



**HAL**  
open science

## **PREMHYCE : un outil opérationnel pour la prévision des étiages**

François Tilmant, Pierre Nicolle, François Bourgin, François Besson, Olivier Delaigue, Pierre Etchevers, Didier Francois, Matthieu Le Lay, Charles Perrin, Fabienne Rousset, et al.

► **To cite this version:**

François Tilmant, Pierre Nicolle, François Bourgin, François Besson, Olivier Delaigue, et al.. PREMHYCE : un outil opérationnel pour la prévision des étiages. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2020, 106 (5), pp.37-44. 10.1051/lhb/2020043 . hal-03042989

**HAL Id: hal-03042989**

**<https://hal.science/hal-03042989>**

Submitted on 8 Dec 2020

**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.

Copyright

## PREMHYCE : un outil opérationnel pour la prévision des étiages

François Tilmant<sup>1</sup>, Pierre Nicolle<sup>1,a</sup>, François Bourgin<sup>1</sup>, François Besson<sup>2</sup>, Olivier Delaigue<sup>1</sup>, Pierre Etchevers<sup>2</sup>, Didier François<sup>3</sup>, Matthieu Le Lay<sup>4</sup>, Charles Perrin<sup>1,\*</sup>, Fabienne Rousset<sup>2</sup>, Dominique Thiéry<sup>5</sup>, Claire Magand<sup>6</sup>, Timothée Laurent<sup>6,b</sup> et Élise Jacob<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, Antony, France

<sup>2</sup> Météo-France, Direction de la climatologie, Toulouse, France

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

<sup>4</sup> EDF-DTG, Grenoble, France

<sup>5</sup> BRGM, Orléans, France

<sup>6</sup> Office français de la biodiversité (OFB), Vincennes, France

<sup>7</sup> Ministère de la Transition écologique, Direction de l'eau et de la biodiversité, La Défense, France

Reçu le 27 mai 2020 / Accepté le 25 septembre 2020

**Résumé** – De nombreux usages de l'eau peuvent être fortement impactés par les pénuries d'eau (eau potable, irrigation, hydroélectricité...). Il est donc nécessaire d'anticiper les périodes d'étiage afin d'améliorer la gestion de l'eau. Ceci est renforcé par la perspective d'étiages futurs plus sévères dans le contexte du changement climatique. Cinq institutions françaises ont développé un outil opérationnel de prévision des bas débits, PREMHYCE. Il est testé en temps réel sur une centaine de bassins versants de France métropolitaine depuis 2017. PREMHYCE comprend cinq modèles hydrologiques qui peuvent être calés sur des bassins versants jaugés et assimilent les dernières observations de débit. Les prévisions de débits sont émises jusqu'à un horizon de 90 jours selon l'approche *Ensemble Streamflow Prediction* (ESP) (données météorologiques historiques utilisées comme ensemble de scénarios d'entrée). Ces données météorologiques (précipitations, évapotranspiration et température) sont issues de la réanalyse SAFRAN journalière de Météo-France, sur la période 1958–2018. Les performances de l'outil sont analysées sur les étiages 2017–2018 pour 38 bassins versants sur lesquels les prévisions sont disponibles pour tous les modèles. Ces derniers ont montré des capacités d'anticipation de l'ordre de 40 jours en moyenne. La plupart des modèles présentent une précision satisfaisante pour prévoir les bas débits à courte échéance ( $j + 7$ ).

**Mots clés** : prévision d'étiage / modèle hydrologique / prévision d'ensemble / gestion des ressources en eau / sécheresse

**Abstract** – **PREMHYCE: an operational tool for low-flow forecasting.** In many countries, rivers are the primary supply of water. A number of uses (drinking water, irrigation, hydropower...) can be strongly affected by water shortages. Therefore, there is a need for the early anticipation of low-flow periods to improve water management. This is strengthened by the perspective of having more severe low flows in the context of climate change. Several French institutions have been collaborating over the last years to develop an operational tool for low-flow forecasting, called PREMHYCE. It was tested in real time on more than one hundred catchments in continental France since 2017. PREMHYCE includes five hydrological models, which are calibrated on gauged catchments and which assimilate flow observations. Low-flow forecasts can be issued up to 90 days ahead, based on Ensemble Streamflow Prediction (ESP) using historical climatic data as ensembles of future input scenarios. The performance of the forecasting tool is analysed on the 2017–2018 low flows on 38 catchments for which forecasts are available for all the models. The capacity to

\*Correspondance : [charles.perrin@inrae.fr](mailto:charles.perrin@inrae.fr)

<sup>a</sup> Adresse actuelle : Université Gustave Eiffel, GERS-LEE, Bouguenais, France.

<sup>b</sup> Adresse actuelle : Agence de l'eau Adour-Garonne, Toulouse, France.

anticipate low-flow events shows an average anticipation of 40 days. The short-term forecast (7 days ahead) is good for most of the models.

