



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



Programmation 2013 – Thème Hydrologie – Action 6

Prévision des Etiages par des Modèles Hydrologiques : Comparaison et Evaluation (Projet PREMHYCE) – Rapport de synthèse

Rapport final

**Pierre NICOLLE, Charles PERRIN, Vazken
ANDRÉASSIAN, François BESSON, Didier
FRANÇOIS, Matthieu LE LAY, Thibault MATHEVET,
Fabienne REGIMBEAU, Jean-Michel SOUBEYROUX,
Dominique THIÉRY, Christian VIEL, Bénédicte
AUGEARD, Pascal MAUGIS et Emmanuel MORICE**

Février 2014

Partenariat entre :

l'Institut national de recherche en sciences et technologie
pour l'environnement et l'agriculture



le BRGM



EDF-DTG



Météo-France



l'Université de Lorraine



Avec le soutien de :

l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques



la Direction de l'Eau et de la Biodiversité
du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie



- **AUTEURS**

Pierre NICOLLE, Irstea, pierre.nicolle@irstea.fr

Charles PERRIN, Irstea, charles.perrin@irstea.fr

Vazken ANDRÉASSIAN, Irstea, vazken.andreassian@irstea.fr

François BESSON, Météo-France, francois.besson@meteo.fr

Didier FRANÇOIS, CEGUM, Université de Lorraine, didier.francois@univ-metz.fr

Matthieu LE LAY, EDF-DTG, matthieu.le-lay@edf.fr

Thibault MATHEVET, EDF-DTG, thibault.mathevet@edf.fr

Fabienne REGIMBEAU, Météo-France, fabienne.regimbeau@meteo.fr

Jean-Michel SOUBEYROUX, Météo-France, jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

Dominique THIÉRY, BRGM, d.thiery@brgm.fr

Christian VIEL, Météo-France, christian.viel@meteo.fr

Bénédicte AUGÉARD, ONEMA, benedicte.augeard@onema.fr

Pascal MAUGIS, ONEMA, maintenant à IPSL-LSCE, pascal.maugis@lsce.ipsl.fr

Emmanuel MORICE, DEB – MEDDE, emmanuel.morice@developpement-durable.gouv.fr

- **CORRESPONDANTS**

ONEMA :

Bénédicte AUGÉARD, Chargée de mission Hydrologie quantitative, ONEMA,
benedicte.augeard@onema.fr

MEDDE :

Emmanuel MORICE, DEB – MEDDE, emmanuel.morice@developpement-durable.gouv.fr

Irstea :

Pierre NICOLLE, Irstea, pierre.nicolle@irstea.fr

Charles PERRIN, Irstea, charles.perrin@irstea.fr

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

Droits d'usage : Accès libre

Niveau géographique : National

Couverture géographique : France métropolitaine et La Réunion

Niveau de lecture : Professionnels, Experts

• RESUME

Les étiages revêtent des enjeux environnementaux et socio-économiques très importants, et les perspectives d'évolution des pressions sur la ressource et des conditions climatiques rendent cruciale la mise au point d'outils performants pour l'estimation et l'anticipation des étiages. Dans ce contexte, le projet PREMHYCE (PRévision des Étiages par des M odèles H ydrologiques : C omparaison et E valuation) a eu pour objectif d'évaluer les performances de modèles hydrologiques de simulation et de prévision des étiages sur un ensemble de bassins versants français.

Les travaux ont porté sur cinq modèles hydrologiques, à savoir les modèles Gardenia du BRGM, GR6J d'Irstea, Isba-Modcou de Météo-France, Mordor d'EDF-DTG et Presages de l'Université de Metz. Ces modèles sont utilisés en France et considérés comme opérationnels ou pré-opérationnels. Ils sont le résultat de modes de développement variés et d'expertises diverses. Chaque concepteur de modèle avait en charge de réaliser les tests de son modèle, en suivant un protocole commun d'évaluation défini collectivement en début de projet, et de fournir les résultats pour une évaluation globale. Ce protocole définissait des modalités des tests se rapprochant autant que possible des conditions réelles d'utilisation, un ensemble de critères numériques et graphiques pour évaluer les performances des modèles, et des modèles de référence (« benchmark ») définissant des attentes minimales en termes de performances. Deux modes d'évaluation ont été traités : la simulation (utile notamment pour des applications de reconstitution ou de prédétermination des étiages) et la prévision (dans un objectif d'anticipation des périodes d'étiage). Le premier a été réalisé dans un cadre déterministe (une simulation par modèle) alors que le second l'a été dans un cadre probabiliste (en utilisant un ensemble de scénarios météorologiques futurs).

Dans une première phase, les tests ont porté sur un échantillon de 24 bassins versants considérés comme naturels (non influencés), répartis sur le territoire métropolitain et à la Réunion, et présentant des caractéristiques physiques et hydrométéorologiques très diversifiées. Un autre échantillon de 11 bassins métropolitains pour lesquels des données sur les influences (essentiellement liées à des barrages et des prélèvements) étaient disponibles, a ensuite permis une seconde phase de test pour mesurer la capacité des modèles. Les bases de données correspondantes ont été construites en collaboration avec les services hydrométriques régionaux, Météo-France et des gestionnaires d'ouvrages, ce qui a permis de regrouper de longues séries d'enregistrements hydrométéorologiques présentant un certain nombre d'événements d'étiages sévères.

Les résultats montrent que plusieurs modèles donnent des résultats proches, que ce soit en simulation ou en prévision. Bien que certains modèles soient apparus plus robustes que d'autres, il n'a pas été possible d'identifier un unique modèle donnant les meilleures performances sur tous les bassins d'étude et tous les critères sélectionnés. Malgré la diversité des caractéristiques des bassins versants étudiés et des modèles testés, il n'a pas été possible de mettre en évidence de typologie entre bassins et modèles. Le niveau de performance atteint a été très variable d'un bassin à un autre, et la proximité des résultats des modèles également. En prévision, les délais d'anticipation utiles allant de seulement quelques jours jusqu'à plusieurs semaines ont été obtenus, en fonction des performances des modèles et de l'inertie des processus souterrains générant les écoulements en étiage sur les bassins. La construction d'un multi-modèle a montré que la combinaison des résultats des modèles pouvait apporter une plus-value importante sur la simulation et la prévision des étiages. Sur les bassins influencés, la prise en compte de ces influences, même si elle a montré certaines limites en contexte prévisionnel, a permis d'atteindre des niveaux de performance comparables à ceux obtenus sur les bassins influencés. Globalement, les meilleurs modèles ont permis d'atteindre des délais d'anticipation utiles au moins aussi long que sur les bassins non-influencés.

Ces travaux ouvrent la voie au développement d'outils de simulation et de prévision des étiages pour les services opérationnels, qui seraient basés sur l'ensemble ou une partie des modèles testés, avec par exemple la mise en place d'une approche multi-modèle.

• MOTS CLES

Etiage ; Modèle hydrologique ; Simulation ; Prévision ; Comparaison ; Benchmark ; Débit ; Influence ; France

- **LOW-FLOW FORECASTING USING HYDROLOGICAL MODELS: COMPARISON AND EVALUATION (PREMHYCE PROJECT) – SYNTHESIS REPORT**

- **ABSTRACT**

Low-flows are concerned by important environmental and socio-economic issues. Outlooks about pressure on resource and climatic condition make it crucial to develop performant tools to estimate and anticipate low-flow situations. In this context, the PREMHYCE project (Low-flow forecasting with hydrological models: comparison and evaluation) aimed to evaluate performances of low-flows forecasting and simulation hydrological models on a set of French catchments.

Five hydrological models were evaluated: Gardenia from BRGM, GR6J from Irstea, Isba-Modcou from Météo-France, Mordor from EDF-DTG and Presages from University of Metz. These models are used in France and considered as operational or pre-operational. They result from various development mode and expertise. Each modeler had to test his model following a common evaluation protocol, which was established at the beginning of the project. The results had to be providing for an overall evaluation. The evaluation protocol aimed to define the test method to be closed to real use condition. An ensemble of numerical and graphical criteria was chosen to evaluate model performances, and a reference model (benchmark) was used to define minimal expectation in term of performances. Two evaluation modes were handled: simulation (useful for reconstitution application or low-flow predetermination) and forecasting (to anticipate low-flow situation). Simulation was realized in a deterministic framework (one simulation per model) while forecasting was in a probabilistic framework (using an ensemble of future meteorological scenarios).

A first step consisted in evaluating models on a set of 24 natural (non-influenced) catchments, in metropolitan France and in la Réunion island. They present various physical and hydrometeorological conditions. A second step consisted in using another set of 11 influenced catchments in metropolitan France where influence data were available (dams and water levies). An important database was elaborate in collaboration with regional hydrometric departments, Météo-France and reservoir managers, and provide a number of severe low-flow situations.

Results show that several models provide similar results, in simulation and forecasting. Although a few models appeared more robust, it was not possible to identify a best model on all catchments and criteria. Despite the characteristic diversity of catchments and models, it was not possible to highlight a typology between catchments and models. Performances were variable in function of catchments, as well as model results similarity. In forecasting mode, useful forecasting lead-time range to a few days to a few weeks. They are function of models performances and of groundwater process inertia which causes low-flows on catchments. A combination of the models into a multi-model showed an important added value on low-flow simulation and forecasting. Taking into account influences on influenced catchments allowed getting similar performances as on natural catchments, even if it is more limited in forecasting. Overall, best models have achieved useful forecasting lead-time as long as on natural catchments.

These works allows developing low-flow simulation and forecasting operational tools, based on all or part of the tested models, e.g. in implementing a multi-model approach.

- **KEY WORDS**

Low flows; Hydrological model; Simulation; Forecast; Comparison; Benchmark; Discharge; Influence; France

SOMMAIRE

1.	Contexte et objectifs du projet PREMHYCE.....	7
1.1.	Pourquoi prévoir les étiages ?.....	7
1.2.	Les modèles hydrologiques pour la prévision des étiages.....	7
1.3.	Expérience sur la prévision d'étiage en France.....	7
1.4.	Objectifs du projet PREMHYCE	8
2.	Bassins et données	9
2.1.	Bassins versants naturels	10
2.2.	Bassins versants influencés.....	11
3.	Modèles hydrologiques testés	12
4.	Protocole de test.....	14
4.1.	Tests en simulation et prévision	14
4.2.	Scénarios pour la prévision.....	15
4.3.	Périodes d'évaluation.....	15
4.4.	Critère d'analyse des performances des modèles.....	16
4.5.	Horizon de prévision utile.....	19
4.6.	Mise en œuvre concrète des tests et des analyses.....	19
5.	Principaux résultats en simulation.....	19
5.1.	Bassins versants non influencés	21
5.1.	Bassins versants influencés.....	21
6.	Principaux résultats en prévision	23
6.1.	Bassins versants non influencés	24
6.1.	Bassins versants influencés.....	27
6.2.	Evaluation des horizons de prévision utiles.....	30
7.	Conclusion générale.....	31
	Références.....	33
	Table des illustrations.....	34
	Remerciements	35
	Annexe 1 : Liste des bassins versants non influencés.....	36
	Annexe 2 : Liste des bassins versants influencés.....	37
	Annexe 3 : Critères numériques en simulation.....	38
	Annexe 4 : Critères numériques en prévision	39
	Annexe 5 : Horizons de prévision utiles déterminés pour trois critères de performance pour chacun des bassins versants influencés et non-influencés sur les deux périodes de validation	41

1. Contexte et objectifs du projet PREMHYCE

1.1. Pourquoi prévoir les étiages ?

Dans de nombreux pays, les rivières sont la principale source d'approvisionnement en eau. Par exemple en France, 81 % des 33 km³ prélevés provenaient des rivières en 2009. L'approvisionnement en eau potable, l'irrigation, la navigation, la production énergétique (hydroélectricité et refroidissement de centrales) sont largement tributaires des ressources en eau de surface et peuvent être fortement affectés par des pénuries d'eau dans les rivières, et ce d'autant plus que la réglementation accorde une importance croissante au maintien de la qualité écologique des cours d'eau, imposant notamment le maintien de débits minimaux.

L'anticipation précoce des périodes d'étiage est donc nécessaire pour améliorer la gestion de l'eau et prendre des mesures adaptées pour atténuer les impacts socio-économiques et écologiques des pénuries d'eau. Les sécheresses extrêmes, qui ont eu lieu en Europe de l'Ouest en 1921, 1949, 1976 et plus récemment en 2003, soulignent la nécessité de systèmes d'anticipation performants. En outre, la perspective d'étiages plus marqués dans un contexte de changement climatique souligne la nécessité d'outils de gestion appropriés pour les faibles débits. Malgré cela, les outils opérationnels de prévision des étiages sont encore très limités dans de nombreux bassins et beaucoup moins développés que ceux dédiés à la prévision des crues.

En dépit de premières tentatives dès les années 1960 pour développer des modèles dédiés aux étiages, la prévision d'étiage n'a reçu que peu d'attention dans la littérature scientifique et technique comparativement à la prévision des crues. Bien que d'essences très similaires, les deux exercices ont en fait des différences marquées, essentiellement en raison des différences de dynamique des crues et des étiages. En effet, les faibles débits sont des phénomènes durables avec une dynamique lente, contrairement aux crues. En outre, les attentes sont différentes en termes de délais d'anticipation, qui sont plus longs dans le cas de faibles débits, allant généralement de quelques jours à quelques semaines. Notons que nous ne nous intéresserons pas ici à la prévision saisonnière.

1.2. Les modèles hydrologiques pour la prévision des étiages

Les modèles hydrologiques sont des outils essentiels pour la prévision des étiages. Les premiers modèles conçus pour cela correspondaient à des modèles linéaires de type ARMA¹ et des courbes de récession non influencée.

Cependant, ces méthodes font généralement l'hypothèse d'une absence de précipitations futures, ce qui est le cas le plus pessimiste, mais souvent pas vraiment réaliste quand un délai de quelques semaines est considéré. Pour améliorer la pertinence des prévisions, il est nécessaire de tenir compte des conditions météorologiques futures. En raison de l'incertitude sur ces conditions futures (principalement en termes de température et de précipitations), la méthode habituellement utilisée pour émettre des prévisions d'étiage consiste à alimenter un modèle hydrologique avec un ensemble de scénarios météorologiques décrivant la gamme de conditions futures probables, et à analyser statistiquement les résultats des modèles pour la période cible.

1.3. Expérience sur la prévision d'étiage en France

En France, les premières initiatives visant à développer des modèles opérationnels de prévision des étiages remontent aux années 1960 et 1970, avec l'utilisation de méthodes simples basées

¹ Auto-Regressive Moving Average

sur l'analyse statistique des caractéristiques d'écoulement et des courbes de récession. Cela a coïncidé avec l'augmentation des capacités de production hydroélectrique dans les régions montagneuses et le développement d'un réseau dense de centrales nucléaires dans les zones de plaine, qui ont besoin d'une source en eau fiable pour le refroidissement. Dans ce contexte, des modèles linéaires de prévision, fonction des informations amont ont par exemple été développés par EDF sur la Loire et la Seine. Des modèles hydrologiques conceptuels ont ensuite été utilisés pour surmonter les limitations des méthodes basées sur la régression simple.

Parmi les premières tentatives d'utilisation de modèles conceptuels, on retrouve des travaux du CTGREF sur le bassin de la Durance à la fin des années 1970, pour améliorer la gestion de l'eau d'irrigation en période d'étiage. Ce modèle prenait en compte l'influence de la neige sur ce bassin. Le BRGM, qui a travaillé sur les prévisions des niveaux dans les aquifères dans les années 1980, a ensuite développé un modèle conceptuel de prévision des étiages (le modèle GARDENIA), qui est aujourd'hui utilisé en conditions opérationnelles. EDF a également été actif dans le développement d'outils opérationnels et a mis en place un système de prévision basé sur un modèle hydrologique (MORDOR) dans les années 1990 afin de mieux gérer les réservoirs dans le bassin Durance. Ce système a ensuite été étendu à d'autres bassins dans les régions montagneuses où EDF gère des barrages, notamment le bassin de la Loire. En utilisant des méthodes similaires, Irstea (anciennement Cemagref) a progressivement fait évoluer son modèle de simulation (GR4J) pour améliorer ses performances pour des objectifs de simulation ou de prévision. De son côté, l'Université de Lorraine a développé une plateforme d'analyse et de prévision des étiages basée sur un modèle hydrologique conceptuel et mise en œuvre sur le nord-est de la France (bassins de la Meuse, de la Moselle et du Rhin). Enfin, Météo-France utilise sa chaîne de modélisation Safran-Isba-Modcou (SIM) qui couvre toute la métropole pour évaluer la prévisibilité des étiages.

