

Université Pierre et Marie Curie

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

**Peut-on améliorer les performances du modèle GRP
pour la prévision des crues ?**

Tests sur un échantillon de bassins versants français.

Thomas Pinna

Encadrement : Charles Perrin et Julie Viatgé

Septembre 2017



**IRSTEA, UR HBAN
1 rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex**



VIGICRUES



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE**

ABSTRACT

Flood forecasting is a key societal challenge. Improving forecasting models would improve, among others, the protection of people and properties. The GRP model, widely used in operational flood forecasting services (SPC) in France has been the subject of several recent research and feedbacks, especially during the flood in May / June 2016. These feedbacks have highlighted the model tendency to underestimate flood volumes and to forecast peaks with some delay. The aim of this study was therefore to explore different improvement pathways to overcome the current weaknesses of the GRP hydrological model.

This study was based on a sample of 266 catchments from the database of Andrea Ficchi's PhD thesis (240 catchments) and from the Seine moyenne-Yonne-Loing (SmYL) and Loire-Cher-Indre (LCI) SPCs, which provided catchments heavily impacted by the 2016 flood event (26 catchments). Hydrometeorological data are available at the hourly time step from July 1, 2004 to July 31, 2013 and were retrieved mainly from the national HYDRO archive and the SAFRAN database of Météo-France.

Sixteen versions of the GRP model were implemented in order to test different improvement pathways concerning the model structure (adding an interception store or modifying the exchange function), the model parameterization (optimizing some fixed parameters, e.g. the capacity of the production store) and the model calibration strategy (sequentially calibrating parameters). We set up a test and analysis protocol aiming to quantify the performance changes between the original and modified versions. A set of criteria was used to evaluate the model from various aspects (criteria calculated over the whole time series and over the flood events only).

This research resulted in the proposal of a modified version of the GRP model, which showed small though significant improvements over the original version, without increasing its overall complexity. The proposed version remains simple and could be implemented to the GRP operational tool.

Keywords: hydrological modelling, flood forecasting, GRP model

Remerciements

Ce travail a été possible grâce à la mise à disposition de bases de données climatiques par Météo-France et des données hydrologiques par le SCHAPI et les SPC LCI (Lionel Berthet et Renaud Marty) et SMYL (Joanna Brunelle et Flavien Riffiod). Ce stage a été financé dans le cadre de la convention 2017 Irstea-DGPR/SCHAPI.

Je souhaite tout d'abord remercier mon encadrant Charles Perrin pour m'avoir fait confiance et permis de réaliser ce stage au sein de l'équipe HYDRO à IRSTEA Antony mais aussi pour sa disponibilité, sa patience (heure d'été et d'hiver...) et pour son soutien lors des moments de doute.

Je tiens aussi à remercier particulièrement Julie Viatgé d'avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions sur le fonctionnement du modèle GRP (sans oublier le « Find in files » de CodeBlocks !!), Vazken Andreassian, Olivier Delaigue et Pierre Nicolle pour leur aide précieuse en matière de programmation, et Flavien Riffiod (DRIEE IDF) et Nicolas Le Moine (UPMC) pour leurs conseils au cours du stage.

Enfin, je souhaite remercier les membres de l'équipe hydrologie au grand complet pour leur accueil et pour leur gentillesse, qui m'ont permis d'effectuer ce stage dans un environnement chaleureux et plus qu'agréable.

Table des matières

I Introduction et contexte.....	4
II Synthèse bibliographique.....	6
II.1 La modélisation hydrologique	6
II.2 Les prévisions hydrologiques	7
II.3 Présentation succincte de quelques modèles hydrologiques.....	8
II.4 La famille des modèles GR (Génie Rural).....	9
III Données et outils	10
III.1 Présentation de la base de données.....	10
III.2 Description du modèle GRP.....	14
III.3 Structure et fonctionnement du modèle GRP.....	15
IV Méthodologie.....	16
IV.1 Pistes d'amélioration envisagées.....	16
IV.2 Mise en place d'un cadre de test et d'analyse	20
IV.3 Synthèse et nomenclature des versions testées.....	25
IV.4 Présentation graphique des résultats.....	26
V Résultats.....	26
V.1 Évaluation de la version de référence : GRP0.....	26
V.2 Ajout d'un réservoir d'interception : GR3PI / GR4PI.....	29
V.3 Optimisation de la capacité du réservoir de production	32
V.4 Modification de la stratégie de calage : Calage séquentiel.....	35
V.5 Couplage des modifications.....	37
V.6 Analyse de la fonction d'échange.....	41
V.7 Versions potentiellement adaptables à l'outil opérationnel.....	45
VI Conclusion et perspectives	47
VII Bibliographie.....	49

I Introduction et contexte

À l'échelle mondiale, les inondations représentent un risque naturel majeur : c'est l'aléa naturel le plus récurrent et répandu géographiquement. Il génère le plus de dommages matériels et touche le plus la population. Les dégâts se chiffrent annuellement à plusieurs dizaines de milliards de dollars, ce qui représente près de 80 % des pertes liées aux catastrophes dues à des phénomènes naturels.

Selon l'Agence Européenne pour l'Environnement (European Environment Agency (EEA), 2003), le coût des dommages indemnisables par les assurances a été d'au moins 25 milliards d'euros pour les inondations observées en Europe entre 1998 et 2002. Les dommages n'ont pas été uniquement économiques : environ un demi-million de personnes ont dû quitter leurs habitations et 700 personnes ont trouvé la mort. En 2016, l'Europe a été victime d'importantes inondations provoquant, d'après un rapport publié par le Swiss Re Institute (Sigma, 2017), près de 2,9 milliards d'euros de dégâts assurés, 17 morts et 35 blessés.

D'après le site portail du Ministère en charge de l'Environnement¹, en France, près de 13 300 communes et un quart de la population sont exposés au risque inondation. La région Ile-de-France comptabilise à elle seule, 830 000 habitants, 100 000 entreprises et 750 000 emplois directement concernés par le risque inondation.

De nombreuses actions de prévention ont été élaborées au cours de ces dernières décennies pour lutter contre les inondations provoquées par les crues. L'objectif principal est de limiter les débordements soit en construisant divers aménagements tels que des bassins de rétention ou des digues, soit en préservant certaines zones essentielles (zones humides, forêts de protection...). Il est aussi possible de minimiser l'impact d'une inondation sur les enjeux en limitant par exemple l'urbanisation en zone inondable tel que le préconisent les Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI).

Cependant, certaines actions préventives sont inefficaces pour éviter des impacts dès lors que les périodes de retour associées aux événements sont supérieures à celles de dimensionnement. Il est alors essentiel de pouvoir anticiper les événements de crue, particulièrement ceux générateurs d'inondations, afin de mettre en place des Plans de Secours Spécialisés Inondations (PSSI) visant à protéger la population et les infrastructures.

C'est dans ce contexte qu'interviennent les modèles hydrologiques dédiés à la prévision des crues. La surveillance du territoire français est sous la responsabilité du SCHAPI², qui soutient et coordonne les 19 Services de Prévision des Crues (SPC) répartis sur l'ensemble du territoire (Figure 1). Les SPC assurent une surveillance continue des principaux cours d'eau français ainsi que les prévisions hydrologiques permettant d'évaluer le risque de futurs événements de crue. En outre, ils ont pour rôle de mettre en place des systèmes d'annonces de crues et transmettent très régulièrement des bulletins d'information, affectant à chaque cours d'eau une couleur de vigilance selon l'importance du risque de crue. L'ensemble des bulletins remontent ensuite au SCHAPI et servent à élaborer une carte nationale de vigilance mise à disposition du grand public via le site internet Vigicrues³.

¹ <http://www.georisques.gouv.fr>, portail thématique du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire consacré à la prévention des risques majeurs.

² Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

³ <https://www.vigicrues.gouv.fr/>

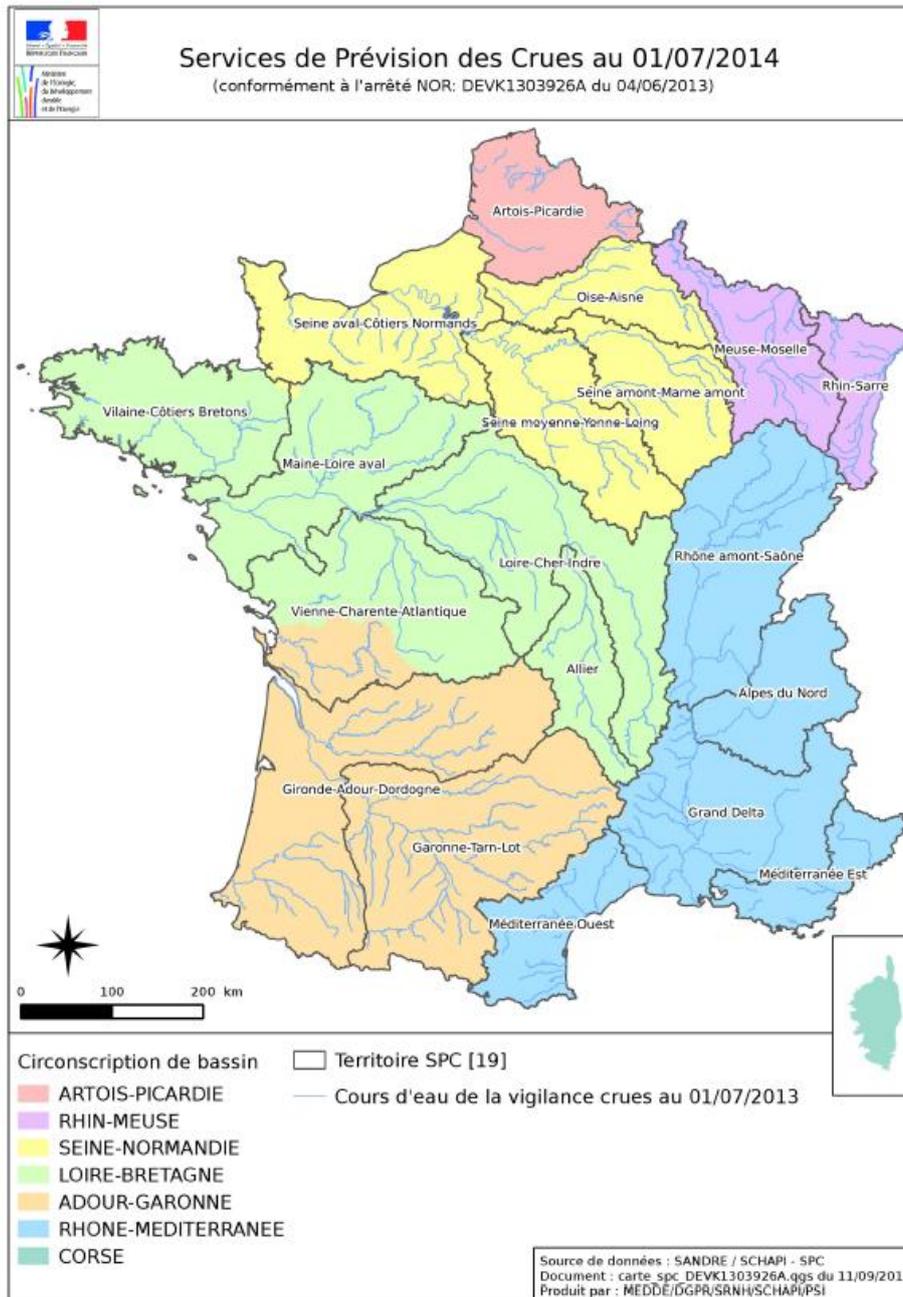


Figure 1 : Carte des zones de compétence des Services de Prédiction des Crues (Source : SCHAPI)

Les enjeux de la prédiction des crues sont multiples : évacuation des populations, protection des biens, gestion de la navigation, organisation des secours, surveillance des digues, gestion d'ouvrages, etc... Des analyses coût-bénéfice révèlent l'intérêt socio-économique des services de prédiction hydrologique. Ces derniers favorisent la diminution des dommages liés aux crues : aux Etats-Unis par exemple, sur la période 1981 – 2000, une économie de près de 40 % a été obtenue par les services de prédiction du National Weather Service (Berthet, 2010). Les modèles de prédiction étant encore limités dans leurs performances, il est indispensable de continuer les recherches visant à les améliorer pour répondre à ces différents objectifs d'anticipation et d'alerte.

Le modèle GRP, développé à Irstea et spécialement conçu pour la prédiction des crues, est aujourd'hui largement utilisé par les SPC. Depuis sa conception, différentes recherches ont permis d'adapter ce modèle au pas de temps horaire. Par ailleurs, les nombreux retours

d'expérience reçus sur le modèle GRP ont permis de mettre en évidence des points faibles, notamment une sous-estimation du volume de crue et un retard à la montée. Ces limitations sont potentiellement liées à la structure du modèle, son calage ou encore la manière dont il assimile les débits observés.

L'objectif de ce stage a été de tester, de manière exploratoire, diverses pistes d'amélioration du modèle. Nous avons mis en place un protocole d'analyse et de tests visant à appréhender les divers points d'améliorations possible de modélisation. Il s'agit d'évaluer les gains/pertes de performances obtenues par les modifications envisagées (structure du modèle, critères de calage, assimilation...) par rapport à la version actuelle du modèle. A terme, cette réflexion doit aboutir à la proposition d'un modèle plus performant en conditions opérationnelles.

II Synthèse bibliographique

II.1 La modélisation hydrologique

Les populations humaines, du fait de leur dépendance à l'eau, s'installent à proximité des cours d'eau. L'eau, élément vital pour le développement et le maintien de la vie, est aussi indispensable pour les activités anthropiques. Actuellement, une importante partie de la population française réside sur des zones inondables. Dès lors, ces populations sont sujettes à des risques d'inondation causés par des phénomènes de crue. Ces crues génératrices d'inondation, parfois catastrophiques et souvent inévitables, sont la conséquence de fortes précipitations survenues sur une aire donnée. Cette entité géographique, appelée bassin versant, est l'unité d'étude pour l'hydrologue. Une des grandes problématiques de ces dernières décennies a donc été d'essayer d'appréhender et de comprendre le fonctionnement du bassin versant et les processus physiques intervenant dans la transformation de la pluie en débit. Cependant, la compréhension de cette transformation reste très complexe à l'échelle du bassin versant. En effet, les bassins versants possèdent des caractéristiques très hétérogènes et de nombreux processus physiques interviennent à des échelles spatiales et temporelles très variables. Il a donc fallu développer des outils permettant de simplifier la représentation de ces processus.

L'outil en question, le modèle hydrologique pluie-débit, consiste à représenter la transformation des précipitations en débit à l'exutoire du bassin par le biais d'une formulation mathématique. D'après le Dictionnaire de l'Environnement, un modèle peut être défini comme « *une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir* ».

Depuis la fin des années 1950, ces modèles mathématiques ont connu un développement important, rendu possible notamment par l'augmentation des capacités de calcul. De nos jours, il existe un nombre important de modèles hydrologiques répondant à des objectifs variés (Singh, 1995; Singh et Frevert, 2002, cités dans Berthet, 2010). Dans ses travaux de thèse, Lionel Berthet cite aussi Moore et al. (2005) qui évoquent le fait que ces modèles sont relativement similaires car ils se basent sur les mêmes concepts. Il existe une bibliographie très développée quant à la classification de ces modèles en fonction de leur approche et de leur complexité (Berthet, 2010). Ainsi nous pouvons distinguer trois principaux types d'approches :

- La **modélisation conceptuelle** fait généralement intervenir plusieurs réservoirs reliés entre eux, qui se remplissent et se vident pour permettre de modéliser la réponse du bassin versant à des événements pluvieux. Cette approche est considérée comme descendante (« top-down »), les paramètres sont déduits de données observées au lieu d'être prédéterminés, et les processus hydrologiques sont représentés directement à

l'échelle du bassin versant (Lobligeois, 2014). Ces modèles diffèrent par leur structure (module de production et de transfert) et leur nombre de paramètres à optimiser. Les valeurs des paramètres, vont dépendre du bassin versant. À partir des données de précipitation, d'évapotranspiration potentielle (entrée du modèle) et d'un jeu de paramètres, un débit est calculé à l'exutoire du bassin versant modélisé.

- Les modèles fondés sur la **physique** tentent de représenter les processus hydrologiques en appliquant des équations différentielles de la physique gouvernant ces processus et ayant des paramètres a priori mesurables sur le terrain. Ils nécessitent une discrétisation spatiale et temporelle fine et sont généralement associés à une approche distribuée. Ces modèles sont donc théoriquement en capacité de tenir compte des changements d'occupation du sol et de fonctionner sur des bassins versants non jaugés (Perrin, 2000), même si d'un point de vue pratique, ce n'est pas forcément le cas.
- Les **modèles empiriques** sont élaborés à partir des données d'entrée et de sortie sans faire explicitement référence aux processus impliqués dans la transformation pluie-débit. Ils sont construits de façon à reproduire les sorties du modèle à partir des données d'entrées par l'intermédiaire de relations mathématiques simples.