**Keywords:** low-flow forecasts / hydrological model / ensemble forecasting / water resources management / drought

## 1 Introduction

Dans de nombreux pays, les cours d'eau sont les principales sources d'approvisionnement en eau. En 2013, en France, 73 % des prélèvements totaux (38 km<sup>3</sup>) proviennent des eaux de surfaces (Chataigner et Michon, 2017). De nombreux usages sont concernés (refroidissement des centrales thermiques, énergie hydroélectrique, AEP, irrigation, industrie, navigation), et peuvent être fortement impactés par les pénuries d'eau en rivière (Bousquet *et al.*, 2003). De plus, ces usages doivent être compatibles avec le maintien de la qualité de la vie aquatique, se traduisant par exemple par le respect d'un débit minimum biologique dans le cours d'eau (Acreman et Dunbar, 2004).

Il est nécessaire d'anticiper plus précocement les périodes d'étiage afin d'améliorer la gestion de l'eau et de prendre des mesures plus rapides pour atténuer l'impact socio-économique et écologique des pénuries d'eau (Chiew et McMahon, 2002 ; Karamouz et Araghinejad, 2008). Les sécheresses extrêmes survenues en France en 1976, 2003 et, plus récemment, en 2011, 2015 et 2017 soulignent la nécessité de bénéficier de systèmes de prévision, renforcée par la perspective d'avoir des étiages plus sévères et plus fréquents en été dans le contexte des changements climatiques.

En 2011, l'Office français de la biodiversité (OFB, anciennement ONEMA puis AFB) et le ministère de l'Environnement ont lancé un projet de recherche visant à comparer et évaluer la capacité de plusieurs modèles hydrologiques à produire des prévisions d'étiages utiles pour la prise de décision en temps réel. Ce projet a conduit à la mise au point d'un outil de prévision des faibles débits basé sur les modèles hydrologiques testés (GARDÉNIA [Thiéry, 2014] du BRGM, GR6J [Pushpalatha *et al.*, 2011] d'INRAE, MORDOR SD [Garavaglia *et al.*, 2017] d'EDF, PRESAGES [Lang *et al.*, 2006] de l'université de Lorraine et SIM [Habets *et al.*, 2008] de Météo-France).

Il existe plusieurs approches et outils de prévision d'étiages. Une revue détaillée est fournie par Nicolle *et al.* (2014). Plus récemment, quelques travaux ont été réalisés sur cette thématique :

- analyse de méthodes de conditionnement des scénarios d'entrée pour la prévision de débit saisonnière, testées par Crochemore *et al.* (2017). Ces auteurs ont étudié l'impact des méthodes de conditionnement sur la performance des prévisions de débit saisonnières, afin d'identifier les attributs de prévision entraînant une amélioration ou une détérioration à l'aide de ces méthodes ;
- étude des capacités des prévisions d'étiage saisonnières ensemblistes sur la Moselle (Demirel *et al.*, 2015). Les auteurs ont comparé trois modèles hydrologiques conceptuels pour la prévision d'étiage et ont évalué l'effet des prévisions saisonnières d'ensemble sur la qualité des prévisions de débits. Ils ont montré que les incertitudes des précipitations ont un impact plus important sur la prévision

saisonniers des débits que les incertitudes sur l'évapotranspiration et les conditions initiales des modèles ;

- proposition d'un cadre de prévision des débits d'étiage dans les cours d'eau méditerranéens (Risva *et al.*, 2018). Les auteurs ont fourni un outil simple et efficace pour la prévision des étiages jusqu'à six mois, qui nécessite peu de données, basé sur une amélioration du concept de réservoir linéaire pour représenter les récessions de débit.

En France, quelques outils opérationnels ont été développés récemment, directement ou indirectement liés à la prévision des étiages. On peut citer :

- le projet AQUI-FR (Habets *et al.*, 2015 ; Vergnes *et al.*, 2020), qui vise à intégrer des modèles hydrogéologiques pour surveiller et prévoir les ressources en eaux souterraines à moyenne échéance (10–15 jours) ou saisonnière, sur les principaux aquifères de France ;
- E-tiage, un service en ligne destiné à aider les utilisateurs finaux dans la gestion de l'eau. Il permet de surveiller le débit des cours d'eau au cours des derniers jours et de prévoir les débits des bassins versants de l'Adour-Garonne et des Charentes (Sud-Ouest de la France).

