



HAL
open science

Evaluation, calage et mise en oeuvre opérationnelle du modèle de prévision des crues GRP sur des sous-bassins du Cher, de l'Indre et de la Loire: Rapport Final

Laurent Coron, Charles Perrin, Damien Lilas, Vazken Andréassian, Lionel Berthet, Julien Peschard

► To cite this version:

Laurent Coron, Charles Perrin, Damien Lilas, Vazken Andréassian, Lionel Berthet, et al.. Evaluation, calage et mise en oeuvre opérationnelle du modèle de prévision des crues GRP sur des sous-bassins du Cher, de l'Indre et de la Loire: Rapport Final. [Rapport Technique] irstea. 2010, pp.47. hal-02594595

HAL Id: hal-02594595

<https://hal.inrae.fr/hal-02594595v1>

Submitted on 15 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.

**EVALUATION, CALAGE ET MISE EN ŒUVRE
OPERATIONNELLE DU MODELE DE
PREVISION DES CRUES GRP
SUR DES SOUS-BASSINS
DU CHER, DE L'INDRE ET DE LA LOIRE**

Rapport final

Novembre 2010

Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés,
Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex
Tel : 01 40 96 61 21 ; Fax : 01 40 96 61 99 ; www.cemagref.fr

Titre	MISE EN PLACE DU MODELE DE PREVISION DES CRUES GRP SUR DES SOUS-BASSINS DU CHER ET DE L'INDRE
Auteurs	Laurent Coron, Charles Perrin, Damien Lilas, Vazken Andréassian, Lionel Berthet, Julien Peschard
Date	Novembre 2010
Institution	Cemagref, UR HBAN (Antony)
Commanditaire	DREAL Centre Interlocuteurs : Didier Reinbold, Joanna Brunelle, Yoann Faucard, Angélique Godart
Nb de pages du rapport	47 (hors annexes)
Fournis avec le rapport	<ul style="list-style-type: none"> - base de données horaire complète sous format numérique - exécutable de calage et de prévision temps réel - guide d'utilisation des exécutables

Résumé

Le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Cher-Indre (LCI), dans le cadre de la diversification de ses modèles de prévision des crues, a souhaité réaliser une étude de modélisation pour mettre en place le modèle de prévision des crues GRP sur des sous-bassins du Cher, de l'Indre et de leurs affluents, ainsi que sur des affluents de la Loire amont. L'objectif était de développer pour ces bassins, des modèles de prévision de crue aussi fiables que possible, avec des horizons de prévision aussi grands que possible, idéalement de 24 à 72h.

Cette étude portait sur 32 stations hydrométriques réparties sur le réseau hydrographiques, avec des bassins versants allant de 51 km² à 3492 km². Quatorze de ces stations avaient déjà été analysées lors du diagnostic préliminaire réalisé par le Cemagref en 2008.

L'étude a été divisée en 3 phases dont les principales conclusions sont les suivantes :

- Phase 1 : Constitution de la base de données

Cette phase, largement prise en charge par le SPC, a permis de mettre au point une base de données continue au pas de temps horaire sur des périodes de 10 à 14 ans suivant les stations. Des problèmes dans les données des 18 nouvelles stations ont été constatés et sont de nature à diminuer les performances des modèles. L'analyse du réseau pluviométrique au sol a fait ressortir les cas des petits bassins avec très peu de postes disponibles (1 ou 2). Sur ces bassins (en particulier celui du Cher à Chamobonchard), l'utilisation de postes supplémentaires permettrait de fiabiliser l'information pluviométrique.

- Phase 2 : Analyse hydrologique du fonctionnement des bassins et présentation du modèle

Cette phase a permis de caractériser, par une méthode hydrologique, les temps moyens de réaction des bassins versants aux pluies. Ces temps de réaction vont de 3 à 24 heures pour les bassins étudiés. L'objectif de prévision de l'étude étant de 24-72 h, il est donc clair que pour atteindre cette échéance, des prévisions de pluie devront être intégrées à la chaîne de prévision pour tous les bassins.

Cette phase a également permis de présenter plus en détail le modèle de prévision GRP, son mode de calage ainsi que d'établir les procédures utilisés pour évaluer ses performances.

- Phase 3 : Evaluation et calage du modèle de prévision

Une procédure rigoureuse de test en calage-contrôle complétée par une sélection de critères numériques et graphiques a été utilisée pour analyser les résultats. Bien que l'évaluation puisse conduire à des interprétations légèrement différentes en fonction des critères choisis, il a été conclu que le modèle fournissait des résultats de nettement meilleure qualité qu'un modèle simple de persistance. Cependant un lien entre le scénario de pluie future utilisé et la qualité de la prévision a clairement été établi, montrant toute l'importance qu'auront les prévisions de pluie sur la capacité du modèle à prévoir les débits en conditions opérationnelles. Globalement, le modèle a été jugé bon sur 5 stations, moyen sur 21 et faible sur 6. Ces résultats sont partiellement amoindris par la qualité des données utilisées, jugée insuffisante sur un certain nombre de stations. Des tests complémentaires effectués sur 9 bassins avec des jeux de données validées montrent en effet une nette marge de progression.

Cette étude devrait donc contribuer à renforcer le potentiel de prévision du SPC LCI sur sa zone de compétence.

Plusieurs pistes restent à explorer pour améliorer les résultats du modèle GRP, notamment :

- une meilleure exploitation de l'information pluviométrique pour améliorer l'estimation de la lame d'eau précipitée,
- une analyse détaillée des influences nivales,
- l'analyse de l'impact de la fonction objectif sur les résultats du modèle de prévision.

Sommaire

1. Introduction	1
1.1. Contexte et objectifs de l'étude.....	1
1.2. Méthodologie adoptée	1
1.3. Contenu du rapport.....	2
2. Résultats de la Phase 1 : Mise en place de la base de données	3
2.1. Objectifs de la Phase 1	3
2.2. Bassins étudiés	3
2.3. Données pluviométriques	7
2.3.1. Données de postes au sol	7
2.3.2. Données SAFRAN.....	7
2.3.3. Sécurisation de l'information pluviométrique.....	10
2.4. Données hydrométriques.....	10
2.5. Données d'évapotranspiration potentielle.....	11
2.6. Sélection d'événements pour analyse	12
2.7. Périodes de test.....	13
2.8. Mise en forme des données pour les tests	14
2.9. Synthèse des résultats de la Phase 1	15
3. Résultats de la Phase 2 : Analyse hydrologique des bassins versants et présentation du modèle de prévision.....	17
3.1. Objectifs de la Phase 2	17
3.2. Méthodologie de caractérisation	18
3.3. Modèle de prévision sélectionné	19
3.4. Résultats	21
3.5. Synthèse des résultats de la Phase 2	24
4. Résultats de la Phase 3 : Calage et évaluation du modèle.....	25

4.1. Objectifs	25
4.2. Méthode d'évaluation du modèle.....	25
4.2.1. Procédure de calage / contrôle	26
4.2.2. Détermination des périodes	26
4.2.3. Algorithme de calage	27
4.2.4. Scénarios de pluie future considérés lors des tests	27
4.2.5. Horizons de calage et délais de prévision	28
4.2.6. Critères numériques d'évaluation	29
4.2.7. Critères graphiques d'évaluation	32
4.2.8. Représentation graphique des résultats.....	33
4.3. Présentation et analyse des résultats.....	34
4.3.1. Détail des résultats fournis.....	34
4.3.2. Analyse des résultats.....	36
4.3.3. Comparaison des résultats à ceux du diagnostic établi en 2008	38
4.4. Tests complémentaires avec des chroniques étendues et validées	39
4.5. Conclusion de la phase 3	42
5. Conclusion générale.....	45
Bibliographie.....	47
Annexe 1: Tableau récapitulatif des données disponibles par bassin	
Annexe 2 : Chroniques pluie-débit-ETP sur les 24 bassins initiaux	
Annexe 3: Fiches synthétiques de résultats obtenus sur les 21 stations étudiées	
Annexe 4 : Catalogue de prévisions réalisées sur les 21 stations étudiées	
Annexe 5: Fiches synthétiques de résultats complémentaires obtenus sur 9 stations avec des données validées	
Annexe 6 : Catalogue de prévisions réalisées sur 9 stations avec des données validées	

Liste de figures

Figure 1 : Localisation des stations hydrométriques, des contours des bassins associés (les points bleus représentent les stations déjà analysées lors de l'étude de diagnostic en 2008, celles en rouges les stations supplémentaires)	6
Figure 2 : Localisation des principaux postes pluviométriques disponibles en temps réel sur le bassin ..	9
Figure 3 : Disponibilité des données hydrométriques	11
Figure 4 : Exemple de fichier de données constitué pour le test des modèles.....	14
Figure 5 : Illustration de l'influence des conditions pluviométriques passées et futures sur la prévision de crue	18
Figure 6 : Evolution des erreurs du modèle de prévision en fonction de l'échéance suivant deux scénarios de pluie future.....	19
Figure 7 : Schéma structurel du modèle GRP avec représentation de la procédure d'exploitation des débits observés	20
Figure 8 : Lien entre temps de réaction et superficie des bassins.....	22
Figure 9 : Temps de réaction aux pluies (en heures) sur les stations étudiées	23
Figure 10 : Illustration de la procédure de calage-contrôle adoptée (d'après Cemagref, 2005)	26
Figure 11 : Détermination des périodes de calage et tests dans un cas simple.....	27
Figure 12 : Représentation des différentes situations rencontrées avec la méthode de veille : (a) Alerte valable, (b) Fausse alerte, (c) Alerte manquée, (d) Non alerte valable	31
Figure 13 : Exemple de graphique comparant les variations de débit prévues et observées.....	32
Figure 14 : Exemple de fiche synthétique de résultats	33
Figure 15 : Exemple d'hydrogramme de prévision.....	34

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des bassins étudiés et des stations hydrométriques associées.....	5
Tableau 2 : Densité pluviométrique sur les bassins.....	8
Tableau 3 : Périodes d'études retenues pour les sous bassins étudiés	14
Tableau 4 : Temps de réaction des bassins aux pluies, estimés par modélisation.....	21
Tableau 5 : Horizons de calage retenus.....	29
Tableau 6 : Tableau de contingence de dépassement de seuil.....	31
Tableau 7 : Synthèse des résultats obtenus par le modèle GRP sur les 32 stations étudiées.....	35
Tableau 8 : Synthèse des résultats obtenus par le modèle GRP sur les 32 stations étudiées.....	37
Tableau 9 : Comparaison des appréciations qualitatives des performances du modèle réalisées en 2008 et 2010.....	39
Tableau 10 : Comparaison des résultats du modèle GRP obtenus en prenant les jeux de données initiaux (en vert) et les jeux de données validées (en jaune). (a) Période 1995-2005, (b) Période 1995-2009.....	40

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs de l'étude

En 2008, le Service de Prévision des Crues Loire-Cher-Indre (SPC LCI) de la DREAL Centre a demandé au Cemagref de réaliser un diagnostic préliminaire des performances du modèle de prévision de crues GRP sur 14 sous-bassins du Cher et de l'Indre (superficies allant de 200 à 3500 km²).

Ces tests préliminaires avaient conclu à des résultats satisfaisants du modèle sur neuf stations, moyens pour quatre stations et peu satisfaisant sur une station (voir Cemagref, 2008). Suite à ces premiers résultats, le SPC LCI a souhaité étendre ce travail de test à 32 stations, l'essentiel des stations supplémentaires étant situées sur le haut bassin de la Loire. L'objectif du SPC était de se doter de l'outil opérationnel GRP pour diversifier ses moyens de prévision sur ces bassins.

L'objectif de la présente étude est ainsi de développer et mettre en place le modèle de prévision des crues GRP sur 32 stations réparties sur les bassins du Cher, de l'Indre et de la Loire, avec des horizons de prévision aussi grands que possible.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une convention de recherche et développements partagés entre la DREAL Centre et le Cemagref. Le SPC souhaite ainsi améliorer sa capacité de prévision en profitant des développements déjà effectués dans le cadre de la collaboration SCHAPI – Cemagref. Le Cemagref, par ces développements et la diffusion de ses outils, cherche à confronter ses travaux au contexte opérationnel et à bénéficier d'un retour d'expérience sur l'utilisation des outils proposés au SPC.

1.2. Méthodologie adoptée

Le travail prévu dans le cadre de la convention DREAL – Cemagref a été décomposé en deux grandes parties :

- la première, prévoyant le calage et l'analyse partagée des résultats du modèle,
- la seconde concernant la remise des outils opérationnels, la fourniture de la documentation, la formation des prévisionnistes et le suivi opérationnel des résultats du modèle.

Ce rapport a pour objectif essentiel de détailler les résultats des tests du modèle GRP sur les 32 stations sélectionnées, suivant une méthodologie similaire à celle suivie par le Cemagref (2008) dans son étude de diagnostic, mais qui a été améliorée au cours de l'année 2009, dans le cadre des différentes actions du Cemagref pour la mise à disposition du modèle GRP auprès des SPC.

La démarche adoptée pour cette étude de modélisation est composée des trois phases de travail suivantes :

1. mise en place de la base de données destinée à évaluer et caler les modèles hydrologiques ;
2. analyse hydrologique des bassins versants ciblés dans cette étude ;
3. test, évaluation et calage des modèles de prévision ;

Ces travaux ont été réalisés en concertation avec le SPC. Ils doivent conduire à la mise en fonctionnement opérationnel du modèle GRP au SPC. Cet aspect est déjà bien avancé grâce à l'implication du SPC.

1.3. Contenu du rapport

Ce rapport présente les résultats obtenus dans les différentes phases d'élaboration des modèles de prévision. Il fournit notamment :

- une description de la base de données constituée avec l'aide du SPC, avec une sélection d'événements de crue sur chaque bassin versant ;
- une caractérisation des temps de réponse des bassins versants à l'aide de la modélisation hydrologique ;
- une description de la méthodologie de test retenue et les critères utilisés pour évaluer les performances des modèles ;
- une analyse des résultats généraux du modèle sur les stations étudiées ;

Ce rapport ne détaille pas les aspects logiciels, car l'essentiel des procédures de mise en place du modèle GRP est détaillé dans le guide technique du logiciel GRP.

Ce rapport a été fourni au SPC avec les éléments informatiques suivants :

- base de données horaires disponible à chaque station étudiée (de 1986 au plus tôt à 2009) ;
- catalogue des résultats par événements ;
- exécutable de calage du modèle ;
- exécutables de prévision opérationnelle,
- guide d'utilisation.

2. Résultats de la Phase 1 : Mise en place de la base de données

2.1. Objectifs de la Phase 1

Cette première phase du travail était une phase préparatoire de collecte, mise en forme et analyse succincte des données qui seront ensuite exploitées pour les travaux de modélisation.

Elle visait à :

- mettre au point, pour chaque bassin versant, un jeu de données nécessaire au calage et au test des modèles, dans un format uniforme ;
- définir les périodes exploitables pour le calage et le test des modèles ;
- définir pour chaque bassin des événements cibles sur lesquels les résultats des modèles seront analysés plus en détail.

Nous donnons ici les principaux résultats obtenus. Cette phase a été réalisée grâce à l'implication forte du SPC qui a fourni la plupart des données utilisées.

2.2. Bassins étudiés

Nous ne reviendrons pas ici sur les caractéristiques physiques du bassin. Nous pouvons simplement mentionner que le bassin présente une topographie assez variée, avec des altitudes relativement élevées dans les parties les plus amont (Cher amont, Haute Loire) et des zones de plaine à l'aval. Les écoulements sont majoritairement orientés vers le nord-ouest. Le bassin est sous un climat à dominante océanique, avec des événements de crues générées par des pluies prolongées (plusieurs jours). Il est cependant soumis à des événements de pluie intenses de type cévenols sur les parties les plus en amont du bassin de la Loire, qui peuvent causer des crues éclairs sur l'amont du bassin.

La neige peut ponctuellement perturber le fonctionnement hydrologique habituel du bassin. En effet, en observant les chroniques de température, celles-ci sont régulièrement négatives, notamment sur les bassins les plus à l'amont. Il y a donc vraisemblablement formation de couverts neigeux temporaires qui peuvent, en cas de redoux brutal, contribuer de façon significative à des volumes de crue, notamment au printemps. Cependant, ici, il n'a pas été envisagé de prendre en compte ce phénomène de manière explicite, qui nécessiterait d'avoir des données de température en temps réel. Il faudra cependant garder à l'esprit cette potentielle influence des fontes nivales lors de l'analyse des résultats.

L'étude porte sur 32 stations hydrométriques dont 14 étaient déjà présentes dans l'étude préliminaire de 2008. La liste est fournie dans le Tableau 1. Une carte de localisation est fournie à la Figure 1.

La gamme des superficies des bassins versants associés est assez étendue (de 51 km² à 3492 km²), avec une valeur médiane à 524 km².

Les sous-bassins étudiés sont situés sur trois bassins principaux :

- le bassin du Cher : on trouve 4 stations sur le Cher dans sa partie amont (Chambonchard, Montluçon, Saint-Victor et Saint-Amand Montrond d'amont en aval) et 10 stations sur ses affluents, avec d'amont en aval la Tardes, la Voueize, l'Aumance, l'Auron, l'Yèvre, le Moulon, l'Arnon, la petite Sauldre et la Grande Sauldre ;
- le bassin de l'Indre : on trouve deux stations sur l'Indre (Saint Cyran du Jambot et Ardentes) et une station sur l'Indrois ;
- le haut bassin de la Loire : on trouve 15 stations sur des affluents de la Loire, avec d'amont en aval la Gazeille, la Borne, le Lignon du Velay, la Dunières, la Semène, le Furan, la Mare, le Lignon du Forez, l'Aix, le Rhins, l'Arconce, la Bourbince,, l'Arroux, l'Aron..