La résolution spatiale peut différer selon le type de modèle :

- Une approche **globale** considère le bassin versant comme une seule entité de calcul, la variabilité spatiale des forçages climatiques et/ou des caractéristiques physiques du bassin n'est donc pas explicitement prise en compte. Une telle approche fait l'hypothèse que cette variabilité spatiale joue un rôle de second ordre sur la réponse du bassin versant induite par des valeurs « moyennes » à l'échelle du bassin.
- L'approche **distribuée** considère le bassin versant comme une grille de maille régulière (ou non) relativement fine et permet donc de prendre en compte explicitement la variabilité spatiale des processus, des entrées du modèle et des caractéristiques du bassin.
- Une approche **semi-distribuée** consiste à séparer le bassin versant en plusieurs sous-unité homogènes (sous-bassins). Elle permet aussi de mieux tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du bassin versant, avec un niveau de discrétisation limité, souvent choisi en fonction du réseau hydrométrique ou de l'analyse de l'organisation du bassin hydrographique.

Selon l'objectif souhaité et le processus étudié, la discrétisation temporelle du modèle doit être adaptée. Si l'on s'intéresse par exemple aux crues, le pas de temps choisi sera assez court car ce phénomène, relatif au temps de réponse du bassin à des événements de pluie, peut se produire en moins d'une heure. Pour la simulation/prévision des crues, le modèle fonctionnera donc au pas de temps journalier (pour les très grands bassins ou certains objectifs d'estimation d'apport à des ouvrages), horaire pour des objectifs de vigilance voire même infra-horaire pour des bassins particulièrement réactifs à des phénomènes pluvieux convectifs de forte intensité.

II.2 Les prévisions hydrologiques

Dans ce mémoire, nous faisons la distinction suivante entre simulation et prévision :

- La simulation permet la détermination du débit au pas de temps t à partir des données météorologiques (pluie, évapotranspiration potentielle) jusqu'à cet instant. Ainsi, il est possible de reconstruire une série de débit ou de l'étendre sur une période où les données pluviométriques observées sont disponibles.

- La prévision permet de calculer le débit du pas de temps $t + 1$ jusqu'au pas de temps $t + H$ (où H représente l'horizon de prévision) à partir des données météorologiques et hydrométriques observées jusqu'au pas de temps t . Il est aussi nécessaire de fournir un scénario (une prévision) des pluies futures, entre le pas de temps où débute la prévision et l'horizon de prévision choisi. La fiabilité des prévisions hydrologiques dépend donc de la qualité des prévisions météorologiques effectuées.

Deux types de prévisions météorologiques peuvent alimenter les modèles hydrologiques :

- Les prévisions déterministes : à partir d'un état initial de l'atmosphère déterminé grâce aux observations récoltées, le modèle météorologique simule l'évolution du comportement de l'atmosphère en se basant sur des lois de la physique et de la thermodynamique. Il propose ensuite un seul scénario. Le défaut de ce type de prévision réside dans l'incapacité à évaluer l'incertitude du fait de l'unicité du scénario prévu.¹
- Les prévisions d'ensemble : contrairement aux précédentes, plusieurs états initiaux de l'atmosphère sont déterminés en fonction des incertitudes attribuées aux mesures, sachant qu'une petite variation de l'état initial de l'atmosphère peut engendrer des prévisions très différentes. Le modèle prévoit ensuite un ensemble de scénarios d'évolution du comportement de l'atmosphère, chaque membre de cet ensemble étant relatif à un état initial donné. Ces différents scénarios sont généralement considérés comme équiprobables.

Le choix d'alimentation du modèle hydrologique par l'une ou l'autre de ces prévisions conduira donc à produire des prévisions hydrologiques déterministes ou d'ensemble.

Un point important de la prévision hydrologique réside dans la méthode de mise à jour du modèle qui permet d'améliorer la qualité des prévisions. Le principe est d'exploiter des observations, typiquement le débit, disponibles à l'instant de prévision, et de mettre le modèle le plus possible en cohérence avec ces observations par des procédures dédiées d'assimilation. L'hypothèse sous-jacente est qu'on augmente les chances d'avoir de bonnes prévisions si le modèle est davantage en accord avec les observations à l'instant de la prévision. Ces procédures d'assimilation s'appliquent sur ce qui est considéré par le modélisateur comme étant une source première d'incertitude, et peuvent donc porter sur les pluies, les paramètres, les états et les sorties du modèle, voire même sur la structure du modèle dans les procédures multi-modèles. Par exemple, si l'on suspecte des erreurs de mesure des pluies, la correction des pluies observées passées peut permettre d'obtenir des sorties du modèle davantage en accord avec les observations et peut donc améliorer les prévisions futures. Grâce aux observations de débit, on peut aussi quantifier les erreurs des prévisions antérieures : par exemple, la prévision réalisée au pas de temps $t - 1$ pour le pas de temps t peut être comparée à l'observation au pas de temps t . On peut alors essayer d'exploiter les propriétés de la chronique de ces erreurs par des modèles statistiques simples, tenant compte par exemple de l'autocorrélation des erreurs ou de tendances à la sur- ou sous-estimation, et corriger ainsi les prévisions du modèle.

II.3 Présentation succincte de quelques modèles hydrologiques

Une très grande diversité de modèles hydrologiques apparaît dans la littérature scientifique. En réaliser un inventaire détaillé dépasse le cadre de ce stage. Il nous a cependant paru utile de présenter brièvement quelques exemples de modèles hydrologiques de prévision pour situer notre travail dans le cadre plus général de la prévision opérationnelle des crues en France.

¹ <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/les-techniques-de-prevision>

MORDOR¹ est un modèle conceptuel global journalier développé par EDF-DTG. La version opérationnelle de ce modèle possède 10 paramètres à caler et possède quatre réservoirs ainsi qu'un hydrogramme unitaire (Garçon, 1996). Ce modèle comporte aussi un module neige. Des données d'évapotranspiration et de pluie sont à fournir en entrée. Il est utilisé en opérationnel dans les centres de prévision d'EDF et couvre une grande partie du territoire.

La plateforme de modélisation hydrologique PLATHYNES regroupe différents modèles dont MARINE² et ATHYS³. Cette plateforme, développée par le SCHAPI, permet de faire fonctionner ces modèles en prévision opérationnelle.

MARINE est un modèle distribué d'inspiration physique fonctionnant à pas de temps variable et particulièrement adapté pour la modélisation et à la prévision des crues éclair (Garambois, 2012). Il est composé de trois modules permettant : (i) d'estimer la saturation en eau des sols, (ii) d'estimer les écoulements latéraux de surface par le biais d'une approximation de la loi de Darcy, (iii) et de représenter les ruissellements de surface à l'aide d'une simplification des équations de Saint-Venant. Ce modèle dispose d'un modèle adjoint facilitant, entre autres, l'assimilation de données pour la prévision.

ATHYS (Marchandise, 2007) est une plateforme regroupant un ensemble de modèles hydrologiques spatialisés combinés à des modules de traitements géographiques et hydroclimatiques. Développé à l'IRD, cette plateforme de modélisation est composée de quatre modules. Le module MERCEDES présente différentes fonctions dont la prévision des crues, la gestion des ressources en eau et les études d'impacts provoqués par des changements climatiques ou anthropiques. Le module VISHYR est un outil de visualisation et de traitement des données hydroclimatiques. Enfin, le module VICAIR gère la visualisation et le traitement des données géographiques spatialisées, et le module SPATIAL est chargé de l'interpolation spatiale.

II.4 La famille des modèles GR (Génie Rural)

Irstea développe depuis les années 1980 une famille de modèles hydrologiques conceptuels, les modèles GR (Génie Rural). Ces derniers sont utilisés pour différents types d'application à caractère opérationnel (pour plus de détails, voir par exemple le chapitre 2 de la thèse de Yang (1993) ou le site web Irstea⁴).

Au sein de cette famille de modèle, un modèle spécialement conçu pour la prévision, a été développé par Tangara (2005) à partir du modèle GR4J (Perrin, 2000; Perrin et al., 2003). Il propose donc une version simplifiée de GR4J qui permet de faire une mise à jour simple de l'état du réservoir de routage. Ce nouveau modèle, nommé GRP (Génie Rural pour la Prévision de crue), possède trois paramètres à caler en mode prévision. Tangara (2005) propose aussi une méthode d'exploitation de l'erreur commise par le modèle, qui se base sur un procédé de type autorégressif.

Dans sa thèse, Berthet (2010) propose une structure optimisée de GRP fonctionnant au pas de temps horaire. En effet, le fonctionnement et la structure du modèle sont conditionnés par le pas de temps (Mouelhi, 2003, cité dans Berthet, 2010).

¹ MOdèle à Réservoirs de Détermination Objective du Ruissellement

² Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des évènements Extrêmes

³ ATelier HYdrologique Spatialisé

⁴ <http://webgr.irstea.fr/modeles/bref-historique/>

Berthet (2010) s'intéresse ensuite aux mises à jour du modèle, et réalise différents tests pour déterminer quels états du modèle il faut mettre à jour et par quelle méthode. Il fait le choix de tester la mise à jour de l'hydrogramme unitaire et de la pluie efficace selon une méthode « complète » qui donne pleinement confiance aux données assimilées. Il teste aussi la mise à jour du niveau du réservoir de routage selon une méthode « partielle » (filtre de Kalman) qui donne une confiance plus modérée aux assimilations. Ces différents essais n'ont pas permis d'identifier une meilleur mise à jour que celle proposée par Tangara (2005) effectuée sur le niveau du réservoir de routage selon une méthode « complète ». Il teste par ailleurs les réseaux de neurones artificiels (RNA) comme outil d'exploitation de l'erreur de prévision et la retient comme une alternative intéressante à la méthode développée par Tangara (2005). Actuellement, la version du modèle horaire GRP utilisée à des fins opérationnelles par les SPC est celle proposée par Berthet (2010). Nous présenterons en détail la structure et le fonctionnement du modèle GRP dans la partie III de ce rapport.

III Données et outils

III.1 Présentation de la base de données

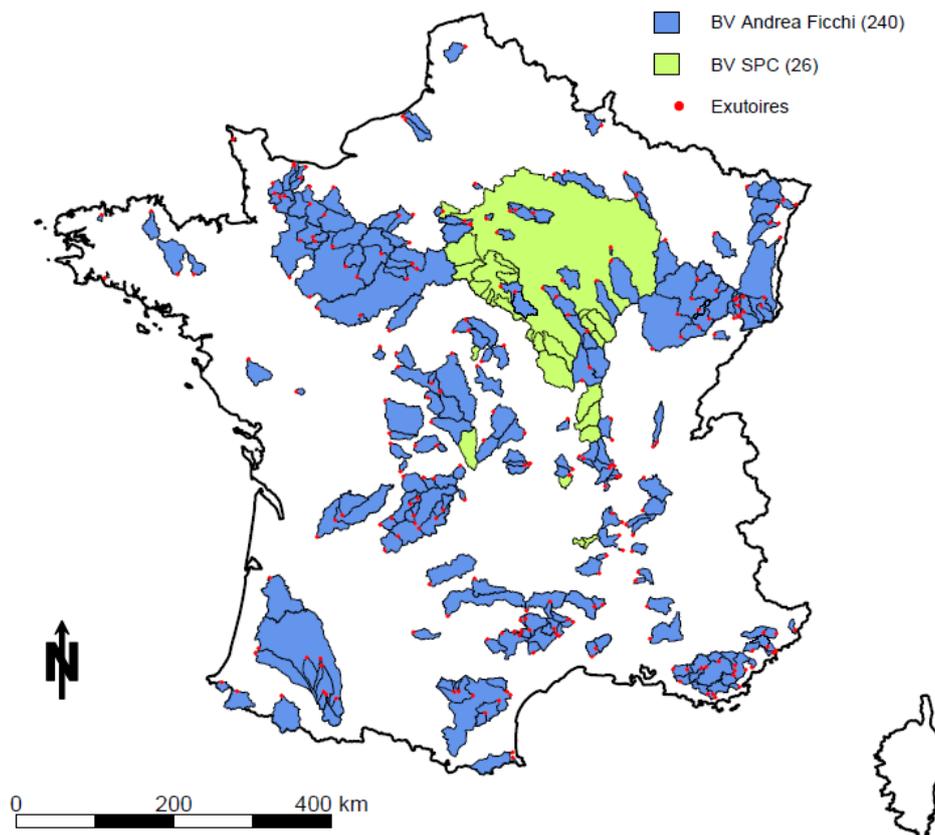


Figure 2 : Localisation des 266 bassins versants utilisés

De manière à assurer une bonne généralité à nos résultats, nous avons choisi de travailler sur un large échantillon de bassins versants français présentant des caractéristiques hydroclimatiques et physiques variées (Andreassian et al., 2006 ; Gupta et al., 2014) . En effet, le modèle GRP étant utilisé par la majorité des Services de prévision des crues (SPC) français, nous souhaitons sélectionner des modifications du modèle qui améliorent globalement les résultats.

Notre échantillon est composé de 266 bassins versants français (Figure 2), provenant de deux bases de données que nous présentons dans cette partie. L'intégralité des données hydrométéorologiques est disponible au pas de temps horaire du 1^{er} juillet 2004 au 31 juillet 2013. La première année de cette chronique étant utilisée pour la période d'initialisation (« warm-up ») du modèle, la période d'analyse effective sera donc de 8 ans.

III.1.1 Base de données des SPC

L'événement de crue qui a touché les bassins de la Seine et de la Loire en mai-juin 2016 a été un événement majeur. La Fédération Française des Assurances (FFA) estime que les dégâts indemnisés pour cette crue se sont élevés à 1,3 milliards d'euros pour l'ensemble du territoire français. Les départements de Seine-et-Marne, de l'Essonne et du Loiret ont été les plus touchés et comptabilisent près de 45% des dégâts. Les bassins versants de ces départements sont surveillés par les SPC Loire-Cher-Indre (LCI) et Seine-moyenne-Yonne-Loing (SmYL) qui ont utilisé le modèle GRP en opérationnel lors de cet événement. Les retours d'expérience ont fait apparaître des résultats mitigés du modèle¹. Il a donc paru important d'incorporer dans notre étude un certain nombre de bassins ayant été impactés par cet événement.

Une partie de notre échantillon est composée d'une sélection de bassins, effectuée à notre demande par les Services de Prévision des Crues (SPC) :

- Loire-Cher-Indre (LCI), service de la DREAL² Centre Val de Loire,
- et Seine-moyenne-Yonne-Loing (SMYL), service de la DRIEE³ Île-de-France.

Cet échantillon comporte 26 bassins versants répartis de façon homogène sur le territoire des SPC. L'objectif de cette sélection est d'avoir une bonne représentation des bassins versants impactés par les crues de mai-juin 2016, afin de donner des pistes de compréhension du potentiel rôle de la structure du modèle dans certains résultats obtenus lors de ces événements. L'événement de 2016 ne fait cependant pas partie de notre période d'étude, car un travail spécifique sur cet événement a été réalisé en parallèle de ce stage (stage de Claire Vrignaud, M2 SDUEE-HH, à Irstea).

Les données récoltées par le SPC Loire-Cher-Indre proviennent essentiellement du réseau de surveillance hydrométéorologique CRISTAL et de Météo-France qui fournit, en plus des mesures pluviométriques en temps réel, des prévisions météorologiques.

Le SPC Seine-moyenne-Yonne-Loing récupère les données hydrométriques auprès des services hydrométriques de la DRIEE, de la DREAL Centre Val de Loire et de la DREAL Bourgogne Franche Comté. Les observations et prévisions météorologiques sont fournies par Météo-France.

Les pluviomètres fournissent des observations ponctuelles qu'il faut spatialiser pour obtenir une pluie de bassin. La méthode d'interpolation utilisée par les SPC LCI et SMYL est la méthode des polygones de Thiessen. Une aire d'influence est attribuée à chaque pluviomètre ce qui permet de leur donner une pondération (α). La pluie de bassin est ensuite calculée à partir d'une moyenne pondérée : $P_{bassin} = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i$ où N est le nombre de pluviomètres, P_i la pluie ponctuelle au pluviomètre i et α_i , la pondération associée. Les poids attribués aux pluviomètres peuvent être modifiés (sans trop s'éloigner de la pondération initiale) si cela améliore les performances et les hydrogrammes prévus.

¹ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2017.02%20Rapport%20inondations%20mai-juin%202016.pdf>

² Direction Régionale de L'Environnement de l'Aménagement et du Logement

³ Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie

III.1.2 Base de données d'Andrea Ficchi

Les traitements décrits dans cette partie ont été réalisés par Andrea Ficchi. Nous en donnons un résumé pour une bonne compréhension des données utilisées.

III.1.2.1 Sources des données et traitements effectués

Les données hydroclimatiques sont issues des réanalyses SAFRAN et de la Banque HYDRO. Les données de la Banque HYDRO sont fournies par des services de l'État tels que les DREAL mais aussi par des organismes de recherche comme IRSTEA. Ces données sont ensuite administrées par le SCHAPI.