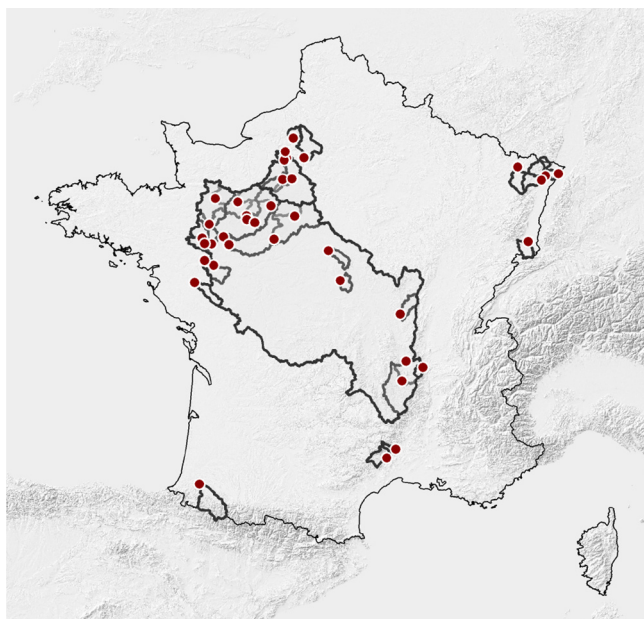
Les objectifs de cet article sont de présenter succinctement les principales caractéristiques de l'outil de prévision des étiages PREMHYCE et les résultats obtenus sur les périodes d'étiage 2017 et 2018, en évaluant la capacité des modèles à anticiper les étiages sévères et à estimer les débits caractéristiques d'étiages VCN10.

## 2 Bassins versants et données

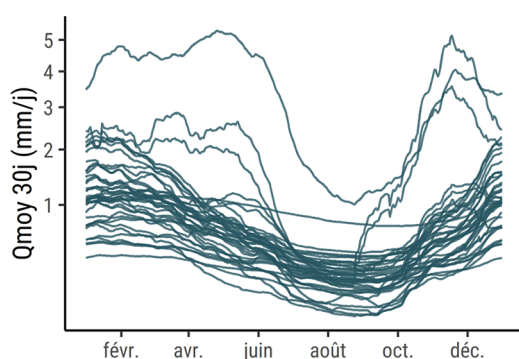
### 2.1 Sélection des bassins versants

La sélection des bassins versants a été réalisée en coopération avec diverses institutions impliquées dans la gestion des bas débits, sur des volets réglementaires ou opérationnels (DREAL, DDT, gestionnaires régionaux de l'irrigation, etc.). Ils ont fourni des listes de bassins cibles où les influences humaines sont limitées, la version actuelle de l'outil ne prenant pas en compte les influences en amont. Une centaine de bassins versants, principalement situés dans le nord-est, le nord-ouest, le sud-ouest et le centre de la France ont ainsi été sélectionnés. Le modèle SIM utilisé dans la plateforme PREMHYCE fournissant des simulations sur 1163 points prédéfinis, nous n'avons conservé ici que les bassins pour lesquels des sorties de SIM étaient disponibles, soit 38 bassins (Fig. 1).

Les bassins versants retenus présentent divers régimes hydrologiques sous influence océanique, méditerranéenne ou continentale (Fig. 2). Le tableau 1 présente les principales caractéristiques des bassins versants, avec des surfaces de bassins allant de 262 à 111 000 km<sup>2</sup>, des altitudes médianes de



**Fig. 1.** Localisation des 38 bassins étudiés. Chaque exutoire est représenté par un point rouge.



**Fig. 2.** Régimes hydrologiques des 38 bassins étudiés.

75 à 968 m et des séries chronologiques de débits couvrant des périodes allant de 22 à 60 ans.

## 2.2 Données

Les séries chronologiques de débits journaliers ont été extraites de la base de données HYDRO (disponible sur [www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)). Les séries de précipitations et températures journalières proviennent de la réanalyse atmosphérique SAFRAN (mailles de 8 km × 8 km) développée par Météo-France (Quintana-Segui *et al.*, 2008 ; Vidal *et al.*, 2010). Elles sont disponibles en continu sur la période 1959–2019 en France et ont été agrégées à l'échelle du bassin versant en suivant la procédure développée par Delaigue *et al.* (2020). L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à l'aide de la formule proposée par Oudin *et al.* (2005) basée sur la

température moyenne journalière de l'air et la latitude. Cette période comprend des conditions de sécheresses sévères en termes de climat (par exemple, les étés 1976, 1989, 2003, 2005, 2011, 2015 et 2017). Le [tableau 1](#) fournit également les gammes de caractéristiques hydro-climatiques des 38 bassins versants. Les conditions hydro-climatiques sont assez variables en termes de précipitations annuelles moyennes, d'ETP et de débit.

## 2.3 Caractérisation des étiages 2017 et 2018

La [figure 3](#) présente l'indice de précipitation et évapotranspiration standardisé (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) pour les 38 bassins versants. C'est un indice de sécheresse inspiré du SPI mais qui prend en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP) en plus de la précipitation. Il inclut donc les effets de la variabilité de l'ETP sur les sécheresses, ce qui permet de mieux contraster des zones à précipitations équivalentes mais sous des régimes de températures différents (Stagge *et al.*, 2014). Il permet de rendre compte d'un état du bilan en eau (sur une durée d'un mois en [figure 3](#)) par rapport à la moyenne (1998–2018) sur cette même durée. Un indice supérieur (resp. inférieur) à 0 présente des conditions plus humides (resp. plus sèches) que la normale. Les dynamiques globales sont similaires : on retrouve globalement les périodes plus sèches et plus humides en même temps pour une très grande majorité de bassins versants, même si certains bassins présentent des tendances différentes (c'est le cas par exemple de l'Hérault à Laroque et du Gardon de Saint-Jean à Corbès dans le sud de la France en août 2017). La variabilité entre bassins peut être conséquente, et particulièrement pour les mois de novembre 2017 et d'octobre 2018 par exemple. Les étiages 2017 et 2018 sont particulièrement sévères, notamment au cours du mois d'octobre 2017 et entre août et octobre 2018, avec des valeurs de SPEI correspondant à des périodes très sèches.

