceptée), d'environ 2 °C pour le futur proche, et d'environ 3.8°C pour le futur lointain, se situe dans les Alpes, près de la frontière avec la Suisse et l'Italie ; la zone la moins touchée se situe dans le Nord-Ouest, notamment en Bretagne. Nous observons par ailleurs que les MCG projettent une hausse très marquée des températures en Corse, l'augmentation pouvant atteindre 10.4°C pour le futur proche et jusqu'à 11.8 °C pour le futur lointain. Il est important de noter tout de même que les projections de températures pour les zones côtières, comprenant un mélange de caractéristiques terrestres et maritimes car les mailles des MCG sont plus larges que le territoire de la Corse, peuvent simuler des variations très différentes de précipitations et de température, et donc l'incertitude associée à ses résultats est très élevée. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution.

Nous observons par ailleurs que l'intensité du réchauffement sur l'ensemble du territoire est plus importante pour le futur lointain, qui présente une augmentation d'environ 3.3°C en moyenne,

contrairement au futur proche qui présente un réchauffement d'environ 1.7°C. Ceci est en accord avec la construction des RCP qui simulent un réchauffement de plus en plus intense au cours du temps (fig.1) entre 1 et 2°C pour le futur proche et entre 3 et 4°C pour le futur lointain (approximativement). Les projections ayant tendance à diverger avec le temps, on remarque la plus grande dispersion observée pour le futur lointain.

Il existe par ailleurs des différences d'intensité et d'incertitude entre les différents RCP, avec une incertitude et une intensité plus marquée pour le RCP 8.5 (fig. A-2-a, A-2-b).

Afin d'expliquer cette zonation, nous pouvons avancer différentes hypothèses. Tout d'abord, nous pouvons estimer que la proximité à l'océan ait un effet sur les variations de température : l'océan, agissant comme tampon du changement climatique et du climat en général, pourrait expliquer le faible degré d'augmentation sur les zones côtières. La différence entre les côtes Nord et Ouest pourrait s'expliquer par la présence du Gulf Stream au large des côtes Atlantiques, permettant d'avantage de tamponner l'augmentation de la température. Finalement, il semblerait que l'altitude ait un effet également, puisque les zones les plus affectées sont par ailleurs des zones de très forte altitude et qu'à l'inverse, les zones les moins impactées sont proches du niveau de la mer.

Les cartes pour l'ETP ne sont pas données ici puisque la distribution spatiale de l'ETP est quasiment identique à celle de la température. La hausse de l'ETP sur l'ensemble de territoire est d'environ +6% entre 2021 et 2050 et de +16% entre 2071 et 2100.

Précipitations

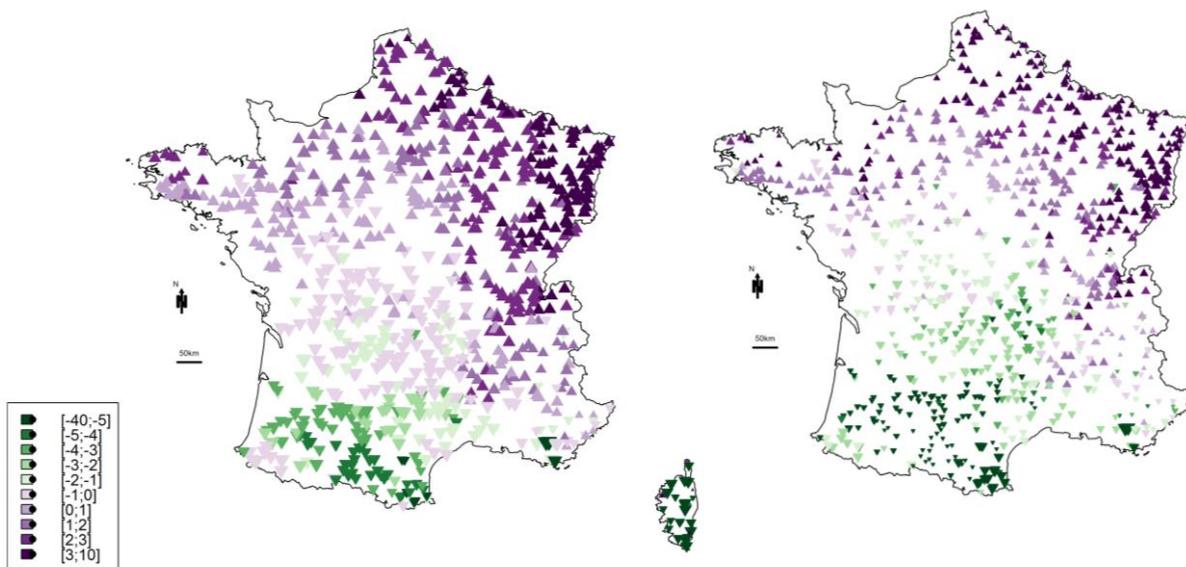


Figure 5 : Évolution des précipitations annuelles (en %) projetées par 45 MCG entre 1961-1991 et 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite)

En s'intéressant aux précipitations (fig. 5), nous observons que les variations de celles-ci sont plus hétérogènes. Il n'y a pas de nette tendance à l'augmentation ou la diminution, mais plutôt des zones subissant des influences différentes. Cette zonation ne suit par ailleurs pas les mêmes tendances que la température. Certaines zones, comme le Sud-Ouest et la Corse, présentent des diminutions des précipitations, alors que dans l'Est et le Nord la tendance est à l'augmentation ; le Centre ne semble pas subir d'effets importants. La zone la plus affectée par la baisse des précipitations (Corse mise à part) est la zone pyrénéenne, avec des diminutions allant de -5% à -10% pour le futur proche, et

s'aggravant sévèrement d'ici 2071-2100, avoisinant plutôt une diminution de -5 à -40%. La Corse est, comme pour les températures, la zone la plus affectée sur l'ensemble du territoire : les modèles projettent une baisse des précipitations étant en moyenne de -18% pour le futur lointain, pouvant atteindre -40%. Le Nord-Est à l'inverse présente des augmentations des précipitations pouvant aller jusqu'à 10% toutes périodes confondues. Cependant, les différents MCG présentent des résultats assez variables pour cette zone (points plus petits), donc cette interprétation est à considérer avec précaution. Cette incertitude est d'ailleurs plus marquée pour la période lointaine.

La diminution nette des précipitations dans la zone pyrénéenne pourrait avoir plusieurs explications : le fait qu'il s'agisse d'une zone naturellement chaude et sèche de par sa latitude et son altitude, une disposition du relief et une distance à la mer ne permettant pas d'apporter les masses d'eau évaporées, ou encore une combinaison de ces deux phénomènes. Pour expliquer l'augmentation des précipitations dans l'Est et le Nord du pays, nous pouvons imaginer qu'il s'agit d'un effet combiné des grandes circulations atmosphériques et du relief.

III.1.2 Variables hydrologiques

Incertitude entre les débits simulés en temps présent et les débits simulés

Nous rappelons ici qu'afin d'estimer l'évolution du débit, nous n'avons pas confronté nos simulations directement aux données observées en temps présent, mais nous avons, à partir de données climatiques observées pour la période de contrôle, simulé des débits Q^{STP} . Ceci permet de s'affranchir partiellement de l'incertitude liée au décalage entre les modèles et la réalité. Pour quantifier cette incertitude, nous avons calculé la différence relative entre Q^{STP} et Q^O , c'est-à-dire $I = (Q^O - Q^{STP}) / Q^O$. Nous avons calculé l'incertitude pour les débits moyens annuels, les QMNA5 et les QJXA10.

L'incertitude pour les débits moyens est comprise entre -74% et +22%, mais vaut -2% en moyenne, ce qui montre que le modèle GR4J est assez performant en temps normal. Cependant, pour les extrêmes hydrologiques nous obtenons une incertitude beaucoup plus importante. L'incertitude pour les QMNA5 est comprise entre -82% et +1138% (+25% en moyenne), et celle pour les QJXA10 est comprise entre -82% et +80% (-15% en moyenne). Ainsi, en comparant nos simulations futures aux données simulées en temps présent, nous évitons d'ajouter à la variation due au changement climatique une erreur de modélisation.

Les figures en annexe A-3 montrent la distribution spatiale des incertitudes. Nous n'avons pas identifié de structure spatiale particulière sur l'incertitude du modèle hydrologique.

