

## LES SIMULATIONS HYDRO-CLIMATIQUES DRIAS 2020 - SIM2

**Fabienne ROUSSET<sup>1</sup>, flore TOCQUER<sup>2</sup>, Jean-Michel SOUBEYROUX<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [fabienne.rousset@meteo.fr](mailto:fabienne.rousset@meteo.fr)

<sup>2</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [flore.tocquer@meteo.fr](mailto:flore.tocquer@meteo.fr)

<sup>3</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [jean-michel.soubeyroux@meteo.fr](mailto:jean-michel.soubeyroux@meteo.fr)

**Résumé :** Dans le cadre des projets EXPLORE2 et LIFE EAU&CLIMAT, la chaîne de modélisation SIM2 de Météo-France a été utilisée pour produire des scénarios hydro-climatiques, basés sur le jeu de données atmosphérique DRIAS 2020. Les résultats sur les paramètres de surface ainsi que sur les débits mettent en avant la forte incertitude due à la modélisation climatique, et montrent également la gradation des évolutions induites par chaque RCP. Enfin, elles font apparaître un gradient nord-sud sur la France, avec notamment une tendance plutôt à la hausse des débits hivernaux et de l'eau du sol sur la moitié nord de la France, et un assèchement généralisé sur la moitié sud.

**Mots-Clés :** Changement climatique, modélisation hydrologique, EXPLORE 2, débit.

**Abstract :** Within the framework of the EXPLORE 2 and LIFE EAU&CLIMAT projects, the modeling chain SIM2 from Météo-France was used to produce hydrological scenarios, based on the DRIAS 2020 dataset. The future evolution of surface parameters such as soil moisture or snow cover, as well as the streamflows, show an important uncertainty due to climate uncertainty. It also depends on the RCP scenario. Moreover, we can notice a regional contrast as well as a seasonal contrast, streamflow and soil moisture tend to increase particularly in winter and over the north of France, whereas they tend to decrease especially in summer and over the southern part of France.

**Keywords :** Climate change, hydrological modeling, EXPLORE 2, streamflow.

### Introduction

La chaîne de modélisation hydro-météorologique SIM2 (Le Moigne et al. 2020) est un outil utilisé par Météo-France depuis de nombreuses années pour le suivi temps réel de l'hydro-météorologie de surface sur la France, la caractérisation climatique, la climatologie, et pour diverses applications de prévision de la ressource en eau (à moyenne échéance, à échéance saisonnière). Plus récemment, elle a été utilisée pour l'étude de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France, au travers des projets EXPLORE2070<sup>1</sup> et CHIMERE 21<sup>2</sup>. Dans le cadre des projets en cours EXPLORE 2<sup>3</sup> et LIFE EAU&CLIMAT<sup>4</sup>, la chaîne SIM2 est utilisée pour réaliser des projections hydro-climatiques sur la France basées sur les projections météorologiques DRIAS-2020<sup>5</sup>.

### 1. La modélisation hydro-climatique SIM2

1 <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>

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

3 <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

4 <https://www.gesteau.fr/life-eau-climat>

5 [drias-climat.fr](https://drias-climat.fr)

## 1.1. Description de la chaîne SIM2

La chaîne Safran-Isba(Surfex)-Modcou (SIM) a été développée dans le cadre d'une coopération entre Météo-France et le Centre de géosciences de Mines ParisTech. Elle simule sur la France les flux d'eau et d'énergie à l'interface sol-atmosphère-biosphère, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des principales nappes. Ce modèle est utilisé en opérationnel depuis près de 20 ans pour le suivi temps réel de l'hydrologie de surface sur la France, la caractérisation climatique, et la prévision à différentes échéances. Il fait l'objet de nombreuses actions de recherche. La chaîne hydrométéorologique Safran-Isba(Surfex)-Modcou (SIM) a été validée sur l'ensemble de la France par Habets et al. (2008) par comparaison à des observations quotidiennes de débit, hauteurs de nappes et hauteurs de neige sur la période 1995-2005. Ces dernières années, une version 2 de la chaîne a été mise en place en y apportant de nombreuses améliorations décrites dans l'article Le Moigne et al. (2020). La version utilisée par les simulations hydrologiques réalisées dans le cadre du projet EXPLORE 2 est la version SIM2.

La chaîne SIM2 est composée de 3 modules, représentés sur la figure 1.