1.4. Objectifs du projet PREMHYCE

Ces différents modèles de prévision qui existent aujourd'hui en France, ont été développés par des groupes indépendants, et n'ont jamais été évalués de manière à pouvoir en cerner les forces et faiblesses respectives. Il est donc difficile pour un utilisateur de savoir quel outil choisir, relativement à ses objectifs d'application et aux caractéristiques de son bassin. Or, il existe aujourd'hui une forte demande dans les services opérationnels chargés du suivi des étiages (notamment les Directions régionales de l'environnement – DREAL) pour disposer d'outils performants d'aide à l'anticipation de situations critiques, de manière à en permettre une meilleure gestion.

Partant de ce constat, l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), en coordination avec la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du Ministère de l'écologie (MEDDE), a lancé en 2011 le projet PREMHYCE (PRévision des Etiages par des Modèles Hydrologiques : Comparaison et Evaluation). L'objectif de ce projet était d'évaluer les forces et faiblesses des modèles de prévision d'étiage existants, en les plaçant dans des conditions proches de conditions réelles d'utilisation. Les résultats de ces tests devaient ainsi alimenter la réflexion sur la faisabilité de produits opérationnels de prévision et sur les voies de recherche à suivre pour améliorer ces modèles.

Coordonné par Irstea et réalisé en partenariat avec des équipes de recherche issues du BRGM, d'EDF-DTG, de Météo-France et de l'Université de Lorraine, ce projet a duré trois ans (2011-2013) et a été réalisé en trois phases :

- Phase 1 : Mise en place d'un protocole de test et d'évaluation, et de bases de données de travail,
- Phase 2 : Test des modèles en simulation et prévision sur bassins naturels,
- Phase 3 : Test des modèles en simulation et prévision sur bassins influencés.

On entend ici par simulation l'exercice d'estimation du débit à un instant t connaissant les informations météorologiques sur le bassin jusqu'à cet instant, et par prévision l'exercice, à partir d'un instant t , d'estimation des débits futurs en t et $t+L$ (L étant l'horizon de prévision), connaissant les conditions antérieures et utilisant un ou plusieurs scénarios de conditions météorologiques futures.

Ce rapport de synthèse présente les principaux résultats des travaux réalisés dans ces différentes phases. Dans ce qui suit, on détaille tout d'abord la base de données mise en place, les modèles testés et le protocole de test établi pour tester les modèles en simulation et en prévision. Sont ensuite présentés les principaux résultats suivant ces deux modes d'application, à chaque fois sur bassins influencés et non influencés.

Ce rapport synthétise des éléments issus d'un certain nombre de rapports intermédiaires écrits au cours du projet, en particulier :

- Perrin et al. (2011), Prévision des étiages – Développement et comparaison de méthodes
- Nicolle et al. (2012a), Projet PREMHYCE : Protocole d'évaluation et base de données
- Nicolle et al. (2012b), Projet PREMHYCE : note relative aux critères basés sur les caractéristiques d'étiage : volume déficitaire, durée, date de début et de fin d'étiage
- Nicolle et al. (2012c), Projet PREMHYCE : résultats de la comparaison des modèles de simulation d'étiage
- Nicolle et al. (2013a), Projet PREMHYCE : résultats de la comparaison des modèles de prévision d'étiage
- Nicolle et al. (2013b), Projet PREMHYCE : développement d'un multi-modèle pour la simulation et la prévision d'étiage
- Nicolle et al. (2013c), Projet PREMHYCE : description de la base de données pour l'étude sur des bassins versants influencés
- Nicolle et al. (2014a), Projet PREMHYCE : résultats de la comparaison des modèles de simulation et prévision d'étiage – Bassins influencés

Des éléments plus détaillés sont donc disponibles dans ces rapports, disponibles auprès de l'ONEMA ou des auteurs.

2. Bassins et données

Les travaux ont porté sur deux échantillons de bassins :

- 24 bassins dits naturels, pour lesquels on peut considérer que les influences sur les étiages sont négligeables ;
- 11 bassins versants présentant des étiages significativement influencés par les activités humaines, en particulier la régulation des débits par des ouvrages et les prélèvements.

Pour chaque échantillon, une base de données au pas de temps journalier a été mise en place. Elle comprend des données de précipitation, de température et d'évapotranspiration potentielle, ainsi que des données hydrométriques à l'exutoire de chaque bassin. Pour les bassins influencés, ont également été rajoutées des données quantifiant les influences. Ces bases de données ont été mises à disposition des modélisateurs du projet, tout le monde bénéficiant ainsi des mêmes informations.

Nous donnons dans ce qui suit une description succincte de ces deux échantillons.

2.1. Bassins versants naturels

Les 24 bassins versants sélectionnés correspondent à 22 bassins situés en métropole (voir Figure 1) et deux sur l'île de la Réunion (Figure 2). La liste détaillée des bassins, avec un certain nombre de caractéristiques, est fournie en Annexe 1. Les bassins ont été sélectionnés de manière à représenter une bonne couverture du territoire et des caractéristiques physiques et hydroclimatiques variées.



Figure 1 : Localisation des 22 bassins versants naturels sélectionnés en France métropolitaine

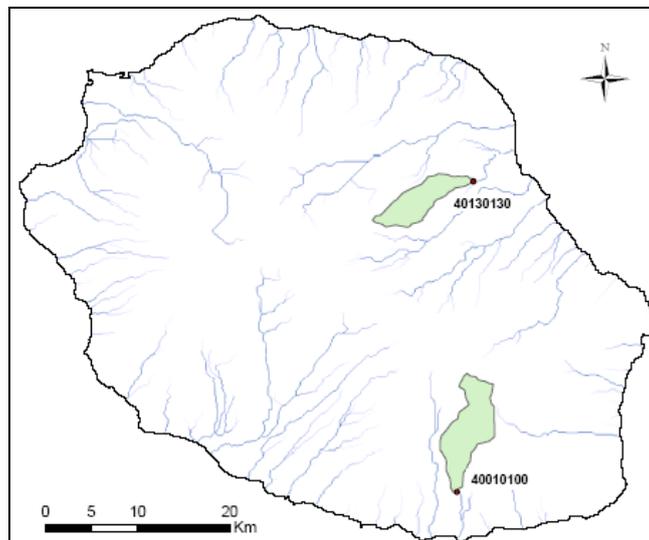


Figure 2 : Localisation des deux bassins versants naturels sélectionnés sur l'île de la Réunion

Les données climatiques journalières ont été fournies par Météo-France, et correspondent à la base SAFRAN sur le territoire métropolitain et à des données au sol à la Réunion. Les données de débit ont été extraites de la banque HYDRO ou fournies par l'Office de l'Eau Réunion. Toutes les chroniques hydrométriques sélectionnées en métropole possèdent des données à partir du 1er janvier 1974 jusqu'à fin 2009, soit 36 ans de données (hors lacunes sur certains bassins).

Cela inclut donc les étiages sévères de 1976, 1990 ou 2003. Pour la Réunion, les chroniques sélectionnées couvrent la période 1990-2011.

Pour chaque bassin, deux périodes ont été identifiées au sein des séries disponibles pour réaliser les tests des modèles (voir Tableau 1). Chaque période comprend une période d'initialisation assurant un bon fonctionnement du modèle (voir protocole de test détaillé plus loin).

Tableau 1 : Périodes de test sélectionnées sur les bassins versants non influencés

	Début	Fin
Métropole		
Initialisation 1	01/01/1971	31/12/1973
Période test 1	01/01/1974	31/12/1991
Initialisation 2	01/01/1989	31/12/1991
Période test 2	01/01/1992	31/12/2009
Réunion		
Initialisation 1	01/01/1987	31/12/1989
Période test 1	01/01/1990	31/12/2000
Initialisation 2	01/01/1998	31/12/2000
Période test 2	01/01/2001	31/12/2011

2.2. Bassins versants influencés

Les tests ont porté sur 11 bassins versants influencés répartis sur le territoire métropolitain, dont 9 par des barrages réservoirs (bassins de la Loire, la Seine et la Meurthe) et 2 par des prélèvements agricoles (bassin de la Sèvre Niortaise) (voir Figure 3 et Annexe 2 pour la liste détaillée).

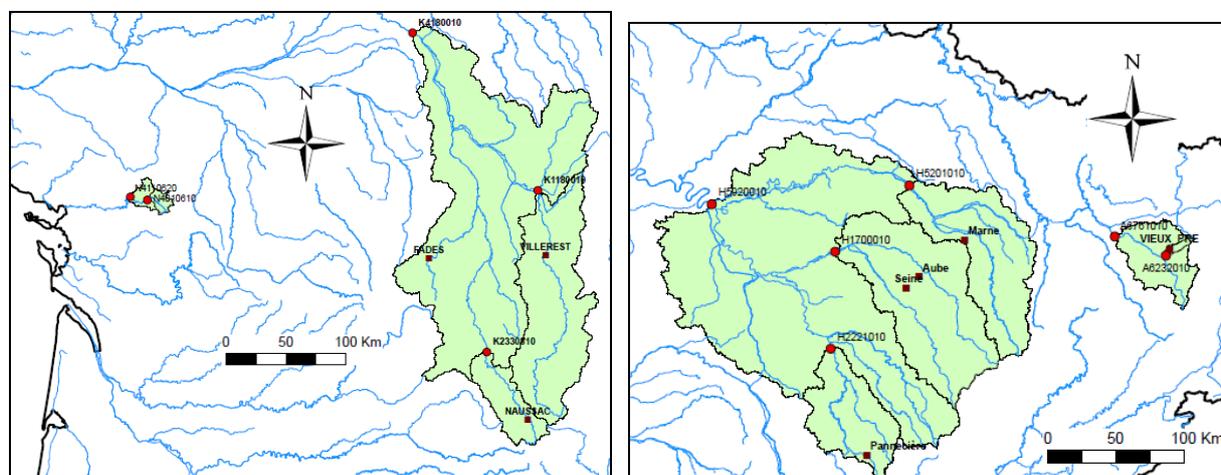


Figure 3 : Localisation des bassins versants sélectionnés, à gauche sur la Sèvre et la Loire, à droite sur la Seine et la Meurthe

Les données hydroclimatiques utilisées sont issues des mêmes bases de données que pour les bassins non-influencés. Des données ont en plus été regroupées pour pouvoir quantifier les influences. Il s'agit des volumes journaliers stockés (ou les variations de volumes) dans les réservoirs, et des volumes prélevés dans le cas de l'irrigation. Comme pour les bassins influencés, deux périodes test ont été définies. Cependant, compte tenu du caractère assez contraignant des données de prélèvement, les périodes test sont spécifiques à chaque grand ensemble hydrographique (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Périodes de test sélectionnées sur les bassins versants influencés

Code	Initialisation 1		Période 1		Initialisation 2		Période 2	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
Meurthe	01/01/1987	31/12/1989	01/01/1990	31/12/1999	01/01/1997	31/12/1999	01/01/2000	31/12/2009
Seine	01/01/1985	29/02/1988	01/03/1988	31/12/1998	01/01/1996	31/12/1998	01/01/1999	31/12/2008
Loire	01/01/1982	01/01/1985	02/01/1985	31/12/1997	01/01/1995	31/12/1997	01/01/1998	31/12/2009
Sèvre Niortaise	01/01/1996	31/12/1998	01/01/1999	31/12/2004	01/01/2002	31/12/2004	01/01/2005	31/12/2009

3.Modèles hydrologiques testés

Dans le cadre du projet PREMHYCE, cinq modèles (voir Tableau 3 et Figure 4) ont été testés. Il s'agit de modèles hydrologiques continus, s'appuyant sur des conceptions assez différentes, mais fonctionnant en simulation et en prévision sur des principes communs et ayant des données d'entrée similaires. Cela facilite largement la procédure de test et la comparaison des résultats. Un questionnaire, distribué aux participants du projet, a permis de dresser un panorama général des caractéristiques détaillées de ces modèles, utiles notamment pour en déterminer les contraintes de fonctionnement.

Tableau 3 : Liste des cinq modèles hydrologiques testés

Modèle	Nom utilisé ici	Institution responsable des tests dans PREMHYCE
GARDENIA	GARD	BRGM
GR6J	GR5J	Irstea
MORDOR	MORD	EDF-DTG
PRESAGES	PRES	Université de Lorraine
Isba - Modcou	SIM	Météo-France

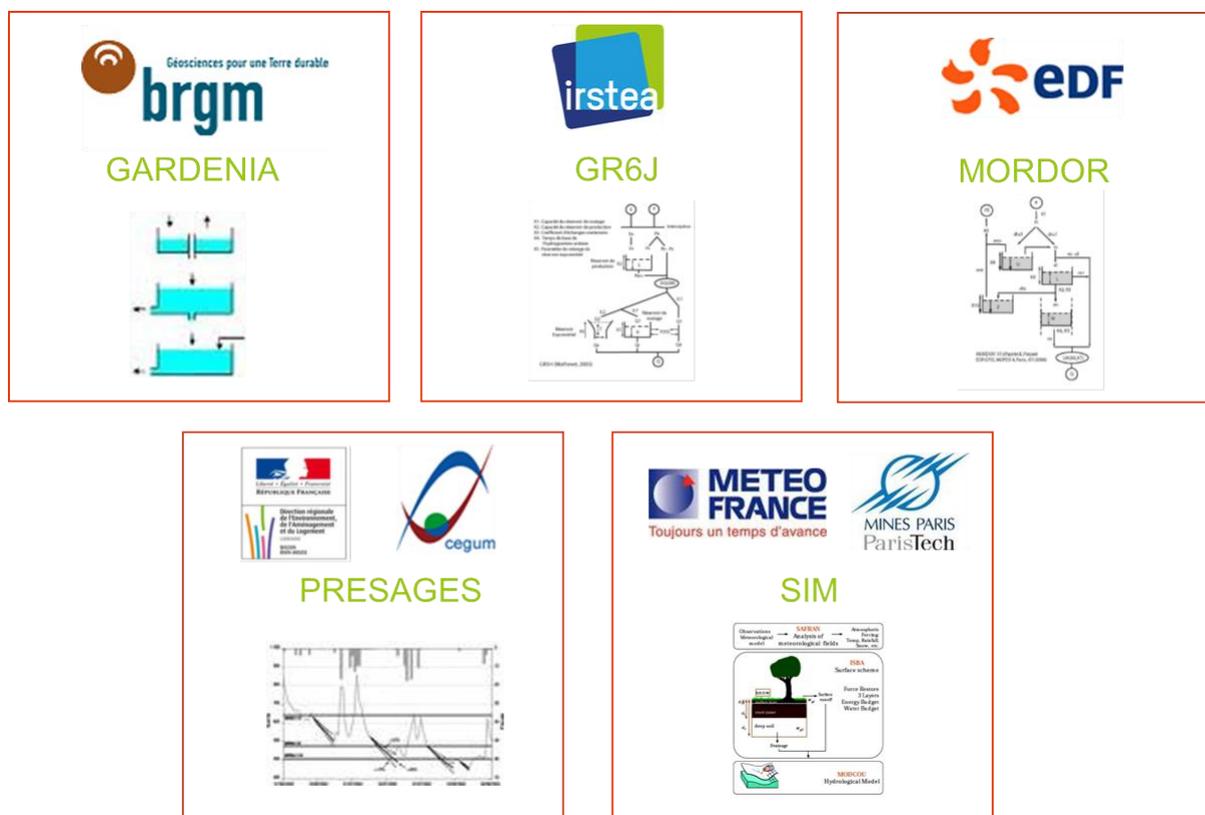


Figure 4 : Illustration des cinq modèles testés

Tous les modèles testés sont des modèles continus (simulation du cycle hydrologique complet) et peuvent donc être utilisés tout au long de l'année. Ils incluent tous des variables internes permettant de représenter des stocks d'eau sur le bassin. Ils dépendent de paramètres, donc le mode d'estimation était laissé au choix de chaque modélisateur. Il est important de mentionner que tous les modèles ont utilisé des procédures de calage des paramètres à la station hydrométrique considérée, à l'exception de SIM qui a fonctionné en mode quasiment non jaugé. Cela a une forte influence sur les résultats de ce modèle.

Les modèles présentent des spécificités d'application, notamment pour la partie prévision, dans les techniques de mise à jour ou de post-traitement utilisées. Par ailleurs, les stratégies de prise en compte des ouvrages sur les bassins influencés sont variables suivant les modèles.

Des informations plus détaillées sur les modèles testés, ainsi que les résultats du questionnaire sont disponibles dans des rapports antérieurs (voir Perrin et al. 2011).

Chaque partenaire du projet était en charge de réaliser les tests de son modèle en fonction du protocole commun, détaillé dans ce qui suit.