Tableau 1 : Liste des bassins étudiés et des stations hydrométriques associées

Bassin	Code	Cours d'eau - Nom Station	Surface (km ²)	Présente dans l'étude de 2008
Cher	K5090900	Le Cher à Chambonchard	517	oui
	K5220900	Le Cher à Montluçon	1750	oui
	K5220910	Le Cher à Saint-Victor	1840	non
	K5400920	Le Cher à Saint Amand Montrond	3492	oui
	K5183020	La Tardes à Chambon sur Voueize	854	oui
	K5143110	La Voueize à Gouzon	144	non
	K5383020	L'Aumance à Hérisson	920	oui
	K5623010	L'Auron au Pondy	199	oui
	K5552300	L'Yèvre à Savigny en Septaine	531	oui
	K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	138	non
	K6192420	L'Arnon à Alnay	2170	oui
	K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol	318	oui
	K6332510	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	594	oui
	K6402500	La Grande Sauldre à Salbris	1200	oui
Indre	K7202610	L'Indre à Ardenes	697	oui
	K7312610	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	1712	oui
	K7433030	L'Indrois à Genillé	396	oui
Loire	K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	51	non
	K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	375	non
	K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	139	non
	K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène	228	non
	K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	134	non
	K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	178	non
	K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	95	non
	K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	371	non
	K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	193	non
	K0983010	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	427	non
	K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	599	non
	K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	819	non
	K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	1800	non
	K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	2280	non
K1773010	L'Aron à Verneuil	1470	non	

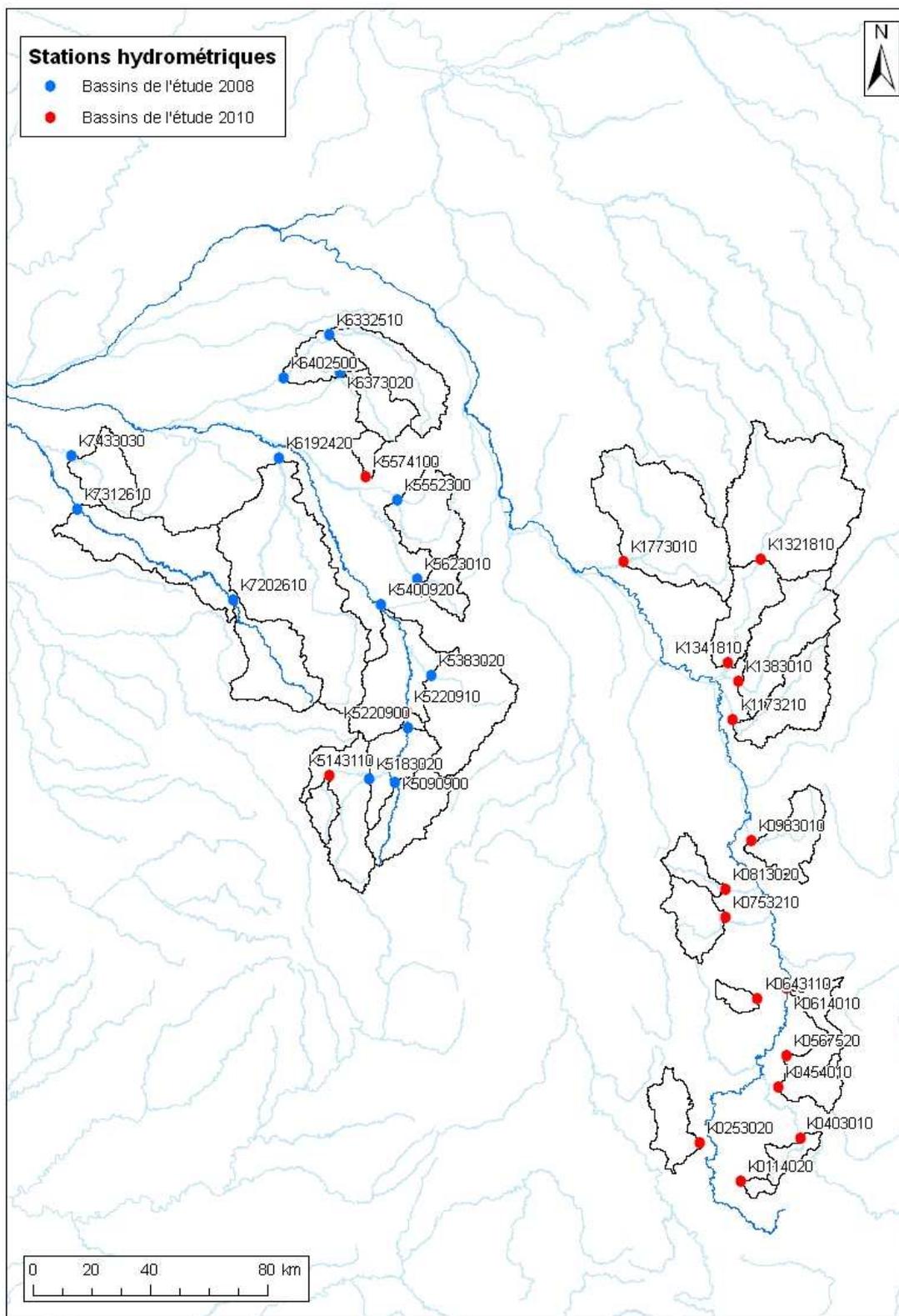


Figure 1 : Localisation des stations hydrométriques, des contours des bassins associés (les points bleus représentent les stations déjà analysées lors de l'étude de diagnostic en 2008, celles en rouges les stations supplémentaires)

Notons que le SPC a déjà une forte expérience en termes de modélisation sur certains de ces bassins. Par exemple, les bassins du haut bassin de la Loire ont été largement étudiés, par exemple par Moulin (2007) en collaboration avec le SPC. Ces travaux ont montré les difficultés de modélisation sur ces bassins, liées notamment aux problèmes d'observation des pluies et à la caractérisation de leur variabilité spatiale.

2.3. Données pluviométriques

La période d'analyse ciblée pour cette étude va de 1994 à 2007, avec des variations suivant les stations étudiées en fonction de la disponibilité des données. Deux sources de données pluviométriques ont été exploitées (voir Tableau 2).

2.3.1. Données de postes au sol

Ces données ont été fournies par le SPC lors de l'étude préliminaire de 2008. Seuls les postes pluviométriques actuellement disponibles en temps réel au sein du SPC ont été considérés. Il apparaît en effet intéressant que les modèles soient calés avec l'information pluviométrique dont ils pourront effectivement disposer en conditions opérationnelles. Ces données avaient été analysées par le SPC avant mise à disposition au Cemagref et n'ont donc pas subi de critique plus avancée. Pour chaque bassin couvert par ces postes, une simple moyenne arithmétique des postes pluviométriques sélectionnés a été réalisée pour calculer la pluie de bassin.

L'Annexe 2 montre les chroniques de disponibilité pluviométrique, avec à chaque pas de temps le nombre de postes disponibles. Certaines variations sont dues à l'ajout d'un poste au cours de la période. Un certain nombre de bassins disposent ainsi de peu de postes en début de période et davantage ensuite (par exemple la Tardes, l'Arnon ou l'Indre). D'autres variations plus erratiques correspondent à des lacunes ponctuelles. Lors des tests, pour les cas où une absence de données se produisait ponctuellement et simultanément sur tous les postes sélectionnés pour le bassin, nous avons choisi de remplacer cette lacune par une pluie de bassin égale à 0. Bien que cela puisse avoir un effet notable sur les résultats (si la pluie n'a pas été nulle en réalité), nous avons choisi cette option pour permettre le test des modèles sur la plus longue période possible. Remarquons que dans le cas du Cher à Chambonchard, qui ne dispose que d'un poste sur lequel des lacunes assez nombreuses existent sur la période 1996-2003, cela pourrait nuire à la qualité des résultats du modèle.

2.3.2. Données SAFRAN

Ces données ont été utilisées pour tous les bassins nouveaux par rapport à l'étude de 2008, pour lesquels une nouvelle base de données de postes pluviométriques au sol n'a pas été constituée. Ces données sont issues de traitements antérieurs réalisés au Cemagref. Elles correspondent aux cumuls des données SAFRAN journalières désagrégées au pas de temps horaire à partir des répartitions observées sur des postes au sol. Elles ne correspondent donc pas à l'information disponible en temps réel. La procédure de désagrégation utilisée n'est pas idéale car elle conduit parfois à répartir les cumuls SAFRAN de manière uniforme sur la journée (cas où l'information horaire au sol présente des lacunes ou correspond à une pluie nulle sur la journée). La maille SAFRAN (64 km²) est par ailleurs assez large par rapport aux bassins les plus petits de notre étude. Cela conduit à un lissage de l'information locale. Il

faudra donc garder à l'esprit la nature de cette entrée pluviométrique au moment de l'analyse des résultats du modèle. Ces données ne présentent pas de lacunes sur la période ciblée.

Notons que pour les bassins où nous avons utilisé de la pluie SFRAN, le SPC a quand même fourni le nombre et la liste des postes effectivement disponibles pour ces bassins (voir Tableau 2). Nous avons simplement lors des tests affectés à chacun des postes la même information pluviométrique.

Tableau 2 : Densité pluviométrique sur les bassins

Bassin	Code	Cours d'eau - Nom Station	Surface (km ²)	Nb Postes	Indice densité (km ² /poste)	Source Données Pluie
Cher	K5090900	Le Cher à Chambonchard	517	1	517	Postes
	K5220900	Le Cher à Montluçon	1750	11	159	Postes
	K5220910	Le Cher à Saint-Victor	1840	11	167	Safran
	K5400920	Le Cher à Saint Amand Montrond	3492	18	194	Postes
	K5183020	La Tardes à Chambon sur Voueize	854	6	142	Postes
	K5143110	La Voueize à Gouzon	144	2	72	Safran
	K5383020	L'Aumance à Hérisson	920	5	184	Postes
	K5623010	L'Auron au Pondy	199	2	100	Postes
	K5552300	L'Yèvre à Savigny en Septaine	531	4	133	Postes
	K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	138	3	46	Safran
	K6192420	L'Arnon à Alnay	2170	9	241	Postes
	K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol	318	2	159	Postes
	K6332510	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	594	4	149	Postes
	K6402500	La Grande Sauldre à Salbris	1200	7	171	Postes
Indre	K7202610	L'Indre à Ardentes	697	6	116	Postes
	K7312610	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	1712	9	190	Postes
	K7433030	L'Indrois à Genillé	396	5	79	Postes
Loire	K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	51	2	26	Safran
	K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	375	4	94	Safran
	K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	139	3	46	Safran
	K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène	228	2	114	Safran
	K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	134	3	45	Safran
	K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	178	3	59	Safran
	K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	95	3	32	Safran
	K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	371	4	93	Safran
	K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	193	3	64	Safran
	K0983010	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	427	3	142	Safran
	K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	599	3	200	Safran
	K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	819	3	273	Safran
	K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	1800	4	450	Safran
	K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	2280	5	456	Safran
K1773010	L'Aron à Verneuil	1470	5	294	Safran	

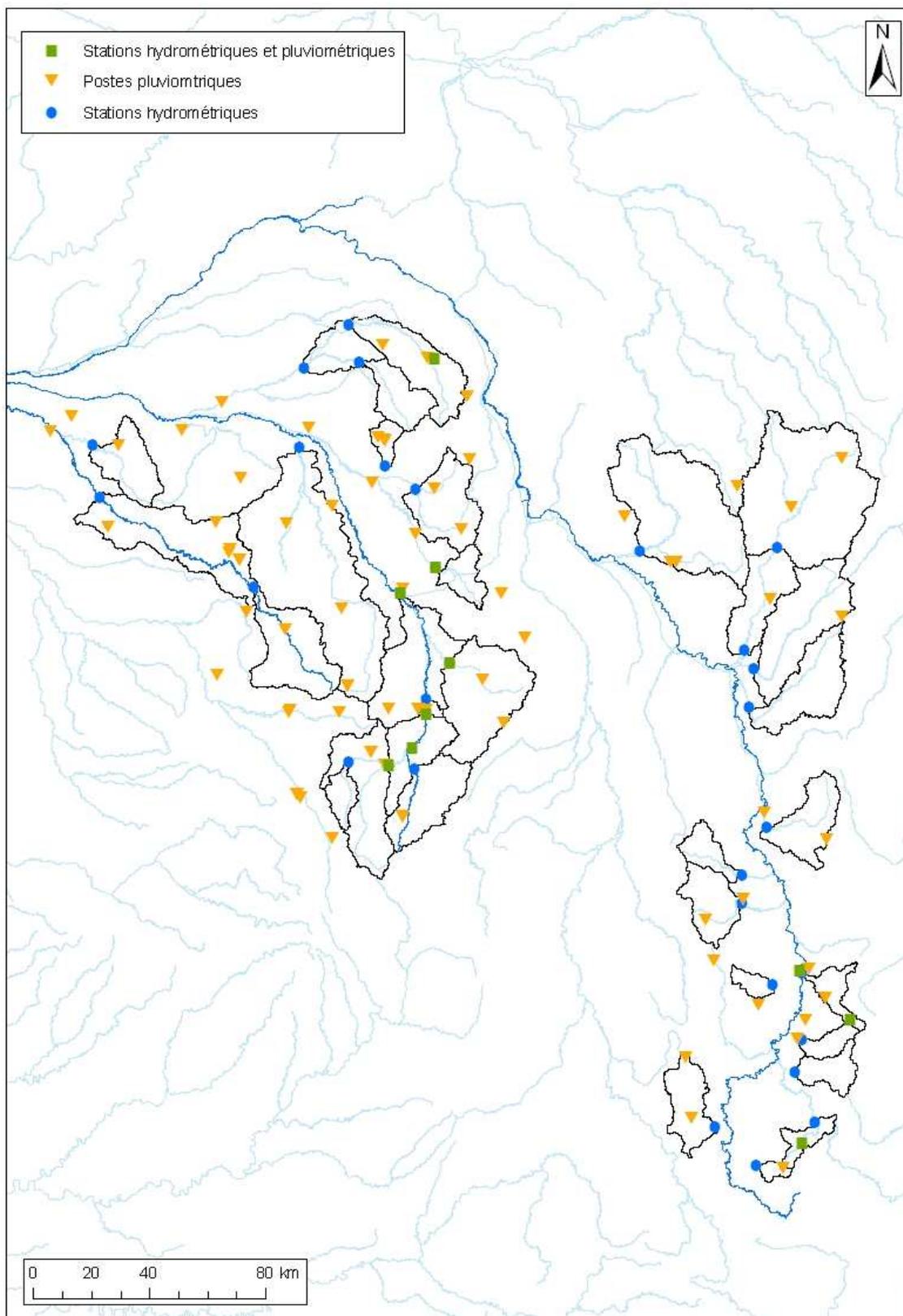


Figure 2 : Localisation des principaux postes pluviométriques disponibles en temps réel sur le bassin

2.3.3. Sécurisation de l'information pluviométrique

Certains bassins sont peu couverts par le réseau pluviométrique, avec seulement un ou deux postes disponibles (voir Tableau 2). Il s'agit de bassins suivants :

- le Cher à Chambonchard (1 poste),
- l'Auron au Ponds (2 postes),
- la Petite Sauldre à Ménétréol (2 postes),
- la Gazeille à Besseyre-Saint-Mary (2 postes),
- la Dunières à Sainte-Sigolène (2 postes)
- la Voueize à Gouzou (2 postes).

Ces bassins présentent une information pluviométrique à risque, dans le sens où une panne sur l'un des postes peut entraîner une dégradation significative de l'information utilisée en entrée du modèle (voire son absence). Des absences de données pluviométriques, si elles ne sont pas dommageables hors événements dans le cas de modélisations événementielles, peuvent entraîner au contraire de fortes erreurs d'un modèle fonctionnant en continu tel que le modèle GRP. Le modèle continu utilise en effet l'historique des pluies passées pour mettre à jour ses états internes. **Une absence totale de données sera considérée comme une pluie nulle, ce qui peut entraîner sur de longues périodes un déficit d'eau dans les réservoirs du modèle et donc un manque de réactivité en début d'événement en raison d'états d'humidité trop faibles. Il faut donc veiller à assurer une information pluviométrique d'une qualité aussi constante que possible en entrée du modèle.** Cela peut être délicat pour les bassins avec très peu de postes. D'un point de vue opérationnel, s'il est cependant difficile de densifier les réseaux sur les têtes de bassin, il faudrait à minima pouvoir associer au bassin du Cher à Chambonchard un second poste pluviométrique pour limiter les risques d'interruption complète de l'information pluviométrique.

2.4. Données hydrométriques

Les stations ciblées dans l'étude sont toutes des stations jaugées. Après une rapide inspection visuelle, deux groupes de stations se dégagent :

- d'une part celles qui faisaient partie de la première étude de 2008 et qui avaient été fournies par le SPC, et qui peuvent être jugées de bonne qualité;
- d'autre part toutes les nouvelles stations (le Cher à Saint-Victor, la Voueize à Gouzou, le Moulon à Bourges, toutes les stations de la partie Loire), pour lesquelles les chroniques utilisées peuvent être qualifiées de suspectes, avec de brusques variations dans les débits. Pour ces stations, il est probable que la qualité des données limite les performances du modèle, et qu'il faudra refaire une analyse avec des données de meilleure qualité si elles peuvent être fournies par le SPC.