– Safran est un système d'analyse permettant de reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiquement homogènes, à partir d'observations au sol et de produits de modèles de circulation générale à grande échelle. Ces profils sont projetés spatialement et verticalement sur une grille régulière de 8 km sur la France et permettent de produire une analyse en point de grille de 8 paramètres météorologiques sur la France aux pas de temps horaire et quotidien : température de l'air, précipitation liquide, précipitation solide, force du vent, humidité de l'air, rayonnement solaire direct, rayonnement solaire diffus et nébulosité. La réanalyse climatologique Safran produite par Météo-France couvre la période allant du 1er août 1958 au 31 juillet 2021 et est complétée chaque année. Dans le cadre des projections climatiques du projet EXPLORE 2, le module Safran est remplacé par les données atmosphériques issues du jeu DRIAS 2020.

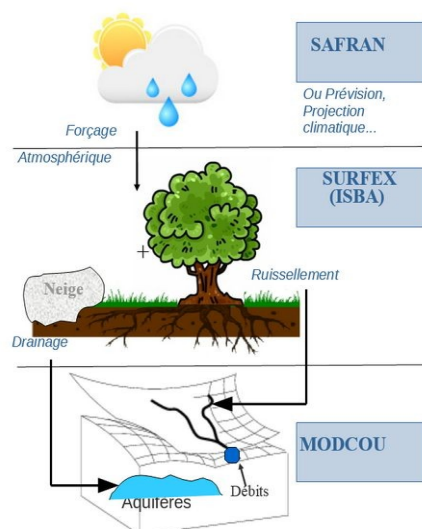


figure 1. Schéma de fonctionnement de la chaîne SIM2

– Surfex (contenant le cœur de code Isba) est un modèle de surface développé par le CNRM en collaboration avec plusieurs laboratoires de recherche. Il est ici utilisé dans une version orientée hydrologie (version diffusion, multicouches), permettant de représenter les surfaces continentales dans les modèles atmosphériques et hydrologiques. Il comporte plusieurs modules permettant de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans le sol, la végétation, la neige, et l'hydrologie superficielle (drainage et ruissellement).

– Le modèle hydrogéologique Modcou est un modèle développé par le Centre de Géosciences de Mines ParisTech. Météo-France a collaboré avec le Centre de Géosciences pour développer une version du modèle sur l'ensemble de la France. Cette version est utilisée dans le cadre de la chaîne SIM2. Le modèle hydrogéologique Modcou couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de simuler les débits des rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés. L'eau est transportée vers les rivières ou alimente les aquifères. Modcou simule l'évolution des aquifères et des nappes, ainsi que leurs interactions avec les rivières.

## 1.2. Mise en œuvre de SIM2 pour les simulations hydro-climatiques basées sur le jeu DRIAS 2020

Dans le cadre des projets EXPLORE 2 et LIFE EAU&CLIMAT, la chaîne SIM2 a été forcée par les projections climatiques du jeu DRIAS 2020, dont la composition est détaillée sur la figure 2, et c'est la méthode de correction de biais ADAMONT<sup>6</sup> qui a été utilisée. Trois scénarios climatiques d'émission de gaz à effet de serre (RCP) sont considérés : RCP2.6 (faibles émissions), RCP4.5 (émissions modérées), RCP8.5 (forte émissions).

GCM	RCM	HISTO	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	■	■	■	■
CNRM-CM5	Racmo22E v2	■	■	■	■
IPSL-CM5A-MR	WRF381P	■		■	■
IPSL-CM5A-MR	RCA4	■		■	■
HadGEM2-ES	RegCM4-6	■	■		■
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	■		■	■
EC-EARTH	Racmo22E v2	■	■	■	■
EC-EARTH	RCA4	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	REMO*	■	■	■	■
NorESM1-M	HIRHAM5 v3	■		■	■
NorESM1-M	REMO**	■	■		■

\* REMO 2009 ; \*\* REMO 2015

**figure 2.** Les 30 simulations du climat futur (8 RCP 2.6, 10 RCP 4.5 et 12 RCP8.5) et les 12 simulations historiques du jeu DRIAS 2020 (source rapport DRIAS 2020, drias-climat.fr)

