

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'ADAPTATION AVEC DES OUTILS DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUES LIBRES

Guillaume THIREL¹, David DORCHIES², Olivier DELAIGUE¹, Laura NUNEZ TORRES¹, Diyae ELMALKI²

¹ Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR research unit, Hydrology Research Group, Antony, France

(guillaume.thirel@inrae.fr)

² G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

(david.dorchies@inrae.fr)

Résumé : L'impact du changement climatique (CC) sur l'hydrologie entraîne une aggravation des étiages qui exacerbe les tensions sur les usages de l'eau en France. Afin d'évaluer l'adéquation des stratégies d'adaptation, il est nécessaire de disposer d'outils permettant de les décliner au niveau local. Nous présentons les packages R airGR et airGRiwrn servant à la modélisation hydrologique et à la prise en compte des influences anthropiques. Ils permettent de modéliser les débits de manière distribuée et d'inclure les usages de l'eau, grâce à des données d'entrée limitées. Ces logiciels libres et simples d'usage peuvent être mis en œuvre par la recherche aussi bien qu'au niveau institutionnel. Via l'exemple de la Seine, nous montrons leur potentiel pour modéliser des débits influencés et l'impact du CC sur les débits naturels de cette zone anthropisée.

Mots-Clés : modélisation intégrée, logiciel libre, stratégie d'adaptation, galaxie airGR

Introduction

Afin de mieux se préparer à un futur fortement modifié, les initiatives portées par le monde de la recherche et les organismes de gestion se multiplient : études d'impact du changement climatique, élaboration de plans territoriaux de gestion de l'eau (PTGE), de SAGE et de SDAGE, écriture de plans régionaux d'adaptation. Si de nombreuses études d'impact du changement climatique sont réalisées à des échelles globales ou régionales, la diversité des impacts au niveau local impose une déclinaison plus fine spatialement. En ce qui concerne l'hydrologie, cela s'est concrétisé par des études au niveau national (étude Explore 2070 sur la France, Chauveau et al., 2013 ; étude Explore 2 en cours) ou au niveau régional (études MOSARH 21 et CHIMERE 21 sur la région Grand-Est, par exemple ; Thirel et al., 2019, 2021).

Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de décliner au mieux au niveau local les impacts du changement climatique, mais aussi la gestion intégrée des bassins versants et les stratégies d'adaptation des usages de l'eau (Sauquet et al., 2019). De nombreux outils existent déjà (e.g. WEAP, MIKE HYDRO Basin), cependant peu d'entre eux sont présentés sous forme de codes ouverts et sont parcimonieux dans leur approche (i.e. données d'entrée nécessaires limitées). Dans cet article, nous présentons deux outils, airGR et airGRiwrn, qui permettent de modéliser les débits de manière distribuée et d'inclure spatialement les usages de l'eau, tout en ne requérant qu'un nombre limité de données d'entrée.

Dans un premier temps, nous présentons ces outils. Puis, nous présentons le cas d'étude de la Seine, affecté par quatre lacs-réservoirs. Enfin, nous présentons un exemple d'application mettant en œuvre ces outils en modélisant les débits avec ou sans influence sur le passé, mais aussi les débits naturels futurs.

1. Des outils de modélisation libres et hautement configurables

L'étude de l'impact du changement climatique et de l'adaptation de la gestion de la ressource en eau requiert des outils permettant de modéliser la relation pluie-débit et les usages de manière spatialisée.

1.1. airGR

Le package airGR¹ (Coron et al., 2017, 2022) est un package libre disponible sous le langage R qui met à disposition les modèles pluie-débit de la famille GR, dont GR4J (Perrin et al., 2003), et leurs dernières évolutions. Ces modèles empiriques, fonctionnant aux pas de temps horaire, journalier, mensuel et annuel, permettent, via des données de précipitations et de température de l'air, de simuler les débits dans les rivières (Perrin et al., 2018). Le package propose aussi un modèle d'accumulation et de fonte de la neige, des fonctions pour optimiser les paramètres des modèles, évaluer leur performance et tracer des graphiques d'analyse.

1.2. La semi-distribution

Historiquement, les modèles GR sont globaux (c'est-à-dire qu'ils considèrent comme homogènes à l'échelle du bassin versant les processus et les données d'entrée). Cependant, les impacts du changement climatique et les stratégies d'adaptation se déclinant au niveau local, airGR propose des versions semi-distribuées des modèles GR. Dans ces versions, les données d'entrée, les modèles GR et les paramétrisations sont appliqués sur des bassins versants emboîtés, et les débits simulés amont sont routés en aval grâce à une fonction de propagation (Lobligeois, 2014). airGR inclut aussi les derniers travaux permettant une meilleure spatialisation des paramètres des modèles GR (de Lavenne et al., 2019).

1.3. airGRiwrn

Le package airGRiwrn² est un package R qui « encapsule » airGR, c'est-à-dire qu'il utilise directement ses fonctionnalités et ses modèles GR, mais systématise leur utilisation de manière semi-distribuée grâce à un ensemble de nouvelles fonctions permettant de mettre en place un réseau de modèles (Dorchies et al., 2022). Par ailleurs, airGRiwrn permet d'inclure des usages de l'eau dans ce réseau, soit en injectant directement des prises ou des restitutions d'eau mesurées, soit en autorisant le couplage à des modèles d'usage (figure 1). Cependant, les usages étant soumis à des règles de gestion ou à des restrictions, il est possible d'utiliser des « contrôleurs », fonctions implémentant des logiques de décision, et qui déterminent, par exemple, quand les usages voient leur demande satisfaite ou non.

Ce package permet donc, par exemple, de simuler les débits de bassins versants intégrant des réservoirs écrêteurs de crues ou de soutien d'étiage, des canaux effectuant des transferts inter-bassins, toutes sortes de prélèvements et de rejets et leur régulation.

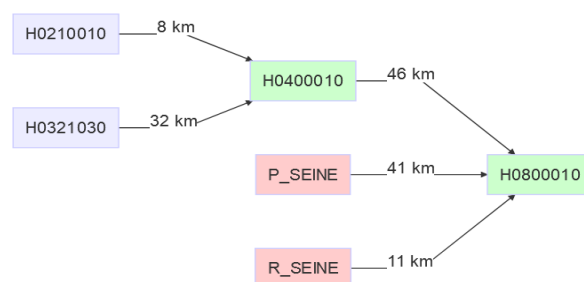


figure 1. Exemple d'un graphique GRiwrn représentant le voisinage du lac-réservoir Seine. En bleu, une modélisation hydrologique GR amont ; en vert, les modélisations hydrologiques GR sur des bassins versants intermédiaires ; en rouge, des injections d'influences humaines ou des modèles de gestion.

¹ Voir le site <https://hydrogr.github.io/airGR/> pour des exemples de mise en œuvre et la documentation

² Voir le site <https://airgriwrn.g-eau.fr/> pour des exemples de mise en œuvre et la documentation

2. Le cas d'étude

2.1. Description du bassin versant de la Seine

Nous modélisons le bassin de la Seine en amont de Vernon (superficie environ 64 420 km²). La topographie est relativement peu marquée, l'altitude variant de 31 m à 300 m, excepté dans le Morvan (max 901 m). Le régime hydrologique est pluvial océanique, caractérisé par des débits plus élevés sur la période de novembre à juin et, à l'inverse, des débits plus faibles sur la période de juillet à octobre. L'influence de la neige est assez faible sur le bassin, mais non négligeable lors de forts épisodes neigeux par exemple dans la région du Morvan. Le bassin de la Seine est soumis à différentes influences anthropiques. En effet, ce bassin présente de forts besoins en eau, car il compte environ 18 millions d'habitants. Parmi les influences anthropiques, nous nous limiterons aux quatre lacs-réservoirs situés en amont du bassin et totalisant un volume de 807,5 Mm³. Construits entre 1949 et 1990, ces retenues ont le double objectif d'écrêter les crues et de soutenir les étiages.

2.2. Données observées

Nous utiliserons trois bases de données :

- les données climatiques issues de la base de données SAFRAN de Météo-France (Vidal et al., 2010) : la précipitation et la température de l'air, disponibles au pas de temps journalier sur une grille de 8 x 8 km ;
- les données hydrologiques de débits mesurés au pas de temps journalier, issus de la Banque HYDRO (Leleu et al., 2014), complétées par des stations gérées par l'EPTB Seine Grands Lacs ;
- les données de débits de prise et de restitution de chaque lac au pas de temps journalier, fournies par l'EPTB Seine Grands Lacs.

2.3. Données de projections climatiques

Les projections climatiques utilisées font partie du jeu de données climatiques DRIAS 2020 corrigées avec la méthode ADAMONT (Verfaillie et al. 2017, Soubeyroux et al., 2020). Il s'agit de la liste restreinte de cinq projections identifiées par Météo-France (communication interne). Les données, au pas de temps journalier, sont disponibles sur une grille de 8 x 8 km. Nous nous intéressons au RCP 8.5 et considérons la période de référence 1976-2005 et la période future 2071-2100.

2.4. Structuration du modèle

Le modèle semi-distribué découpe le bassin versant selon 143 stations de jaugeage choisies en fonction de la disponibilité des données de débit et leur localisation (Nunes-Torres, 2021). Ce maillage fin du territoire a pour intérêt une meilleure représentation des hétérogénéités hydroclimatiques du bassin, mais offre aussi la possibilité d'inclure de manière fine et localisée des influences anthropiques. Les quatre lacs-réservoirs sont intégrés via neuf points d'injections représentant leurs différents ouvrages de prise et de restitution.

3. Résultats

3.1. Modélisation de la Seine sur le passé : débits naturels et anthropisés

Comme décrit plus haut, airGRiwrn permet d'inclure des séries temporelles d'influences anthropiques connues. Sur la figure 2, nous montrons quel est l'impact d'une telle prise en compte pour la station de la

Seine à Troyes qui se situe en aval du lac Seine. A l'aide d'un modèle hydrologique et d'une connaissance des chroniques de débits prélevés et restitués en aval du lac Seine, nous pouvons représenter fidèlement le régime hydrologique influencé sur cette station. En enlevant le lac Seine du modèle, nous pouvons par ailleurs simuler le débit « naturel », c'est-à-dire celui qui aurait dû être si la retenue en amont n'avait pas existé. On observe que le débit naturel serait plus haut l'hiver et plus bas l'été, montrant l'apport du lac Seine pour écrêter les crues et soutenir les étiages.

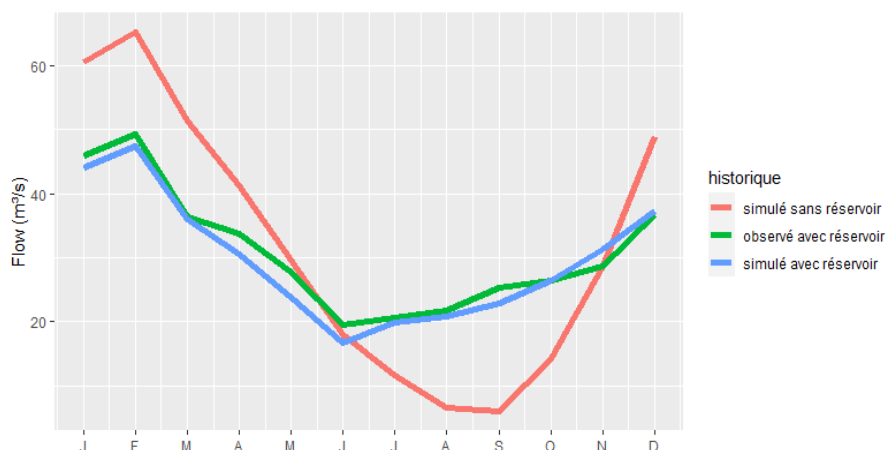


figure 2. Régime hydrologique sur la période 1959-2019 de la Seine à Troyes (H0800010) observé (vert) et simulé avec le modèle GR4J et CemaNeige, avec (bleu) et sans prise en compte du réservoir Seine (rouge).

Le modèle GR4J + CemaNeige a été appliqué, via airGRiwrn, sur plus de 100 bassins versants emboîtés sur le bassin de la Seine, comme on peut le voir sur la figure 3. Dans cette configuration, les séries temporelles observées de prises et de vidanges des grands lacs de Seine sont injectées dans le modèle. La Figure 3a montre le biais commis sur le débit annuel (R-QA). On observe que le modèle ne présente qu'un biais très faible (en deçà de 5% du débit annuel) sur la plupart des sous-bassins. Une légère surestimation est notable en aval du lac situé sur la Marne et sur quelques autres bassins, et quelques sous-estimations sont notées au sud-ouest du bassin de la Seine. Concernant le biais sur le QMNA5³ (R-QMNA5, Figure 3b), on observe une tendance à la sous-estimation en amont du bassin de la Seine, et quelques bassins avec une surestimation. Cependant, dans l'ensemble les erreurs commises par le modèle restent tout à fait acceptables sur ces indicateurs qui caractérisent des événements extrêmes, et donc par définition difficiles à simuler.

³ Le QMNA5 est le débit mensuel minimal sur l'année avec une période de retour de cinq ans.

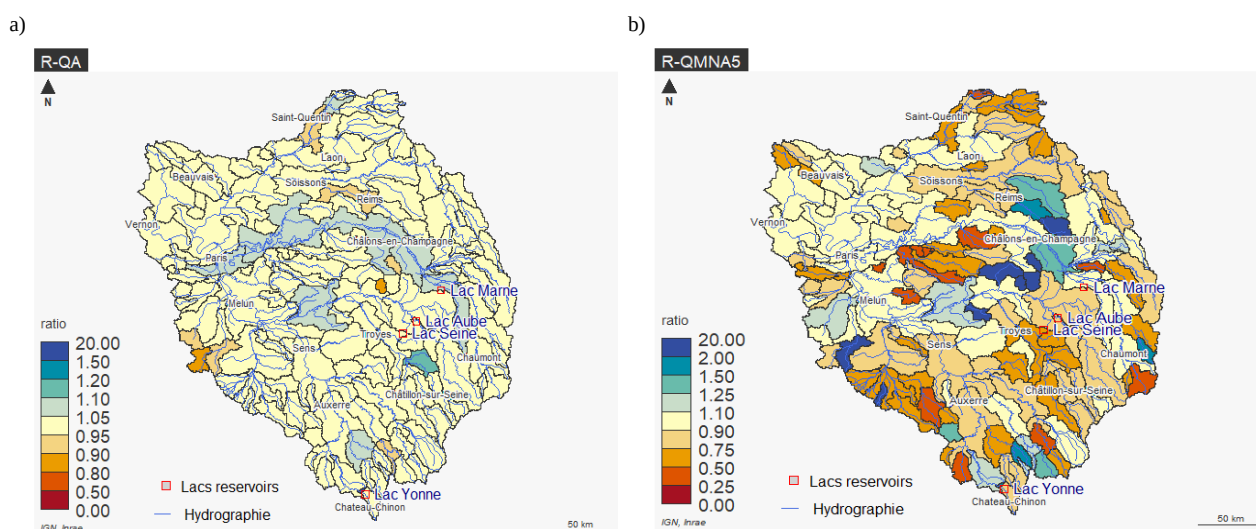


figure 3. Bassin de la Seine discrétisé en sous-bassins versants modélisés avec airGRiwrn. A gauche, le biais sur le débit annuel, à droite le biais sur le QMNA5. Les valeurs de biais sont parfaites si elles valent 1, il y a surestimation au-dessus de 1 et sous-estimation en dessous de 1.

3.2. Impact du changement climatique sur l'hydrologie naturelle

Dans cette section, nous analysons l'impact du changement climatique sur l'hydrologie naturelle, c'est-à-dire sans prise en compte de la gestion passée, présente ou future des grands lacs de Seine. Nous considérons dans un premier temps les débits de la Seine à Paris et l'ensemble de l'emprise de son bassin pour le climat, ainsi que le RCP 8.5. Les projections climatiques montrent un comportement saisonnier globalement cohérent avec la réanalyse SAFRAN sur la période de référence (1976-2005), avec néanmoins une forte variabilité des précipitations selon les modèles utilisés (non montré). Pour la période 2071-2100, l'évolution des précipitations est contrastée : une augmentation est observée durant l'hiver et une légère diminution durant l'été. Deux modèles climatiques divergent, avec une forte augmentation pour le modèle IPSL toute l'année sauf au printemps, et une baisse forte pour le modèle HadGEM pour l'été. L'évolution des températures se situe entre +4 °C l'hiver et +3 à +8 °C l'été.

Concernant les débits projetés pour la Seine à Paris (Figure 4), ceux-ci sont légèrement sous-estimés tout au long de l'année avec les cinq modèles sur la période de référence. Pour la période future 2071-2100, le modèle IPSL sort clairement du lot, avec une augmentation importante tout au long de l'année sauf au printemps, avec un pic à plus de 1000 m³/s en moyenne mensuelle en janvier. Cette augmentation est en lien direct avec l'évolution des précipitations décrite ci-dessus. Les autres projections de débits montrent une évolution bien différente : une augmentation de l'ensemble des projections l'hiver, une diminution de l'ensemble des projections l'été et l'automne, et une évolution neutre au printemps. Même si nous n'avons dans ce travail pas mis en œuvre de modèle de gestion future des grands lacs de Seine, il va sans dire que cette évolution tend à indiquer une tension croissante sur les objectifs d'écêtement des crues et de soutien des étiages de ces réservoirs.

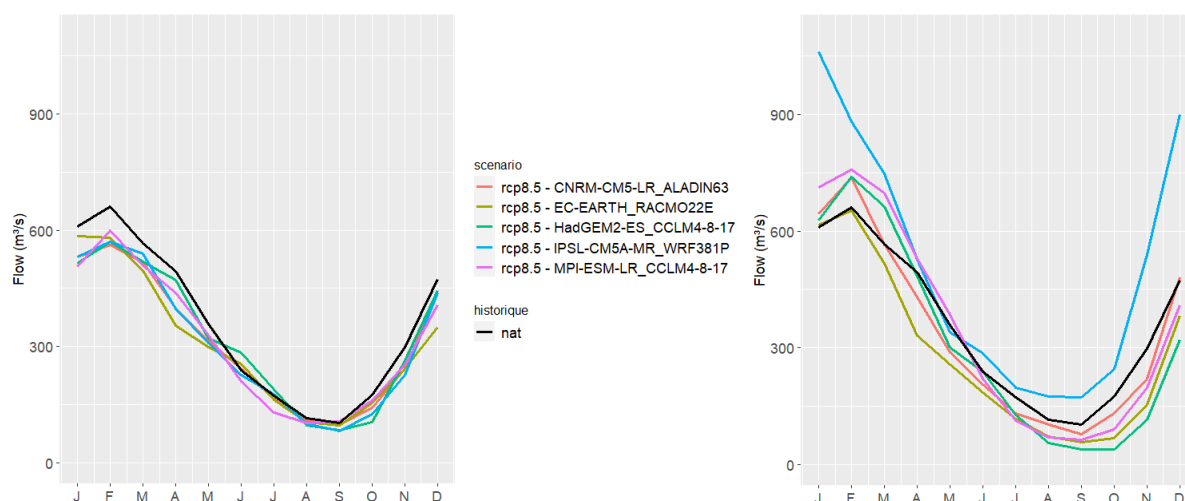


figure 4. Régime hydrologique mensuel de la Seine à Paris sans prise en compte des grands lacs. A gauche sur la période historique, à droite sur la période 2071-2100 pour le RCP 8.5. En noir, le débit naturel simulé avec SAFRAN.

Analysons désormais les évolutions de débits sur l'ensemble de la zone d'étude entre la période de référence et la période 2071-2100 (Figure 5). Les débits moyens montrent une évolution spatialement contrastée, avec une tendance à l'augmentation sur une large partie du territoire, et une tendance à la baisse à l'ouest de la zone. L'évolution du QMNA5, indicateur d'étiage, montre une diminution claire de ce débit caractéristique sur l'ensemble de la zone, évolution expliquée à la fois par une baisse des précipitations estivales et par une augmentation de la température, provoquant une augmentation de l'évapotranspiration.

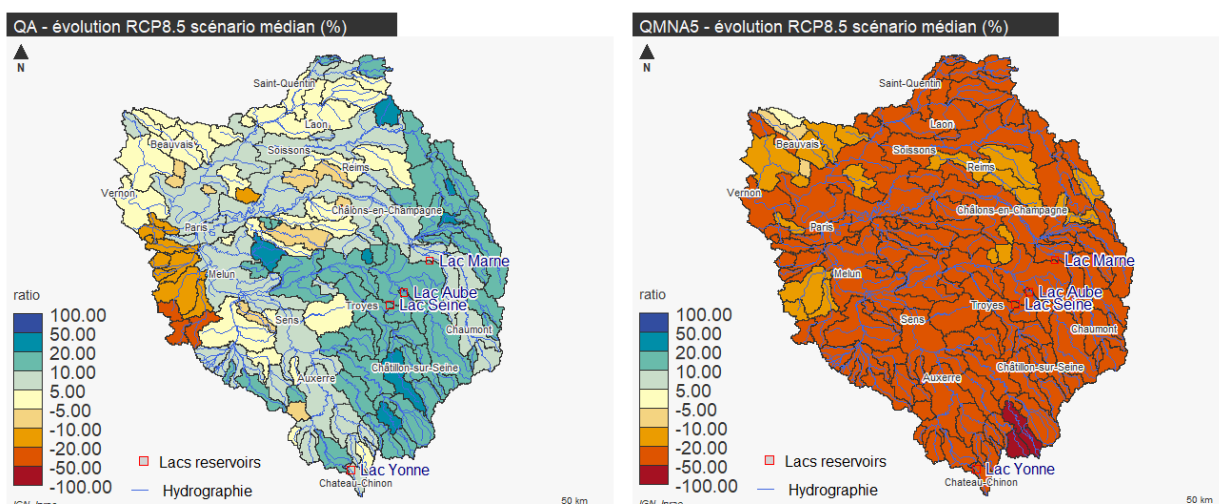


figure 5. Evolution en pourcentage du débit moyen annuel (à gauche) et du QMNA5 (à droite) entre la période historique et 2071-2100 pour le RCP 8.5. La médiane de l'ensemble des projections est tracée.

Conclusion

Les derniers développements d'airGR et le nouveau package R airGRiwr simplifient la mise en œuvre de la modélisation de bassins versants anthropisés. Ces outils ont été utilisés pour mettre en place un modèle pluie-débit de la Seine distribué sur 143 stations de jaugeage et intégrant les interconnexions avec lacs-réservoirs régulant les crues et les étiages. La suppression de l'influence des réservoirs a permis d'évaluer l'impact du changement climatique à la fin du 21^e siècle sur l'hydrologie naturelle du bassin

laissant présager une évolution défavorable en termes d'intensité des étiages ainsi que des crues. Certaines projections utilisées pour cette étude font actuellement l'objet de réflexion au sein du projet Explore2 traitant de la modélisation de l'impact du changement climatique sur les débits naturels des bassins versants français. Les perspectives d'utilisation de cette chaîne de modélisation sont nombreuses : intégrations des prélèvements et transferts sur le bassin (canaux de navigation, irrigation, eau potable, industrie...) pour améliorer la naturalisation des débits, mais surtout l'intégration de règles de gestion des lacs-réservoirs et de scénarios d'usages pour l'étude des adaptations possibles du bassin au changement climatique.

Remerciement : Les auteurs remercient le programme du PIREN-Seine d'avoir financé le stage de fin d'études de Laura Nunez Torres. Les auteurs tiennent aussi à remercier la Commission européenne et l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le financement dans le cadre du consortium international collaboratif IN-WOP financé dans le cadre de l'appel conjoint 2018 du Cofund ERA-NET WaterWorks2017. Cet ERA-NET fait partie intégrante des activités développées par le JPI Water.

Bibliographie

- Chauveau M. et al., 2013 : Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? , *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, **4**, p. 5. doi:10.1051/lhb/2013027.
- Coron L. et al., 2017 : The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, **94**, 166-171, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Coron L. et al., 2022 : airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.7.0, doi: 10.15454/EX11NA, URL: <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- de Lavenne A. et al., 2019 : A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model. *Water Resources Research*, **55** (11): 8821-8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>.
- Dorchies D. et al., 2022. airGRiwrn: Modeling of Integrated Water Resources Management based on airGR. R Package version 0.6.1. <https://doi.org/10.15454/3CVD1I>.
- Leleu I. 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. doi: 10.1051/lhb/2014004.
- 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.
- Nunez Torres L., 2021 : Simulation d'un bassin versant anthropisé à l'aide d'un modèle hydrologique semi-distribué : Le bassin de la Seine et ses réservoirs. Rapport de stage-Polytech Sorbonne. 1/9/2021. <https://hal.inrae.fr/hal-03359617>.
- Perrin C. et al., 2018 : Empirical approach to hydrological modelling: a historical perspective in the case of the GR models, *Geophysical Research Abstracts*, **20**, EGU2018-15734, EGU General Assembly 2018.
- Perrin C. et al., 2003 : Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation, *Journal of Hydrology* **279** (1-4): 275–89. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).
- Sauquet E. et al., 2019 : Vers l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au niveau des bassins versants français. [Rapport de recherche] Inrae; Irstea. (hal-02930768)
- Soubeyroux J.-M. et al., 2020 : LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE, Météo-France, rapport de 98 pages.
- Thirel G. et al., 2019 : Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Mosel, Sarre and Ill), *Houille Blanche*, **5-6**, pp. 140-149.
- Thirel G. et al., 2021 : Projet CHIMERE 21. CHlers – Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle. Rapport final. Agence de l'Eau Rhin-Meuse. 152 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.
- Verfaillie D. et al., 2017: The Method ADAMONT V1.0 for Statistical Adjustment of Climate Projections Applicable to Energy Balance Land Surface Models. *Geosci Model Dev*, **10** (11) 4257–83. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>

Vidal J.-P. et al., 2010 : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, **30**(11), 1627–1644. doi: 10.1002/joc.2003.