



HAL
open science

Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Mosel, Sarre and Ill)

Guillaume Thirel, Kai Gerlinger, Charles Perrin, Gilles Drogue, Benjamin Renard, Jean-Pierre Wagner

► **To cite this version:**

Guillaume Thirel, Kai Gerlinger, Charles Perrin, Gilles Drogue, Benjamin Renard, et al.. Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Mosel, Sarre and Ill). *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2019, 105 (5-6), pp.140-149. 10.1051/lhb/2019039 . hal-02546370

HAL Id: hal-02546370

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02546370>

Submitted on 5 Jul 2021

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

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

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill) ?

Guillaume Thirel^{1,*}, Kai Gerlinger², Charles Perrin¹, Gilles Drogue³, Benjamin Renard⁴ et Jean-Pierre Wagner⁵

¹ Irstea, UR HYCAR, Antony, France

² HYDRON, Karlsruhe, Allemagne

³ Centre de Recherche en Géographie (LOTERR), Université de Lorraine, Metz, France

⁴ Irstea, UR RiverLY, Lyon, France

⁵ DREAL Grand-Est, Metz, France

Reçu le 17 mai 2018 / Accepté le 13 décembre 2018

Résumé – Le projet MOSARH21 a réalisé une évaluation des effets du changement climatique anthropique sur les débits des affluents français du Rhin grâce à des projections climatiques récentes (expérience CMIP5). La démarche s'appuie sur deux modèles hydrologiques, GRSD et LARSIM, utilisés conjointement avec un ensemble de projections climatiques désagrégées. Les effets sont quantifiés à l'aide de divers indicateurs relatifs aux régimes des cours d'eau, aux crues et aux étiages. Les projections hydrologiques indiquent que les débits moyens interannuels seraient en légère augmentation, celle-ci pouvant même devenir importante pour le scénario radiatif RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste en termes de réchauffement climatique). L'aléa de crue devrait s'intensifier dans un futur proche (2021–2050). En revanche, dans un futur lointain (2071–2100), l'évolution des indicateurs de crue est incertaine, les projections hydrologiques étant divergentes. Les débits d'étiages diminueraient dans un futur proche. Leur évolution pour la fin du siècle est plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible selon le scénario choisi. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus dans le cadre d'études d'impact antérieures réalisées dans la partie française du bassin du Rhin. Compte tenu des différences méthodologiques et des résultats obtenus, on peut conclure que la base de connaissances actualisée produite dans le cadre du projet MOSARH21 valide les tendances des études précédentes.

Mots clés : ressources en eau / crues / étiages / changement climatique / Rhin

Abstract – **Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Mosel, Sarre and Ill).** The MOSARH21 project evaluated the future impacts of climate change on streamflows from the French tributaries of the River Rhine based on recent climate projections (CMIP5 experiment). The adopted methodology relies on two hydrological models (GRSD and LARSIM), used jointly with an ensemble of climate projections disaggregated at the local scale. The impacts were quantified with several indicators describing rivers regimes, floods and low flows. The evolutions of mean interannual streamflow indicate a slight increase, which could even become important for the radiative scenario RCP 8.5 (the most pessimistic one in terms of climate warming). Flood could intensify in the near future (2021–2050). In the far future (2071–2100), the evolution of floods indicators is more uncertain, as the hydrological projections diverge. Low flows could be decreasing in the near future. Their evolution in the far future is more uncertain, going from drastic decrease to sensible rise depending on the chosen scenario. The results were compared to those from previous impact studies performed on the basin. Given the methodological differences and the obtained results, we can conclude that the MOSARH21 project is consistent with the conclusions of the previous studies.

Keywords: water resources / floods / low flows / climate change / River Rhine

*Correspondance : guillaume.thirel@irstea.fr

1 Introduction

La France coopère étroitement avec les pays riverains des bassins du Rhin et de la Moselle depuis plus de 50 ans au sein des commissions fluviales internationales pour la protection du Rhin (CIPR¹) et de la Moselle (CIPMS²). Initialement focalisée sur la lutte contre la pollution, cette coopération institutionnelle et scientifique s'est élargie dans le courant des années 1980 à la thématique des inondations, puis au début des années 2010 aux questions du changement climatique et des étiages, qui ne connaissent pas les limites administratives des États. Cette coopération se concrétise notamment sous la forme de plans internationaux de gestion pour l'amélioration de la qualité des eaux et des milieux aquatiques ainsi que pour la réduction des risques d'inondation dans le cadre de la mise en œuvre des directives européennes 2000/60/CE et 2007/60/CE³.

La réalité des changements climatiques anthropiques ne fait plus aucun doute aujourd'hui et ils risquent de modifier l'intensité et la fréquence des événements hydrologiques extrêmes (IPCC, 2013). Il devient alors nécessaire pour les gestionnaires d'anticiper le devenir de ces événements. À cet effet, la directive 2007/60/CE demande aux États membres de l'Union européenne de prendre en compte l'incidence probable des changements climatiques sur la survenance des inondations afin d'examiner :

- si de nouveaux territoires peuvent être exposés à des risques d'inondation importants ;
- la durabilité des actions planifiées pour réduire les dommages potentiels aux personnes et aux biens.

Le projet MOSARH21 (pour MOselle-SARre-RHIn, «Évolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)») (Thirel *et al.*, 2018), a eu pour objet la mise à jour de notre connaissance des débits futurs sur les affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill et cours d'eau vosgiens) en utilisant des projections climatiques récentes. Ce projet s'inscrit dans la lignée des projets menés régionalement, comme Garonne 2050 sur le bassin de la Garonne (Lhuissier *et al.*, 2016), Climaware sur le bassin de la Seine (Dorchies *et al.*, 2016), R²D² sur le bassin de la Durance (Sauquet *et al.*, 2016) ou bien nationalement, comme au Maroc (Sinan et Belhouji, 2016) ou en France avec Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013). Ces projets, tout comme MOSARH21, associent le plus souvent chercheurs et gestionnaires (DREAL et agences de l'eau).

Les affluents français du Rhin ont fait l'objet de plusieurs études ces dernières années, centrées sur ou incluant ces bassins versants, notamment les projets Rheinblick 2050 (Görge *et al.*, 2010), VULNAR (Thierion *et al.*, 2012),

Explore 2070 (Chauveau *et al.*, 2013) et FLOW MS (CIPMS, 2013). Si ces études ont permis d'établir des diagnostics détaillés sur le territoire visé, les données et méthodes utilisées ont largement varié entre ces différentes études, conduisant à des conclusions parfois différentes. Parmi les éléments qui diffèrent figurent les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, le choix et le nombre de modèles climatiques globaux (MCG) utilisés, les méthodes de descente d'échelle mises en œuvre, les modèles hydrologiques appliqués et enfin les périodes de référence et futures utilisées pour calculer divers indicateurs d'évolution des variables hydrologiques.