## 2. Les simulations hydro-météorologiques de surface

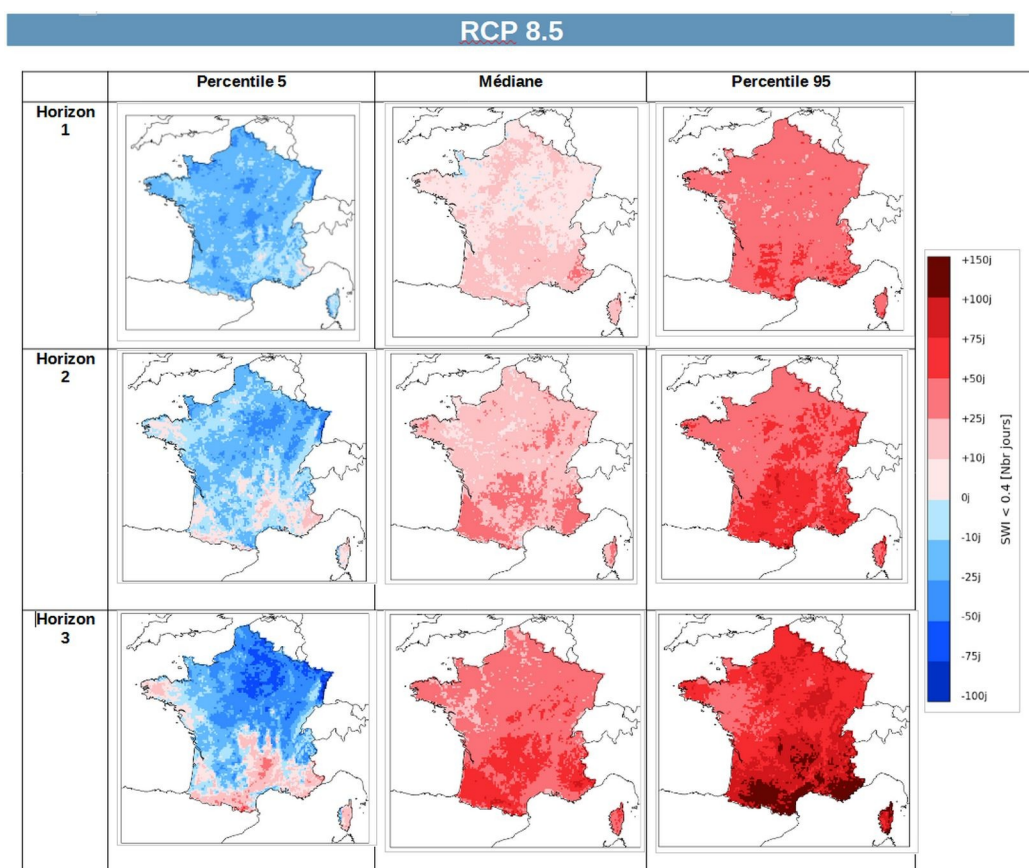
Le module Surfex de SIM2 tourne sur une grille régulière de 8 km de côté couvrant l'ensemble de la France métropolitaine et la Corse, et permet d'obtenir des scénarios d'évolutions climatiques de plusieurs variables de surface concernant la ressource en eau, dont les plus utilisés sont : l'évaporation réelle (eau totale restituée à l'atmosphère par le sol et les plantes en raison des processus d'évaporation – du sol nu et de l'eau interceptée par la végétation – et de transpiration des plantes), l'équivalent en eau du manteau neigeux (SWE) ou encore l'indice d'humidité du sol (SWI, qui permet de caractériser la quantité d'eau présente dans la couche racinaire, et disponible pour la végétation). En outre, on a accès aux composantes du bilan d'eau comme le ruissellement ou le drainage gravitationnel.

Afin de s'intéresser aux évolutions du climat, chaque variable est considérée sur des périodes de 30 ans : sur la période 1976-2005 d'une part, c'est la période dite « historique » des modèles de climat, et sur des horizons futurs proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100) d'autre part. Et ce, pour chacun des 12 couples de modèles GCM/RCM et chacun des trois RCP 2.6, 4.5 et 8.5.

<sup>6</sup> <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/218>

L'évolution de chaque variable peut être représentée en fonction de l'horizon futur, ou encore du RCP, et de plus à partir de ces variables des indicateurs simples ont été définis. Par exemple, afin d'avoir une première approche de l'évolution de la sécheresse du sol, nous avons calculé le nombre de jours annuel moyen pendant lesquels le SWI (indice d'humidité du sol) est inférieur à 0.4 (valeur empirique qui permet de qualifier un sol sec). L'évolution de cet indicateur est présentée sur les figures 3 et 4.