Notons que si la plupart des modèles ont pu réaliser l'intégralité des tests attendus, quelques tests n'ont pu être réalisés en raison de contraintes de temps de calcul ou de disponibilité. Par ailleurs, le modèle SIM, qui est le plus lourd à mettre en œuvre étant donnée sa portée nationale, n'a pu répondre qu'à une version allégée des tests en prévision. Ce modèle a par ailleurs traité similairement bassins versants naturels et influencés (pas de prise en compte des influences) et n'a pas pu être testé sur les bassins réunionnais où il n'est pas implémenté actuellement.

Les résultats de ces modèles cibles ont été comparés à des modèles de référence (« benchmarks ») définis comme :

- la moyenne interannuelle des débits journaliers, nommé DAQ, en simulation,
- et au modèle défini comme la variabilité naturelle des débits journaliers, nommé NVQ, en prévision,

l'objectif étant bien entendu de vérifier que l'on obtient des performances meilleures que ces modèles très simples.

Par ailleurs, des approches multi-modèles ont également été testées, de manière à évaluer la pertinence de combinaisons de ces modèles, en simulation et en prévision:

- le multi-modèle équipondéré, par lequel il s'agit de créer un modèle où les simulations/prévisions correspondent à la moyenne des sorties des cinq modèles hydrologiques à chaque pas de temps. Dans le cadre de la prévision d'ensemble, chaque membre du multi-modèle correspond à la moyenne des membres prévus des cinq modèles pour un scénario en entrée.
- le multi-modèle pondéré par un indice de performance : en simulation, le multi-modèle correspond à une moyenne pondérée des simulations des cinq modèles hydrologiques, le poids affecté à chaque modèle étant fonction des performances du modèle sur la période de calage. En prévision, chaque membre du multi-modèle correspond à la moyenne pondérée des membres prévus des cinq modèles pour un scénario en entrée.
- le multi-modèle pondéré par les erreurs des modèles sur les pas de temps précédents, applicable uniquement dans le cas de la prévision et ne prenant pas en compte le modèle SIM pour les raisons invoquées en partie 4.1 concernant les temps de calcul.

Ces modèles ont été construits uniquement en post-traitement des simulations et prévisions fournis par chacun des cinq modèles testés. Nous présenterons les résultats du multi-modèle retenu en simulation et en prévision.

4. Protocole de test

Pour s'assurer que les résultats des tests soient exploitables et effectivement comparables, il était essentiel de placer les modèles dans des conditions d'utilisation similaires.

La mise au point d'un protocole de test a donc fait l'objet des travaux de la première phase du projet. Cette étape, indispensable, a permis de faire en sorte que les participants s'accordent sur la démarche, les attendus et le mode d'évaluation, et que les tests proposés soient faisables par tous. Comme nous l'avons signalé plus haut, certaines adaptations du protocole ont été nécessaires pour SIM qui présente de fortes contraintes en termes de temps de calcul.

Nous reprenons dans ce qui suit les principes généraux du protocole. Notons que les tests en simulation et ceux en prévision correspondent à des modalités de mise en œuvre différentes, qui sont rappelées ci-dessous. Des informations plus détaillées sur le protocole sont disponibles dans des rapports complémentaires (voir Nicolle et al., 2010).

4.1. Tests en simulation et prévision

La simulation et la prévision des débits sont deux exercices différents, même s'ils peuvent être réalisés avec des outils identiques. La Figure 5 illustre la différence entre les deux modes de fonctionnement. Une différence majeure est la disponibilité des débits observés dans le second cas. Le débit n'étant pas une entrée du modèle mais une sortie, on exploite cette information par des techniques d'assimilation de données (aussi appelées mises à jour) qui permettent de corriger en temps réel le fonctionnement du modèle.

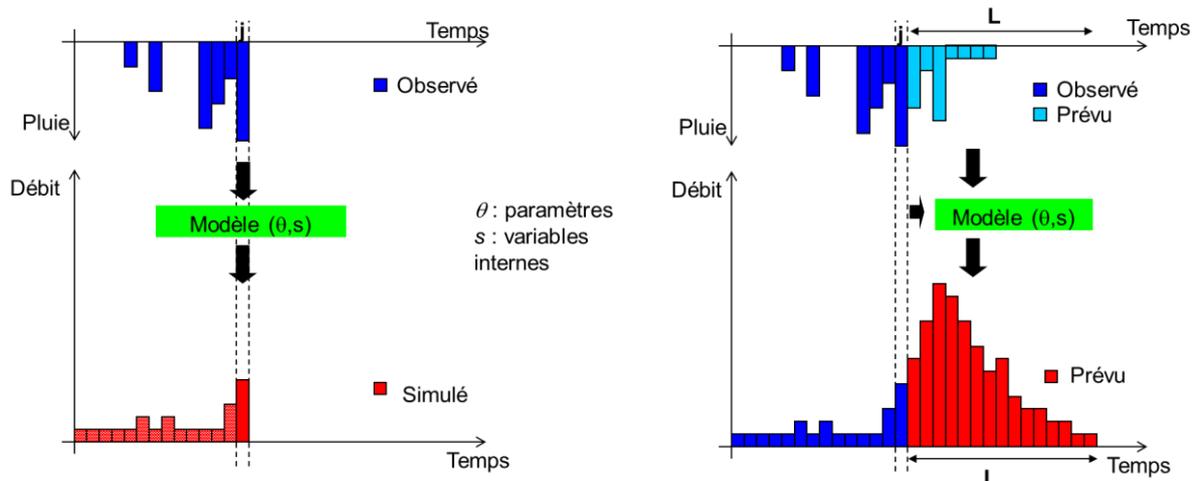


Figure 5 : Illustration des différences entre exercices de simulation (gauche) et prévision (droite) basés sur un modèle hydrologique

Deux séries de tests des modèles sont donc demandées :

- Tests de calages/validations en simple simulation : les modèles simulent le débit de l'instant t connaissant les pluies et autres variables météorologiques jusqu'à cet instant. Les débits observés sont inconnus à l'instant t , il n'y a donc pas d'assimilation possible des débits.
- Tests en prévision (sur les périodes de validation uniquement) : les modèles fournissent, à partir d'un instant t de prévision, les débits prévus entre $t+1$ et $t+L$ (L délai fixé ici à 90 jours), connaissant les pluies et autres variables météorologiques jusqu'à l'instant t ,

ainsi qu'un scénario de pluie et variables météorologiques futures. On utilise ici les paramètres déterminés sur la période de calage

Les résultats des tests en simulation sont attendus en calage et en validation (contrôle). Les résultats des tests en prévision ne sont demandés que sur chacune des périodes de validation.

Par ailleurs, compte tenu des temps de calcul trop importants pour SIM, Météo-France a fourni des prévisions de débit seulement tous les 5 jours sur la période de validation 2 (1992 à 2009), sur les mois plus spécifiques aux étiages (de mai à octobre inclus) et jusqu'à 30 jours d'échéance (90 jours tous les 1^{er} du mois).

Rappelons que sur les bassins versants influencés, il faut considérer en plus des entrées météorologiques celles liées aux influences sur le bassin, qui sont prises en charge par des modules dédiés au sein des modèles.

4.2. Scénarios pour la prévision

Dans le cas de la prévision, il est nécessaire de définir un scénario météorologique futur. Les horizons de prévision visés allant jusqu'à quelques semaines, les incertitudes sur les prévisions de débit sont fortement impactées par les incertitudes sur les conditions météorologiques futurs. Or on ne dispose pas aujourd'hui de prévisions météorologiques (issues de modèles météorologiques) à de telles échéances (les échéances actuellement atteignables sont de l'ordre de deux semaines). Pour tenir compte des incertitudes liées au choix du scénario météorologique, une approche d'ensemble a été choisie. Elle consiste à faire tourner le modèle sur la période future avec n scénarios différents.

Pour chaque jour de la période test, on a ainsi réalisé un ensemble de n ($n = 51$ pour la métropole et $n = 33$ pour la Réunion) prévisions sur une plage de 1 à 90 jours. Les n scénarios d'entrée correspondent au rejeu de la climatologie sur toutes les années où l'on disposait de données (le scénario correspondant aux données observées sur l'année en cours est utilisé comme run de contrôle). Les prévisions réalisées pour des plages temporelles à cheval sur deux années calendaires utilisent comme entrées les séries historiques continues pour la même période (exemple : considérons une prévision émise le 01/12/2005 pour une plage de 90 jours – allant du 02/12/2005 au 01/03/2006 –, les scénarios utilisés en entrée correspondront aux observations sur des plages temporelles allant du 02/12 de l'année N au 01/03 de l'année N+1).

Sur les bassins versants influencés, le choix a été fait de ne retenir qu'un scénario de gestion future correspondant à celui réalisé effectivement a posteriori. Ainsi, un seul scénario correspondant aux influences observées a été utilisé pour émettre une prévision, couplé à chaque scénario climatique. Bien que cette situation ne reflète pas ce qui se passerait dans la réalité (la gestion étant adaptée en fonction des prévisions météorologiques), la prise en compte d'autres scénarios supposerait l'utilisation de module d'optimisation de la gestion qui était en dehors du cadre du projet.

4.3. Périodes d'évaluation

Pour chaque bassin, la série disponible est découpée en deux périodes (notées 1 et 2), servant alternativement au calage et aux tests en validation (simulation et prévision) :

Calage période 1 (C1) → Validation période 2 (V2)

Calage période 2 (C2) → Validation période 1 (V1)

Cette procédure permet d'avoir des résultats des modèles en mode validation sur toutes les données disponibles, la validation étant le mode de fonctionnement le plus proche des conditions réelles d'utilisation des modèles. C'est uniquement en validation que les performances des modèles ont été évaluées.

En prévision, on se place de manière rétrospective à chaque jour de la série et on réalise une prévision comme si on était en temps réel.

Les périodes test utilisées sont celles définies précédemment pour chaque bassin.

4.4. Critère d'analyse des performances des modèles

Pour analyser les performances des modèles hydrologiques, un ensemble de critères numériques et graphiques a été mis au point. Il n'existe en effet pas un unique critère permettant d'évaluer l'ensemble des qualités attendues pour la simulation et la prévision des étiages.

Les tests en simulation ne produisant qu'une série chronologique par modèle et par période alors que les tests en prévision en produisant n , des jeux de critères différents ont été utilisés pour ces deux modes d'utilisation. A chaque fois, on peut classer les critères en quatre catégories :

- les critères visant l'évaluation des performances sur tous les débits simulés en basses eaux ;
- les critères évaluant la qualité de sous-passement de seuil d'étiage, typiquement des seuils de vigilance et de crise, communément utilisés par les services opérationnels pour la gestion. Ici, ces seuils ont arbitrairement été définis de manière uniforme pour tous les bassins comme les quantiles 80% et 95% (au dépassement) de la courbe des débits classés, de manière à permettre des analyses systématiques des résultats ;
- les critères sur les caractéristiques des étiages en termes de volume déficitaire et de durée notamment ;
- quelques critères calculés sur l'ensemble des débits, pour évaluer la cohérence des modèles en dehors des périodes d'étiage, c'est-à-dire n'étant utilisés qu'à titre indicatif.

Dans le cas des prévisions, nombre de critères sélectionnés sont pour des évaluations probabilistes, permettant notamment d'évaluer la dispersion et la fiabilité des ensembles de prévisions. Bien que les prévisions soient disponibles pour des délais de 1 à 90 jours, deux horizons cible ont été retenus pour analyser les résultats : 7 jours et 30 jours.

Les listes détaillées des critères pour la simulation et la prévision sont fournies en Annexe 3 et 4 respectivement. Des précisions sur le développement des critères concernant les caractéristiques d'étiage sont disponibles dans le rapport de Nicolle et al., 2012 (a). Le Tableau 4 récapitule la liste des critères utilisés.

Les critères étant calculés pour chaque bassin et chaque période, les tests ont produit un grand nombre de résultats. Ils ont été synthétisés pour avoir pour chaque modèle des évaluations par bassin ou sur l'ensemble des bassins, en utilisant des moyennes ou des distributions des critères. Une représentation graphique synthétique de tous les critères sous forme « radar » a également été utilisée (voir exemple à la Figure 6). Un critère numérique représentant l'aire bleue du polygone est appelé critère intégrateur.

A côté de ces critères numériques, un certain nombre d'illustrations graphiques ont été réalisées, de manière à visualiser plus facilement les résultats. Il s'agit notamment du tracé des hydrogrammes observés et simulés ou prévus, avec l'utilisation d'une échelle logarithmique pour mieux visualiser les comportements sur les très faibles débits. Cela a été fait pour chaque bassin sur un ensemble de 8 périodes d'étiages considérés comme les plus marqués sur la période disponible.

Dans le cas de la prévision, les illustrations ont été faites pour des prévisions à intervalles réguliers. Les illustrations ont été sorties de manière systématique pour tous les bassins et tous les modèles. La Figure 7 donne des exemples de quelques-unes de ces illustrations en simulation et prévision.

Tableau 4 : Liste des critères d'évaluation et signification

Acronyme	Signification
C2MQ	Version bornée du critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits
C2MiQ	Version bornée du critère de Nash-Sutcliffe calculé sur l'inverse des débits
KGEQ	Kling-Gupta Efficiency calculé sur les débits
RMSEss	Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne) calculée lorsque les débits observés sont inférieurs au seuil de vigilance (quantile 80% au dépassement de la distribution des débits)
POD	Probability Of Detection (probabilité de détection), basé sur le tableau de contingence
FAR	False Alarm Rate (taux de fausses alertes), basé sur le tableau de contingence
CSI	Critical Succes Index (indice de succès critique), basé sur le tableau de contingence
Vdef	Critère de volume déficitaire : ratio des volumes déficitaires simulés ou prévus et observés
Duré_éti	Critère des durées d'étiage : ratio des durées d'étiage simulées ou prévues et observées
Datdeb	Critère de date de début d'étiage : écart entre les dates de début d'étiage simulées ou prévues et observées
Datfin	Critère de date de fin d'étiage : écart entre les dates de fin d'étiage simulées ou prévues et observées
DRPS	Discrete Ranked Probability Score
BSvig	Brier Score calculé avec le seuil de vigilance (quantile 80% au dépassement de la distribution des débits)
BScri	Brier Score calculé avec le seuil de crise (quantile 95% au dépassement de la distribution des débits)
Cont_ratio	Containing ratio (taux de couverture) : Pourcentage d'observations contenues dans l'intervalle de confiance à 80% des débits prévus (80% des observations devraient être contenu dans cet intervalle) lorsque l'observation est inférieure au seuil de vigilance
Sharp	Sharpness (finesse) : Largeur moyenne des intervalles définis par les quantiles 10 et 90 de la distribution des prévisions lorsque l'observation est inférieure au seuil de vigilance

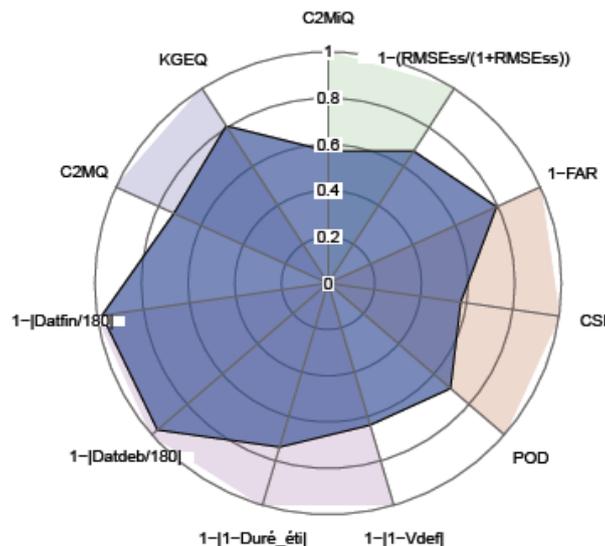
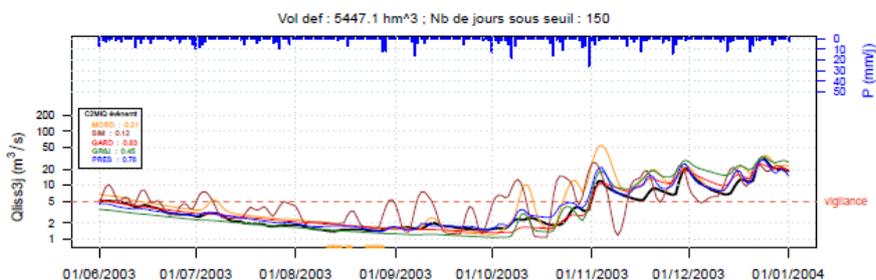


Figure 6 : Exemple de graphique « radar » utilisé pour résumer les performances de chaque modèle sur l'ensemble des bassins