## 3 L'outil de prévision des étiages premhyce

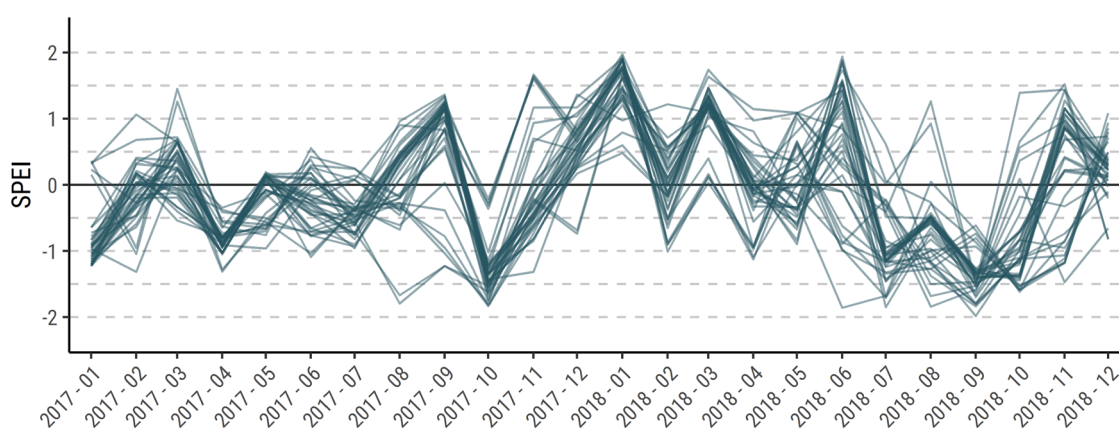
### 3.1 Présentation de la plateforme

Cinq organismes de recherche et d'expertise (BRGM, INRAE, EDF-DTG, université de Lorraine et Météo-France) ont participé à une étude de comparaison de modèles hydrologiques ([Tab. 2](#)) pour la prévision des étiages : GARDÉNIA (Thiery, 2014), GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011), MORDOR SD (Garavaglia *et al.*, 2017), PRESAGES (Lang *et al.*, 2006) et SIM (Habets *et al.*, 2008). Suite à cette phase de recherche (Nicolle *et al.*, 2014), il a été décidé de construire un outil opérationnel de prévision pouvant exploiter l'ensemble des modèles testés.

Les premiers utilisateurs ciblés pour l'utilisation opérationnelle de l'outil de prévision sont les services de l'État en charge du suivi des étiages, en particulier les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) et les directions départementales des territoires (DDT). L'outil, destiné à fournir des informations à ces services pour une meilleure anticipation et gestion des périodes d'étiage, est actuellement en phase de test avec les services partenaires. Les cinq modèles présentés précédem-

**Tableau 1.** Minimum, médiane et maximum de quelques caractéristiques hydro-climatiques des 38 bassins versants.

	Min	Médiane	Max
Superficie (km <sup>2</sup> )	262	913	110 188
Altitude médiane (m)	75	186	968
Disponibilité des débits (années)	23	50,5	61
Précipitation moyenne annuelle P <sub>A</sub> (mm/an)	653	801	1754
Évapotranspiration potentielle moyenne annuelle ETP <sub>A</sub> (mm/an)	596	672	752
Débit moyen annuel Q <sub>A</sub> (mm/an)	96	235	1269
Indice de débit de base (BFI) (%)	36	59	94

**Fig. 3.** Indice de précipitation et évapotranspiration standardisé calculé sur une durée d'un mois sur les 38 bassins versants.**Tableau 2.** Principales caractéristiques des cinq modèles hydrologiques utilisés dans l'outil de prévision PREMHYCE.

Modèle	Institution	Type	Discretisation spatiale	Nombre de paramètres à caler	Méthode d'assimilation	Méthode de post-traitement
GARDÉNIA	BRGM	Conceptuel	Global	4 à 13	Oui	Non
GR6J	INRAE	Conceptuel	Global	6 à 8	Oui	Non
MORDOR SD	EDF-DTG	Conceptuel	Semi-distribué (bandes d'altitudes)	11 à 15	Oui	Non
PRESAGES	Univ. Lorraine	Conceptuel	Global	7 à 10	Oui	Oui
SIM	Météo-France	Base physique	Distribué	Pas de paramètres calés à la station	Non	Oui

ment ont été intégrés dans une plateforme de prévision qui permet de générer des prévisions journalières de débits de manière automatisée sur plus d'une centaine de stations.