En scénario RCP 8.5 (figure 3), le nombre de jours sol sec augmente régulièrement au cours du siècle pour atteindre des valeurs entre +25 et +50 en fin de siècle pour la distribution médiane, et jusqu'à +100 jours sur le sud de la France pour la distribution extrême. Inversement, la distribution plus humide indique une diminution du nombre de jours secs sur une large moitié nord de la France. L'incertitude liée aux modèles climatiques est forte à tous les horizons temporels. Dans tous les cas, on observe une augmentation du nombre de jours sol sec plus forte au sud de la France que dans le nord.



**figure 3.** Écart de nombre de jours de sol sec (SWI<0.4) pour le RCP 8.5 par horizon et selon les paramètres de distributions multi-modèles Q05 , Q50 , Q95

L'évolution saisonnière de l'écart relatif de l'humidité du sol sous RCP8.5 (figure 4) montre un assèchement important du sol en été et en automne et des valeurs autour de la normale pour l'hiver et le printemps. Les incertitudes entre les modèles sont plus fortes en été et en automne, et augmentent avec l'horizon temporel.

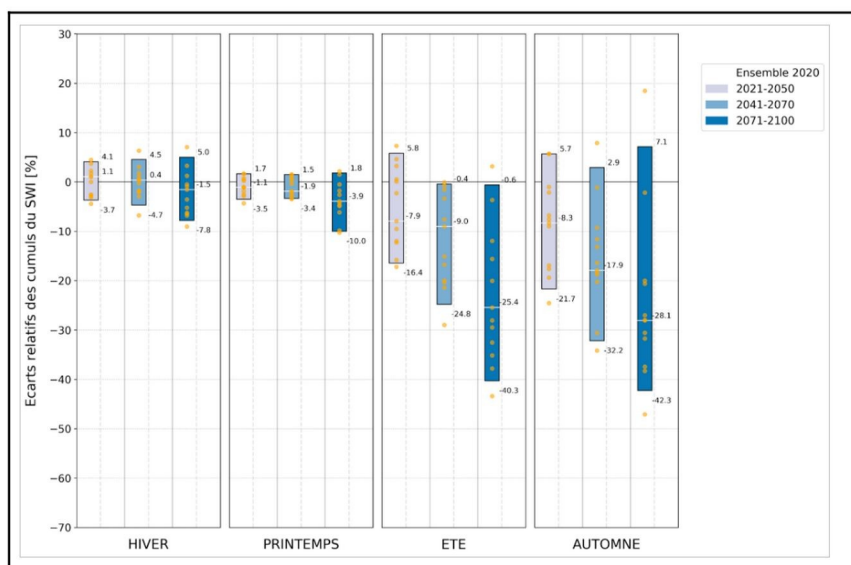


figure 4. Écarts relatifs de l'évolution saisonnière de l'humidité du sol par horizon temporel pour le RCP 8.5

### 3. Les simulations de débit

Nous avons produit quelques analyses simples des évolutions des débits issus du modèle SIM2. Ces résultats seront enrichis dans la suite du projet EXPLORE 2, d'une part avec l'utilisation de différents modèles hydrologiques qui permettront de mieux quantifier l'incertitude liée à la modélisation hydrologique, et d'autre part avec le calcul d'indicateurs hydrologiques plus ciblés (de type VCN ou QMNA par exemple).

#### 3.1. Evolution des débits annuels

La figure 5 présente l'évolution du débit moyen annuel en fin de siècle pour les RCP4.5 et 8.5, pour l'ensemble des modèles climatiques, la robustesse du signe du changement étant soulignée par un encadré noir des symboles. Elle met en avant un gradient nord-sud marqué, avec des hausses de débits moyens sur la moitié nord de la France, surtout en RCP4.5, et des baisses sur la moitié sud, très marquées en RCP8.5. L'incertitude climatique demeure forte, en effet un grand nombre de stations ne présentent pas un signal de changement robuste.