La Meuse à Saint-Mihiel B2220010 (2540 km²)

— OBSERVATION — SIMULATION SIM — SIMULATION GR&J
— SIMULATION MORD — SIMULATION GARD — SIMULATION PRES



La Meuse à Saint-Mihiel B2220010 (2540 km²)

— OBSERVATION — PREVISION — CONTROLE

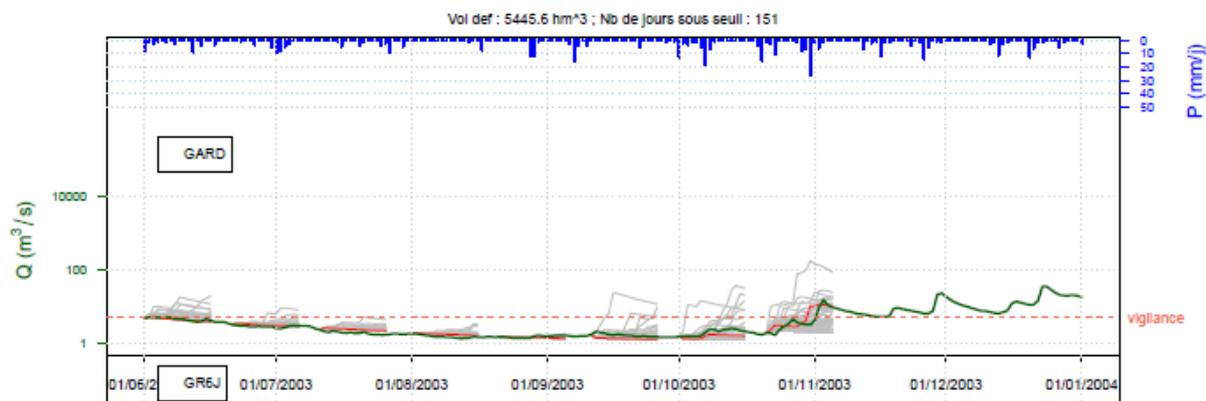


Figure 7 : Exemples de quelques graphiques utilisés pour illustrer les résultats en simulation (haut) et prévision (bas)

4.5. Horizon de prévision utile

L'horizon de prévision utile (HPU) définit l'échéance de prévision maximale jusqu'à laquelle le modèle hydrologique fournit des prévisions plus informatives que le modèle de référence, ici la climatologie. Pour chaque bassin, l'HPU est simplement défini par l'échéance de prévision au-delà de laquelle le modèle devient moins bon que la climatologie pour le critère sélectionné. Pour cette analyse et pour que les prévisions soient réellement utiles d'un point de vue opérationnel par rapport à la climatologie, nous avons considéré des différences de performances plus importantes entre modèle et climatologie : l'HPU est défini comme l'horizon au-delà duquel les performances du modèle ne sont plus au moins 20% supérieures à la climatologie. Le relèvement du seuil de significativité des performances a pour conséquence de faire baisser les HPU, avec donc une vision moins optimiste. Les valeurs d'HPU sont limitées à 90 jours ici (échéance maximale de prévision dans cette étude).

L'HPU est particulièrement intéressant pour évaluer les limites d'anticipation que l'on peut atteindre sur les différents bassins. Il sera fonction à la fois des caractéristiques physiques du bassin (notamment l'inertie des nappes contribuant au débit de base), des capacités du modèle à bien simuler le fonctionnement du bassin, et des critères de performance choisis.

4.6. Mise en œuvre concrète des tests et des analyses

Pour les tests en simulation et prévision, d'abord sur bassins naturels et ensuite sur bassin influencés, les bases de données constituées ont été mises à disposition des participants via un site FTP, à un format unique. Les participants disposaient ensuite d'une période de test pour produire l'ensemble des résultats attendus, qui devaient être fournis sous forme de chroniques de débits simulés ou prévus à un format pré-spécifié.

Enfin, l'analyse des résultats a été réalisée de manière centralisée, à partir de scripts écrits dans le langage R (<http://www.r-project.org/>), qui permettent à la fois de calculer l'ensemble des critères numériques et de générer en séries toutes les illustrations graphiques. Cette procédure est apparue plus fiable que de laisser à chacun la charge du calcul des critères pour éviter d'introduire des différences liées à l'interprétation de certains critères.

Les rapports d'analyse des résultats étaient ensuite discutés et améliorés collectivement.

5. Principaux résultats en simulation

Dans cette partie, nous détaillons les principaux résultats obtenus lors des tests en simulation, sur les bassins non influencés et influencés. Les résultats détaillés sont disponibles dans les rapports intermédiaires du projet (voir Nicolle et al, 2012c, Nicolle et al, 2013b et Nicolle et al, 2014). Les analyses proposées ici se basent essentiellement sur des résultats à l'échelle des échantillons de bassins. Notons que quelques modèles n'ayant pu produire de simulations sur certains bassins, nous présentons ici les résultats sur des échantillons réduits : 22 bassins (au lieu de 24) pour l'échantillon non influencé (hors bassins réunionnais) et 9 bassins (au lieu de 11) pour l'échantillon influencé. Ce choix a été fait de manière à privilégier le nombre de modèles comparés. Dans les tests sur les bassins non influencés sont également inclus les résultats de l'approche multi-modèle (non testée dans le cas des bassins influencés).

Les analyses sur les échantillons complets mais avec un nombre moindre de modèles sont disponibles dans les rapports mentionnés précédemment.

La Figure 8 présente les résultats des performances moyennes sur l'ensemble des critères. Les lignes rouges représentent les résultats sur l'échantillon de bassins versants non influencés, les polygones bleus ceux sur l'échantillon de bassins influencés. Les valeurs des critères sont

transformées pour avoir un maximum en 1, les valeurs négatives étant ramenées à 0. Les fonds colorés représentent les différents types de critère :

- performance sur toute la gamme de débit en violet (rappelons que ces critères ne sont pas des critères cible du projet mais sont donnés à titre d'évaluation du comportement général du modèle),
- performances sur les bas débits en vert,
- critères de sous-passement de seuil en orange,
- critères sur les caractéristiques d'étiage en rose.

Le Tableau 5 fournit quant à lui une idée du classement des modèles sur les différents critères.

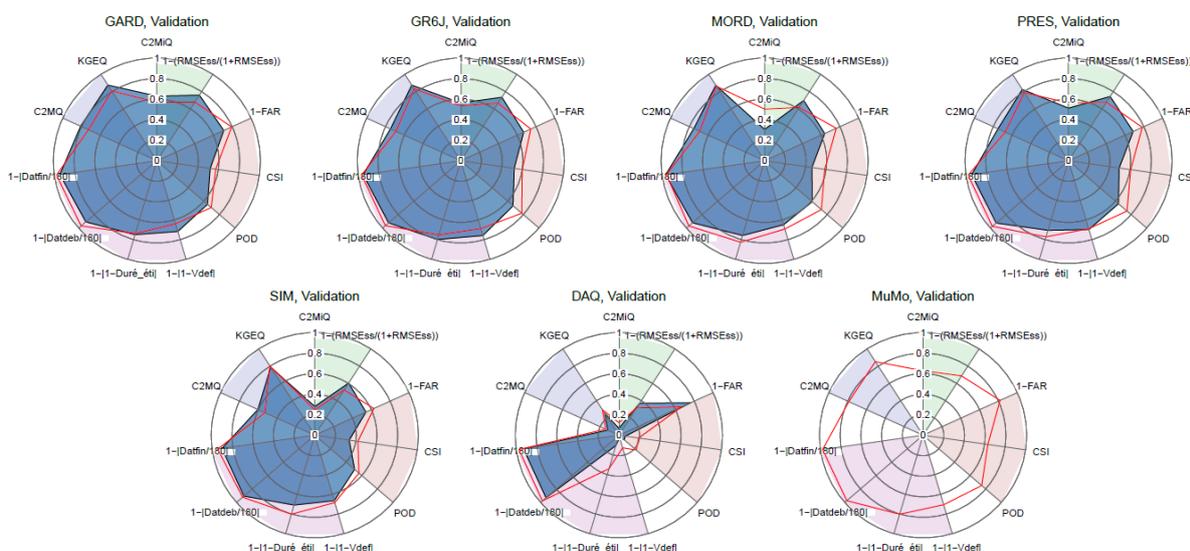


Figure 8 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu) pour les cinq modèles hydrologiques, le modèle DAQ et le multi-modèle

Tableau 5 : Classement des modèles basé sur les performances moyennes en validation sur les 22 bassins métropolitains non influencés et les 9 bassins influencés (le rang moyen n'est calculé que sur les neuf critères d'étiage)

Critère	Rang modèle											
	Bassins non-influencés						Bassins influencés					
	GAR	GR6	MOR	PRE	SIM	DAQ	GAR	GR6	MOR	PRE	SIM	DAQ
C2MIQ	1	3	2	4	5	6	1	4	2	3	5	6
KGEQ	3	2	1	5	4	6	1	2	3	4	5	6
C2MiQ	1	3	4	2	5	6	1	2	4	3	5	6
RMSE ss	1	3	4	2	5	6	1	3	4	2	5	6
FAR	1	4	3	2	6	5	2	4	5	3	6	1
CSI	4	2	3	1	5	6	2	1	4	3	5	6
POD	4	1	3	2	5	6	2	1	4	3	5	6
Vdef	5	3	1	2	4	6	2	1	5	3	4	6
Durée éti	5	4	1	3	2	6	3	1	2	5	4	6
Date deb	3	4	2	1	5	NA	4	2	3	1	5	NA
Date fin	2	3	4	1	5	NA	3	2	1	4	5	NA
Rang moyen	2.9	3.0	2.8	1.8	4.7	5.9	2.0	1.9	3.7	2.8	4.9	5.3
Critère intégrateur	0,738	0,741	0,738	0,746	0,630	0,393	0,736	0,735	0,679	0,708	0,605	0,324

5.1. Bassins versants non influencés

Les résultats des modèles sont relativement proches dans l'ensemble (Figure 8), excepté SIM qui semble avoir plus de difficultés sur un certain nombre de critères de performance. Rappelons cependant que ce modèle n'est pas calé à la station. Il apparaît délicat d'établir une hiérarchie claire entre les quatre autres modèles, aucun ne fournissant les meilleurs résultats sur tous les critères : si l'on regarde leur classement sur chaque critère (Tableau 5, partie gauche), Gardenia se classe mieux que les autres modèles sur quatre critères de performances, Mordor et PRESAGES sur trois, GR6J sur un et SIM sur aucun. Sur l'ensemble des critères, PRESAGES est le plus régulièrement classé parmi les meilleurs modèles, suivi de Mordor, Gardenia, GR6J, et enfin SIM. Ces classements sont cependant à nuancer tant les différences moyennes peuvent être faibles sur certains critères, comme l'illustre la Figure 8. Tous les modèles sont globalement largement supérieurs au modèle de référence DAQ, ce qui est rassurant sur leur capacité à apporter de l'information par rapport à la climatologie des débits.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les cartes des performances moyennes sur les deux périodes de validation pour les critères C2MiQ, Vdef et CSI pour chacun des modèles sur les bassins non influencés (triangles) et influencés (cercles). Nous avons pris ces trois critères comme représentatifs des trois catégories de critères sur les étiages mentionnés précédemment. Les qualités sur certains critères peuvent être très variables entre les modèles selon les bassins considérés. On observe ici que même si pour quelques bassins, les modèles arrivent tous à globalement bien simuler les débits d'étiage (La Meuse à St-Mihiel en C2MiQ par exemple), pour d'autres on constate de gros écarts de performance (Le Gapeau à Hyères en C2MiQ par exemple, bien modélisé par PRESAGES mais beaucoup moins bien par les autres modèles). Cela dépend également du critère observé. Dans l'exemple du Gapeau à Hyères, le modèle Gardenia présente des performances en C2MiQ moins bonnes que PRESAGES, alors qu'il est meilleur sur le critère de volume déficitaire et qu'ils sont assez similaires en CSI.

Certaines caractéristiques d'étiage sont assez difficiles à modéliser par l'ensemble des modèles avec des différences qui peuvent être importantes sur les dates de début et fin d'étiage par exemple (voir Figure 8). Par ailleurs, une analyse plus détaillée sur certains bassins versants a pu montrer que les performances pouvaient varier de manière assez importante selon la période de validation. La bonne ou moins bonne modélisation des débits d'étiage paraît également davantage liée au bassin versant étudié et à ses spécificités qu'au choix du modèle. L'observation des hydrogrammes a montré un comportement global assez similaire de ces quatre modèles malgré des différences sur des périodes plus courtes. Il semble que les étiages sévères aient tendance à être surestimés par les modèles, même si ce n'est pas toujours le cas en fonction des années et parfois même au sein d'une même année.

Les différentes approches multi-modèles ont montré des résultats très proches sur tous les bassins et critères de performance. Nous avons choisi ici de présenter les résultats du multi-modèle pondéré par un indice de performance (la probabilité de détection) (voir Figure 8). L'utilisation d'un multi-modèle en simulation permet d'obtenir des résultats dans l'ensemble meilleurs que tous les modèles (sur 25 des 44 bassins périodes), mais celui-ci ne permet pas de changer drastiquement les performances par rapport au meilleur modèle sur un bassin considéré : si tous les modèles ont des difficultés à modéliser un bassin, le multi-modèle ne pourra produire des résultats plus satisfaisants. Cependant, le multi-modèle est plus robuste : il permet de compenser les performances des meilleurs et moins bon modèles.

5.1. Bassins versants influencés

Nous retrouvons ici des conclusions similaires à celles sur les bassins non-influencés : les résultats des modèles sont relativement proches dans l'ensemble, mais les différences sont un peu plus marquées. De manière intéressante, les niveaux de performances moyennes pour chacun des critères sont assez proches sur les bassins non-influencés et influencés

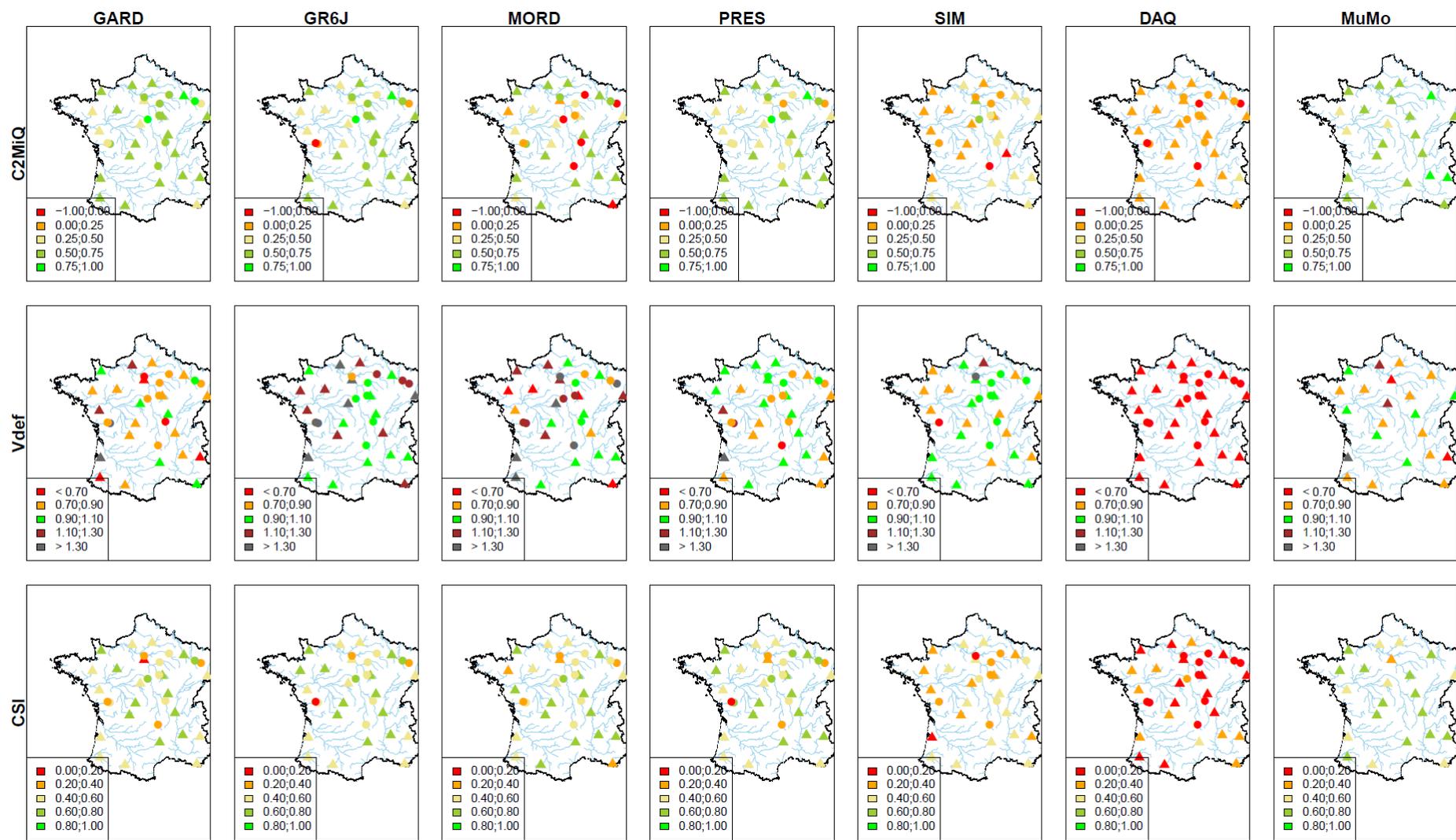


Figure 9 : Cartes des performances moyennes sur les 2 périodes de validation en C2MiQ, Vdef et CSI pour chaque modèle et pour les bassins non influencés (triangles) et influencés (rond)

Ceci indique qu'en simulation, les modèles sont capables de prendre en compte de manière assez satisfaisante les influences. On dénote néanmoins quelques pertes pour tous les modèles, sur les trois critères de sous-passement de seuils notamment. Le classement des modèles est sensiblement différent de l'analyse sur les bassins non-influencés (pour 60% des classements), et GR6J est globalement plus souvent mieux classé que les autres modèles. Ici aussi, aucun modèle ne fournit les meilleurs résultats sur tous les critères et les différences de classement à nuancer étant donnés les écarts parfois faibles, comme l'illustre la Figure 8. SIM est ici encore un peu plus en retrait.