Débits moyens annuels

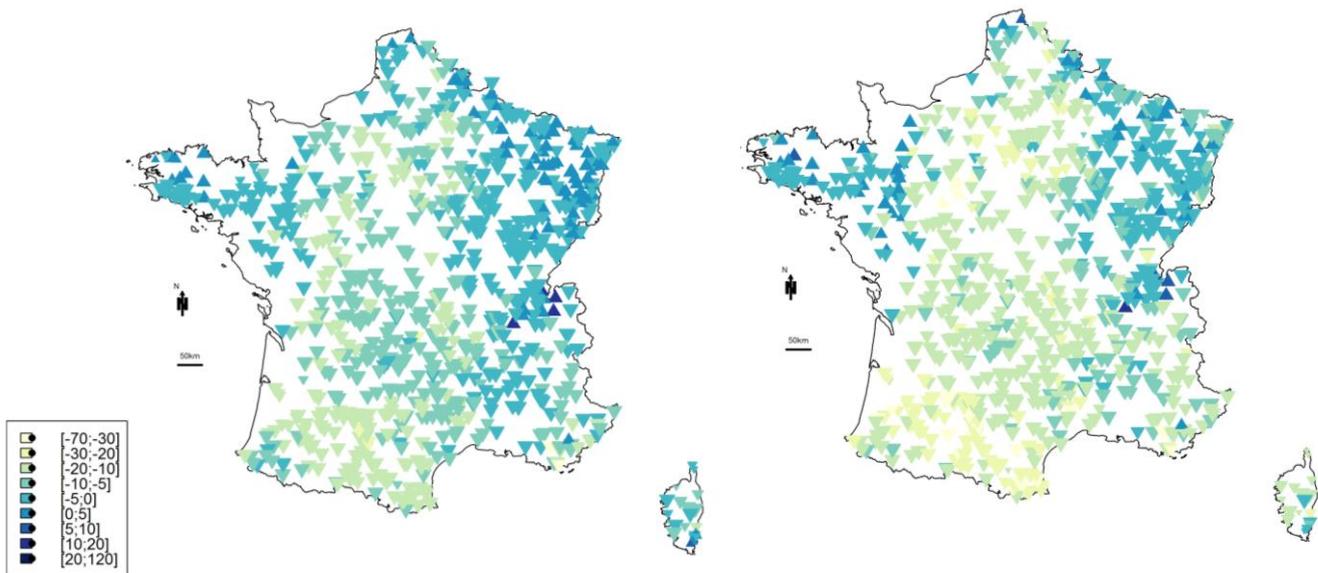


Figure 6 : Évolution des débits annuels (en %) projetés par 45 MCG entre 1961-1991 et 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite)

L'évolution des débits en France simulés par GR4J à l'horizon 2021-2050 (fig. 6) tend, pour la majorité du territoire, vers une baisse annuelle de ceux-ci de l'ordre de -5 à -30%. Les modèles projettent une baisse particulièrement marquée pour le sud-ouest du pays, tout comme pour les précipitations, allant de -10 à -40%. Le centre de la France et la Corse présentent également une tendance à la baisse qui est cependant moins marquée que pour le Sud-Ouest. La région Nord-Est et certains bassins alpins seront parmi les seules zones à conserver des débits du même ordre ou même en légère augmentation.

À l'horizon 2071-2100, nous observons cette même tendance à la baisse sur la majorité du territoire, plus sévère pour cette période (de -10 à -70% environ), et nous distinguons plus nettement une zone particulièrement défavorisée : les bassins du Sud-Ouest.

Au total il semblerait que le sud de la France va subir les effets combinés d'une hausse de l'ETP et d'une baisse des précipitations, ce qui va surtout impacter le sud-ouest du pays et qui va provoquer une baisse de plus en plus importante des débits moyens annuels, alors que dans le Nord-Est l'augmentation des précipitations pourrait compenser l'augmentation de l'ETP.

Étiages

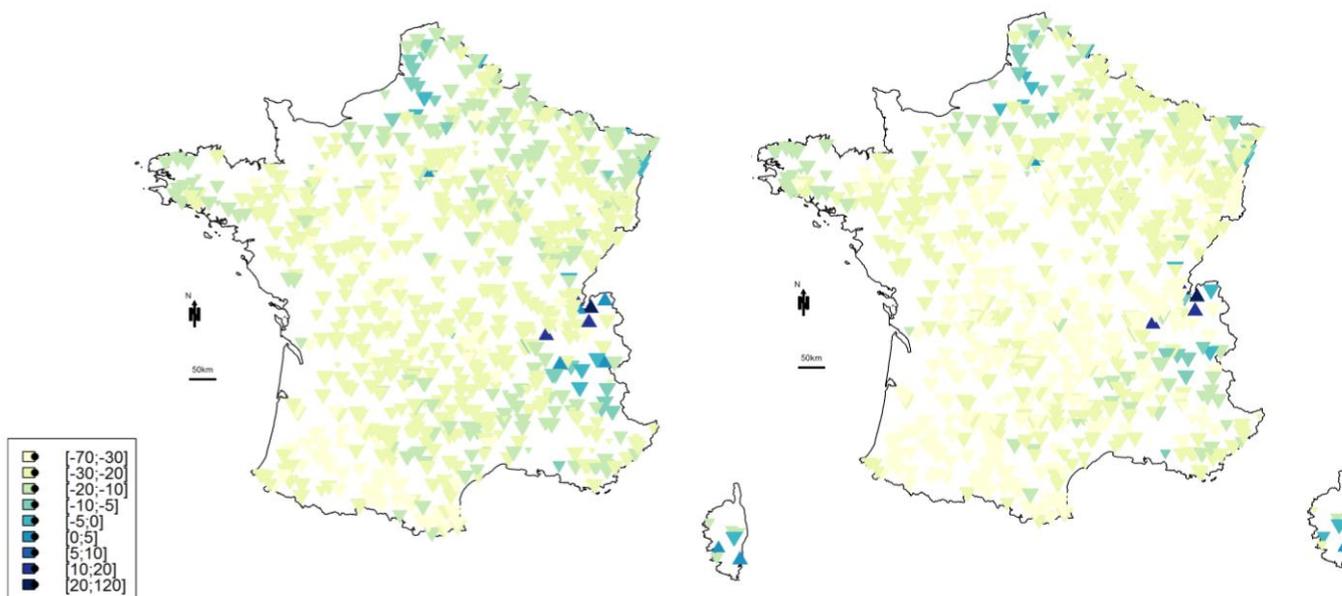


Figure 7 : Évolution des débits minimum mensuels quinquennaux secs, QMNA5 (en %) projetés par 45 MCGs entre 1961-1991 et 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite)

Concernant l'évolution des étiages (fig. 7), que nous illustrons ici grâce aux débits minimum quinquennaux secs, les modèles s'accordent sur une aggravation générale sur l'ensemble du territoire pour toutes les périodes.

À l'horizon 2021-2050, les résultats sont assez homogènes, mais nous pouvons tout de même distinguer une zone plus affectée : il s'agit, à nouveau, du contrefort pyrénéen. La baisse des QMNA5 est de l'ordre de -20 à -40% dans le sud du pays, et plutôt de l'ordre de -10 à -20% dans le reste du territoire.

À l'horizon 2071-2100, l'aggravation des étiages est encore plus sévère, de l'ordre de -30% à -70% sur la quasi-totalité du territoire. Le sud-est du pays, à proximité des Alpes, est moins touché, avec une diminution de -20% à -10%. Nous pouvons penser que les bassins alpins subiront possiblement une diminution de l'enneigement, permettant une diminution moins brutale des débits d'étiage, qui ont lieu durant l'hiver pour ces régions. La fonte des neiges et des glaces serait ainsi plus progressive, permettant aux cours d'eau de cette région de bénéficier d'une légère hausse des débits sur toute l'année.

Crues

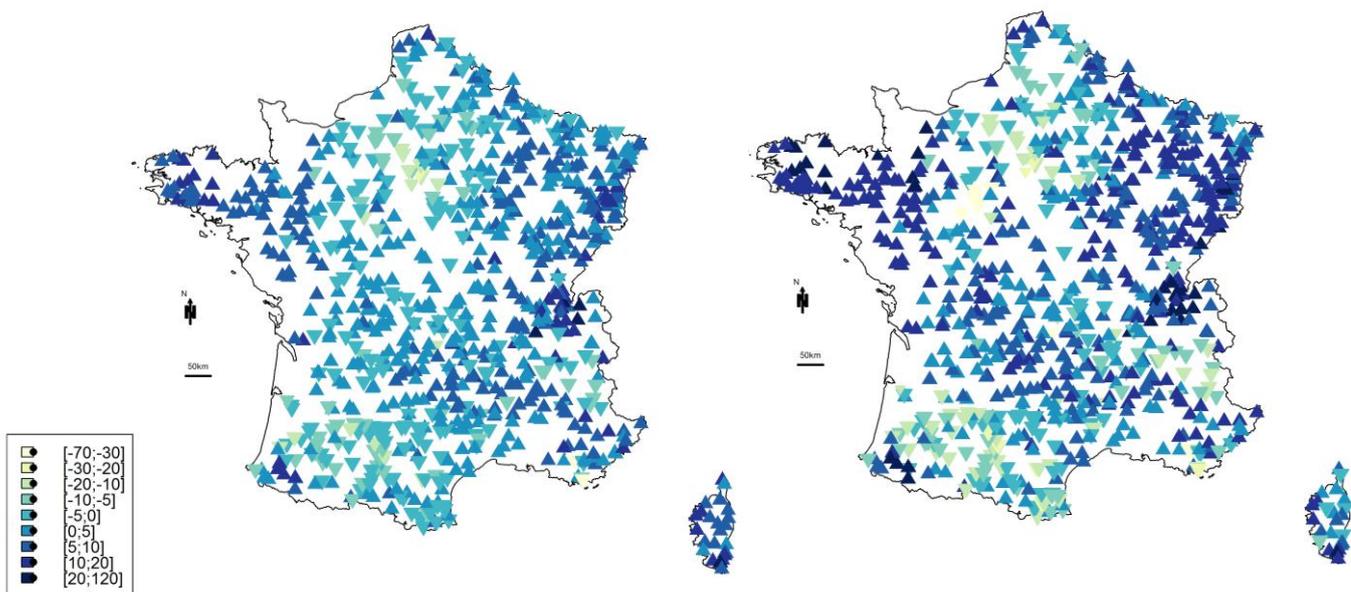


Figure 8 : Évolution des débits journaliers maximaux de période de retour 10 ans, QJXA10 (en %) projetés par 45 MCG entre 1961-1991 et 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite)

En s'intéressant à l'évolution des crues pour la période 2021-2050, que nous illustrons ici par les débits journaliers maximaux de période de retour 10 ans, nous observons tout d'abord l'absence de tendance nette, contrairement à l'évolution des étiages et débits moyens. En effet, sur l'ensemble du territoire les variations oscillent entre -5% et +5%. Nous distinguons tout de même une légère diminution des crues allant de -5 à -10% au niveau du contrefort pyrénéen, ce qui est en accord avec la baisse annuelle des débits que nous avons observé pour cette zone. L'est du pays, lui, présente une intensification des crues de l'ordre de 5 à 20%, même s'il est difficile de distinguer une zonation nette.

Pour la période 2071-2100, nous observons également une hétérogénéité au niveau des résultats. Cependant, la tendance généralisée à la hausse semble ici plus marquée, le Centre, le Nord et l'Ouest présentant une augmentation des crues de +5% à +20%, avec certaines zones montrant des augmentations de +20 à +120%. Le contrefort pyrénéen et les Alpes, comme pour la période 2021-2050, présentent une diminution du QJXA10, ici de -5% à -20%. Au total, l'évolution des crues ne suit pas une tendance nette sur l'ensemble du territoire, mais il semblerait que les débits des zones montagnardes, du fait d'une diminution globale des précipitations soient enclins à diminuer. Le reste du territoire semble plus sujet à des oscillations de débit plus ou moins extrêmes, avec des crues plus fortes et des étiages plus sévères.

III.2. Résultats sur les grands fleuves français

Comme dans le projet Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013), nous nous sommes intéressés en détail aux résultats climatiques et hydrologiques des bassins versants alimentant les plus grands fleuves français : la Seine, la Loire, le Rhône et la Garonne (la Seine a été exclue à cause de valeurs aberrantes dans certaines mailles SAFRAN). Ces quatre fleuves ont les débits les plus importants en France, et donc la quantification des effets du changement climatique sur ceux-ci peut permettre aux décideurs de mieux répartir cette ressource suite aux variations de débit.

III.2.1 Futur proche (2021-2050)

a) Variables climatiques

Température

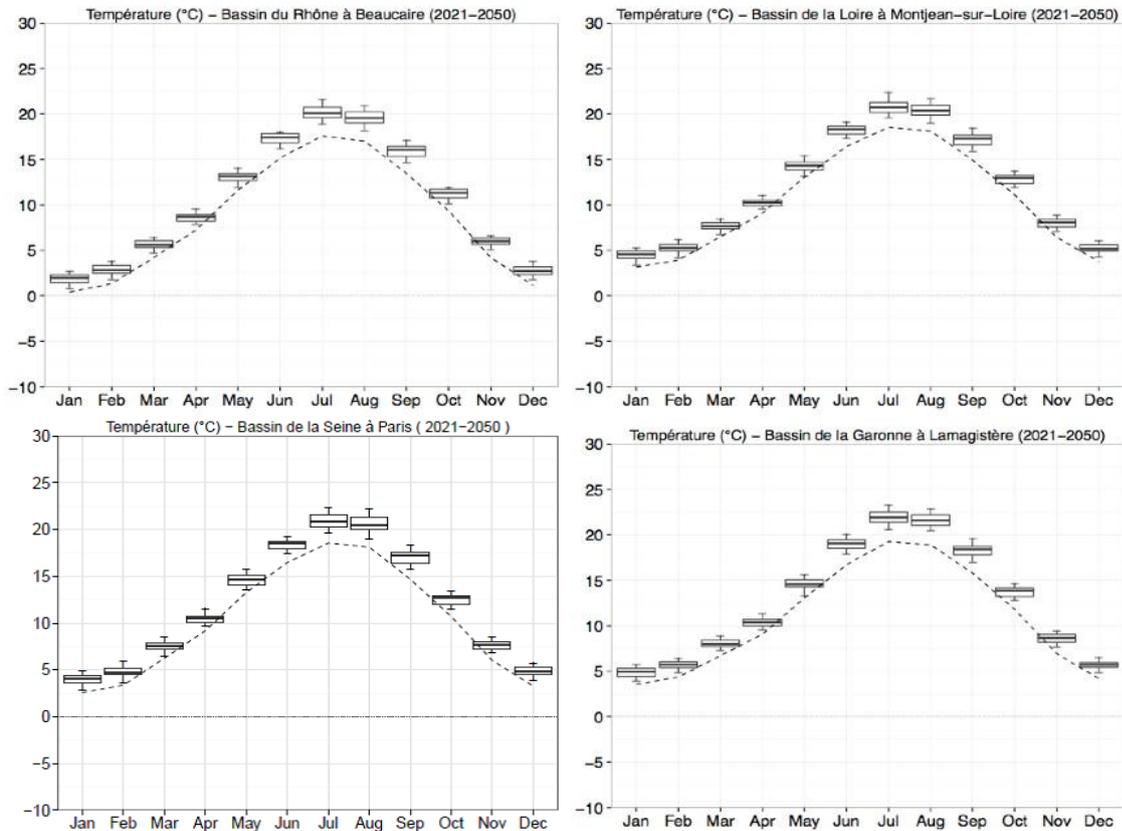


Figure 9 : Températures moyennes mensuelles simulées par les 45 MCG (boxplots) et les températures en temps présent (pointillés) pour le futur proche pour quatre grands bassins versants : les boxplots montrent la valeur médiane, ainsi que les quantiles 25%, 75%, (contours de la boîte) 5% et 95% (barres)

Les projections s'accordent sur une hausse de la température annuelle comprise entre +0.1 et +2.8°C avec des variations de températures plus marquées en été qu'en hiver. En été, les températures vont augmenter, d'après la médiane des différentes projections climatiques, d'environ +2.5 °C pour le Rhône, +2.3°C pour la Loire et la Seine, et +2.7°C pour la Garonne, l'augmentation atteignant +4.8°C pour certains MCG. En hiver, l'augmentation de température est de l'ordre de +1.4°C pour la Seine, +1.5°C pour le Rhône et la Loire, et est plus importante pour la Garonne (+1.7°C).

Précipitations

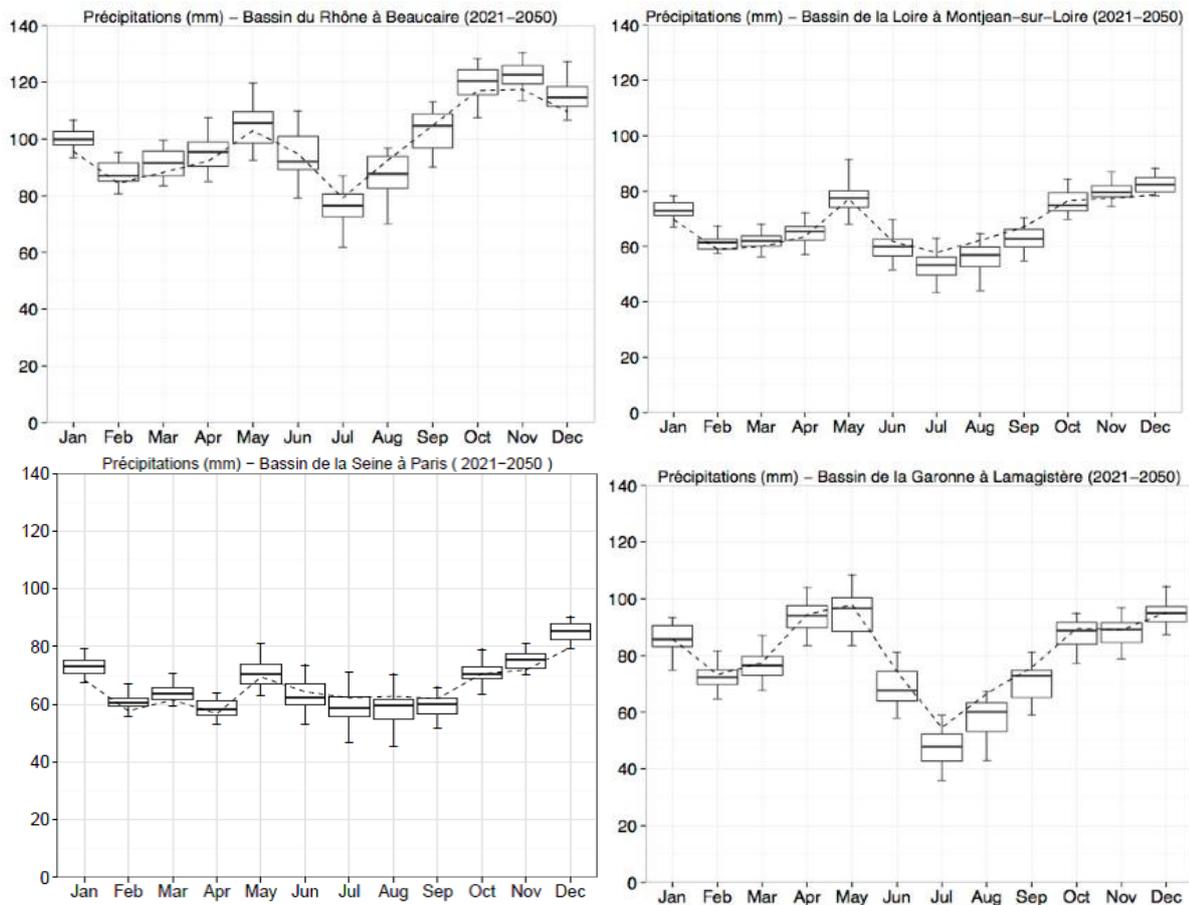


Figure 10: Précipitations moyennes mensuelles simulées par les 45 modèles climatiques (boxplots) et les précipitations en temps présent (pointillés) pour le futur proche pour quatre grands bassins versants

Les variations de précipitations présentent une plus grande disparité avec des variations peu nettes. En effet, nous remarquons qu'il existe une incertitude au niveau du signe des variations (puisque les boxplot recourent les données observées). Les précipitations annuelles présentent des variations comprises entre -7.6% et +10.3% pour le Rhône, -8% et +8% pour la Loire, -5.6% et +7.1% pour la Seine et entre -15% et +5.8% pour la Garonne. En se concentrant sur les différentes saisons, nous distinguons tout de même certaines tendances, les précipitations diminuant de -2 à -5% en été pour le Rhône, -3 à -8% pour la Loire, -2% à -6% pour la Seine et de -12% à -8% pour la Garonne, le bassin le plus impacté. L'hiver à l'inverse présente des augmentations de +3% à +4.6% pour le Rhône, +2.8 à +4.8% pour la Loire et +3.5% à +6.7% pour la Seine. La Garonne cependant présente une diminution de -1.2% à -0.2%.

Évapotranspiration potentielle

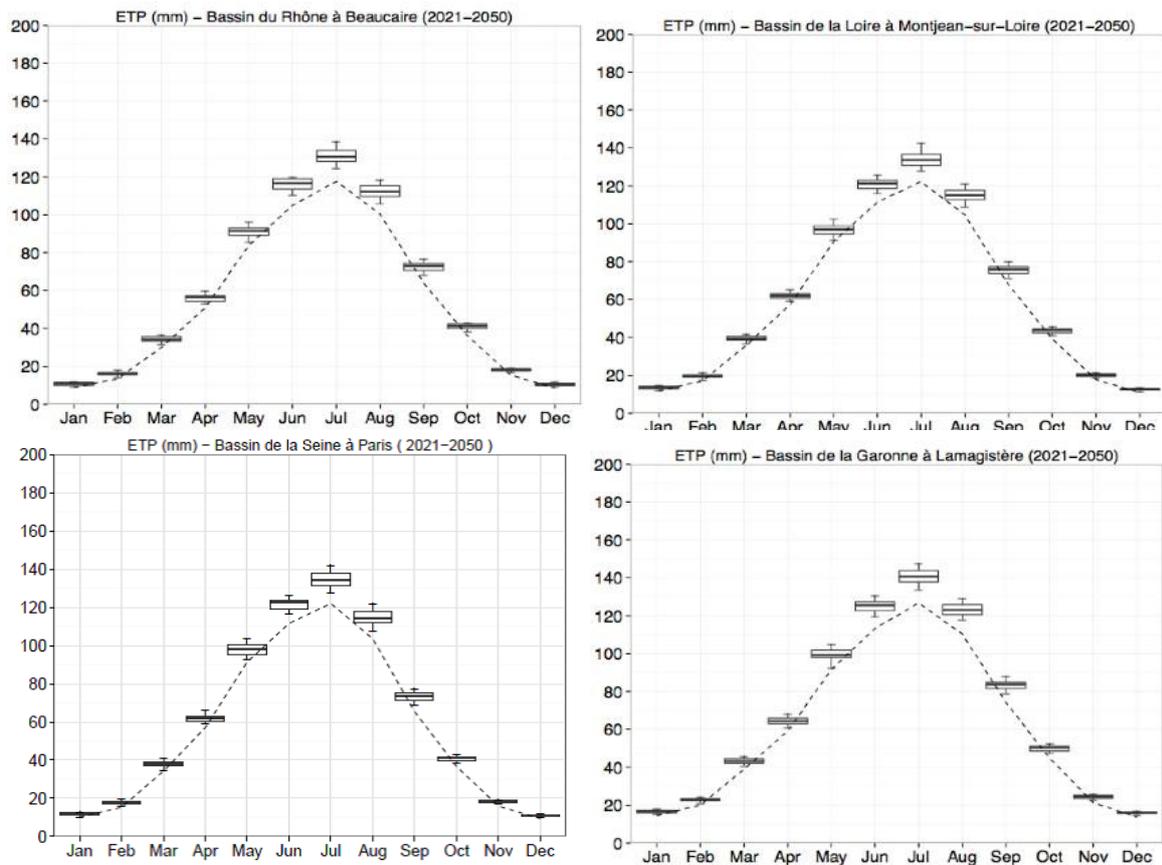


Figure 11 : Évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle simulée par les 45 MCG (boxplots) et l'évapotranspiration en temps présent (pointillés) pour le futur proche pour quatre grands bassins versants

En ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle, les projections s'accordent sur une hausse de celle-ci sur toute l'année (de +2% à +18% pour le Rhône, de +7.1% à +16.2% pour la Loire, +7.1% à +18% pour la Seine et +1.5% à +16.8% pour la Garonne), notamment en été. Les variations d'intensité de l'ETP paraissent par ailleurs analogues aux variations de température, ce qui peut s'expliquer par le fait que le calcul de l'ETP par la formule de Oudin (Oudin *et al.*, 2005) dépend de la température.

b) Débits

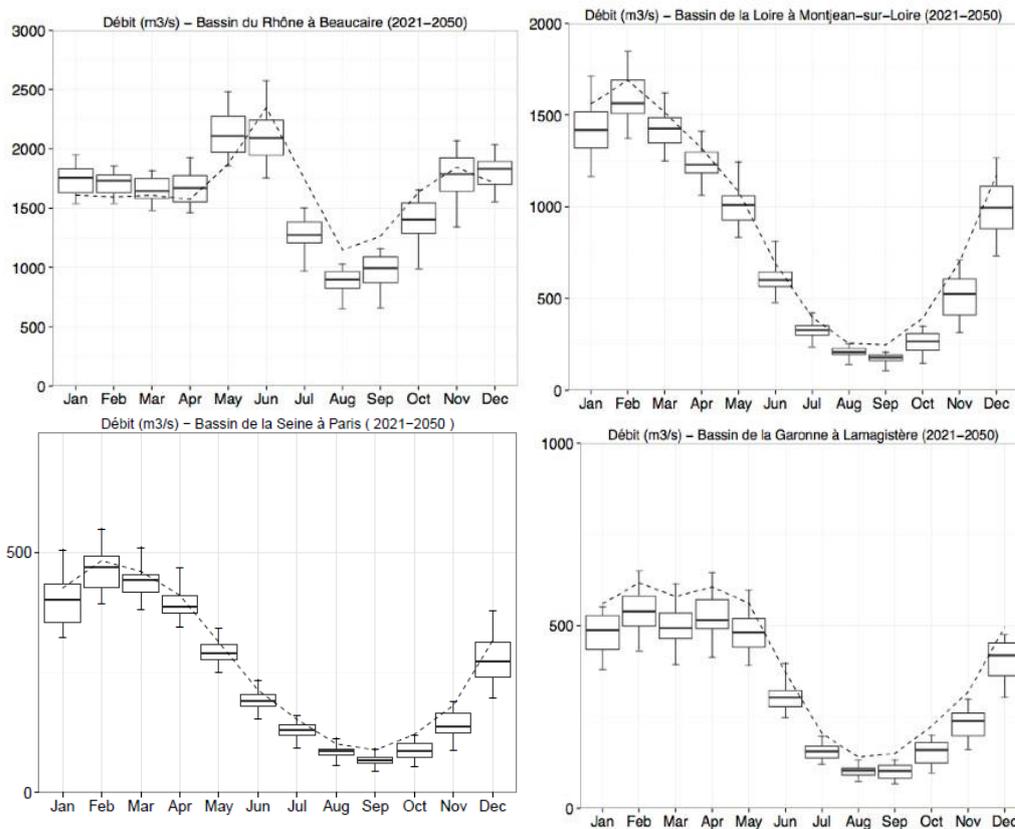


Figure 12 : Débits moyens mensuels simulés par les 45 MCG (boxplots) et les débits simulés en temps présent (pointillés) pour le futur proche pour quatre grands bassins versants

Finalement, lorsque nous nous intéressons aux débits, nous remarquons qu'il y a une baisse des débits moyens annuels. Cependant, selon le régime hydrologique du bassin versant considéré, les variations sont plus marquées à différentes saisons.

Les bassins de la Loire et de la Seine, caractérisés par un régime pluvial (crues en hiver, étiages en été ; forte influence de la température), montrent une projection des débits moyens mensuels en baisse sur toute l'année, avec une diminution de -11% (la Loire) et -10% (la Seine) de la ressource annuelle en eau. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la combinaison d'une hausse de l'ETP avec des variations de précipitations intensifiant la baisse des débits (dans le cas d'une baisse des précipitations) ou ne parvenant pas à compenser la hausse de la température (dans le cas d'une légère hausse).

Le bassin du Rhône, qui présente un régime pluvio-nival (crues au printemps à cause de la fonte des neiges et en hiver à cause de la baisse de l'ETP) présente des variations de débit plus contrastées. D'avril à mai, les simulations projettent une hausse des débits de +10%. Cela pourrait s'expliquer par une fonte des neiges précoce et moins importante. Cette évolution a d'ailleurs été observée par Claire Magand lors de sa thèse sur la Durance. L'été, à l'inverse, se caractérise par des diminutions des débits de -20 à -50%.

Le bassin de la Garonne, avec un comportement hydrologique intermédiaire entre celui du Rhône et celui de la Loire (faibles crues printanières) montre une diminution sévère des débits sur l'ensemble de l'année (-17%). En été les débits diminuent de -23% en moyenne, certains MCG montrant des

diminutions de jusqu'à -60%. L'hiver la diminution est moins sévère mais avoisine tout de même -13.5% en moyenne.

III.2.2 Futur lointain (2071-2100)

a) Variables climatiques

Température

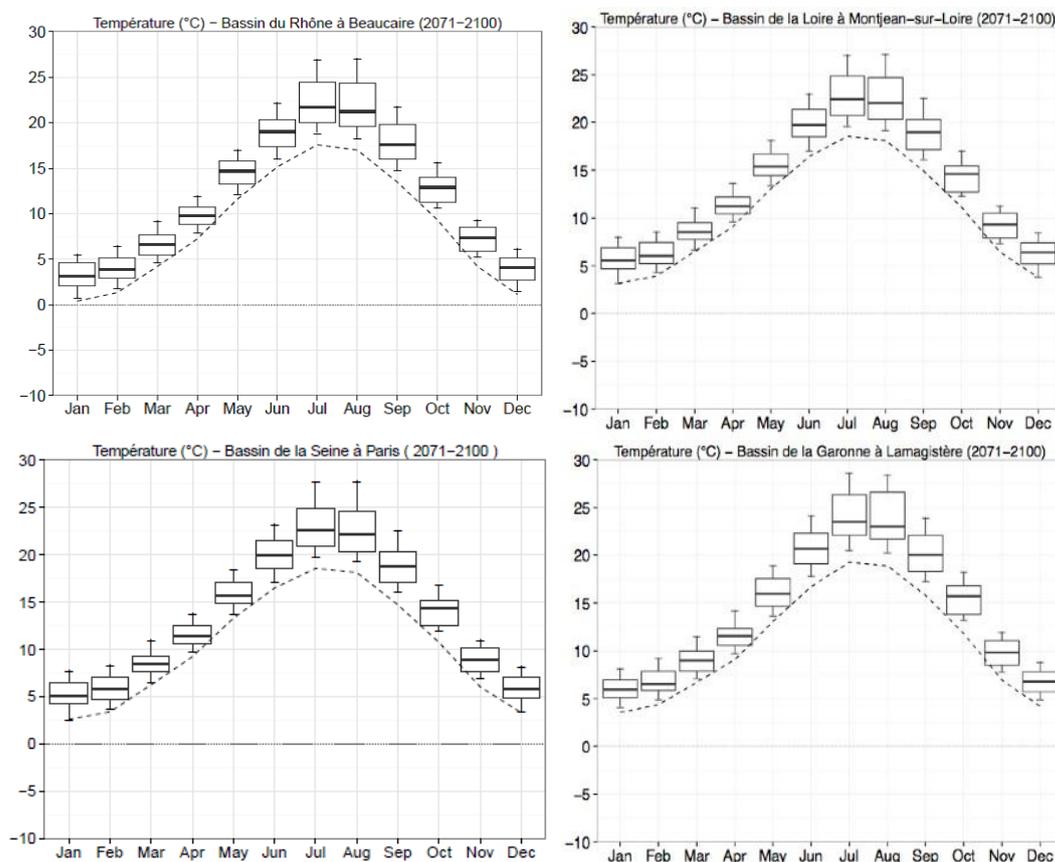


Figure 13 : Températures moyennes mensuelles simulées par les 45 MCG (boxplots) et les températures en temps présent (pointillés) pour le futur lointain pour quatre grands bassins versants

En s'intéressant au futur lointain, nous observons que les variations de température sont analogues aux variations pour le futur proche mais avec une plus forte intensité. Les projections montrent donc une augmentation des températures moyennes mensuelles ainsi qu'annuelles, les projections simulant des variations oscillant entre +0.3°C et +6.7°C pour le Rhône (+3.3°C en moyenne), 0°C et +6°C pour la Loire et la Seine (+3°C en moyenne), et entre +0.5°C et +6.7°C pour la Garonne (+3.2°C en moyenne). Par ailleurs, nous remarquons qu'il y a une dispersion plus importante des résultats pour le futur lointain. En effet, plus la période à laquelle on s'intéresse est lointaine, plus grande est l'incertitude.

Précipitations

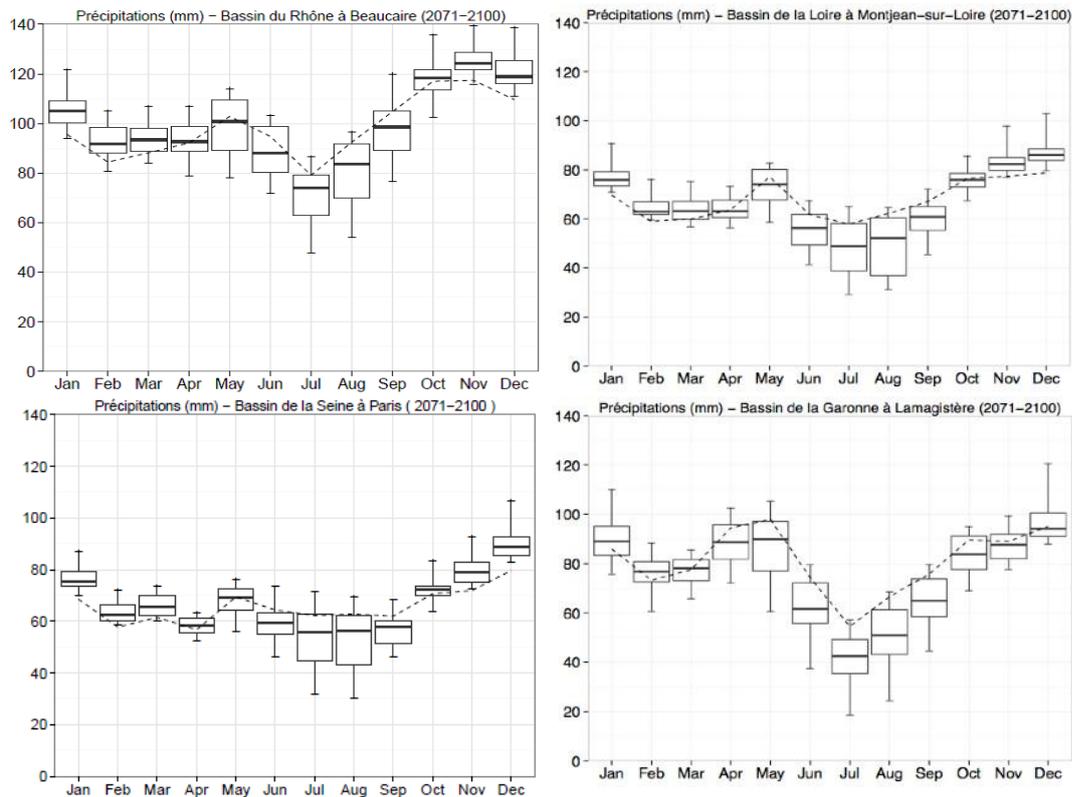


Figure 14: Précipitations moyennes mensuelles simulées par les 45 MCG (boxplots) et les précipitations en temps présent (pointillés) pour le futur lointain pour quatre grands bassins versants

Tout comme pour la température, l'intensité des variations des précipitations et de l'incertitude liée à celles-ci est plus importante pour le futur lointain. Ainsi, il y a une baisse plus marquée des précipitations annuelles pour le bassin de la Garonne (-8%), une faible tendance à l'augmentation pour le bassin de la Seine (+1.5% en moyenne sur toute l'année), et pas d'effet significatif sur le Rhône et la Loire. La baisse des précipitations est plus marquée en été (-7% pour le Rhône, -13% pour la Loire, -9% pour la Seine et -20% pour la Garonne), mais à différence des résultats pour le futur proche, en hiver les précipitations ont tendance à augmenter, ce explique que le bilan annuel tende vers 0% pour le Rhône et la Loire et soit positif pour la Seine.

Évapotranspiration potentielle

L'ETP (non présentée ici) a aussi une nette tendance à augmenter de façon analogue à la température, avec, comme pour les précédentes variables, une plus forte incertitude au sein des différents MCG.

b) Débits

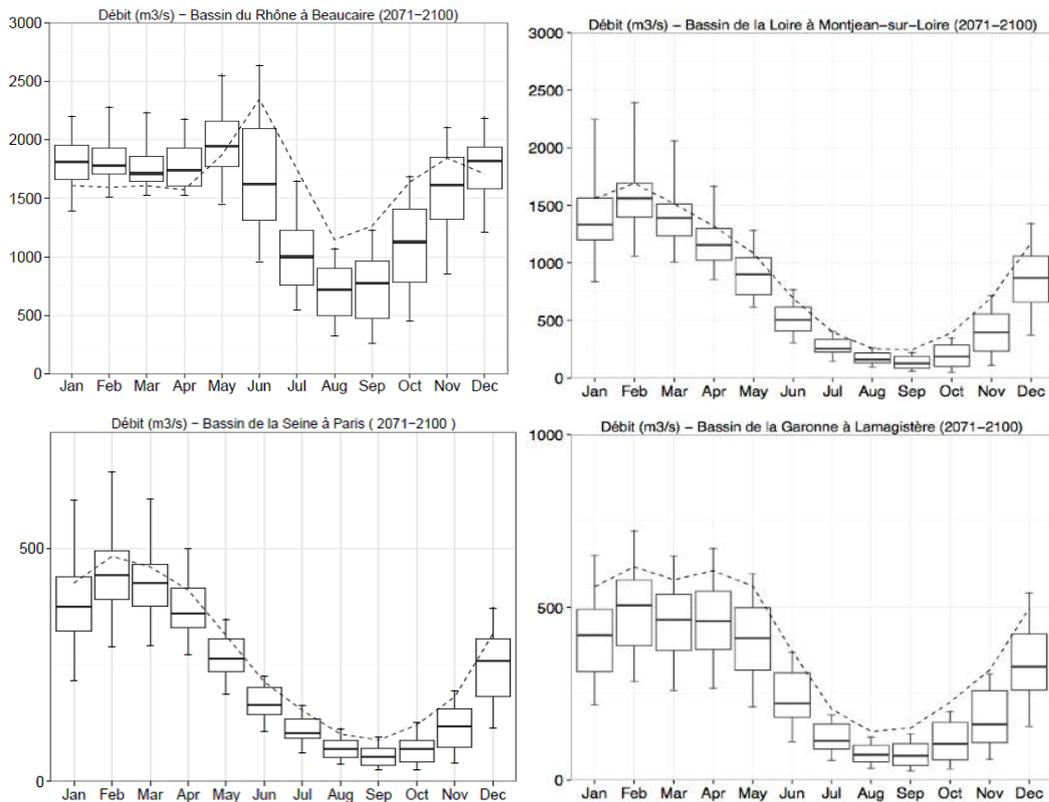


Figure 15: Débits moyens mensuels simulés par les 45 modèles climatiques (boxplots) et les débits simulés en temps présent (trait en pointillés) pour le futur lointain pour quatre grands bassins versants

Les variations de débit pour le futur lointain semblent tendre vers une nette baisse. Le bassin du Rhône voit son débit annuel diminuer de -10% et la Loire de -18%, le bassin le plus affecté par cette diminution étant le bassin de la Garonne, avec une baisse marquée du débit moyen annuel (-32%). Ainsi, les débits pour toute l'année se verront diminués. Pour la Loire et la Garonne la baisse des débits est assez uniforme sur l'année, alors que le bassin du Rhône montre des variations assez hétérogènes, avec une augmentation des débits en hiver et une baisse sévère en été. Ce phénomène est sûrement lié à un dérèglement du cycle d'accumulation/fonte des neiges de ce bassin à régime pluvio-nival.

III.2.3 Différences entre les RCP

Comme énoncé auparavant, nous avons choisi de nous concentrer sur deux RCP : 2.6 et 8.5. Ainsi, nous avons choisi les deux extrêmes des émissions en gaz à effet de serre simulés par le GIEC. Pour illustrer les différences entre ces RCP, nous prendrons l'exemple du bassin de la Loire à Montjean-sur-Loire. En comparant les projections issues des différents RCP (fig. 16) nous observons tout d'abord que le sens des variations ne change pas entre les différents RCP. Il existe tout de même des différences : l'amplitude des variations est plus importante pour le RCP 8.5, ce qui est en accord avec la définition des RCP (le RCP 8.5 simulant un forçage radiatif plus conséquent que le RCP 2.6). Par ailleurs, nous remarquons également que l'étendue des variations entre les MCG pour le RCP 8.5 est plus importante : il y a une incertitude plus marquée lorsque le forçage radiatif est fort. Finalement, d'après la définition de l'évolution du forçage radiatif pour le RCP 2.6, les projections lointaines pour

ce RCP tendent vers une stabilisation de l'impact du changement climatique (fig. 1), contrairement aux RCP 8.5, la différence entre les périodes 2021-2050 et 2071-2100 est donc moins marquée.

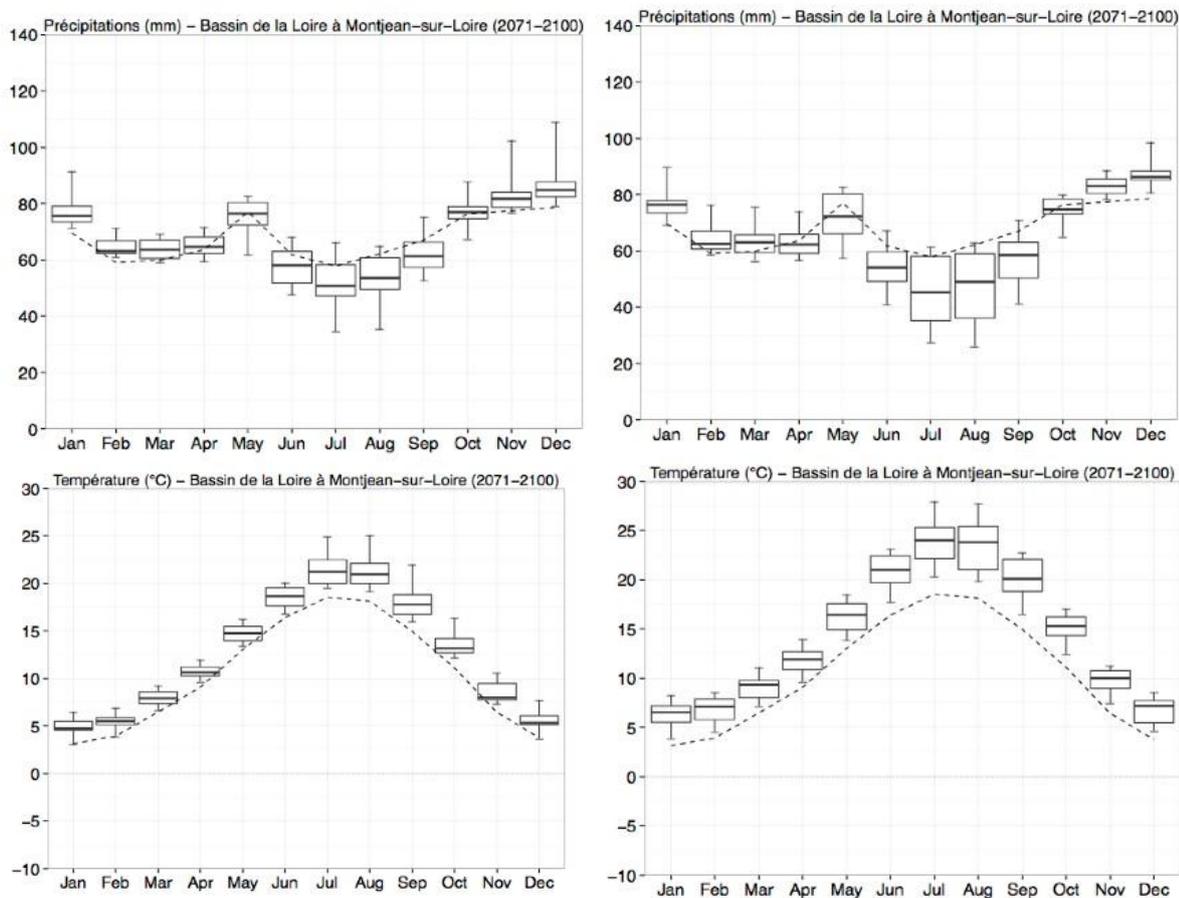


Figure 16: Variations de température et précipitations pour le bassin de la Loire à Montjean-sur-Loire pour le futur lointain ; à gauche figurent les projections pour le RCP 2.6 et à droite pour le RCP 8.5

III.3. Comparaison avec Explore 2070

Nos projections sont par ailleurs globalement en accord avec les résultats du projet Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013). Cette étude, effectuée sur la période 2046-2065 ne nous permet pas de comparer directement les valeurs obtenues, mais nous pouvons comparer les tendances suivies par les variables climatiques et hydrologiques.

Les résultats d'Explore 2070 montrent une baisse des débits moyens mensuels sur la majeure partie de l'année pour les bassins du Rhône, de la Loire et de la Garonne, à l'exception des mois de février à avril pour le bassin du Rhône et de la Garonne, ce qui est en accord avec nos projections.

De plus, dans ce projet il est estimé qu'il y aura une diminution significative globale des ressources à l'échelle du territoire avec des étiages plus marqués pour la plupart des cours d'eau. Ceci est en accord avec nos observations. Par ailleurs, Explore 2070 montre une évolution incertaine des crues, de même que nos résultats pour la période 2021-2050. Nos résultats pour la période 2071-2100 montrent tout de même le développement de zones pour lesquelles l'augmentation de l'intensité des crues est plus nette et ressemble à la répartition des pluies pour cette même période.

IV. Conclusions

Cette étude nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions concernant l'évolution du climat, des débits et du comportement hydrologique de la France pour le futur proche (2021-2050) et lointain (2071-2100).

Nos résultats montrent, en premier lieu, une augmentation de la température sur l'ensemble du territoire. Il existe des différences entre les différents MCG et RCP, mais tous s'accordent sur l'existence d'un réchauffement allant de 1 à 2°C pour la période 2021-2050 et de 3 à 4°C pour la période 2071-2100. Les variations d'évapotranspiration potentielle, par définition, suivent la même tendance. Les Alpes et le contrefort pyrénéen seront les plus affectés par la hausse des températures ; la Bretagne sera la moins affectée.

Les variations de précipitation sont plus hétérogènes que les variations de température. Le contrefort pyrénéen présente la baisse la plus marquée de précipitations, et le centre de la France présente cette même tendance à moindre intensité. Les variations au Nord-Est montrent une tendance générale à l'augmentation, mais l'incertitude pour cette zone est assez élevée.

Les débits moyens annuels vont baisser sur l'ensemble du territoire, notamment dans le Sud-Ouest. Le Nord-Est sera cependant épargné dans le siècle à venir.

La totalité de la France subira des étiages de plus en plus sévères, ce qui rendra la répartition de l'eau en périodes sèches très difficile, nuisant potentiellement à tous les secteurs dépendant fortement de cette ressource : l'industrie, l'agriculture et la navigation. Ne seront épargnées que de très rares zones, comme certains bassins du massif Alpin.

L'évolution des crues, plus hétérogène, semble tendre vers une augmentation pour la plupart du territoire, sauf la zone pyrénéenne et les Alpes. Ainsi, en combinant une intensification des crues et une aggravation des étiages, il semblerait que la France sera de plus en plus sujette à des flux hydrologiques changeants au cours des années, ce qui rend la prise de décisions sur la répartition de cette ressource difficile.

Au total, les zones montagnardes sont les plus affectées par le changement climatique. Elles présentent la plus forte augmentation des températures et baisse des précipitations, ce qui se traduit par une diminution importante sur toute l'année des débits, une aggravation des étiages, et même un adoucissement des crues. Au total, il semblerait que le cycle d'enneigement/fonte des neiges sera dérégulé et le manteau neigeux moins conséquent, ce qui pourrait avoir un effet catastrophique sur l'approvisionnement en eau de ces régions. En effet, les zones montagnardes dépendent fortement de la fonte des neiges et des glaces pour se ravitailler en eau.

Les bassins du Rhône à Beaucaire et de la Garonne à Lamagistère sont d'ailleurs la preuve des effets du changement climatique sur les bassins montagnards. Le bassin du Rhône dont l'exutoire est situé au pied du massif Alpin montre une fonte des neiges précoce et une forte diminution des débits en été. Le bassin de la Garonne situé dans le contrefort pyrénéen montre une diminution soutenue des débits sur toute l'année. Le bassin de la Seine à Paris et de la Loire à Montjean-sur-Loire, présentant des comportements assez similaires, représentent à l'inverse les zones les moins touchées par les variations du changement climatique. La baisse des précipitations, des températures et des débits est peu marquée, avec une incertitude dépassant parfois les variations simulées.

Il est à noter que le travail réalisé lors de ce stage, même s'il constitue une première référence basée sur le CMIP5 à l'échelle de la France, devra être complété par la suite. En effet, il faudra compléter le

jeu de projection hydrologique pour les MCG et RCP non exploités. De plus, la chaîne de l'incertitude n'a pas été abordée de manière complète : les différentes réalisations des MCG devraient être testées, ainsi que différentes méthodes de descente d'échelle, différents modèles hydrologiques ainsi que calages de ceux-ci. Enfin, il conviendrait de compléter l'analyse par d'autres indicateurs hydroclimatiques.

Annexes

Annexe A-1 : Liste des MCG et des instituts les ayant créés

Acronyme	Modèles	Institut
BCC	BCC-CSM1.1* BCC-CSM1.1(m)*	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (Chine)
CCCma	CanESM2*	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)
CMCC	CMCC-CESM* CMCC-CM CMCC-CMS*	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italie)
CNRM-CERFACS	CNRM-CM5*	Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique (France)
CSIRO-BOM	ACCESS1.0* ACCESS1.3*	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australie), et BOM (Bureau of Meteorology, Australie)
CSIRO-QCCCE	CSIRO- Mk3.6.0*	CSIRO en collaboration avec le Queensland Climate Change Centre of Excellence (Australie)
EC-EARTH	EC-EARTH* (version modifiée par le KNMI)	Consortium EC-EARTH (UE, 11 pays)
GCESS	BNU-ESM*	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University (Chine)
INM	INM-C4*	Institute for Numerical Mathematics (Russie)
IPSL	IPSL-CM5A-LR* IPSL-CM5A-MR* IPSL-CM5B*	Institut Pierre-Simon Laplace (France)
LASG-CESS	FGOALS-s2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (Chine)
MIROC	MIROC-ESM* MIROC-ESM-CHEM* MIROC5*	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), et le National Institute for Environmental Studies (Japon)
MOHC	HadGEM2-CC* HadGEM2-ES*	Met Office Hadley Centre (réalisations HadGEM2-ES additionnelles contribuées par Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (UK)
MPI-M	MPI-ESM-LR* MPI-ESM-MR*	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) (Allemagne)
MRI	MRI-CGCM3*	Meteorological Research Institute (Japon)
NASA GISS	GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies (USA)
NCAR	CCSM4*	National Center for Atmospheric Research (USA)
NCC	NorESM1-M*	Norwegian Climate Centre (Norvège)
NOAA GFDL	GFDL-CM3* GFDL-ESM2G* GFDL-ESM2M*	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)

Figure A-1 : Liste des MCG présents dans la méthode ADC et les centres de modélisation les ayant conçus (* = MCG utilisés pour la suite du stage)

Annexe A-2 : Cartes avec différents RCP

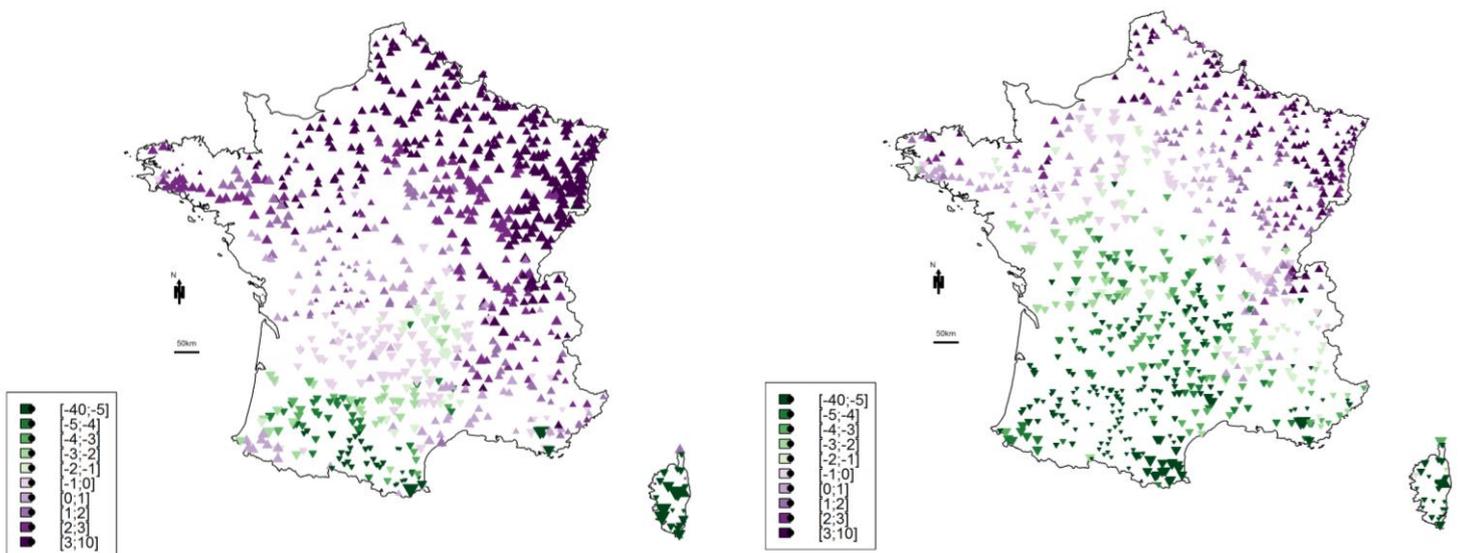


Figure A-2-a : Évolution des précipitations annuelles (en %) projetées par 19 MCGs (RCP2.6, à gauche) et par 26 MCGs (RCP8.5, à droite) entre 1961-1991 et 2071-2100

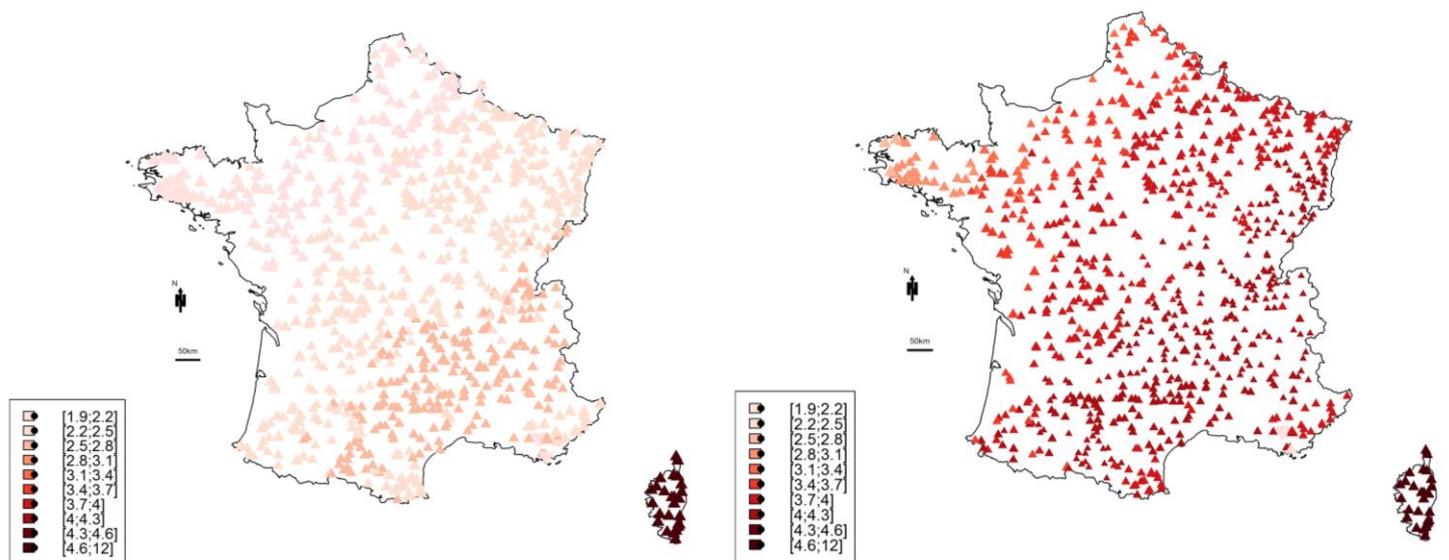


Figure A-2-b : Évolution des températures annuelles (en °C) projetées par 19 MCGs (RCP2.6, à gauche) et par 26 MCGs (RCP8.5, à droite) entre 1961-1991 et 2071-2100

Annexe A-3 : Distribution géographique de l'incertitude

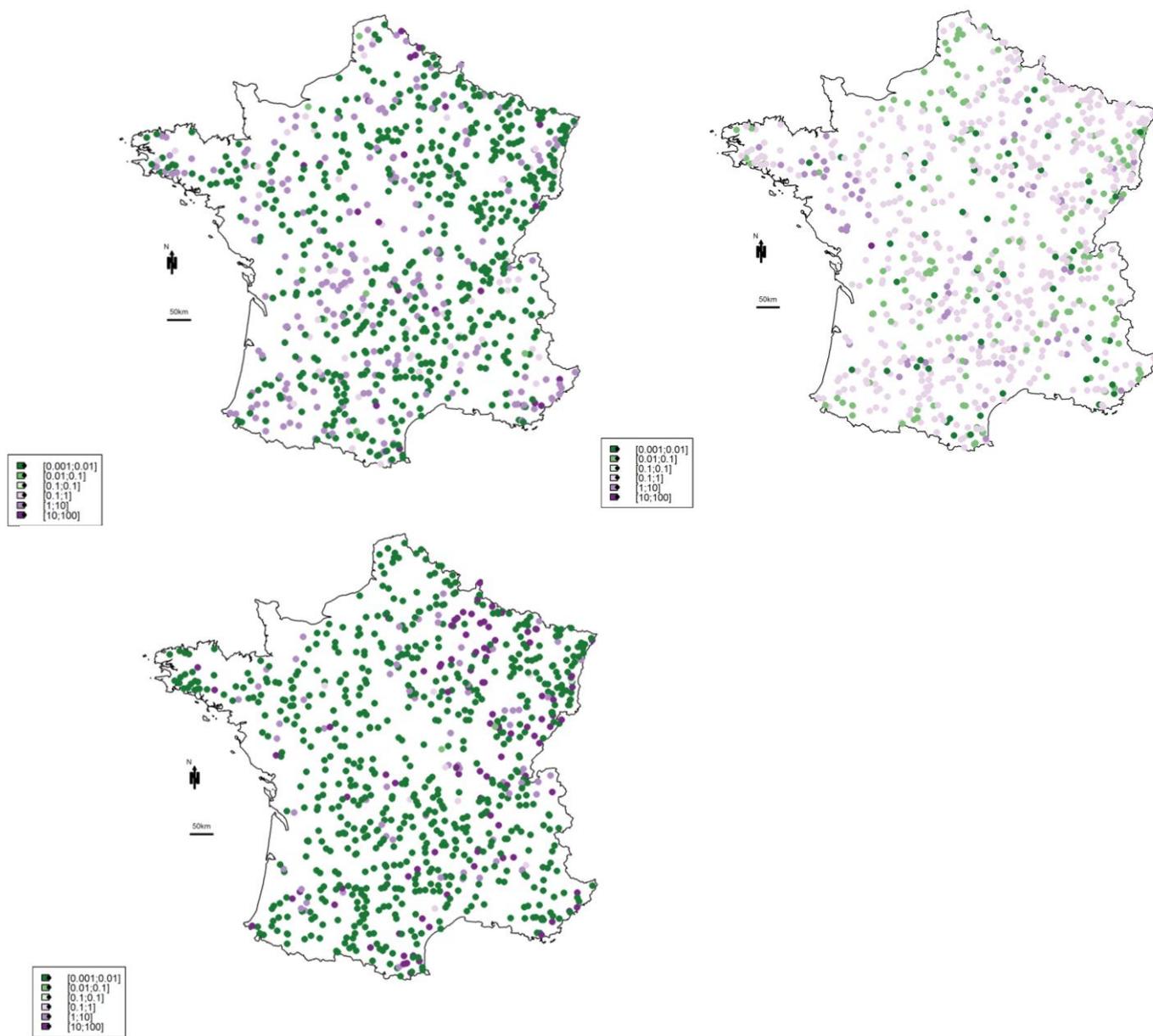


Figure A-3: Distribution géographique de l'incertitude relative entre les données observées et simulées pour le débit moyen (en haut à gauche), le QMNA5 (en haut à droite), et le QJXA10 (en bas à gauche)

Références

- Beven K., 2006. A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* 320, 18–36
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology* 27, 1643–1655
- Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.Y., Sauquet E., Vidal J.P., Rouchy N., Martin E., David J., Norotte T., Maugis P., De Lacaze X., 2013. Quels impacts climatiques sur les eaux de surface en France à l’horizon 2070 ? *La Houille Blanche* n° 4, 5–15
- Coron L., 2013. Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Thèse de doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris).
- Ducharne A., Koster R., Suarez M., Stieglitz M., Kumar P., 2000. A catchment based approach to modeling land surface processes in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, pp. 24809-24822
- Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoïn S., Rieu J., 2009. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, GICC - Gestion et Impacts du Changement Climatique, Rapport du projet RexHyss, http://www.sisyphes.jussieu.fr/~ducharne/rexhyss/DOCS/Rapport_final_0000454_web.pdf
- Edijatno, Nascimento N.O., Yang X., Makhlof Z., Michel C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44 (2), 263–277.
- Forzieri G., Feyen L., Rojas R., Flörke M., Wimmer F., Bianchi A., 2014. Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 85–108
- Gascoïn S, Ducharne A, Ribstein P, Carli M, Habets F., 2009. Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *Journal of Hydrology* 368, 1-4
- Habets F., Boone A., Champeaux J. L. , Etchevers P., Franchis Teguy L., Leblois E., Ledoux E., Le Moigne P., Martin E., Morel S., Noilhan J., Quintaná-Seguí P., Rousset-Regimbeau F., Viennot P., 2008. The SAFRAN-ISBA- MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research* 113 : D06113
- IPCC, 2000. Special Report on Emissions Scenarios, Summary for policy makers (eds Nakićenović, N. & Swart, R.), Genève, Suisse, pp 20
- IPCC, 2013. Summary for Policymakers: Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, NY, EU.
- IPCC, s.d. – a. History [En ligne] <http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml> (Page consultée le 14/05/2014)
- IPCC, s.d. – b. What is a GCM? [En ligne] <http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html> (Page consultée le 30/04/2014)
- IPCC, s.d. – c. Criteria for Selecting Climate Scenarios [En ligne] <http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html> (Page consultée le 30/04/2014).
- Klemes V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31:1, 13–24
- Knutti R., Sedláček J., 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change* 3, 369–373.
- Kraaijenbrink P., 2013a. Advanced Delta Change method: Extension of an application to CMIP5 GCMs, Mémoire de master, Royal Netherlands Meteorological Institute (Pays-Bas)
- Kraaijenbrink P., 2013b. KNMI Advanced Delta Change methode Application Manual, Royal Netherlands Meteorological Institute (Pays-Bas)
- Krause P., Bäse F., Bende-Michl U., Fink M., Flügel W., Pfenning B., 2006. Multiscale investigations in a mesoscale catchment – hydrological modelling in the Gera catchment. *Advances in Geosciences* 9, 53–61
- McDonald R., Green P., Balk D., Fekete B., Revenga C., Todd M., Montgomery M., 2011. Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* vol. 108 (15), 6312–6317
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 27 (3), 282–290
- Oudin L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290–306,

- Paquet E., 2004. Évolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nival à différentes altitudes. *La Houille Blanche* n° 8, 75–82
- Perrin C., Michel C., Andréassian V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. **279** : 275–289
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92-107
- Quintana-Seguí P., Ribes A., Martin E., Habets F., Boé J., 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *Journal of Hydrology* 383, 111–124
- R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Taylor, K., Stouffer R., Meehl G., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498
- Thiéry D., 2003. Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. *Rapport BRGM n° RP 52832*.
- Valéry, A., 2010. Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.
- Van Pelt, S., J. Beersma, T. Buishand, 2012. Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 4517-4530
- Vidal J.P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyroux J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627-1644
- WRCP, s.d.. CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – Overview [En ligne]. <<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>> (Page consultée le 29/04/2014).