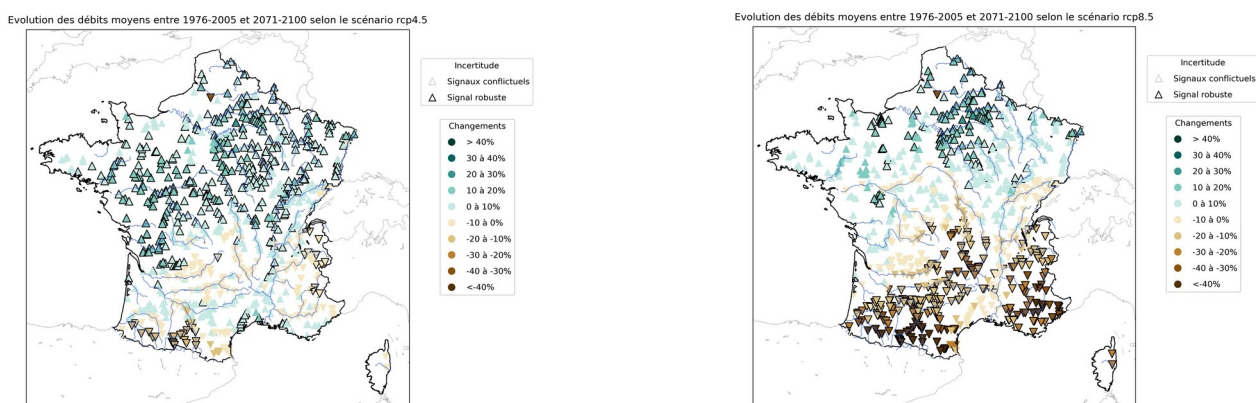
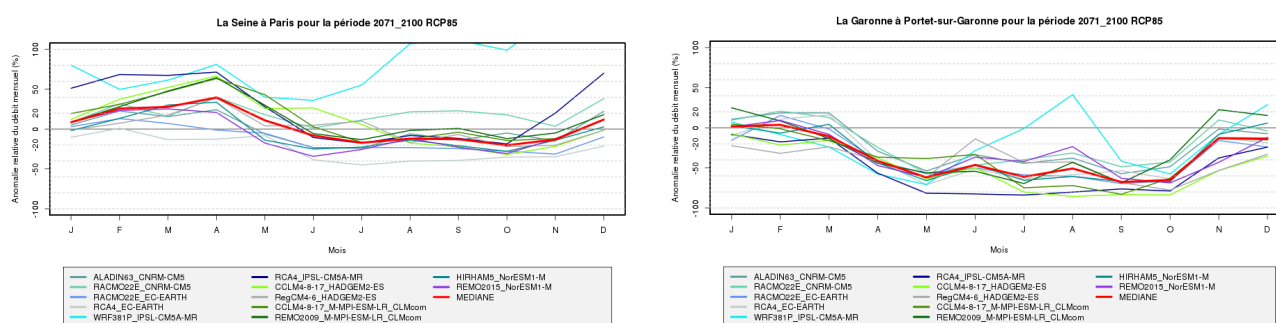


figure 5. Evolution du débit moyen annuel à l'horizon 2071-2100 pour les RCP 4.5 (à gauche) et 8.5 (à droite)

### 3.2. Evolution du cycle hydrologique annuel

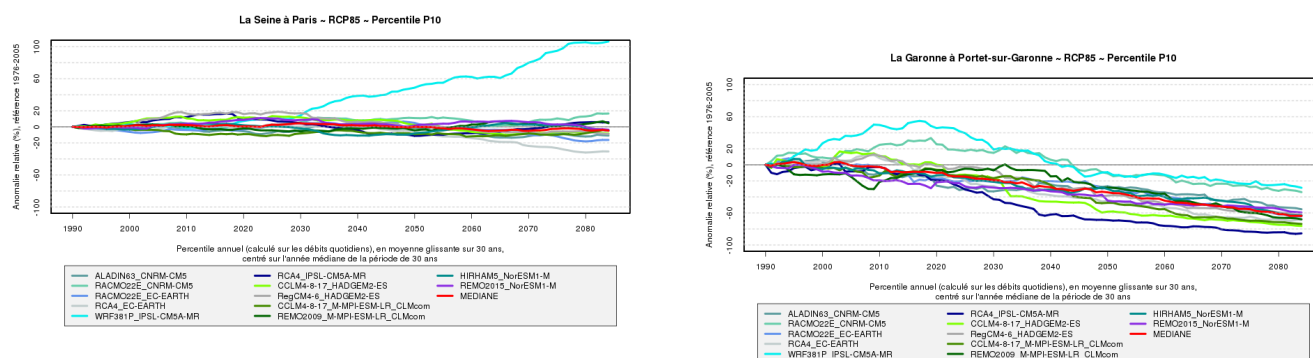
La figure 6 présente l'évolution relative du cycle annuel moyen au pas de temps mensuel, en fin de siècle par rapport à la période 1976-2005, pour le RCP 8.5, pour la Seine à Paris (régime pluvial de la moitié nord de la France) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (régime pluvio nival du sud de la France). Sur la Seine, comme sur de nombreuses stations de la moitié nord de la France, l'évolution des débits hivernaux est une tendance à l'augmentation, de 20 à 40 % pour la médiane des modèles. Les débits estivaux ont tendance à la baisse, plus largement sur la période de juin à novembre la médiane des modèles climatiques se situe à environ -10 / -20 %. Sur la Garonne, le signal est quasi unanimement à la baisse. La baisse des débits printaniers traduit une diminution du pic de fonte, lié à l'augmentation des températures et la diminution du manteau neigeux des Pyrénées, et les débits estivaux sont en forte baisse, de -40 à -60 % pour la médiane des modèles climatiques.



**figure 6.** Evolution du cycle annuel moyen à l'horizon 2071-2100 pour le RCP 8.5 pour la Seine à Paris (à gauche) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (à droite)

### 3.3. Evolution des étiages

La figure 7 présente l'évolution des débits d'étiage pour le RCP 8.5, pour la Seine à Paris et la Garonne à Portet-sur-Garonne. Les débits d'étiage sont définis comme étant le Q10 annuel calculé sur les débits quotidiens, puis moyennés sur des périodes de 30 ans glissants (l'année portée en abscisse du graphique étant l'année du milieu de la période de 30 ans). Ces débits sont présentés en termes d'évolution par rapport à la période 1976-2005, c'est pourquoi les graphiques démarrent à zéro. Pour la Seine comme pour beaucoup de stations du nord de la France, l'évolution attendue des débits d'étiage est relativement faible, sauf pour le modèle IPSL/WRF (qui donne une augmentation marquée des précipitations convectives estivales surtout en RCP8.5). Pour la Garonne en revanche, comme pour beaucoup de stations de la moitié sud de la France, la tendance des débits d'étiage est à la baisse, cette baisse est continue avec le temps, et en fin de siècle elle s'échelonne d'environ -25 à -80 %.



**figure 7.** Evolution du Q10 annuel (calculé sur les débits journaliers), en moyenne glissante sur 30 ans, par rapport à la période 1976-2005, pour le RCP 8.5 pour la Seine à Paris (à gauche) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (à droite)

## Conclusion

Les projections hydro-climatiques obtenues avec la chaîne de modélisation SIM2 et le jeu de données atmosphériques DRIAS 2020 mettent en avant la forte incertitude due à la modélisation climatique, avec des évolutions contrastées et parfois de signe contraire selon les paramètres sur l'ensemble des modèles climatiques du jeu DRIAS 2020. Elles montrent également une gradation des évolutions induites par chaque RCP. Enfin, elles font apparaître une variabilité saisonnière (été-hiver) et un gradient nord-sud sur la France, avec notamment une tendance plutôt à la hausse des débits hivernaux et de l'eau du sol sur la moitié nord de la France, et un assèchement généralisé sur la moitié sud avec des diminutions marquées des débits estivaux.

Ce travail donne un premier aperçu de résultats qui contribueront au projet EXPLORE 2. Ces résultats sont encore partiels, car le projet EXPLORE 2 va proposer une analyse poussée des sources d'incertitude des projections climatiques hydrologiques, et ce grâce à la mise en œuvre d'autres méthodes de correction de biais des modèles climatiques, et également l'utilisation d'un grand nombre de modèles hydrologiques. L'ensemble des résultats du projet EXPLORE 2 permettra d'avoir une analyse beaucoup plus complète et détaillée des scénarios d'évolution de l'hydrologie de surface et souterraine sur la France.

## Bibliographie

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., and Viennot, P.: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **113**, D06113, <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>, 2008.

Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F.: The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France, *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>, 2020.