SAFRAN est un système d'analyse de variables atmosphériques qui s'étend de 1958 à 2013 avec une résolution spatiale de 8 km de côté. Les données sont ensuite agrégées à l'échelle du bassin versant. Les précipitations journalières sont calculées entre 6h UTC du jour j et 6h UTC du jour j+1.

Pour la période de « warm-up », ces données de précipitations journalières ont été désagrégées au pas de temps horaire de façon uniforme. Les données à des pas de temps plus fins n'étaient pas disponibles.

Entre le 01/07/2005 et le 31/07/2013, ce sont des données de stations pluviographiques (Météo France) au pas de temps 6 minutes qui ont été utilisées. Pour chaque bassin versant, l'aire d'influence des différents pluviomètres a été calculée à partir de la méthode des polygones de Thiessen. La répartition temporelle des pluies de bassin au pas de temps 6 minutes a été utilisée pour désagréger les pluies de bassin journalières SAFRAN.

Les données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle, uniquement disponibles au pas de temps journalier, sont produites par Météo-France et proviennent de la base de données SAFRAN. L'évapotranspiration potentielle journalière a été calculée à partir de la formule d'Oudin nécessitant uniquement le jour julien, la température journalière de l'air et la latitude du bassin versant. Afin d'obtenir l'évapotranspiration potentielle horaire, la donnée journalière a été désagrégée selon une parabole dont le maximum est atteint entre 12h et 14h et est nulle entre 19h et 7h.

III.1.2.2 Critères de sélection

Cet échantillon est constitué de 240 bassins versants français sélectionnés au sein d'une base de 3701 bassins selon plusieurs critères. Les bassins versants conservés présentent une faible influence nivale et anthropique et ont une superficie comprise entre 5 et 10 000 km². Ils ont aussi été sélectionnés selon la disponibilité des données hydrométéorologiques.

L'application des différents critères sur l'échantillon initial de bassins versants ont permis de sélectionner 223 bassins versants auxquels ont été ajoutés 17 bassins versants additionnels. Ces derniers ont été sélectionnés en relaxant certains critères afin de représenter au mieux la totalité du territoire français et de répondre à une demande d'ajout faite par le SPC Gironde-Adour-Dordogne.

III.1.3 Caractéristiques générales de l'échantillon

L'échantillon total des 266 bassins versants, relativement bien réparti sur le territoire français, est doté d'une grande variabilité de caractéristiques hydroclimatiques et morphologiques. Le Tableau 1 en présente quelques-unes.

	Superficie (km ²)	Altitude (m)	Longueur hydraulique (km)	Densité de drainage (km ⁻¹)	Débit moyen annuel (mm/an)	Pluie moyenne annuelle (mm/an)	ETP moyenne annuelle (mm/an)
Min	3,5	70	1,65	0,005	32	627	550
Médiane	373	392	24,65	0,066	322	916	667
Max	43825	1308	243,9	0,75	1480	2064	859

Tableau 1 : Caractéristiques générales de l'échantillon de bassins versants.

III.1.4 Analyse du bilan hydrique des bassins versants

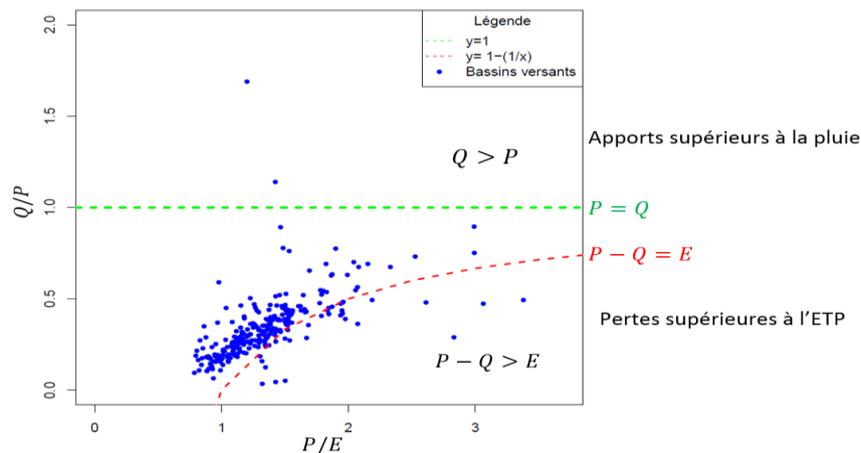


Figure 3: Diagramme de Turc représentant les bilans en eau des 266 bassins de l'échantillon

La Figure 3 est une variante du diagramme de Turc qui permet d'effectuer une première analyse du bilan en eau des bassins versants. Les pluies, débits et évapotranspirations potentielles, ont été moyennés sur la chronique entière en ayant préalablement retiré les pas de temps où le débit est lacunaire. L'ordonnée Q/P de ce diagramme représente le coefficient d'écoulement et l'abscisse P/E , l'inverse de l'indice d'aridité. On remarque que certains bassins versants sont horsains, dans le sens où ils présentent des bilans en eau excédentaires ou déficitaires. Deux bassins présentent un débit supérieur aux pluies (apport) et une trentaine de bassins sont quant à eux suspectés de subir des pertes souterraines vers une nappe profonde ou des bassins voisins. Ces différents comportements peuvent également être le signe de données douteuses.

La Figure 4 permet de localiser ces bassins horsains, majoritairement situés dans la partie Est de la France. Les bassins ont été placés sur une carte hydrogéologique. Nous avons ensuite proposé des hypothèses pour chaque bassin en fonction du contexte hydrogéologique rencontré sur cette carte. Une majorité des bassins se trouvent en contexte karstique. Pour les autres bassins, nous avons émis l'hypothèse qu'il pouvait y avoir des problèmes liés à des surestimations de pluies (principalement pour des bassins de petite taille) ou encore des bassins sous influence anthropique, notamment avec la présence de certains transferts hydroélectriques.

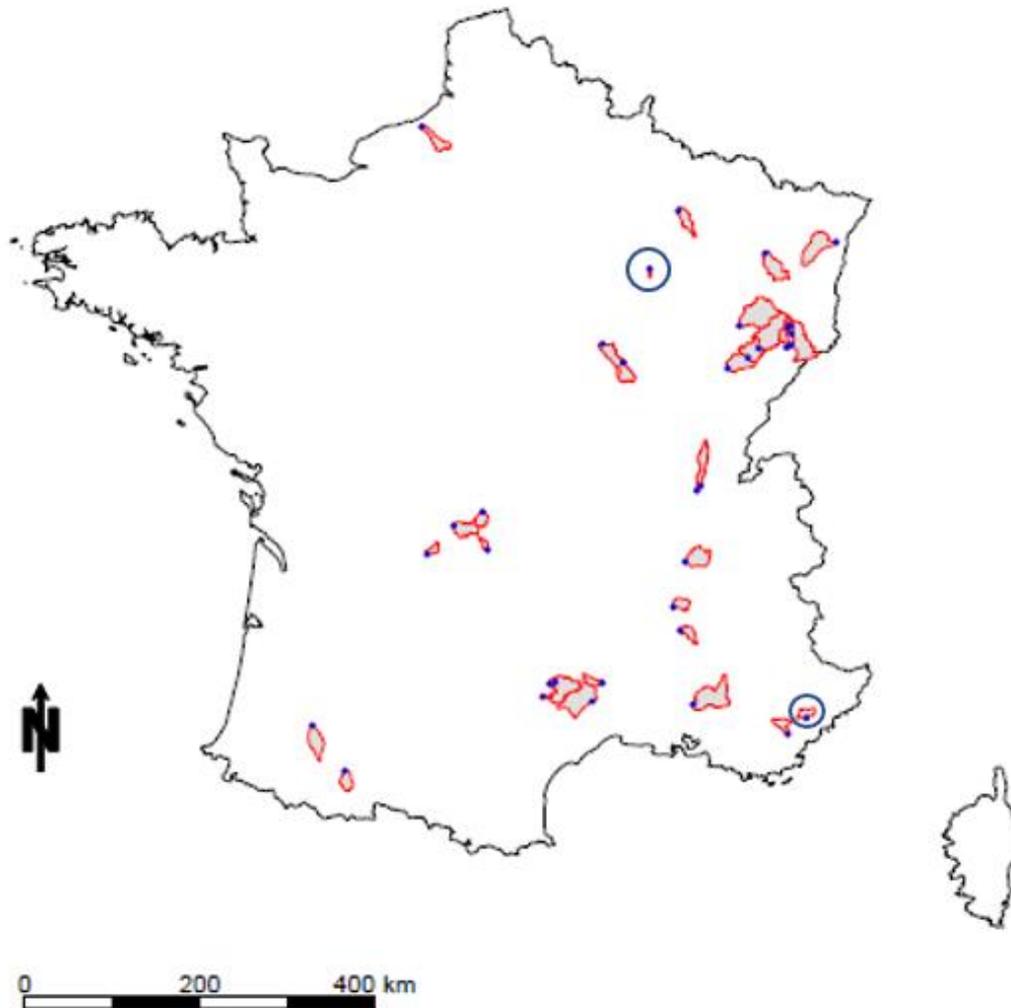


Figure 4 : Localisation géographique des bassins versants horsains (les bassins entourés sont excédentaires)

III.2 Description du modèle GRP

Le modèle GRP est actuellement utilisé par la grande majorité des services de prévision des crues (SPC) en France, ainsi que par quelques utilisateurs privés et pour des applications de recherche.

Le modèle GRP est un modèle **continu** dans le sens où il emploie les conditions météorologiques antérieures à l'évènement en cours afin de déterminer les conditions d'humidité du bassin versant au moment de la prévision.

Il est aussi défini comme **global** car il considère le bassin versant comme une seule entité de calcul. La variabilité spatiale des caractéristiques et des précipitations du bassin n'est donc pas explicitement prise en compte.

Enfin, ce modèle fait intervenir dans sa structure plusieurs **réservoirs** reliés entre eux, qui se remplissent et qui se vident afin de permettre de modéliser la réponse du bassin versant. Le mode de construction de ce modèle conduit à le classer entre modèles conceptuels et empiriques.

La méthode de correction employée ici est la méthode proposée par Tangara, établie d'après la formule suivante :

$$\hat{Q}_{t-1 \rightarrow t} = Q_{t-1 \rightarrow t} * \left(\frac{Q_{Obs t}}{Q_{t-1 \rightarrow t}} \right)^\alpha \quad \text{(III.1)}$$

Où :

- $\hat{Q}_{t-1 \rightarrow t}$ est le débit prévu et corrigé pour le pas de temps t au pas de temps $t - 1$
- $Q_{Obs t}$ est le débit observé au pas de temps t
- $Q_{t-1 \rightarrow t}$ est le débit prévu avant la correction
- α est un coefficient fixé à 0.45

La comparaison de cette méthode avec l'approche par réseau de neurones artificiel (RNA) ayant déjà fait l'objet de tests comparatifs approfondis par Berthet (2010), nous n'utiliserons pas l'approche RNA ici pour des raisons pratiques de temps de calcul.

IV Méthodologie

Dans cette partie, nous présentons les faiblesses actuelles du modèle et les pistes d'amélioration envisagées pour y pallier. Nous présentons un protocole de test et d'analyse visant à quantifier les évolutions de performance entre les versions testées.

IV.1 Pistes d'amélioration envisagées

Des travaux récents autour du modèle, ainsi que des retours d'expérience reçus sur le modèle GRP, par exemple sur les crues de septembre 2013 et janvier 2014 dans le Sud-Est (Viatgé & Perrin, 2016) ou sur les crues de 2016 par les SPC LCI et SMYL, ont permis de mettre en évidence certaines difficultés, en particulier :

- La sous-estimation fréquente de l'amplitude du pic de crue et du volume écoulé lors des événements.
- La réponse « molle » du modèle lors de la montée de crue, ce qui se traduit par un retard à la montée et entre les pics de crue prévu et observé.

Afin de mieux prévoir et d'évaluer la montée et le pic de crue, nous avons envisagé plusieurs voies d'améliorations. Les limitations rencontrées par ce modèle sont potentiellement liées à sa structure, ses stratégies de calage ou encore à la façon dont l'assimilation des débits observés est effectuée. Par conséquent, nous avons décidé d'intervenir sur la structure du modèle et sur ses modalités de calage. La procédure d'assimilation n'a pas été traitée du fait de la durée trop limitée du stage.

IV.1.1 Structure du modèle

IV.1.1.1 Réservoir d'interception

Nous pouvons définir le processus d'interception comme la partie des précipitations interceptées par la végétation qui n'atteint jamais le sol et qui est ensuite évaporée. Les travaux de thèse de Ficchi (2017) ont permis de démontrer, de façon empirique et formelle (preuve mathématique), que l'utilisation de la fonction de neutralisation à des pas de temps infra-journaliers pour représenter l'interception, n'était pas correcte car plus le pas de temps choisi est court, plus l'interception est réduite. Les volumes d'eau interceptés au pas de temps horaire

sont très inférieurs à ceux obtenus par la même fonction au pas de temps journalier. Cette sous-estimation, à des pas de temps réduits, conduit à une augmentation des volumes d'eau en sortie de cette étape de neutralisation. Ses travaux sur le modèle GR4 montrent que cela déstabilise le fonctionnement du modèle, avec une compensation réalisée par le coefficient d'échange en eau du modèle qui aura tendance à accentuer les pertes. En utilisant un réservoir d'interception avec une capacité permettant de reproduire les volumes journaliers interceptés, les effets de compensations sont évités et les performances du modèle sont améliorées. La capacité de ce réservoir est déterminée seulement de manière climatique et ne correspond donc pas à un paramètre supplémentaire du modèle à optimiser.

Nous faisons l'hypothèse qu'un phénomène similaire se produit dans le modèle GRP au pas de temps horaire, et que le déficit de volume intercepté est compensé par un paramètre d'ajustement (CORR) inférieur à 1. Le coefficient s'appliquant tout le temps, cela pourrait limiter les volumes en période de crue. L'utilisation du réservoir d'interception, en permettant des valeurs du paramètre CORR plus proches de 1, pourrait limiter ces phénomènes de sous-estimation.

Une première modification testée a donc consisté à introduire la solution proposée par Ficchi (2017). Nous avons remplacé la fonction de neutralisation de la pluie par un réservoir d'interception avec une capacité fixée à quelques millimètres (comme le préconise Andréa Ficchi dans sa thèse). Cette version du modèle sera nommée *GR3P-I*.

Dans sa thèse, Andrea Ficchi considère deux méthodes différentes pour déterminer la capacité optimale du réservoir d'interception : l'une consiste à calculer la pluie nette en premier, et l'autre consiste à calculer l'évaporation en premier. Dans le cadre de ce stage, nous n'avons utilisé que la seconde méthode, privilégiée par Ficchi (2017).

Cette fonction de neutralisation est définie par les équations suivantes (Perrin et al., 2003) :

$$\text{Si } P \geq E \text{ alors } P_n = P - E \text{ et } E_n = 0 \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Si } P < E \text{ alors } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P \quad (\text{IV.2})$$

où : E et P représentent respectivement l'évapotranspiration potentielle et les précipitations. P_n et E_n représentent la pluie et l'évapotranspiration nette.

L'interception (I) est calculée comme s'il y avait un réservoir d'interception de capacité nulle. (Perrin et al., 2003). L'interception peut se calculer comme la différence entre P et P_n et d'après les équations (IV.1) et (IV.2), si $P \geq E$ alors $I = E$ sinon $I = P$. Le calcul de l'interception peut donc être reformulé de la façon suivante :

$$I = \min(E, P) \quad (\text{IV.3})$$

Pour des modèles fonctionnant au pas de temps journalier, l'utilisation de la fonction de neutralisation, correspondant à un réservoir d'interception de capacité nulle, semble adéquate. Dans ses travaux de thèse, Andrea Ficchi a montré que l'ajout d'un réservoir d'interception, au pas de temps journalier, n'apportait aucune amélioration significative à ce pas de temps. De plus, il cite deux auteurs (Gerrits, 2010; Savenije, 2004), qui précisent que l'échelle de temps du processus d'interception est de l'ordre d'un jour. Il faudra donc de l'ordre d'un jour pour que la pluie interceptée par la végétation s'évapore.

Dans le cadre de ce stage, nous utiliserons aussi l'interception journalière, calculée à partir de la fonction de neutralisation, comme référence afin de déterminer la capacité du réservoir d'interception permettant d'obtenir un volume total intercepté au pas de temps horaire équivalent au volume total intercepté au pas de temps journalier. Pour ce faire, nous avons

agrégé les données de précipitation et d'évapotranspiration horaires au pas de journalier, puis calculé l'interception journalière (I_j) à partir de la formule suivante :

$$I_j = \min(E, P) \quad (\text{IV.4})$$

où : E et P représentent l'évapotranspiration potentielle et les précipitations journalières.

