



HAL
open science

Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ?

Pierre Nicolle, Charles Perrin, Vazken Andréassian, Bénédicte Augeard, Frédéric Besson, A. Carroget, D. Francois, M. Le Lay, F. Régimbeau, D. Thiery

► To cite this version:

Pierre Nicolle, Charles Perrin, Vazken Andréassian, Bénédicte Augeard, Frédéric Besson, et al.. Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ?. Doctorat. France. 2015, pp.24. hal-02603376

HAL Id: hal-02603376

<https://hal.inrae.fr/hal-02603376>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ?

Pierre Nicolle, Charles Perrin, Vazken Andréassian, Bénédicte Augeard, François Besson, Aurélie Carroget, Didier François, Matthieu Le Lay, Fabienne Regimbeau et Dominique Thiéry

Sommaire

N°20

Faible pluie et forte chaleur : en période estivale, les débits des cours d'eau français diminuent et lors d'épisodes climatiques particulièrement secs, les autorités peuvent être amenées à prendre des mesures de restriction des usages de l'eau.

Or, près de 80% des volumes prélevés pour ces usages (production énergétique, irrigation, approvisionnement en eau potable, ou navigation) proviennent des eaux de surface.

L'anticipation des périodes de très basses eaux (étiages) est donc nécessaire pour améliorer la gestion de l'eau et prendre des mesures adaptées pour atténuer les impacts socio-économiques et écologiques des restrictions d'usage d'eau. De plus, la perspective d'étiages plus marqués dans un contexte de changement climatique souligne la nécessité d'outils de gestion appropriés pour prévoir les faibles débits.

Ce document présente ce qu'est la prévision des étiages, comment elle est réalisée et pour quels besoins en France, ainsi que les résultats d'un projet de recherche original de comparaison de plusieurs modèles de prévision des étiages, en vue de les intégrer dans un outil à vocation opérationnelle.

- 1- Pourquoi et comment prévoir les étiages ?
- 2- Comment utiliser un modèle hydrologique pour la prévision des étiages ?
- 3- Comment évaluer des modèles de prévision d'étiage ? Méthode proposée par le projet PREMHYCE (Prévision des étiages par des modèles hydrologiques, comparaison et évaluation)
- 4- Quels sont les principaux enseignements du projet PREMHYCE ?
- 5- Quelles modalités pour l'utilisation opérationnelle des modèles hydrologiques ?
- 6- Perspectives
- Pour en savoir plus

© Michel Bramard - Onema



I- Pourquoi et comment prévoir les étiages ?

● Qu'est-ce que l'étiage d'un cours d'eau ?

L'étiage est parfois assimilé aux basses eaux saisonnières, mais il convient mieux de définir l'étiage comme le débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, entendu comme l'exacerbation de ces basses eaux (Dacharry, 1996). L'étiage est considéré comme une période limitée dans l'année où les débits passent en dessous d'une valeur seuil. La sévérité de l'étiage peut être caractérisée en termes de durée, d'intensité mais également sur la base des volumes qu'il n'est plus possible de prélever en rivière (appelés volumes déficitaires) relativement à un seuil (Figure 1).

Comme tout débit en rivière, l'étiage est la résultante d'un ensemble de processus de transformation et de transfert de l'eau sur le bassin versant qui alimente la rivière. Contrairement aux crues qui sont des épisodes hydrologiques relativement rapides (quelques heures à quelques jours), les étiages ont des dynamiques lentes et sont le résultat de phénomènes hydrométéorologiques s'étendant sur plusieurs semaines à plusieurs mois et conduisant à la baisse des débits.

Les bas débits en rivière sont principalement alimentés par les compartiments souterrains du bassin versant en

connexion avec la rivière. Les nappes souterraines alimentent la rivière lorsque leur niveau est supérieur à celui de la rivière. Les niveaux des basses eaux sont donc fonction des caractéristiques hydrogéologiques des bassins versants. Ce point est important puisque la taille et la vitesse de vidange des compartiments souterrains vont en partie conditionner la capacité d'un bassin versant à produire ou non des étiages soutenus, sur des durées plus ou moins longues.

En France métropolitaine, la diminution des débits des cours d'eau se produit majoritairement en été, avec des étiages principalement en fin d'été ou début d'automne (août-septembre). Elle est la conséquence de l'augmentation des températures, qui induit un accroissement de l'évapotranspiration (l'eau qui s'évapore du sol et celle qui est « consommée » par les végétaux). Cette augmentation des températures peut être combinée à une baisse saisonnière des précipitations, limitant d'autant plus la disponibilité en eau pour l'écoulement. Ceci provoque la diminution des niveaux des eaux souterraines et des rivières, appelée tarissement, aboutissant à des situations d'étiage d'autant plus importantes qu'elles se prolongent

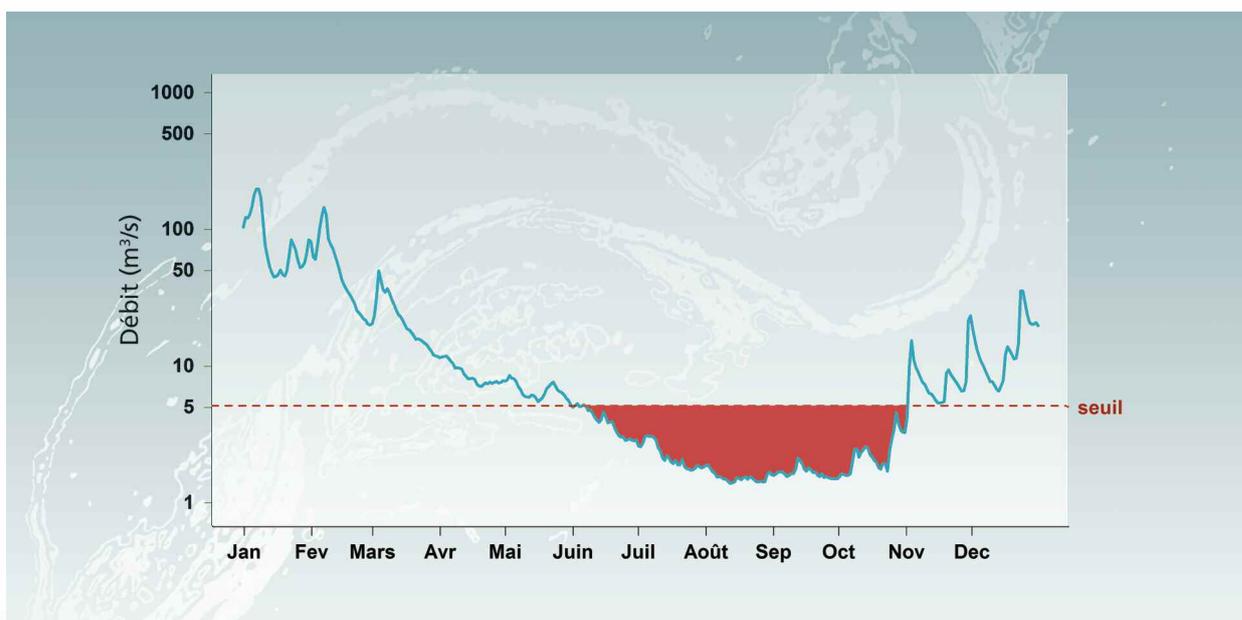


Figure 1. Illustration de la sévérité d'un étiage par sa durée et son volume déficitaire.

dans le temps. Les processus à l'origine des étiages peuvent remonter à des saisons antérieures (hiver précédent déficitaire en pluie, donc nappe souterraine peu rechargée par exemple) et cette genèse longue explique la difficulté à déterminer les facteurs de leur apparition et leur sévérité (Delus, 2011). De plus, les prélèvements d'eau en rivière pour différents usages peuvent avoir un impact conséquent sur les débits.

● Comment sont gérés les étiages en France ?

Les étiages revêtent des enjeux environnementaux et socio-économiques importants. En France, les rivières constituent la première source d'approvisionnement en eau pour différents usages (eau potable, irrigation, énergie, industrie, etc.) et sont également utilisées pour la navigation ou pour des activités récréatives. Tous ces prélèvements sont soumis à déclaration ou à demande d'autorisation auprès de l'administration (article R214-1 du Code de l'environnement). En période d'étiage, la gestion de ces usages s'appuie sur deux principes complémentaires :

■ **une gestion structurelle (ou long terme) des prélèvements.** Pour éviter la surexploitation de la ressource en eau, les prélèvements déclarés et autorisés ne doivent en théorie pas dépasser le volume d'eau prélevable. Ce dernier est calculé pour que, statistiquement, huit années sur dix en moyenne, les volumes et débits maximaux autorisés ou déclarés puissent en totalité être prélevés dans cette ressource tout en garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants (circulaire du 30 juin 2008). Pour les deux années restantes, il peut être considéré que la situation relève de circonstances climatiques ou hydrologiques exceptionnelles, et qu'elle peut être gérée comme une situation de crise ;

■ **une gestion en cas de crise.** Les préfets peuvent prendre des mesures de suspension provisoire des usages de l'eau (article L211-3 du Code de l'environnement) lors d'épisodes exceptionnels. Ainsi les arrêtés cadres

Par ailleurs, une partie des étiages français se produisent en période hivernale sur les massifs montagneux : sous l'effet de la baisse des températures, les précipitations deviennent solides, sont stockées au sol sous forme de manteau neigeux et ne sont donc plus disponibles pour l'écoulement. Ces étiages hivernaux ont leur importance pour certains usages de l'eau, notamment dans les communes de haute montagne.

départementaux définissent des zones et des règles de gestion à appliquer en période d'étiage (exemple en Encart, page suivante). Ils permettent de garantir une progressivité des mesures de restriction en fonction de niveaux seuils dans les rivières ainsi que le respect du principe de solidarité amont-aval. Ces seuils sont généralement au nombre de trois ou quatre : vigilance, alerte, alerte renforcée et crise. Ils peuvent être définis sur la base de débits caractéristiques calculés sur de longues séries de données de débit : quantiles de la courbe des débits classés (valeur en dessous de laquelle est observé un pourcentage donné des débits), débit mensuel minimum annuel (QMNA) ou le débit moyen minimum sur x jours (VCNx) associés à des périodes de retour, etc.

Prévoir les étiages pour anticiper les périodes de pénurie est essentiel pour améliorer la gestion de la ressource en eau. Cela permet potentiellement de limiter les périodes de crise et ainsi de réduire les impacts socio-économiques et écologiques des pénuries d'eau. Compte tenu de la dynamique lente des étiages, des prévisions de l'ordre de quelques jours à quelques semaines sont nécessaires.



Exemple de l'arrêté préfectoral cadre sécheresse d'Indre-et-Loire pris en 2013

Le 11 juin 2013, le préfet du département d'Indre et Loire a émis un arrêté cadre sécheresse pour faire face à des insuffisances éventuelles de la ressource en eau en période d'étiage. Ce document permet de cadrer les mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau. Il s'agit de gérer au mieux les situations de pénurie en assurant le maintien des usages prioritaires comme l'alimentation en eau potable.

L'arrêté cadre, qui précise sa propre durée de validité, permet de :

- délimiter les zones hydrographiques où sont susceptibles de s'appliquer des mesures de restriction ou d'interdiction des prélèvements ou des rejets ; 47 zones ont ainsi été définies sur le département ;
- fixer les seuils de référence en dessous desquels des mesures de restriction ou d'interdiction des prélèvements doivent s'appliquer ; ces seuils sont des valeurs de débit lorsqu'une station hydrométrique est installée ou des observations d'assecs ;
- définir les mesures de limitation ou d'interdiction temporaires des usages de l'eau applicables dès lors que les seuils de référence sont atteints.

L'arrêté définit dans un premier temps les types de prélèvements qui seront impactés par des mesures de restriction. Dans ce département, certains usages tels que les prélèvements en eau potable ou l'arrosage individuel des potagers sont par exemple exemptés des règles de gestion.

L'arrêté précise ensuite les zones hydrographiques de référence (et les communes concernées), correspondant aux bassins versants où s'appliqueront les mesures de restriction ou d'interdiction de prélèvements ou rejets. Pour chacune de ces zones, deux seuils de débit (seuil d'alerte renforcée et seuil de crise) ont été déterminés et déclencheront les mesures de restriction de certains usages (alerte renforcée) ou leur interdiction (crise).

L'arrêté cadre définit également les conditions de réunion d'un comité sécheresse qui programme les mesures de limitation ou d'interdiction de chaque zone hydrographique déterminée, pour émettre l'arrêté sécheresse qui appliquera ces mesures spécifiques.

Tous les usages de l'eau correspondant à différentes catégories (consommation des collectivités, des particuliers, usages industriels et commerciaux, usages agricoles) sont détaillés ainsi que les mesures de restriction ou limitations associées. Ainsi, il est interdit d'arroser les espaces verts de 10h à 20h lorsque le seuil d'alerte renforcée est sous-passé et l'interdiction devient totale lorsque le seuil de crise est sous-passé.

L'arrêté spécifie également les poursuites encourues pour le non-respect de ses mesures et les recours possibles.

Enfin, l'arrêté cadre définit les personnels en charge de l'application de ses dispositions et de sa diffusion.

<http://www.indre-et-loire.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement/Gestion-de-l-eau/Eau-et-milieux-aquatiques/Prelevements-et-les-redevances/Arrete-cadre-secheresse-du-11-juin-2013>

● Quels sont les outils de prévision des étiages et leurs limites ?

Pour prévoir les étiages, plusieurs approches sont possibles. Les hypothèses sous-jacentes à chacune d'elles sont plus ou moins fortes, suivant les données disponibles et les niveaux de connaissance et de compréhension du fonctionnement du bassin versant.

Trois grands types d'approches de prévision des étiages peuvent être distingués :

- **la caractérisation statistique des débits.** Il s'agit d'utiliser la variabilité naturelle des débits observés dans les années d'enregistrement comme indicateur des conditions susceptibles de se produire dans le futur. Pour chaque jour de l'année, la distribution statistique des débits observés au cours des années antérieures est calculée. Cette distribution est ensuite utilisée pour estimer les probabilités d'apparition des débits futurs. Cette méthode, très simple, permet de fournir une gamme probable des débits futurs. En revanche, elle ne permet pas de tenir compte des conditions initiales observées ni d'informations sur les conditions météorologiques futures. L'hypothèse sous-jacente de cette approche est donc que les conditions initiales et futures ont peu d'impact sur la prévision ;

- **les lois de tarissement de débit en rivière.** Elles visent à reproduire la diminution des débits d'une rivière au cours du temps en l'absence de précipitations futures. Cette méthode considère le débit observé à l'instant de prévision comme condition initiale. La loi de Maillet (exponentielle décroissante) est couramment utilisée pour simuler la diminution du débit à partir de cette condition initiale. L'hypothèse d'absence de pluie future conduit à des estimations de débit pessimistes ;

- **les modèles hydrologiques de type pluie-débit.** Ils permettent de reproduire le comportement hydrologique du bassin versant en réponse à des forçages météorologiques (pluie et évapotranspiration). Ils permettent de simuler les états initiaux de divers compartiments du bassin versant et de prendre en compte les conditions météorologiques futures pour fournir des estimations de débit. Si de nombreux scénarios météorologiques futurs sont disponibles (par exemple des prévisions d'ensemble issues d'un modèle météorologique), on peut ainsi avoir accès à la distribution des débits futurs correspondants, donc à une information probabiliste.

Le Tableau 1 compare ces différentes approches. Bien entendu, les catégories d'approches proposées ici ne sont pas exhaustives, d'autres approches hybrides étant envisageables (par exemple des approches multimodèles). Parmi ces trois approches, celle exploitant les modèles pluie-débit apparaît comme la plus complète et polyvalente et sera donc privilégiée ici.

1
Tableau

Données utilisées par trois types d'approches de prévision des étiages et prévisions associées.

Approche de prévision	Conditions initiales	Conditions futures	Commentaires
Caractérisation statistique	Non prises en compte	Non prises en compte	Approche « climatologique » basée uniquement sur les séries historiques
Loi de tarissement	Débit observé	Pluie nulle	Hypothèse pessimiste de prévision
Modèle hydrologique pluie-débit	Simulations des différents compartiments du bassin	Prise en compte des scénarios météorologiques disponibles	Prévisions prenant en compte à la fois des conditions initiales et futures

● Quelles sont les sources d'incertitudes dans la prévision des étiages ?

La prévision vise à quantifier ce qui va arriver dans le futur, qui est par définition inconnu. Elle est donc soumise à des sources d'erreurs liées à la méconnaissance des conditions initiales et futures, et de l'évolution du système étudié.

En prévision des étiages, les principales sources d'incertitudes sont les suivantes :

■ **conditions initiales sur le bassin versant.** L'estimation des conditions initiales, que ce soit pour les débits, l'humidité des sols ou les niveaux de nappes, présente diverses difficultés métrologiques et méthodologiques. En effet, la mesure de faibles débits en rivière reste délicate : irrégularité de la section, précision des instruments de mesure, etc. L'estimation de la quantité d'eau souterraine soulève la difficulté de l'interpolation¹ spatiale de mesures ponctuelles à l'échelle du bassin versant et elle nécessite la connaissance des caractéristiques des sols et du sous-sol (par exemple porosité, conductivité hydraulique, etc.). En dehors du débit, il est donc souvent difficile d'avoir accès à des estimations de conditions initiales en temps réel. Le recours à des méthodes de simulation peut donc aider à compenser l'absence de mesure, mais les résultats de ces méthodes sont eux-mêmes entachés d'incertitudes (erreur de modélisation, utilisation de données météorologiques spatialisées en entrée comprenant elles-mêmes des incertitudes) ;

■ **conditions météorologiques futures.** La connaissance des pluies et des températures futures est un facteur important de la prévision des étiages, puisque ces forçages vont en partie conditionner les débits futurs. Leur quantification est réalisée par des modèles météorologiques, dont les sorties restent encore entachées d'erreurs, et ce d'autant plus que les horizons de prévision sont lointains. En absence de prévision météorologique, des archives

d'observations climatologiques passées peuvent aussi être utilisées. Les modèles pluie-débit, en exploitant un ensemble de scénarios climatologiques, permettent de quantifier l'incertitude associée à la méconnaissance des conditions météorologiques futures ;

■ **comportement hydrologique du bassin versant.** La caractérisation de la réponse du bassin versant aux conditions météorologiques est délicate, étant donné la diversité, la complexité et la variabilité spatio-temporelle des processus mis en jeu. La représentation de la relation pluie-débit dépend de nombreux paramètres dont il faut estimer les valeurs, généralement sur la base des observations passées. La disponibilité de ces dernières est donc primordiale pour limiter les incertitudes. La comparaison entre les données simulées dans le passé et les données réellement observées permet de quantifier l'incertitude sur la représentation du comportement du bassin ;

■ **activités humaines.** Aux trois sources d'incertitudes précédentes existant sur tous les bassins s'ajoute une quatrième, à savoir la méconnaissance des impacts des activités humaines, telles que prélèvements, rejets, transferts d'un bassin à l'autre, ouvrages de régulation, etc. sur les bassins versants influencés. La quantification des influences étant souvent délicate, et leur prise en compte dans des outils de simulation encore imparfaite, les influences passées et futures sur le bassin peuvent avoir un impact significatif sur l'incertitude associée aux prévisions de débit.

Ces différentes sources d'incertitudes se combinent et leurs impacts respectifs sur les prévisions d'étiage peuvent dépendre de l'horizon de prévision ciblé : ainsi, l'impact de l'incertitude sur les conditions initiales va diminuer au fur et à mesure que l'horizon de prévision augmente.

● Quelles sont les qualités attendues d'une prévision d'étiage ?

L'utilité pratique d'un modèle de prévision des étiages pour des applications de gestion va directement dépendre de la qualité de ses sorties (données calculées par le modèle).

Parmi les qualités génériques attendues des prévisions, on peut citer :

■ **la justesse.** Le modèle doit fournir des débits aussi proches que possible des observations réelles faites *a posteriori* ;

■ **la robustesse.** Le niveau d'erreur du modèle ne doit pas augmenter dans des situations inconnues en dehors de la gamme de celles rencontrées dans le passé ;

■ **la fiabilité et la finesse.** Il s'agit de deux attributs communément évalués sur des prévisions probabilistes. Au sens statistique, une prévision est jugée fiable si les intervalles de confiance à x % associés aux prévisions contiennent en moyenne x % des observations sur une longue période. Elle est d'autant plus fine que les intervalles

1- Opération consistant à déterminer, à partir d'une série statistique succincte aux valeurs trop espacées, de nouvelles valeurs correspondant à un caractère intermédiaire pour lequel aucune mesure n'a été effectuée.

de confiance sont réduits (faible dispersion autour de la valeur centrale). Ces deux qualités sont délicates à atteindre simultanément ;

■ **l'anticipation.** La prévision est d'autant plus intéressante qu'elle fournira des informations utiles longtemps à l'avance. Cette qualité d'anticipation peut être par exemple quantifiée relativement à des franchissements de seuils d'étiage.

Ces différents aspects de la qualité de la prévision auront plus ou moins d'importance suivant les enjeux, usages et contextes ciblés. Comme nous le verrons dans la suite, il existe des techniques et critères variés pour évaluer ces différentes qualités.

II – Comment utiliser un modèle hydrologique pour la prévision des étiages ?

● Le modèle hydrologique comme représentation du comportement hydrologique du bassin versant

Un modèle hydrologique est une représentation simplifiée du fonctionnement du bassin versant, sous forme d'équations mathématiques. Ici, on s'intéresse aux modèles pluie-débit (ou plus rigoureusement précipitations-évapotranspiration-débit). Ce type de modèle traduit un ensemble de processus physiques à l'œuvre sur le bassin versant conduisant aux débits à l'exutoire d'un cours d'eau à partir d'entrées de pluie (précipitations) et d'autres variables climatiques comme la température qui permet d'estimer l'évapotranspiration. Il est souvent constitué de deux fonctions :

■ **une fonction de production.** Elle divise la pluie précipitée sur le bassin versant en une part évapotranspirée, une part stockée au sein du bassin versant, une part rejoignant des nappes profondes et une part qui participe à l'écoulement ;

■ **une fonction de routage.** Elle simule le transfert de l'eau au sein des versants et du réseau hydrographique et répartit dans le temps la quantité d'eau qui s'écoule dans le cours d'eau.

Ces fonctions comportent des variables d'états internes (évoluant dans le temps) représentant des stocks ou flux d'eau (par exemple l'humidité du sol), et des paramètres (fixes dans le temps) représentant des propriétés physiques du bassin (par exemple l'épaisseur du sol). Leur fonctionnement en continu (tout au long de l'année) permet d'intégrer les conditions antérieures sur le bassin versant. La détermination des paramètres est parfois faite par mesure directe mais plus généralement réalisée par optimisation numérique sur des séries d'observations passées.

Un modèle hydrologique nécessite des variables d'entrée. Ici, il s'agit des forçages climatiques : les pluies donnant une estimation des entrées d'eau atmosphériques, et d'autres variables telles que la température, le rayonnement, etc., permettant de quantifier les retours d'eau vers l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Certains des modèles utilisés dans la suite utilisent le concept d'évapotranspiration potentielle pour estimer l'évapotranspiration réelle.

Ces modèles sont développés en général pour représenter le fonctionnement « naturel » d'un bassin versant. Ils ne prennent pas en compte les influences anthropiques (prélèvements, rejets, transferts interbassin, ouvrages de régulation), mais des méthodes existent pour les intégrer. Certains modèles ont d'ailleurs été explicitement développés pour tenir compte de ces influences, par exemple le modèle Marthe² ou le modèle hydrologique de la plateforme Maélia³ qui prennent explicitement en compte la dynamique des prélèvements agricoles.

2- Développé par le Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM (Seguin, 2013)

3- Développée par l'Institut national de recherche en agronomie, Inra (Balestrat et Théron, 2014)

● Principes de l'utilisation d'un modèle hydrologique pour la prévision des étiages

La production d'une prévision d'étiage à l'aide d'un modèle hydrologique comporte plusieurs étapes. Nous décrivons ici les principales étapes de la mise en œuvre des modèles qui seront utilisés par la suite. Nous nous plaçons dans le cas d'une prévision émise un jour j , sur une plage de H jours (horizon de prévision) allant de $j+1$ à $j+H$. Pour les étiages, l'horizon H peut aller de quelques jours à quelques semaines voire quelques mois. On suppose que les paramètres des modèles ont été préalablement estimés par mesure ou optimisation à partir des données observées passées.

Quatre étapes peuvent être distinguées (voir aussi Figure 2).

■ Étape 1 – Initialisation

Le modèle simule le débit sur une période passée (typiquement au moins un an) précédant la date j , en utilisant les observations d'entrées météorologiques sur cette période. Sur la Figure 2 étape 1, seul le dernier mois de simulation est représenté. A l'instant j , on dispose alors d'un vecteur de variables d'état du modèle, résultant de l'intégration des conditions passées et représentant les stocks d'eau existants au sein du bassin versant. Ces états sont un indicateur du potentiel du bassin à générer des écoulements ;

■ Étape 2 – Assimilation (appelée aussi mise à jour)

Cette étape permet d'exploiter les mesures disponibles sur le bassin versant, susceptibles d'aider à corriger les erreurs du modèle que l'on peut constater à l'instant j , typiquement un écart entre la valeur observée et la valeur simulée de débit à cet instant. Des approches adaptées d'assimilation peuvent alors être appliquées pour minimiser ces erreurs, en jouant par exemple sur les états internes du modèle, générant ainsi un vecteur d'état mis à jour. Cette étape d'assimilation n'est pas systématiquement mise en œuvre ;

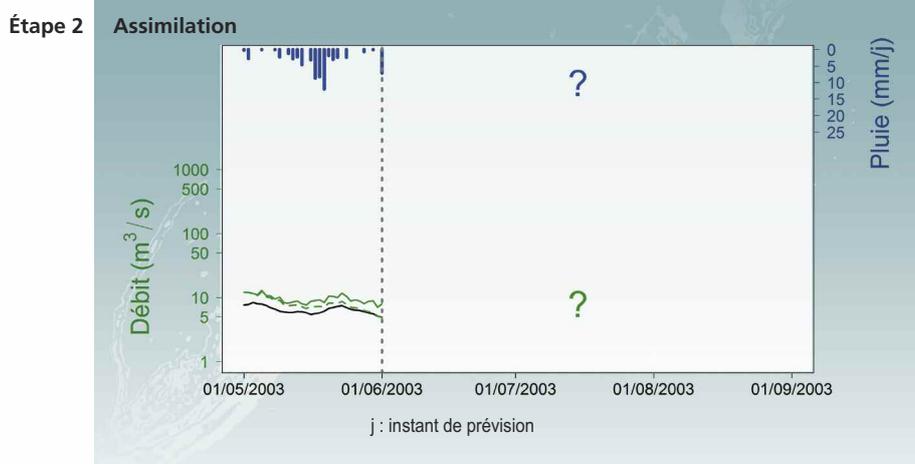
■ Étape 3 – Prévision

Il s'agit de l'étape clé du processus. A partir des conditions initiales précédemment déterminées, le modèle simule les débits sur la plage de prévision, en utilisant un scénario météorologique issu de modèles de prévisions météorologiques ou d'archives climatiques. Cela permet de simuler les débits futurs de $j+1$ à $j+H$. Cette étape est répétée autant de fois qu'il y a de scénarios disponibles, en repartant à chaque fois des mêmes conditions initiales à j . Un ensemble de prévisions de débits peut donc être généré, chaque élément (appelé membre) de cet ensemble étant relatif à un scénario donné ;

■ Étape 4 – Traitement statistique

L'ensemble des membres de la prévision hydrologique est analysé statistiquement pour comparer les débits futurs à différents seuils et déterminer des probabilités de sous-passer ces seuils. Des approches de post-traitement peuvent être appliquées pour corriger les biais moyens constatés du modèle sur de longues périodes (par exemple une tendance systématique à la surestimation des étiages).

Au cours de ce processus (étapes 1 à 4), il est possible de prendre en compte les influences anthropiques (prélèvements, rejets, transferts ou ouvrages par exemple) si les modèles sont configurés pour cela. Cette étape nécessite de disposer de scénarios d'influences futures, qui sont parfois difficiles à obtenir ou estimer.



- simulé
- - - simulé mis à jour
- observé
- Intervalles contenant 50% des prévisions
- Intervalles contenant 90% des prévisions

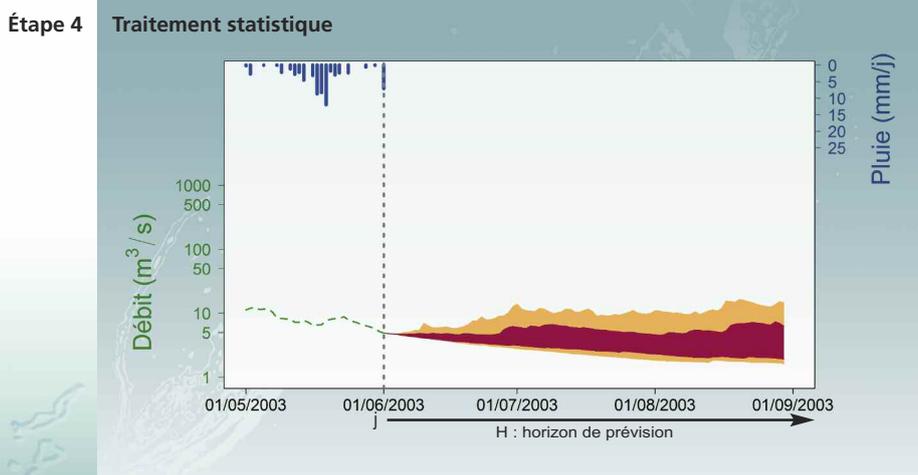
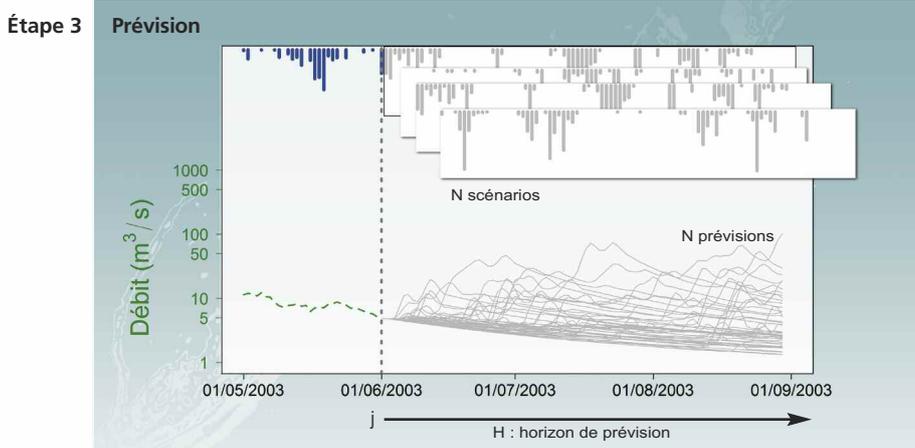


Figure 2. Construction de la prévision hydrologique d'ensemble à partir de scénarios météorologiques comme entrée du modèle pluie-débit. Après avoir initialisé le modèle jusqu'à l'instant j, la simulation est mise à jour par assimilation des données observées, puis N prévisions sont générées à partir de N scénarios de pluie et permettent d'établir des statistiques de prévision.

III- Comment évaluer des modèles de prévision d'étiage ? Méthode proposée par le projet PREMHYCE (Prévision des étiages par des modèles hydrologiques, comparaison et évaluation)

● Motivations et objectifs du projet PREMHYCE

L'Onema et la Direction de l'eau et de la biodiversité du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (Medde) ont lancé en 2011 une étude d'évaluation des modèles de prévision d'étiages sur des bassins versants français, intitulée PREMHYCE. Cette étude comparative a eu pour but d'évaluer les forces et faiblesses de cinq modèles de prévision d'étiage, dans la perspective de développer des produits opérationnels de prévision. Ces modèles ont été testés sur des bassins

versants considérés comme naturels et sur des bassins versants soumis à des influences (essentiellement prélèvement en rivière et barrages).

À l'issue des travaux scientifiques achevés début 2014, les partenaires du projet ont décidé en 2014-2015 de développer un outil opérationnel à destination des services de l'État permettant d'exploiter les modèles testés en temps réel (voir Chapitre V).

● Bassins versants étudiés et données utilisées

La comparaison et l'évaluation des modèles testés ont été réalisées sur deux échantillons de bassins versants distincts en France (Figure 3) :

- un premier échantillon constitué de 24 bassins versants dont les débits sont peu ou pas influencés par les activités humaines, dont deux sur l'île de La Réunion ;
- un second échantillon constitué de 11 bassins versants influencés par des barrages ou des prélèvements agricoles.

Ces bassins versants d'étude ont été sélectionnés avec l'aide des services opérationnels de l'État (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) ou Office de l'eau), sur des critères de qualité des données, de longueur des séries de données disponibles et d'enjeux associés sur le bassin versant. Ils présentent une diversité de conditions pédo-climatiques, représentatives de celles rencontrées en France. Ils

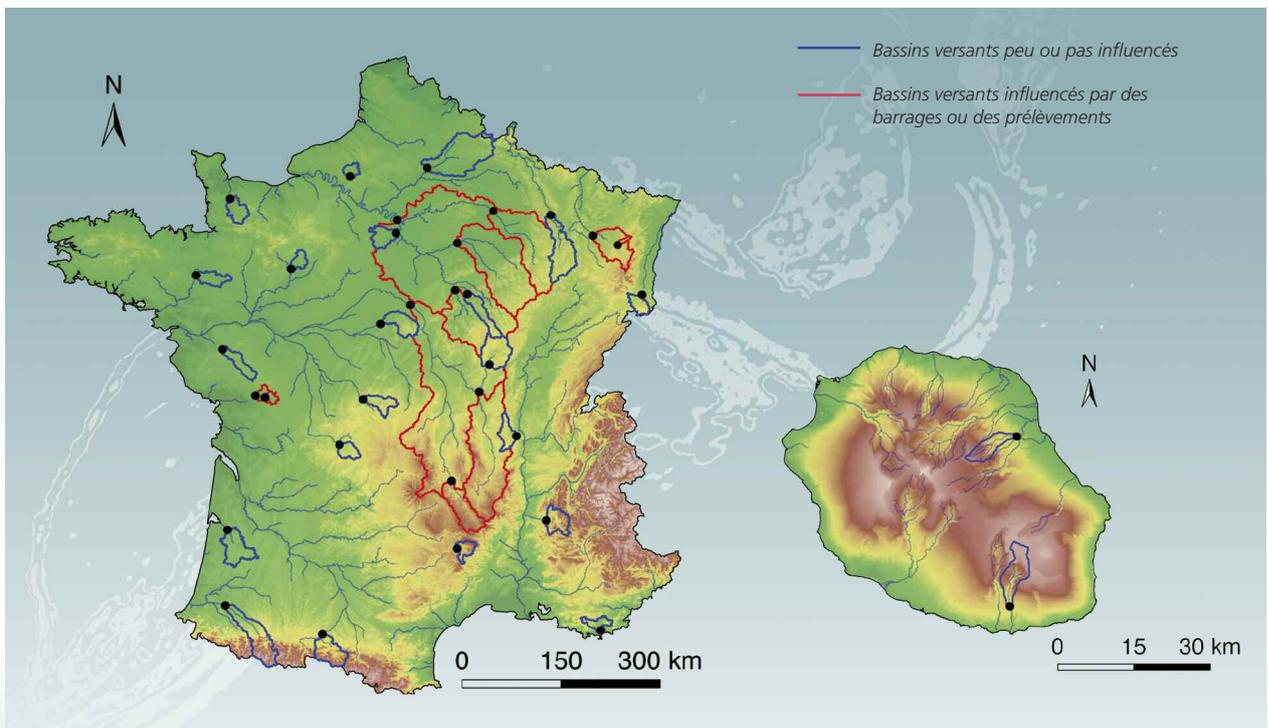


Figure 3. Localisation des bassins versants en France métropolitaine et à La Réunion utilisés pour tester les modèles de prévision des étiages.

disposent de séries chronologiques de débit suffisamment longues pour effectuer une évaluation robuste des modèles.

Les données utilisées lors de cette étude sont :

- des séries chronologiques de débits journaliers (entre 14 et 36 années sur la période 1974-2010) issues de la banque HYDRO⁴ ;
- des données de précipitation, d'évapotranspiration et

de températures journalières (51 années entre 1959 et 2010) issues de la réanalyse SAFRAN⁵ (sauf pour l'île de La Réunion où les données de mesures ponctuelles ont été utilisées) ;

- des données d'influences (entre 11 et 25 années entre 1999 et 2010) fournies par les gestionnaires.

● Modèles hydrologiques évalués

Cinq organismes de recherche et d'expertise (BRGM, Irstea, EDF-DTG, Université de Lorraine et Météo-France) ont souhaité participer à cette étude de comparaison, utilisant chacun leur propre modèle hydrologique : GARDÉNIA (Thiéry, 2014), GR6J (Pushpalatha *et al.*, 2011), MORDOR (Garçon, 1999), PRESAGES (Lang *et al.*, 2006) et SIM (Habets *et al.*, 2008).

Ces cinq modèles de prévision sont déjà utilisés en conditions opérationnelles ou pré-opérationnelles en France. Ils se distinguent par leur mode de construction, avec :

- des approches conceptuelles, dans lesquelles le modèle est construit sur des concepts de représentation de la transformation pluie-débit et les paramètres sont calés au travers d'une comparaison entre ses sorties et des observations ;
- des approches à bases physiques, dans lesquelles le modèle est construit par intégration des équations de la physique des écoulements, les paramètres du modèle sont déterminés à partir de mesures de terrain et aucun calage n'est nécessaire.

On peut aussi les distinguer par leur résolution spatiale, avec une approche globale dans laquelle l'hétérogénéité du bassin versant n'est pas explicitée ou une approche distribuée, dans laquelle le bassin versant est discrétisé en mailles pour prendre en compte son hétérogénéité (Tableau 2 et Figure 4, page suivante). Le nombre de paramètres à optimiser pour reproduire les caractéristiques hydrologiques du bassin versant sont variables, le modèle SIM étant le seul modèle ne procédant pas à un calage des paramètres à la station de mesure de débit. Ils utilisent tous des méthodes d'assimilation des débits ou des procédures statistiques de post-traitement qui permettent d'améliorer la prévision.

Des tests ont également été réalisés pour combiner les sorties de ces différents modèles en un multi-modèles, dans le but d'améliorer la prévision de débit. La méthode de combinaison retenue consiste à réaliser une moyenne pondérée des prévisions de chaque modèle, en fonction de l'erreur commise par chacun des modèles sur les pas de temps précédant la prévision.

2

Principales caractéristiques des cinq modèles hydrologiques de prévision évalués dans le cadre du projet PREMHYCE.

Tableau

Modèle	Sigle	Institution	Type	Résolution spatiale	Nombre de paramètres à caler	Méthode d'assimilation	Prise en compte des influences	Méthode de post-traitement
GARDÉNIA	GARD	BRGM	Conceptuel	Global	4 à 13	Oui	Oui	Non
GR6J	GR6J	Irstea	Conceptuel	Global	6 à 8	Oui	Oui	Non
MORDOR	MORD	EDF-DTG	Conceptuel	Global	11 à 15	Oui	Oui	Non
PRESAGES	PRES	Univ. Lorraine	Conceptuel	Global	7 à 10	Oui	Oui	Oui
SIM	SIM	Météo-France	Base physique	Distribué	Pas de paramètres calés à la station	Non	Non	Oui

4- Banque de données nationale qui stocke et met à disposition les données de débit et de hauteur d'eau issues des stations de mesure implantées sur les cours d'eau français (<http://www.hydro.eaufrance.fr>).

5- Réanalyse fournie par Météo-France qui utilise les données observées et les modèles météorologiques (Vidal *et al.*, 2010)

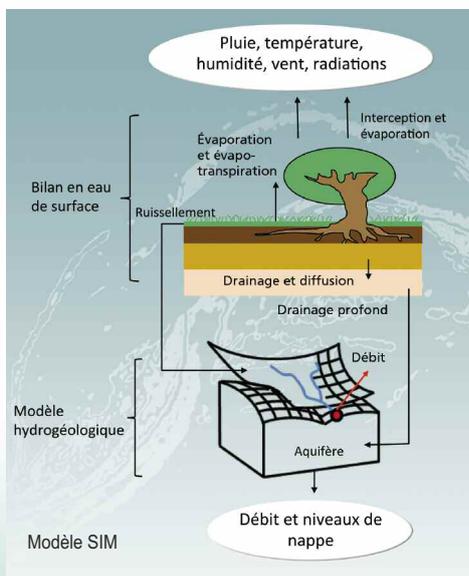
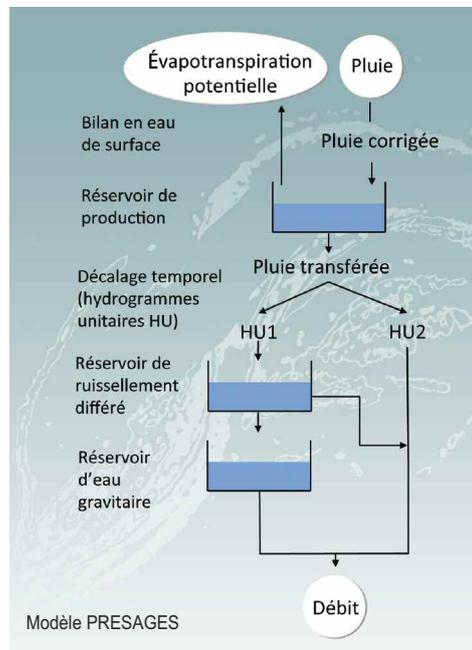
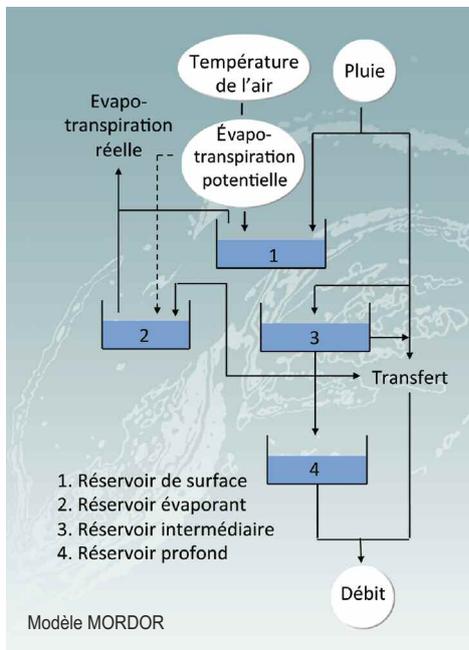
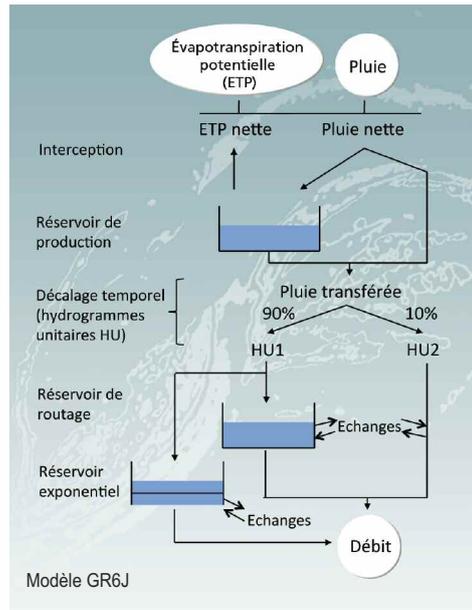
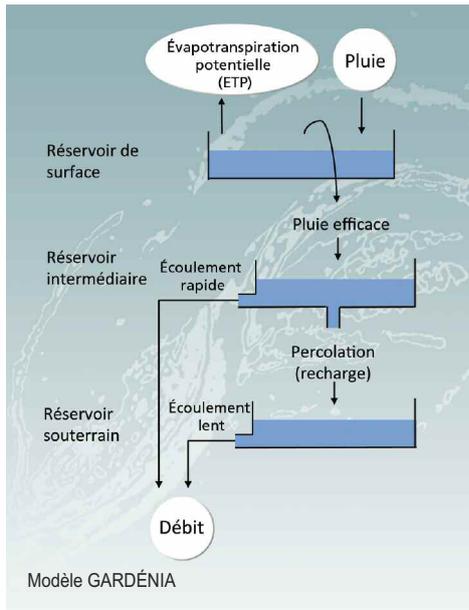


Figure 4. Schémas conceptuels des cinq modèles hydrologiques de prévision évalués dans le cadre du projet PREMHYCE. Le modèle SIM est le seul modèle utilisant des équations à base physique pour simuler le devenir de l'eau de pluie dans le bassin versant, les autres conceptualisent le stockage de l'eau et le transfert de l'eau en utilisant des combinaisons de réservoirs avec des connexions et des lois de vidange spécifiques.

● Protocole de comparaison de modèles de prévision des étiages

■ Procédure d'évaluation de la performance des modèles

Un protocole commun d'évaluation a été mis en place pour définir les modalités de tests se rapprochant autant que possible des conditions réelles d'utilisation et garantir une homogénéité des résultats.

La procédure d'évaluation des modèles consiste à rejouer des prévisions sur les séries chronologiques passées. Il s'agit de se placer à chaque jour de la série et de réaliser une prévision comme si elle était émise en temps réel, c'est-à-dire sans connaître les vraies conditions météorologiques futures. Les délais de prévision ciblés ici vont de 1 à 90 jours ce qui couvre toute la gamme des délais de prévision intéressants pour les opérationnels. L'évaluation des performances des modèles sera ciblée sur des horizons de plus grand intérêt pour la prévision des étiages, de 7 et 30 jours.

Pour ce faire, les séries chronologiques de débit disponibles sont divisées en deux périodes égales. L'une sert au calage des paramètres des modèles, l'autre sert à l'évaluation en contrôle (ou validation). Ces deux périodes sont ensuite inversées, pour permettre d'obtenir des résultats en validation sur l'ensemble des données disponibles. Ces résultats en validation seront comparés aux débits observés, et permettront de calculer des critères de performances numériques pour évaluer les modèles.

■ Scénarios météorologiques utilisés pour la prévision des étiages

Pour rejouer des prévisions de débit faites à partir d'une date donnée, le plus représentatif des conditions opérationnelles serait d'utiliser les prévisions météorologiques qui étaient disponibles à cette date. Malheureusement, les modèles météorologiques ne fournissent actuellement pas de prévisions opérationnelles quotidiennes au-delà d'une quinzaine de jours, c'est-à-dire bien en deçà de l'horizon maximum de prévision ciblé ici (90 jours). De plus, les archives de prévisions météorologiques passées ne sont pas suffisamment homogènes pour une évaluation robuste des modèles hydrologiques car les techniques de prévision se sont améliorées au cours du temps. L'option choisie dans le projet a été d'alimenter les modèles de prévision hydrologique par des scénarios issus d'archives climatiques (par exemple SAFRAN sur la métropole), chaque année représentant un scénario. Dans le mode appelé « rejeu » utilisé pour tester les modèles, pour une prévision émise au jour j de l'année Y pour le jour $j+H$ (c'est-à-dire entre $j+1$ et $j+H$), le modèle sera alimenté par les observations météorologiques disponibles entre les jours $j+1$ et $j+H$ des années $1, \dots, Y-1, Y+1, \dots$,

N (N étant le nombre total d'années de la série disponible). Les modèles hydrologiques fourniront ainsi $N-1$ membres de prévision de débit. En mode temps réel, on peut utiliser les N années disponibles de l'archive comme autant de scénarios et ajouter les prévisions météorologiques comme des scénarios supplémentaires.

■ Modèle de référence pour la prévision des débits

Pour s'assurer que les modèles testés permettent d'atteindre un niveau de performance minimum, un modèle de référence de prévision des débits a été retenu. Les résultats des modèles sont ainsi comparés à un modèle « naïf » qui fournirait comme prévision la gamme de variation naturelle des débits pour chaque jour de l'année. Il correspond au modèle statistique présenté précédemment dans la partie « Quels sont les outils de prévision des étiages et leurs limites ? ». Ce modèle est dénommé par la suite NVQ (pour variabilité naturelle des débits – *natural variability of streamflow* en anglais).

■ Critères d'évaluation de la performance des modèles

Une large sélection de critères a été retenue pour l'évaluation et la comparaison des performances des modèles de prévision. Ils évaluent les différentes qualités attendues des modèles pour la prévision (cf. partie précédente « Quelles sont les qualités attendues d'une prévision d'étiage ? »).

Ces critères permettent d'évaluer la capacité des modèles à :

- reproduire toute la gamme de débit et plus particulièrement les bas débits (deux critères) ;
- prévoir le franchissement de seuils de débit (cinq critères) ;
- reproduire la durée de l'étiage et les volumes déficitaires (deux critères) ;
- produire des ensembles de prévisions fiables et fins, c'est-à-dire qui encadrent l'observation et qui soient resserrés autour d'elle (deux critères).

Les formulations mathématiques de ces différents critères sont détaillées par Nicolle *et al.* (2014). Ils varient tous entre 0 et 1, la valeur la plus élevée représentant les meilleurs modèles. Les critères étant calculés pour chaque bassin versant, chaque période de validation et chaque horizon de prévision, les tests ont produit un grand nombre de résultats. Ils ont été synthétisés afin d'avoir pour chaque modèle des évaluations par bassin ou sur l'ensemble des bassins, en utilisant des moyennes ou des distributions des critères.

IV- Quels sont les principaux enseignements du projet PREMHYCE ?

● Exemple d'évaluation des modèles sur un bassin versant

Nous présentons dans cette partie un exemple de résultats détaillés pour le bassin versant de la Meuse à Saint-Mihiel (2 540 km²).

La Figure 5 présente les hydrogrammes prévus par les cinq modèles hydrologiques et le modèle de référence NVQ sur la Meuse à Saint-Mihiel pour un événement d'étiage marqué observé lors de l'année 2003. Ici, les faisceaux de prévision (ou « membres ») jusqu'à 15 jours sont représentés pour une prévision émise tous les 20 jours, ainsi que la simulation réalisée avec les entrées climatiques observées *a posteriori* (membre de contrôle).

Plusieurs différences entre les modèles peuvent être observées :

- GARDÉNIA (GARD) et GR6J ont tendance à être peu dispersés par rapport aux autres modèles, c'est-à-dire que les membres de la prévision sont plus resserrés ;
- l'observation du membre de contrôle montre que le modèle SIM réagit davantage aux pluies (petites pointes) que les autres modèles ;
- PRESAGES (PRES) a tendance à sous-estimer le débit mais présente un ensemble de prévisions qui encadrent bien l'observation ;
- MORDOR (MORD) et SIM prévoient des ensembles qui ont tendance à surestimer le débit prévu par rapport à celui observé à mesure que l'échéance de prévision augmente.

On observe tout l'intérêt de la prévision des modèles pour des étiages sévères par rapport au modèle de référence (variabilité des débits observés dans le passé à cette date). Par définition, le modèle de référence aura tendance à surestimer systématiquement les étiages sévères alors que les autres modèles représentent des ensembles nettement plus centrés sur le débit observé et moins dispersés.

Cet exemple montre toute la complexité de comparer des modèles de prévision d'étiage, chacun possédant ses propres qualités en fonction de ce qui est recherché pour la prévision.



Méandre de la Meuse près de Saint-Mihiel.

© Pierre Margeot – Onema

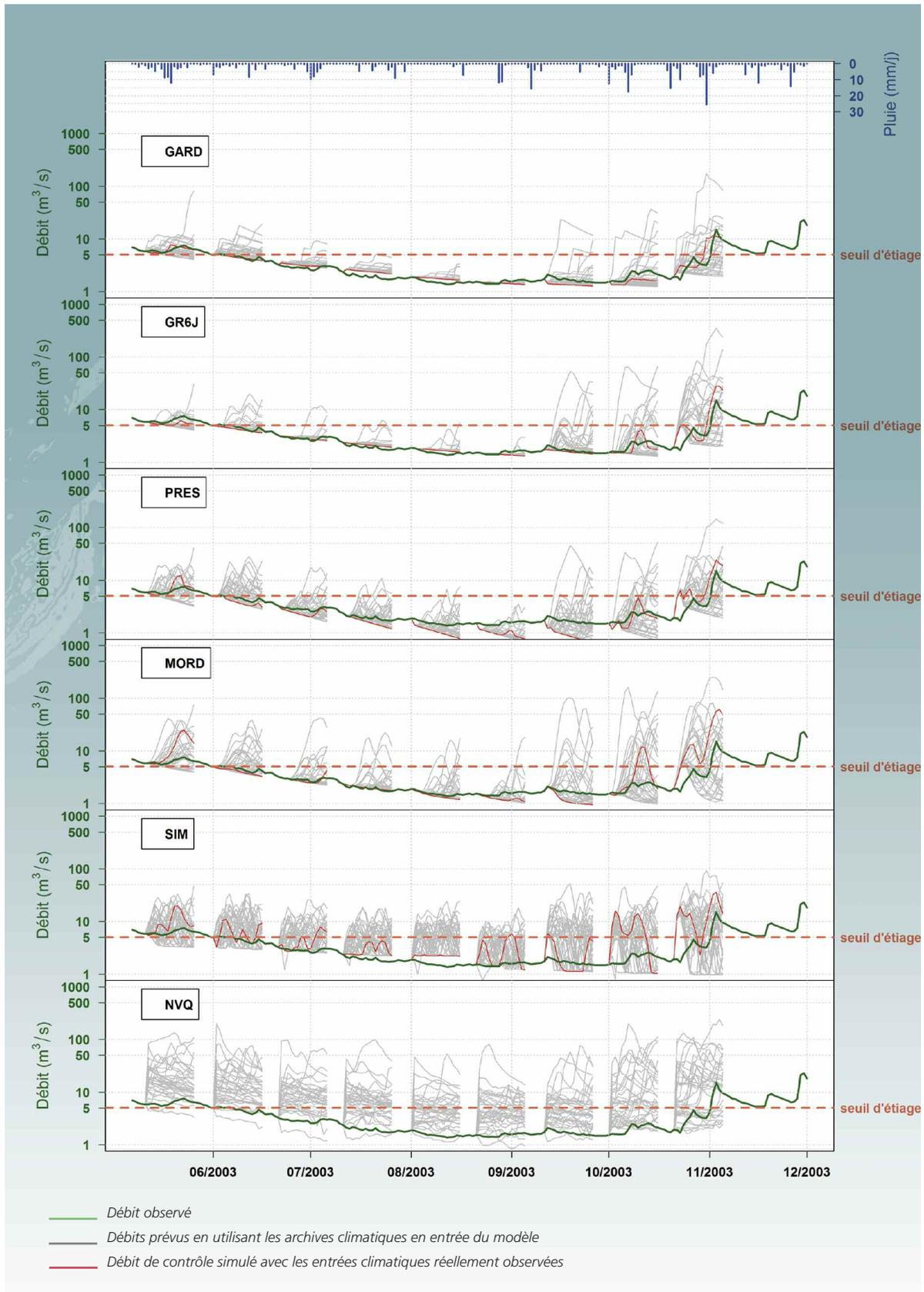


Figure 5. Hydrogrammes observés et prévus de l'évènement d'étiage le plus marqué pour la Meuse à Saint-Mihiel (année 2003) pour les cinq modèles hydrologiques (GARDÉNIA, GR6J, PRESAGES, MORDOR, SIM) et pour le modèle de référence simple NVQ (variabilité des débits observés dans le passé à cette date).

L'échelle logarithmique permet de bien visualiser les très faibles débits.

● Analyse statistique des critères d'évaluation sur l'ensemble des bassins versants

Les résultats sont détaillés ici pour deux horizons cibles d'évaluation : un horizon court à j+7 jours et un horizon plus long à j+30 jours.

La Figure 6 présente les résultats des performances moyennes des cinq modèles hydrologiques et du modèle de référence NVQ à l'horizon de prévision j+7, sous forme de diagrammes radar regroupant l'ensemble des critères d'évaluation et sur les deux échantillons de bassins versants, influencés et non influencés. Plus les performances sont proches de 1, plus l'aire du polygone est étendue et meilleur est le modèle.

Les résultats montrent que les performances des modèles sont proches sur les bassins non-influencés (en bleu), même si le modèle SIM est légèrement en retrait. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les paramètres de SIM ne sont pas calés aux stations hydrométriques cible, ce qui le pénalise par rapport aux autres modèles dont les paramètres sont optimisés aux stations.

Une hiérarchie entre modèles ne peut pas être clairement définie. Certains modèles présentent en moyenne de meilleures performances sur certaines qualités attendues pour la prévision (critères de performance).

Néanmoins, l'observation détaillée des résultats bassin par bassin (non représentés ici) montre une plus grande diversité des résultats, avec des niveaux de performance atteints variables entre les bassins, mais également entre

modèles. Il n'a pas été possible de relier ces résultats à certaines caractéristiques physiographiques de ces bassins (taille du bassin, importance des écoulements souterrains, relief, etc.). Sur les bassins influencés (en rouge), les modèles apparaissent globalement moins performants que sur le premier échantillon de bassin. Ces différences peuvent s'expliquer par la prise en compte des influences, puisqu'elle ajoute un degré de complexité et d'incertitude supplémentaire pour la prévision. Les différences entre modèles sont plus contrastées même si là aussi il est difficile de hiérarchiser les modèles. Ce contraste peut être imputé au fait que les méthodes de prise en compte des influences sont différentes selon les modèles.

Les modèles présentent tous néanmoins de meilleurs résultats que le modèle de référence NVQ, ce qui montre qu'ils apportent tous une information utile par rapport à ce modèle simple.

A des échéances de prévision plus lointaines (par j+30, non représentées ici), les performances des modèles de prévision sont plus faibles qu'à des échéances plus courtes, ce qui est attendu. Les performances ont tendance à diminuer avec l'augmentation de l'échéance de prévision, d'une part car les erreurs de prévisions se cumulent, qu'elles proviennent de la prévision météorologique ou de la prévision des débits, et d'autre part car l'effet de l'assimilation des débits observés par les modèles a de moins en moins d'influence.

● Jusqu'à quelles échéances les prévisions sont-elles utiles ?

La diminution des performances observées avec l'augmentation de l'échéance de prévision pose la question de savoir jusqu'à quelle échéance les modèles sont encore performants pour prévoir les débits.

Il est possible de répondre à cette question en évaluant l'horizon de prévision maximum pour lequel les modèles permettent d'apporter une information supplémentaire

par rapport au modèle de référence. Cet horizon de prévision est appelé Horizon de prévision utile (HPU). Il s'agit de comparer les performances des modèles et du modèle de référence à chaque échéance de prévision et de déterminer l'horizon pour lequel les performances modèle deviennent moins bonnes que les performances du modèle de référence.

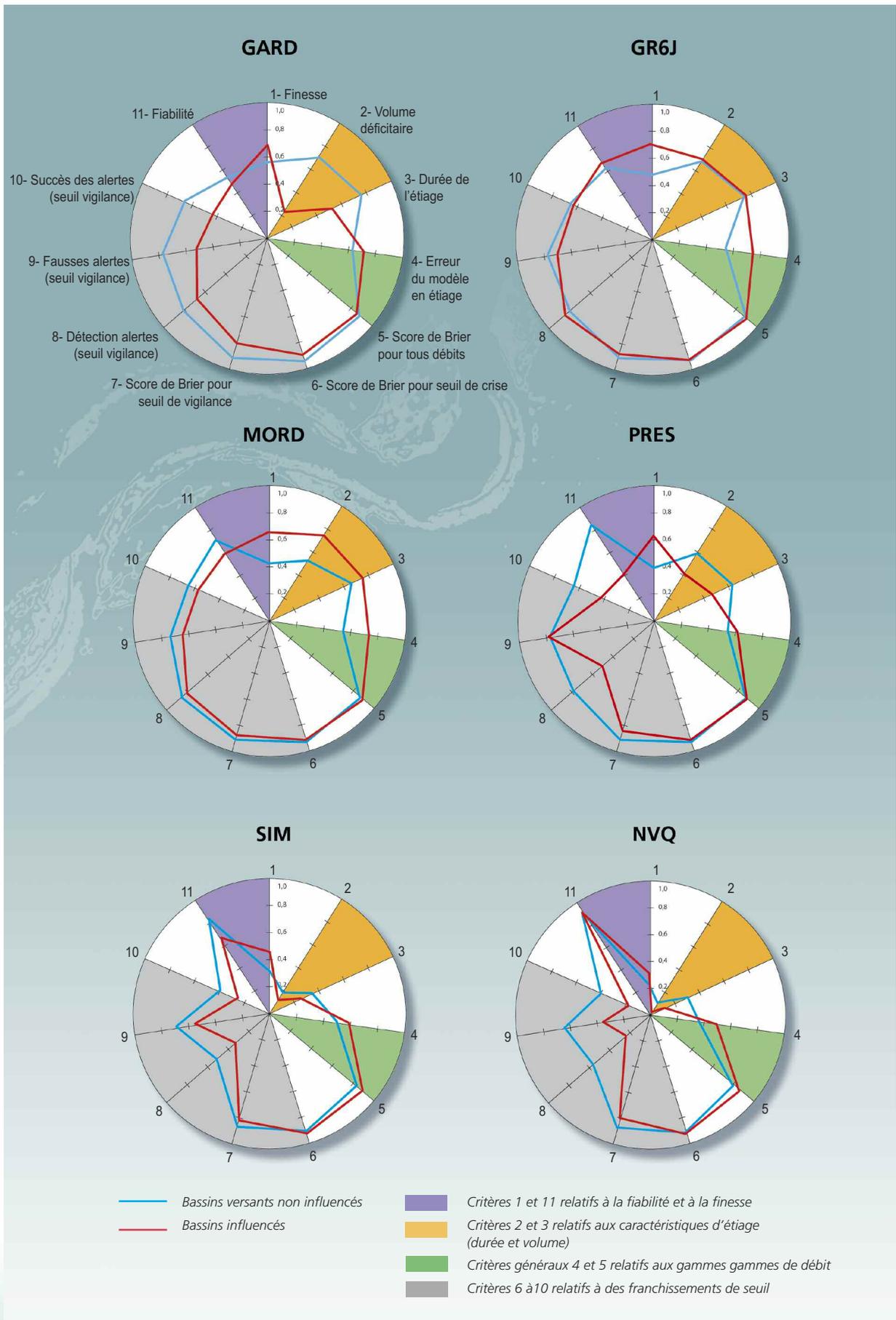


Figure 6. Critères de performances moyens pour les cinq modèles hydrologiques (GARDÉNIA, GR6J, PRESAGES, MORDOR, SIM) et le modèle de référence simple NVQ (variabilité des débits observés dans le passé à cette date) pour l'échéance de prévision $j+7$.

Plus les valeurs du critère sont proches de 1, meilleur est le modèle. Les définitions détaillées des critères sont données par Nicolle et al. (2014).

La Figure 7 montre l'horizon de prévision le plus lointain atteint pour les deux échantillons de bassins versants (non influencés et influencés) et précise quel modèle l'a atteint. Ces résultats montrent là aussi une grande diversité. Les capacités de prévisibilité entre bassins peuvent être très variables, avec des HPU qui vont de quelques jours à quelques semaines voire mois, sans qu'il ait été possible de relier ces résultats à des caractéristiques d'étiage ou de bassin.

Il est là aussi difficile de déterminer quel modèle permet de prévoir le plus loin dans le temps, puisque les résultats diffèrent selon les bassins versants et même en fonction des périodes de validation observées.

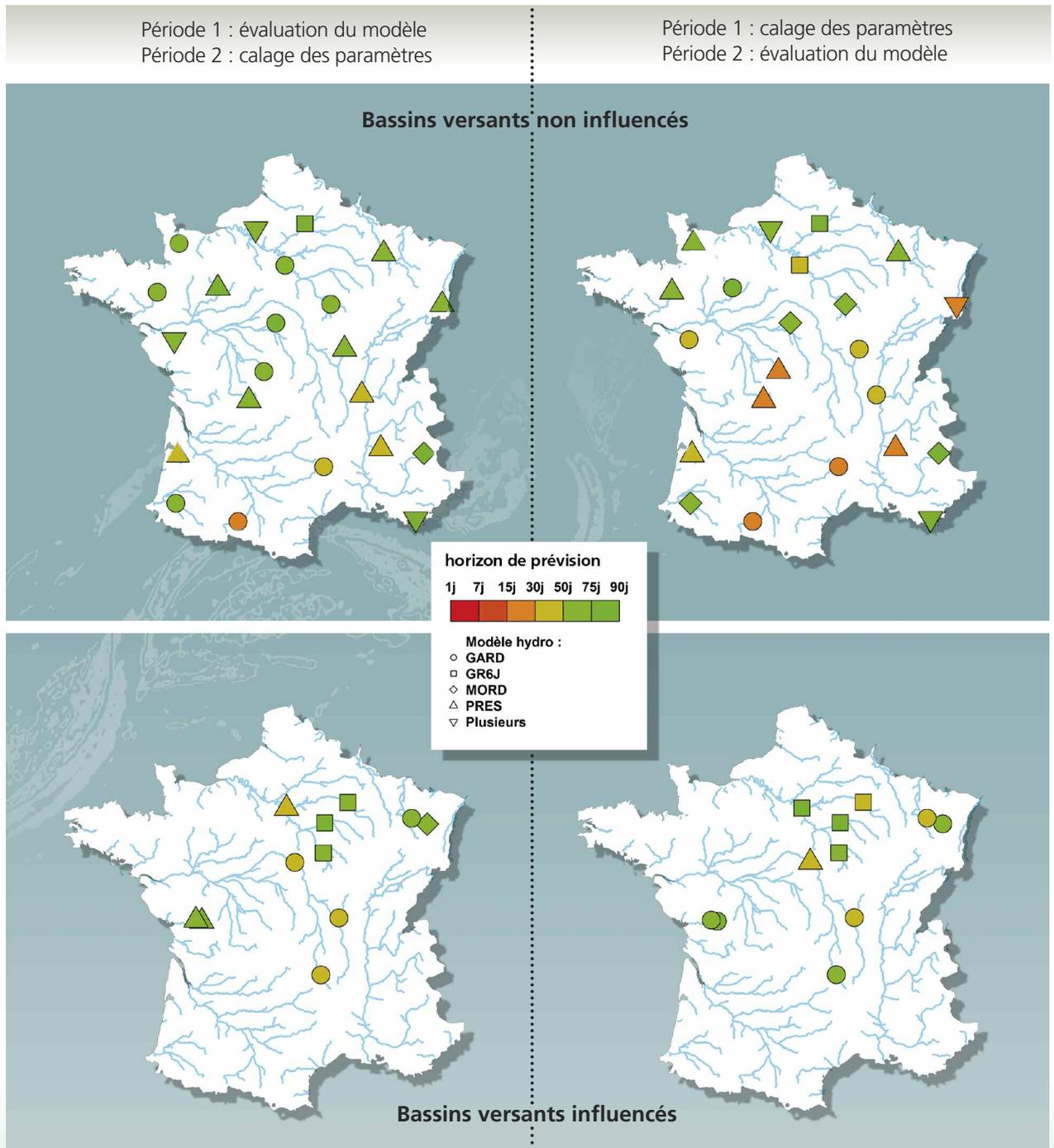


Figure 7. Cartographie de l'horizon de prévision utile maximum (HPU) obtenu sur les échantillons de bassins versants (en haut non influencés, en bas influencés) et pour chaque période de validation (d'évaluation).

La période où les mesures de débits sont disponibles est divisée en deux :

à gauche : la période 1 est utilisée pour l'évaluation du modèle et la période 2 pour le calage des paramètres ;

à droite : c'est l'inverse, la période 1 est utilisée pour le calage des paramètres et la période 2 pour l'évaluation du modèle.

La forme du sigle indique le modèle qui a atteint cet horizon maximum et la couleur indique la valeur de cet horizon.

D- Quelles modalités pour l'utilisation opérationnelle des modèles hydrologiques ?

A l'issue de la phase d'évaluation des modèles de prévision des étiages du projet PREMHYCE, il a été décidé de construire un outil opérationnel de prévision pouvant exploiter l'ensemble des modèles testés. Nous en donnons

ici les principes généraux et les implémentations attendues. Des informations complémentaires sur cet outil sont disponibles auprès des partenaires du projet ou sur le site <http://webgr.irstea.fr>.

● Principes de l'outil opérationnel de prévision

En premier lieu, l'outil opérationnel de prévision des étiages a vocation à être utilisé par les services de l'État, en particulier les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) et Directions départementales des territoires (DDT), en charge du suivi des étiages sur des bassins naturels ou influencés. Il a vocation à appuyer ces services pour une meilleure anticipation et gestion des périodes d'étiage, il est actuellement en phase de test avec les Dreal volontaires.

Cet outil rassemble l'ensemble des cinq modèles hydrologiques de la phase de comparaison pour les intégrer dans une plateforme de prévision, et permet de générer des prévisions de débit de manière automatisée sur un ensemble de stations cibles.

L'outil opérationnel proposé est organisé en deux parties :

- une partie de calage-contrôle des modèles, permettant :
 - d'évaluer les performances du ou des modèles sur un ou plusieurs bassins versants suivant une procédure en calage-contrôle sur des périodes indépendantes sur une base de données historiques, en utilisant la procédure définie dans PREMHYCE,
 - de caler les paramètres du modèle sur les données disponibles et de générer un ensemble de sorties (répertoires et fichiers) nécessaires au fonctionnement de l'outil en temps réel ;

● Sorties (répertoires et fichiers)

Pour chacun des utilitaires, les résultats des prévisions de débits et les performances associées sont disponibles sous forme de fichiers texte. Des fiches de synthèse permettent de visualiser ces résultats, d'une part pour évaluer et sélectionner le ou les modèles à utiliser, et d'autre part pour l'aide à la prise de décision en temps réel.

■ une partie « temps réel » permettant de faire tourner l'outil en mode :

- « temps réel » en réalisant une prévision à partir des dernières observations disponibles en temps réel,
- « temps différé » en réalisant une prévision à partir d'une date antérieure spécifiée par l'utilisateur, par exemple pour le rejeu d'un événement *a posteriori*.

Cet outil permet de choisir le ou les modèles de prévision à utiliser (y compris le multi-modèle qui pondère les résultats de chaque modèle en fonction de l'erreur commise sur les pas de temps précédant la prévision). Il est possible d'utiliser plusieurs jeux de prévisions météorologiques en entrée des modèles :

- le rejeu de la climatologie (réutilisation du climat passé), comme utilisé lors de la phase de comparaison des modèles ;
- un scénario « pluie nulle », qui considère qu'aucune précipitation n'aura lieu dans le futur. Ce scénario fournira une borne basse de prévision issue d'un tarissement non influencé (cf. partie précédente « Quels sont les outils de prévision des étiages et leurs limites ? ») ;
- les prévisions à 10 jours d'échéance du Centre européen de prévisions à moyen terme (CEPMMT) adaptées par Météo-France.

Dans le cas de l'outil de calage-contrôle, ces fiches visent à permettre à l'utilisateur de comparer les modèles et le multi-modèle qu'il souhaite utiliser, à travers des graphiques qui illustrent les performances des modèles :

- graphiques en radar des performances ;
- comparaison des débits prévus et observés ;
- horizon de prévision utile déterminé ;
- hydrogrammes prévus sur des événements d'étiage.

L'outil « temps réel » fournit une fiche de synthèse de la prévision effectuée à la date t pour une échéance donnée.

La Figure 8 présente un exemple de la partie prévision des débits de ces fiches de synthèse pour une prévision réalisée le 1^{er} mai 2002 pour une échéance de 90 jours, par le modèle GR6J sur le bassin de la Meuse à Saint-Mihiel.

Cette fiche permet de visualiser les débits prévus par le modèle en utilisant les scénarios météorologiques

prévus par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), les débits prévus par le modèle en utilisant le rejeu de la climatologie (cf « Scénarios météorologiques utilisés pour la prévision des étiages »), les débits prévus par le modèle de référence. Ces débits peuvent être comparés visuellement aux seuils opérationnels et il est également possible de visualiser les débits d'une année particulière que l'utilisateur souhaite afficher.

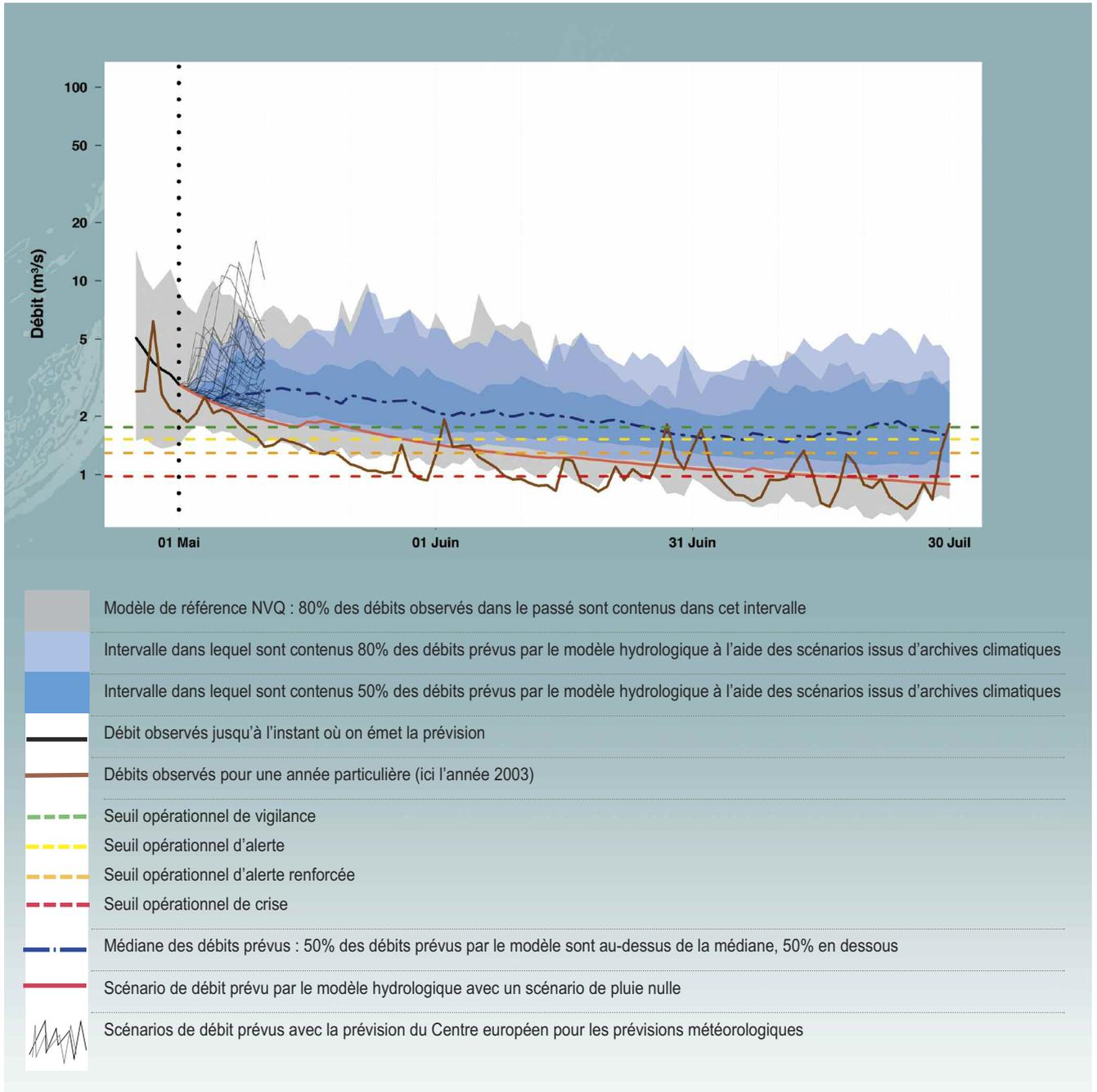


Figure 8. Fiche de synthèse des résultats de prévision en temps réel par l'outil opérationnel de prévision : exemple de la Meuse à Saint-Mihiel le 1^{er} mai 2002, simulation avec GR6J.

● Mise en œuvre pratique

Cet outil de prévision d'étiage nécessite la construction d'une base de données pour fonctionner. Dans le cas de l'utilitaire de calage-contrôle, elle doit être établie par les services gestionnaires et doit comprendre, pour chaque bassin versant, des chroniques historiques continues au pas de temps journalier :

- des précipitations moyennes estimées sur le bassin versant ;
- des températures moyennes estimées sur le bassin versant ;
- de l'évapotranspiration potentielle moyenne estimée sur le bassin ;
- des débits à l'exutoire du bassin versant (chroniques non nécessairement continues contrairement aux précédentes).

Une profondeur de chronique d'une dizaine d'années est conseillée pour une optimisation correcte des paramètres des modèles, même si quelques années peuvent suffire.

Dans le cas de l'utilitaire temps réel, les modèles doivent disposer également d'une archive de ce type de données pour initialiser leurs états, ainsi que de scénarios de prévisions météorologiques, qui peuvent être construits à partir de la base de données de l'utilitaire de calage-contrôle dans le cas du rejeu de la climatologie.

VI- Perspectives

Cette première version d'un outil opérationnel de prévision des étiages constitue un outil d'aide à la prise de décision pour les gestionnaires, qui leur permettra d'anticiper les situations de crise et d'adapter les mesures de restriction. Il permettra également d'enrichir les bulletins de situation hydrologique, de mieux informer le grand public, ou encore d'anticiper et de cibler les situations où des campagnes de jaugeages de bas débit pourraient être effectuées.

Une version ultérieure de l'outil, prévue dans le cadre de la poursuite du partenariat sur 2016-2018, étendra ses fonctionnalités, notamment à la prise en compte explicite des influences humaines potentielles sur le bassin versant, comme cela a été fait lors de la phase d'évaluation des modèles. Même si les modèles hydrologiques peuvent s'adapter à ce type de conditions, leur utilisation sur des bassins versants influencés doit être effectuée avec précaution, car les données sur les prélèvements et leurs évolutions dans le temps sont souvent difficiles à collecter et nécessitent parfois de développer des modules spécifiques pour les intégrer.

Par ailleurs, les capacités de prévision des modèles restent perfectibles. La qualité des prévisions à moyenne échéance issues de modèles météorologiques est limitée, tandis que l'utilisation de scénarios constitués du rejeu de la climatologie fournit des prévisions de débit dispersées. Le couplage de ces deux sources d'information pourra être effectué afin d'améliorer la qualité des prévisions autant que la prévisibilité des modèles.

Pour en savoir plus...

● Le projet PREMHYCE

<http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-eaux/modeles-hydrologie-prevision-etiages-bassins-versants>

Nicolle *et al.*, 2014, Prédiction des Étiages par des Modèles Hydrologiques : Comparaison et Évaluation (Projet PREMHYCE) - Rapport de synthèse. Rapport final. Convention 2013. 35p. + ann. 8p
<http://www.onema.fr/Publications-2014>

Nicolle, P. *et al.* : *Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments*, *Hydrol Earth Syst Sci*, 18(8), 2829–2857, doi:10.5194/hess-18-2829-2014, 2014

<http://webgr.irstea.fr/>

● La gestion de la sécheresse et les mesures de restriction

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Quelles-sont-les-mesures-prises.html>

<http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp>

Références

Balestrat, M. and Thérond, D. Enjeux de la gestion quantitative de l'eau en France. Quels données et outils de modélisation pour les institutions publiques en charge de la gestion des étiages ?, Rapport d'étude Onema-Inra., 2014.

Dachary, M. Dictionnaire français d'hydrologie, [online] Available from: <http://webworld.unesco.org/water/hp/db/glossary/glu/indexdic.htm>, 1996.

Delus, C. L. Sévérité des étiages et indigence des précipitations : une relation évidente mais rarement simple - Exemple en régime pluvial océanique, *Rev. Géographique Est*, 51(3-4) [online] Available from: <http://rge.revues.org/3455> (Accessed 20 July 2015), 2011.

Garçon, R. Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues, *Houille Blanche*, (7-8), 88–95, doi:10.1051/lhb/1999088, 1999.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Moigne, P. L., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Seguí, P. Q., Rousset-Regimbeau, F. and Viennot, P. *The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France*, *J. Geophys. Res.*, 113(D6), D06113, doi:10.1029/2007JD008548, 2008.



Lang, C., Freyeruth, A., Gille, E. et François, D. Le dispositif PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages, *Géocarrefour*, 81(1), 15–24, doi:10.4000/geocarrefour.1715, 2006.

Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T. and Andréassian, V. *A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation*, *J. Hydrol.*, 411(1–2), 66–76, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.09.034, 2011.

Seguin, J.-J. Présentation de 6 modèles hydrogéologiques spatialisés dédiés à la gestion de la ressource en eau souterraine, à l'évaluation de risques, à la quantification d'impact climatique, Rapport de la convention Onema-BRGM., 2013.

Thiéry, D. Logiciel GARDENIA, version 8.2, Guide d'utilisation (GARDENIA software, version 8.2, User Guide), BRGM., 2014.

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. and Soubeyrou, J.-M., *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*. *International Journal of Climatology*, 30 : 1627–1644. doi : 10.1002/joc.2003, 2010.

La collection *Comprendre pour agir* accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires de l'eau et des milieux aquatiques.

1- Eléments d'hydromorphologie fluviale
(octobre 2010)

2- Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière
(mai 2011)

3- Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels
(décembre 2011)

4- Evolutions observées dans les débits des rivières en France
(décembre 2012)

5- Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?
(décembre 2012)

6- Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux ?
(avril 2013)

7- Captages Grenelle : au-delà de la diversité, quels caractères structurants pour guider l'action ?
(septembre 2013)

8- Les évaluations économiques en appui à la gestion des milieux aquatiques
(octobre 2013)

9- Regards des sciences sociales sur la mise en œuvre des politiques publiques
(décembre 2013)

10- Comment développer un projet ambitieux de restauration d'un cours d'eau ? Retours d'expériences en Europe, un point de vue des sciences humaines et sociales
(février 2014)

11- Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons Principes et méthodes
(mai 2014)

12 - La compétence « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations »
(Gemapi)
(aout 2014)

13 - Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : éclairages et pistes d'actions pour la gestion
(octobre 2014)

14 - Connaître les perceptions et les représentations : quels apports pour la gestion des milieux aquatiques ?
(décembre 2014)

15- Quelle est l'efficacité d'élimination des micropolluants en station de traitement des eaux usées domestiques? Synthèse du projet de recherche ARMISTIQ
(janvier 2015)

16- Modèles hydro-économiques : quels apports pour la gestion de l'eau en France ?
(mars 2015)

17- Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion
Vol. 1 Connaissances pratiques
(mars 2015)

18- Les espèces exotiques envahissantes dans les milieux aquatiques : connaissances pratiques et expériences de gestion
Vol. 2 Expériences de gestion
(mars 2015)

19- Captages Grenelle : où en est-on de la protection contre les pollutions diffuses? Comment aller plus loin ?
(septembre 2015)

20- Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ?
(novembre 2015)



● Rédaction

Pierre Nicolle (Irstea),
Charles Perrin (Irstea),
Vazken Andréassian (Irstea),
Bénédicte Augeard (Onema),
François Besson (Météo-France),
Aurélie Carroget (Medde),
Didier François (Université de Lorraine),
Matthieu Le Lay (EDF),
Fabienne Regimbeau (Météo-France)
et Dominique Thiéry (BRGM)

● Edition

Véronique Barre (Onema, direction de l'action scientifique et technique) et
Claire Roussel (Onema, délégation à l'information et à la communication)

● Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

● Citation

Nicolle P., Perrin C., Andréassian V.,
Augeard B., Besson F., Carroget A., François D.,
Le Lay M., Regimbeau F. et Thiéry D. 2015.
Prévoir les étiages : que peut-on attendre des modèles hydrologiques ? Onema.
Collection *Comprendre pour agir*. 24 pages.

Contacts :

benedicte.augeard@onema.fr
pierre.nicolle@irstea.fr

© Alain Dutarret - Irstea



Imprimé par IME by estimprim



ISBN 979-10-91047-48-7

Novembre 2015