Par ailleurs, les qualités sur certains critères peuvent être très variables selon les bassins considérés. On observe aussi que certains bassins sont bien modélisés pour la majorité des modèles quel que soit le critère (La Loire à Gien (K4180010) et la Meurthe à Damelevières (A6232010) par exemple). De la même façon, tous les modèles éprouvent des difficultés à simuler les débits de la Sèvre Niortaise à Echiré (N411620), quel que soit le critère observé.

Par ailleurs, au vu du relativement faible nombre de bassins, il semble difficile de dégager des tendances sur l'impact des différentes influences sur les performances des modèles : les bassins influencés par des prélèvements (Sèvre Niortaise) ne se dégagent pas par rapport aux influences de barrage au regard des performances des modèles. Par ailleurs, pour un même type d'influence, les performances peuvent être très différentes pour des bassins emboîtés (bassin de la Meuse où les débits de la Plaine à Raon l'étape sont plus difficiles à simuler). Notons aussi que pour quelques bassins, les performances peuvent être assez différentes selon les périodes de validation (par exemple sur La Seine à Paris Austerlitz (H5920010) pour tous les modèles par exemple) (résultats non détaillés ici). Les performances ne sont pas liées à la proportion du débit influencé (moyenne du rapport entre la valeur absolue des influences et le débit à l'exutoire pour chaque jour, voir Annexe 2). Il faudrait réaliser des tests sur un échantillon de bassin plus large pour établir des liens potentiels de causalité entre niveau de performance et caractéristiques des bassins ou des influences.

6.Principaux résultats en prévision

Dans cette partie, nous présentons une synthèse des principaux résultats obtenus lors des tests en prévision, sur les bassins non influencés et influencés. Les résultats détaillés sont disponibles dans les rapports intermédiaires du projet (voir Nicolle et al, 2013a, Nicolle et al, 2013b et Nicolle et al, 2014). Les analyses proposées ici se basent essentiellement sur des résultats à l'échelle des échantillons de bassins. Comme en simulation, quelques modèles n'ayant pu produire de simulations sur certains bassins, nous analysons les résultats ici sur des échantillons réduits qui sont les mêmes qu'en simulation. Par ailleurs, l'analyse est réalisée ici sur un nombre de pas de temps réduits comme expliqué en partie 4.1. Les résultats associés au multi-modèle ne sont pas présentés ici, ce dernier n'ayant pu faire l'objet d'une évaluation cohérente avec ce qui est présenté ici.

Une évaluation de la capacité des modèles à prévoir à plus ou moins long terme est également présentée, en déterminant des horizons de prévision utiles pour lesquels le modèle apporte toujours de l'information par rapport au modèle de référence.

Les analyses sur les échantillons complets mais avec un nombre moindre de modèles sont disponibles dans les rapports mentionnés précédemment.

A noter que nous n'avons pas calculé les critères liés aux dates de début et fin d'étiage, puisque celles-ci sont calculées sur les moyennes interannuelles des débits prévus et observés, et représentent des écarts en nombre de jours. Les prévisions fournies par Météo-France ne permettent pas de calculer correctement ces deux critères.

6.1. Bassins versants non influencés

A l'échéance de +7 jours, les résultats des modèles (Figure 10, lignes rouges) sont relativement proches dans l'ensemble pour Gardenia, GR6J et PRESAGES, avec quelques différences (meilleure fiabilité pour PRESAGES et SIM, meilleure finesse pour Gardenia). Mordor présente un peu plus de difficultés sur les volumes déficitaires. Le modèle NVQ est moins performant que ces modèles mais présente de très bonnes performances pour certains critères : taux de couverture (ce qui est logique par construction). SIM est beaucoup plus proche du modèle NVQ. Une hiérarchie claire des modèles est difficile à dégager, aucun ne fournit les meilleurs résultats sur tous les critères, mais SIM est globalement en retrait par rapport aux trois autres. Les classements sur chaque critère (Tableau 6, partie gauche entre parenthèses) montrent que Gardenia se classe mieux que les autres modèles sur cinq critères de performances, GR6J sur quatre, PRESAGES et Mordor sur un. Sur l'ensemble des critères, GR6J et Gardenia sont le plus régulièrement classés parmi les meilleurs modèles et sont quasiment équivalents. On trouve ensuite PRESAGES légèrement en retrait, puis Mordor. Le modèle NVQ est le moins bien classé, ce qui est rassurant et montre que tous les modèles apportent une information utile par rapport à ce modèle simple de référence.

A l'échéance de +30 jours, les performances baissent dans l'ensemble, et plus particulièrement sur les volumes déficitaires et la finesse. SIM subit de moins grosses pertes de performance que les autres modèles, et parvient à être similaire ou meilleur que les autres modèles sur certains critères. La moindre chute de performance s'explique probablement par l'absence d'assimilation de données, qui implique que le modèle lui-même n'induit pas une dépendance des performances à l'horizon de prévision. Les modèles gagnent par contre en taux de couverture, mais ceci est mécaniquement lié à l'élargissement des intervalles de confiance. Les performances des modèles sont très similaires et plus proches du modèle NVQ dans l'ensemble. Là aussi, il paraît délicat de hiérarchiser les quatre modèles. Pour leur classement sur chaque critère (Tableau 6), Gardenia se classe mieux que les autres modèles sur cinq critères de performances, PRESAGES sur 3, Mordor sur 2 et GR6J sur 1. Sur l'ensemble des critères, Gardenia est ici le plus régulièrement classé parmi les meilleurs modèles, suivi de PRESAGES, GR6J, Mordor et enfin de SIM et du modèle NVQ, similaires. Les modèles continuent néanmoins à apporter une information intéressante par rapport au modèle de référence, même si le gain par rapport à l'échéance de +7 jours est beaucoup plus faible.

Comme en simulation, ces classements sont à nuancer tant les différences moyennes peuvent être faibles sur certains critères, comme l'illustrent la Figure 10 et la Figure 11. La Figure 12 et la Figure 13 présentent les cartes des performances moyennes sur les deux périodes de validation pour les critères RMSEss, BSvig et Vdef pour chacun des modèles sur les 22 bassins non influencés (triangles) et les 9 bassins influencés (cercles), respectivement pour les échéances $j+7$ et $j+30$. De la même manière que pour les résultats en simulation, les qualités sur certains critères peuvent être très variables selon les bassins : on observe ici que, même si pour quelques bassins, les modèles arrivent tous à globalement bien prévoir les débits d'étiage (L'Andelle à Vascoeuil ou l'Oise à Sempigny en RMSEss par exemple, et ce, quelle que soit l'échéance de prévision), les performances des modèles sont davantage variables sur certains autres bassins (La Petite Creuse à Fresselines en RMSEss par exemple, bien modélisé par Gardenia mais un peu ou beaucoup moins bien par les autres modèles). Cela dépend également du critère observé : dans l'exemple de l'Orge à Morsang-sur-Orge, les performances des modèles sont plutôt bonnes en RMSEss pour les deux échéances de prévision mais chutent significativement en BSvig ou Vdef, comparativement aux autres bassins. Il semble qu'on garde une certaine cohérence sur les performances pour chaque bassin entre les différentes échéances de prévision : les performances sur l'Oise à Sempigny quel que soit le modèle restent meilleures à l'échéance +7 jours et +30 jours que celles du Serein à Chablis.

Les résultats des modèles ne semblent pas dépendre des caractéristiques de la sévérité des étiages (Base Flow Index ou rapport des quantiles au non dépassement Q10/Q50) et ne prévoient pas mieux ou moins bien les débits d'étiage pour des bassins qui présentent un BFI

élevé ou un rapport Q10/Q50 faible. Ce résultat laisse penser que les modèles testés ici sont suffisamment flexibles pour s'adapter à des conditions très variables de contribution souterraine aux écoulements en étiage.

Les résultats ne sont pas présentés ici, mais comme en simulation, les trois approches multi-modèles présentent des résultats similaires, même si le multi-modèle pondéré par les erreurs sur les pas de temps précédent est légèrement meilleur. En prévision, les bénéfices d'un multi-modèle sont beaucoup moins évidents. Ceci est peut-être dû au caractère trop brut de cette approche : même si cette approche est plutôt efficace sur la prévision des crues, d'autres approches prenant en compte la dynamique lente des bas débits serait peut-être plus efficace et devrait être investigué pour la prévision des étiages.

Tableau 6 : Classement des modèles basé sur les performances en validation sur les 9 bassins influencés (sur les 22 bassins non influencés) pour la période 2, sur la base des prévisions fournies par Météo-France

Critère	Rang modèle											
	Echéance j+7						Echéance j+30					
	GARD	GR6J	MORD	PRES	SIM	NVQ	GARD	GR6J	MORD	PRES	SIM	NVQ
RMSEss	2 (1)	1 (4)	(2)	3 (3)	4 (5)	5 (6)	1 (1)	2 (6)	(2)	4 (3)	3 (4)	5 (5)
DRPS	5 (3)	1 (1)	(4)	2 (2)	3 (5)	4 (6)	5 (3)	4 (1)	(4)	1 (2)	3 (6)	2 (5)
POD	2 (3)	1 (2)	(1)	3 (4)	4 (6)	5 (5)	1 (3)	2 (2)	(1)	3 (4)	4 (6)	5 (5)
FAR	4 (3)	2 (1)	(4)	1 (2)	3 (5)	5 (6)	4 (3)	2 (2)	(5)	1 (1)	3 (4)	5 (6)
CSI	2 (1)	1 (2)	(3)	3 (4)	4 (5)	5 (6)	2 (3)	1 (2)	(1)	3 (4)	4 (6)	5 (5)
BSvig	4 (3)	1 (1)	(4)	2 (2)	3 (5)	5 (6)	5 (3)	2 (2)	(4)	1 (1)	3 (5)	4 (6)
BScri	5 (2)	1 (1)	(4)	4 (3)	2 (6)	3 (5)	5 (1)	4 (2)	(5)	3 (3)	2 (6)	1 (4)
Cont_ratio	4 (6)	2 (5)	(4)	5 (2)	3 (3)	1 (1)	3 (6)	2 (4)	(5)	5 (1)	4 (3)	1 (2)
Sharp	2 (1)	1 (2)	(3)	3 (4)	4 (5)	5 (6)	1 (1)	2 (3)	(2)	3 (5)	4 (4)	5 (6)
Vdef	3 (1)	1 (2)	(4)	2 (3)	4 (5)	5 (6)	2 (1)	1 (4)	(3)	3 (2)	4 (5)	5 (6)
Duré_éti	2 (1)	1 (2)	(3)	3 (4)	4 (5)	5 (6)	2 (1)	1 (3)	(2)	3 (4)	4 (6)	5 (5)
Rang moyen	3,0 (2,3)	1,5 (2,1)	(3,3)	2,5 (3,0)	3,6 (5,0)	4,4 (5,4)	2,9 (2,4)	2,1 (2,8)	(3,1)	2,5 (2,7)	3,5 (5,0)	4,1 (5,0)
Critère intégrateur	0,547 (0,640)	0,674 (0,631)	0,650 (0,616)	0,559 (0,623)	0,469 (0,498)	0,421 (0,479)	0,543 (0,549)	0,592 (0,540)	0,562 (0,544)	0,508 (0,545)	0,443 (0,480)	0,427 (0,486)

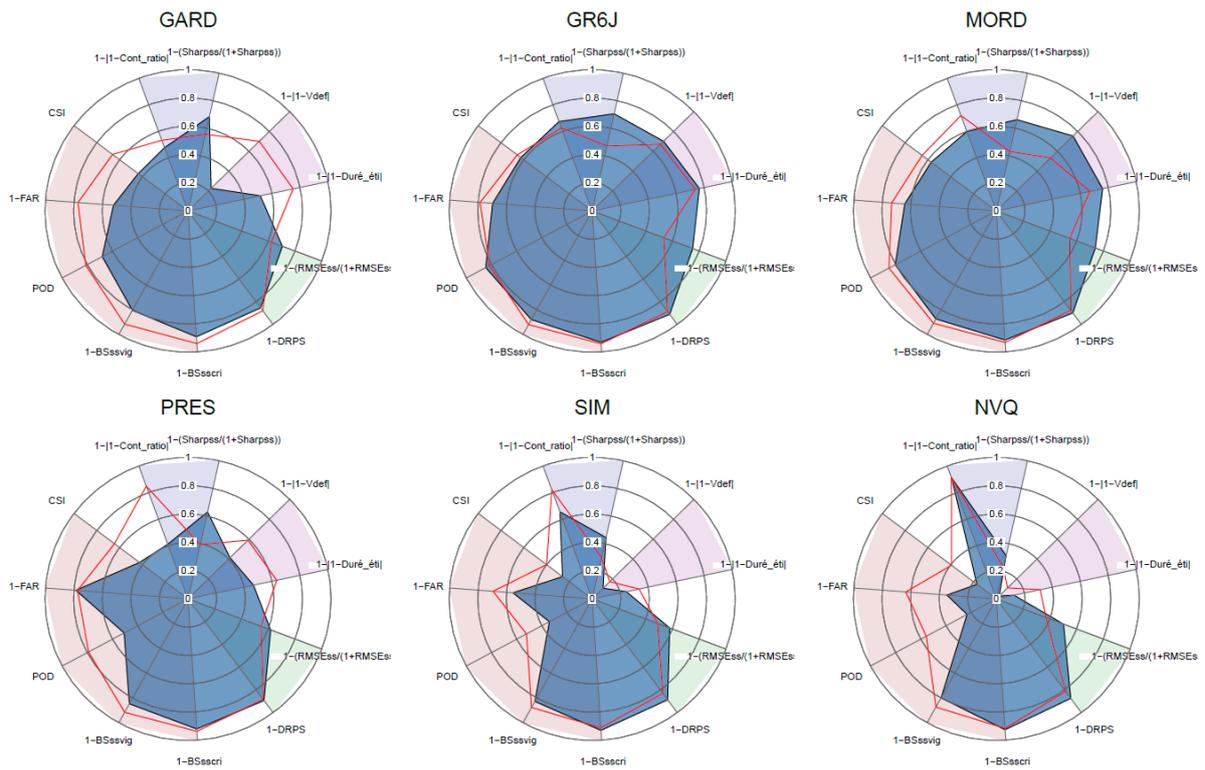


Figure 10 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu), sur la période de validation 2 à une échéance de +7 jours pour les cinq modèles hydrologiques et le modèle NVQ