Nous avons ensuite sommé les I_j sur toute la chronique afin d'obtenir le cumul de pluie intercepté ($I_{tot|j}$). Enfin, nous avons calculé l'interception horaire cumulée ($I_{tot|h}$) sur toute la période. La Figure 6 propose une représentation du réservoir d'interception ainsi que les différentes étapes de calcul qui ont été effectuées pour chaque valeur testée de capacité du réservoir d'interception.

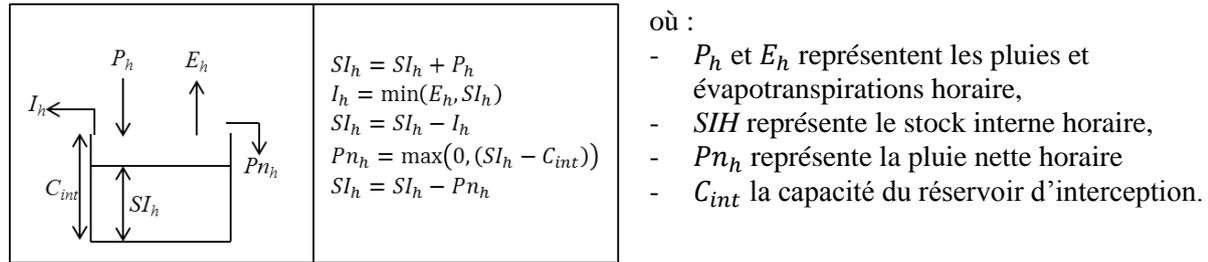


Figure 6 : Schéma du réservoir d'interception et étapes de calcul

Pour chaque capacité testée, nous avons calculé le rapport entre l'interception cumulée horaire et l'interception cumulée journalière, noté $RI_{h|j}$:

$$RI_{h|j} = \frac{I_{tot|h}}{I_{tot|j}} \quad (\text{IV.5})$$

où $I_{tot|h}$ et $I_{tot|j}$ sont les interceptions totales horaires et journalières respectivement. La valeur optimale de ce ratio est 1, ce qui correspond à $\sum I_h = I_{tot|j}$. Afin d'approcher cette valeur, nous avons testé différentes capacités du réservoir d'interception : 0.1 mm, de 0.25 à 5 mm par pas de 0.25 mm, 4, 5, 7.5, 10 et 15 mm. Cela permet d'identifier la valeur assurant, sur l'ensemble de la série, la cohérence entre les flux d'interception horaires et les flux obtenus par simple neutralisation de P et ETP au pas de temps journalier.

IV.1.1.2 Optimisation de la capacité du réservoir de production

La capacité du réservoir de production est actuellement considérée comme un paramètre fixe du modèle. La capacité de ce réservoir (CAP, 275 mm) est donc commune à tous les bassins versants français. Le choix de fixer ce paramètre vient du fait que le laisser libre n'apportait pas d'amélioration de performance au modèle lorsque celui-ci est calé avec un objectif de prévision. Cela pourrait venir du fait que, l'objectif de prévision privilégiant les dynamiques de court terme, la mise à jour tendrait à masquer la question du bilan en eau de long terme qui dépend en partie de ce paramètre.

Or ce paramètre présente une importante variabilité régionale lorsqu'il est laissé libre dans le modèle de simulation. En effet, ce paramètre, qui dépend des quantités de pluie et d'évaporation, joue un rôle essentiel dans la détermination du bilan en eau et des pertes évaporatoires.

La fixation de la capacité du réservoir de production ne laissant que le paramètre d'ajustement du volume (CORR) comme volant d'ajustement du bilan, nous pouvons faire l'hypothèse que cela peut impacter la simulation des crues. Le rendement via le réservoir de production

implique des variations saisonnières, alors que le paramètre CORR agit de la même façon toute l'année.

Nous avons donc décidé de rendre libre ce paramètre afin d'éviter de possibles phénomènes de compensation. Pour éviter les interactions avec la mise à jour lors de l'optimisation, ce paramètre sera calé en mode simulation. D'un point de vue pratique, on utilisera la procédure séquentielle décrite à la partie IV.1.2.

Cette version du modèle, possédant quatre paramètres à optimiser sera nommée *GR4P-CAP*. Nous testerons aussi une version avec le réservoir d'interception : *GR4-I-CAP*. D'autres variantes seront testées dans le cadre du stage, où l'on fixera aussi certains des trois paramètres (CORR, ROUT ou TB) à leur valeur obtenue en simulation.

IV.1.1.3 Modification de la fonction d'ajustement de la pluie efficace

Le paramètre CORR applique une correction multiplicative unique sur les volumes produits par le réservoir de production :

$$Pr' = CORR. (Perc + Pn - Ps) \quad (IV.6)$$

Cette correction ne change donc pas suivant les saisons ou les conditions hydrologiques, et les volumes d'eau perdus/gagnés sont une fonction croissante de la pluie efficace produite. Or, la fonction au sein du modèle de simulation i) varie en fonction du temps et ii) sature à une valeur maximale (correspondant à la valeur du paramètre).

Nous faisons l'hypothèse qu'une fonction variable dans le temps et présentant une saturation pourrait limiter les problèmes de sous-estimation des volumes lors des événements (le paramètre CORR étant majoritairement inférieur à 1 sur un grand nombre de bassins).

L'idée serait donc de donner à la fonction de correction une dynamique saisonnière (par ex. liée au réservoir de production) voire événementielle (liée au réservoir de routage) comme cela est fait dans le modèle de simulation, pour voir si cela joue significativement dans la restitution des volumes de crue. Nous testerons donc des solutions inspirées du modèle de simulation.

IV.1.2 Calage du modèle

IV.1.2.1 Critère de calage

La seconde voie d'amélioration consiste à chercher des critères de calage plus pertinents afin d'optimiser les paramètres du modèle dans le but de corriger le déficit de volume et le décalage temporel du pic de crue. La phase de calage du modèle est réalisée de façon automatique par une méthode dite « pas-à-pas », qui recherche la valeur optimale de chaque paramètre. Cette procédure d'optimisation tente de minimiser l'erreur commise par le modèle sur les débits prévus. Actuellement, la fonction objectif employée est l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur les débits prévus pour un horizon donné. Ce critère engendre un poids plus élevé pour les forts débits du fait de sa formulation quadratique :

$$RMSE_{prev} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i+H) - Q_{prev}(i+H))^2} \in]0, +\infty[\quad (IV.7)$$

Où :

- H est l'horizon de prévision, N le nombre de pas de temps pris en compte
- $Q_{obs}(i+H)$ et $Q_{prev}(i+H)$ sont les débits observés et prévus à la date $t+H$.

IV.1.2.2 Modification de la stratégie de calage

La stratégie de calage actuelle est réalisée en mono-objectif (une seule fonction objectif) et les paramètres sont optimisés en prévision (avec mise-à-jour). Nous proposons de modifier cette stratégie de calage en s'inspirant de l'approche multi-objectif développée par Facundo Alonso dans ses travaux de thèse avec Nicolas Le Moine, qui associe calage en simulation et en prévision.

L'exploration d'une approche multi-objectif étant en test dans ces travaux, nous nous orientons ici sur une approche plus simple de calage séquentiel, qui consiste à :

- 1) Caler les paramètres du modèle d'abord en simulation (sans assimilation),
- 2) Fixer certains paramètres, typiquement les paramètres de bilan (la capacité du réservoir de production et éventuellement le paramètre CORR) aux valeurs ainsi obtenues,
- 3) Optimiser les paramètres restants en prévision, comme cela est fait actuellement.

Lorsqu'on optimise les paramètres en simulation, la fonction-objectif (RMSE) est calculée d'après l'équation suivante, :

$$RMSE_{sim} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i) - Q_{prev}(i))^2} \quad \in]0, +\infty[\quad \text{(IV.8)}$$

On obtient ainsi un jeu de paramètre $\{\theta\}_{sim}$. Quand on optimise les paramètres en prévision, la fonction-objectif est calculée pour un horizon donné à partir de l'équation (IV.7) et on obtient donc un jeu de paramètre $\{\theta\}_{prev}$ différent de celui obtenu en simulation.

IV.2 Mise en place d'un cadre de test et d'analyse

IV.2.1 Modèle de référence pour les analyses

Dans un premier temps, nous avons utilisé la version actuelle du modèle GRP sur notre échantillon de bassins versants. Ce modèle servira de référence afin d'évaluer les performances obtenues avec les différentes modifications envisagées. Afin de déterminer la version du modèle la plus prometteuse, nous testerons les modifications envisagées séparément et en les combinant.

IV.2.2 Méthode de test et choix du scénario de pluies futures

Le modèle sera testé de manière rétrospective sur la période de données disponible, comme s'il fonctionnait à chaque pas de temps en prévision. Nous emploierons le test de calage-contrôle croisés « *split-sample test* » (Klemeš, 1986) qui consiste à séparer la chronique en deux périodes. La première période P_1 sera utilisée pour caler le modèle et le jeu de paramètres θ_1 obtenu permettra de tester la qualité du modèle sur la seconde période P_2 . La seconde phase de ce test consiste à caler le modèle sur P_2 et de contrôler sur P_1 avec le jeu de paramètre θ_2 . Nous analyserons les distributions des critères de performance obtenus en validation (contrôle) sur les deux périodes.

Nous testerons un scénario de pluies futures « parfaites » en utilisant les pluies observées à postériori comme pluies futures prévues. Ce scénario de pluie est bien évidemment très

optimiste, mais ce choix permettra d'analyser les performances du modèle indépendamment des incertitudes liées aux prévisions des pluies.

IV.2.3 Choix de l'horizon de calage

Pour simplifier les travaux et limiter le nombre de tests, nous avons choisi, dans le cadre de ce travail, d'utiliser le temps de réponse moyen du bassin versant à un évènement pluvieux comme horizon de calage, à la fois pour le calage des paramètres en prévision et pour l'analyse des performances. Ce temps se définit comme la durée écoulée entre le centre de gravité d'une averse et la pointe de crue. L'usage du temps de réponse comme horizon de calage permet donc d'optimiser le fonctionnement du modèle pour ce temps caractéristique de la crue, ce qui est intéressant d'un point de vue opérationnel.

Les temps de réaction ont été déterminés par une fonction de corrélation croisée entre les séries de pluie et de débit. On détermine ainsi le décalage Δt (« lag ») qui maximise la corrélation entre ces deux séries.

L'outil opérationnel limite l'horizon de calage à 72 h et l'utilitaire de calage calcule les critères de performance uniquement pour les 15 échéances suivantes : 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66 et 72 h. L'horizon de calage choisi sera donc l'une des 15 échéances la plus proche du temps de réaction calculé. La distribution de ces temps de réponse et les horizons de calage associés sont présentés en Figure 7.

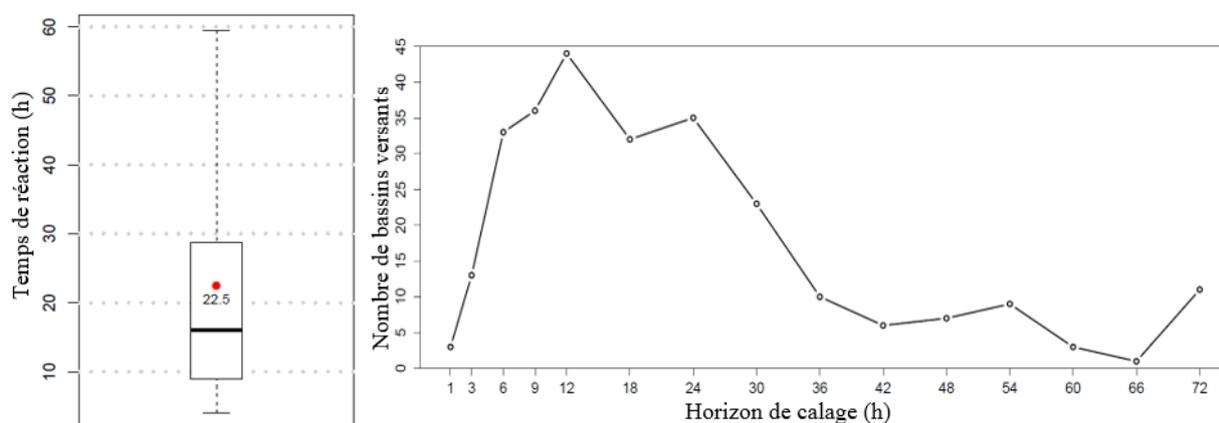


Figure 7 : Distribution des temps de réaction et des horizons de calage associés sur les 266 bassins (la boîte à moustaches donne les quantiles 0.05, 0.25, 0.50, 0.75 et 0.95 et le point montre la moyenne)

Notre échantillon est majoritairement composé de bassins versants ayant un temps de réaction inférieur à 30 heures et le temps de réaction médian est d'environ 16 heures. Compte tenu de ces résultats, les distributions des critères de performance seront présentées pour les horizons de prévision suivants : 1 h, 3 h, 6 h, 9 h, 12 h, 24 h, et 48 h.

IV.2.4 Critères de performance

Afin d'évaluer les performances des modèles testés, nous avons utilisé différents critères. Certains sont calculés en continu sur la série entière et d'autres seulement sur les évènements de crue. On retrouve dans cette sélection des critères déjà utilisés dans l'outil opérationnel GRP. L'objectif était d'avoir des critères comparables entre bassins.

IV.2.4.1 Critères continus

➤ Le critère de persistance

Ce critère permet de comparer l'erreur du modèle à celle d'un modèle de référence naïf qui propose le dernier débit observé comme prévision ($Q_{prev}(i+H) = Q_{obs}(i)$) :

$$PI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i+H) - Q_{prev}(i+H))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(i+H) - Q_{obs}(i))^2} \in] - \infty, 1[\quad (\text{IV.9})$$

Où :

- H est l'horizon de prévision, N le nombre de pas de temps pris en compte
- $Q_{obs}(i+H)$ et $Q_{prev}(i+H)$ sont les débits observés et simulés à la date $i+H$
- $Q_{obs}(i)$ est le débit observé au pas de temps i .

Quand ce critère est de 1, le modèle est parfait (impossible !). Quand il vaut 0, le modèle testé est similaire au modèle de référence (ou de persistance). Enfin, si ce critère est négatif, alors le modèle testé est moins performant que ce modèle de référence. Le C2MP (Mathevet et al., 2006) est une version bornée du critère de persistance, permettant d'éviter de donner un poids trop important aux valeurs fortement négatives de la persistance lorsque l'on regarde les moyennes de critères sur un ensemble de bassins :

$$C2MP = \frac{PI}{2 - PI} \in] - 1, 1[\quad (\text{IV.10})$$

➤ L'erreur absolue relative moyenne

À l'inverse des critères précédents, cette erreur, n'étant pas élevée au carré, n'accentue pas le poids des erreurs importantes commises par le modèle pour les forts débits. Plus cette erreur tend vers 0, plus les performances du modèle sont élevées.

$$EARM = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{obs}(i+H) - Q_{prev}(i+H)|}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}(i+H)} \in]0, +\infty[\quad (\text{IV.11})$$

Pour un horizon de prévision donné H , ce critère calcule pour les N pas de temps l'erreur absolue commise par le modèle entre les débits observés et prévus. La somme des erreurs est ensuite rapportée à la somme des débits observés. En d'autres termes, l'erreur absolue faite à chaque pas de temps est rapportée au débit moyen.

IV.2.4.2 Critères évènementiels

Similairement à ce qui a été fait dans la thèse d'Andrea Ficchi (2017), nous utiliserons des critères pas seulement calculés sur la totalité de la chronique, mais également à l'échelle évènementielle. Il s'agira notamment de critères de franchissement de seuils, sur les volumes, de retard en montée ou sur les pointes. La sélection d'évènements de crue est réalisée via l'outil opérationnel (Irstea, 2017). Cette sélection est composée :

- des 18 évènements de débit présentant les pics de crue les plus élevés,
- des 6 plus importants évènements pluviométriques non compris dans les 18 évènements de débits précédemment sélectionnés.

La Figure 8 rend compte de la saisonnalité des évènements. Les évènements de crue les plus importants surviennent principalement en hiver (courbe rouge) tandis que les évènements pluviométriques n'ayant pas provoqués de crue (courbe noire) sont majoritairement observés en

été et à l'automne. Ces deux types d'événements se déroulent à des saisons différentes du fait des conditions initiales d'humidité du sol : en hiver les sols sont plus souvent saturés en eau qu'en été et ne permettent donc pas d'absorber autant de pluie.

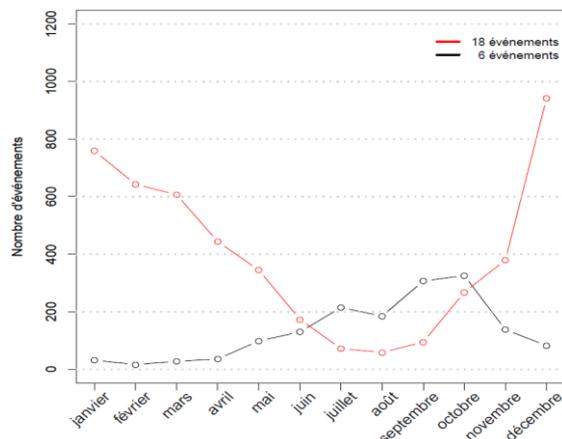


Figure 8: Saisonnalité des événements sélectionnés

➤ *Critères de franchissement de seuil*

Ces critères permettent d'évaluer la capacité du modèle à prévoir les dépassements de seuil préalablement définis (comme les seuils de vigilance). Ces critères s'intéressent à la réalisation d'un événement ou non et à sa prévision (ou non) par le modèle. Ils permettent donc d'obtenir quatre configurations différentes (AV, FA, AM et NAV) regroupées dans un tableau de contingence (Tableau 2) qui pourra être analysé afin d'évaluer les performances du modèle. En pratique, les situations où le débit observé à l'instant de prévision est supérieur au seuil choisi ne sont pas prises en compte car l'assimilation du dernier débit observé induirait un débit prévu lui aussi supérieur au seuil. Ce cas de figure aurait donc pour effet de surestimer les performances du modèle. Une fois ces situations écartées, on observe pour chaque pas de temps si les débits observés et prévus, sur la plage de prévision, dépassent ou non le seuil choisi. La plage de prévision correspond à l'horizon de calage choisi, qui dans notre cas est relatif au temps de réaction du bassin. Enfin, nous avons choisi d'utiliser le quantile Q95 comme seuil de vigilance.

Observation

		Observation	
		Dépassement	Non dépassement
Prévision	Dépassement	Alerte valable (AV)	Fausse alerte (FA)
	Non dépassement	Alerte manquée (AM)	Non alerte valable (NAV)

Tableau 2: Table de contingence de dépassement de seuil

Un bon modèle tend à maximiser les alertes valables et les non-alertes valables (moins utile pour évaluer les performances). Il doit aussi éviter à tout prix les alertes manquées, ainsi que les fausses alertes, les premières ayant potentiellement des conséquences beaucoup plus dramatiques que les secondes.

Ce tableau de contingence permet de comptabiliser le nombre d'occurrence des quatre configurations sur toute la période d'analyse. À partir de ce dernier, différents critères ont été proposés dans la littérature afin de faciliter l'interprétation de ce tableau.

La probabilité de détection (*POD*) représente le rapport entre le nombre d'évènements de dépassement de seuil prévu et le nombre d'évènements réellement observés. Plus le nombre

d'alertes manquées est faible, plus ce critère tend vers sa valeur optimale qui est de 1 (pour $AM=0$).

$$POD = \frac{AV}{AV + AM} \quad (IV.12)$$

Le taux de fausses alertes (FAR) renseigne la proportion de fausses alertes prévues sur la totalité des dépassements prévus. Ce score est optimal ($FAR = 0$) lorsque le nombre de fausses alertes est nul.

$$FAR = \frac{FA}{AV + FA} \quad (IV.13)$$

L'indice de succès critique représente le rapport entre le nombre d'alertes valables et l'ensemble des dépassements observés (alertes valables et manquées) et fausses alertes prévues. Ce score est optimal ($CSI=1$) lorsqu'un évènement ou non-évènement est bien prévu ($AM=FA=0$).

$$CSI = \frac{AV}{AV + AM + FA} \quad (IV.14)$$

➤ *Critère d'erreur sur l'amplitude des pointes de crue*

Ce critère calcule l'erreur (relative) en amplitude entre les pics de crue observés et prévus. Il est négatif quand la pointe de crue prévue est sous-estimée, positif dans le cas d'une surestimation et atteint sa valeur optimale en 0.

$$\Delta Q_{max} = \frac{Q_{prev}^m - Q_{obs}^m}{Q_{obs}^m} \quad (IV.15)$$

avec : Q_{prev}^m et Q_{obs}^m , les débits maximum observés et prévus pour un évènement de crue.

➤ *Critère de retard de prévision des pointes de crue*

Ce critère calcule simplement l'intervalle de temps séparant les pics de crue prévus et observés. Habituellement les prévisions sont en retard et le critère est négatif ; Cependant il est possible que les prévisions soient en avance, auquel cas ce critère sera positif. Afin de permettre une comparaison de ce critère entre bassins, nous avons choisi de normer ce critère par un temps caractéristique propre à chaque bassin correspondant au temps de réaction décrit au paragraphe IV.2.3.

$$R_p = \frac{t(Q_{obs}^p) - t(Q_{prev}^p)}{t_r} \quad (IV.16)$$

avec : $t(Q_{obs}^p)$ et $t(Q_{prev}^p)$, les instants où les débits maximums observés et prévus pour un évènement de crue sont atteints et t_r le temps de réaction du bassin versant.

➤ *Critère de retard à la montée (Berthet, 2010)*

Ce critère permet d'évaluer le retard moyen à la montée de crue en définissant en premier lieu un dépassement de seuil de débit minimum noté Q_m représentant le début de la montée de crue. Lors d'un évènement de crue, nous calculons le retard $\Delta t(q) = \hat{t}(q) - t(q) \forall q > Q_m$, c'est-à-dire le temps écoulé entre les instants où les débits observés et prévus dépassent le seuil Q_m

(choisi de façon arbitraire comme étant le quantile 50). Nous calculons ensuite $Q_M = \min(\max(Q_{obs}), \max(Q_{prev}))$ afin d'avoir un critère de retard moyenné sur tous les débits compris entre Q_m et Q_M . Ce critère est négatif lorsque les prévisions sont en retard et positif lorsqu'elles sont en avance.

$$R_m = -\frac{1}{Q_M - Q_m} \int_{Q_m}^{Q_M} t^{Prev}(Q) - t^{obs}(Q) dQ = -\frac{1}{Q_M - Q_m} \int_{t_0}^{t_1} \tilde{Q}_{obs}(t) - \tilde{Q}_{prev}(t) dt \quad (IV.17)$$

Ceci est équivalent à :

$$R_m = -\frac{1}{Q_M - Q_m} \sum_{i=1}^n \tilde{Q}_{obs} - \tilde{Q}_{prev} \quad (IV.18)$$

$$avec \left\{ \begin{array}{l} \tilde{Q}_{obs}^i = \min \left(Q_M, \max \left(Q_m, \max(Q_{obs}^i, \tilde{Q}_{obs}^{i-1}) \right) \right) \\ \tilde{Q}_{prev}^i = \min \left(Q_M, \max \left(Q_m, \max(Q_{prev}^i, \tilde{Q}_{prev}^{i-1}) \right) \right) \end{array} \right\} \quad (IV.19)$$

IV.3 Synthèse et nomenclature des versions testées

Le Tableau 3 récapitule les versions du modèle GRP testées :

Nomenclature	Nombre de paramètres libres	Modifications/Ajouts	Commentaires
<i>GRP0</i>	3	-	Version initiale
<i>GR4P-I</i>	4	Insertion d'un réservoir d'interception (<i>I</i>)	Capacité optimisée
<i>GR3P-I</i>	3		Capacité fixée
<i>GR4P-CAP-SIM</i>	4	Optimisation de la capacité du réservoir de production (<i>CAP</i>) avec les autres paramètres	Optimisation sans MAJ des quatre paramètres
<i>GR4P-CAP-PREV</i>	4		Optimisation avec MAJ des quatre paramètres
<i>GRP-CAP</i>	4	Capacité optimisée du réservoir de production Calage séquentiel des paramètres (calage d'abord sans MAJ, puis avec MAJ sauf pour un paramètre laissé à sa valeur optimisée sans MAJ)	CAP optimisé sans MAJ
<i>GRP-ROUT</i>	4		ROUT optimisé sans MAJ
<i>GRP-TB</i>	4		TB optimisé sans MAJ
<i>GRP-CORR</i>	4		CORR optimisé sans MAJ
<i>GRPI-CAP-ROUT</i>	4	Réservoir d'interception avec capacité fixée Capacité optimisée du réservoir de production Calage séquentiel des paramètres (calage d'abord sans MAJ, puis avec MAJ sauf pour deux paramètres laissés à leurs valeurs optimisées sans MAJ)	CAP et ROUT sans MAJ
<i>GRPI-CORR-CAP</i>	4		CORR et CAP sans MAJ
<i>GRPI-CORR-ROUT</i>	4		CORR et ROUT sans MAJ
<i>GRPI-CORR-TB</i>	4		CORR et TB sans MAJ
<i>GRPI-ROUT-TB</i>	4		ROUT et TB sans MAJ
<i>GRPI-TB-CAP</i>	4		TB et CAP sans MAJ
<i>GR3PI-FE</i>	3		Réservoir d'interception avec capacité fixée
<i>GR3PI-FL</i>	3	Modification de la fonction d'échange en eau	Fonction d'échange linéaire

Tableau 3 : Nomenclature et récapitulatif des modèles GRP testés

IV.4 Présentation graphique des résultats

Afin d'analyser et de synthétiser les résultats obtenus, nous avons opté pour une représentation graphique sous forme de *boîtes à moustaches* (ou boxplot). Ces derniers permettent de rendre compte des distributions des performances des différents modèles testés, ce qui facilitera la comparaison des modèles. Les moustaches représentent les quantiles 5 et 95 %, les boîtes représentent les quantiles 25, 50 (médiane, trait en gras) et 75 %, enfin la moyenne est représentée par un point rouge (Figure 9). Les valeurs extrêmes (5 % des valeurs les plus faibles et des plus élevées) ne sont pas représentées. La boîte contient 50 % des valeurs, les traits reliant la boîte aux moustaches contiennent chacun 20 % des valeurs.

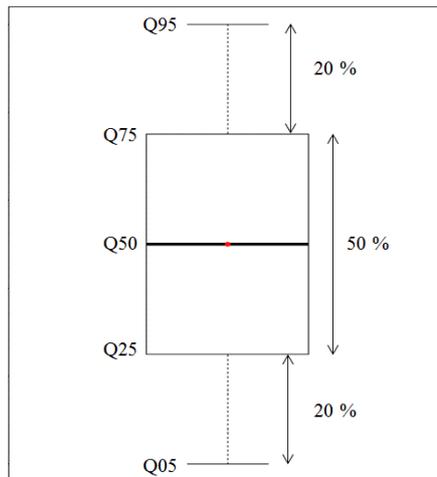


Figure 9 : Exemple d'une boîte à moustache

V Résultats

Dans cette partie, nous exposerons les analyses des différentes versions testées. Ensuite, nous présenterons l'évaluation des performances de la version initiale de GRP qui servira de référence afin de déterminer si les modifications entraînent une amélioration significative des performances. Les différents critères de performance ont été calculés pour tous les horizons. Cependant, par souci de synthèse, nous ne présenterons que les résultats jugés les plus intéressants.

V.1 Évaluation de la version de référence : *GRP0*

V.1.1 Distribution des paramètres

La distribution des trois paramètres libres du modèle pour l'ensemble de nos bassins versants est présentée en Figure 10. Le paramètre TB, représentant le décalage temporel entre pluie et débit, a une distribution relativement similaire à celle des temps de réaction calculés. Le paramètre CORR est globalement inférieur à 1. Cela est assez cohérent avec les autres GR utilisés en simulation, où les fonctions d'échanges en eau souterraine simulent globalement plutôt des pertes vers les nappes. Il peut aussi être le signe de phénomènes de compensation d'un volume d'eau intercepté trop faible pour équilibrer le bilan en eau. La distribution du paramètre ROUT est assez dispersée, indiquant de potentiels problèmes de sensibilité lors de la phase d'optimisation du jeu de paramètres.

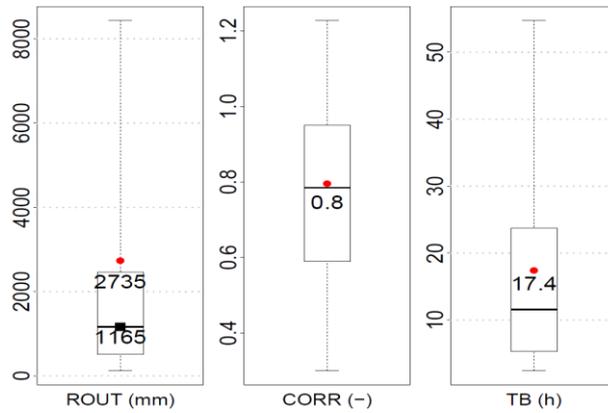


Figure 10: Distribution des paramètres du modèle GRP0 de référence (la valeur de la moyenne est indiquée, ainsi que celle de la médiane pour le paramètre ROUT)

V.1.2 Analyse des critères de performance

Critères continus

Aux horizons de prévision courts, l'erreur relative moyenne (EARM) est faible, le modèle montre donc de bonnes performances qui se dégradent progressivement aux horizons de prévision plus lointains (Figure). Ces résultats mettent en évidence l'effet de la mise-à-jour du modèle qui s'estompe à mesure que l'horizon de prévision augmente. L'assimilation du dernier débit observé se fait à l'instant de prévision, il est donc logique que son efficacité diminue lorsque l'horizon augmente. Quand l'effet se sera complètement dissipé, on retrouvera l'erreur que l'on aurait obtenue en simulation (sans mise à jour).

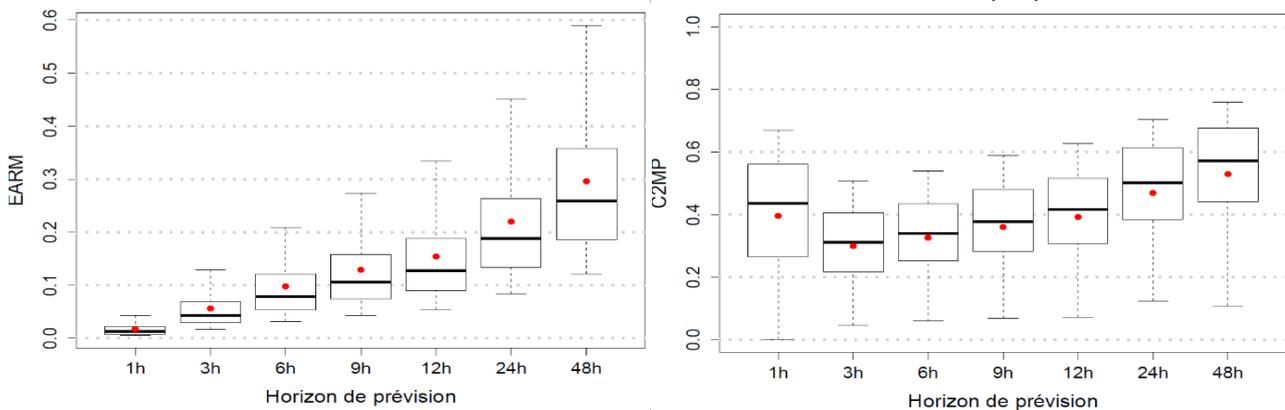


Figure 12 : Distribution des critères EARM et C2MP à différents horizons de prévision pour le modèle GRP0 de référence

L'évolution du critère C2MP en fonction de l'horizon de prévision pourrait sembler à première vue incohérente, le critère commence par se dégrader puis ne cesse d'augmenter. Le critère C2MP compare en fait l'erreur du modèle à celle d'un modèle de référence « naïf » qui donnerait pour prévision le dernier débit observé. L'augmentation du critère pour les horizons lointains ne correspond pas au fait que la prévision s'améliore avec l'horizon (c'est l'inverse qui se produit), mais juste que les performances du modèle de référence se dégradent plus rapidement que celles du modèle. La baisse du C2MP à courte échéance s'explique, elle, par le fait que la correction autorégressive de Tangara (III.1), qui consiste à exploiter l'erreur antérieure entre le débit observé au pas de temps t et le débit prévu pour le pas de temps t au temps $t-1$, apporte beaucoup à courte échéance mais son effet diminue rapidement (Berthet, 2010).

Critère d'erreur en amplitude

La médiane des distributions du critère d'erreur en amplitude de la pointe de crue (ΔQ_{max}) est négative pour tous les horizons de prévision, la pointe de crue est majoritairement sous-estimée. Du fait de l'action de la mise à jour et de la correction autorégressive de Tangara, cette sous-estimation est relativement faible à courte échéance, mais augmente progressivement pour des horizons plus lointains (Tableau 4).

	ΔQ (%)						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
GRPO	-0,06	-2,20	-5,48	-8,18	-10,46	-16,61	-21,63

Tableau 4 : Médiane de la distribution du critère d'erreur en amplitude de la pointe de crue (ΔQ) pour le modèle GRPO de référence

Critères temporels événementiels

Les critères temporels ont été calculés sur les événements de crue sélectionnés par l'outil opérationnel. Le critère de retard de la pointe de crue (R_p) est négatif pour la majorité des bassins versants et ce, pour tous les horizons de prévisions (Tableau 5). Il traduit donc un retard de la pointe de crue prévue par rapport à la pointe de crue observée. À courte échéance, le retard est quasiment nul du fait de la mise à jour et la correction des débits, mais il augmente rapidement pour les horizons plus lointains (diminution de l'efficacité de la mise à jour et la correction).

Pour l'horizon de 48 h, la médiane est de -0,08, ce critère étant normé par le temps de réponse du bassin versant, cela équivaut à un retard égal à 8 % du temps de réaction.

	R_p (-)						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
GRPO	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
	R_m (h)						
	GRPO	-0,14	-0,84	-1,44	-1,70	-1,76	-1,23

Tableau 5 : Médiane des distributions du critère de retard à la montée (R_m) et du critère de retard de la pointe de crue (R_p) pour le modèle GRPO de référence

Les observations sont quasiment similaires en ce qui concerne le critère de retard à la montée de crue (Tableau 5). La montée de crue prévue est majoritairement en retard (critère négatif) et ce retard augmente progressivement jusqu'à l'échéance 24 h puis diminue et finit par se stabiliser à partir de l'horizon 60 h (non présenté dans ce rapport).

Critères événementiels d'alerte

Les critères d'alerte (Figure 11) ont été calculés avec un seuil de dépassement correspondant au quantile 0.95 des débits observés. La surveillance du dépassement de ce seuil est effectuée sur la plage de prévision dont l'échéance est l'horizon de calage. Ces critères ne sont donc pas calculés pour tous les horizons de prévision.

La probabilité de détection (POD) indique qu'un peu plus de 66 % des franchissements de seuil sont bien prévus en médiane sur l'ensemble des bassins, soit environ deux franchissements sur trois. Cependant, ce critère ne tient pas compte des fausses alertes. Le taux de fausses alertes (FAR) a une valeur médiane assez élevée (28 %), indiquant une propension significative du modèle à prévoir des franchissements indus du seuil. L'indice de succès critique (CSI) qui fait

la synthèse des deux autres critères, a une valeur intermédiaire (médiane à 51%), assez modeste.

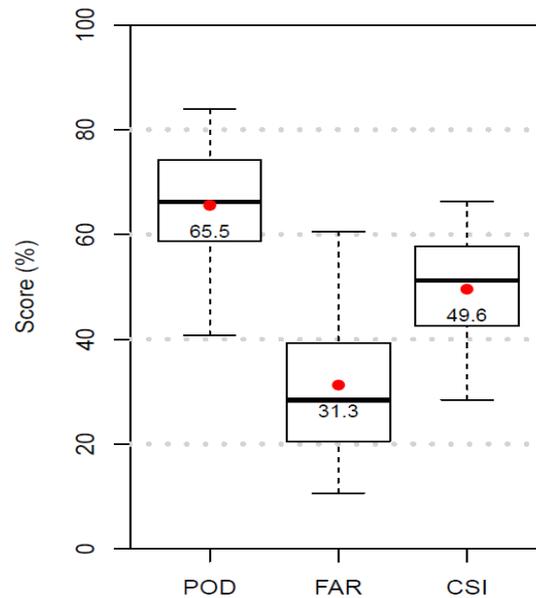


Figure 11 : Distribution des critères de contingence POD, FAR et CSI

V.1.3 Bilan de l'évaluation

Corroborant les retours d'expérience de certains SPC, les différents critères mettent en évidence la tendance qu'a le modèle à sous-estimer les volumes en période de crue et à fournir des prévisions en retard. Tous les critères montrent aussi la dégradation des performances à mesure que l'horizon de prévision augmente, ce qui est un résultat attendu. Cette observation peut être attribuée à la dissipation de l'effet de la mise à jour et de la correction des débits pour les horizons lointains. Les critères quadratiques, évaluant l'adéquation de l'événement prévu à l'événement observé, ne sont pas très élevés et ne traduisent donc pas de très bonnes performances. Le paramètre de correction de la pluie (CORR) est globalement inférieur à 1, ce qui pourrait en partie être lié aux sous-estimations de volume rencontrées.

V.2 Ajout d'un réservoir d'interception : GR3PI / GR4PI

Dans cette partie, nous présenterons les performances obtenues avec l'ajout d'un réservoir d'interception avec, dans un premier temps une capacité déterminée de manière climatique (cf. les travaux d'Andrea Ficchi présentés précédemment) puis dans un second temps une capacité optimisée lors de la phase de calage de l'outil opérationnel.

La Figure 12 (gauche) présente la distribution des capacités du réservoir d'interception déterminée de manière climatique (voir partie IV.1.1, paragraphe *i*). La valeur moyenne de cette distribution est de 1.84 mm. Dans ses travaux de thèse, Andrea Ficchi (2017) obtient des capacités de l'ordre de quelques millimètres. Pour un pas de temps d'1 h, la valeur moyenne est de 1,9 mm. Nos résultats semblent donc être cohérents avec ceux obtenus par Andrea Ficchi. L'optimisation de la capacité du réservoir d'interception par l'outil de calage (Figure 12, droite), conjointement avec les trois autres paramètres du modèle, donne une distribution nettement plus élevée (moyenne à 6.1 mm). Cette différence pourrait indiquer que le modèle se sert de ce réservoir différemment de ce qui était anticipé dans les travaux d'Andrea Ficchi.

Cela peut aussi être lié à une sensibilité différente lors du calage, en lien avec des fonctions objectif différentes, et sera à comparer avec les valeurs de la capacité obtenues par calage en mode simulation.

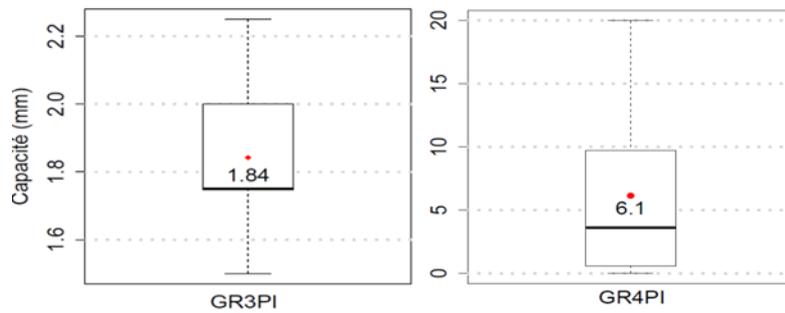


Figure 12 : Distribution des capacités optimales du réservoir d'interception déterminées de manière climatique (gauche) et par l'outil de calage opérationnel de GRP (droite).

V.2.1 Distribution des paramètres

Nous nous intéressons particulièrement à la distribution du paramètre CORR. Si ce paramètre est à l'origine des sous-estimations des volumes de crue, il serait intéressant de voir sa valeur se rapprocher de 1 lorsqu'on insère le réservoir d'interception.

L'ajout du réservoir d'interception déplace légèrement la distribution du paramètre CORR vers des valeurs plus élevées (Figure 13), ce qui va dans le sens pressenti. À première vue, il semblerait plus judicieux d'opter pour la version *GR3PI* à trois paramètres car les résultats sont quasiment similaires à ceux obtenus avec la version *GR4PI* qui a un paramètre libre supplémentaire. La différence par rapport à *GRP0* semble donc davantage liée au fait d'introduire un réservoir d'interception que de laisser libre la capacité de ce dernier. Il est préférable de conserver la version la plus parcimonieuse (peu de paramètres à caler) afin de limiter les éventuelles interactions entre les paramètres.

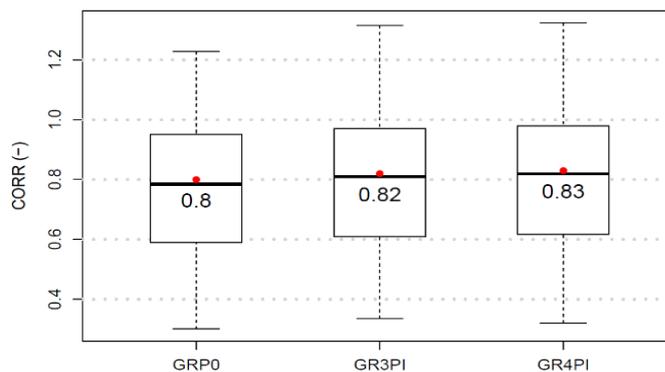


Figure 13 : Distribution du paramètre CORR pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec réservoir d'interception)

V.2.2 Analyse des critères de performance

Critères continus

À courte échéance, l'ajout d'un réservoir d'interception de capacité fixée ou non n'améliore pas significativement les performances du modèle selon l'erreur relative moyenne absolue (EARM) obtenue. Pour les horizons de prévision plus lointains, on observe une légère amélioration des

performances, les valeurs médianes sont plus faibles (Tableau 6). Nous pouvons faire la même observation pour le critère C2MP, les performances sont très légèrement améliorées pour les horizons lointains et les médianes sont équivalentes pour les versions *GR3PI* et *GR4PI*. L'ajout d'un paramètre à caler (version *GR4PI*) n'est cependant pas justifié car les améliorations observées ne sont pas significatives.

<i>EARM</i>							
	<i>1 h</i>	<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>9 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>
<i>GRP0</i>	0,01	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,26
<i>GR3PI</i>	0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,25
<i>GR4PI</i>	0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,24
<i>C2MP</i>							
<i>GRP0</i>	0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58
<i>GR3PI</i>	0,44	0,31	0,34	0,38	0,42	0,51	0,59
<i>GR4PI</i>	0,44	0,31	0,34	0,38	0,42	0,51	0,59

Tableau 6 : Médiane des distributions des critères C2MP et EARM pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec réservoir d'interception)

Critères temporels événementiels

L'ajout d'un réservoir d'interception n'a pas diminué la tendance qu'a le modèle à prévoir les pointes crues en retard (Tableau 7), les valeurs médianes du critère R_P étant équivalentes pour les trois versions. Une légère amélioration des résultats en montée (R_m) est cependant obtenue avec la version *GR3PI* pour les horizons inférieurs à 48 h.

R_m (h)							
	<i>1 h</i>	<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>9 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>
<i>GRP0</i>	-0,14	-0,84	-1,44	-1,70	-1,76	-1,23	-0,58
<i>GR3PI</i>	-0,13	-0,81	-1,35	-1,61	-1,67	-1,18	-0,61
<i>GR4PI</i>	-0,14	-0,80	-1,35	-1,62	-1,71	-1,24	-0,74
R_P (-)							
<i>GRP0</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
<i>GR3PI</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,15	-0,16	-0,11	-0,07
<i>GR4PI</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,15	-0,15	-0,10	-0,08

Tableau 7 : Médiane des distributions du critère de retard à la montée (R_m) et du critère de retard de la pointe de crue (R_P) pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec réservoir d'interception)

Critère d'erreur en amplitude

L'erreur en amplitude du pic de crue est légèrement atténuée selon la médiane des distributions (Tableau 8), ce qui va dans le bon sens. Encore une fois, les améliorations apportées par les versions *GR3PI* et *GR4PI* ne sont pas significativement différentes.

ΔQ (%)							
	<i>1 h</i>	<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>9 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>
<i>GRP0</i>	-0,06	-2,20	-5,48	-8,18	-10,46	-16,61	-21,63
<i>GR3PI</i>	-0,04	-2,08	-5,25	-7,65	-9,78	-15,61	-20,45
<i>GR4PI</i>	-0,04	-2,07	-5,12	-7,63	-9,75	-15,37	-20,11

Tableau 8 : Médiane des distributions du critère d'erreur en amplitude du pic de crue (ΔQ) pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec réservoir d'interception)

V.2.3 Bilan de l'évaluation

L'ajout d'un réservoir d'interception a permis un petit gain de performances et une petite augmentation de la valeur du paramètre CORR. Ceci a contribué à diminuer l'erreur en amplitude de la pointe de crue. Le retard du pic de crue prévu reste inchangé mais on dénote une petite amélioration du critère de retard à la montée de crue pour tous les horizons de prévision (excepté 48 h). Les critères de dépassement de seuil sont faiblement impactés : le modèle prévoit légèrement plus de fausses alertes et diminue son nombre d'alertes valables.

Les versions *GR3PI* et *GR4PI* obtiennent des performances similaires, l'ajout d'un paramètre à optimiser en plus n'est donc pas justifié. Afin de garder un modèle qui soit le plus parcimonieux possible, nous conserverons donc la version *GR3PI* pour la suite des analyses.

V.3 Optimisation de la capacité du réservoir de production

Dans cette partie, nous présenterons les performances obtenues avec l'ajout d'un paramètre à optimiser, la capacité du réservoir de production (fixée à 275 mm dans le modèle *GRP0*). La première version testée consiste à caler tous les paramètres en mode « simulation », c'est-à-dire sans mise-à-jour (*GRP-CAP-SIM*). Dans la seconde version, les paramètres seront tous calés en mode « prévision » (*GRP-CAP-PREV*).

V.3.1 Distribution des paramètres

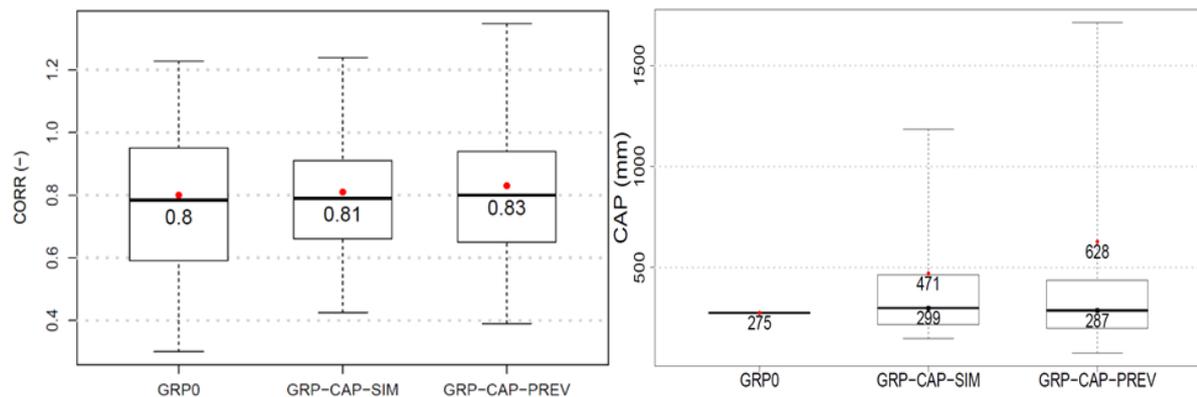


Figure 14 : Distribution des paramètres CORR et CAP pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec capacité du réservoir de production libre)

La distribution du paramètre CORR (Figure 14) se décale légèrement vers des valeurs plus élevées avec l'optimisation de la capacité du réservoir de production (CAP), surtout pour la version *GRP-CAP-PREV*. Cette version possède des valeurs moyennes et médianes plus élevées. La version *GRP-CAP-SIM* présente, elle, une dispersion légèrement moins forte des valeurs extrêmes.

V.3.2 Analyse des critères de performance

Critères continus

L'optimisation de la capacité du réservoir de production (CAP) n'apporte pas d'amélioration du critère EARM pour la version où l'on optimise tous les paramètres en mode « prévision »

(GRP-CAP-PREV). Ceci corrobore les travaux de Tangara et Berthet qui avaient préconisé de fixer ce paramètre lorsqu'on utilise une fonction objectif avec mise à jour du modèle. La version GRP-CAP-SIM apporte une petite amélioration du critère EARM mais significative uniquement pour les horizons de prévision lointains (Tableau 9).

		<i>EARM</i>						
		<i>1 h</i>	<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>9 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>
<i>GRP0</i>		0,01	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,26
<i>GRP-CAP-SIM</i>		0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,22
<i>GRP-CAP-PREV</i>		0,01	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,26
		<i>C2MP</i>						
<i>GRP0</i>		0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58
<i>GRP-CAP-SIM</i>		0,41	0,28	0,32	0,36	0,40	0,51	0,59
<i>GRP-CAP-PREV</i>		0,44	0,32	0,34	0,38	0,42	0,50	0,57

Tableau 9 : Médiane des distributions des critères de performance continus (EARM et C2MP) pour trois versions du modèle GRP (GRP0 et deux versions avec capacité du réservoir de production libre)

Concernant le C2MP, les deux versions semblent globalement dégrader les performances, sauf un léger gain de performances pour l'horizon 48 h pour GRP-CAP-SIM. Ce résultat semblerait suggérer que l'optimisation des paramètres sans assimilation pour des horizons lointains est intéressante, ce qui semble relativement logique puisqu'on se rapproche d'un fonctionnement en simple simulation.

Critère d'erreur en amplitude

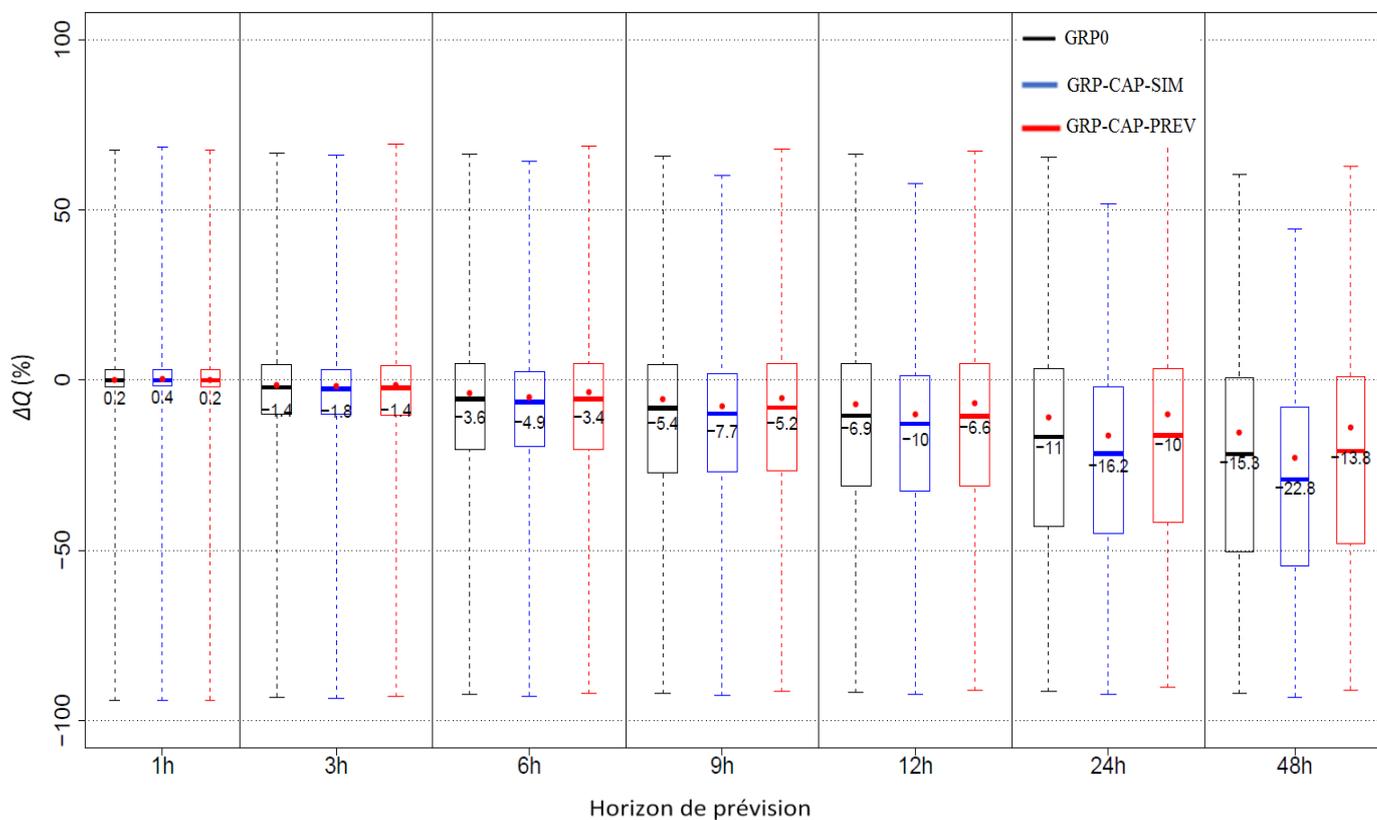


Figure 15 : Distributions du critère d'erreur en amplitude de la pointe de crue (ΔQ) pour trois versions du modèle GRP (GRP0 et deux versions avec capacité du réservoir de production libre)

Les valeurs moyennes de l'erreur en amplitude sont légèrement diminuées avec la version où CAP est optimisé en mode « prévision ». En revanche, les performances se dégradent avec la version *GRP-CAP-SIM*, surtout pour les horizons lointains. L'amplitude du pic de crue reste globalement sous-estimée pour ces trois versions, le critère est négatif pour 75 % des événements de crue sélectionnés (Figure 15).

Critères temporels événementiels

La version *GRP-CAP-PREV* permet une diminution du retard à la montée pour chaque horizon de prévision et une diminution du retard du pic de crue pour les horizons lointains tandis que la version *GRP-CAP-SIM* obtient des retards plus élevés que la version initiale *GRP0* (Tableau 10).

	$R_p (-)$						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
<i>GRP0</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
<i>GRP-CAP-SIM</i>	-0,02	-0,10	-0,17	-0,23	-0,26	-0,25	-0,12
<i>GRP-CAP-PREV</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,15	-0,15	-0,09	-0,05
	$R_m (h)$						
<i>GRP0</i>	-0,14	-0,84	-1,44	-1,70	-1,76	-1,23	-0,58
<i>GRP-CAP-SIM</i>	-0,23	-1,26	-2,35	-2,81	-3,00	-2,62	-1,68
<i>GRP-CAP-PREV</i>	-0,14	-0,78	-1,30	-1,42	-1,43	-0,94	-0,19

Tableau 10 : Médiane des distributions des critères de retard de la pointe de crue (R_p) et de retard à la montée (R_m) pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec capacité du réservoir de production libre)

Critères d'alerte

Le nombre d'alertes valables augmente un peu avec la version *GRP-CAP-PREV* (Tableau 11) ainsi que le nombre de fausses alertes, ce qui se traduit par un indice de succès critique inférieur à celui de la version *GRP0*. Si on se réfère au CSI, qui résume l'information en représentant les succès (alertes valables) par rapport à ce qui a été prévu (alertes valables et non-alertes valables) et ce qui aurait dû l'être (alertes manquées), la version *GRP0* obtient le meilleur score.

La version *GRP-CAP-SIM* dégrade encore une fois les performances avec presque 10 % d'alertes valables en moins mais diminue son taux de fausses alertes.

	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>CSI</i>
<i>GRP0</i>	66,25	28,35	51,25
<i>GRP-CAP-SIM</i>	57,90	25,10	46,80
<i>GRP-CAP-PREV</i>	67,65	29,80	50,00

Tableau 11 : Médiane des distributions des critères de contingence pour trois versions du modèle GRP (*GRP0* et deux versions avec capacité du réservoir de production libre)

V.3.3 Bilan de l'évaluation

L'optimisation de la capacité du réservoir de production en mode prévisionnel ne présente pas d'intérêt lorsque les performances sont évaluées avec des critères continus, ce qui corrobore les résultats de précédents travaux. Elle apporte cependant une petite amélioration des performances événementielles du modèle ainsi qu'une légère augmentation de la valeur du

paramètre CORR qui permet vraisemblablement de diminuer l'erreur en amplitude de la pointe de crue. Les critères temporels (R_P et R_m) sont améliorés pour toutes les échéances de prévision. Les valeurs des critères continus restent cependant inchangées avec cette version.

À contrario, la version consistant à caler tous les paramètres en simulation (*GRP-CAP-SIM*) dégrade globalement les performances du modèle GRP excepté pour les valeurs des critères continus qui présentent une légère augmentation. Il serait donc intéressant de réaliser une analyse consistant à effectuer un calage séquentiel (partie V.4) où l'on fixerait certains paramètres à leurs valeurs en simulation tandis que le reste des paramètres seraient optimisés en prévision.

V.4 Modification de la stratégie de calage : Calage séquentiel

L'objectif de ces tests est d'évaluer s'il est possible d'apporter un gain de performance en exploitant à la fois les paramètres optimisés en simulation $\{\theta_{sim}\}$, permettant de reproduire le comportement du bassin versant à long terme, et les paramètres optimisés en prévision $\{\theta_{prev}\}$ permettant de maximiser les chances d'avoir une bonne réponse instantanée. L'analyse précédente a permis de montrer les variations de performance entre un calage des paramètres en simulation et un calage des paramètres en prévision. Bien que globalement les performances soient plus faibles lorsqu'on cale sans mise-à-jour, certains critères présentent une légère amélioration, notamment les critères continus.

V.4.1 Distribution des paramètres

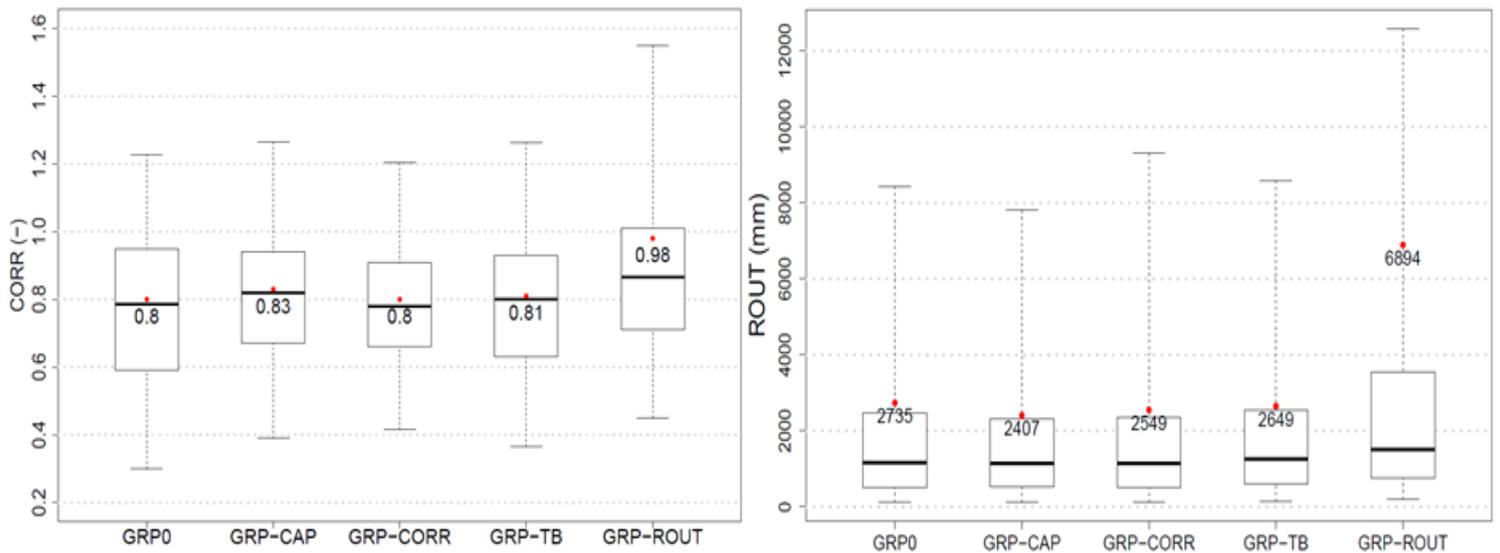


Figure 16 : Distribution des paramètres CORR (gauche) et ROUT (droite) pour cinq versions du modèle GRP (GRP0 et quatre versions avec l'un des paramètres calés préalablement sans mise à jour)

Nous pouvons observer une légère augmentation de la distribution du paramètre CORR pour la version consistant à caler le paramètre CAP en simulation (Figure 16). Pour celles consistant à caler CORR ou TB, les résultats sont quasiment inchangés. La version *GRP-ROUT* présente une forte augmentation de la valeur du paramètre CORR avec une valeur moyenne de 0,98. Néanmoins, les quantiles les plus élevés de la distribution sont en forte hausse, ce qui biaise un peu l'estimation de la valeur moyenne, la médiane étant à 0,86. Lorsqu'on analyse la

distribution des autres paramètres, on s'aperçoit que la version *GRP-ROUT* présente une distribution de *ROUT* plus élevée que pour les autres versions. Le calage en simulation du paramètre *ROUT* induit donc une augmentation de la valeur de *ROUT* et semble permettre, lors de l'optimisation des paramètres restants avec mise-à-jour, une valeur de *CORR* plus forte. Cela dénote peut-être des effets de compensation dans les rôles des paramètres *ROUT* et *CORR* dans le lissage des pluies efficaces.

V.4.2 Analyse des critères de performance

Ces quatre versions, proposant un calage séquentiel des paramètres, ne permettent pas d'améliorer les critères continus. Les valeurs médianes des critères continus étant similaires pour ces quatre versions, le Tableau 12 ne présente pas toutes les versions :

	<i>EARM</i>						
<i>GRP0</i>	0,01	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,26
<i>GRP-ROUT</i>	0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,25
<i>GRP-CORR</i>	0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,25
	<i>C2MP</i>						
<i>GRP0</i>	0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58
<i>GRP-ROUT</i>	0,44	0,31	0,34	0,38	0,42	0,5	0,58
<i>GRP-CORR</i>	0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58

Tableau 12 : Médiane des distributions des critères de performance continus (*EARM* et *C2MP*)

La version où l'on cale le paramètre *ROUT* en simulation est la seule version à présenter une diminution de l'erreur en amplitude de la pointe (Figure 17) de crue probablement causée par l'augmentation significative de la valeur du paramètre *CORR*. La version *GRP-TB* permet d'améliorer les deux critères temporels (Tableau 13) pour les horizons lointains, on ne dénote pas de changement pour les échéances courtes.

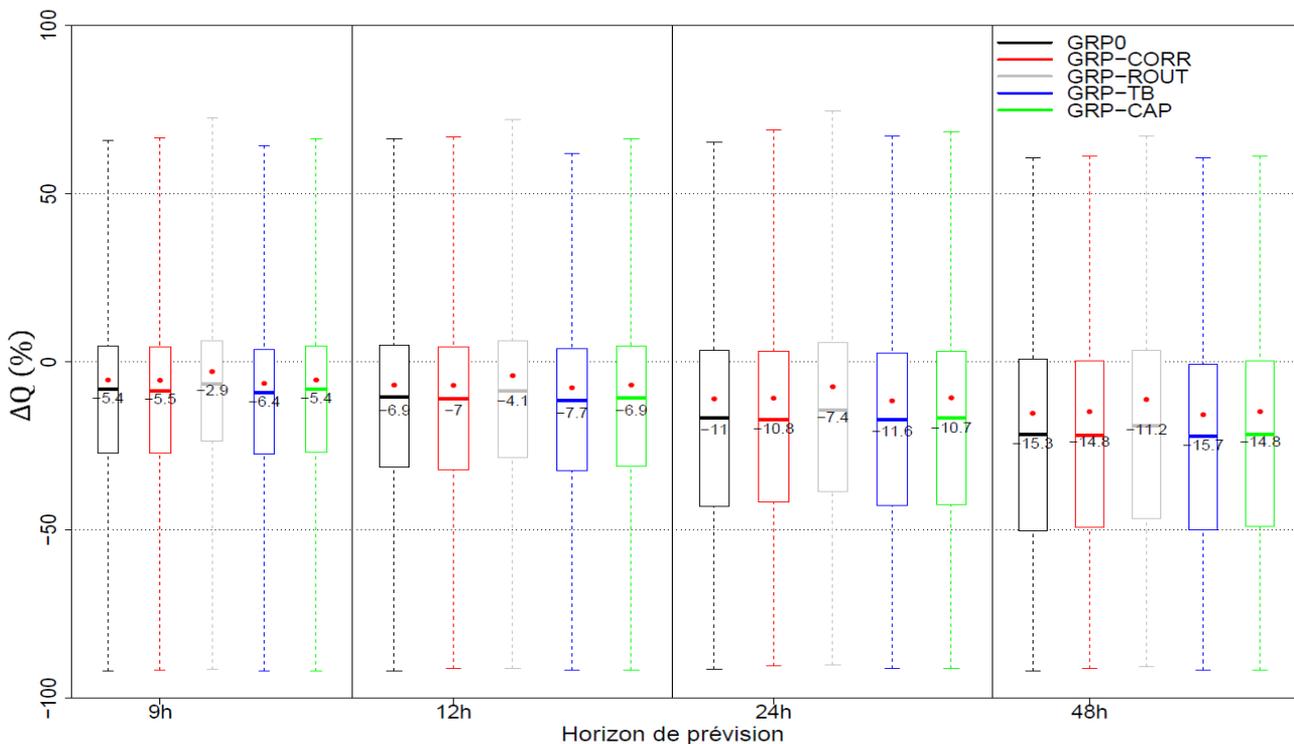


Figure 17 : Distributions du critère d'erreur en amplitude de la pointe de crue (ΔQ) pour cinq versions du modèle *GRP* (*GRP0* et quatre versions consistant à fixer un paramètre à sa valeur en simulation)

Lorsqu'on se réfère aux critères de contingence, les gains de performances sont encore une fois minimes. De plus les versions apportant le meilleur gain sont cette fois-ci les versions *GRP-CORR* et *GRP-CAP*. Pour ces versions, le modèle prévoit plus d'alertes valables (augmentation de la probabilité de détection) mais augmente aussi son taux de fausses alertes (FAR) ce qui a pour effet de diminuer l'indice de succès critique (CSI).

	$R_m (h)$						
<i>GRPO</i>	-0,14	-0,84	-1,44	-1,7	-1,76	-1,23	-0,58
<i>GRP-TB</i>	-0,16	-0,92	-1,45	-1,53	-1,44	-0,83	-0,01
	$R_p (-)$						
<i>GRPO</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
<i>GRP-TB</i>	-0,02	-0,08	-0,14	-0,16	-0,16	-0,07	0

Tableau 13 : Médiane des distributions des critères de retard R_p et R_m

V.4.3 Bilan de l'évaluation

Le calage séquentiel des paramètres, faisant intervenir calage sans puis avec mise-à-jour du modèle, ne permet pas d'améliorer significativement les performances selon les distributions des critères continus et des critères d'alerte. L'augmentation de la valeur du paramètre CORR pour la version *GRP-ROUT* permet vraisemblablement d'augmenter les volumes d'eau écoulés et donc de diminuer l'erreur en amplitude.

Le calage en simulation du paramètre TB permet une réduction du retard lors de la montée de crue ainsi qu'une réduction du retard du pic de crue prévu. Le temps de base (TB) influe sur le temps de réponse du bassin aux pluies, plus ce temps est long et plus la pointe de crue est atténuée. Le temps de base est plus court lorsqu'on cale TB en simulation, cela a donc dû permettre d'obtenir une montée de crue plus rapide.

V.5 Couplage des modifications

L'objectif de cette analyse a été de combiner les différentes modifications testées au cours de ce stage. Les versions présentées dans cette partie comporteront donc :

- un réservoir d'interception de capacité fixée (méthode climatique),
- un réservoir de production de capacité optimisée,
- un calage séquentiel des paramètres.

Dans la partie précédente, nous avons calé un seul paramètre à la fois en simulation et nous avons pu remarquer une légère amélioration des performances, notamment pour les versions *GRP-ROUT* et *GRP-TB*. Nous avons fait l'hypothèse que les performances pourraient être améliorées en calant plusieurs paramètres en simulation. Pour cette analyse, nous avons donc choisi de tester chacune des combinaisons possibles de deux paramètres à caler en simulation.

V.5.1 Distribution des paramètres

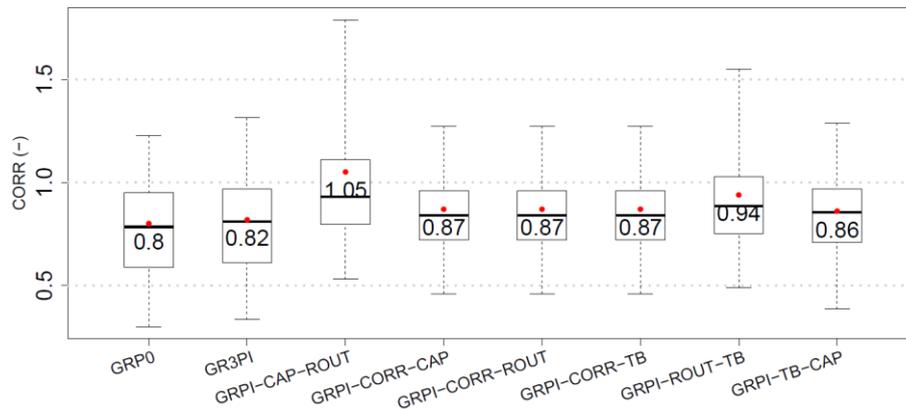


Figure 18 Distribution du paramètre CORR pour GRP0, GR3PI et six versions avec deux des paramètres calés préalablement sans mise à jour

Les versions testées présentent toutes une augmentation de la valeur du paramètre CORR (Figure 18) ce qui devrait permettre de réduire les sous-estimations du volume d'eau écoulé lors d'un évènement de crue. Les valeurs moyennes et médianes ainsi que les différents quantiles sont tous plus élevés. Toutefois les versions *GRPI-CAP-ROUT* et *GRPI-ROUT-TB* présentent des valeurs élevées des quantiles 0.95, avec au moins 5 % des bassins ayant un paramètre CORR supérieur à 1,5.

L'ajout de *GR3PI* au sein de la Figure 18 permet de mieux distinguer l'effet de l'introduction du réservoir d'interception de celui du calage séquentiel des paramètres. Le paramètre CORR est plus sensible au calage séquentiel des paramètres qu'à l'ajout du réservoir d'interception qui n'autorise qu'une très légère augmentation.

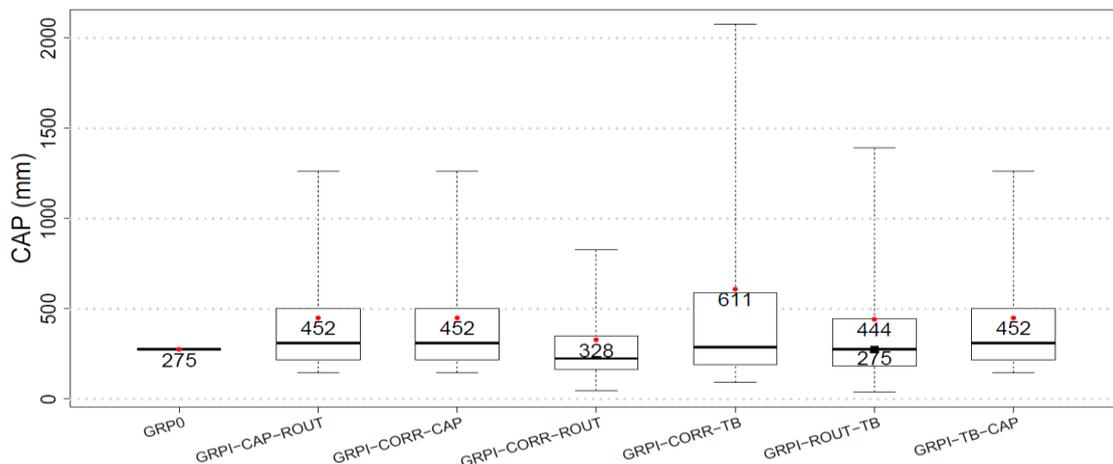


Figure 19 : Distribution du paramètre CAP, la valeur médiane de la version GRPI-ROUT-TB est représentée par le carré noir.

Pour les versions où la capacité du réservoir de production (CAP) est l'un des deux paramètres optimisés en simulation, les distributions de ce paramètre sont identiques (Figure 20) car le paramètre CAP est à chaque fois issu du même calage en simulation. En effet, pour les versions *GRPI-CAP-ROUT*, *GRPI-CORR-CAP* et *GRPI-TB-CAP*, la valeur du paramètre CAP conservée est celle obtenue lors de la première étape de calage sans mise-à-jour. Il est donc logique d'obtenir la même distribution pour ce paramètre. Pour les versions où la capacité du

réservoir de production (CAP) est l'un des deux paramètres optimisés en simulation, les distributions de ce paramètre sont identiques (Figure 20) car le paramètre CAP est à chaque fois issu du même calage en simulation. En effet, pour les versions *GRPI-CAP-ROUT*, *GRPI-CORR-CAP* et *GRPI-TB-CAP*, la valeur du paramètre CAP conservée est celle obtenue lors de la première étape de calage sans mise-à-jour. Il est donc logique d'obtenir la même distribution pour ce paramètre

De plus, la version *GRP-ROUT-TB* obtient une valeur médiane de la distribution du paramètre CAP équivalente à la valeur fixée de *GRP0* (275 mm). La version *GRP-CORR-TB* présente des capacités très élevées pour certains bassins versants, la procédure de calage a peut-être rencontré des difficultés avec cette configuration.

V.5.2 Analyse des critères de performance

Le couplage des modifications a permis de réduire l'erreur en amplitude de la pointe de crue, en particulier avec les versions où le paramètre ROUT est optimisé sans mise-à-jour. Ce résultat est en adéquation avec les distributions du paramètre CORR obtenues pour ces trois versions, mais aussi avec les résultats de la partie précédente qui ont montré que le calage du paramètre ROUT en simulation permettait de réduire la sous-estimation du pic de crue.

	ΔQ (%)						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
<i>GRP0</i>	-0,06	-2,20	-5,48	-8,18	-10,46	-16,61	-21,63
<i>GRP-CAP-ROUT</i>	0,12	-1,51	-4,00	-6,09	-8,07	-13,70	-18,52
<i>GRP-CORR-ROUT</i>	0,10	-1,63	-4,24	-6,58	-8,43	-14,21	-19,38
<i>GRP-ROUT-TB</i>	0,05	-1,91	-4,69	-6,84	-8,80	-14,21	-19,00

Tableau 14 : Médiane des distributions du critère d'erreur en amplitude du pic de crue (ΔQ)

Le même constat peut être fait concernant les critères temporels : lorsque TB est l'un des deux paramètres calés en simulation, on observe une légère diminution du retard pour les horizons lointains. Cependant, ces versions ne permettent pas d'améliorer les scores de contingence qui restent proche des valeurs obtenues avec la version initiale.

	R_p						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
<i>GRP0</i>	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
<i>GRP-CORR-TB</i>	-0,02	-0,09	-0,14	-0,16	-0,16	-0,06	0
<i>GRP-TB-CAP</i>	-0,02	-0,09	-0,14	-0,16	-0,15	-0,05	0
	R_m (h)						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
<i>GRP0</i>	-0,14	-0,84	-1,44	-1,7	-1,76	-1,23	-0,58
<i>GRP-CORR-TB</i>	-0,16	-0,9	-1,43	-1,46	-1,39	-0,73	-0,08
<i>GRP-ROUT-TB</i>	-0,15	-0,89	-1,5	-1,61	-1,63	-1,07	-0,17
<i>GRP-TB-CAP</i>	-0,17	-0,92	-1,46	-1,5	-1,41	-0,88	-0,12

Tableau 15 : Médiane des distributions des critères d'erreur temporels R_p et R_m

Le couplage des modifications permet d'améliorer légèrement le critère EARM, et cela se vérifie pour toutes les versions testées. En effet, on peut observer sur la Figure 20 une diminution de l'erreur absolue relative moyennement bien marquée pour l'horizon 48h et c'est la version *GRP-CORR-ROUT* qui permet d'obtenir le meilleur gain de performance.

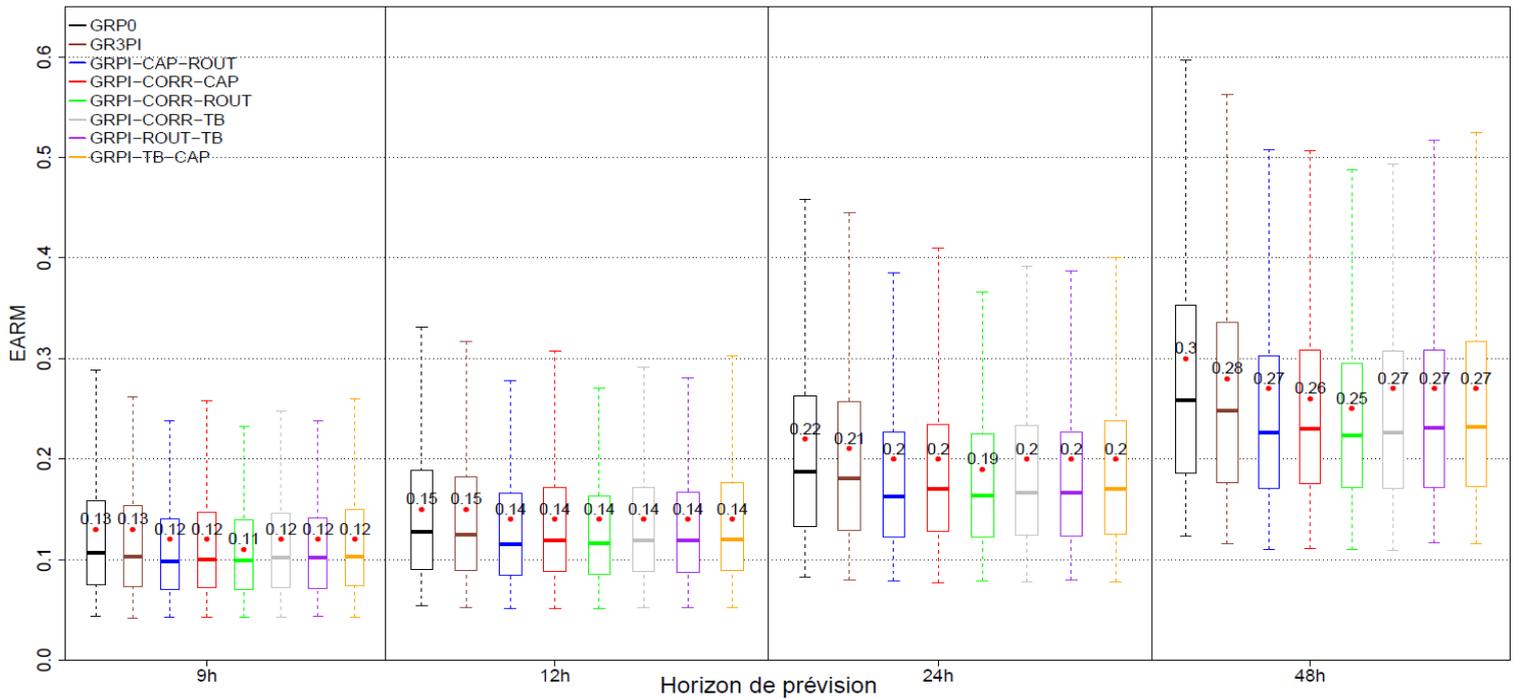


Figure 20: Comparaison des distributions du critère EARM

Le critère C2MP est légèrement amélioré avec ces six versions mais uniquement pour les horizons supérieurs à 12h (Tableau 16). De plus, le gain entre ces six versions est équivalent.

	C2MP						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
GRP0	0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58
GRPI-ROUT-TB	0,42	0,29	0,33	0,38	0,42	0,51	0,59
GRPI-TB-CAP	0,41	0,29	0,33	0,39	0,43	0,52	0,60
GRPI-CAP-ROUT	0,43	0,31	0,34	0,38	0,42	0,52	0,60

Tableau 16 : Médiane des distributions du critère C2MP pour le modèle GRP0 actuel et trois de six versions proposant une combinaison des modifications testées.

V.5.3 Bilan de l'évaluation

Le couplage des modifications a permis d'obtenir un paramètre CORR plus proche de 1, provoquant ainsi une diminution de l'erreur en amplitude du pic de crue, en particulier pour les versions où la capacité du réservoir de routage est calée en simulation. De plus, nous avons pu observer une réduction de l'erreur temporelle, spécialement pour les versions où le temps de base de l'hydrogramme unitaire (TB) a été optimisé sans mise-à-jour. Ces résultats tendraient à indiquer que ces deux paramètres sont moins bien calés lorsque l'on utilise un modèle avec mise à jour. La mise à jour pourrait effectivement « masquer » une partie de l'information sur la dynamique temporelle des débits, qui est utile pour le calage de ces paramètres.

Toutes les versions ont engendré une légère amélioration des critères continus mais n'ont cependant pas permis d'améliorer les scores de contingence.

Ces versions ont permis une amélioration globale des performances qui est relativement faible pour les échéances courtes (< 24 h), mais plus significatives pour des échéances plus longues de 24 et 48h.

V.6 Analyse de la fonction d'échange

L'objectif de cette analyse a été d'étudier les volumes d'eau échangés (pertes/gains) par le modèle GRP. Nous avons tenté de savoir dans quelle mesure le paramètre CORR était responsable de la sous-estimation des volumes d'eau écoulés lors des événements de crue. GRP dérive du modèle GR4H, les structures des deux modèles présentant de forte similarité. Une des différences vient de la formulation de la fonction d'échange en eau. Nous avons donc décidé de comparer les volumes d'eau échangés au sein des modèles GRP et GR4H. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle GR4H implémenté dans le package airGR (Coron et al., 2017). Ce choix de prendre GR4H comme support d'analyse plutôt que GRP visait à éviter de potentiels effets de la mise à jour. De plus, les modèles ont été testés en calage-contrôle et les volumes d'eau échangés ont été calculés séparément en contrôle pour les deux périodes.

Le modèle GR4H inclut une fonction d'échange permettant de prendre en compte des gains ou pertes en eau du système vers des aquifères profonds et/ou des bassins versants voisins. Ces échanges souterrains sont représentés par le paramètre $X2$ (mm/h). La fonction d'échange souterrain en eau est formulée de la façon suivante :

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (\text{V.1})$$

où $X3$ et R sont respectivement la capacité et le niveau du réservoir de routage (en mm).

Le paramètre $X2$ est multiplié par le terme $\frac{R}{X3}$ qui représente le taux de remplissage du réservoir de routage. Cette fonction d'échange est donc directement liée au réservoir de routage tandis que le paramètre CORR applique une correction multiplicative unique sur les volumes produits par la fonction de production (IV.6).

Afin de rendre la comparaison possible, nous avons élaboré une variante du modèle GR4H (*GR4H-CORR*) au sein de laquelle nous avons remplacé la fonction d'échange souterrain en eau (V.1) par le coefficient d'ajustement CORR de GRP. Pour rester le plus cohérent possible avec le modèle GRP, le paramètre CORR a été appliqué sur les volumes produits par la fonction de production (pluie efficace + percolation). La seconde variante développée (*GR4H-F0*) a consisté à placer la fonction d'échange en eau plus à l'amont de la structure du modèle, à l'endroit où agit le paramètre CORR dans le modèle GRP. La formulation de cette fonction restera cependant inchangée (V.1) et donc toujours liée au réservoir de routage.

Les résultats obtenus pour les deux périodes étant similaires, nous avons décidé de ne présenter que ceux obtenus pour la période P1 (2004-2008). