



**HAL**  
open science

## **CHIMERE21 : Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21e siècle**

Guillaume Thirel, Lila Collet, Pierre Etchevers, D. Francois, Joël Gailhard, Charles Perrin, Mathieu Reverdy, Fabienne Rousset, Raphaëlle Samacoïts, Jean-Philippe Vidal, et al.

► **To cite this version:**

Guillaume Thirel, Lila Collet, Pierre Etchevers, D. Francois, Joël Gailhard, et al.. CHIMERE21 : Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21e siècle. UNESCO-SHF, Sécheresses, étiages et déficits en eau, Dec 2019, Paris, France. pp.16. hal-02609951

**HAL Id: hal-02609951**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02609951v1>**

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.

# CHIMERE21 : Evolution du régime hydrologique de la Meuse et de la Chiers au 21<sup>e</sup> siècle

**THIREL Guillaume<sup>1</sup>, COLLET Lila<sup>1</sup>, ETCHEVERS Pierre<sup>2</sup>, FRANÇOIS Didier<sup>3</sup>, GAILHARD Joël<sup>4</sup>, PERRIN Charles<sup>1</sup>, REVERDY Mathieu<sup>5</sup>, ROUSSET Fabienne<sup>2</sup>, SAMACOITS Raphaëlle<sup>2</sup>, VIDAL Jean-Philippe<sup>5</sup>, VINCENDON Béatrice<sup>2</sup>, & WAGNER Jean-Pierre<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Irstea, UR HYCAR, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, Antony, France, [guillaume.thirel@irstea.fr](mailto:guillaume.thirel@irstea.fr)

<sup>2</sup> Météo-France, DCSC/AVH, 42 avenue Gaspard Coriolis, Toulouse, France

<sup>3</sup> LOTERR, Université de Lorraine, Ile du Saulcy, Metz, France

<sup>4</sup> EDF/DTG, 21 avenue de l'Europe, Grenoble, France

<sup>5</sup> Irstea, UR RiverLy, 5 rue de la Doua, Villeurbanne, France

<sup>6</sup> DREAL Grand-Est, 2 rue Augustin Fresnel, Metz, France

*Cet article a pour objectif de présenter les objectifs du projet CHIMERE21 ainsi que les premiers travaux réalisés. CHIMERE21 est un projet financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse qui vise à mettre à jour les projections hydrologiques sur la partie française du bassin de la Meuse avec les dernières projections climatiques. Afin de prendre en compte de manière extensive les diverses sources d'incertitude d'une telle chaîne de modélisation, deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre, cinq couples de modèles climatiques globaux et régionaux, une ou deux méthodes de descente d'échelle ainsi que quatre modèles hydrologiques calés de six manières différentes ont été utilisés.*

*Nous présentons ici l'amélioration de la base de données hydroclimatiques observées de la Meuse (naturalisation des débits observés et amélioration des données climatiques sur les bassins versants transfrontaliers) ainsi que sur l'évaluation de la performance et de la transposabilité temporelle des modèles hydrologiques. L'analyse menée conclut à la très bonne performance générale des modèles hydrologiques sur le régime ainsi que sur les étiages, sur l'ensemble des 16 stations du bassin versant. Par ailleurs, il a été noté une très bonne transposabilité temporelle des modèles hydrologiques, leurs performances restant élevées sur des périodes indépendantes.*

*Mots-clefs : Meuse, multi-modèles hydrologiques, indicateurs, CMIP5, impact du changement climatique, analyse d'incertitude.*

## *CHIMERE21: Changes in the Meuse and the Chiers Rivers hydrological cycle in the 21<sup>st</sup> century*

*This paper presents the aims of the CHIMERE21 project and the first results of this work. CHIMERE21 is funded by the French Rhin-Meuse Water Agency (Agence de l'Eau Rhin Meuse) and aims to update hydrological projections across the French part of the Meuse River catchment based on the last up-to-date climatic projections. In order to extensively account for the diverse sources of uncertainty related to climate change impact modelling, two greenhouse gas emissions scenarios, five couples of global and regional climate models, one or two downscaling methods, and four hydrological models calibrated in six different ways were used in this project.*

*This paper focuses on the improvement of the observed hydro-climatic database in the Meuse River catchment (naturalisation of observed discharge and improvement of the climate data over transboundary catchments) and on the evaluation of performance and temporal replicability of the hydrological models. The analysis concluded on a very high model performance for the hydrological regime and the low-flow season, across the 16 gauging stations selected on this catchment. Moreover, models show a very good temporal replicability, with high model performances shown on independent periods.*

*Key words: Meuse River, hydrological multi-modelling, indicators, CMIP5, climate change impact, uncertainty analysis.*

## **I INTRODUCTION**

L'augmentation de la température de l'air et la modification des précipitations simulées par les projections climatiques vont impacter fortement le cycle hydrologique des cours d'eau français lors des prochaines décennies [Chauveau et al., 2013]. Par ailleurs, les pressions anthropiques sur la ressource en eau semblent s'accroître en France, notamment lors des périodes les plus sèches de l'année, résultant en de nombreuses

restrictions d'usages de l'eau chaque année. Si le Nord-Est de la France peut sembler relativement épargné par rapport à d'autres zones telles que le Sud-Ouest ou la région méditerranéenne, des épisodes comme 2003 ont pu montrer la nécessité de mieux caractériser le risque d'étiage afin de disposer de mesures de gestion plus adaptées. Dans le passé, le projet national Explore 2070 [Chauveau et al., 2013] a permis d'évaluer l'évolution des débits futurs de la Meuse française, en diagnostiquant une diminution de 15 à 20% d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle du débit moyen et une diminution des débits d'étiage de 20 à 60%. Le projet AMICE mené sur le bassin de la Meuse internationale a permis une estimation équivalente des débits futurs. Ces deux projets n'ont pas permis de conclure sur l'évolution des crues. Depuis ces projets, la disponibilité de nouveaux outils et jeux de données chez les climatologues et les hydrologues permet de mettre à jour et affiner ces projections hydrologiques.

Dans ce contexte, le projet CHIMERE21 a pour objectif de réaliser une évaluation des impacts futurs du changement climatique sur les débits de la partie française de la Meuse, en utilisant les dernières simulations climatiques disponibles produites dans le cadre de l'exercice de modélisation climatique CMIP5. Ce travail, réalisé en concertation avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, s'inscrit dans la nécessité de disposer de projections hydrologiques au niveau régional mises à jour dans la perspective de l'adaptation du bassin au changement climatique. Cet article a pour objectif de présenter les premières étapes de ce projet dont les conclusions devraient être diffusées début 2020. Nous décrirons le bassin versant d'étude, l'amélioration de la base de données météorologiques, la naturalisation des débits observés ainsi que les modèles hydrologiques utilisés. Une analyse de la performance et de la robustesse des modèles hydrologiques sera menée. Enfin, nous introduirons les prochaines étapes de travail.

## **II ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES**

### **II.1 Le bassin versant de la Meuse**

Le bassin de la Meuse française (10120 km<sup>2</sup>) s'étend du Bassigny (Haute-Marne) au sud, où la Meuse prend sa source, jusqu'à Givet au nord à la frontière belge, après un parcours d'environ 500 km (Figure 1). La Meuse reçoit les écoulements de plusieurs affluents, la Chiers et la Semoy, qui sont des rivières transfrontalières : la première prend sa source au Luxembourg, puis passe en Belgique avant de revenir en France et la seconde prend sa source en Belgique avant de revenir en France. Le climat du bassin versant de la Meuse est principalement océanique, avec des influences semi-continentales. Le régime hydrologique est pluvial, avec des hautes eaux en hiver (de décembre à mars), et des basses eaux en été (de juillet à septembre). Les précipitations neigeuses sont limitées, avec parfois des couverts neigeux temporaires sur les reliefs (Ardennes) n'ayant que des impacts rares sur les crues.

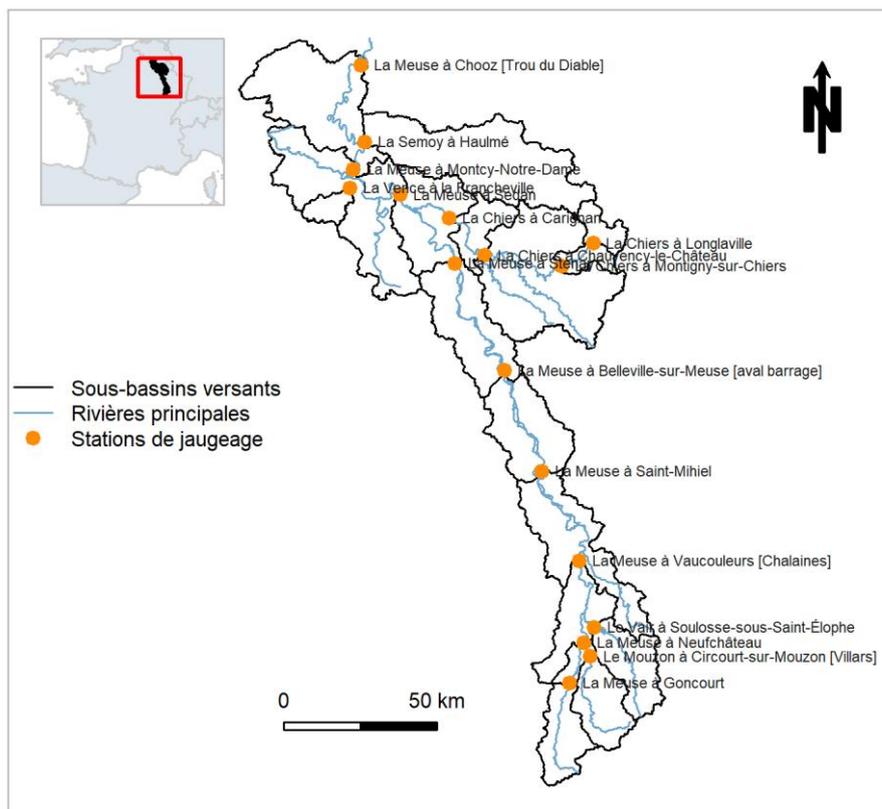


Figure 1 : Bassin versant de la partie française de la Meuse et stations de jaugeage utilisées pour le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques.

## II.2 Base de données d'observations

Un échantillon de seize stations de jaugeage, réparties sur le bassin versant, a été sélectionné pour réaliser les calages et les simulations des modèles hydrologiques. Cette sélection repose sur les enjeux hydrologiques de ces territoires en ce qui concerne les étiages, les crues (Territoires à Risques d'Inondations) mais aussi sur les longueurs et la qualité des historiques de débits observés disponibles. A l'exception de trois stations qui ne comprennent qu'une vingtaine d'années de débits observés journaliers, nous disposons d'au moins quarante ans de débits issus de la Banque HYDRO [Leleu et al., 2014] sur la période 1970-2016. Pour les données climatiques observées, la réanalyse atmosphérique SAFRAN [Vidal et al., 2010] disponible depuis 1958 a été exploitée. Elle fournit des variables à un pas de temps journalier selon une grille de 8 km sur la France métropolitaine et les zones de drainage des cours d'eau étrangers coulant vers la France (bassins transfrontaliers). Les données de précipitations et température sont utilisées pour forcer les modèles hydrologiques lors de leurs calages et simulations. L'évapotranspiration de référence (ETP) est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith [Allen et al., 1998]. La base de données d'Irstea qui croise ces différentes variables à l'échelle des bassins versants a été exploitée dans le cadre de ces travaux [Delaigue et al., 2018].

## II.3 Correction des pluies sur la partie belge du bassin

Une première analyse de la base de données des variables hydro-climatiques observées a été mise en place en amont du calage des modèles. Ce diagnostic sur les cumuls interannuels du débit, des précipitations et de l'ETP a permis d'évaluer si le bilan hydrologique a besoin d'être équilibré à l'échelle de chaque sous-bassin et de définir un coefficient correcteur pour l'une des variables analysées. En effet, une grande partie du sous-bassin de la Semoy et la partie amont de la Chiers se trouvent en Belgique. L'analyse SAFRAN utilise des données météorologiques (observations et ébauches modèle) uniquement sur la France métropolitaine. Afin de couvrir les zones frontalières nécessaires à l'hydrologie, les mailles SAFRAN localisées hors des frontières se voient attribuer la valeur de la maille métropolitaine frontalière la plus proche, selon un double critère de distance et d'altitude. Cette approche peut engendrer un biais non-négligeable dans les bassins transfrontaliers et dans le cas de la Meuse une sous-estimation des précipitations puisque les Ardennes belges

connaissent des précipitations plus intenses que les Ardennes françaises. De plus, le sous-bassin de la Vence comporte une zone karstique, dont la délimitation des zones d'infiltration est mal connue. Ces diagnostics ont ainsi permis d'établir une correction multiplicative des précipitations (de 1,15) des sous-bassins de la Semoy à Haulme et de la Chiers à Longlaville et à Montigny-sur-Chiers (cette dernière comprenant aussi des galeries minières drainant une zone extérieure au bassin versant topographique) et une correction multiplicative de la surface du sous-bassin de la Vence à Francheville (de 1,20).

### III NATURALISATION DES DEBITS

Les modèles hydrologiques sélectionnés pour le projet simulent des conditions naturelles d'écoulement et ne prennent pas en compte les transferts et les utilisations de l'eau liés aux activités humaines. Leurs simulations doivent donc être comparées à des observations de débit naturel, c'est-à-dire hors influence de type prélèvements, rejets ou ouvrages pouvant exister en amont de la station cible. Dès lors, il convient de mettre en place des stratégies pour estimer les débits naturels, sur la base des débits influencés observés et de la connaissance des influences. Les débits naturels estimés, autrement appelés débits naturalisés, serviront ensuite de référence pour la modélisation du cycle hydrologique naturel du bassin versant (voir par ex. Wen, 2009).

En l'absence de grands ouvrages de régulation, le bassin présente des influences modérées. L'analyse effectuée dans CHIMERE21 a porté sur les seize stations sélectionnées, sur une période de référence allant de 1970 à 2016. Plusieurs types d'influence ont été identifiés, parmi lesquels on trouve les prélèvements et rejets liés à l'eau potable et aux eaux usées, à l'industrie, aux canaux de navigation et aux sites miniers. Les prélèvements pour l'agriculture sont limités sur le bassin (communication personnelle, AERM, DREAL) et ont été négligés. Afin de juger du degré d'influence humaine sur les débits des seize stations, la stratégie suivante a été établie. La somme des influences répertoriées par bassin a été comparée à un seuil caractérisant les débits d'étiage (établi comme étant égal à 15% du VCN<sub>75</sub> - le débit minimal sur 7 jours consécutifs de période de retour 5 ans), ce qui a permis d'identifier huit stations comme potentiellement influencées en étiage par les activités humaines car les influences dépassent ce seuil.

Parmi les prélèvements industriels, le site de la centrale nucléaire de Chooz et la station d'épuration de Charleville-Mézières apparaissent comme les principaux points d'influence, mais à un niveau où la Meuse présente déjà des débits importants, avec donc un impact limité en étiage. Plus en amont sur le bassin, les industries, les prélèvements industriels ou les sorties de sites miniers sont apparus comme ayant un impact important sur des petits bassins amont (Meuse, Mouzon, Vair et Chiers). Sur le site de Chooz, EDF a recalculé une estimation des volumes journaliers consommés par évaporation et a pu produire une série de débit corrigée de cette influence. En dehors du site de Chooz, les données disponibles sur les influences restent très partielles, en termes de démarrage et d'évolution des influences, de profondeur des chroniques disponibles ou de pas de temps des séries. Sur cette base, il n'a pas été possible d'appliquer de manière fiable des procédures de naturalisation des débits sur les stations jugées influencées en étiage. Cependant, certaines périodes de données, jugées trop influencées pour les travaux de modélisation prévus, ont été placées en lacunes. De plus amples détails sont fournis par Terrier et al. [2018].

### IV MODELISATION HYDROLOGIQUE

L'incertitude relative à la modélisation hydrologique fait partie de la cascade des incertitudes à prendre en compte dans les études d'impact et ne peut pas être négligée lors de la réalisation de projections hydrologiques [Thirel et al., 2015]. Celle-ci est donc prise en compte dans CHIMERE21 via l'utilisation de quatre modèles hydrologiques de conceptualisation diverse et de différentes paramétrisations pour chacun des modèles.

#### IV.1 Modèles hydrologiques utilisés

Quatre modèles hydrologiques aux caractéristiques différentes à la fois au niveau de la discrétisation spatiale et de la représentation des processus, sont utilisés :

- GRSD [de Lavenne et al., 2019] : il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel distribué sur des sous-bassins versants. Ce modèle est composé de modèles GR5J globaux à réservoirs distribués à l'échelle des sous-bassins versants, dont les débits simulés sont ensuite routés, ainsi que d'un module d'accumulation et de fonte de la neige de type degré-jour. GRSD comporte six à huit paramètres à

caler par sous-bassin versant. Dans le cadre du présent projet, seuls 6 paramètres sont calés, le module de neige n'étant pas calé.

- MORDOR dans sa version spatialisée [Rouhier et al., 2017] : il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel étagé par bandes d'altitude. Comme pour GRSD, la version utilisée ici est également distribuée par sous-bassins versants. Lui aussi basé sur une conceptualisation par réservoirs [Garavaglia, 2017] il comporte un module d'accumulation et de fonte de la neige degré-jour. Selon son contexte d'application (hydrologie de plaine ou de montagne), 9 à 16 paramètres peuvent être activés. Dans le cadre du présent projet seuls 9 paramètres sont calés.
- PRESAGES [Lang et al., 2006] : il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel global basé sur le principe des réservoirs lui aussi. Ce modèle ne comprend pas de module d'accumulation et de fonte de la neige. Il comporte 6 paramètres à optimiser.
- SIM2 [Habets et al., 2008] : il s'agit d'une chaîne de modèles hydro-météorologiques, à base physique, distribuée sur des mailles de 8 km de côté pour la modélisation de flux de surface et sur des mailles pouvant aller jusqu'à 1 km de côté pour la modélisation des flux hydrologiques latéraux. SIM2 inclut un module d'accumulation et de fonte de la neige à bilan d'énergie. Les modèles composant la chaîne SIM2 n'ont pas subi de calage par bassin d'étude, toutefois une méthode de post-traitement des débits basée sur le principe du quantile-quantile a été mise en place pour débiaiser les sorties de débit sur le bassin de la Meuse au droit de six des seize stations d'étude.

## IV.2 Protocole de calage

Les modèles hydrologiques ont été calés sur la période d'août 1970 à juillet 2016 en se basant sur les débits journaliers observés naturalisés (voir section III) des 16 stations disponibles. Afin de quantifier l'incertitude liée à la paramétrisation des modèles, six calages ont été réalisés pour chaque modèle hydrologique, couplant trois périodes de calage et deux fonctions-objectif (i.e. critères d'optimisation).

Les trois périodes de calage correspondent à la période totale (1970-2016), la première moitié de la période (1970-1993) et la seconde moitié (1993-2016). Un test en calage-contrôle réalisé sur les deux sous-périodes indépendantes (Split Sample Test - SST), chacune servant alternativement pour le calage et le contrôle, permet d'évaluer la robustesse du modèle, c'est-à-dire sa transposabilité temporelle en contexte climatique non-stationnaire [Klemeš, 1986].

Tous les modèles sauf SIM2 ont été calés avec deux fonctions-objectif afin de contraindre (i) la dynamique du régime moyen journalier et (ii) la dynamique du débit en étiage, en utilisant une composée des critères de KGE [Kling et al., 2012] et NSE [Nash and Sutcliffe, 1970] sur le débit et ses transformées. On rappelle que ces critères sont optimaux pour une valeur égale à 1 et que des valeurs négatives indiquent de mauvaises performances. Les simulations sont considérées très satisfaisantes pour des valeurs supérieures à 0.80. Concernant SIM2, une méthode de type correction quantile-quantile a été appliquée aux débits simulés. Ce débiaisage a été calé et appliqué sur chacune des trois périodes à l'échelle journalière. Par conséquent, la méthode est théoriquement adaptée à la fois au régime moyen journalier et aux étiages, ce qui signifie que ces deux objectifs n'ont pas été pris en compte de manière différenciée pour SIM2.

## IV.3 Performance et robustesse des modèles hydrologiques

Les performances des modèles sont présentées dans cette section. Il convient de noter que les calages effectués pour contraindre la dynamique du régime sont évalués avec le critère de KGE sur le régime (Tableau 1 et Figure 2a) et que les calages effectués pour contraindre la dynamique des étiages sont évalués avec le critère de NSE sur le logarithme des débits (Tableau 2 et Figure 2b). Il ne s'agit donc pas directement des fonctions-objectif utilisées. Concernant SIM2, le même débiaisage a été évalué à la fois pour le régime et pour les étiages. Notez que les scores sont calculés pour les stations contenant moins de 10 % de lacunes de débit observé sur chaque période (par exemple sur la période 1970-2016, cela concerne 9 stations, voir Figure 2).

Les quatre modèles montrent une distribution des performances similaire sur l'ensemble des stations, à quelques exceptions près. En calage sur 1970-1993, le KGE sur le régime est supérieur à 0,82 et atteint 0,97 voire 0,99 pour tous les modèles. Ce score reste supérieur à 0,86 en période de contrôle (Tableau 1). En calage sur 1993-2016, les performances sont similaires avec des KGE sur le régime supérieurs à 0,82 pour tous les modèles. En période de contrôle, les performances se dégradent notamment en ce qui concerne les

valeurs minimales, mais les valeurs restent satisfaisantes à très satisfaisantes. Les modèles hydrologiques sont donc performants et robustes sur le régime.

En calage sur 1970-1993, le critère sur les étiages est supérieur à 0,86 pour tous les modèles et est stable voire s'améliore (pour PRESAGES et SIM2) en contrôle (Tableau 2). Le calage sur 1993-2016 montre des performances très satisfaisantes en calage et en contrôle (supérieures à 0,88 et 0,85 respectivement). Les modèles hydrologiques sont donc globalement très performants et robustes en étiage.

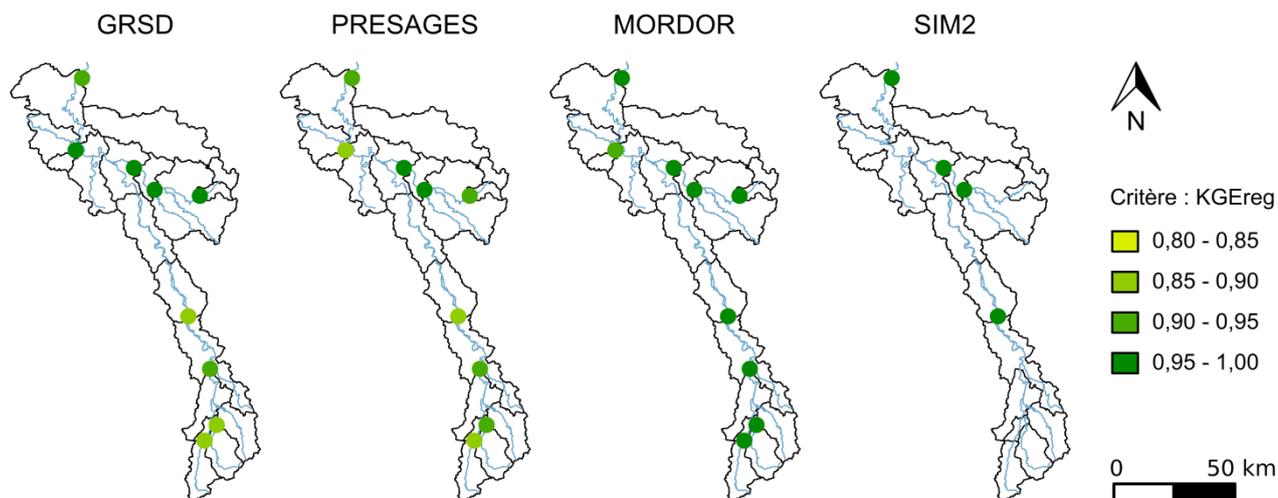
Tableau 1 : Performance des modèles hydrologiques GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 en Split Sample Test avec le critère de KGE sur le régime (valeurs minimales et maximales sur l'ensemble des stations). GRSD, PRESAGES et MORDOR sont calés sur le régime et SIM2 est débiaisé sur l'ensemble de la période de calage.

Modèle	Calage 1970-1993	Validation 1993-2016	Calage 1993-2016	Validation 1970-1993
GRSD	0,82 – 0,99	0,86 – 0,92	0,85 – 0,99	0,75 – 0,93
PRESAGES	0,83 – 0,99	0,86 – 0,96	0,82 – 0,99	0,81 – 0,95
MORDOR	0,95 – 0,99	0,88 – 0,98	0,94 – 0,99	0,86 – 0,97
SIM2	0,97 – 0,97	0,86 – 0,96	0,98 – 0,99	0,82 – 0,97

Tableau 2 : Performance des modèles hydrologiques GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 en Split Sample Test avec le critère de NSE sur le logarithme du régime (valeurs minimales et maximales sur l'ensemble des stations). GRSD, PRESAGES et MORDOR sont calés sur les étiages et SIM2 est débiaisé sur l'ensemble de la période de calage. Notez que SIM2 présente donc ici le même débiaisage que dans le Tableau 1.

Modèle	Calage 1970-1993	Validation 1993-2016	Calage 1993-2016	Validation 1970-1993
GRSD	0,86 – 0,99	0,86 – 0,97	0,88 – 0,99	0,85 – 0,98
PRESAGES	0,88 – 0,99	0,92 – 0,99	0,93 – 0,99	0,88 – 0,99
MORDOR	0,94 – 0,99	0,92 – 0,99	0,95 – 0,99	0,88 – 0,99
SIM2	0,89 – 0,98	0,97 – 0,99	0,98 – 0,99	0,85 – 0,97

## (a) Performance en calage sur le régime



## (b) Performance en calage sur l'étiage

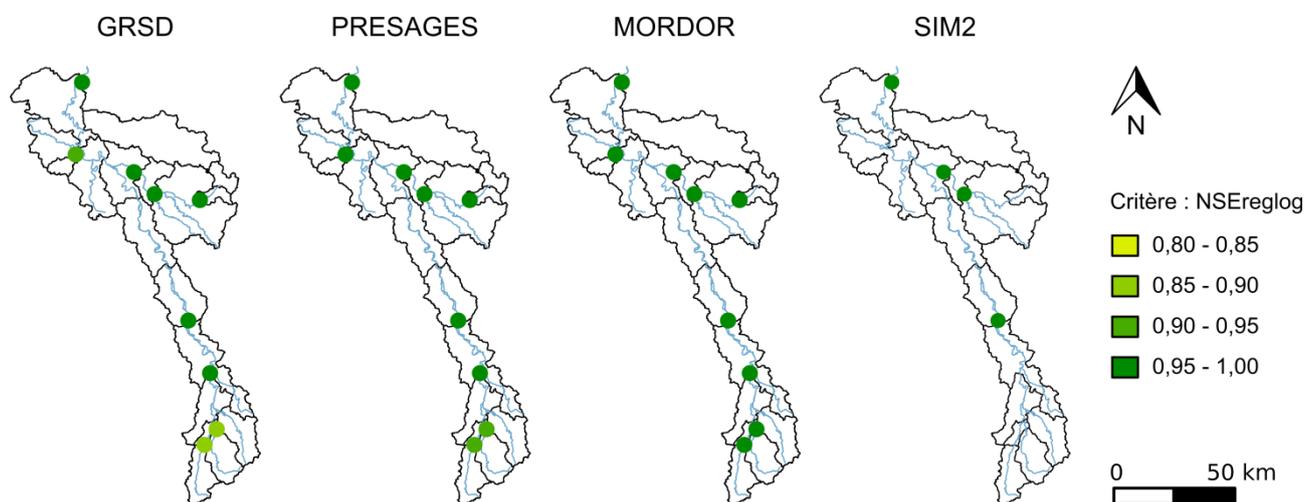


Figure 2 : Performance des modèles hydrologiques GRSD, PRESAGES, MORDOR et SIM2 sur la période 1970-2016 avec (a) le critère de KGE sur le régime (KGEreg), et (b) le critère de NSE sur le logarithme du régime (NSEreglog). Notez que SIM2 présente ici le même débiaisage pour les lignes (a) et (b) alors que les trois autres modèles sont calés pour le régime (a) et les étiages (b), respectivement.

La Figure 2 présente de manière spatialisée les résultats pour les quatre modèles hydrologiques sur la période totale (1970-2016) sur le régime (Figure 2a) et les étiages (Figure 2b). GRSD, PRESAGES et MORDOR ont été calés sur le régime (Figure 2a) et les étiages (Figure 2b) alors que SIM2 a subi le même débiaisage pour les deux figures. Afin de comparer les performances des modèles en régime, le critère KGE sur le régime est utilisé dans la Figure 2a. De même pour les étiages, le critère NSE sur le logarithme du régime est calculé dans la Figure 2b. Concernant le régime, tous les modèles montrent des performances très satisfaisantes (Figure 2a), avec des critères allant de 0,85 à 0,99 pour GRSD et PRESAGES, et de 0,94 à 0,99 pour MORDOR et SIM2. On peut noter que les sous-bassins amont montrent des performances légèrement moins bonnes que les sous-bassins aval pour GRSD et PRESAGES.

Concernant les étiages, les quatre modèles montrent aussi des performances très satisfaisantes en calage total (Figure 2b), avec des valeurs de NSE sur le logarithmique du régime allant de 0,90 à 0,99 pour GRSD, de 0,91 à 0,99 pour PRESAGES, et de 0,96 à 0,99 pour MORDOR et SIM2. Cette analyse permet de conclure sur la bonne performance des modèles hydrologiques sur l'ensemble du bassin versant de la Meuse.

La Figure 3 présente les courbes de régime mensuel et de débits classés à l'exutoire du bassin de la Meuse, obtenus avec les calages sur la période totale sur le régime (Figure 3a) et les étiages (Figure 3b). Le module et les indicateurs de crue (le débit journalier maximum annuel décennal -QJXA10) et d'étiage (le débit

mensuel minimum quinquennal sec, QMNA5, et le VCN7<sub>5</sub>) sont indiqués pour les observations et les différentes simulations (en m<sup>3</sup>/s). Cette figure montre que, pour les deux types de calage, le régime et la distribution statistique des débits sont bien représentés par les différents modèles, avec un module bien simulé par tous les modèles (biais inférieur à 1%), une sous-estimation légère des débits les plus forts, particulièrement pour GRSD et PRESAGES, et une reprise un peu précoce des débits après l'étiage, particulièrement pour GRSD. En calage sur le régime, MORDOR tend à sous-estimer les étiages, ce qui est corrigé avec le calage sur les étiages. Les débits extrêmes hauts (QJXA10) sont surestimés dans les deux cas par GRSD et MORDOR (de 8 et 3% respectivement), et sous-estimés par PRESAGES et SIM2 (de 9 et 2% respectivement), tandis que les bas débits (QMNA5 et VCN7<sub>5</sub>) sont sous-estimés par les quatre modèles, légèrement par GRSD, SIM2 et PRESAGES (moins de 10%), et surtout par MORDOR (de 24% et 22% respectivement). Le calage sur les étiages permet à MORDOR de corriger ce biais en se rapprochant des valeurs observées (sous-estimation de 17% pour le QMNA5 et 15% pour le VCN7<sub>5</sub>), limite la surestimation des débits extrêmes hauts par GRSD (de 5%) et en accentue la sous-estimation par PRESAGES (de 19%). Notez que les scores de SIM2 sont identiques car il n'y a qu'une seule adaptation quantile quantile pour SIM2.

(a) Calage sur le régime

(b) Calage sur l'étiage

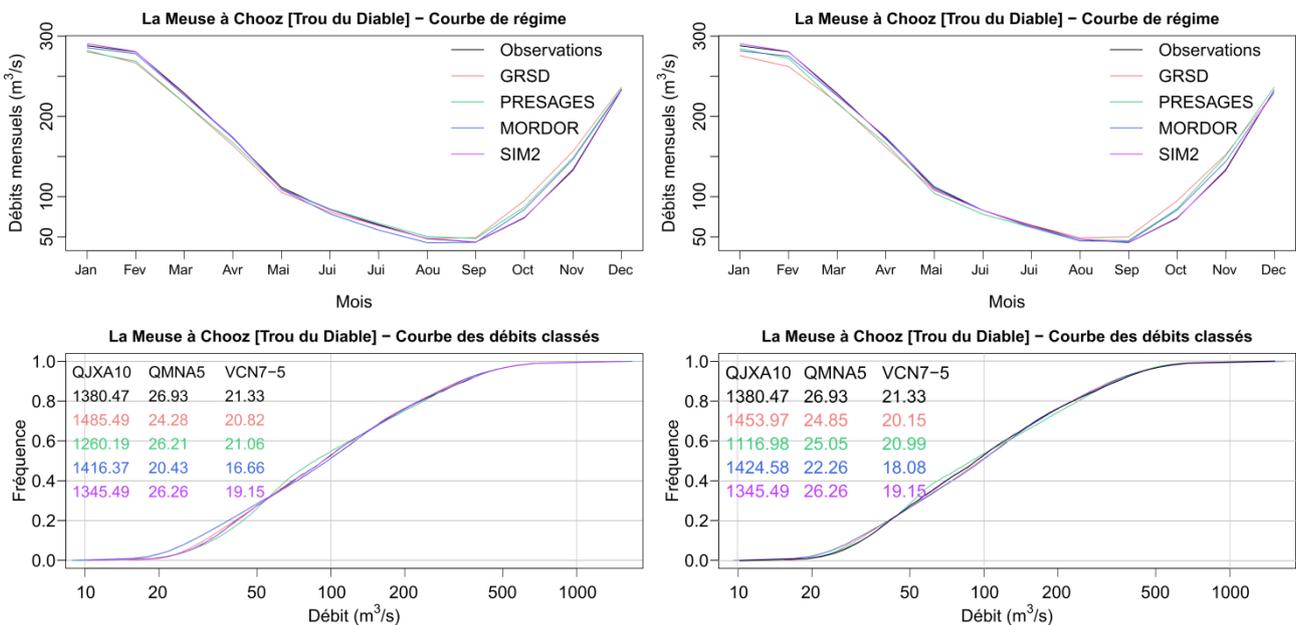


Figure 3 : Courbe de régime mensuel (en haut) et courbe des débits classés (en bas) de la Meuse à Chooz sur la période 1970-2016 pour les observations (en noir) et les simulations avec les modèles GRSD (en rouge), PRESAGES (en vert), MORDOR (en bleu) et SIM2 (violet) obtenues avec le calage sur le régime (en haut) et les étiages (en bas). Notez que concernant SIM2, le même débiaisage est présenté sur les deux lignes.

## V TRAVAIL FUTUR: PROJECTIONS HYDROCLIMATIQUES

Plusieurs étapes de travail seront menées ces prochains mois. Des projections climatiques issues du dernier exercice de modélisation climatique (CMIP5) seront utilisées. Il s'agit de cinq couples de modèles climatiques globaux (GCM) et de modèles climatiques régionaux (RCM) issus de la base de données Euro-Cordex [Jacob et al., 2014]. Ces couples GCM/RCM ont été forcés par deux scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) contrastés : le RCP 4.5, représentant un futur où les émissions de gaz à effet de serre se stabilisent d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle, et le RCP 8.5, correspondant au scénario présentant la plus forte augmentation d'émissions de gaz à effet de serre [van Vuuren et al., 2011]. Afin d'affiner la résolution spatiale pour qu'elle soit conforme aux besoins des modèles hydrologiques (ici des mailles de 8 km de côté), une méthode statistique de descente d'échelle a été utilisée. Cette méthode, appelée ADAMONT [Verfaillie et al., 2017], a été initialement développée sur les massifs montagneux et a été étendue à l'échelle de la France dans le cadre de CHIMERE21. Elle repose sur une combinaison d'approches par types de temps, de correction quantile-quantile et de méthode des analogues. Une seconde méthode basée sur les analogues et la méthode Scope-Climat [Caillouet et al., 2019] est prévue d'être utilisée afin de prendre en compte

l'incertitude relative à cette étape de la chaîne de modélisation. Ces projections seront analysées au regard de plusieurs indicateurs hydrologiques. Un travail de communication et d'appropriation des résultats par les acteurs sera mené en collaboration avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

## VI CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté le travail mis en œuvre afin de mettre à jour les projections hydroclimatiques sur le bassin de la Meuse. Dans ce travail, une attention particulière a été portée sur la prise en compte des incertitudes inhérentes aux différents maillons de la chaîne de modélisation. Les enjeux de l'adaptation à l'échelle des bassins justifient de disposer d'études régionales de ce type abordant les différents domaines d'incertitude.

## VII REMERCIEMENTS

Le projet CHIMERE21 bénéficie d'un financement de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse. Le SCHAPI est remercié pour la mise à disposition des débits observés de la Banque HYDRO.

## VIII REFERENCES

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration -- Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Graff, B., and Soubeyroux, J.-M. (2019). *SCOPE Climate: a 142-year daily high-resolution ensemble meteorological reconstruction dataset over France*, Earth Syst. Sci. Data, 11, 241-260, <https://doi.org/10.5194/essd-11-241-2019>.
- Chauveau, M., S. Chazot, C. Perrin, P.-Y. Bourgin, E. Sauquet, J.-P. Vidal, N. Rouchy, E. Martin, J. David, T. Norotte, P. Maugis et X. De Lacaze (2013). *Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?* (What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070?). La Houille Blanche (4): 5-15, doi: 10.1051/lhb/2013027.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.Y. (2018). *Base de données hydroclimatiques observées à l'échelle de la France*. IRSTEA, UR HYCAR, Équipe Hydrologie des bassins versants, Antony, URL: <https://webgr.irstea.fr/base-de-donnees>.
- De Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H. Perrin, C. (2019, in press). *A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model*, Water Resources Research, 55. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>.
- Droque, G., Fournier, M., Bauwens, A., Buiteveld, H., Commeaux, F., Degré, A., De Keizer, O., Detrembleur, S., Dewals, B., François, D., Guilmin, E., Hausmann, B., Hissel, F., Huber, N., Lebaut, S., Losson, B., Kufeld, M., Nacken, H., Piroton, M., Pontégni, D., Sohier, C., Vanneville, W. (2010). *AMICE report, Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin, WP1 report summary – Actions 1 & 3*.
- Garavaglia, F., Le Lay, M., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., Mathevet, T. (2017). *Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from a lumped to a semi-distributed approach*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 3937-3952, <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>.
- Habets, F., et al. (2008). *The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France*, J. Geophys. Res., 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.
- Jacob, D., et al. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), pp. 563-578
- Klemeš, V. (1986). *Operational testing of hydrological simulation models*, Hydrolog. Sci. J., 31, 13–24, doi:10.1080/02626668609491024.

- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. (2012). *Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios*. J. Hydrol. 424–425, 264–277.
- Lang, C., Gille, E., François, D., Auer, J.-C. (2006). *PRESAGES: A collection of tools for predicting low flows [Le dispositif PRESAGES: Un ensemble d'outils pour la prévision des étiages]*. IAHS-AISH Publication, (308), pp. 145-150.
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., et al. (2014). *La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques*. La Houille Blanche, (1), 25-32. URL: <http://hydro.eaufrance.fr/>.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models: Part 1 – A discussion of principles*. J. Hydrol. 10, 282–290.
- Rouhier, L., Le Lay, M., Garavaglia, F., Le Moine, N., Hendrickx, F., Monteil, C., Ribstein, P. (2017). *Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response*. Journal of Hydrology, 553: 13-25 (doi 10.1016/j.jhydrol.2017.07.037).
- Terrier, M., Perrin, C., Thirel, G. (2018). CHIMERE21. *Vers une estimation des débits naturels sur le bassin versant de la Meuse*. Rapport intermédiaire de projet. [https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2019/06/Rapport\\_Naturalisation\\_CHIMERE21\\_vfinale.pdf](https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2019/06/Rapport_Naturalisation_CHIMERE21_vfinale.pdf).
- Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C. (2015). *On the need to test hydrological models under changing conditions*. Hydrological Sciences Journal, 60:7-8, 1165-1173, DOI:10.1080/02626667.2015.1050027.
- vanVuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al (2011). *The representative concentration pathways: an overview*. Climatic Change, 109: 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. (2017). *The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models*, Geosci. Model Dev., 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M. (2010). *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*. International Journal of Climatology, 30 (11), pp. 1627-1644.
- Wen, L. (2009). *Reconstruction of natural flow in a regulated system, the Murrumbidgee River, Australia, using time series analysis*. Journal of Hydrology, 364(3-4), 216–226