À noter que les modèles conceptuels produisent chaque jour de nouvelles prévisions, tandis que le modèle SIM ne produit des prévisions que le premier jour du mois en raison de contraintes de temps de calcul.

### 3.2 Fonctionnement de l'outil de prévision

Les modèles doivent disposer d'une archive climatique pour initialiser leurs états à l'instant de prévision. Les données nécessaires sont des chroniques historiques continues au pas de

temps journalier de précipitations, températures et évapotranspirations potentielles moyennes sur le bassin versant ainsi qu'une série de débits à l'exutoire sur les quelques pas de temps précédant l'instant de prévision de manière à réaliser une assimilation et ajuster les prévisions (à l'exception du modèle SIM qui ne dispose pas d'assimilation en temps réel mais qui effectue un post-traitement pour améliorer les prévisions).

L'outil opérationnel PREMHYCE peut fonctionner selon deux modes :

- temps réel : réalisation d'une prévision à partir des dernières observations disponibles en temps réel ;
- temps différé : réalisation d'une prévision à partir d'une date antérieure spécifiée par l'utilisateur (pour le rejeu d'un événement a posteriori par exemple).

À noter que dans le travail présenté ici, le mode temps différé a été utilisé avec des données validées *a posteriori* et non avec les données acquises en temps réel, ce qui peut conduire à donner une vision légèrement plus optimiste des performances des modèles, les problèmes de données étant alors moindres.

Les résultats des prévisions de débits sont disponibles sous forme de fichiers texte et des fiches de synthèse permettent de visualiser ces résultats pour aider à la prise de décision en temps réel.

## 4 Méthodologie

### 4.1 Prévision hydrologique d'ensemble avec des modèles hydrologiques

Les modèles permettent de prévoir les débits journaliers sur des horizons de prévision  $t + 1$  à  $t + L$  (avec  $L$  l'horizon de prévision maximal), en connaissant à la fois les données météorologiques observées et les débits observés jusqu'au pas de temps  $t$ , et en faisant des hypothèses (choix de scénarios) pour les futures données météorologiques de  $t + 1$  à  $t + L$ . Les observations de débits peuvent être utilisées dans un schéma d'assimilation et/ou dans une procédure de correction statistique.

Les étapes successives de la méthode de prévision des étiages avec des modèles hydrologiques sont les suivantes :

- les états internes des modèles hydrologiques sont initialisés à l'aide d'observations climatiques des conditions passées jusqu'au jour de prévision ;
- les dernières observations de débit peuvent être assimilées, généralement en corrigeant les états internes ou les sorties du modèle ;
- plusieurs scénarios météorologiques sont utilisés comme entrées du modèle pour fournir un ensemble de prévisions de débits de  $t + 1$  à  $t + L$  ;
- les prévisions de débits sont analysées statistiquement afin de fournir des intervalles de confiance des débits possibles sur les horizons de prévision ;
- une correction des débits prévus peut être appliquée, en utilisant les erreurs des modèles en simulation sur les derniers pas de temps avant l'instant de prévision (assimilation de type report d'erreur, appliquée à tous les modèles sauf SIM), ou en appliquant un post-traitement de type quantile-quantile (SIM).

Si cette approche est assez classique, l'originalité de PREMHYCE réside dans le fait qu'elle est appliquée dans un cadre multi-modèle. Cela présente deux avantages potentiels : améliorer les prévisions qui en résultent et mieux tenir compte de l'incertitude structurelle de modélisation. Par souci de simplicité, ces aspects ne sont pas abordés dans la suite de cet article.

### 4.2 Scénarios de prévisions

L'outil opérationnel PREMHYCE adopte l'approche de l'ESP (*Ensemble Streamflow Prediction*) (Day, 1985) en termes de scénarios de prévision météorologiques futurs.

Considérons, pour un bassin donné, que  $N$  années d'observations climatiques historiques sont disponibles. En temps réel, on souhaite faire une prévision un jour  $t$ , c'est-à-dire prévoir des débits entre les jours civils  $t + 1$  et  $t + L$ . Les données météorologiques observées disponibles entre les jours  $t + 1$  et  $t + L$  au cours des années 1 à  $N$  (i.e.  $N$  scénarios) sont utilisées comme scénarios d'entrée pour le modèle, car elles constituent des conditions météorologiques probables pour cette période de l'année. Un scénario de précipitations nulles (c'est-à-dire des précipitations égales à 0 pour les  $L$  prochains jours) est également utilisé pour fournir la prévision du débit dans le cas le plus défavorable. Il est associé à une moyenne interannuelle quotidienne du potentiel d'évapotranspiration.

Ici, 24 années (1991–2014) de données climatiques journalières issues de la réanalyse SAFRAN ont été utilisées pour l'évaluation des années 2017 et 2018.

### 4.3 Évaluation de la qualité des prévisions

Afin de déterminer la qualité des prévisions issues de la plateforme PREMHYCE, la capacité des modèles à anticiper les étiages sévères et à quantifier des débits caractéristiques d'étiages VCN10 est évaluée. D'autres indicateurs auraient également pu être utilisés (par exemple, le QMNA [voir Lang Delus, 2011] pour une discussion des différents indicateurs d'étiage). Les modèles de la plateforme produisent des prévisions à une échéance de 90 jours. Ainsi, il est possible d'évaluer les capacités d'anticipation et de précision entre 1 et 90 jours. Nous présentons ici les résultats obtenus pour les années 2017 et 2018, années durant lesquelles la plateforme a été utilisée en conditions opérationnelles. Les résultats présentés ici ne sont cependant pas issus du fonctionnement en vrai temps réel, mais d'un rejeu *a posteriori*.

#### 4.3.1 Évaluation de l'anticipation

Afin d'évaluer l'anticipation des modèles, un seuil de dépassement/non-dépassement a été fixé. Un débit caractéristique d'étiage a ainsi été considéré : le Q80 (débit dépassé 80 % du temps). Les volumes déficitaires et la date de début de chaque épisode de sécheresse sont ensuite estimés selon la méthode du *Sequent Peak Algorithm* (Thomas et Burden, 1963). L'épisode le plus sévère (volume déficitaire le plus élevé) de chaque année a été retenu.

L'objectif est de déterminer l'échéance la plus lointaine de la date du début de la sécheresse pour laquelle plus de  $X$  % ( $X$  pris ici égal à 50) des scénarios sont effectivement inférieurs au seuil fixé. À partir des prévisions réalisées au cours des 90 jours précédant cette date, le taux de scénarios passant sous le seuil Q80 est calculé. On peut ainsi évaluer l'anticipation sur les deux années étudiées.

#### 4.3.2 Évaluation de la précision

Pour évaluer la précision des prévisions réalisées avec les cinq modèles hydrologiques, les débits caractéristiques d'étiages VCN10 qui correspondent aux débits moyens les plus bas sur 10 jours sont utilisés. Ces valeurs sont calculées pour chaque bassin et chaque année à partir des débits observés.

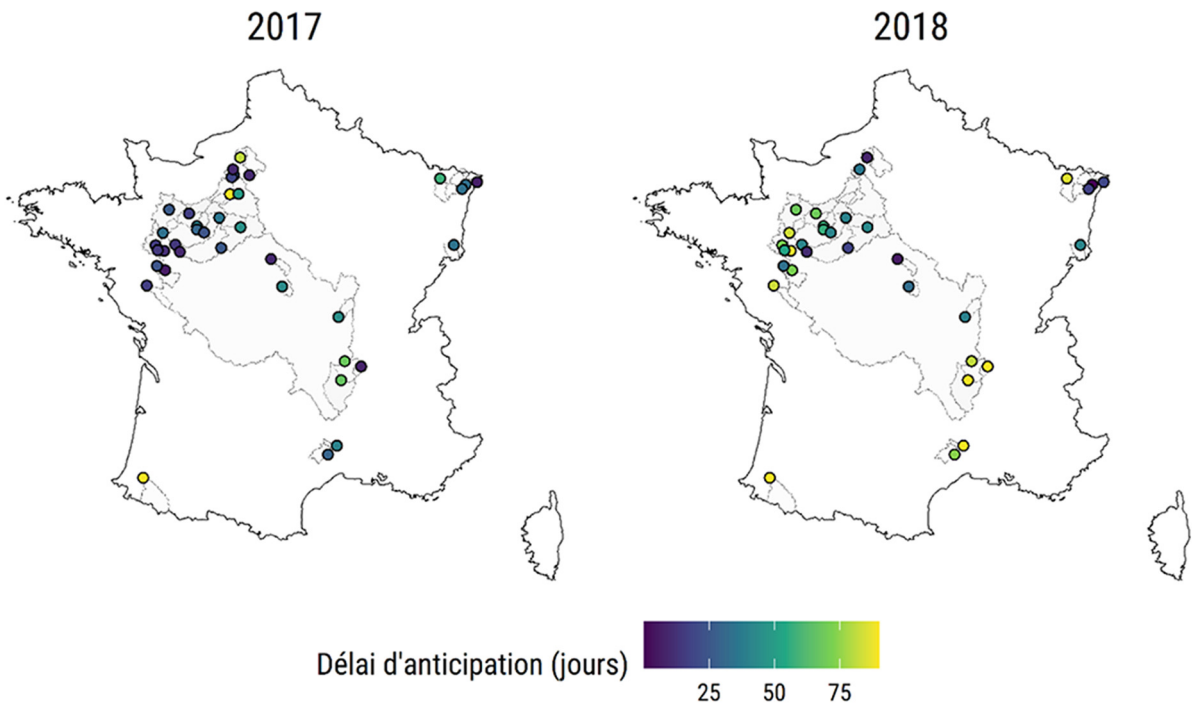


Fig. 4. Cartographie du nombre moyen de jours d'anticipation pour l'ensemble des modèles en 2017 (à gauche) et 2018 (à droite).

Pour chaque modèle, les débits moyens sur 10 jours obtenus aux dates des VCN10 sont calculés pour chaque membre de la prévision d'ensemble et pour une échéance de prévision donnée. Les quantiles 10, 50 et 90 de ces valeurs sont ensuite estimés pour chaque modèle et chaque échéance. Ils permettent de donner un aperçu de la précision des prévisions en période de sécheresse hydrologique.

## 5 Résultats

### 5.1 Anticipation des étiages

La figure 4 présente la carte du nombre moyen de jours d'anticipation obtenu pour l'ensemble des modèles en 2017 et 2018. On observe en moyenne une anticipation de l'ordre de 42 jours pour tous les bassins et tous les modèles. Cette anticipation a été plus importante en 2018 (52 jours) qu'en 2017 (33 jours) et est variable selon les modèles d'une année sur l'autre (32 jours en 2017 contre 59 en 2018 pour GR6J) et entre les modèles (de 37 jours pour SIM à 46 pour MORDOR SD). La cartographie montre que l'anticipation peut être très différente selon les bassins, allant de 6 à 90 jours en 2017, et de 1 à 90 jours en 2018. L'anticipation pour un même bassin entre 2017 et 2018 peut également être très variable. L'anticipation est liée à trois facteurs principaux : l'inertie du bassin, la variabilité climatique et la capacité du modèle à reproduire la dynamique du bassin en basses eaux. Le faible nombre de bassins et leur répartition géographique ne permettent cependant pas de conclure sur des tendances régionales quant aux capacités d'anticipation.

Ces résultats sont fortement dépendants du taux de scénarios sous-passant le seuil utilisé pour considérer que la période de sécheresse est prévue. Un nombre supérieur de scénarios sous-passant le seuil fournirait des résultats plus

pessimistes, et inversement avec un nombre inférieur de scénarios. De même, les estimations d'anticipation dépendent du choix du seuil utilisé pour définir une période de sécheresse.

### 5.2 Précision des prévisions

Afin de simplifier la visualisation des résultats, nous avons choisi de ne présenter que deux échéances spécifiques : une échéance à court terme (7 jours) et une à plus long terme (30 jours). Ces horizons ont été choisis car ils sont utilisés par les gestionnaires de l'eau.

La figure 5 représente les quantiles 10, 50 et 90 des débits moyens sur 10 jours prévus aux échéances 7 jours et 30 jours en fonction du VCN10 observé, pour les années 2017 et 2018 sur les 38 bassins versants étudiés. On observe globalement une bonne correspondance entre les prévisions et les observations, malgré une tendance à la surestimation plus ou moins marquée selon les bassins. À courte échéance, les modèles GARDÉNIA et GR6J présentent des résultats comparables, tandis que la dispersion des valeurs est plus importante pour les modèles PRESAGES et SIM, et dans une moindre mesure pour MORDOR SD sur certains bassins. À plus longue échéance, les valeurs sont globalement plus dispersées. Les modèles GARDÉNIA et GR6J présentent une dispersion plus limitée que MORDOR SD, PRESAGES et SIM.

Les prévisions avec le modèle SIM semblent un peu moins satisfaisantes sur certains bassins, même si les différences avec les autres modèles restent limitées pour les quantiles 10 et 50. La baisse de performance peut s'expliquer par le fait que le modèle SIM n'est pas calé aux stations hydrométriques et est donc pénalisé par rapport aux autres modèles qui sont optimisés aux stations. De plus, les prévisions avec le modèle



**Fig. 5.** Quantiles 10 (rouge), 50 (bleu) et 90 (vert) des débits moyens sur 10 jours prévus en fonction du VCN10 observé sur les années 2017 et 2018 pour les 38 bassins versants étudiés, aux échéances 7 jours (haut) et 30 jours (bas) pour les cinq modèles de la plateforme PREMHYCE.

SIM ne sont réalisées que le premier jour du mois et la mise à jour des prévisions n'est donc pas possible au cours du mois.

## 6 Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté les résultats des cinq modèles hydrologiques utilisés dans la plateforme PREMHYCE pour la prévision des étiages. L'étude a été menée sur un jeu de 38 bassins versants français aux caractéristiques physiques et hydro-climatiques variées. Un rejou des années 2017 et 2018 a été effectué et les capacités d'anticipation et de précision des modèles ont été évaluées.

La capacité d'anticipation des périodes d'étiage s'est révélée bonne et les modèles ont montré leurs capacités à reproduire le débit caractéristique VCN10 à court terme (7 jours) et à long terme (30 jours) malgré une tendance à la surestimation et une diminution de la précision avec l'augmentation de l'échéance de prévision.

Pour améliorer les prévisions à court terme et mieux répondre aux attentes des utilisateurs, l'outil de prévision PREMHYCE utilise depuis peu les prévisions météorologiques d'ensemble du Centre européen (CEPMMT) en entrée des modèles hydrologiques. Des améliorations sont également attendues de la mise en place d'une approche multi-modèle.

**Remerciements.** Les auteurs remercient Météo-France pour la fourniture des données météorologiques et le Service central hydrométéorologique d'appui à la prévention des inondations (SCHAPI) pour la fourniture des données de débit. Nous remercions également les directions régionales de l'environnement (DREAL) et les directions départementales des territoires (DDT) pour la fourniture des données de débit et leurs contributions au projet. Le projet PREMHYCE a été financé par l'Office français de la biodiversité (OFB) et suivi par la Direction de l'eau et de la biodiversité du ministère de la

Transition écologique. Enfin, nous remercions les deux relecteurs anonymes pour leurs commentaires détaillés sur une version antérieure de l'article, qui ont permis d'en améliorer la qualité.

## Références

- Acreman MC, Dunbar MJ. 2004. Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrol Earth Syst Sci* 8(5): 861–876. Available from <https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004>.
- Bousquet S, Gaume E, Lancelot B. 2003. Évaluation des enjeux socio-économiques liés aux étiages de la Seine. *La Houille Blanche* (3): 145–149. Disponible sur <https://doi.org/10.1051/lhb/2003066>.
- Chataigner J, Michon J. 2017. Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau (données 2013), bulletin n° 2, note de synthèse. Agence française pour la biodiversité.
- Chiew FHS, McMahon TA. 2002. Global ENSO-streamflow teleconnection, streamflow forecasting and interannual variability. *Hydrol Sci J* 47(3), 505–522. Available from <https://doi.org/10.1080/02626660209492950>.
- Crochemore L, Ramos M-H, Pappenberger F, Perrin C. 2017. Seasonal streamflow forecasting by conditioning climatology with precipitation indices. *Hydrol Earth Syst Sci* 21(3): 1573–1591. Available from <https://doi.org/10.5194/hess-21-1573-2017>.
- Day G. 1985. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *J Water Resour Plan Manag* 111(2): 157–170.
- Delaique O, Génot B, Lebecherel L, Brigode P, Bourgin PY. 2020. Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. Antony: Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group. Available from <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- Demirel MC, Booij MJ, Hoekstra AY. 2015. The skill of seasonal ensemble low-flow forecasts in the Moselle River for three different hydrological models. *Hydrol Earth Syst Sci* 19(1): 275–291. Available from <https://doi.org/10.5194/hess-19-275-2015>.
- Garavaglia F, Lay ML, 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(8): 3937–3952. Available from <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>.
- Habets F, Boone A, Champeaux JL, *et al.* 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J Geophys Res* 113(D6): D06113. Available from <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>.
- Habets F, Ackerer P, Amraoui N, *et al.* 2015. AQUI-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale. *Géologues* (187): 105–109.
- Karamouz M, Araghinejad S. 2008. Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: case study. *J Irrig Drain Eng* 134(4): 471–478. Available from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:4\(471\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(471)).
- Lang C, Freyermuth A, Gille E, François D. 2006. Le dispositif PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Étiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages. *Géocarrefour* 81(1): 15–24. Disponible sur <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1715>.
- Lang Delus C. 2011. Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo, Environnement, Nature, Paysage* (571). Disponible sur <https://doi.org/10.4000/cybergeo.24837>.
- Nicolle P, Pushpalatha R, Perrin C, *et al.* 2014. Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 18(8): 2829–2857. Available from <https://doi.org/10.5194/hess-18-2829-2014>.
- Oudin L, Hervieu F, Michel C, *et al.* 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *J Hydrol* 303(1–4):290–306. Available from <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Pushpalatha R, Perrin C, Le Moine N, Mathevet T, Andréassian V. 2011. A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *J Hydrol* 411(1–2): 66–76. Available from <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.034>.
- Quintana-Segui P, Le Moigne P, Durand Y, *et al.* 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France. *J Appl Meteorol Climatol* 47(1): 92–107.
- Risva K, Nikolopoulos D, Efstratiadis A, Nalbantis I. 2018. A framework for dry period low flow forecasting in Mediterranean streams. *Water Resour Manag.* Available from <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2060-z>.
- Stagge JH, Tallaksen LM, Xu CY, Van Lanen HAJ. 2014. Standardized precipitation–evapotranspiration index (SPEI): sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters. *IAHS Publ* (363): 367–373.
- Thiery D. 2014. Logiciel GARDENIA, version 8.2, guide d'utilisation [GARDENIA software, version 8.2, user guide] (No. BRGM/RP-62797-FR 102). BRGM, 129 p.
- Thomas HA Jr, Burden RP. 1963. Operations research in water quality management. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, pp. 1–17.
- Vergnes JP, Roux N, Habets F, *et al.* 2020. The AQUIFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period. *Hydrol Earth Syst Sci* 24(2): 633–654. Available from <http://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020>.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 23(7): 1696–1718. Available from <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- 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. *Int J Climatol* 30(11): 1627–1644. Available from <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.

**Citation de l'article** : Tilmant F, Nicolle P, Bourgin F, Besson F, Delaigue O, Etchevers P, François D, Le Lay M, Perrin C, Rousset F, Thiéry D, Magand C, Leurent T, Jacob É. 2020. PREMHYCE : un outil opérationnel pour la prévision des étiages. *La Houille Blanche* : 37–44