La Figure 3 illustre la disponibilité des données hydrométriques retenues sur la période d'étude. Les lacunes sont globalement assez limitées et permettent de réaliser un test sur la quasi-totalité des événements observés.

L'observation des chroniques (voir Annexe 2) montre des dynamiques de fonctionnement assez variées : les petits bassins ont globalement des réponses assez rapides, comme nous le verrons dans la présentation des résultats de la phase 2, alors que les plus grands ont des

réponses plus lissées. Quelques bassins situés sur le haut bassin de la Loire ont des réactions très violentes liées à des événements de crue intenses, de type cévenol.

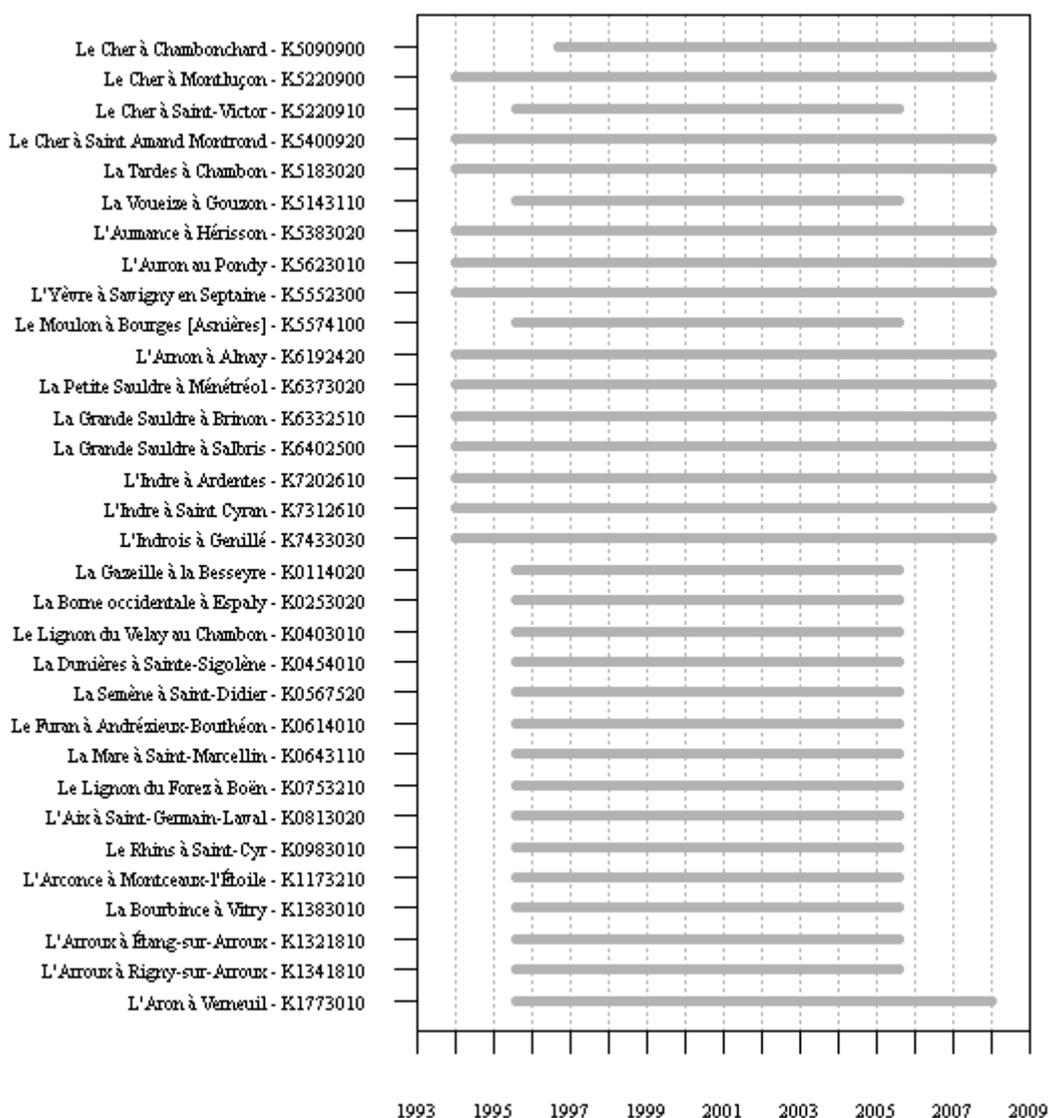


Figure 3 : Disponibilité des données hydrométriques

2.5. Données d'évapotranspiration potentielle

Outre des données pluviométriques et hydrométriques, les modèles pluie-débit testés dans cette étude utilisent des données permettant de quantifier la demande évaporatoire de l'air. Il s'agit de données d'évapotranspiration potentielle (ETP). Elles permettent au modèle de calculer les retours d'eau réels vers l'atmosphère à l'échelle du bassin versant. Ces données sont nécessaires pour permettre d'établir l'évolution de l'humidité du bassin, variable indispensable à la modélisation continue envisagée ici.

L'ETP n'est pas une variable directement mesurée, mais elle est estimée par une formule exploitant des variables météorologiques mesurées telles que la température, la vitesse du vent, l'insolation, l'humidité relative de l'air, etc. Suite aux travaux d'Oudin (2004) qui ont montré la faible sensibilité des modèles à la formulation et à la variabilité temporelle de l'ETP, nous avons choisi de retenir une formulation basée sur la température comme seule variable mesurée et sur la radiation extraterrestre (qui ne dépend que de la latitude) (Oudin et al., 2005). Des valeurs moyennes interannuelles pour chaque jour étant suffisantes, une courbe moyenne de régime d'ETP a donc été utilisée. Pour chaque bassin, des ETP moyennes de bassin ont été calculées sur la base de valeurs moyennes interannuelles disponibles au Cemagref. Les courbes de régime ainsi obtenues sont illustrées en Annexe 2.

2.6. Sélection d'événements pour analyse

Pour mieux analyser et visualiser les performances des modèles hydrologiques, nous avons souhaité établir pour chaque bassin une sélection d'événements représentatifs de ses conditions hydrométéorologiques pouvant conduire à une crue.

Rappelons que le modèle hydrologique sélectionné fonctionne en continu (tout au long de l'année), mais cela n'est pas incompatible avec une évaluation qualitative sur des événements donnés.

Un algorithme automatique de sélection d'événements a été appliqué sur les séries hydro-météorologiques disponibles. L'originalité de cette procédure est de prendre des critères de sélection basés à la fois sur les débits et sur la pluie. Elle permet ainsi de ne pas ignorer les événements pluviométriques importants n'ayant pas conduit à des événements de crue significatifs, mais pour lesquels on souhaite vérifier que les prévisionnistes n'ont pas été induits en erreur. Certains modèles sont en effet trop réactifs aux pluies : les tester uniquement sur des événements de crue ne permettrait pas de mettre en évidence leurs fausses alertes.

Nous avons choisi de retenir 24 événements par bassin, ce qui représente entre 1 et 2 événements par an sur la période d'étude. Ces événements se décomposent en 18 événements de crue et 6 événements pluviométriques.

La procédure de sélection d'événements, qu'ils soient pluviométriques ou de crues, répond aux critères suivants :

1. chaque événement a une durée fixée à 20 jours,
2. un nouvel événement quel qu'il soit, ne peut débuter au plus tôt que 2 jours avant la fin d'un événement déjà existant (que celui-ci soit de débit ou de pluie),
3. aucune valeur manquante de pluie ou de débit n'est acceptée au cours d'un événement à l'exception des 2 derniers jours,
4. les événements de crues sont identifiés en premier, et c'est seulement lorsque les 18 événements de crues ont été retenus que les événements pluviométriques sont identifiés. On évite ainsi de resélectionner en tant qu'événement pluviométrique des pluies ayant entraîné des événements de crues déjà retenus,
5. les événements de crues sont construits à partir des débits horaires maximaux observés, et sont identifiés dans leur ordre décroissant d'importance (i.e. le 1^{er} événement identifié correspond à la plus forte crue observée, puis le 2^{ème} événement à la 2^{ème} plus forte et ainsi de suite),

6. pour les événements de crue, la période de l'événement est centrée sur le débit maximal,
7. les événements pluviométriques sont construits à partir des cumuls de pluie maximaux observés sur une fenêtre glissante de 24 heures et sont identifiés dans leur ordre décroissant d'importance (de manière analogue à la sélection des événements de crues),
8. pour les événements pluviométriques, le cumul de pluie sur 24 heures à l'origine de l'événement est placé à 1/5^{ème} de la période de l'événement (i.e. au 4^{ème} ou 5^{ème} jour),

Les événements sélectionnés pour chaque bassin sont illustrés en Annexe 4, où ils sont présentés par ordre chronologique.

La période test est riche en événements significatifs, avec les crues de 1994, 1998, 2001 ou 2006 sur les bassins de l'Indre et du Cher, ou ceux de 1996, 2001 ou 2003 sur le bassin de la Loire.

2.7. Périodes de test

Pour chaque station, nous avons retenu la plus longue période où des données pluviométriques et hydrométriques cohérentes existent en continu et de manière globalement concomitante. Ces périodes visibles sur la Figure 3 sont rappelées dans le Tableau 3.

Pour l'évaluation des performances, la période disponible sera divisée en deux sous-périodes approximativement d'égale longueur, pour pouvoir réaliser des tests en calage/contrôle croisés. Pour des questions d'initialisation des modèles, la première année de données de chaque période ne sera cependant pas prise en compte pour l'évaluation des modèles.

Tableau 3 : Périodes d'études retenues pour les sous bassins étudiés

Bassin	Code	Cours d'eau - Nom Station	DateDebut	DateFin
Cher	K5090900	Le Cher à Chambonchard	01/01/1994	31/12/2007
	K5220900	Le Cher à Montluçon	01/01/1994	31/12/2007
	K5220910	Le Cher à Saint-Victor	01/08/1995	31/07/2005
	K5400920	Le Cher à Saint Amand Montrond	01/01/1994	31/12/2007
	K5183020	La Tardes à Chambon sur Voueize	01/01/1994	31/12/2007
	K5143110	La Voueize à Gouzou	01/08/1995	31/07/2005
	K5383020	L'Aumance à Hérisson	01/01/1994	31/12/2007
	K5623010	L'Auron au Pondy	01/01/1994	31/12/2007
	K5552300	L'Yèvre à Savigny en Septaine	01/01/1994	31/12/2007
	K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	01/08/1995	31/07/2005
	K6192420	L'Arnon à Alnay	01/01/1994	31/12/2007
	K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol	01/01/1994	31/12/2007
	K6332510	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	01/01/1994	31/12/2007
K6402500	La Grande Sauldre à Salbris	01/01/1994	31/12/2007	
Indre	K7202610	L'Indre à Ardentes	01/01/1994	31/12/2007
	K7312610	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	01/01/1994	31/12/2007
	K7433030	L'Indrois à Genillé	01/01/1994	31/12/2007
Loire	K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	01/08/1995	31/07/2005
	K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	01/08/1995	31/07/2005
	K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	01/08/1995	31/07/2005
	K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène	01/08/1995	31/07/2005
	K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	01/08/1995	31/07/2005
	K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	01/08/1995	31/07/2005
	K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	01/08/1995	31/07/2005
	K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	01/08/1995	31/07/2005
	K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	01/08/1995	31/07/2005
	K0983010	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	01/08/1995	31/07/2005
	K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	01/08/1995	31/07/2005
	K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	01/08/1995	31/07/2005
	K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	01/08/1995	31/07/2005
	K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	01/08/1995	31/07/2005
K1773010	L'Aron à Verneuil	01/08/1995	31/07/2005	

2.8. Mise en forme des données pour les tests

Pour chaque bassin versant, nous avons constitué un unique fichier texte au format colonne récapitulant l'ensemble des données nécessaires au test des modèles, à savoir les données de débit, d'ETP et de pluie. Un exemple de fichier est donné à la Figure 4.

K6402500 - La Grande Sauldre à Salbris						
Superficie bassin (km ²); 1200.0						
	Debit	ETP01	Pluvio001	Pluvio002	Pluvio003	Pluvio004
Pondérations		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AAAAMMJJ HH	Q(m3/s)	K6402500	18241002	K6322510	18269003	18015003
19940101 00	19.800	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000
19940101 01	20.100	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000
19940101 02	20.400	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000
19940101 03	20.700	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000
19940101 04	20.900	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000
19940101 05	21.200	0.000	0.000	-9.990	-9.990	0.000

Figure 4 : Exemple de fichier de données constitué pour le test des modèles

2.9. Synthèse des résultats de la Phase 1

Cette phase du travail a permis de mettre en place la base de données nécessaire à la phase de modélisation sur les 32 stations ciblées.

Les points suivants peuvent être mentionnés :

- On dispose selon les stations de périodes d'observation variant de 10 à 14 ans. Cela donne a priori une bonne idée des variabilités climatiques et hydrologiques rencontrées sur ces bassins, et devrait donc permettre de tester les modèles dans des conditions variées ;
- Des données de postes pluviométriques ou SAFRAN seront utilisées en entrée du modèle. Les données SAFRAN donnent dans le cas des bassins étudiés, une information plus éloignée des conditions opérationnelles que si nous avons utilisé de postes pluviométriques au sol. Au pas de temps horaire, elle est en effet moins détaillée et aura tendance pour les petits bassins à lisser la variabilité spatiale. Il faudra donc être vigilant lors de l'analyse des résultats sur l'impact potentiel de cette information ;
- Quelques bassins ne disposent que d'un ou deux postes pour estimer la pluie de bassin, ce qui peut générer une configuration fragile pour la sécurisation de l'information pluviométrique si des pannes simultanées, telles qu'elles ont été observées par le passé sur les chroniques dont nous disposons, se produisent en utilisation opérationnelle. Pour les bassins sur lesquels un seul poste est disponible, un deuxième poste au moins devrait y être associé (notamment le bassin du Cher à Chambonchard) ;
- une sélection d'événements a été réalisée sur la base de critères pluviométriques et hydrologiques, conduisant à l'identification de 24 événements par bassin correspondant à des débits élevés et/ou des pluies importantes.

Cette base permettra de tester les modèles et d'analyser leurs résultats.

Notons que si les données pluviométriques et hydrométriques fournies ont globalement parues de bonne qualité, il faut garder à l'esprit qu'elles sont issues d'un travail d'analyse critique ayant permis a posteriori d'en corriger les principales erreurs. Ce travail de critique n'est pas simple à réaliser en temps réel, mais il est important qu'un niveau de vérification minimum des données soit opéré par le SPC avant alimentation du modèle GRP. Sinon les résultats peuvent dans certains cas devenir désastreux voire incohérents à cause de ces problèmes de données. Une mise à jour rétrospective des bases de données est également possible et permet de gommer les impacts à long terme d'erreurs dans les données pluviométriques.

3.

Résultats de la Phase 2 : Analyse hydrologique des bassins versants et présentation du modèle de prévision

3.1. Objectifs de la Phase 2

L'objectif essentiel de cette phase est de réaliser une caractérisation hydrologique simple des bassins versants, pour estimer leurs temps de réaction aux pluies.

Les délais de prévision généralement souhaités par les services de prévision des crues sont de l'ordre de 24 h à 72 h (24 h par exemple pour la carte de vigilance). Or il est clair que la plupart des bassins versants ciblés ont des temps de réponse aux pluies inférieurs à 72 h et même à 24 h. Pour atteindre les délais de prévision souhaités, il faudra donc faire intervenir des prévisions de pluie. Deux zones temporelles devront donc être distinguées (voir Figure 5) :

- la première où les pluies futures n'ont pas d'impact sur les débits et la qualité des prévisions de débit ne dépend donc que des conditions passées (observées) et du modèle hydrologique ;
- la suivante où les prévisions de débit dépendront des prévisions de pluie, et ce d'autant plus que le délai de prévision s'allonge (la qualité de la prévision de pluie se dégradant logiquement avec l'augmentation de l'échéance).

La caractérisation de ces temps de réaction peut se faire par méthode géométrique (par exemple en mesurant le décalage temporel entre début d'événement et début de montée de crue). Cependant, de telles méthodes restent assez subjectives, notamment dans la détermination des débuts d'événements. Le recours à un modèle hydrologique semble plus adapté, puisqu'il est construit pour faire le lien entre la pluie et le débit.

Nous présentons donc ici une méthodologie basée sur le modèle pluie-débit sélectionné pour l'étude et nous en donnons les résultats.

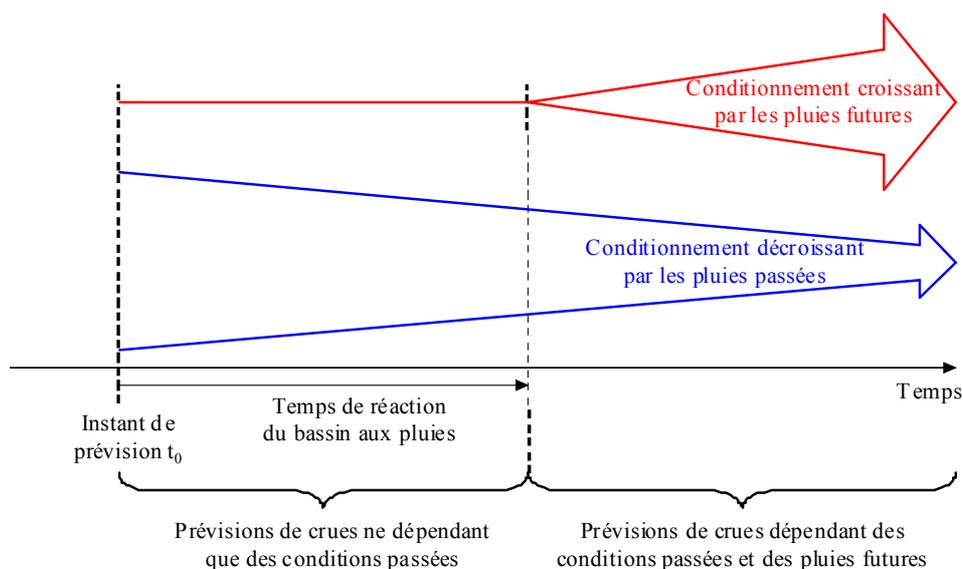


Figure 5 : Illustration de l'influence des conditions pluviométriques passées et futures sur la prévision de crue

3.2. Méthodologie de caractérisation

La méthode proposée consiste à analyser l'évolution des performances du modèle hydrologique de prévision en fonction de l'échéance, en fournissant au modèle deux scénarios de pluie future différents :

- un scénario de pluies futures nulles (la pluie s'arrête de tomber après l'instant de prévision) ;
- un scénario de pluies futures parfaitement connues (on fournit au modèle les données de pluie réellement observées a posteriori).

Dans ces deux tests, ce qui est important est que seul le scénario de pluie change, tout le reste étant égal par ailleurs. D'autres scénarios de pluie future auraient pu être choisis, mais les deux précédents ont l'avantage d'être commodes à mettre en œuvre.

Pour chaque échéance, on évalue l'erreur du modèle (voir Figure 6). En deçà du temps de réaction du bassin, les erreurs du modèle avec les deux scénarios sont identiques, car elles ne sont pas conditionnées par les pluies futures. Au-delà, elles sont différentes. L'échéance correspondant à une différenciation des deux erreurs donne donc une estimation du temps de réaction du bassin.

Bien entendu, cette estimation du temps de réaction du bassin est moyennée sur l'ensemble des événements de la période. Certains événements auront des temps de réaction plus courts, d'autres plus longs.

Signalons enfin que cette estimation va dépendre partiellement :

- du modèle utilisé et des hypothèses de construction de ce modèle (par exemple mode global). Cependant, nous avons choisi d'utiliser ici le modèle qui sera mis en

œuvre dans le système de prévision, ce qui rend plus cohérente la démarche avec l'objectif final ;

- de l'information pluviométrique utilisée : dans le cas où les pluviomètres sont situés plutôt sur l'amont du bassin, le transfert simulé par le modèle devra être plus rapide que si les pluviomètres étaient situés plutôt à l'aval. La position des pluviomètres peut donc jouer un rôle sur le résultat obtenu (le problème serait le même avec une approche de type géométrique) ;
- la performance du modèle : des difficultés de modélisation peuvent conduire à des compensations de la part des paramètres qui vont avoir tendance à modifier les temps de réponse apparents. Par exemple, une durée plus grande de l'hydrogramme unitaire aura un effet de lissage supplémentaire des entrées du modèle, qui peut permettre au modèle de compenser des problèmes ayant d'autres origines.

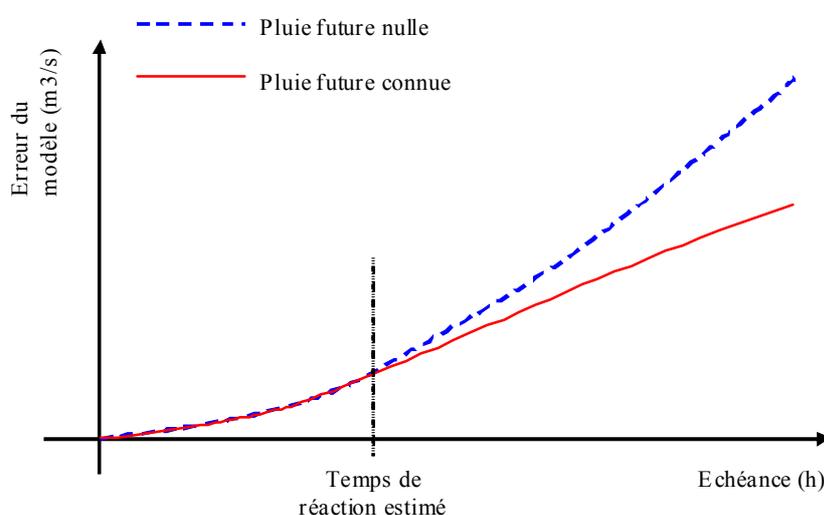


Figure 6 : Evolution des erreurs du modèle de prévision en fonction de l'échéance suivant deux scénarios de pluie future

Il faut donc globalement être prudent quant à l'interprétation de ces résultats. Rappelons aussi qu'il ne s'agit pas ici de déterminer des temps de propagation des crues d'amont en aval entre deux stations, mais bien des temps de réaction aux pluies (voir notamment Cemagref, 2004).

3.3. Modèle de prévision sélectionné

Pour réaliser la caractérisation hydrologique des bassins, nous utilisons le modèle GRP. Une description du modèle est donnée par Berthet (2010) et sera reprise dans la Phase 3 de la présente étude pour en détailler les nouvelles fonctionnalités. Nous reviendrons également au cours de la Phase 3 sur l'intérêt d'un tel modèle pour les objectifs de prévision annoncés.

Nous nous contentons à ce stade d'en donner les principales caractéristiques (voir schéma à la Figure 7). GRP est un modèle hydrologique 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. Autrement dit, il fait l'hypothèse que ces hétérogénéités ont 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) ;
- dépendant de **trois paramètres optimisables**. Ce faible niveau de complexité lui confère une bonne stabilité et une bonne robustesse.

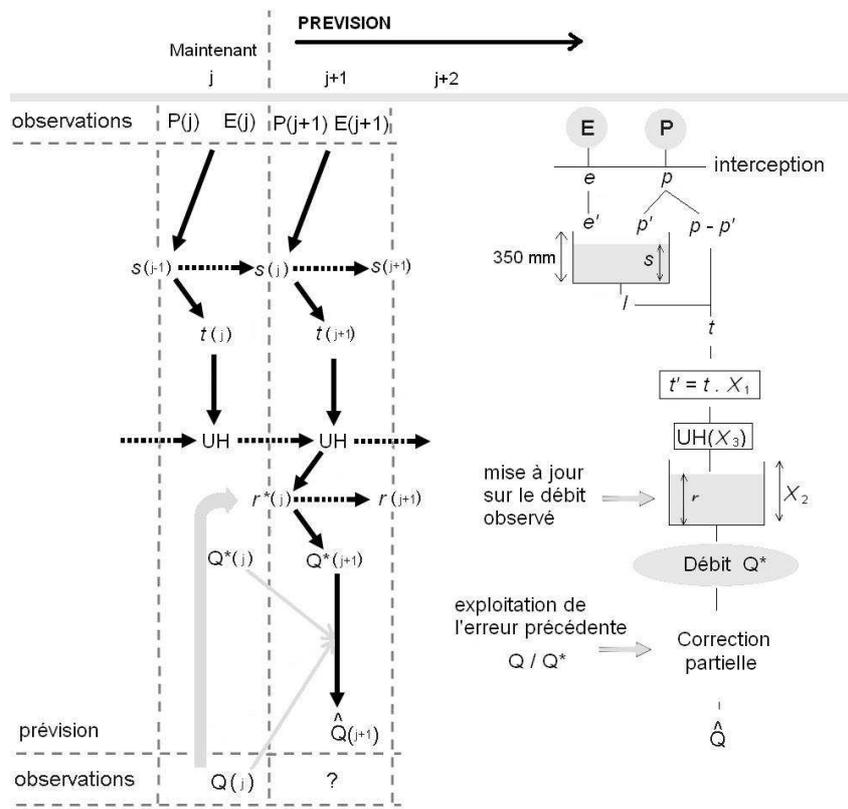


Figure 7 : Schéma structurel du modèle GRP avec représentation de la procédure d'exploitation des débits observés

Le décalage entre pluie et débit est essentiellement conditionné par l'hydrogramme unitaire du modèle. Cependant, son réservoir de routage réalise un lissage plus ou moins important de la pluie efficace, contribuant ainsi à simuler un effet tampon du bassin.

3.4. Résultats

Le modèle GRP a donc été appliqué à l'ensemble des 24 bassins de l'étude, en suivant la procédure décrite précédemment. Les performances ont été évaluées pour 10 échéances différentes : 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 et 72 h.

Tableau 4 : Temps de réaction des bassins aux pluies, estimés par modélisation

Bassin	Code	Cours d'eau - Nom Station	Surface (km ²)	Temps de réaction
Cher	K5090900	Le Cher à Chambonchard	517	3
	K5220900	Le Cher à Montluçon	1750	9
	K5220910	Le Cher à Saint-Victor	1840	9
	K5400920	Le Cher à Saint Amand Montrond	3492	18
	K5183020	La Tardes à Chambon sur Voueize	854	6
	K5143110	La Voueize à Gouzou	144	6
	K5383020	L'Aumance à Hérisson	920	6
	K5623010	L'Auron au Pondy	199	6
	K5552300	L'Yèvre à Savigny en Septaine	531	18
	K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	138	6
	K6192420	L'Arnon à Alnay	2170	24
	K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol	318	12
	K6332510	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	594	18
K6402500	La Grande Sauldre à Salbris	1200	24	
Indre	K7202610	L'Indre à Ardentes	697	12
	K7312610	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	1712	18
	K7433030	L'Indrois à Genillé	396	9
Loire	K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	51	3
	K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	375	6
	K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	139	3
	K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène	228	6
	K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	134	3
	K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	178	6
	K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	95	3
	K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	371	3
	K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	193	3
	K0983010	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	427	3
	K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	599	12
	K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	819	12
	K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	1800	9
	K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	2280	12
	K1773010	L'Aron à Vermeuil	1470	12

Les graphiques regroupés en Annexe 3 illustrent les résultats pour chacun des bassins. Le Tableau 4 récapitule les temps de réaction estimés en utilisant cette méthodologie. Ils sont compris entre 3 et 24 h. La moitié des bassins (16 sur 32) réagit très rapidement aux pluies avec un temps de réaction estimé inférieur ou égal à 6 h. Sur les sous-bassins du haut bassin de la Loire, tous les bassins réagissent en 12 h ou plus, indiquant la réactivité de cette partie du bassin. 6 bassins ont un temps de réaction compris entre 18 et 24 h.

Ces résultats indiquent également que :

- le pas de temps horaire choisi ici convient à la majorité des bassins. Cependant, 8 bassins majoritairement situés sur le haut bassin de la Loire ont un temps de réaction estimé de 3 h seulement. Sur ces bassins, un pas de temps infra-horaire permettrait de mieux suivre les dynamiques de montée de crue à court terme ;

- le temps de réaction le plus grand étant de 24 h, il n'est possible sur aucun des bassins d'atteindre un délai de prévision supérieur sans prendre en compte des prévisions de pluie. Dans tous les cas, la qualité de la prévision à cette échéance dépendra donc partiellement de la prévision de pluie, et ce d'autant plus que le temps de réaction du bassin est court, comme c'est le cas pour de nombreux bassins.

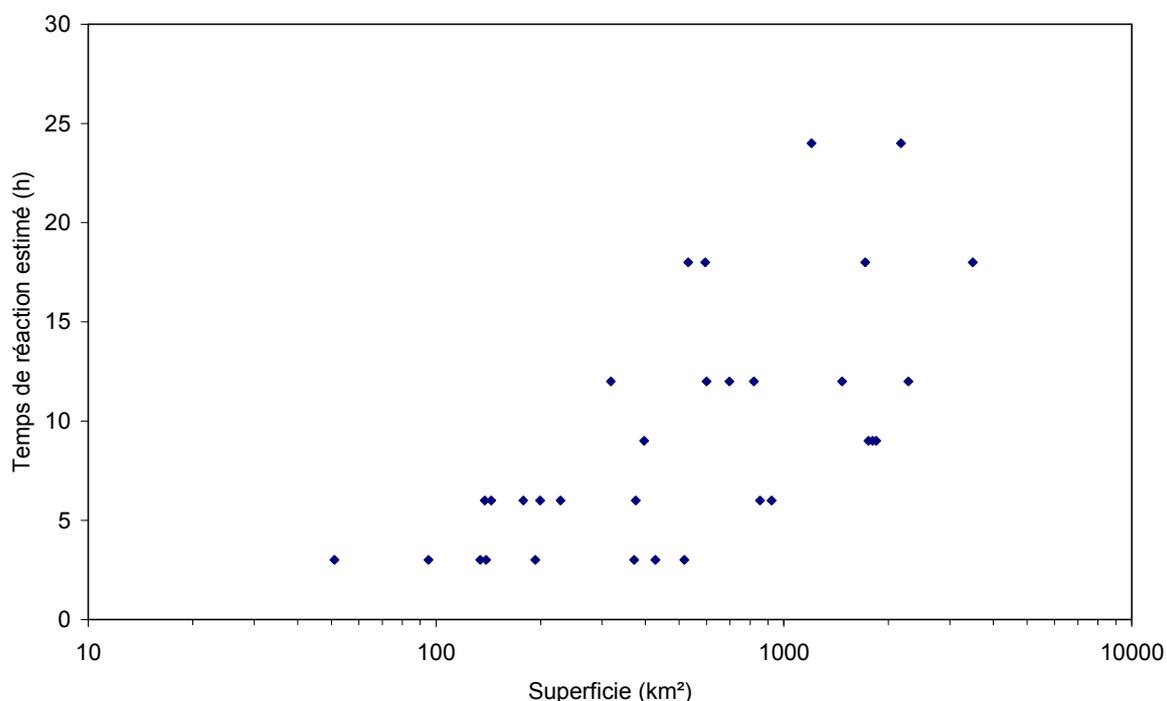


Figure 8 : Lien entre temps de réaction et superficie des bassins

La Figure 8 illustre le lien existant entre temps de réaction et superficie. Logiquement, on constate une tendance à l'augmentation avec la superficie, mais le lien entre temps de réaction et superficie est relativement faible. On trouve par exemple dans l'échantillon des bassins avec des superficies proches et des temps de réaction très différents. La pente et les conditions de sol et sous-sol contribuent à expliquer ces différences. Ainsi, le Cher à Chamobonchard (517 km²), situé en tête de bassin, a un temps de réaction estimé à 3 h, alors que la Grand Sauldre à Brinon (594 km²), bassin avec beaucoup moins de relief, a un temps de réaction estimé à 18 h.

Lorsqu'on regarde l'évolution des temps de réaction lorsque l'on va d'amont en aval d'un cours d'eau, le temps de réaction a tendance à augmenter. C'est le cas sur le Cher où l'on dispose de 4 stations, et sur l'Indre, la Grande Sauldre et l'Arroux sur lesquelles on dispose de 2 stations à chaque fois. Si, ici, cette augmentation est monotone d'amont en aval, ce n'est pas toujours le cas. En effet, il peut arriver qu'un affluent à écoulement rapide vienne modifier le temps de réaction global d'une rivière, qui sera en apparence plus faible en aval qu'en amont de la confluence.

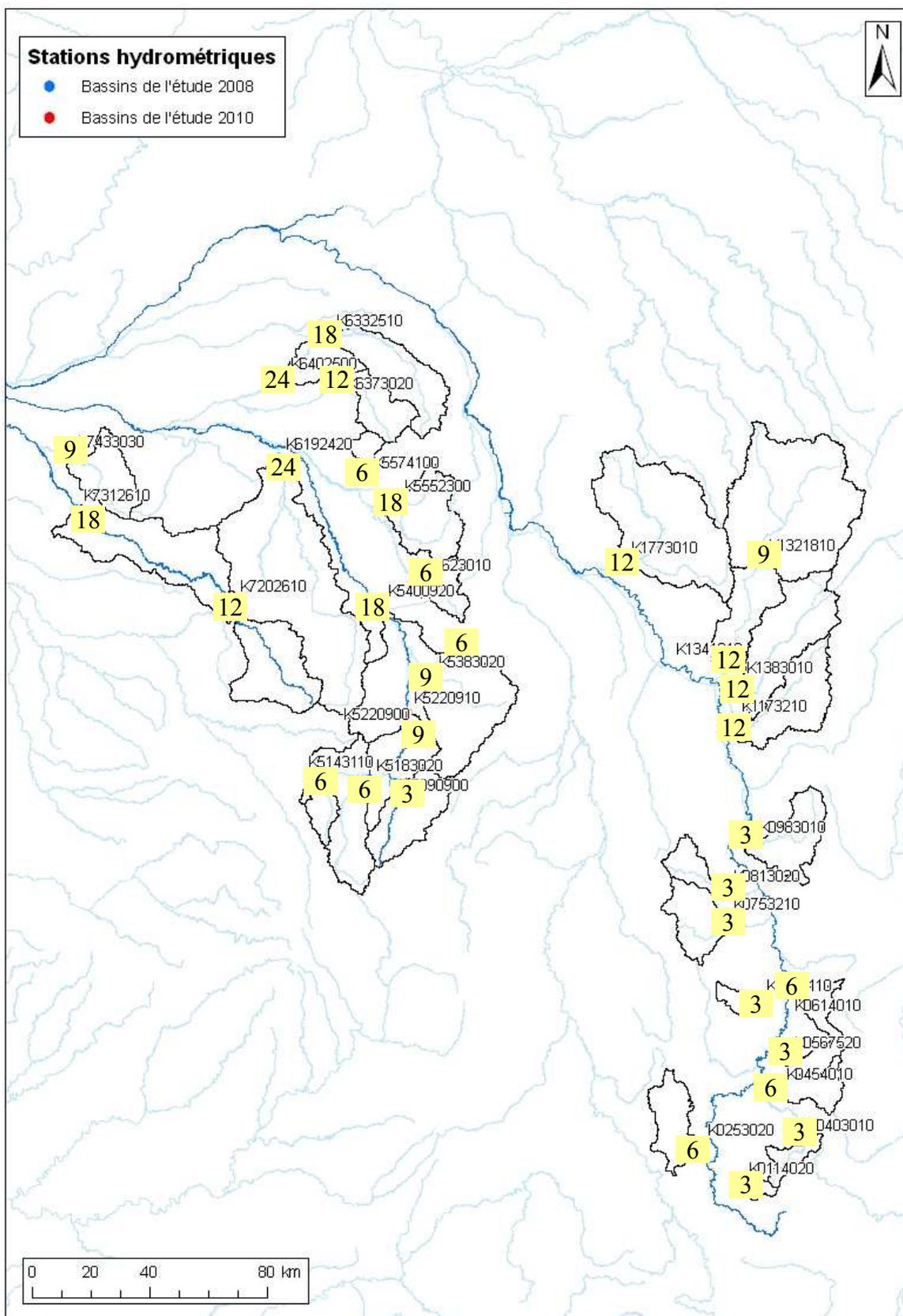


Figure 9 : Temps de réaction aux pluies (en heures) sur les stations étudiées

3.5. Synthèse des résultats de la Phase 2

Cette phase du travail a permis d'estimer les temps de réaction des bassins aux pluies. Globalement, ces temps sont compris entre 3 et 24 h.

Pour des échéances de prévision en deçà de ces temps, la pluie future ne joue aucun rôle sur la prévision de débit. Cependant, au-delà, elle conditionne partiellement cette prévision. L'obtention de prévisions au-delà de 24 h sera donc dans tous les cas conditionnée par les prévisions de pluie, et ce d'autant plus que le temps de réaction estimé est court.

4. Résultats de la Phase 3 : Calage et évaluation du modèle

4.1. Objectifs

Cette phase du travail constitue une étape majeure dans la réalisation de l'étude. Elle consiste en effet en une évaluation détaillée des capacités prédictives des modèles, ainsi qu'en une analyse de leur sensibilité aux pluies. Elle doit également fournir les jeux de paramètres calés pour une application opérationnelle. Enfin, elle permet de voir comment les nouveaux modèles proposés se situent par rapport à d'autres modèles de prévision.

L'évaluation des modèles permet de quantifier les niveaux d'erreur que l'on peut attendre en conditions opérationnelles avec les modèles proposés. Pour réaliser cette phase de test, nous nous sommes donc placés dans des conditions aussi proches que possible de celles d'une utilisation opérationnelle du modèle, même si nous verrons qu'il est délicat de prendre en compte dans une telle évaluation tous les paramètres pouvant influencer sur la qualité des prévisions en temps réel.

La structure choisie est celle du modèle GRP (voir phase 2) qui présente l'avantage d'être à la fois simple d'utilisation et peu gourmand en données, ce qui rend ce modèle bien adapté à la pratique opérationnelle.

Nous avons utilisé la base de données hydro-pluviométrique établie lors de la phase 1. Cette base offre une bonne diversité de conditions climatiques et hydrologiques. Elle a été établie en se calquant au maximum sur la disponibilité des données en temps réel.

Nous détaillons dans ce qui suit la méthodologie qui a été adoptée pour cette phase du travail.

4.2. Méthode d'évaluation du modèle

La procédure d'évaluation proposée a pour objectif de quantifier le niveau de fiabilité que l'on peut attendre du modèle GRP. Elle fournit un certain nombre d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs sur le fonctionnement du modèle sur des données antérieures disponibles. Elle repose sur les éléments suivants.

4.2.1. Procédure de calage / contrôle

Le modèle de prévision est utilisé en temps réel, par définition, sur des événements non encore rencontrés. Il faut donc mettre le modèle de prévision dans une situation d'évaluation similaire, en testant son comportement sur des événements non rencontrés pendant la phase de calage. Pour cela, une procédure de calages / contrôles croisés sur sous-périodes indépendantes est adoptée (Klemeš, 1986). Cette procédure, illustrée à la Figure 10 consiste à caler alternativement le modèle sur l'une des sous-périodes et à le contrôler sur l'autre, et vice-versa. Ainsi, le modèle peut être évalué en contrôle sur l'intégralité des données disponibles. **C'est en phase de contrôle que les performances des modèles sont analysées**, puisque c'est dans cette phase (en dehors du calage) que fonctionnent les modèles en opérationnel. Les performances en calage donnent en effet une vision trop optimiste des capacités des modèles.

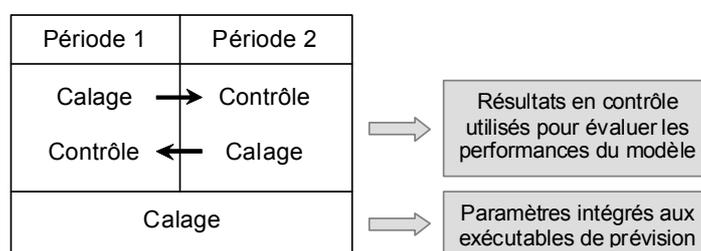


Figure 10 : Illustration de la procédure de calage-contrôle adoptée (d'après Cemagref, 2005)

Cette procédure de test permet de :

- quantifier l'efficacité du modèle (niveau de performance que l'on peut en attendre) ;
- quantifier la robustesse du modèle, c'est-à-dire sa capacité à conserver en phase de contrôle un niveau d'erreur similaire à celui rencontré lors du calage.

4.2.2. Détermination des périodes

La détermination de la période de calage et des périodes de tests du modèle est faite automatiquement en fonction des données disponibles dans les fichiers établis en Phase 1.

Le programme cherche des périodes aussi longues que possibles ne comportant aucune lacune de pluie ou d'ETP. Une fois les périodes répondant à ce critère identifiées, le programme cherche deux périodes non lacunaires. Parmi les périodes identifiées, il a le choix entre l'utilisation deux périodes non concomitantes (séparées par des lacunes) et le fait de scinder une période continue en deux sous périodes. Il choisit alors la solution optimale permettant d'obtenir deux périodes aussi longues que possibles (notées P1 et P2). Une fois ces deux périodes déterminées, elles sont utilisées alternativement comme plage de calage (en réservant la première année pour la mise en route) et plage de test de telle sorte que les tests du modèle soient toujours effectués sur la période n'ayant pas servie au calage.

Pour le calage final des paramètres, la plus longue période identifiée est utilisée pour bénéficier du maximum d'information disponible.

On notera que les débits peuvent être lacunaires durant la (les) année(s) de mise en route mais qu'un nombre minimum de pas de temps non lacunaires est requis sur la plage restante utilisée pour le calage (cf. Figure 11).

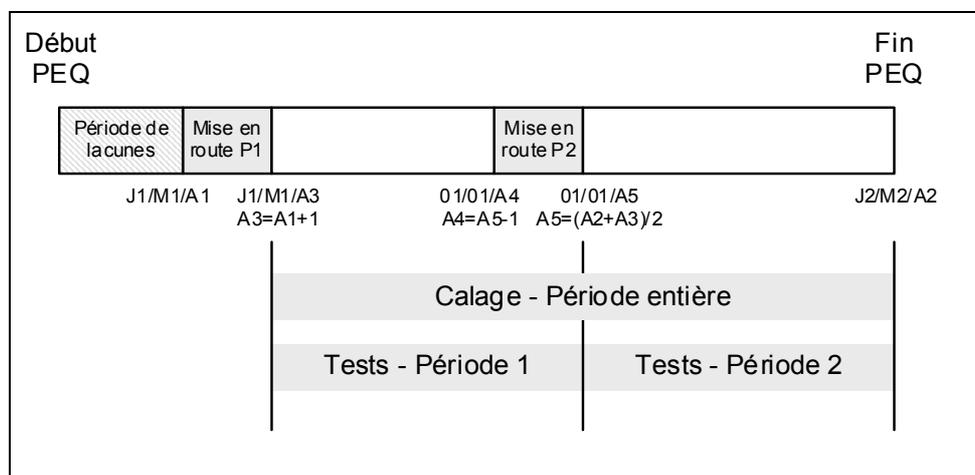


Figure 11 : Détermination des périodes de calage et tests dans un cas simple

4.2.3. Algorithme de calage

Le calage des paramètres a été réalisé à l'aide d'une procédure automatique, dite méthode « pas-à-pas », développée et largement testée au Cemagref. Cette procédure est une procédure locale de recherche d'un optimum dans l'espace des paramètres. Elle a prouvé son efficacité dans les travaux de recherche menés au Cemagref et est bien adaptée pour les modèles ayant un faible nombre de paramètres, comme c'est le cas ici. Des informations complémentaires sur cette procédure sont disponibles dans les travaux de Mathevet (2005).

La fonction objectif utilisée ici est l'erreur quadratique moyenne calculée sur les débits. Cette erreur donne par construction davantage de poids aux forts débits de la chronique (qui sont ceux sur lesquels on fait généralement les plus fortes erreurs en valeur absolue).

4.2.4. Scénarios de pluie future considérés lors des tests

Le test de modèles de prévision requiert l'utilisation de scénarios de pluie future. En effet, les prévisions quantitatives de pluie influencent notablement les prévisions hydrologiques, dès lors qu'on se situe au-delà du temps de réaction du bassin. Dans un contexte de vigilance crue, des horizons de 24 à 72 h sont ciblés et rendent donc indispensable l'utilisation d'un scénario de pluie future. En conditions opérationnelles, les services de prévisions des crues disposent de prévisions quantitatives de pluie de Météo-France. Pour évaluer les performances du modèle, il serait donc logique d'utiliser des historiques de prévisions quantitatives de précipitations sur les bassins, ce qui permettrait de se mettre dans des conditions d'évaluations les plus proches possible des conditions opérationnelles. Cependant, de tels historiques sont rarement disponibles.

Par conséquent, deux scénarios simples de pluies futures, pouvant facilement être mis en place sans élaboration d'hypothèses très spécifiques sur les pluies, ont été utilisés pour tester le modèle :

- un scénario de **pluie future nulle**, qui représente un scénario défavorable, en particulier pour les horizons de prévisions supérieurs au temps de réaction du bassin. Un tel scénario est cependant utilisé par défaut en conditions opérationnelles en absence de prévision de pluie ;
- un scénario de **pluie future parfaitement connue**, qui représente des conditions de test idéalisées. Un tel scénario est irréaliste en conditions opérationnelles, mais permet d'avoir une évaluation des performances du modèle, sans y introduire les erreurs liées à la méconnaissance des pluies futures.

Les deux scénarios doivent conduire à des performances quasiment identiques en deçà du temps de réaction du bassin, les performances avec scénario de pluie future nulle se dégradant ensuite plus rapidement que celles avec scénario de pluie parfaitement connue.

Dans ces tests, on ne tient donc pas compte de la part de l'erreur qui pourrait être apportée par une mauvaise estimation des pluies futures. Tout ce que l'on peut dire à ce stade, c'est que les performances obtenues avec le second scénario sont ce que l'on obtiendra *au mieux* avec le modèle choisi et l'information pluviométrique disponible. Les performances obtenues avec les conditions de pluie future nulle ne sont pas forcément ce que l'on obtiendra au pire en conditions opérationnelles au-delà du temps de réaction du bassin, de mauvaises prévisions de pluie pouvant conduire à des erreurs plus importantes.

4.2.5. Horizons de calage et délais de prévision

Le calage du modèle a été réalisé pour un horizon fixe. Le choix des horizons de calage dépend :

- **du temps de réaction estimé du bassin.** Au delà de ce temps de réaction, les scénarios de pluies futures deviennent nécessaires au calcul d'une prévision réaliste. On pourra donc utiliser ce temps de réaction comme un horizon de calage intéressant.
- **de l'horizon souhaité par le SPC** pour ses objectifs de prévision et/ou vigilance. Ces échéances sont généralement de l'ordre de 24 h à 72 h si possible. On pourra donc utiliser ces échéances comme horizon de calage.

Comme on l'imagine facilement, ces deux aspects sont souvent antagonistes sur les bassins de petite et moyenne taille. On privilégiera l'horizon de calage le plus étendu parmi les deux horizons cités précédemment.

En conséquence, les horizons de calage présentés dans le Tableau 5 ont été retenus, la règle suivante ayant été utilisée :

- Horizon calage = 12 h si Temps réaction bassin \leq 12
- Horizon calage = Tr si Temps réaction bassin $>$ 12

Quelque soit horizon de calage choisi, des prévisions sont générées à différentes échéances. Ainsi, les performances sont évaluées pour 10 horizons de prévision différents : 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 et 72 h.

Tableau 5 : Horizons de calage retenus

Bassin	Code	Cours d'eau - Nom Station	Surface (km ²)	Temps de réaction	Horizon de calage
Cher	K5090900	Le Cher à Chambonchard	517	3	12
	K5220900	Le Cher à Montluçon	1750	9	12
	K5220910	Le Cher à Saint-Victor	1840	9	12
	K5400920	Le Cher à Saint Amand Montrond	3492	18	18
	K5183020	La Tardes à Chambon sur Voueize	854	6	12
	K5143110	La Voueize à Gouzou	144	6	12
	K5383020	L'Aumance à Hérisson	920	6	12
	K5623010	L'Auron au Pondy	199	6	12
	K5552300	L'Yèvre à Savigny en Septaine	531	18	18
	K5574100	Le Moulon à Bourges [Asnières]	138	6	12
	K6192420	L'Arnon à Alnay	2170	24	24
	K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol	318	12	12
	K6332510	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	594	18	18
	K6402500	La Grande Sauldre à Salbris	1200	24	24
Indre	K7202610	L'Indre à Ardentes	697	12	12
	K7312610	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	1712	18	18
	K7433030	L'Indrois à Genillé	396	9	12
Loire	K0114020	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	51	3	12
	K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	375	6	12
	K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	139	3	12
	K0454010	La Dunières à Sainte-Sigolène	228	6	12
	K0567520	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	134	3	12
	K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	178	6	12
	K0643110	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	95	3	12
	K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	371	3	12
	K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	193	3	12
	K0983010	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	427	3	12
	K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	599	12	12
	K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	819	12	12
	K1321810	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	1800	9	12
	K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	2280	12	12
K1773010	L'Aron à Verneuil	1470	12	12	

4.2.6. Critères numériques d'évaluation

L'utilisation de critères a pour objectif de quantifier l'*utilité* de la prévision (information supplémentaire apportée par le modèle au prévisionniste par rapport aux outils/connaissances existants pour sa prise de décision).

Plutôt que d'utiliser un seul critère, nous avons préféré utiliser plusieurs critères qui soient aussi parlants que possible pour le prévisionniste. Notons que seuls les critères en phase de contrôle sont calculés, car ils sont les plus représentatifs des performances du modèle en conditions opérationnelles.

- **Erreur quadratique moyenne**

Le principal critère numérique utilisé est l'**erreur quadratique moyenne** (exprimée en m³/s), définie par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i+L) - Q_{prev}(i+L))^2}$$

où $Q_{obs}(i+L)$ et $Q_{prev}(i+L)$ sont les débits observés et prévus aux temps $i+L$, L est le délai de prévision et n le nombre de pas de temps pris en compte. On a restreint ce calcul à des débits

au-dessus d'un seuil de crue. Ce seuil a été défini comme le quantile 0.95 de la courbe des débits horaires classés. Ce seuil correspond donc au débit sus-passé en moyenne pendant 438 heures chaque année.

Cette erreur renseigne sur l'erreur faite en moyenne sur les forts débits.

L'évolution de ce critère en fonction du délai de prévision permet de constater la vitesse de dégradation des prévisions du modèle lorsque l'horizon s'allonge. En conditions réelles, viendrait s'ajouter à l'erreur du modèle celle due à la méconnaissance des pluies futures, et ce d'autant plus que l'horizon de prévision est lointain.

Sont également calculés les quantiles de la **distribution des erreurs du modèle** (représentés sous forme de diagrammes à moustaches), ce qui permet notamment d'avoir un **intervalle de confiance à 80 % (intervalle entre les moustaches) sur les erreurs** du modèle. Par rapport à la RMSE, cette analyse des distributions permet de voir si le modèle a plutôt tendance à sous-estimer ou surestimer les débits. Ces intervalles de confiance sont représentés graphiquement en fonction du délai de prévision.

- **Critère de persistance**

Le modèle GRP a été évalué relativement à un modèle de référence simple qu'est le modèle de persistance. Ce modèle considère que le débit reste inchangé à partir de l'instant de prévision : ($Q_{prev}(i+L) = Q_{obs}(i)$).

Cette comparaison se fait sur les erreurs quadratiques moyennes en utilisant un critère adimensionnel d'efficacité défini par :

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i+L) - Q_{prev}(i+L))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i+L) - Q_{obs}(i))^2}$$

Un critère de 1 indique que le modèle testé est parfait, un critère de 0 indique que le modèle testé est équivalent au modèle de persistance, un critère négatif indique que le modèle testé fournit des prévisions moins bonnes que celles du modèle de référence. On a donc ainsi une comparaison quantitative directe des deux modèles.

Notons que l'interprétation de ce critère n'est pas toujours simple, car il faut bien se rappeler qu'on compare deux modèles. Ainsi, un critère d'efficacité négatif ne veut pas forcément dire que le modèle testé est mauvais si le modèle de persistance présente déjà une erreur très faible (par exemple pour des horizons courts sur un bassin très lent), cela veut seulement dire qu'il est moins bon que la référence.

- **Critères de franchissement de seuil**

Ces critères permettent d'évaluer la capacité du modèle à prévoir les dépassements de seuils prédéfinis (par exemple seuils de vigilance). Afin de les comptabiliser, on définit quatre configurations illustrées à la Figure 12. En classant les prévisions réalisées dans chacune des quatre configurations, on obtient ainsi le tableau de contingence présenté au Tableau 6.

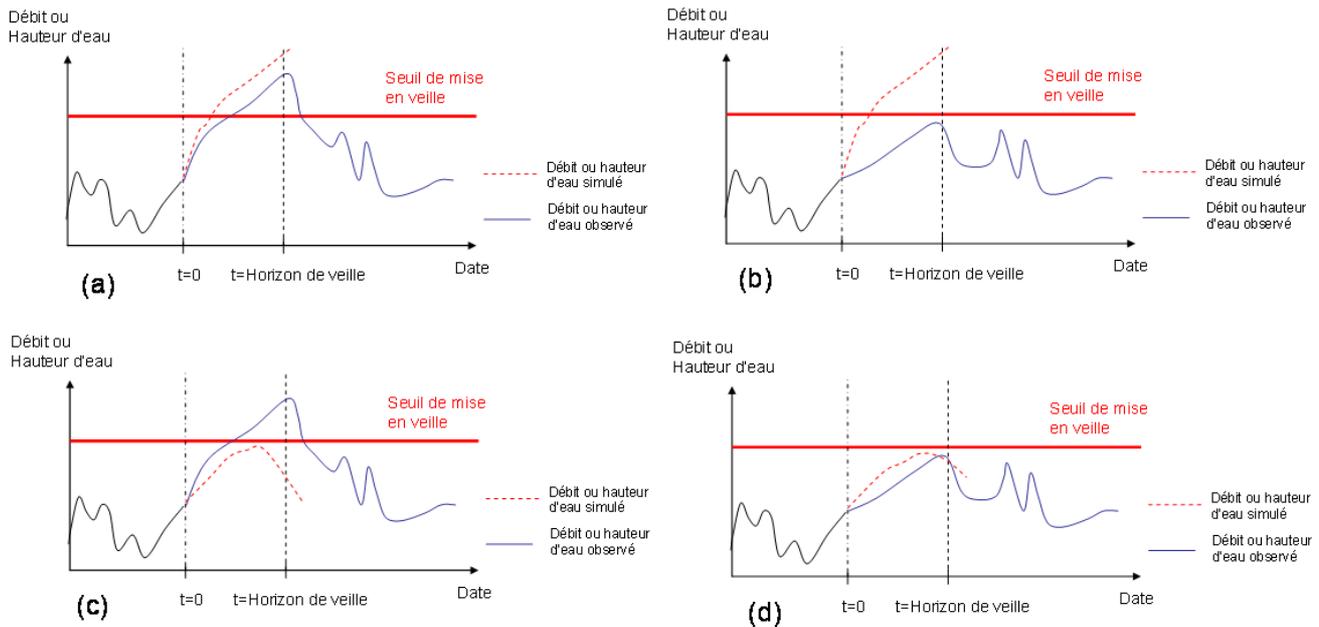


Figure 12 : Représentation des différentes situations rencontrées avec la méthode de veille : (a) Alerte valable, (b) Fausse alerte, (c) Alerte manquée, (d) Non alerte valable

Tableau 6 : Tableau de contingence de dépassement de seuil

		Observation	
		Dépassement	Non dépassement
Prévision	Dépassement	Alerte valable ^(a)	Fausse alerte ^(b)
	Non dépassement	Alerte manqué ^(c)	Non alerte valable ^(d)

Pour faciliter l'interprétation des valeurs contenues dans le tableau de contingence, trois scores d'efficacité qui en découlent sont calculés :

- la probabilité de détection (POD)

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

La probabilité de détection, bien qu'elle ignore complètement la possibilité de fausses alertes, représente la probabilité qu'une alerte ait été prévue lorsqu'elle a effectivement lieu.

- le taux de fausses alertes (FAR)

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

Ce score est en quelque sorte l'inverse du premier en ce sens qu'il témoigne cette fois de la probabilité d'annoncer une alerte alors qu'elle n'aura pas lieu.

- l'indice de succès critique (CSI).

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}$$

Ce score est intéressant puisqu'il résume en quelque sorte l'information en représentant les succès par rapport à ce qui a été prévu, mais aussi ce qui aurait dû l'être.

4.2.7. Critères graphiques d'évaluation

Les illustrations graphiques suivantes sont proposées pour aider à l'évaluation des prévisions :

1. **la comparaison des débits prévus et observés** à l'horizon utilisé pour le calage,
2. **la comparaison des variations de débit observées et prévues** à ce même horizon. Ce graphique permet de mettre en évidence la capacité à bien prévoir les variations observées (voir exemple en Figure 13). On cherche notamment à éviter les cas où le modèle prévoit une variation de débit opposée à celle réellement observée a posteriori, car ces situations sont souvent désastreuses pour le prévisionniste.

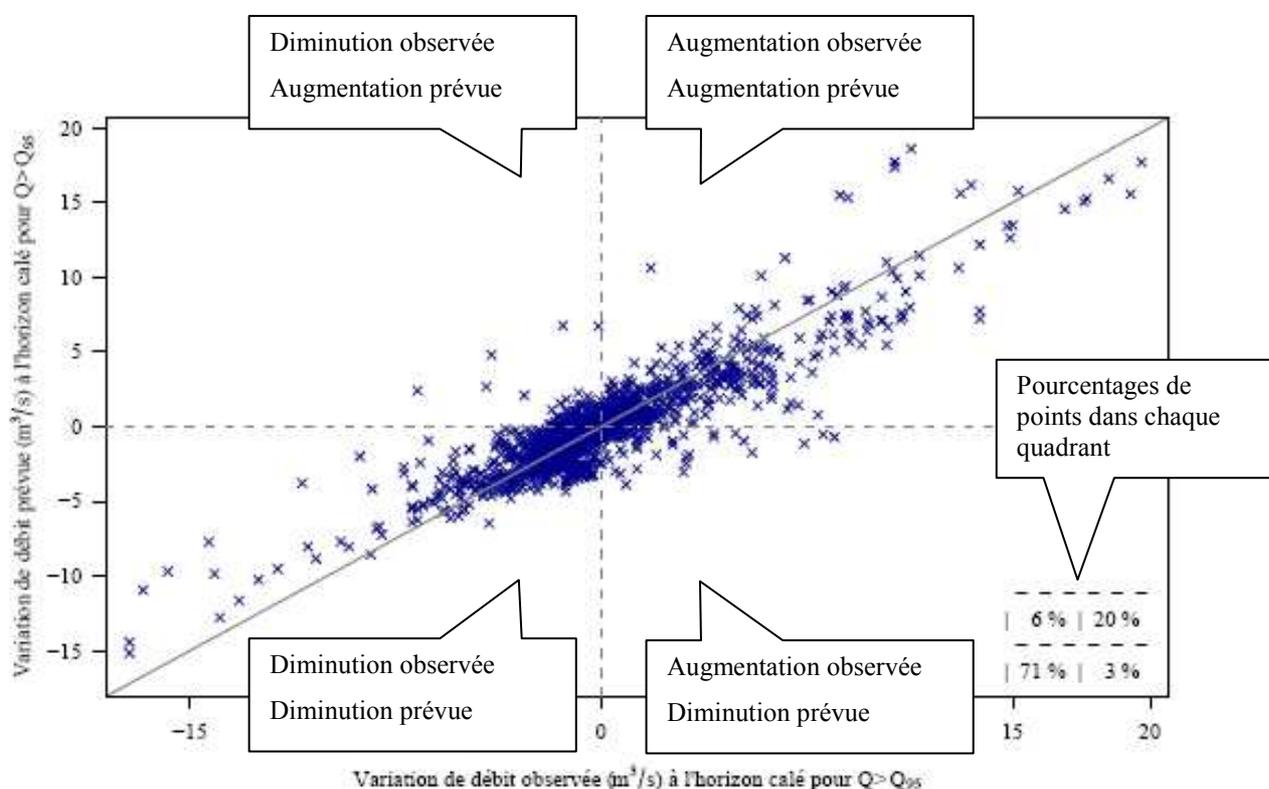


Figure 13 : Exemple de graphique comparant les variations de débit prévues et observées

Dans ces deux graphiques, on cherche à obtenir des nuages de points proches de la bissectrice. Le deuxième graphique est généralement plus exigeant que le premier, et permet notamment de plus facilement détecter des problèmes lors de la montée de crue (moitié droite du graphique), qui est souvent la phase la plus délicate à prévoir. Pour avoir une évaluation quantitative correspondant à ce graphique, nous avons calculé pour les quatre quadrants qui le composent (augmentation prévue et observée, augmentation prévue et diminution observée, diminution prévue et augmentation observée, diminutions prévue et observée) le pourcentage de prévisions concernées.

On a également calculé la proportion des cas où une augmentation a été prévue quand une augmentation est effectivement observée (quadrant en haut à droite du graphique) par rapport au nombre total d'augmentations observées. Une valeur élevée de ce ratio indique une bonne capacité du modèle à prévoir les phases de montée.

4.2.8. Représentation graphique des résultats

Les résultats des tests précédemment mentionnés sont organisés sous la forme d'une fiche synthétique pour chaque bassin étudié. Un exemple de fiche de performances ainsi obtenue est donné à la Figure 14. On y trouve :

- un tableau récapitulant brièvement les caractéristiques du bassin étudié et les critères numériques d'efficacité;
- un graphique montrant l'évolution de la RMSE en fonction du délai de prévision pour le modèle de persistance et le modèle GRP testé avec différents scénarios de pluies futures ;
- un second graphique représentant les distributions des erreurs de GRP en fonction de l'horizon de prévision pour des scénarios de pluies futures parfaitement connues et nulles;
- le tableau de contingence issu de l'analyse des dépassements de seuil;
- deux graphiques comparant les débits prévus et observés d'une part, et les variations prévues et observées d'autre part, pour le modèle GRP.

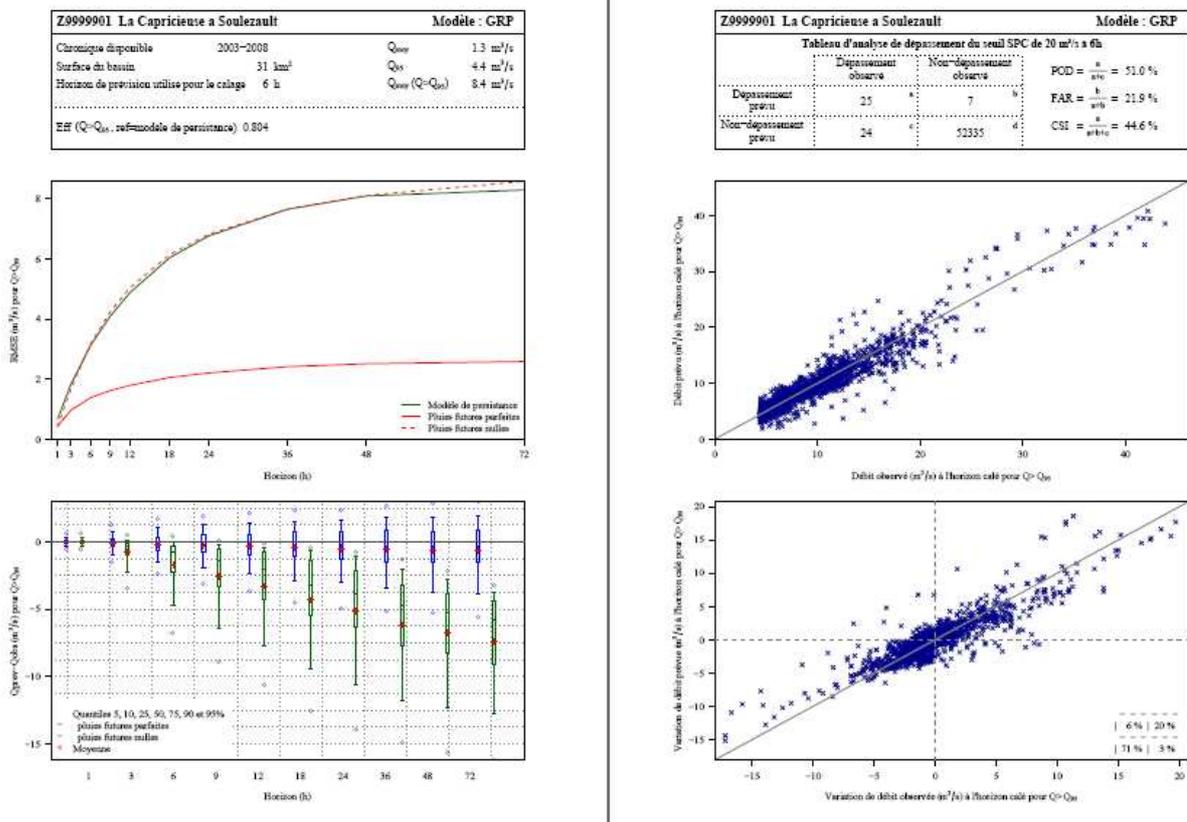


Figure 14 : Exemple de fiche synthétique de résultats

Ces fiches synthétiques de résultats ont été complétées par une illustration des hydrogrammes de prévision sur chacun des 24 événements sélectionnés lors de la phase 1 de l'étude. Un exemple d'hydrogramme de prévision est donné à la Figure 15.

Ont été tracés sur ces graphes :

- les débits observés,
- la courbe liant les débits prévus à l'horizon de prévision correspondant au temps de réaction du bassin,
- les traces de prévisions successives réalisées au cours de l'événement (faisant apparaître les prévisions sur des périodes de 72 h). Pour des raisons de lisibilité, nous avons limité le nombre de traces de prévision à une par jour,
- les seuils de débits fournis par le SPC (actuellement disponibles pour seulement 7 stations sur les 32 étudiées ; pour les autres, nous avons choisi arbitrairement de prendre le quantile 0.99 des débits horaires observés),
- les précipitations observées.

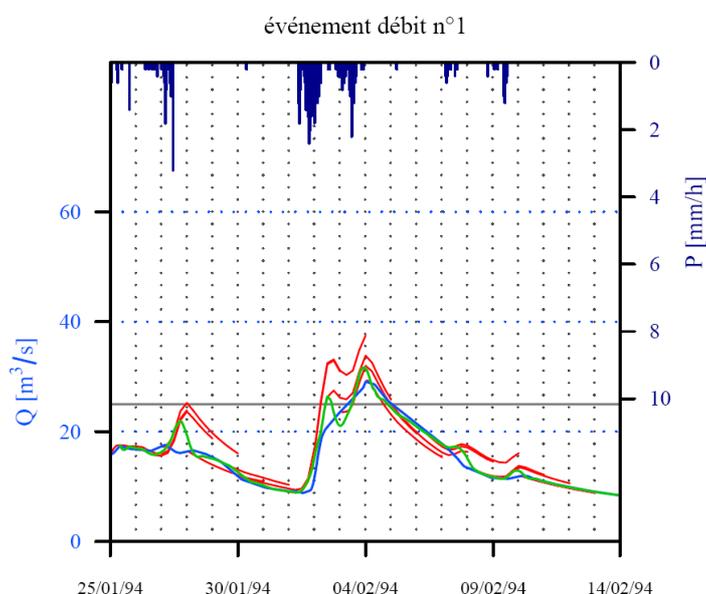


Figure 15 : Exemple d'hydrogramme de prévision

4.3. Présentation et analyse des résultats

4.3.1. Détail des résultats fournis

Les représentations graphiques des résultats des tests ont été favorisées afin de présenter, de la façon la plus claire possible, les différents critères utilisés pour évaluer les performances du modèle.

Les fiches synthétiques des résultats établies pour les 32 bassins de l'étude sont disponibles en Annexe 3. Nous avons par ailleurs représenté en Annexe 4 les prévisions faites sur les 24 événements sélectionnés pour chaque bassin lors de la phase 1.

Tableau 7 : Synthèse des résultats obtenus par le modèle GRP sur les 32 stations étudiées

Bassin	Nom Abrégé	Code	Surface (km²)	Source Données Pluie	Nb Postes	Horizon de calage	Qmoy (m3/s)	Q95 (m3/s)	Pour Q > Q95					Qualification des performances
									Qmoy (m3/s)	RMSE(PP)	RMSE(PP)/Qmoy	Eff (pers)	ΔQprev>0 lorsque ΔQobs>0	
Cher	Le Cher à Chambonchard	K5090900	517	Postes	1	12	5,4	17,5	31,5	5,5	0,17	0,60	67%	Moyennes
	Le Cher à Montluçon	K5220900	1750	Postes	11	12	15,2	50,9	78,4	16,6	0,21	0,58	48%	Moyennes
	Le Cher à Saint-Victor	K5220910	1840	Safran	11	12	17,7	57,3	92,2	9,0	0,10	0,46	54%	Moyennes (-)
	Le Cher à Saint Amand Montrond	K5400920	3492	Postes	18	12	24,1	82,4	145,5	20,4	0,14	0,69	79%	Bonnes
	La Tardes à Chambon sur Voueize	K5183020	854	Postes	6	12	8,0	27,7	43,3	6,1	0,14	0,81	73%	Bonnes
	La Voueize à Gouzou	K5143110	144	Safran	2	12	1,3	4,4	7,6	1,3	0,17	0,44	61%	Faibles
	L'Aumance à Hérisson	K5383020	920	Postes	5	12	5,5	21,0	40,9	10,2	0,25	0,81	81%	Bonnes
	L'Auron au Pondy	K5623010	199	Postes	2	12	1,0	3,9	7,5	1,9	0,25	0,66	73%	Moyennes (+)
	L'Yèvre à Savigny en Septaine	K5552300	531	Postes	4	12	3,2	11,8	18,8	1,1	0,06	0,45	70%	Moyennes (-)
	Le Moulon à Bourges [Asnières]	K5574100	138	Safran	3	12	1,1	4,2	6,8	1,3	0,18	0,55	62%	Moyennes
	L'Arnon à Alnay	K6192420	2170	Postes	9	12	13,1	37,5	63,5	4,4	0,07	0,40	79%	Moyennes (-)
	La Petite Sauldre à Ménétréol	K6373020	318	Postes	2	12	3,1	10,5	17,5	2,2	0,13	0,68	76%	Moyennes (+)
	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	K6332510	594	Postes	4	12	4,8	15,9	26,3	5,9	0,22	0,48	70%	Moyennes
La Grande Sauldre à Salbris	K6402500	1200	Postes	7	12	9,7	32,0	49,4	5,6	0,11	0,59	79%	Moyennes	
Indre	L'Indre à Ardentes	K7202610	697	Postes	6	12	5,3	18,3	33,4	6,5	0,19	0,70	82%	Bonnes
	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	K7312610	1712	Postes	9	12	13,0	38,3	60,0	11,6	0,19	0,15	38%	Faibles
	L'Indrois à Genillé	K7433030	396	Postes	5	12	2,3	9,7	19,9	4,7	0,23	0,82	86%	Bonnes
Loire	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	K0114020	51	Safran	2	12	1,3	3,8	7,0	2,8	0,40	0,53	43%	Faibles
	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Ma	K0253020	375	Safran	4	12	2,7	8,0	13,4	3,2	0,24	0,51	59%	Moyennes
	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lig	K0403010	139	Safran	3	12	3,0	9,4	18,5	8,1	0,44	0,49	43%	Moyennes (-)
	La Dunières à Sainte-Sigolène	K0454010	228	Safran	2	12	3,0	8,1	13,6	4,0	0,29	0,36	39%	Faibles
	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	K0567520	134	Safran	3	12	1,9	5,2	9,2	2,2	0,23	0,43	33%	Faibles
	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	K0614010	178	Safran	3	12	2,3	5,8	12,2	7,2	0,59	0,39	57%	Faibles
	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	K0643110	95	Safran	3	12	0,8	2,5	4,2	1,3	0,30	0,53	53%	Moyennes (-)
	Le Lignon du Forez à Boën	K0753210	371	Safran	4	12	5,5	15,5	25,1	6,0	0,24	0,48	63%	Moyennes (-)
	L'Aix à Saint-Germain-Laval	K0813020	193	Safran	3	12	2,6	8,7	15,1	4,2	0,27	0,49	55%	Moyennes (-)
	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	K0983010	427	Safran	3	12	4,6	16,7	27,9	3,5	0,13	0,51	60%	Moyennes
	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	K1173210	599	Safran	3	12	5,3	19,9	34,1	6,2	0,18	0,51	65%	Moyennes
	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	K1383010	819	Safran	3	12	7,2	30,5	49,4	5,1	0,10	0,56	72%	Moyennes
	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	K1321810	1800	Safran	4	12	21,2	75,8	121,7	16,5	0,14	0,53	74%	Moyennes
L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	K1341810	2280	Safran	5	12	25,0	91,2	141,0	12,5	0,09	0,59	85%	Moyennes (+)	
L'Aron à Verneuil	K1773010	1470	Safran	5	12	16,7	68,2	113,6	13,7	0,12	0,59	81%	Moyennes (+)	

Enfin, le Tableau 7 synthétise les principaux résultats obtenus. Pour chaque bassin, il présente les informations générales et les performances du modèle. Il regroupe ainsi les données numériques présentées dans chacune des fiches synthétiques. Ce tableau présente pour chaque station :

- la RMSE de GRP à l'horizon cible (utilisé pour le calage) pour des scénarios de pluies futures parfaitement connues (RMSE PP). Afin de comparer plus facilement les erreurs du modèle entre les différents bassins, seulement le rapport entre la RMSE PP et le débit moyen en période de hautes eaux est présenté.
- le critère d'efficacité basé sur le modèle de persistance
- les pourcentages des cas où, lors d'une montée de crue, le modèle prévoit également une augmentation du débit.

Ces critères ont été calculés sur les périodes de hautes eaux seulement (pour un débit supérieur au quantile 95%).

Rappelons qu'il n'existe pas de critère unique d'évaluation des performances des modèles de prévision et que plusieurs aspects peuvent être intéressants à analyser. Il est donc difficile de qualifier les performances du modèle de manière absolue, celle-ci dépendant de nombreux facteurs et des attentes du SPC. Nous nous sommes tout de mêmes risqués à une telle analyse, en qualifiant la qualité globale des prévisions sur chaque bassin dans la dernière colonne du Tableau 7.

A partir des éléments mentionnés précédemment, nous donnons dans la partie suivante une analyse des résultats du modèle. Nos critères d'évaluation ne correspondant pas forcément exactement à ceux du SPC, il faudra que celui-ci s'approprie ces résultats et en fasse sa propre analyse relativement à ses objectifs spécifiques sur chaque bassin.

4.3.2. Analyse des résultats

Nous donnons dans le Tableau 8 une brève analyse qualitative de ces résultats station par station. Globalement, on peut retenir les points suivants :

- Quels que soient le bassin et l'horizon de prévision considérés, le modèle GRP est nettement meilleur que le modèle de persistance en condition de pluie parfaitement connue. En conditions de pluie future nulle, l'erreur sur l'estimation de la pluie future dégrade largement les performances du modèle lorsque l'on regarde au-delà du temps de réaction du bassin. Pour bon nombre de stations, le modèle donne alors une information limitée (voire quelque fois dégradée) par rapport au modèle de persistance. Ces résultats indiquent le poids qu'aura la prévision de pluie dans la qualité des prévisions de débit dès lors que l'on se situe au-delà du temps de réaction du bassin aux pluies.
- Le modèle a globalement davantage tendance à sous-estimer les pointes qu'à les surestimer, et davantage tendance à être en retard en montée qu'en avance. Ces deux défauts, bien que non systématiques, sont problématiques pour la prévision. Ils pourraient peut-être être partiellement corrigés en changeant la fonction objectif utilisée lors du modèle. Des travaux de recherche complémentaires seraient nécessaires.
- Le modèle réussit globalement à être réactif en cas d'événement de crue observé et non réactif en cas de pluie forte n'ayant pas entraîné de réaction observée du bassin.

cette qualité est plutôt rassurante quant à la robustesse du modèle et montre l'intérêt d'une modélisation continue dont le calcul en continu des états initiaux permet de rendre compte facilement des périodes où le bassin est sec.

- Les performances du modèle sont en moyenne meilleures sur les bassins ayant été analysés lors de l'étude préliminaire de 2008. Nous imputons ce résultat assez directement à la nature des données utilisées, les nouvelles stations ayant été testées avec des données SAFRAN dont nous avons déjà évoqué les limites, et avec des données hydrométriques dont la qualité pourrait être améliorée. Il serait nécessaire de refaire les tests sur ces stations avec des données de meilleure qualité.
- Sur les sous-bassins les plus à l'amont de la Loire (notamment ceux en rive droite), les conditions particulières de pluie rendent la modélisation très délicate et la pluie SAFRAN, répartie parfois de manière uniforme sur 24 h est clairement insuffisante.
- Certains événements de printemps ont paru sous-estimés, même sur les stations où le modèle est jugé globalement satisfaisant. Il se peut que la neige y joue un rôle significatif.
- Sur les cours d'eau sur lesquels il y avait plusieurs stations d'amont en aval, il n'a pas été trouvé de cohérence globalement forte sur les performances du modèle: certaines stations successives ont des niveaux de performance proches, mais d'autres ont des niveaux de performance très différents. Dans le second cas, le rôle du bassin intermédiaire est vraisemblablement à l'origine des différences.

Tableau 8 : Synthèse des résultats obtenus par le modèle GRP sur les 32 stations étudiées

Bassin	Nom Abrégé	Code	Qualification des performances	Commentaires
Cher	Le Cher à Chambonchard	K5090900	Moyennes	Un seul poste est disponible sur le bassin, avec de nombreuses lacunes sur la période test. Bien que le modèle simule assez bien les débuts de montée de crue, il peine à simuler les pointes (par ex. pour les événements d'avril 1998, février 1999 ou avril 2001).
	Le Cher à Montluçon	K5220900	Moyennes	Le modèle peine à bien reproduire les montées de crue et sous-estime les pointes de certains événements (avril 1998, février 2003)..
	Le Cher à Saint-Victor	K5220910	Moyennes (-)	Comportement similaire à la station de Montluçon située juste à l'amont, avec cependant une dispersion plus grande. Notons que les données utilisées ici sont des données SAFRAN et que la chronique des débits observés mériterait une critique détaillée.
	Le Cher à Saint Amand Montrond	K5400920	Bonnes	Le modèle réagit bien, avec des prévisions globalement peu biaisées. L'amplitude des événements majeurs est bien restituée (malgré parfois quelques retards à la montée). Par rapport aux stations amont, le modèle bénéficie peut-être des apports de l'Aumance.
	La Tardes à Chambon sur Voueize	K5183020	Bonnes	Une des stations où le modèle est le plus performant, avec pics de crue bien restitués.
	La Voueize à Gouzou	K5143110	Faibles	Forte dispersion sur les prévisions, probablement en partie due à la qualité moyenne des données hydrométrique et à l'utilisation de données SAFRAN. Malgré cela, le modèle restitue les tendances dans une majorité de cas.
	L'Aumance à Hérisson	K5383020	Bonnes	Performances globalement bonnes, peu biaisées, malgré une légère tendance à la sous-estimation des pics de crue (par exemple sur l'événement d'avril 2001).
	L'Auron au Pondy	K5623010	Moyennes (+)	Prévision des amplitudes globalement bonne, malgré un léger retard en montée sur certains événements
	L'Yèvre à Savigny en Septaine	K5552300	Moyennes (-)	Bassin ayant une réponse assez lissée. Retard à la montée sur l'événement majeur de mai 2001. Prévision satisfaisante sur les autres événements.

	Le Moulon à Bourges [Asnières]	K5574100	Moyennes	Tendance globalement bien restituées mais forte dispersion sur les prévisions, probablement liée en partie à la qualité des données hydrométriques et à l'utilisation de données SAFRAN
	L'Arnon à Alnay	K6192420	Moyennes (-)	Pics de crue globalement sous-estimés et retards sur les fins de montée des événements les plus importants
	La Petite Sauldre à Ménétréol	K6373020	Moyennes (+)	Tendances globalement bien prévue, mais amplitudes sous-estimées. Evolution importante de l'information pluviométrique (2 postes en début de période et 4 en fin)
	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	K6332510	Moyennes	Modèle assez satisfaisant mais forte sous-estimation sur l'événement majeur de mars 2001
	La Grande Sauldre à Salbris	K6402500	Moyennes	Amplitudes assez bien restituées, à part sur l'événement de mars 2001.
Indre	L'Indre à Ardenes	K7202610	Bonnes	Modèles globalement satisfaisant, malgré un retard à la montée sur les pointes et une légère sous-estimation des pics majeurs. Forte évolution de l'information pluviométrique sur la période (1 poste au début, 6 à la fin)
	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	K7312610	Faibles	L'une des stations où le modèle est le moins satisfaisant. Evolution pluviométrique forte comme pour Ardenes (passage de 4 à 9 postes). Modèles globalement peu apte à prévoir les tendances. Résultats très différents de ceux d'Ardenes, avec donc un bassin intermédiaire fortement influant.
	L'Indrois à Genillé	K7433030	Bonnes	Modèle globalement bon, malgré une sous-estimation de quelques pointes (février 1999 notamment)
Loire	La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	K0114020	Faibles	Tendance à la sous-estimation et prévisions très dispersées. Qualité des données de débit moyenne et répartition des données SAFRAN trop grossière sur certains événements. Difficultés sur les événements majeurs (par ex. crue de novembre 1996)
	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	K0253020	Moyennes	Problèmes similaires à la station précédente, mais prévisions un peu plus satisfaisantes (bassin soumis à des intensités de pluie moindres)
	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	K0403010	Moyennes (-)	Bassin similaire à celui de la Gazeille, avec des résultats également similaires. Données SAFRAN probablement trop grossières sur certains événements.
	La Dunières à Sainte-Sigolène	K0454010	Faibles	Prévisions fortement dispersées. Difficultés à suivre la dynamique rapide des événements
	La Semène à Saint-Didier-en-Velay	K0567520	Faibles	Situation identique à celle de la station précédente. Données de débit à vérifier.
	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	K0614010	Faibles	Modèle globalement en échec
	La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	K0643110	Moyennes (-)	Modèle qui réussit à voir les tendances, mais forte dispersion et sous-estimation des pointes. Problèmes dans les données de débit
	Le Lignon du Forez à Boën	K0753210	Moyennes (-)	Modèle qui voit globalement les tendances. Données hydrométriques à vérifier
	L'Aix à Saint-Germain-Laval	K0813020	Moyennes (-)	Modèle en retard sur les montées et sous-estime les pointes. Données de débit à vérifier.
	Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières	K0983010	Moyennes	Forte dispersion sur les prévisions. Retard à la montée. Données de débit à vérifier.
	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	K1173210	Moyennes	Idem précédemment.
	La Bourbince à Vitry-en-Charolais	K1383010	Moyennes	Amplitudes assez bonnes mais dispersion assez forte
	L'Arroux à Étang-sur-Arroux	K1321810	Moyennes	Retards à la montée. Forte dispersion des prévisions. Données de débit à vérifier.
	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	K1341810	Moyennes (+)	Amplitude correcte et tendance assez bonnes. Données de débit à vérifier.
L'Aron à Verneuil	K1773010	Moyennes (+)	Idem précédemment	

4.3.3. Comparaison des résultats à ceux du diagnostic établi en 2008

Pour les 14 stations sur lesquels nous avons déjà testé le modèle en 2008, nous avons comparé l'appréciation qualitative des résultats du modèle que nous avons faite avec celle

réalisée ici. Le Tableau 9 montre que les évaluations sont globalement cohérentes. Celle de la présente étude est légèrement plus sévère, avec un reclassement entre 2008 et aujourd'hui de 4 stations, de la liste des bassins où le modèle était jugé bon vers celle où il est jugé moyen. Cette baisse relative de l'appréciation des performances du modèle vient d'un nombre de critère d'évaluation plus large et d'une inspection plus fine des hydrogrammes de prévision (en 2008, nous n'avions par exemple regardé les résultats que sur 2 événements).

Tableau 9 : Comparaison des appréciations qualitatives des performances du modèle réalisées en 2008 et 2010

Bassin	Nom Abrégé	Code	Surface (km ²)	Qualification des performances 2008	Qualification des performances 2010
Cher	Le Cher à Chambonchard	K5090900	517	Bonnes	Moyennes
	Le Cher à Montluçon	K5220900	1750	Moyennes	Moyennes
	Le Cher à Saint Amand Montrond	K5400920	3492	Bonnes	Bonnes
	La Tardes à Chambon sur Voueize	K5183020	854	Bonnes	Bonnes
	L'Aumance à Hérisson	K5383020	920	Bonnes	Bonnes
	L'Auron au Pondy	K5623010	199	Bonnes	Moyennes (+)
	L'Yèvre à Savigny en Septaine	K5552300	531	Moyennes	Moyennes (-)
	L'Arnon à Alnay	K6192420	2170	Moyennes	Moyennes (-)
	La Petite Sauldre à Ménétréol	K6373020	318	Bonnes	Moyennes (+)
	La Grande Sauldre à Brinon sur Sauldre	K6332510	594	Moyennes	Moyennes
	La Grande Sauldre à Salbris	K6402500	1200	Bonnes	Moyennes
Indre	L'Indre à Ardentes	K7202610	697	Bonnes	Bonnes
	L'Indre à Saint Cyran du Jambot	K7312610	1712	Faibles	Faibles
	L'Indrois à Genillé	K7433030	396	Bonnes	Bonnes

4.4. Tests complémentaires avec des chroniques étendues et validées

Suite aux analyses précédentes faisant ressortir des problèmes dans les séries de données utilisées, la DREAL a fourni au Cemagref en fin d'étude des chroniques de données validées et étendues, notamment pour tenir compte de l'événement de 2008 sur la Haute Loire. Pour la pluviométrie, des chroniques horaires de postes pluviométriques ont été fournies. Les pluies moyennes de bassin ont alors été calculées comme une moyenne arithmétique des postes disponibles. Pour les débits, une nouvelle extraction de la banque Hydro a été réalisée, les données correspondantes étant jugées de bien meilleure qualité.

De nouveaux tests ont alors été réalisés sur 9 bassins, pour étudier la sensibilité des résultats à ces données. Pour cela, les calages ont été réalisés successivement avec des données non validées et validées, puis les résultats ont été analysés sur les mêmes données de contrôle. Cela a été fait sur la période 1995-2005 comme précédemment, puis sur la période étendue 1995-2009 pour tenir compte des nouvelles données disponibles. Les résultats sont fournis dans le Tableau 10a et le Tableau 10b pour les périodes 1995-2005 et 1995-2009 respectivement. Les illustrations détaillées sont fournies dans les Annexes 5 et 6.

Tableau 10 : Comparaison des résultats du modèle GRP obtenus en prenant les jeux de données initiaux (en vert) et les jeux de données validées (en jaune). (a) Période 1995-2005, (b) Période 1995-2009

Bassin	Code Hydro	Superficie (km ²)	Horizon de calage (h)	Source Données Pluie	Nb Postes	Qmoy (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)	Pour Q > Q95				Qualification des performances
								Qmoy (m ³ /s)	RMSE (PP)/Qmoy	Eff (pers)	Pourc. Augm. prévues	
La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	K0114020	51	12	Safran		1.3	3.8	7.0	0.40	0.53	43%	Faibles
				Safran+Cristal	2	1.2	3.4	5.9	0.51	0.50	41%	Faibles
La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	K0253020	375	12	Safran		2.7	8.0	13.4	0.24	0.51	59%	Moyennes
				Safran+Cristal	4	2.6	7.8	13.1	0.23	0.76	59%	Bonnes
Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	K0403010	139	12	Safran		3.0	9.4	18.5	0.44	0.49	43%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	2.9	8.9	17.3	0.32	0.85	50%	Bonnes
La Dunières à Sainte-Sigolène	K0454010	228	12	Safran		3.0	8.1	13.6	0.29	0.36	39%	Faibles
				Safran+Cristal	2	2.9	7.8	13.3	0.30	0.73	44%	Moyennes (+)
La Semène à Saint-Didier-en-Velay	K0567520	134	12	Safran		1.9	5.2	9.2	0.23	0.43	33%	Faibles
				Safran+Cristal	3	1.7	4.8	8.6	0.28	0.59	43%	Moyennes
Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	K0614010	178	12	Safran		2.3	5.8	12.2	0.59	0.39	57%	Faibles
				Safran+Cristal	3	2.2	5.8	12.4	0.64	0.68	61%	Moyennes (+)
La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	K0643110	95	12	Safran		0.8	2.5	4.2	0.30	0.53	53%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	0.8	2.4	4.2	0.58	0.64	56%	Moyennes
Le Lignon du Forez à Boën	K0753210	371	12	Safran		5.5	15.5	25.1	0.24	0.48	63%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	4	5.3	15.4	24.3	0.25	0.68	67%	Moyennes(+)
L'Aix à Saint-Germain-Laval	K0813020	193	12	Safran		2.6	8.7	15.1	0.27	0.49	55%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	2.6	8.6	14.1	0.35	0.71	68%	Bonnes

(a)

Bassin	Code Hydro	Superficie (km ²)	Horizon de calage (h)	Source Données Pluie	Nb Postes	Qmoy (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)	Pour Q > Q95				Qualification des performances
								Qmoy (m ³ /s)	RMSE (PP)/Qmoy	Eff (pers)	Pourc. Augm. prévues	
La Gazeille à la Besseyre-Saint-Mary	K0114020	51	12	Safran		1.3	3.8	7.0	0.40	0.53	43%	Faibles
				Safran+Cristal	2	1.2	3.4	5.9	0.51	0.50	41%	Faibles
La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	K0253020	375	12	Safran		2.7	8.0	13.4	0.24	0.51	59%	Moyennes
				Safran+Cristal	4	2.7	8.0	13.4	0.17	0.73	67%	Bonnes
Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	K0403010	139	12	Safran		3.0	9.4	18.5	0.44	0.49	43%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	3.0	9.3	18.2	0.26	0.84	52%	Bonnes
La Dunières à Sainte-Sigolène	K0454010	228	12	Safran		3.0	8.1	13.6	0.29	0.36	39%	Faibles
				Safran+Cristal	2	3.0	8.0	13.5	0.21	0.66	47%	Moyennes (+)
La Semène à Saint-Didier-en-Velay	K0567520	134	12	Safran		1.9	5.2	9.2	0.23	0.43	33%	Faibles
				Safran+Cristal	3	1.9	5.2	9.2	0.21	0.61	38%	Moyennes
Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	K0614010	178	12	Safran		2.3	5.8	12.2	0.59	0.39	57%	Faibles
				Safran+Cristal	3	2.3	5.9	12.4	0.48	0.51	64%	Moyennes
La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez	K0643110	95	12	Safran		0.8	2.5	4.2	0.30	0.53	53%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	0.8	2.5	4.3	0.29	0.64	63%	Moyennes
Le Lignon du Forez à Boën	K0753210	371	12	Safran		5.5	15.5	25.1	0.24	0.48	63%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	4	5.5	15.6	25.4	0.20	0.63	65%	Moyennes(+)
L'Aix à Saint-Germain-Laval	K0813020	193	12	Safran		2.6	8.7	15.1	0.27	0.49	55%	Moyennes (-)
				Safran+Cristal	3	2.6	8.9	15.3	0.21	0.69	71%	Moyennes (+)

(b)

Sur la période 1995-2005, une amélioration des performances du modèle est observable sur la quasi-totalité des bassins.

Cela vient clairement du fait que les corrections effectuées sur les données pluviométriques combinées à la nouvelle extraction des données de débit de la banque Hydro ont conduit à une base de données de bien meilleure qualité.

Sur la période 1995-2009, les nouveaux tests réalisés l'ont été en tenant compte de l'événement majeur de 2008. Nous donnons dans ce qui suit une analyse par station (voir Tableau 10b), qui s'appuie sur le tracé des hydrogrammes des 18 plus forts événements en débit et des 6 plus forts événements de pluie, ainsi que sur les fiches performances.

- La Gazeille à la Besseyre :

On observe des résultats qui restent de faibles qualités. Les nouvelles données n'améliorent pas les performances du modèle. Il s'agit d'un bassin versant ayant une faible superficie (51 km²) et présentant un relief marqué. Un modèle au pas de temps horaire peut être qualifié de "grossier" pour ce type de bassin. De plus on ne dispose que de deux pluviomètres pour calculer la pluie du bassin, avec un de ces deux pluviomètres qui est situé en dehors du bassin.

La simulation des événements de crue, montre qu'un retard combiné à une sous-estimation des pics de crue, est souvent observable. GRP est nettement en retard sur l'évènement de crue de 2008.

- La Borne occidentale à Espaly :

GRP sur ce bassin offre de bien meilleurs résultats. Le comportement du modèle est bon sur les événements de crue de 2003 et 2008.

- Le Lignon du Velay au Chambon :

La qualité globale des prévisions sur ce bassin est bonne, comme en atteste les critères numériques. La crue de 1996 est très bien simulée alors que celle de 2008 est sous estimée de près de 60% au niveau du pic de crue.

- La Dunières à Sainte-Sigolène :

Le modèle donne globalement des résultats de bonne qualité, avec une bonne simulation de la crue de 1996. Comme sur la plupart des stations le modèle sous-estime le pic de crue de l'évènement 2008, bien qu'il simule une montée des eaux au moment où elle est effectivement observée.

- La Semène à Saint-Didier :

Les performances du modèle n'ont pas été améliorées par rapport aux tests précédents. On sous-estime fortement les débits de la crue de 2008, où la station semble avoir subi quelques dommages.

- Le Furan à Andrézieux-Bouthéon :

Sur cette station, GRP simule bien les grosses crues, comme celle de 2008. On observe une forte dispersion sur les petites crues illustrant peut être un problème provenant de l'information pluviométrique.

- La Mare à Saint-Marcellin :

GRP sous-estime fortement la crue de 2008, avec un débit prévu à +12h avant le pic de crue quatre fois inférieur à celui finalement observé. En dehors de cet évènement, le modèle donne des résultats satisfaisants.

- Le Lignon du Forez à Boën :

GRP modélise globalement assez bien les événements de crue aussi bien au niveau des variations que de l'intensité. On peut noter un retard assez fréquent sur les pics de crue.

- L'Aix à Saint-Germain-Laval :

Les prévisions sont bonnes. La crue de 2008 est assez bien modélisée.

Remarque: une erreur de donnée sur le pluviomètre Noiretable le 23/01/2008 à 07 heure a été relevée (p= 11677.200mm...). Cette donnée a été mise en lacune pour effectuer le calage.

Ces tests complémentaires, effectués sur des données de meilleure qualité, montrent une amélioration globale et significative des performances du modèle.

Ces résultats pourraient certainement être approfondis, par exemple en améliorant le choix des pondérations attribuées aux postes pluviométriques pour le calcul des pluies de bassins. Des tests ont été effectués en ce sens par Angélique Godart à la DREAL sur le bassin du Lignon du Velay à Chambon sur Lignon. Ils montrent une amélioration nette des résultats lorsque ces pondérations sont ajustées. Il y a donc lieu de penser que sur ces petits bassins où la variabilité de la pluie est forte et l'information pluviométrique limitée, des gains substantiels peuvent être attendus en optimisant au mieux la façon dont est exploitée cette information.

4.5. Conclusion de la phase 3

Cette phase de travail a représenté le cœur de l'étude des performances du modèle GRP. Nous avons adopté ici une approche permettant d'obtenir des résultats dans des conditions aussi proches que possible des conditions opérationnelles. Notons cependant que ces résultats de modélisation sont probablement "idéalisés" sur les stations où les données paraissent critiquées et validées (celles déjà analysées dans l'étude de 2008). La qualité est souvent moindre en temps réel. Les stations sur lesquelles les données ont paru problématiques sont, à ce titre, peut-être plus proches des données qui seront effectivement reçues par le modèle, cela au prix de performances significativement diminuées. Les tests réalisés avec des données de qualité limitée ont donc le mérite de souligner l'effet que pourrait avoir une absence de critique des données en temps réel sur les résultats.

Les tests ont mis en évidence que, peu important les bassins ou l'horizon de calage, il y a toujours avantage à utiliser GRP par rapport à un modèle de persistance. Les résultats sont tout de même mitigés puisqu'ils ont été jugés bons sur 5 stations seulement, moyens sur 21 stations et faibles sur 6 stations. Rappelons cependant que pour 18 stations, la qualité des données est jugée de nature à influencer négativement les performances du modèle. Le modèle n'a d'ailleurs été jugé bon sur aucune de ces 18 stations.

Des tests complémentaires effectués en fin d'étude sur des bases de données de meilleure qualité et étendues (postes pluviométriques au sol et données hydrométriques validées) montrent des améliorations significatives des résultats. Cela donne des perspectives d'amélioration de la qualité du modèle, notamment en optimisant le calcul des pluies de bassin (voir notamment les travaux complémentaires de Godart, 2010).

Les pistes possibles d'amélioration des performances sont les suivantes :

- La tendance à la sous-estimation et au retard observée assez globalement pourrait être partiellement corrigée en utilisant des fonctions objectif au calage légèrement différentes. Des analyses exploratoires ont été réalisées en parallèle de cette étude (Gérard, 2010). Elles n'ont cependant pas abouti à des résultats concluants et demanderaient des travaux complémentaires.
- La question de l'influence de la neige pourrait être analysée. Des différences significatives de simulation avec ou sans module neige, notamment sur les événements de printemps, tendraient à indiquer qu'il y a un gain potentiel à utiliser un tel module en mode prévision. La prochaine intégration d'un module neige au sein du modèle GRP devrait permettre de

faciliter ces analyses. Son utilisation nécessitera de disposer de données de température en temps réel.

Enfin, on peut noter que le type de précipitations futures utilisé en opérationnel a aussi un rôle important, les pertes de performances étant en effet très significatives dans un scénario de pluie futures nulles comparativement au scénario idéalisé de pluie parfaitement connues. Les performances données ici ne sont donc qu'indicatives au-delà du temps de réaction du bassin.

5. Conclusion générale

Ce rapport a présenté les résultats obtenus par le Cemagref dans le cadre de l'étude d'analyse et de modélisation de 32 sous-bassins du Cher et de l'Indre et de leurs affluents, et d'affluents de la Loire en amont du Bec d'Allier. Cette étude de modélisation a été décomposée en trois phases, dont nous rappelons ici les résultats essentiels.

La Phase 1 a consisté à mettre en place la base de données hydrométriques et pluviométriques sur une période de 10 à 15 ans. Une première partie de cette base avait été constituée pour 14 stations lors de l'étude préliminaire réalisée en 2008 et reposait sur des données hydrométriques et de postes au sol, fournies par le SPC. Ces données ont été jugées de bonne qualité. Pour les 18 autres stations, les jeux de données disponibles au Cemagref ont été utilisés et ont paru poser des problèmes de qualité, tant sur la qualité de la donnée pluviométrique issue d'une maille SAFRAN que sur la donnée hydrométrique.

Si la majorité des bassins présente une couverture pluviométrique raisonnable, quelques uns ne sont équipés que d'un ou deux postes, ce qui peut poser des problèmes de fiabilité de l'information pluviométrique. En particulier, un deuxième poste pluviométrique devrait être associé au bassin du Cher à Chambonchard.

24 événements ont ensuite été sélectionnés pour chaque bassin (les 18 plus gros événements de crue et les 6 plus gros événements de pluie complémentaires) pour l'analyse des performances.

La Phase 2 de l'étude a permis de caractériser, par une méthode hydrologique, les temps moyens de réaction des bassins versants aux pluies. Ces temps de réaction vont de 3 à 24 heures pour les bassins étudiés et sont partiellement liés à la superficie des bassins, même s'il a pu être constaté que des bassins de tailles équivalentes pouvaient avoir des temps de réaction très différents. Les temps de réaction estimés ont été mis en regard des objectifs de prévision de l'étude en termes de délais de prévision. En effet, l'horizon "idéal" d'un service de prévision varie généralement entre 24 et 72 heures. Il est donc clair que pour atteindre ces échéances, des prévisions de pluie devront être intégrées à la chaîne de prévision, la qualité des prévisions de débit dépendant grandement de la qualité des prévisions de pluie. Cet aspect n'a cependant été que partiellement couvert lors de cette étude, car nous ne disposons pas de chroniques de prévision de pluie sur le bassin. Seuls des scénarios de pluie future nulle ou de pluie parfaitement connue (correspondant aux pluies observées a posteriori) ont été analysés.

Cette seconde phase a également l'occasion de présenter le modèle de prévision GRP.

La Phase 3 constituait le cœur de l'étude, avec le test du modèle hydrologique de prévision GRP choisi pour cette étude sur les 32 stations retenues. Une procédure rigoureuse de test en calage-contrôle a été établie et une sélection de critères numériques et graphiques a été faite pour analyser les résultats. La procédure de test avait pour objectif de se placer dans des conditions aussi proches que possible des conditions opérationnelles, afin d'évaluer le niveau de performance que l'on peut attendre du modèle dans ces conditions. Malgré cela, un certain nombre d'aspects (problème de critique des données en temps réel, disponibilité et qualité des prévisions de pluie) n'ont pas été analysés, bien qu'ils puissent avoir un impact significatif sur les performances. Par ailleurs, les valeurs des critères fournies, bien que calculées sur des chroniques longues et un nombre significatif d'événements, restent dépendantes des conditions rencontrées.

Bien que l'évaluation puisse conduire à des interprétations légèrement différentes en fonction des critères choisis, il a été conclu que le modèle fournissait toujours pour le prévisionniste une information de meilleure qualité qu'un modèle simple de persistance. Cependant un lien entre le scénario de pluie future utilisé et la qualité de la prévision a clairement été établi, montrant toute l'importance qu'auront les prévisions de pluie sur la capacité du modèle à prévoir les débits en conditions opérationnelles.

Le modèle a été jugé bon sur 5 stations, faible sur 6 stations et moyen sur les 21 stations restantes. La qualité des données jugée problématique sur 18 stations a cependant pu amoindrir les résultats à ces stations. Des tests complémentaires menés avec une base de données de meilleure qualité sur 9 bassins ont en effet montré des améliorations substantielles des résultats.

Cette étude a permis globalement une évaluation assez exhaustive des capacités du modèle de prévision GRP sur la zone d'étude. Elle a par ailleurs 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 le SPC. Le modèle, interfacé à SOPHIE, pourra donc être utilisé pour une application en temps réel.

Plusieurs pistes restent à explorer pour améliorer les résultats du modèle GRP :

- une meilleure exploitation de l'information pluviométrique pour améliorer l'estimation de la lame d'eau précipitée, en particulier sur les petits bassins. Des tests complémentaires effectués par le SPC (Godart, 2010) montrent que des gains significatifs peuvent être attendus.
- une analyse détaillée des influences nivales. La neige semble en effet contribuer de façon significative à certains événements (Reinbold, communication personnelle). La prochaine introduction d'un module neige au sein du modèle GRP devrait faciliter ces analyses.
- l'analyse de l'impact de la fonction objectif sur les résultats du modèle de prévision, notamment pour corriger les tendances à la sous-estimation. Des analyses complémentaires réalisées en parallèle de cette étude (Gérard, 2010) montrent en effet que des différences significatives de résultats peuvent être obtenues lorsque l'on change de fonction objectif. Ce travail n'a cependant pas permis d'identifier de solutions plus satisfaisantes, et des travaux complémentaires seraient nécessaires.

Bibliographie

- 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, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), Paris, 603 pp.
- Cemagref, 2004. Temps de propagation des crues sur le bassin versant de la Seine : analyse par l'estimation des temps de réaction des bassins aux pluies. Rapport d'étude, DIREN Ile-de-France, 27 pp.
- Cemagref, 2008. Test du modèle GR3P sur des sous-bassins versants du Cher et de l'Indre – Résultats préliminaires, pp. 49.
- Gérard, L., 2010. Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage. Rapport de stage de 2ème année, INP-ENSEEIH, Toulouse, Département Hydraulique et Mécanique des Fluides, Cemagref, Antony, 18 pp.
- Godart, A., 2010. Calage du modèle de prévision de crue GRP sur le bassin du Lignon du Velay à Chambon sur Lignon. Rapport interne, DREAL Centre, Orléans, 16 pp.
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 13-24.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Moulin, L., 2007. Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, CERREVE, Ecole Doctorale GRN, 639 pp.
- Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 pp.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306.