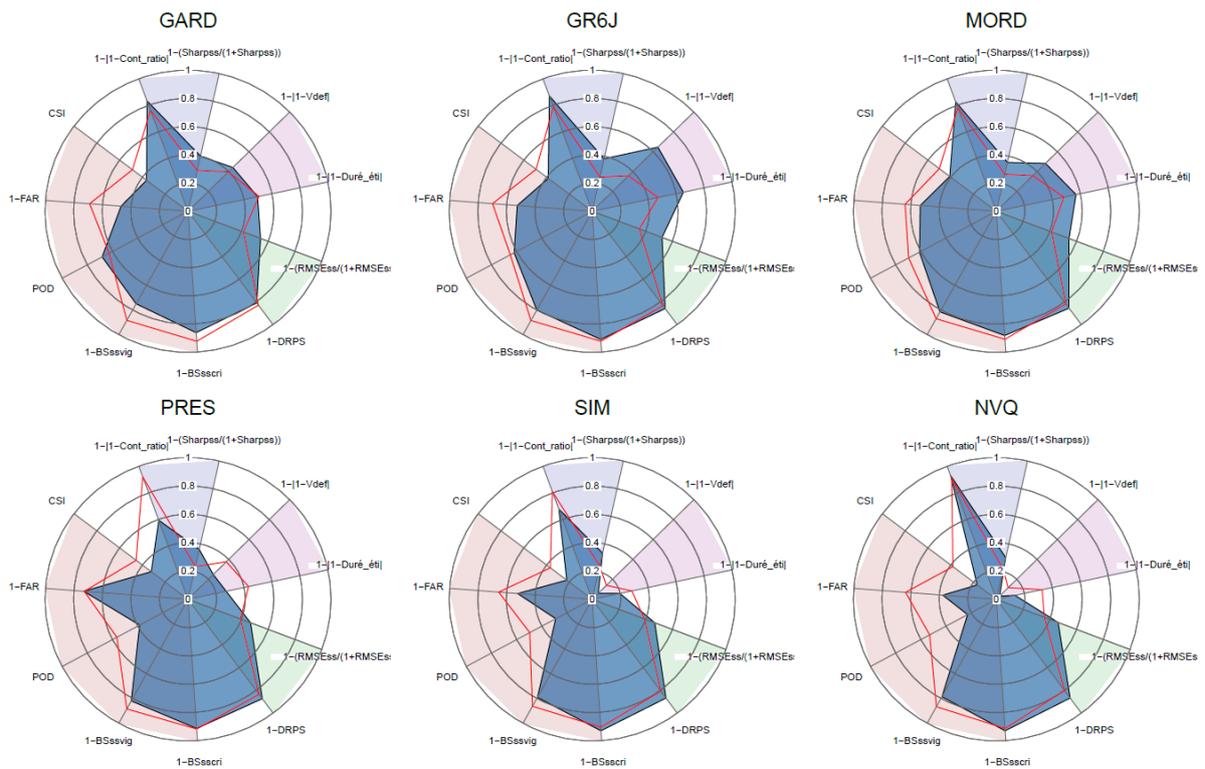


Figure 11 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu), sur la période de validation 2 à une échéance de +30 jours pour les cinq modèles hydrologiques et le modèle NVQ

6.1. Bassins versants influencés

L'analyse des prévisions sur l'échantillon de bassins versants influencés ne prend pas en compte le modèle Mordor dont les prévisions ne sont pas disponibles au jour de la rédaction du rapport.

Ici, les résultats des modèles sont suffisamment différents pour laisser entrevoir une hiérarchie : GR6J semble plus performant que Gardenia, lui-même plus performant que PRESAGES. Ceci n'est pas systématique en fonction des critères observés : PRESAGES est par exemple le plus performant sur le taux de fausse alerte et Gardenia sur la finesse. Le modèle NVQ est moins performant que ces modèles mais présente de très bonnes performances pour certains critères : taux de couverture (par construction). Si l'on regarde leur classement sur chaque critère (Tableau 1), GR6J se classe mieux que les autres modèles dans la majorité des cas (neuf critères) de performances, et PRESAGES sur un. Le modèle NVQ se classe mieux sur le critère du taux de couverture. Sur l'ensemble des critères, GR6J est le plus régulièrement classés parmi les meilleurs modèles. On trouve ensuite PRESAGES puis Gardenia légèrement en retrait. Le modèle NVQ est le moins bien classé, ce qui est rassurant et montre que tous les modèles apportent une information utile par rapport à ce modèle simple de référence.

Comparativement aux bassins non-influencés, les modèles ont tendance à présenter de meilleures performances sur le critère de finesse pour tous les modèles, mais moins bonnes sur les critères liés aux sous-passements de seuils (c'est notamment particulièrement visible pour les trois critères POD, FAR et CSI). PRESAGES présentent également des baisses de performance sur les critères de caractéristique d'étiage (V_{def} et durée d'étiage). Le classement sur le rang moyen est quelque peu modifié : GR6J se détache plus nettement, suivi par PRESAGES, Gardenia puis SIM. Compte tenu des résultats similaires des modèles en termes de performances sur les bassins non influencés, les différences ici peuvent être liées à la manière de prendre en compte les influences dans la modélisation.

Par rapport aux résultats précédents, les performances à +30 jours baissent dans l'ensemble, notamment en termes de finesse et de RMSEss, ce qui est attendu compte tenu de l'allongement du délai de prévision. Les différences de performances entre les modèles sont moins contrastées et plus proches de la climatologie dans l'ensemble, même si PRESAGES est en retrait sur les volumes déficitaires et la probabilité de détection (POD) (il conserve néanmoins un bon taux de fausses alertes FAR). Alors que les différences étaient assez visibles à +7 j, il paraît délicat de hiérarchiser les modèles ici. Pour leur classement sur chaque critère, GR6J, PRESAGES et Gardenia se classe mieux chacun sur trois critères de performances et le modèle NVQ sur deux. Sur l'ensemble des critères, GR6J est ici le plus régulièrement classé parmi les meilleurs modèles, suivi de PRESAGES, Gardenia et SIM, et enfin du modèle NVQ. Les modèles continuent à apporter une information intéressante par rapport au modèle de référence, même si le gain par rapport à l'échéance de +7 jours est beaucoup plus faible.

Ces résultats sont à relativiser : une analyse sur tous les pas de temps et pour les deux périodes de validation fournit des résultats moins contrastés entre les modèles.

Comparativement aux bassins non-influencés, on observe ici les mêmes conclusions qu'à +7 jours sur les critères de sous-passement de seuil POD, FAR et CSI pour la majorité des modèles. Le classement sur le rang moyen est quelque peu modifié : GR6J est passé devant PRESAGES et Gardenia, et PRESAGES devant Gardenia. SIM reste en revanche toujours en retrait.

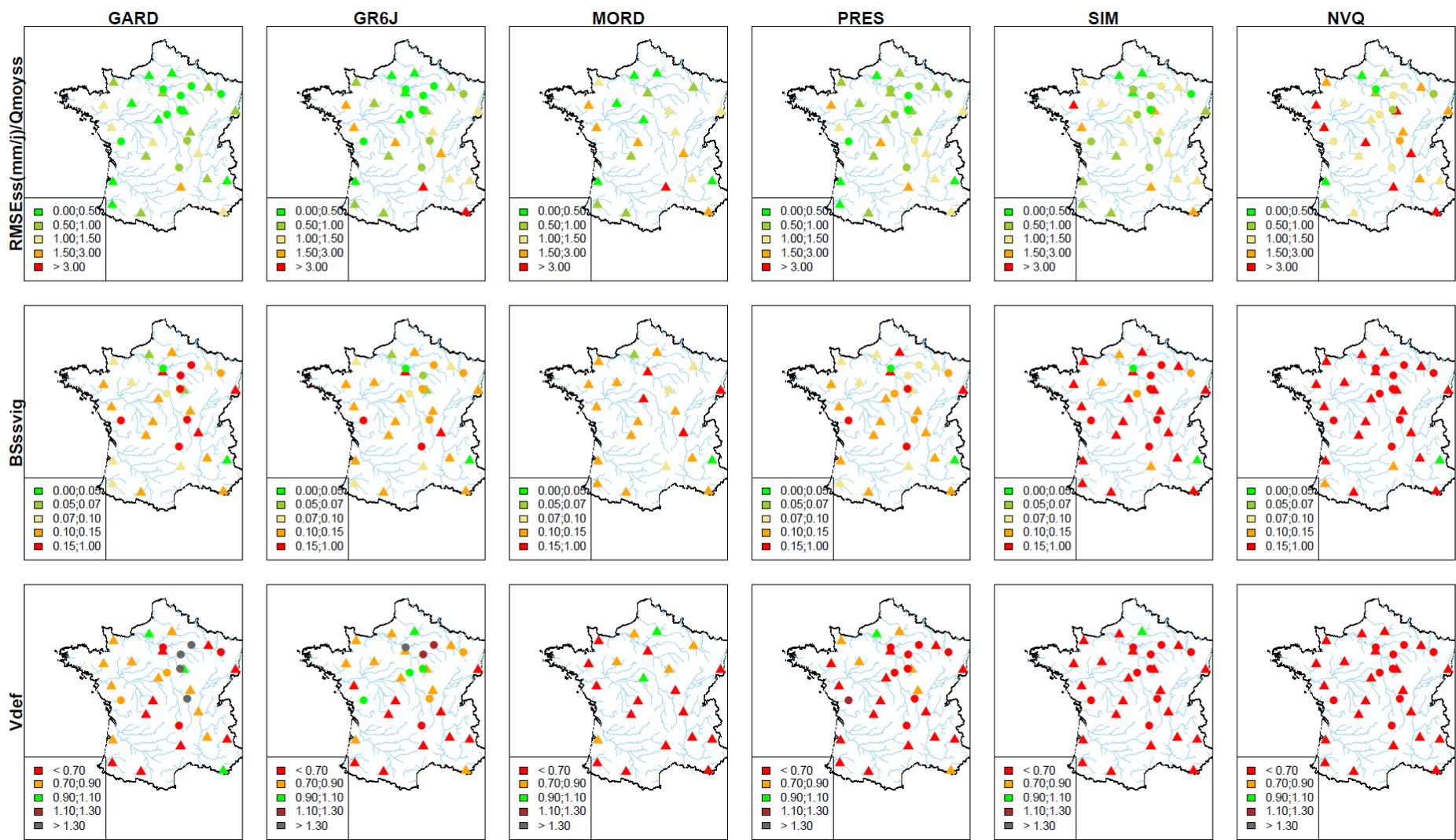


Figure 12 : Cartes des performances à +7 jours sur la période de validation 2 en RMSEss, BSsvig et Vdef pour chaque modèle et pour les 22 bassins non influencés (triangles) et influencés (rond)

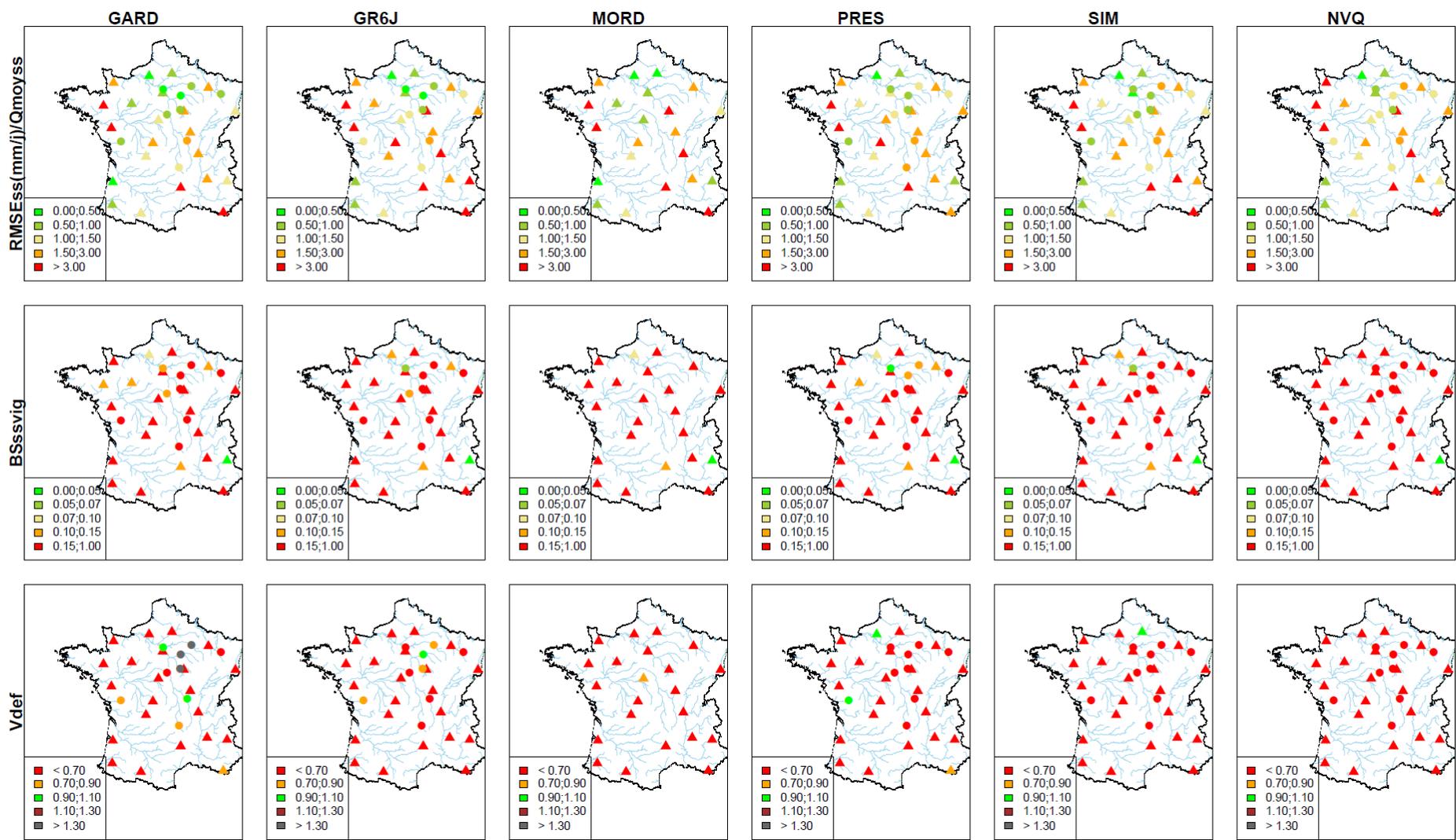


Figure 13 : Cartes des performances à +7 jours sur la période de validation 2 en RMSEss, BSsvig et Vdef pour chaque modèle et pour les 22 bassins non influencés (triangles) et influencés (rond)

La comparaison des classements des modèles sur les bassins influencés et non-influencés est à nuancer toutefois puisque l'absence du modèle Mordor ne permet pas d'avoir une homogénéité pour comparer les résultats des deux échantillons de bassin.

Par ailleurs, les résultats peuvent être très différents en fonction des modèles et des critères observés, comme l'illustrent la Figure 12 et la Figure 13. Les modèles sont assez cohérent sur le critère RMSEss par exemple, même si quelques différences apparaissent. Les résultats sont néanmoins cohérents de l'échéance +7 jours à l'échéance +30 jours : même si les performances diminuent avec l'échéance de prévision, elles restent globalement meilleures pour un bassin par rapport à un autre avec l'augmentation de l'échéance.

Finalement, sur un échantillon de bassins versant influencés par des barrages réservoirs ou par des prélèvements agricoles sur le bassin, les modèles présentent dans l'ensemble des résultats similaires à l'analyse effectuée sur l'échantillon de bassins versants non influencés.

Même si nous avons pu constater qu'aucun modèle n'était plus performant sur tous les critères et sur tous les bassins, il semble néanmoins plus facile ici d'établir une hiérarchie entre les modèles hydrologiques sur leurs performances en étiage, même si les résultats de Mordor en prévision ne sont pas disponibles. GR6J présente sensiblement de meilleurs résultats que les autres modèles et SIM semble éprouver plus de difficultés. La comparaison avec l'analyse sur les bassins non influencé peut laisser penser que la manière d'intégrer les influences dans la modélisation est probablement un facteur important à prendre en compte.

Les modèles apportent tout de même une information par rapport aux modèles de références constitués par le débit moyen journalier interannuel pour la simulation et par la variabilité naturelle des débits pour la prévision.

L'utilisation des scénarios de gestion observés doit amener relativiser les résultats issus des prévisions des modèles hydrologiques pour leur interprétation.

6.2. Evaluation des horizons de prévision utiles

La Figure 14 présente les cartes des horizons de prévision utile (HPU) moyens maximums (moyenne des HPU déterminés avec les critères RMSEss, FAR et Vdef) pour les 22 bassins versants non-influencés (en haut) et pour les 9 bassins versants influencés (en bas) pour les deux périodes de validation. Les différents symboles correspondent aux différents modèles fournissant ce meilleur HPU.

. On observe ici que le HPU maximum peut effectivement varier de manière importante d'une période à l'autre et n'est pas issu forcément du même modèle (exemple de la Petite Creuse à Fresselines, bassin non influencé, où l'HPU moyen est de 63 jours pour GARDENIA contre 21 jours pour PRESAGES sur l'autre période).

Pour les bassins versants non-influencés, on observe que le HPU maximum est cohérent d'une période sur l'autre sur les valeurs de prévision et le modèle capable de fournir cet HPU maximum, excepté pour quelques bassins (exemple de la Seine à Paris Austerlitz, où l'HPU moyen est de 82 jours pour GR6J sur la période de validation 1 contre 33 jours pour PRES sur la période 2, ou pour la Sèvre Niortaise à Azay-le-Brulé où l'HPU maximum est donné par GARD sur la période 1 et PRES sur la période 2).

Les HPU maximums par bassin issus de l'échantillon de bassins non influencés sont en moyenne plus faibles (53 jours contre 57 jours pour les bassins influencés). De plus, la variabilité de ces HPU sur les bassins influencés est plus faible (écart-type de 20 jours pour les bassins non influencés contre 16 jours pour les bassins influencés).

Les résultats détaillés pour chaque bassin sont donnés dans l'Annexe 5.

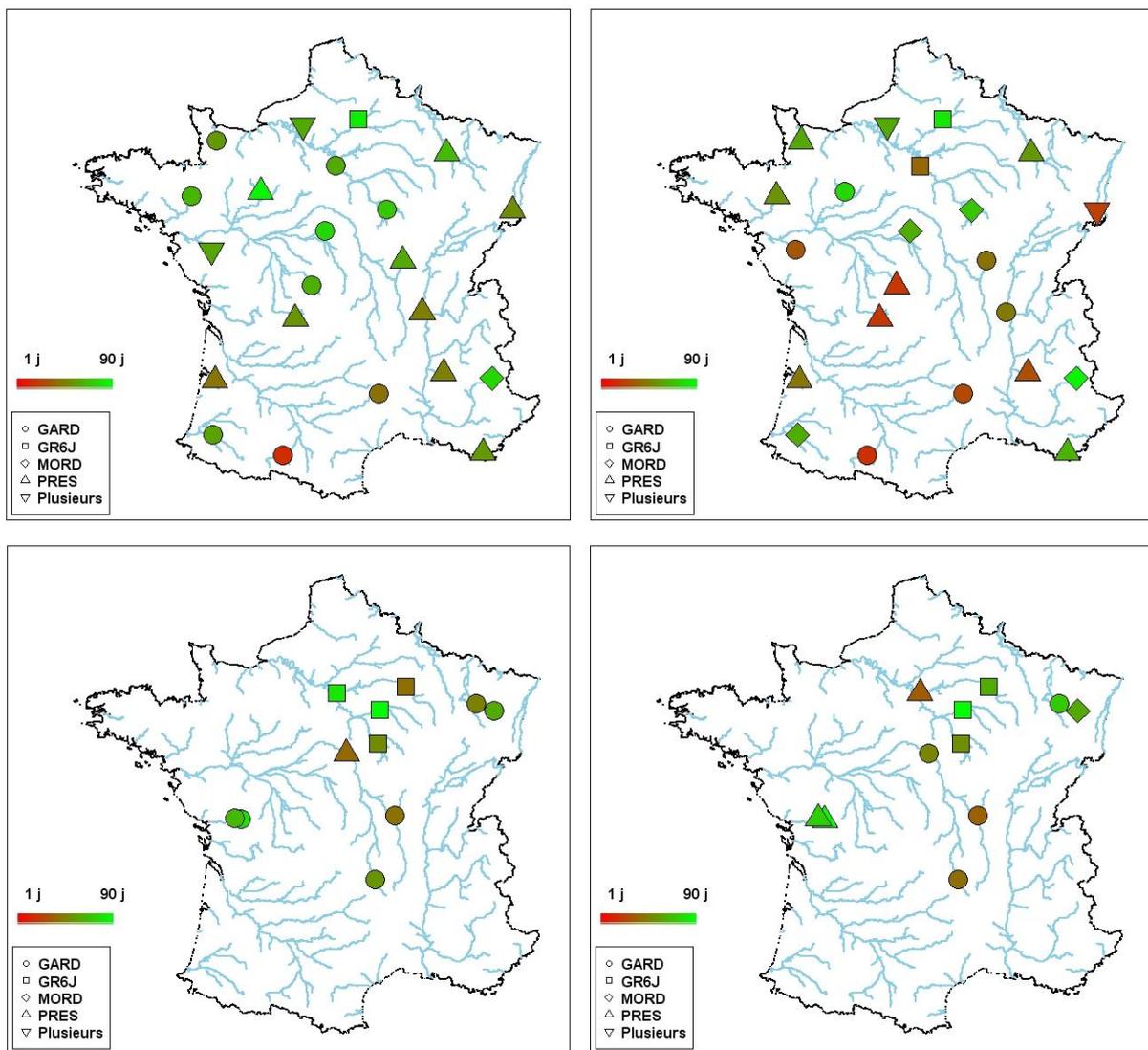


Figure 14 : Carte des horizons de prévision utile moyens pour les 22 bassins non-influencés (en haut) et les 9 bassins influencés (en bas) et pour les périodes de validation 1 (à gauche) et 2 (à droite). Les symboles indiquent le modèle fournissant les meilleurs horizons de prévision utile moyens.

7. Conclusion générale

L'objectif principal du projet PREMHYCE était de réaliser une évaluation comparative de cinq modèles de prévision d'étiages (Gardenia, GR6J, Mordor, Presages et Isba-Modcou) considérés comme opérationnels ou pré-opérationnels en France. Le protocole de test mis en place a permis de s'assurer que les résultats obtenus par les différents modèles sur un ensemble de bassins versants considérés comme naturels ou influencés soient rigoureusement comparables. Des jeux de critères numériques ont permis d'évaluer différents aspects des performances des modèles, en simulation et en prévision. Les stratégies de calage des modèles ont été laissées au choix des modélisateurs. Parmi les modèles testés, seul Isba-Modcou a été utilisé sans calage à la station cible (c'est-à-dire en conditions non jaugées).

- **Principaux enseignements**

Les principaux résultats des nombreux tests comparatifs réalisés sont les suivants :

- les modèles utilisés avec calage ont montré des performances proches en simulation. Le modèle sans calage a quant à lui présenté des performances moindres. Bien que cette différence de performance puisse venir en partie de la structure des modèles, l'absence

de calage à la station est vraisemblablement un facteur limitant les performances de ce modèle ;

- le niveau maximum de performances et la variabilité des performances entre modèle sont apparus très différents suivant les bassins versants. Alors que certains modèles réussissent tous à obtenir de bonnes performances sur certains bassins, d'autres paraissent avoir des étiages très délicats à modéliser ;
- en simulation, la prise en compte des influences par des méthodes simples paraît donner de bons résultats et permettre d'atteindre des niveaux de performance moyens comparables à ceux obtenus sur bassins naturels ;
- en prévision, à courte échéance (7 jours) les différences entre modèles sont un peu plus importantes, en particulier sur les bassins influencés. Ces différences accrues s'expliquent en partie par la façon dont sont assimilés les débits observés à l'instant de la prévision. Les différences entre modèles s'estompent avec l'augmentation du délai de prévision ;
- les délais d'anticipation utiles atteignables sont très variables suivant les bassins, en partie en raison des caractéristiques physiques de ces derniers. Ces délais dépendent également des performances du modèle utilisé et du critère (donc de l'objectif de prévision) choisi ;
- l'approche multi-modèle apparaît comme un moyen intéressant d'assurer une meilleure robustesse aux modélisations, en simulation et prévision.

Au-delà de ces résultats comparatifs, le projet PREMHYCE a permis de rassembler des acteurs de la recherche et des services opérationnels autour de la question de la prévision des étiages, encore confidentielle comparativement à celle des crues, mais qui présente des enjeux majeurs, notamment dans une perspective de raréfaction des ressources en contexte de changement climatique. Les réflexions ont notamment permis de dégager un certain nombre de perspectives, autant d'un point de vue recherche que d'un point de vue opérationnel. Parmi celles-ci, on peut notamment mentionner :

- le besoin de faire progresser les modèles de simulation et prévision des étiages : même si les résultats obtenus sont prometteurs, les marges de progrès restent importantes sur de nombreux bassins ;
- la prise en compte des influences en contexte prévisionnel serait à améliorer. Elle demande l'utilisation de module de gestion et d'optimisation, dont l'application pour de longues échéances et encore peu répandue ;
- le lien entre les modèles de prévision des étiages et les prévisions météorologiques à moyenne échéance (ou même saisonnières) doit être renforcés, de manière à améliorer la finesse et la fiabilité des prévisions d'étiages ;
- les modèles testés ici sont bien adaptés à une mise en œuvre opérationnelle à large échelle. Certains sont d'ailleurs déjà utilisés. Des réflexions sur le développement d'une plateforme de modélisation permettant d'exploiter ces modèles sur de nombreux bassins présentant des enjeux liés aux étiages doivent être entamées ;
- enfin, l'expérience plus ancienne sur l'application de modèle de prévision des crues devrait être exploitée pour la mise en œuvre de modèles de prévision d'étiages, et des synergies sont certainement à rechercher, notamment en termes d'outils.

Références

- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2014), Projet PREMHYCE : Résultat de la comparaison des modèles de prévision d'étiage, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 33p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2013 (c)), Projet PREMHYCE : Description de la base de données pour l'étude sur des bassins influencés, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 15p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2013 (b)), Projet PREMHYCE : Développement d'un multi-modèle pour la simulation et la prévision d'étiage, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 18p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2013 (a)), Projet PREMHYCE : Résultat de la comparaison des modèles de prévision d'étiage, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 61p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2012 (c)), Projet PREMHYCE : Résultat de la comparaison des modèles de simulation d'étiage, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 37p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2012 (b)), Projet PREMHYCE : Note relative aux critères basés sur les caractéristiques d'étiage : volume déficitaire, durée, date de début et fin d'étiage, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 9p.
- NICOLLE P., PERRIN C., ANDRÉASSIAN V. (2012 (a)), Projet PREMHYCE : Protocole d'évaluation et base de données, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 26p.
- PERRIN C., NICOLLE P., PUSHPALATHA R. ANDRÉASSIAN V. (2011), Prévision des étiages – Développement et comparaison de méthodes, rapport d'étude ONEMA, Irstea, 32p.

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation des 22 bassins versants naturels sélectionnés en France métropolitaine	10
Figure 2 : Localisation des deux bassins versants naturels sélectionnés sur l'île de la Réunion	10
Figure 3 : Localisation des bassins versant sélectionnés, à gauche sur la Sèvre et la Loire, à droite sur la Seine et la Meurthe	11
Figure 4 : Illustration des cinq modèles testés	12
Figure 5 : Illustration des différences entre exercices de simulation (gauche) et prévision (droite) basés sur un modèle hydrologique	14
Figure 6 : Exemple de graphique « radar » utilisé pour résumer les performances de chaque modèle sur l'ensemble des bassins	18
Figure 7 : Exemples de quelques graphiques utilisés pour illustrer les résultats en simulation (haut) et prévision (bas)	18
Figure 8 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu) pour les cinq modèles hydrologiques, le modèle DAQ et le multi-modèle	20
Figure 9 : Cartes des performances moyennes sur les 2 périodes de validation en C2MiQ, Vdef et CSI pour chaque modèle et pour les bassins non influencés (triangles) et influencés (rond) Erreur ! Signet non défini.	
Figure 10 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu), sur la période de validation 2 à une échéance de +7 jours pour les cinq modèles hydrologiques et le modèle NVQ.....	26
Figure 11 : Critères de performances moyens sur les 44 bassins périodes non-influencés en France métropolitaine (lignes rouges) et sur les 18 bassins période influencés (bleu), sur la période de validation 2 à une échéance de +30 jours pour les cinq modèles hydrologiques et le modèle NVQ.....	26
Figure 12 : Cartes des performances à +7 jours sur la période de validation 2 en RMSEss, BSssvig et Vdef pour chaque modèle et pour les 22 bassins non influencés (triangles) et influencés (rond).....	28
Figure 13 : Cartes des performances à +7 jours sur la période de validation 2 en RMSEss, BSssvig et Vdef pour chaque modèle et pour les 22 bassins non influencés (triangles) et influencés (rond).....	29
Figure 14 : Carte des horizons de prévision utile moyens pour les 22 bassins non-influencés (en haut) et les 9 bassins influencés (en bas) et pour les périodes de validation 1 (à gauche) et 2 (à droite). Les symboles indiquent le modèle fournissant les meilleurs horizons de prévision utile moyens.....	31
Tableau 1 : Périodes de test sélectionnées sur les bassins versants non influencés	11
Tableau 2 : Périodes de test sélectionnées sur les bassins versants influencés	12
Tableau 3 : Liste des cinq modèles hydrologiques testés.....	12
Tableau 4 : Liste des critères d'évaluation et signification	17
Tableau 5 : Classement des modèles basé sur les performances moyennes en validation sur les 22 bassins métropolitains non influencés et les 9 bassins influencés (le rang moyen n'est calculé que sur les neuf critères d'étiage)	20
Tableau 6 : Classement des modèles basé sur les performances en validation sur les 9 bassins influencés (sur les 22 bassins non influencés) pour la période 2, sur la base des prévisions fournies par Météo-France.....	25

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des correspondants dans les services hydrométriques (DREAL, DEAL, Office de l'Eau Réunion, etc.), la banque HYDRO du SCHAPI, ainsi que les gestionnaires d'ouvrages (notamment l'EPTB Seine Grands Lacs et EDF) qui ont permis de réaliser la sélection de bassins et de constituer les bases de données. Ils remercient également Météo-France pour la mise à disposition gracieuse des données climatiques dans le cadre du projet. Enfin, ils remercient les personnes des services déconcentrés ayant pu suivre le déroulement du projet, et dont les suggestions et retours ont permis d'améliorer la qualité globale des travaux.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de conventions établies entre les partenaires scientifiques et l'ONEMA ou le MEDDE.

Annexe 1 : Liste des bassins versants non influencés

N°	NOM	Code HYDRO	Gestionnaire	Surf (km²)	BFI	Gp Hydro	DateDeb	DateFin	Nb années	iQBE	iQME	iQHE	Réseau Renard
01	L'Ill à Didenheim	A1080330	DREAL Alsace	657	47.6	2	01/11/1973	02/03/2010	36	1	1	1	Non
02	La Meuse à Saint-Mihiel	B2220010	DREAL Lorraine	2542	25.5	6	01/07/1968	03/01/2010	42	1	1	1	Oui
03	Le Serein à Chablis	H2342020	DREAL Bourgogne	1121	51.1	5	01/08/1954	03/03/2010	56	1	1	1	Oui
04	L'Orge à Morsang-sur-Orge	H4252010	DRIEE IDF	927	65.7	2	01/10/1967	07/03/2010	43	1	1	1	Oui
05	L'Oise à Sempigny	H7401010	DREAL Picardie	4316	28.2	2	01/01/1955	02/03/2010	55	1	1	1	Oui
06	L'Andelle à Vascoeuil	H8212010	DREAL Haute Normandie	379	93.5	1	01/01/1973	27/02/2010	36	1	1	1	Non
07	La Vire à Saint-Lô [Moulin des Rondelles]	I5221010	DREAL Basse-Normandie	868	44.6	4	01/01/1971	03/02/2010	39	1	1	0	Non
08	La Seiche à Bruz [Carcé]	J7483010	DREAL Bretagne	811	48.5	5	01/12/1967	11/03/2010	42	1	1	1	Oui
09	L'Arroux à Etang-sur-Arroux [Pont du Tacot]	K1321810	DREAL Centre	1798	29.6	6	01/11/1971	27/03/2010	39	1	1	1	Non
10	La Sauldres à Salbris [Valaudran]	K6402520	DREAL Centre	1200	54.7	6	01/01/1971	28/03/2010	39	1	1	1	Non
11	La Briance à Condat-sur-Vienne [Chambon Veyrinas]	L0563010	DREAL Limousin	597	56	6	01/01/1966	28/03/2010	44	1	1	1	Oui
12	La Petite Creuse à Fresselines [Puy Rageaud]	L4411710	DREAL Limousin	850	47.7	6	01/01/1958	28/03/2010	52	1	1	1	Oui
13	L'Orne Saosnoise à Montbizot [Moulin Neuf Cidrie]	M0243010	DREAL Pays de la Loire	510	55.5	5	01/12/1967	04/03/2010	43	1	1	1	Oui
14	La Sèvre Nantaise à Tiffauges [la Moulinette]	M7112410	DREAL Pays de la Loire	817	44.8	5	01/11/1967	04/03/2010	43	1	1	1	Oui
15	Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	O0592510	EDF-DTG	1570	23	9	01/01/1913	22/03/2010	97	1	1	1	Non
16	Le Tarn à Montbrun [Pont de Montbrun]	O3121010	EDF-DTG	588	35	7	01/01/1961	31/12/2009	38	1	1	1	Oui
17	Le Gave de Pau à Berenx [Pont de Berenx]	Q5501010	DREAL Aquitaine	2575	11.7	1	01/07/1923	28/03/2010	87	1	1	1	Oui
18	l'Eyre à Salle	S2242510	DREAL Aquitaine	1650	49.6	3	01/01/1967	19/03/2010	43	1	1	1	Oui
19	L'Azergues à Lozanne	U4644010	DREAL Rhône-Alpes	798	45.3	2	01/01/1965	28/03/2010	43	1	1	1	Oui
20	La Drôme à Saillans	V4264010	DREAL Rhône-Alpes	936	39.9	8	01/01/1910	28/03/2010	46	1	1	1	Non
21	La Durance à Embrun [La Clapière]	X0310010	EDF-DTG	2175	19.1	11	01/01/1960	31/12/2009	39	1	1	1	Oui
22	Le Gapeau à Hyères [Sainte-Eulalie]	Y4624010	DREAL PACA	517	44.7	5	01/02/1961	01/03/2010	49	1	1	0	Oui
23	La rivière Langevin [] à Saint Joseph []	40010100	Office de l'Eau de la Réunion	35	81.6	NA	26/11/1986	31/12/2010	24	0	0	0	Non
24	La rivière des Roches [] à Saint Benoît [Abondance]	40130130	Office de l'Eau de la Réunion	24	32.7	NA	22/04/1987	31/12/2010	23	0	0	0	Non

avec :

- BFI : Indice d'écoulement de base estimé ;
- Gp Hydro : Régime hydrologique du cours d'eau
- DateDeb : Date de début d'enregistrement disponible dans la Banque HYDRO (extraction printemps 2010)
- DateFin : Date de fin d'enregistrement disponible dans la Banque HYDRO (extraction printemps 2010)
- Nb années : Nombre d'année disponibles
- iQBE, iQME, iQHE : codes qualité en basses, moyennes et hautes eaux, fournis par la Banque HYDRO (2 = douteuse ; 1 = bonne ; 0 = inconnue)
- Réseau Renard : Appartenance à la liste du réseau de référence étiage établie par le Cemagref de Lyon pour l'ONEMA

Annexe 2 : Liste des bassins versants influencés

Code	Nom rivière	Surface (km ²)	Influence	Proportion moyenne de l'influence par rapport au débit (%)
A6232010	La Plaine à Raon l'étape	118	Barrage Vieux-Pré	49
A6761010	La Meurthe à Damelevières	2280	Barrage Vieux-Pré	4
H1700010	La Seine à Pont sur Seine	8856	Lacs réservoirs Aube et Seine	35
H2221010	L'Yonne à Gurgy	3820	Lac réservoir Pannecièrè	15
H5201010	La Marne à Chalons sur Marne	6292	Lac réservoir Marne	39
H5920010	La Seine à Paris Austerlitz	43825	Lacs réservoirs Aube, Marne, Pannecièrè et Seine	21
K1180810	La Loire à Digoïn	9330	Barrage Villerest	29
K2330810	L'Allier à Vieille Brioude	2263	Barrage Naussac	27
K4180010	La Loire à Gien	35709	Barrages Fades, Naussac et Villerest	11
N4010610	La Sèvre Niortaise à Azay-le-Brulé	244	Prélèvements agricoles	3
N4110620	La Sèvre Niortaise à Echiré	565	Prélèvements agricoles	3

Annexe 3 : Critères numériques en simulation

Nom	Formulation	Commentaire
Critères quadratiques		
<p>Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur l'inverse des débits NSE_{iQ}, borné entre [-1;1] tel que</p> $C2M_{iQ} = \frac{NSE_{iQ}}{2 - NSE_{iQ}}$	$NSE_{iQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_{sim_i}} - \frac{1}{Q_{obs_i}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_{obs_i}} - \frac{1}{Q_{obs_i}} \right)^2}$ <p>où Q_{obs_i} : débit observé Q_{sim_i} : débit simulé n : nombre de pas de temps sur la période</p>	Calculé sur tous les pas de temps de la période
<p>Erreur quadratique moyenne calculée sous le seuil de vigilance $RMSE_{ss}$</p>	$RMSE_{ss} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}$ <p>où Q_{obs_i} : débit observé Q_{sim_i} : débit simulé n : nombre de pas de temps où $Q_{obs_i} \leq \text{seuil}$</p>	
Critères de volume		
Rapport global des déficits d'écoulement		Cumul des volumes déficitaires annuels observés et simulés
Critères temporels		
Ecarts sur les dates de début et fin d'étiage		Ecarts relatifs calculés sur les chroniques journalières moyennes interannuelles
Rapport des durées d'étiage		Cumul des durées annuelles observées et simulées
Critères de sous-passement de seuil		
Probabilité de détection POD		Basés sur le tableau de contingence où un événement est observé/prévu si le débit observé/prévu est inférieur au seuil de vigilance
Taux de fausse alerte FAR		
Indice de succès critique CSI		

Annexe 4 : Critères numériques en prévision

Nom	Formulation	Commentaire
Critères quadratiques		
Erreur quadratique moyenne calculée sous le seuil de vigilance RMSEss	$RMSE_{ss} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\overline{Q}_{prev_i} - Q_{obs_i})^2}$ où \overline{Q}_{obs_i} : débit observé \overline{Q}_{prev_i} : moyenne des débits prévus n : nombre de pas de temps où $Q_{obs_i} \leq seuil$	
Critères de volume		
Rapport moyen des déficits d'écoulement Vdef	$V_{def} = \frac{\sum_{i=1}^n \max(0; Q_{seuil} - \overline{Q}_{prev_i})}{\sum_{i=1}^n \max(0; Q_{seuil} - Q_{obs_i})}$ n : nombre de pas de temps sur la période de validation	Rapport des cumuls des volumes déficitaires annuels observés et prévus (à partir de la moyenne des ensembles)
Critères temporels		
Ecart sur les dates de début et fin d'étiage Datdeb, Datfin	$Datdeb_{fin} = Date_{prev} - Date_{obs}$ $Date_{prev}, Date_{obs}$: se reporter à l'Annexe 1	Ecart relatif calculé sur les chroniques journalières moyennes interannuelles (pour chaque année, la moyenne des ensembles est considérée pour établir une chronique moyenne interannuelle prévue)
Rapport des durées d'étiage Duré_éti	$Duré_{éti} = \frac{Durée_{prev}}{Durée_{obs}}$ $Durée_{prev}$: nombre de jours où $\overline{Q}_{prev_i} \leq seuil$ sur la totalité de la période de validation $Durée_{obs}$: nombre de jours où $Q_{obs_i} \leq seuil$ sur la totalité de la période de validation	Cumul des durées annuelles observées et prévues (à partir de la moyenne des ensembles)
Finesse / Fiabilité		
Evaluation de la finesse Sharpness	$Sharp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{90_i} - Q_{10_i}$ n : nombre de pas de temps où $Q_{obs_i} \leq seuil$ Q_{90} (Q_{10}) : quantile 90 (10) de la distribution des prévisions	Largeur moyenne des intervalles définis par les quantiles 10 et 90 de la distribution des prévisions lorsque l'observation est inférieure au seuil de vigilance
Evaluation de la fiabilité (Containing Ratio ou taux de couverture)	$Cont_ratio = \frac{n}{N}$ n : nombre d'observations contenues dans l'intervalle à 80% des prévisions quand $Q_{obs_i} \leq seuil$ N : nombre de pas de temps où $Q_{obs_i} \leq seuil$	Pourcentage d'observations contenues dans l'intervalle de confiance à 80% des débits prévus (80% des observations devraient être contenu dans cet intervalle) lorsque l'observation est inférieure au seuil de vigilance
Critères de sous-passement de seuil		
Probabilité de détection - POD	$\frac{Succès}{Succès + FA}$	Basés sur le tableau de contingence où un événement est observé/prévu si le

	<i>Succès</i> , <i>FA</i> : se reporter à l'Annexe 1	débit observé/prévu est inférieur au seuil de vigilance
Taux de fausse alerte FAR	$\frac{FA}{Succès + FA}$ <i>Succès</i> , <i>FA</i> : se reporter à l'Annexe 1	
Indice de succès critique CSI	$\frac{Succès}{Succès + FA + Manqué}$ <i>Succès</i> , <i>FA</i> , <i>Manqué</i> : se reporter à l'Annexe 1	
Brier Score : BS _{vig} BS _{crise}	$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2$ où <i>o_i</i> : probabilité d'observation <i>y_i</i> : probabilité de prévision <i>n</i> : nombre de pas de temps où <i>Q_{obs_t}</i> ≤ seuil de vigilance (BS _{crise}) <i>Q_{obs_t}</i> ≤ Q ₅₀ (BS _{vig})	Un évènement est observé/prévu si le débit observé/prévu est inférieur au seuil de crise (BS _{crise}) au seuil de vigilance (BS _{vig})
Discrete Ranked Probability Score (DRPS)	$DRPS = \frac{1}{N_{seuil}} \sum_{k=1}^{N_{seuil}} BS_k$ où <i>n</i> : nombre de pas de temps où <i>Q_{obs_t}</i> ≤ seuil de vigilance	Les seuils de débits choisis sont les quantiles (au dépassement) k=Q ₈₀ , Q ₈₂ , Q ₈₄ , ... , Q ₉₆ , Q ₉₈ (soit 10 quantiles)

Annexe 5 : Horizons de prévision utiles déterminés pour trois critères de performance pour chacun des bassins versants influencés et non-influencés sur les deux périodes de validation

Bassin	Période	RMSEss				CSI				Vdef				HPU moyen par modèle			
		GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES
40010100	P1	90	5	11	90	3	3	3	3	90	90	90	90	61	33	35	61
40010100	P2	90	46	9	90	3	3	3	3	90	81	90	90	61	43	34	61
40130130	P1	16	6	5	90	13	8	10	15	3	4	4	3	11	6	6	36
40130130	P2	8	8	4	90	5	4	5	5	3	3	3	3	5	5	4	33
A1080330	P1	90	12	45	90	7	9	5	9	42	35	8	53	46	19	19	51
A1080330	P2	34	29	56	15	9	10	6	9	30	33	11	29	24	24	24	18
B2220010	P1	80	38	57	81	70	72	18	79	37	29	20	38	62	46	32	66
B2220010	P2	51	29	90	41	62	58	13	90	37	37	53	35	50	41	52	55
H2342020	P1	90	61	52	90	90	90	90	90	32	36	17	26	71	62	53	69
H2342020	P2	90	43	90	90	46	43	29	68	69	59	90	50	68	48	70	69
H4252010	P1	90	3	45	4	4	5	5	90	90	90	90	3	61	33	47	32
H4252010	P2	28	58	41	5	3	5	5	5	3	50	12	4	11	38	19	5
H7401010	P1	90	90	90	90	90	76	54	22	66	85	90	18	82	84	78	43
H7401010	P2	90	90	90	90	75	66	17	15	59	89	90	90	75	82	66	65
H8212010	P1	90	90	90	90	3	3	3	3	90	90	90	90	61	61	61	61
H8212010	P2	90	90	90	90	3	3	3	3	90	50	90	90	61	48	61	61
I5221010	P1	71	44	23	63	56	38	36	59	37	35	15	33	55	39	25	52
I5221010	P2	71	40	45	72	60	58	12	67	42	34	30	42	58	44	29	60
J7483010	P1	90	26	17	90	35	26	90	22	70	49	7	60	65	34	38	57
J7483010	P2	40	14	40	35	36	21	90	90	60	59	20	34	45	31	50	53
K1321810	P1	89	22	61	90	36	18	9	56	38	23	26	36	54	21	32	61
K1321810	P2	55	22	35	38	22	21	13	32	45	36	41	42	41	26	30	37
K6402520	P1	90	90	90	90	52	38	51	25	90	90	90	90	77	73	77	68
K6402520	P2	42	41	90	25	28	21	5	32	38	47	90	32	36	36	62	30

L0563010	P1	88	49	56	90	19	13	10	16	41	45	25	54	49	36	30	53
L0563010	P2	24	16	31	15	24	19	6	42	12	8	6	5	20	14	14	21
L4411710	P1	90	57	50	90	69	48	40	62	30	28	8	28	63	44	33	60
L4411710	P2	24	15	23	14	15	16	8	36	21	11	7	12	20	14	13	21
M0243010	P1	90	17	18	90	90	39	90	90	63	90	10	82	81	49	39	87
M0243010	P2	89	25	63	82	90	27	22	90	52	59	90	40	77	37	58	71
M7112410	P1	64	9	21	64	23	26	28	23	90	18	6	90	59	18	18	59
M7112410	P2	26	7	16	27	39	10	19	34	32	11	7	34	32	9	14	32
O0592510	P1	22	10	28	23	16	17	11	17	14	9	10	10	17	12	16	17
O0592510	P2	26	18	26	17	13	12	9	15	15	12	7	8	18	14	14	13
O3121010	P1	47	19	27	52	64	30	11	59	13	8	6	7	41	19	15	39
O3121010	P2	48	18	17	47	9	9	8	9	24	11	7	17	27	13	11	24
Q5501010	P1	61	24	90	72	90	61	12	29	22	19	53	20	58	35	52	40
Q5501010	P2	27	14	90	20	10	12	5	22	30	24	90	23	22	17	62	22
S2242510	P1	72	40	57	90	30	36	33	34	3	3	3	3	35	26	31	42
S2242510	P2	53	41	59	31	35	34	15	90	25	19	13	8	38	31	29	43
U4644010	P1	71	21	32	73	20	38	11	41	25	17	6	24	39	25	16	46
U4644010	P2	90	23	30	67	9	9	7	13	34	25	5	34	44	19	14	38
V4264010	P1	77	14	83	90	21	19	8	22	20	31	9	26	39	21	33	46
V4264010	P2	24	25	22	26	13	13	10	15	40	43	14	47	26	27	15	29
X0310010	P1	36	11	51	26	52	16	90	45	67	81	90	90	52	36	77	54
X0310010	P2	32	9	81	43	90	90	90	43	66	50	90	90	63	50	87	59
Y4624010	P1	90	5	11	90	3	3	3	3	90	90	90	90	61	33	35	61
Y4624010	P2	90	46	9	90	3	3	3	3	90	81	90	90	61	43	34	61

Bassin	Période	RMSEss				FAR				Vdef				HPU moyen par modèle			
		GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES	GARD	GR6J	MORD	PRES
A6232010	P1	90	86	90	3	3	3	3	3	90	76	3	4	61	55	32	3
A6232010	P2	70	90	90	3	3	3	3	3	21	66	90	4	31	53	61	3
A6761010	P1	80	69	23	16	6	7	5	9	53	37	9	18	46	38	12	14
A6761010	P2	87	39	90	13	68	68	11	48	60	58	90	15	72	55	64	25
H1700010	P1	48	90	40	90	39	45	76	90	56	75						
H1700010	P2	77	90	62	90	52	90	90	90	6	90	42	14	45	90	65	65
H2221010	P1	38	44	29	30	13	16	12	20	90	90	71	42	47	50	37	31
H2221010	P2	17	33	34	18	35	30	13	90	90	90	90	20	47	51	46	43
H5201010	P1	25	41	16	23	3	4	16	57	5	76	11	18	11	40	14	33
H5201010	P2	36	90	29	26	3	6	10	90	90	89	88	21	43	62	42	46
H5920010	P1	54	65	25	26	90	90	90	90	90	90	25	38	78	82	47	51
H5920010	P2	38	28	24	3	6	24	8	90	3	10	16	5	16	21	16	33
K1180010	P1	80	76	40	28	9	11	9	61	33	31	7	9	41	39	19	33
K1180010	P2	35	38	41	21	7	6	4	55	62	46	29	25	35	30	25	34
K2330810	P1	68	43	34	33	11	10	17	31	80	36	26	5	53	30	26	23
K2330810	P2	23	28	18	15	6	5	4	7	90	47	90	6	40	27	37	9
K4180010	P1	63	56	41	36	12	12	15	67	29	32	16	10	35	33	24	38
K4180010	P2	35	24	54	14	66	68	13	65	43	48	52	17	48	47	40	32
N4010610	P1	90	14	70	13	90	90	90	90	61	41	18	90	80	48	59	64
N4010610	P2	90	23	31	90	90	90	90	90	83	67	90	90	88	60	70	90
N4110620	P1	90	86	90	3	18	6	6	14	90	76	4	4	66	46	33	16
N4110620	P2	70	90	16	3	41	9	40	42	21	66	90	4	74	55	49	74

Irstea

1, rue Pierre Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony

01 40 96 61 21

www.irstea.fr

Onema

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr