

## Mise au point d'un modèle de prévision des crues sur le bassin versant de l'Orgeval

**Les crues entraînent des dommages humains et des dégâts matériels importants. Pouvoir prédire avec précision les crues est donc précieux afin d'intervenir en temps utile pour protéger les biens et les personnes. Cet article nous présente le travail de mise au point et d'application, sur le bassin versant expérimental de l'Orgeval, du modèle hydrologique GRP « Génie rural pour la prévision » développé par l'équipe Hydrologie d'Irstea à Antony.**

**D**epuis les années 1960, la prévision des crues (prévision à court terme jusqu'à quelques dizaines d'heures) a fait l'objet de recherches approfondies (voir, par exemple, les revues bibliographiques de Tangara, 2005, et Berthet, 2010) et a donné lieu à d'innombrables développements opérationnels dans de nombreux pays, en raison des enjeux humains et économiques liés à ces événements. Un des objectifs majeurs de ces travaux a été de mettre au point des chaînes de modélisation hydrométéorologiques suffisamment fiables pour permettre aux prévisionnistes de mieux anticiper les événements de crue. En France, des efforts importants ont été consentis, en particulier depuis la création du réseau de services de prévision des crues (SPC) et du service central d'hydro-météorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI) en 2003, pour améliorer ces chaînes opérationnelles. Cela est vrai en particulier au niveau des modèles hydrologiques de prévision, qui permettent de faire le lien entre précipitations sur le bassin et débit à venir dans le cours d'eau.

L'efficacité d'un modèle hydrologique de prévision dépend de sa capacité à bien rendre compte d'un ensemble de facteurs, parmi lesquels on trouve la détermination des pluies efficaces (qui dépend généralement des conditions antérieures d'humidité), l'échelle temporelle caractéristique de réaction du bassin versant aux pluies, la persistance du signal débit ou encore la sensibilité de la réponse du bassin à la variabilité spatiale des pluies (Refsgaard, 1997). Elle dépend également de la pertinence des schémas de mise à jour du modèle utilisés

pour exploiter l'information contenue dans les derniers débits observés, ainsi que de la qualité de la modélisation des propriétés statistiques des erreurs du modèle.

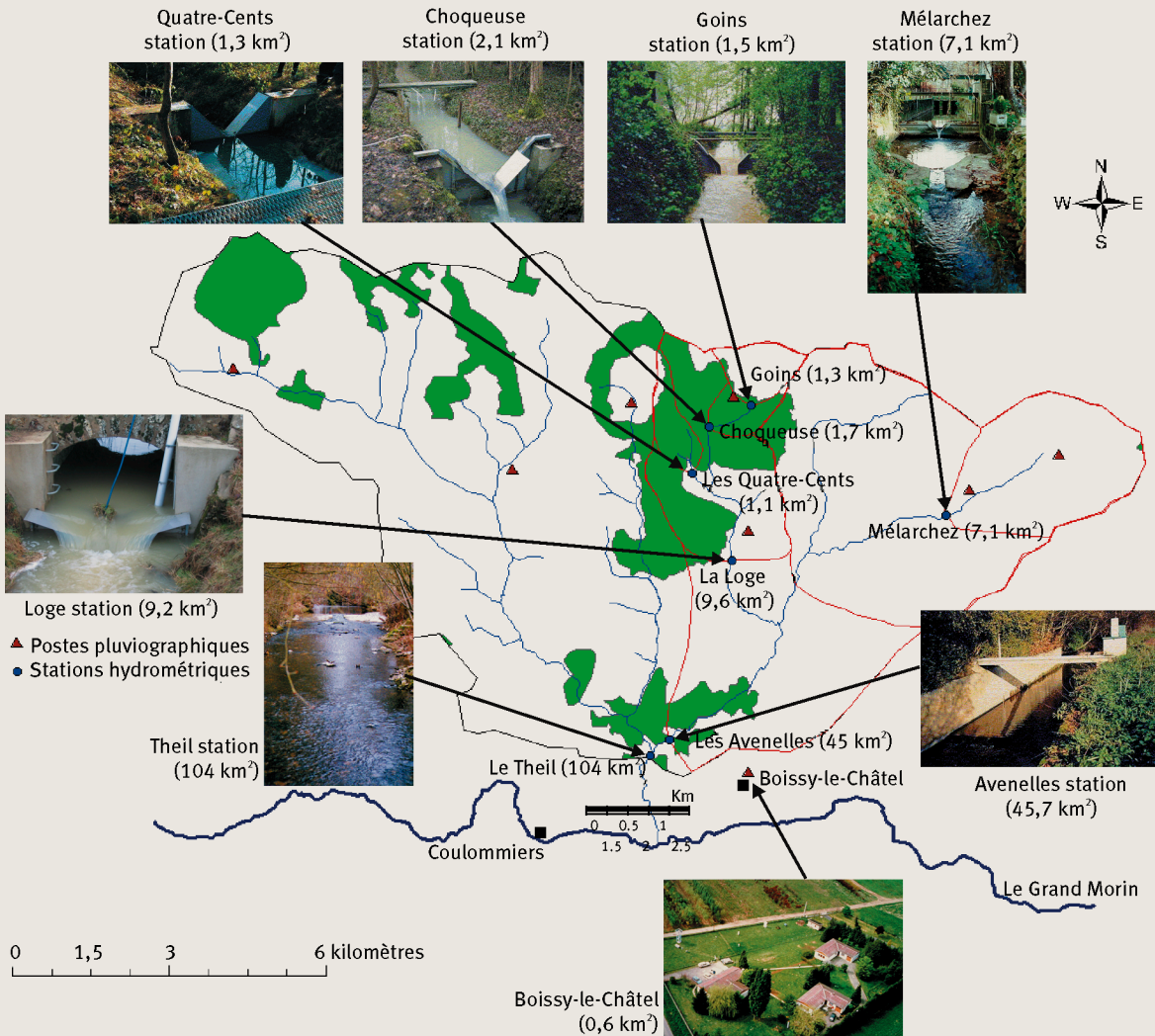
Les recherches effectuées jusqu'à présent par l'équipe Hydrologie d'Irstea à Antony ont conduit à mettre au point un modèle de prévision de crue qui correspond à un compromis intéressant entre efficacité, robustesse et efforts de mise en œuvre.

Ce modèle a été intégré dans le logiciel de prévision opérationnel GRP (Génie rural pour la prévision), actuellement diffusé par Irstea et le SCHAPI. Il est déjà utilisé ou en cours d'installation dans plus de la moitié des SPC (par exemple, Seine moyenne-Yonne-Loing, Loire-Cher-Indre, Grand Delta, Rhin-Meuse, Méditerranée Est, Allier, etc.). Les retours d'expérience de ces utilisateurs constituent une source très intéressante de réflexion pour améliorer le modèle, ainsi que le produit opérationnel.

Pour cela, Irstea s'appuie sur des bases hydrométéorologiques très diversifiées qui permettent de tester le modèle hydrologique de prévision et d'en éprouver la robustesse et la fiabilité. Le modèle a été intégré dans un logiciel de prévision temps réel qui est largement testé avant diffusion par des séries de tests pré-opérationnels réalisés par le SCHAPI et sur le bassin versant de l'Orgeval. Irstea dispose en effet sur ce bassin d'un réseau de mesure propre, qui lui permet d'alimenter le modèle, et donc de tester son comportement en conditions réelles d'utilisation.

Ce texte présente le travail de mise au point et d'application du modèle de prévision sur le bassin de l'Orgeval.

## 1 Localisation des stations hydrométriques, des contours des bassins associés et des postes pluviométriques.



La base de données utilisée est brièvement présentée ainsi que le modèle hydrologique de prévision GRP et les résultats de l'évaluation des performances du modèle sur trois stations du bassin. Enfin, quelques perspectives de ces travaux seront discutées.

### Base de données

Le bassin versant de l'Orgeval (104 km<sup>2</sup> à la station hydrométrique du Theil) est situé en Seine-et-Marne, à l'est de Paris. Il est suivi depuis près de cinquante ans par Irstea, avec un effort météorologique de long terme. Le bassin est à dominante rurale et a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (voir le site internet : <https://gisoracle.cemagref.fr/> pour plus d'informations).

L'Orgeval est un affluent du Grand Morin, avec des problématiques de crue importantes à l'aval de leur confluence.

Actuellement, sept stations hydrométriques et huit postes pluviométriques accessibles en temps réel recueillent des données sur le bassin de l'Orgeval (voir localisation sur la figure 1). Ils sont donc particulièrement intéressants pour les applications de prévision. La répartition géographique des postes pluviométriques est assez homogène et dense.

Dans cette étude, nous avons utilisé trois des sept stations hydrométriques du bassin (tableau 1).

À partir des bases de données existantes, une première phase du travail a consisté à :

- mettre au point, sur chaque bassin, un jeu de données continues au pas de temps horaire, nécessaire au calage

### 1 Stations hydrométriques étudiées.

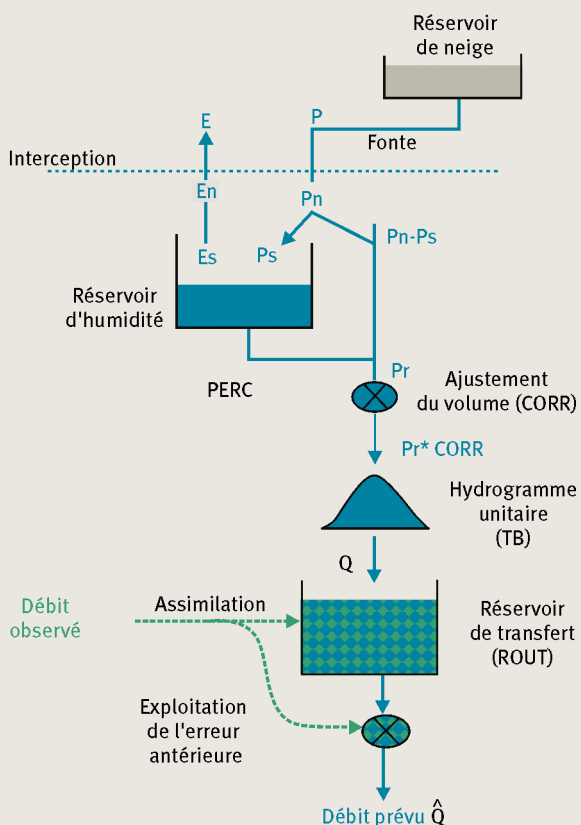
Cours d'eau et station	Code HYDRO	Surface (km <sup>2</sup> )	Temps de réaction estimé (h)
L'Orgeval au Theil	H5723010	104	<6
Le Ru des Avenelles aux Avenelles	H5723020	45,2	<6
Le Fossé Rognon à Mélarchez	H5723210	7,1	<3

▶ et à l'évaluation du modèle de prévision. Les pluies de bassin ont été calculées à partir des postes disponibles.

- réaliser une analyse critique de ces données à l'aide de l'outil PARAPLUIE développé à Irstea (notamment pour la détection des données pluviométriques aberrantes et l'homogénéisation des séries) ;
- définir les périodes exploitables pour les tests de modélisation. La période d'étude choisie (1972-2010) présente une grande diversité d'événements hydrométéorologiques ;
- définir pour chaque bassin des événements cibles sur lesquels analyser les résultats du modèle plus en détail. Une sélection d'événements a été réalisée sur la base de critères pluviométriques et hydrologiques, conduisant à l'identification de vingt-quatre événements par bassin correspondant à des débits élevés et/ou des pluies importantes.

Notons que, d'un point de vue opérationnel, l'alimentation d'un modèle de prévision des crues soulève la question de la critique des données rapatriées en temps réel, leur validité pouvant avoir une influence très importante sur les résultats du modèle. Il est donc important de faire une critique des données avant alimentation du modèle de prévision, au risque sinon d'obtenir des résultats incohérents.

② Schéma structurel du modèle GRP (E : ETP ; P : pluie ; Q : débit ; CORR (-) : facteur de correction des pluies efficaces ; TB (h) : temps de base de l'hydrogramme unitaire ; ROUT (mm) : capacité du réservoir de routage ; les autres lettres représentent des variables internes).



## Modèle de prévision GRP

Le modèle hydrologique de prévision GRP a été mis au point par les travaux de Tangara (2005) au pas de temps journalier, puis étendu au pas de temps horaire par les travaux de Berthet (2010). Un schéma de la structure du modèle est donné sur la figure ②. GRP est un modèle de prévision :

- **continu** (par opposition à un modèle événementiel), c'est-à-dire qu'il fonctionne tout au long de l'année et se sert de l'historique des conditions pluviométriques passées pour déterminer un état initial d'humidité du bassin à l'instant de la prévision ;
- **global** (par opposition à un modèle spatialement distribué), c'est-à-dire qu'il fait l'hypothèse que l'on peut représenter le comportement hydrologique du bassin versant sans tenir compte de l'hétérogénéité spatiale de ses caractéristiques et de ses précipitations, cette hétérogénéité étant considérée comme ayant un rôle de second ordre dans la réponse du bassin versant par rapport à l'influence des valeurs moyennes des caractéristiques et des quantités précipitées ;
- **avec une structure à réservoirs**, l'apparentant ainsi à des modèles conceptuels,
- construit pour une **exploitation directe des débits observés** en entrée (méthode de mise à jour directe) ;
- qui dépend de **trois paramètres optimisables**. Ce faible niveau de complexité lui confère une bonne stabilité et une bonne robustesse.

Le modèle n'a besoin pour fonctionner que de données de pluie, d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de débit. Le modèle peut être utilisé conjointement avec un module de fonte de neige requérant une entrée de température (Valéry, 2010). L'influence de la neige étant limitée sur le bassin de l'Orgeval, ce module ne sera pas utilisé ici. Des informations complémentaires sur le modèle sont disponibles sur le site : [www.cemagref.fr/webgr/modeles/grp/fonctionnement\\_grp.htm](http://www.cemagref.fr/webgr/modeles/grp/fonctionnement_grp.htm).

## Analyse des temps de réaction des bassins aux pluies

Le temps de réaction d'un bassin versant aux pluies est essentiel à connaître en contexte prévisionnel, puisqu'il conditionne en partie l'importance du choix du scénario de pluie future : pour des délais de prévision en deçà de ce temps de réaction, la prévision des débits n'est pas conditionnée par les pluies futures ; au-delà, elle l'est.

Pour déterminer le temps de réaction du bassin, nous avons utilisé directement le modèle hydrologique GRP, puisqu'il est construit pour faire le lien entre la pluie et le débit. Cette approche semble moins subjective que les méthodes géométriques cherchant à identifier les décalages temporels entre événements de pluie et réponses en débit. La procédure adoptée est la suivante : on réalise des prévisions à diverses échéances (1 h, 3 h, 6 h, 9 h, 12 h, etc.) avec le modèle GRP alimenté successivement avec deux scénarios de pluies futures différents : des pluies nulles et des pluies correspondant aux

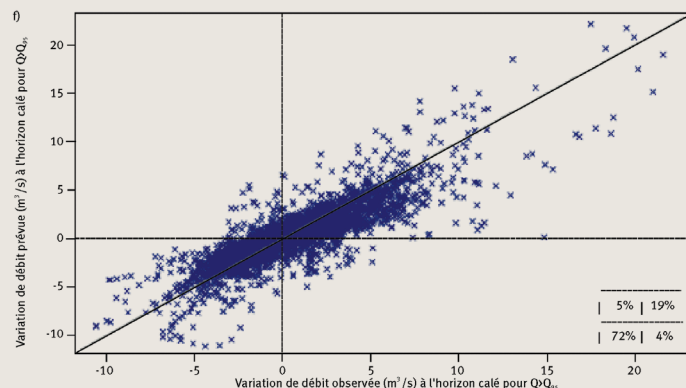
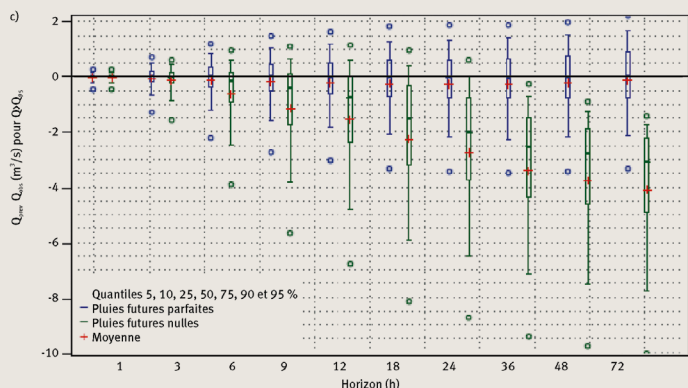
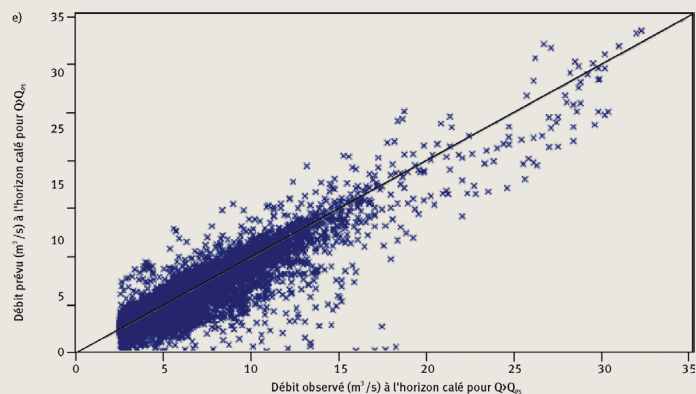
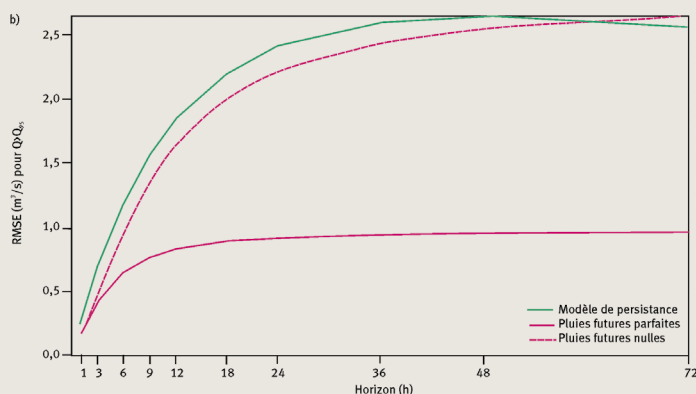
3 Fiche synthétique de résultats du modèle GRP à la station du Theil avec (a) tableau des performances globales ; (b) évolution des erreurs quadratiques moyennes en fonction du délai de prévision ; (c) distributions des erreurs en fonction de l'horizon de prévision ; (d) tableau de contingence issu de l'analyse des dépassements de seuil ; € comparaison des débits observés et prévus par GRP ; (f) comparaison des variations observées et prévues par GRP.

a)

H5723010 Le Theil		Modèle GRP	
Chronique disponible	1970-2009	$Q_{max}$	0,6 m <sup>3</sup> /s
Surface de bassin	103 km <sup>2</sup>	$Q_{50}$	2,5 m <sup>3</sup> /s
Horizon de prévision utilisé pour le calage	6 h	$Q_{max} = (Q \cdot Q_{50})$	5,0 m <sup>3</sup> /s
Eff ( $Q \cdot Q_{50}$ , ref = modèle de persistance) 0,706			

d)

H5723010 Le Theil				Modèle GRP	
Tableau d'analyse du dépassement du seuil SPC de 20 m <sup>3</sup> /s à 6 h					
	Dépassement observé		Dépassement non observé		
	a	b	c	d	
Dépassement prévu	24	13			POD = $\frac{a}{a+b}$ = 80,0 %
Dépassement non prévu	6	299 695			FAR = $\frac{a}{a+b}$ = 55,1 %
					CSI = $\frac{a}{a+b}$ = 55,8 %



observations *a posteriori*. On compare l'évolution des prévisions ainsi réalisées : lorsqu'elles commencent à diverger significativement, l'échéance considérée correspond au temps de réaction du bassin.

Les temps de réaction estimés par cette procédure (tableau 1) sont compris entre 3 et 6 h. Il s'agit donc de bassins réagissant rapidement, ce qui se comprend facilement vues les superficies assez faibles. Ces résultats indiquent également que :

- le pas de temps horaire choisi ici convient bien à la modélisation des bassins aux Avenelles et au Theil (temps de réaction de l'ordre de 6 h), mais semble trop grossier pour la station de Mélarchez (temps de réaction inférieur à 3 h) ;
- pour des délais de prévision plus grands que ces temps de réaction, la qualité de la prévision de débit dépendra donc partiellement de la prévision de pluie, et ce d'autant plus que le délai s'allongera.

Pour des applications de vigilance, les délais de prévision généralement souhaités sont de l'ordre de 24 h au moins. Pour atteindre ce délai, il faudra donc impérativement disposer de prévisions de pluie sur ces bassins.

### Évaluation et calage du modèle de prévision

Avant toute utilisation opérationnelle, un modèle de prévision doit être évalué sur des données historiques, de manière à évaluer la qualité de ses prévisions et sa robustesse. Cette phase du travail a permis une évaluation détaillée des capacités prédictives du modèle, ainsi qu'une analyse de sensibilité aux pluies. Elle a également fourni les jeux de paramètres calés pour une application opérationnelle.

Pour réaliser cette évaluation, nous nous sommes donc placés dans des conditions aussi proches que possible de celles d'une utilisation opérationnelle du modèle. Une



## 2 Synthèse des résultats obtenus par le modèle GRP sur les trois stations étudiées, le quantile 95 % (Q95) de la courbe des débits classés.

Station	Surface (km <sup>2</sup> )	Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	Q95 (m <sup>3</sup> /s)	Pour Q > Q95				Qualifications des performances
				Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	RMSE (PP)/ Qmoy	Eff (persistance)	$\Delta Q_{\text{prev}} > 0$ lorsque $\Delta Q_{\text{Obs}} > 0$ (%)	
Le Theil	104	0,6	2,5	5,0	0,16	0,805	90,0	Très bonne
Les Avenelles	45	0,3	1,1	2,3	0,14	0,730	63,4	Bonne
Mélarchez	7,1	0,1	0,2	0,6	0,35	0,663	58,2	Moyenne

► procédure rigoureuse de test en calage-contrôle croisés sur des sous-périodes indépendantes (Klemes, 1986) a été réalisée. Les performances ont été évaluées par une sélection de critères numériques et graphiques. Les critères numériques incluent :

- l'erreur quadratique moyenne (RMSE) du modèle, qui renseigne sur l'écart moyen des prévisions aux observations, et que l'on rapporte au débit moyen ;
- le critère de persistance, qui compare l'erreur du modèle à celle d'un modèle naïf prévoyant un débit futur égal au débit observé à l'instant de la prévision (modèle de persistance). Ce critère (ainsi que la RMSE) peut n'être calculé qu'au dessus d'un seuil de crue ;
- des critères basés sur le tableau de contingence relatif aux dépassements d'un seuil de crue (on compare notamment dans ce tableau les nombres d'alertes valables, d'alertes manquées et de fausses alertes).

Les critères graphiques incluent :

- l'évolution des erreurs moyennes (ou de leur distribution) en fonction de l'échéance de prévision ;
- la comparaison des débits prévus et observés ;
- la comparaison des variations de débit prévues et observées, ce critère étant plus exigeant que le précédent, notamment pour bien évaluer les phases de montée (correspondant à des variations de débit positives).

Une fiche synthétique de performance a été générée pour chaque station. Elle présente un tableau récapitulatif brièvement les caractéristiques du bassin étudié et les critères numériques d'efficacité (figure 2).

Les résultats numériques détaillés pour les trois stations sont données dans le tableau 2.

Bien que l'évaluation puisse conduire à des interprétations légèrement différentes en fonction des critères choisis, il a été conclu que le modèle apporte une information intéressante pour le prévisionniste pour toutes les stations. On observe cependant une dégradation relative des performances quand on va de l'aval vers l'amont, le modèle ayant davantage de mal à bien prévoir les variations de débit sur les bassins plus petits. Pour la station de Mélarchez, cela peut venir en partie du pas de temps horaire utilisé ici, probablement trop grossier, comme nous l'avons mentionné plus haut.

Au Theil, les prévisions de montée de crue semblent très fiables : les augmentations de débit sont prévues dans 90 % des cas, ce qui indique que le modèle reproduit bien la dynamique du bassin. Ce pourcentage tombe aux environs de 60 % pour les deux autres stations.

S'il n'y a pas d'échec patent du modèle, les résultats obtenus ici sont probablement « idéalisés » par rapport au niveau d'erreur que l'on pourrait attendre en temps réel. Ils ont en effet été obtenus à partir d'une base de données critiquée et validée, alors que la qualité est souvent moindre en temps réel. *A contrario*, ces résultats sont des résultats bruts de modélisation qui n'ont bénéficié d'aucune expertise *a posteriori* de la part de prévisionnistes, ce qui permettrait certainement d'affiner les résultats.

Enfin, notons que les fortes pertes de performances du modèle pour des délais supérieurs au temps de réaction du bassin, lorsqu'une pluie future nulle est utilisée, indiquent une sensibilité importante des prévisions au choix du scénario de pluie future. En conditions opérationnelles, les prévisions seront donc fortement impactées par la qualité des prévisions de pluie disponibles.

### Conclusion et perspectives

Cette application du modèle GRP sur le bassin versant de l'Orgeval contribue au travail continu d'amélioration des modèles de prévision d'Irstea, afin de répondre au mieux aux attentes des utilisateurs.

Ce travail de recherche a donc permis une évaluation assez exhaustive des capacités du modèle de prévision GRP sur la zone d'étude. Elle a abouti à la mise en place des bases temps réel et au calcul des jeux de paramètres du modèle qui permettront son utilisation opérationnelle par l'équipe Hydrologie d'Irstea à Antony.

La bonne qualité des bases de données du bassin versant de l'Orgeval ainsi que la disponibilité de ses longues chroniques de pluies et débits ont contribué à obtenir de bonnes performances du modèle sur ce bassin, surtout sur les stations les plus à l'aval. En effet, le calage d'un modèle sur des chroniques beaucoup plus courtes et/ou présentant de fortes erreurs conduit généralement à des résultats moins robustes.

Ces travaux ont permis d'installer une version temps réel du modèle sur le bassin, dont le suivi est assuré par les

personnels en charge du bassin. Au-delà de l'intérêt pratique de ce dispositif pour les tests pré-opérationnels des différentes versions du modèle GRP, un tel modèle peut également contribuer à une gestion plus efficace du bassin. En effet, l'anticipation des événements de crue pourrait, par exemple, permettre une meilleure identification des périodes où il faudrait réaliser des jaugeages au droit des stations hydrométriques pour valider de façon robuste le modèle de prévision et mieux extrapoler des courbes de tarage.

Par ailleurs, les résultats présentés ici, indiquent que le modèle peut être un outil utile d'aide à la décision dans la gestion des événements de crue sur le bassin. Le modèle mis au point se prêtant facilement à une interface avec SOPHIE (plateforme utilisée par les services de prévision de crues pour effectuer des prévisions en temps réel et alerter la population), il semble en mesure de fournir une information de qualité à des prévisionnistes, et pourrait donc être exploité pour une meilleure anticipation des événements à l'aval, notamment au niveau de la ville de Coulommiers.

En termes de développements du modèle de prévision pour une application sur d'autres bassins versants, la prise en compte des ouvrages et de la neige, non étudiés ici, reste une source potentielle d'amélioration significative des performances du modèle. Un module de prise en compte de la neige est déjà disponible dans la version opérationnelle du modèle GRP. ■

### Les auteurs

**Damien LILAS, Charles PERRIN, Vazken ANDRÉASSIAN, Laurent CORON, Julien PESCHARD, Patrick ANSART, Carina FURUSHO et Cécile LOUMAGNE**

Irstea, centre d'Antony, UR HBAN, Hydrosystèmes et bioprocédés,  
1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony Cedex

✉ [damien.lilas@irstea.fr](mailto:damien.lilas@irstea.fr)  
✉ [charles.perrin@irstea.fr](mailto:charles.perrin@irstea.fr)  
✉ [vazken.andreassian@irstea.fr](mailto:vazken.andreassian@irstea.fr)  
✉ [laurent.coron@irstea.fr](mailto:laurent.coron@irstea.fr)  
✉ [julien.peschard@irstea.fr](mailto:julien.peschard@irstea.fr)  
✉ [patrick.ansart@irstea.fr](mailto:patrick.ansart@irstea.fr)  
✉ [carina.furusho@irstea.fr](mailto:carina.furusho@irstea.fr)  
✉ [cecile.loumagne@irstea.fr](mailto:cecile.loumagne@irstea.fr)

**Lionel BERTHET**

DREAL Auvergne Service Risques/Pôle Prévisions,  
Hydrologie et Risques Naturels,  
7 rue Léo Lagrange 63033 Clermont-Ferrand Cedex 1  
✉ [lionel.berthet@developpement-durable.gouv.fr](mailto:lionel.berthet@developpement-durable.gouv.fr)

### QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- ✉ **BERTHET, L.**, 2010, *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*, Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), Cemagref (Antony), 603 p.
- ✉ **KLEMEŠ, V.**, 1986, Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), p. 13-24.
- ✉ **REFSGAARD, J.-C.**, 1997, Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting, *Nordic Hydrology*, n° 28, p. 65-84.
- ✉ **TANGARA, M.**, 2005, *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*, « Thèse de Doctorat, EPHE (Paris), Cemagref (Antony), 374 p.
- ✉ **VALÉRY, A.**, 2010, *Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*, Thèse de Doctorat, AgroParisTech (Paris), Cemagref (Antony), 405 p.

► Consulter l'ensemble des références  
sur le site de la revue [www.set-revue.fr](http://www.set-revue.fr)