L'objectif principal de la présente étude a été de produire des projections hydrologiques actualisées grâce aux dernières projections climatiques disponibles et d'homogénéiser les méthodes de certains travaux antérieurs. De manière plus détaillée, nous avons utilisé deux des modèles hydrologiques (GRSD et LARSIM) utilisés respectivement lors de deux projets récents incluant la zone d'étude, Explore 2070 et FLOW MS. Nous avons forcé ces modèles avec les données de ces deux projets, qui correspondent au 4^e rapport du GIEC (expérience CMIP3), mais aussi avec des données qui correspondent au 5^e rapport du GIEC (expérience CMIP5). Ainsi, grâce à des méthodes communes, nous avons pu confronter de manière robuste les nouvelles projections hydrologiques à celles obtenues précédemment, en minimisant les différences méthodologiques.

Nous détaillons dans la suite les données utilisées, la démarche de modélisation employée, les résultats obtenus en nous attachant sur ceux produits grâce aux données de l'expérience CMIP5, ainsi que les fiches synthétiques mises à disposition des gestionnaires.

2 Matériel et méthodes

2.1 La zone d'étude

La modélisation hydrologique a été mise en œuvre sur un total de 70 stations hydrométriques (Fig. 1). Cette délimitation hydrographique englobe les principaux affluents du Rhin s'écoulant en France, à savoir la Moselle, la Sarre, ainsi que les affluents vosgiens rive gauche du Rhin. Nous n'incluons pas dans notre zone d'étude le cours principal du Rhin, dont les affluents en Allemagne et en Suisse demandent un traitement spécifique sortant du cadre de MOSARH21. Le choix de ces stations a été effectué pour satisfaire un ou plusieurs critères parmi les suivants :

- stations utilisées pour Explore 2070 ou FLOW MS ;
- présence d'enjeux liés aux crues (Directive inondation) ou aux étiages ;
- données de débits disponibles sur une période suffisamment longue et représentant l'écoulement naturel.

À quelques exceptions près, nous disposons d'une trentaine d'années de débits observés sur ces stations. Le climat de la zone d'étude est océanique dégradé, à influence continentale, et montagnard sur le massif des Vosges. Globalement, cette zone géographique est humide, en particulier dans les Vosges, et l'enneigement peut être important tout en ayant un rôle hydrologique très modéré à l'échelle d'intérêt. Les précipitations sont en moyenne de 930 mm/an et les températures de 9.5 °C.

¹ CIPR : Commission internationale pour la protection du Rhin, <https://www.iksr.org/fr/>.

² CIPMS : Commission internationale pour la protection de la Moselle et de la Sarre, <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/392/>.

³ http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_1_brahmer_low_flows_chr.pdf.

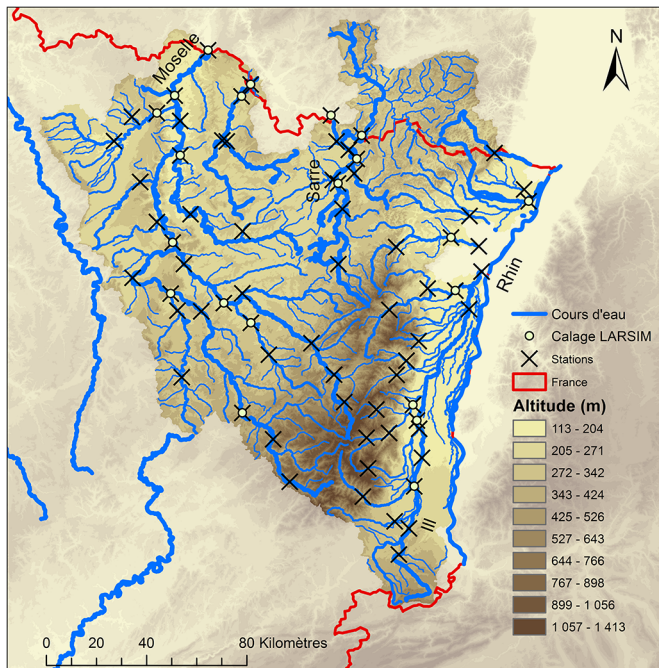


Fig. 1. Localisation des 70 stations hydrométriques et relief de la zone d'étude.

2.2 Les données d'entrée des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques ont été forcés par deux types de données climatiques : des données pseudo-observées et des données issues de projections. Il s'agit dans les deux cas de données journalières.

Les données pseudo-observées sont issues de la réanalyse Safran (Vidal *et al.*, 2010).

Plusieurs jeux de données de projections climatiques, provenant à la fois de l'exercice du Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3, 4^e rapport du GIEC) et du tout dernier exercice CMIP5 (5^e rapport du GIEC), ont été utilisés⁴. Nous n'avons produit dans ce projet aucune projection climatique. Pour des raisons de temps de calcul, le modèle LARSIM n'a pas été appliqué à tous les scénarios de l'exercice CMIP5 (Tab. 1). On notera que les résultats seront par la suite présentés de manière relative : on montrera l'évolution de certains indicateurs entre une période de référence unique (1971–2000) et une ou deux périodes futures, qui varient selon les projections. Pour les projections issues de CMIP5, on appellera « futur proche » la période 2021–2050 et « futur lointain » la période 2071–2100.

⁴ Le scénario radiatif CMIP3 A1B correspond à un scénario futur intermédiaire (ni optimiste en termes d'émissions de gaz à effet de serre, ni pessimiste). Les scénarios radiatifs CMIP5 RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 représentent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre croissants, le RCP 2.6 étant le plus optimiste et le RCP 8.5 le plus pessimiste. À l'heure actuelle, les émissions mesurées indiquent que l'on se situe proche de la trajectoire du scénario radiatif RCP 8.5.

2.3 Les modèles hydrologiques

2.3.1 GRSD

Le modèle GRSD appliqué au pas de temps journalier est la version spatialisée des modèles de simulation pluie-débit de la famille GR. Il s'agit d'un modèle conceptuel semi-distribué qui a été développé à partir des avancées de Lobligeois (2014) pour spatialiser les structures globales des modèles hydrologiques GR sur des sous-bassins versants, reliés par un modèle de propagation hydraulique simplifiée. Ce modèle est basé sur GR5J, développé par Le Moine (2008). Il inclut le modèle d'accumulation et de fonte de la neige CemaNeige (Valéry, 2010). Une analyse détaillée des performances et de la robustesse de GRSD sur les 70 stations du projet est donnée dans de Lavenne *et al.* (2016).

2.3.2 LARSIM

Le modèle de bilan hydrologique appliqué au pas de temps journalier LARSIM (Large Area Runoff SIMulation Model) (Ludwig et Bremicker, 2006) est un modèle conceptuel. Le modèle de bilan hydrologique LARSIM est appliqué avec un maillage régulier carré d'un kilomètre de côté pour la représentation du réseau hydrographique réel. Pour chaque maille, les sous-processus hydrologiques suivants sont décrits : interception, évapotranspiration, accumulation, compaction et fonte de la neige, renouvellement et stockage de l'eau du sol, transport latéral de l'eau et translation et rétention dans les canaux et les lacs.

2.3.3 Calage des modèles

Lors de la réalisation de projections hydrologiques, l'incertitude liée au calage des modèles hydrologiques peut ne pas être négligeable (Parajka *et al.*, 2016 ; Thirel *et al.*, 2015). Ainsi, nous avons mis en place un exercice de calage-contrôle des deux modèles hydrologiques. Cet exercice a consisté au calage et à l'évaluation croisés sur deux sous-périodes de 15 ans incluses dans la période de référence, 1971–2000. Si cela représente une procédure habituelle pour GRSD, ce n'est pas le cas pour LARSIM, qui est le plus souvent calé manuellement. Nous avons donc mis en place pour LARSIM un calage automatique inspiré à la fois de l'algorithme utilisé par GRSD et de la méthodologie itérative de LARSIM (ajustement des paramètres sur le bilan, puis les bas débits, puis les débits intermédiaires, puis les pics de crues). Les paramètres calés de GRSD comme de LARSIM le sont à l'échelle du sous-bassin versant et sont au nombre de six (GRSD) et sept (LARSIM). Les détails de cette méthodologie et les performances des modèles, très satisfaisantes, sont fournis dans l'Annexe B du rapport final de MOSARH21 (Thirel *et al.*, 2018). La réalisation des projections hydrologiques a été faite avec des modèles calés sur la période de référence complète. Les paramètres liés aux modules de neige ne sont pas calés mais fixés à des valeurs par défaut, l'accumulation et la fonte de la neige ne représentant pas des processus dominants sur la zone d'étude.

2.4 Indicateurs hydrologiques de crues et d'étiages

Afin de quantifier les évolutions des débits entre la période de référence et les périodes futures, des indicateurs hydro-

Tableau 1. Résumé des sources de données utilisées comme base de projections climatiques dans MOSARH21. RCP signifie « Representative Concentration Pathway » (trajectoire du forçage radiatif).

Nom des projections	SCRATCH08	ECHAM5-COSMO-CLM	CNRM2014 et IPSL2014	ADC
Référence	Boé <i>et al.</i> (2007)	Wagner <i>et al.</i> (2012)	Somot (2006) et Vautard <i>et al.</i> (2012)	Van Pelt <i>et al.</i> (2012)
Origine du jeu de données	Explore 2070	FLOW MS	Drias AR5 ^a	Advanced-Delta Change (ADC)
Scénarios radiatifs	CMIP3 A1B	CMIP3 A1B	CMIP5 RCP 2.6, 4.5 & 8.5	CMIP5 RCP 2.6, 4.5, 6.0 & 8.5
Nombre de MCG ^b	6	1	2	3 à 4 selon le RCP
Méthode de descente d'échelle	Approche statistique basée sur les types de temps	Modèle climatique régional	Modèles climatiques régionaux	Méthode statistique
Débiaisage	–	Linear scaling & quantile-quantile	« Distribution fitting »	–
Résolution spatiale	8 × 8 km	7 × 7 km	8 × 8 km	8 × 8 km
Période de référence dans MOSARH21	1971–2000	1971–2000	1971–2000	1971–2000
Période(s) future(s) dans MOSARH21	2046–2065	2021–2050	2021–2050 et 2071–2100	2021–2050 et 2071–2100
Modèles hydrologiques utilisés	GRSD et LARSIM	GRSD et LARSIM	GRSD pour tous les RCP, LARSIM pour RCP 8.5 uniquement	GRSD

^a Assessment Report 5.

^b Modèles climatiques globaux.

logiques ont été utilisés. Ceux-ci comprennent les débits moyens interannuels, le débit mensuel minimum quinquennal sec (QMNA5) et le débit journalier maximum de période de retour 10 ans (QJXA10). Par ailleurs, les fiches construites pour synthétiser les résultats comprennent aussi les débits mensuels moyens interannuels, des quantiles au non-dépassement de la courbe des débits journaliers classés (Q1 et Q5 pour les bas débits, Q50 pour la médiane, Q95 et Q99 pour les forts débits), les débits minimaux sur 3 et 7 jours consécutifs (VCN3 et VCN7) calculés sur des périodes de retour de 2, 10 et 20 ans, le QJXA2 et le QJXA100.

3 Résultats

3.1 Projections climatiques

Les projections climatiques issues d'Explore 2070 et FLOW MS étant détaillées respectivement dans Chauveau *et al.* (2013) et CIPMS (2013), nous ne les présentons pas ici. En ce qui concerne les projections issues de CMIP5, elles sont présentées dans la figure 2 pour les précipitations et dans la figure 3 pour les températures, en moyenne à l'échelle de la zone d'étude. Les évolutions sont calculées sur les simulations climatiques uniquement, entre période future et période de référence. Les précipitations montrent une stabilisation ou une légère augmentation des précipitations selon les scénarios et les modèles en futur proche. En revanche, le futur lointain semble bien plus incertain : en effet, les modèles CNRM2014 et IPSL2014 issus du portail Drias divergent largement, le modèle CNRM2014 présentant une évolution faible voire une diminution des précipitations, alors que le modèle IPSL2014 évolue vers une augmentation modérée à forte. L'évolution des

températures est assez homogène en futur proche. En revanche, le futur lointain montre bien l'impact du scénario (plus il est pessimiste, plus les températures augmentent). Par ailleurs, il est remarquable que les projections issues de l'ADC présentent une forte dispersion.

3.2 Projections hydrologiques

L'évolution des débits moyens interannuels est donnée dans la figure 4. Chaque boîte à moustaches représente la distribution des évolutions pour les 70 stations hydrométriques considérées (multiplié par le nombre de MCG pour l'ADC). À chaque fois, sont représentées les évolutions relatives pour la variable d'intérêt, c'est-à-dire la différence entre la variable simulée sur les périodes futures et la période de référence, rapportée à la variable simulée sur la période de référence, les simulations hydrologiques étant produites à partir des simulations climatiques sur les deux périodes. La simulation de l'effet du changement climatique sur l'hydrologie des cours d'eau considérés se fait donc en supposant l'erreur du modèle hydrologique constante. Nous voyons sur la figure 4 que les évolutions montrent une faible augmentation ou une stagnation des débits moyens interannuels dans le futur proche (variation allant généralement de 0 à +15 % en médiane), excepté pour CNRM2014 avec le RCP 2.6 qui présente une tendance médiane à la baisse de 5 %. Les projections IPSL conduisent à une augmentation plus importante que celles du CNRM2014 ou d'ADC.

En revanche, les évolutions sont beaucoup plus contrastées dans le futur lointain : les projections CNRM2014 montrent une diminution parfois forte des débits annuels, allant jusqu'à 25 % en médiane, celles d'IPSL2014, une augmentation très

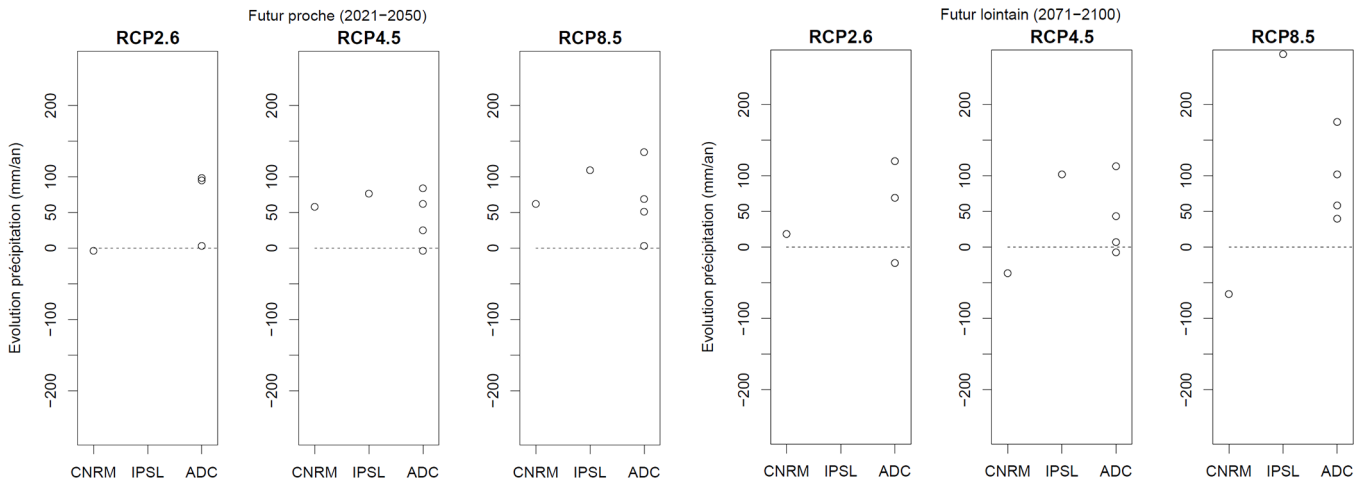


Fig. 2. Évolution des précipitations moyennes annuelles (en mm/an) pour le futur proche (gauche) et le futur lointain (droite) pour CNRM2014, IPSL2014 et ADC sous différents scénarios radiatifs RCP sur la zone d'étude de MOSARH21. Chaque cercle représente un modèle climatique. À noter que le scénario IPSL RCP 2.6 est absent.

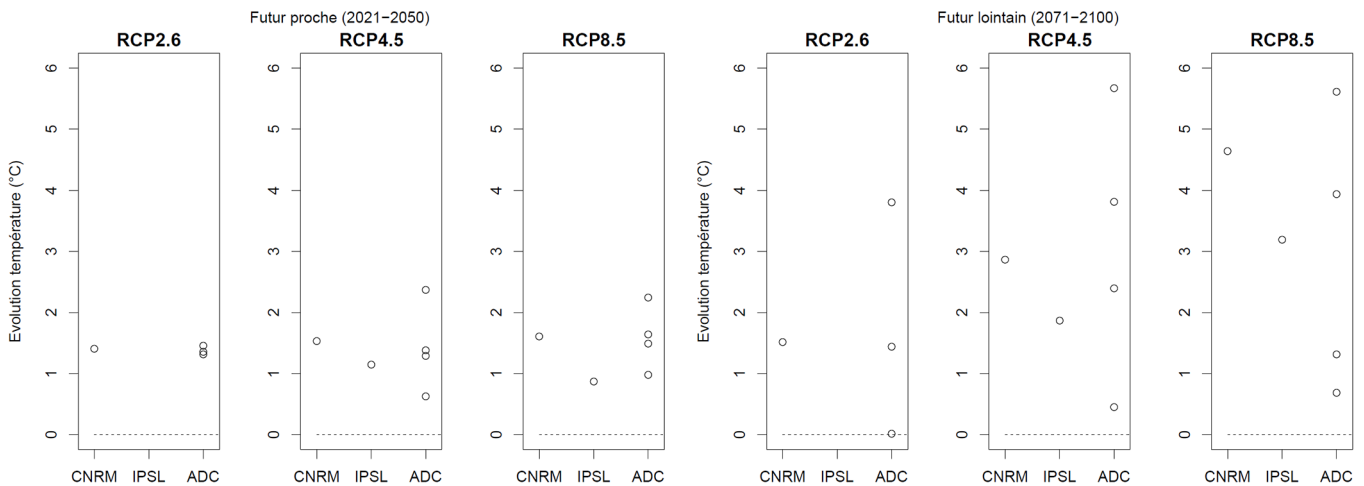


Fig. 3. Idem que la figure précédente pour la température moyenne annuelle.

forte, allant jusqu'à 40 % en médiane, notamment pour le RCP 8.5, alors que les projections ADC sont plus incertaines. Ces évolutions sont très liées aux évolutions de précipitations illustrées dans la [figure 2](#).

En ce qui concerne les débits journaliers les plus forts (le QJXA10), la tendance est à l'augmentation pour une majeure partie des scénarios climatiques ([Fig. 5](#)) dans le futur proche (de 0 à +20 % pour la plupart des scénarios). De rares scénarios donnent une tendance à la baisse, tandis que certains scénarios peuvent donner des augmentations de plus de 50 %.

Pour le futur lointain, on retrouve une forte différence entre CNRM2014 (peu d'évolution ou baisse) et IPSL2014 (forte augmentation). Les projections ADC donnent une augmentation mesurée ou bien une stagnation des forts débits journaliers. Le QJXA10 simulé par GRSD est similaire à celui de LARSIM pour la projection CNRM2014 pour le futur proche, et légèrement plus fort dans les autres cas.

En ce qui concerne les faibles débits ([Fig. 6](#)), les tendances montrent plutôt une baisse du QMNA5 (i.e. une intensification des étiages) dans le futur proche pour les scénarios RCP 2.6 et 4.5, alors que les évolutions sont faibles (CNRM2014 et ADC) ou positives (IPSL2014) pour le RCP 8.5. En revanche, de fortes diminutions sont simulées pour le futur lointain (−5 à −60 % pour la plupart des scénarios) par CNRM2014. Les valeurs de QMNA5 semblent plus fortes pour LARSIM avec la projection IPSL, et plus faibles pour la projection CNRM2014, par rapport à GRSD, avec le RCP 8.5.

L'analyse de ces projections hydrologiques montre une forte disparité, dont l'origine semble tenir en premier lieu aux MCG et en second lieu aux scénarios RCP. En revanche, quel que soit l'indicateur étudié, on observe que l'incertitude liée au modèle hydrologique semble faible : les deux modèles utilisés donnent des gammes d'évolution comparables. La forte disparité entre les projections CNRM2014 et IPSL2014

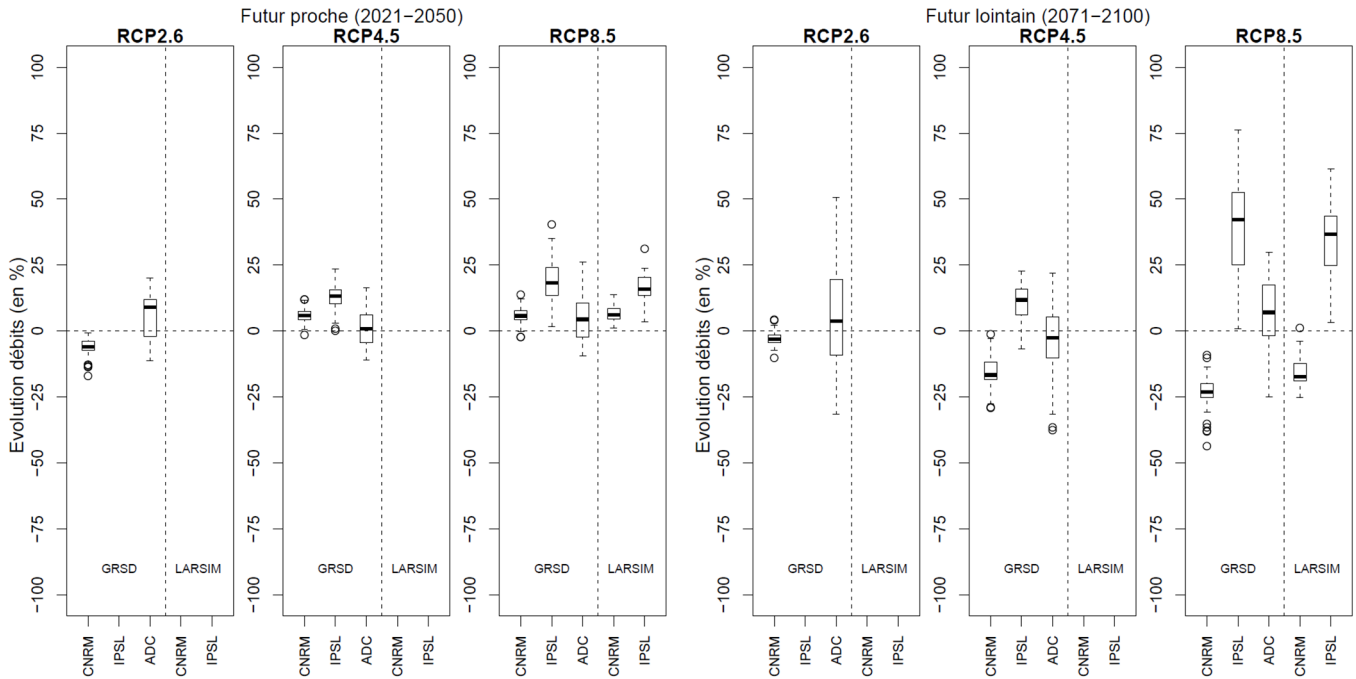


Fig. 4. Distributions des évolutions des débits moyens interannuels simulés par les modèles GRSD et LARSIM pour les deux périodes de projection (2021–2050 à gauche; 2071–2100 à droite) en utilisant trois projections climatiques (CNRM2014, IPSL2014 et ADC) forcées par trois scénarios radiatifs RCP (2.6, 4.5 et 8.5), sur l'ensemble des bassins de la zone d'étude. Les évolutions en pourcentage de l'ensemble des stations sont agrégées dans les boîtes à moustaches, qui indiquent la médiane (trait plein), les quartiles 25 et 75 (boîte) et les percentiles 5 et 95 (moustaches). À noter que les scénarios radiatifs RCP 2.6 et 4.5 pour LARSIM ainsi que IPSL2014 RCP 2.6 sont absents.

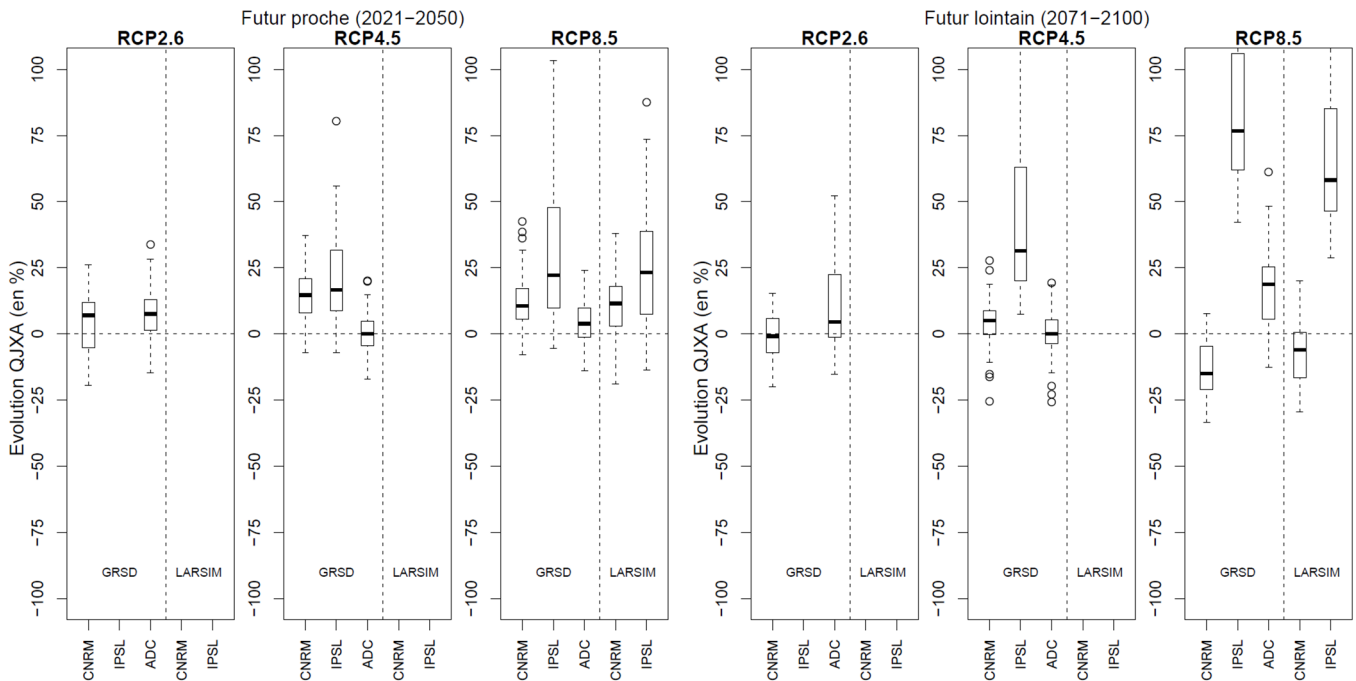


Fig. 5. Idem que la figure précédente pour le QJXA10.

complexifie l'analyse, mais donne tout de même aux gestionnaires un ordre de grandeur des « scénarios extrêmes » envisageables pour les crues et les étiages, les deux projections étant représentatives de l'incertitude régnant sur les évolutions climatiques futures (Ouzeau *et al.*, 2014).

3.3 Mise en perspective au regard des études antérieures

Un des enjeux du projet MOSARH21 était de fournir une base de connaissances actualisée par rapport à des études

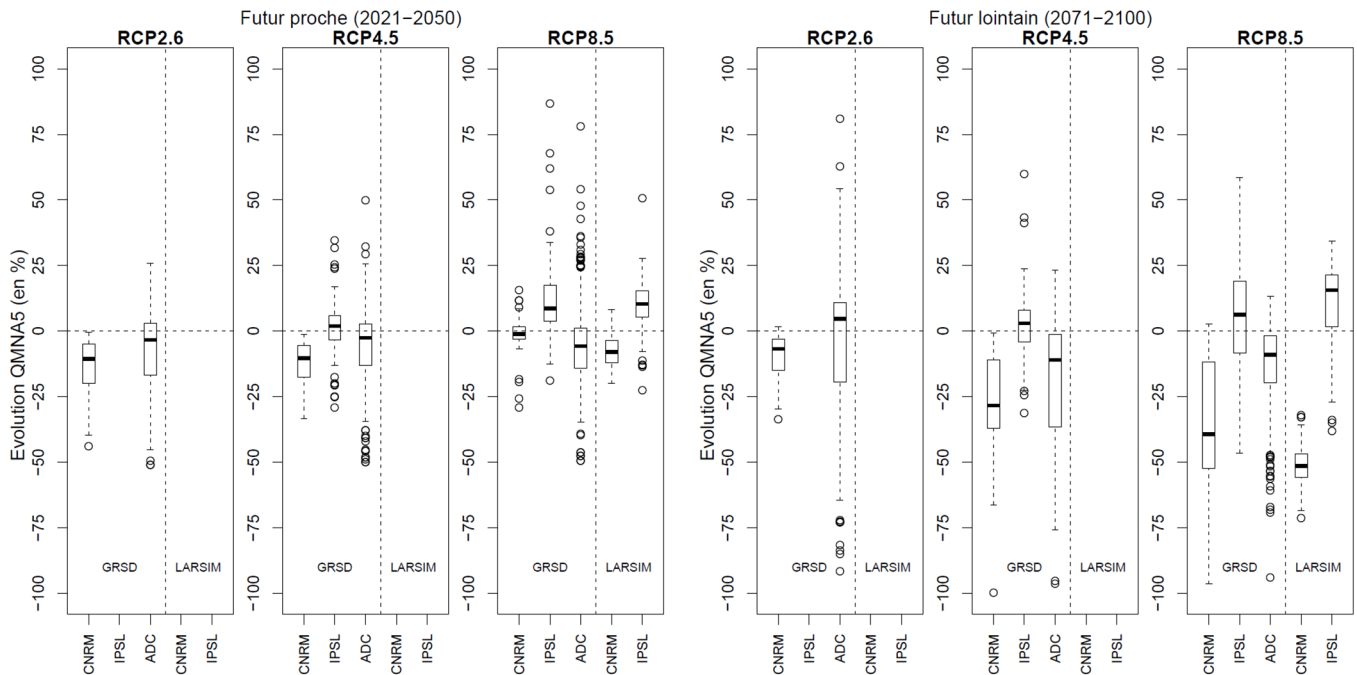


Fig. 6. Idem que la figure précédente pour le QMNA5.

antérieures menées sur le même sujet qui avaient utilisé les projections issues de CMIP3. En effet, une telle comparaison peut rarement être faite par les gestionnaires ou tout autre utilisateur, compte tenu de méthodologies différentes. Par exemple, les périodes d'études, les modèles ou scénarios climatiques, les modèles hydrologiques et leurs conditions de calage (période, fonction objectif, données observées utilisées) et parfois même les indicateurs peuvent différer d'un projet à l'autre. Pour pallier ces limitations, nous avons utilisé ici tout ou partie des projections climatiques des projets Explore 2070 et FLOWMS. Ainsi, nous pouvons comparer les résultats de MOSARH21 avec des projections issues d'Explore 2070 et FLOWMS avec les mêmes modèles hydrologiques et les mêmes indicateurs. Cependant, il faut noter qu'il n'a pas été possible de disposer de périodes d'étude strictement identiques dans nos comparaisons pour Explore 2070.

Les principales conclusions de cette mise en perspective (voir Thirel *et al.* (2018) pour les résultats complets) sont les suivantes. Les modèles GRSD et LARSIM donnent des projections équivalentes pour les scénarios AR4 (Assessment Report4) en ce qui concerne les débits moyens. Les projections issues de FLOWMS semblent se situer dans la même gamme de valeurs que les RCP4.5 et 8.5 de MOSARH21 (augmentation modérée). Cependant, les projections Explore 2070 indiquent une diminution des débits moyens interannuels (environ -10% en médiane). Il faut néanmoins noter que la période future d'Explore 2070 est plus lointaine que la période future proche des autres projections ; on est peut-être déjà dans une seconde phase de l'impact du changement climatique où le réchauffement impacte négativement les débits, comme cela est le cas pour la projection CNRM RCP4.5 et 8.5. Le projet Explore 2070 avait conclu à une grande incertitude sur le signe de l'évolution des crues alors que FLOWMS indiquait une augmentation notable des crues. Par rapport aux résultats de MOSARH21, nous voyons

qu'il existe une bonne correspondance entre les projets indiquant une évolution probablement positive des débits de crues. Cependant, une incertitude notable peut être présente sur certaines projections, que ce soit pour les projets antérieurs comme pour MOSARH21. Enfin, les projections utilisant les données d'Explore 2070 semblent encore une fois être à mi-chemin entre les résultats de MOSARH21 en futur proche et en futur lointain. Les scénarios des précédents projets s'accordaient sur une diminution des débits d'étiage, avec des intensités variables. Les projections issues de FLOWMS semblent bien correspondre aux projections CNRM et ADC. La projection IPSL, quant à elle, est très différente de toutes les autres projections. Enfin, la projection Explore 2070 semble plus proche des projections en futur lointain de MOSARH21, le phénomène d'étiage s'aggravant.

3.4 Les fiches synthétiques

Des fiches synthétiques (Fig. 7) ont été produites pour chaque station hydrométrique, à l'instar de ce qui a été fait lors du projet Explore 2070. Ces fiches ne comportent que les projections (climatiques et hydrologiques) produites grâce aux données CMIP5. Par ailleurs, il a été décidé pour chaque station de présenter les résultats sur des fiches différentes pour le climat, les crues et les étiages. Cette décision se justifie par le fait que des personnes différentes sont en charge des crues et des étiages. Par ailleurs, le format des fiches est plus long que pour Explore 2070, du fait des multiples horizons et RCP considérés, qui sont présentés de manière séparée.

4 Conclusions

Le projet MOSARH21 a permis de mettre à jour les projections hydrologiques sur les affluents français du Rhin

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

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

Fiche crues - Moselle à Perl (DE)

Station	Perl (DE)
Rivière	Moselle
Code HYDRO	PERL
Surface (km ²)	11556.0
Coordonnées Lamb. II (m)	852426, 2504755
Modèles hydrologiques	GRSD, LARSIM
Calage GRSD	Oui
Calage LARSIM	Oui
Période de calage	1971-2000
Période de référence	1971-2000
Période futur proche	2021-2050
Période futur lointain	2071-2100

Les évolutions hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1971-2000) et des simulations en climat futur proche (2021-2050) et futur lointain (2071-2100). Différents modèles climatiques désagrégés sont utilisés en forçage des modèles hydrologiques : les modèles du CNRM et de l'IPSL avec désagrégation dynamique, ainsi que de trois à quatre modèles (parmi CNRM-CM5, MRI-CGCM3, GFDL-CM3, IPSL-CM5 et GISS-E2) avec désagrégation statistique grâce à la méthode de l'Advanced Delta Change (ADC). Les résultats futurs sont présentés sous forme de deltas entre présent et futur, (FUT-PST)/PST. Les valeurs minimales, médianes et maximales sont calculées pour les scénarios ADC. Selon les stations, les scénarios et les périodes, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.



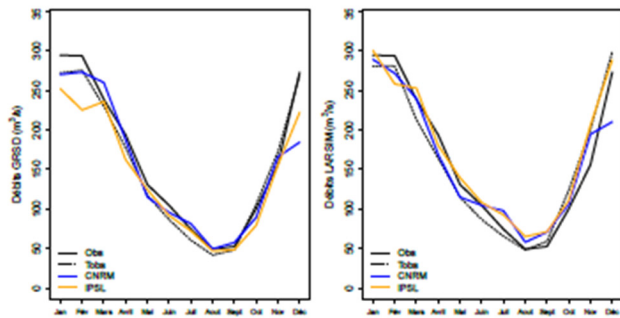
Cette fiche fournit des régimes et des indicateurs hydrologiques liés aux crues. Pour les étiages et le climat, des fiches étiages et climat additionnelles sont disponibles. Le rapport final du projet MOSARH21 donne de plus amples détails sur la méthodologie et la configuration des modèles climatiques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

Situation de référence (1971-2000)

Régimes et indicateurs des débits observés et simulés sur la période de référence.

Tobs indique que les modèles ont été forcés par les observations SAFRAN. Tpst indique que les modèles ont été forcés par les sorties des modèles climatiques. Les débits et indicateurs obtenus avec les scénarios ADC, par construction, sont identiques à Qsim Tobs.

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Annual													
Qobs (m ³ /s)	294.1	293.8	238.3	193.6	130.9	104.8	74.4	49.2	82.7	100.1	156.0	272.6	163.1													
Qsim Tobs (m ³ /s)	271.9	280.4	275.1	280.7	229.6	212.7	177.6	164.1	117.5	114.7	86.5	86.7	80.5	85.5	41.8	48.5	48.3	59.0	105.7	123.6	171.9	200.3	268.4	298.5	154.0	160.7
Qsim Tpst CNRM (m ³ /s)	269.8	288.8	272.8	271.5	259.7	239.2	187.2	168.8	115.1	114.9	95.5	104.6	81.3	97.8	49.5	58.0	57.6	70.7	89.3	106.1	165.8	194.4	184.2	210.0	151.7	159.8
Qsim Tpst IPSL (m ³ /s)	251.9	300.2	224.9	257.9	235.6	252.5	162.4	180.2	124.6	139.5	91.7	108.1	72.2	92.6	46.9	65.0	48.6	71.2	79.3	110.3	155.4	206.2	222.0	288.2	142.7	172.4



	QJXA2	QJXA10	QJXA100
Qobs (m ³ /s)	1066.8	1651.4	2380.6
Qsim Tobs (m ³ /s)	1002.4	930.6	1603.9
Qsim Tpst CNRM (m ³ /s)	931.8	869.3	1442.1
Qsim Tpst IPSL (m ³ /s)	754.1	746.4	1131.0

	Q95	Q99
Qobs (m ³ /s)	819.0	938.0
Qsim Tobs (m ³ /s)	494.0	515.6
Qsim Tpst CNRM (m ³ /s)	476.3	483.9
Qsim Tpst IPSL (m ³ /s)	401.3	460.5

Définition des indicateurs :

Jan - Déc : Débit moyen mensuel pour les mois de janvier à décembre.

Annual : Débit moyen annuel.

QJXA2 : Débit journalier maximal annuel avec une période de retour de 2 ans (biennal).

QJXA10 : Débit journalier maximal annuel avec une période de retour de 10 ans (décennal).

QJXA100 : Débit journalier maximal annuel avec une période de retour de 100 ans (centennal).

Q95 : Quantile 0.95 au non-dépassement de la courbe des débits journaliers classés.

Q99 : Quantile 0.99 au non-dépassement de la courbe des débits journaliers classés.

Fig. 7. Exemple de fiche crues pour la Moselle à Perl (partie supérieure, situation de référence). L'ensemble des fiches est disponible sur la page suivante : <https://webgr.irstea.fr/mosarh21/>.

(Moselle, Sarre, Ill et affluents vosgiens) en utilisant les projections climatiques issues de CMIP5. Pour cela, un cadre de modélisation permettant de quantifier les différentes sources d'incertitudes a été défini. Les résultats indiquent une légère

augmentation des débits moyens interannuels, qui pourrait même devenir importante pour l'une des projections dans une hypothèse d'augmentation forte des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). En ce qui concerne l'aléa de crue, il pourrait

être accru dans un futur proche (2021–2050). En revanche, dans un futur plus lointain, l'évolution des crues est très incertaine, les projections divergeant fortement. Les débits d'étiages seraient à la baisse dans le futur proche (sauf pour l'IPSL2014). Leur évolution dans le futur lointain (2071–2100) serait également plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible selon la projection climatique utilisée.

Par ailleurs, nous avons pu donner des éléments de réponse pour resituer cette nouvelle étude par rapport aux précédentes, qui utilisaient des projections climatiques plus anciennes (CMIP3). Si ces résultats plus anciens ne sont pas remis en cause, nous avons pu montrer que le choix du scénario envisagé (par exemple un scénario optimiste, RCP 2.6, ou pessimiste, RCP 8.5) conditionne grandement la réponse hydrologique, en particulier dans un futur lointain. Cette étude fournit des éléments concrets aux gestionnaires à des fins d'adaptation et de modification éventuelle de la gestion de certains évènements et de faciliter la coopération internationale sur les bassins du Rhin et de la Moselle en utilisant les modèles hydrologiques de référence de part et d'autre de la frontière franco-allemande.

Remerciements. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet MOSARH21 (projet #15C92002) cofinancé par l'agence de l'Eau Rhin-Meuse. Ces travaux ont bénéficié des données de débits issues de la banque HYDRO gérée par le SCHAPI (www.hydro.eaufrance.fr), ainsi que des observations et simulations climatiques produites par Météo-France et l'IPSL. Merci enfin à Didier François (Université de Lorraine) pour son aide avec les données SIG.

Références

- Boé J, Terray L, Habets F, Martin E. 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int J Clim* 27(12): 1643–1655. DOI: [10.1002/joc.1602](https://doi.org/10.1002/joc.1602).
- Chauveau M, Chazot S, Perrin C, *et al.* 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? (What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070?). *La Houille Blanche* 4: 5–15. DOI: [10.1051/lhb/2013027](https://doi.org/10.1051/lhb/2013027).
- CIPMS. 2013. Identification des impacts possibles du changement climatique dans le bassin versant de la Moselle et de la Sarre, Commissions internationales pour la protection de la Moselle et de la Sarre, 13 pp.
- Dorchies D, Thirel G, Perrin C, *et al.* 2016. Climate change impacts on water resources and reservoir management in the Seine river basin (France). *La Houille Blanche* 5: 32–37. DOI: [10.1051/lhb/2016047](https://doi.org/10.1051/lhb/2016047).
- Görgen K, Beersma J, Brahmer G, *et al.* 2010. Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: results of the RheinBlick2050 Project, CHR report, I-23, 229 pp., Lelystad. ISBN 978-90-70980-35-1.
- de Lavenne A, Thirel G, Andréassian V, Perrin C, Ramos MH. 2016. Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. *Proc IAHS* 373: 87–94. DOI: [10.5194/piahs-373-87-2016](https://doi.org/10.5194/piahs-373-87-2016).
- IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [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 (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013, 1535 pp.
- Le Moine N. 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Thèse de Doctorat, Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris), Cemagref (Antony), 324 pp.
- Lhuissier L, Lamblin V, Sauquet E, Arama Y, Goulard F, Strosser P. 2016. Retour sur l'étude prospective Garonne 2050. *La Houille Blanche* 6: 30–35. DOI: [10.1051/lhb/2016057](https://doi.org/10.1051/lhb/2016057).
- Lobligeois F. 2014. Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 312 pp.
- Ludwig K, Bremicker M. 2006. The water balance model LARSIM – Design, content and applications, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., 130 pp. (version française sous : <http://larsim.info/fileadmin/files/Dokumentation/FSH-Bd22-Bremicker-Ludwig-francais.pdf>).
- Ouzeau G, Déqué M, Jouini M, Planton S, Vautard R. 2014. Le climat de la France au XXI^e siècle : volume 4, scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Direction générale de l'Énergie et du Climat, 64 p.
- Parajka J, Blaschke AP, Blöschl G, *et al.* 2016. Uncertainty contributions to low-flow projections in Austria. *Hydrol Earth Syst Sci* 20: 2085–2101. DOI: [10.5194/hess-20-2085-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-2085-2016).
- Sauquet E, Arama Y, Blanc-Coutagne E, *et al.* 2016. Le partage de la ressource en eau sur la Durance en 2050 : vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ? *La Houille Blanche* 5: 25–31. DOI: [10.1051/lhb/2016046](https://doi.org/10.1051/lhb/2016046).
- Sinan M, Belhouji A. 2016. Impact du changement climatique sur le climat et les ressources en eau du Maroc aux horizons 2020, 2050 et 2080 et mesures d'adaptation. *La Houille Blanche* 4: 32–39. DOI: [10.1051/lhb/2016037](https://doi.org/10.1051/lhb/2016037).
- Somot S. 2006. European Regional climate simulation performed with ALADIN-Climate work performed at Météo-France and collaborations. Workshop ALADIN, 2006, Sofia (Bulgaria).
- Thierion C, Longuevergne L, Habets F, *et al.* 2012. Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem. *J Hydrol* 424–425: 68–83. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.028).
- Thirel G, Andréassian V, Perrin C. 2015. On the need to test hydrological models under changing conditions. *Hydrol Sci J* 60: 7–8, 1165–1173, DOI: [10.1080/02626667.2015.1050027](https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1050027).
- Thirel G, Gerlinger K, Perrin C, Drogue G, Renard B, Wagner JP. 2018. Rapport final du projet MOSARH21. https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport_final_MOSARH21_v2_1.pdf, 95 pp.
- Valéry A. 2010. Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat. AgroParisTech (Paris): Cemagref (Antony), 405 pp.
- Van Pelt S, Beersma J, Buishand T. 2012. Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrol Earth Syst Sci* 16: 4517–4530. DOI: [10.5194/hess-16-4517-2012](https://doi.org/10.5194/hess-16-4517-2012).
- Vautard R, Noël T, Li L, *et al.* 2012. Climate variability and trends in downscaled high-resolution simulations and projections over Metropolitan France. *Climate Dynam.* DOI: [10.1007/s00382-012-1621-8](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1621-8).

Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyrou JM. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol* 30(11): 1627–1644. DOI: [10.1002/joc.2003](https://doi.org/10.1002/joc.2003).

Wagner S, Berg P, Schädler G, Kunstmann H. 2012. High resolution climate model simulations for Germany: part II – projected climate changes. *Clim Dynam* 40: 1–2, 415–427. DOI: [10.1007/s00382-012-1510-1](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1510-1).

Citation de l'article : Thirel G, Gerlinger K, Perrin C, Droque G, Renard B, Wagner J-P. 2019. Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill)? *La Houille Blanche* 5-6: 140–149.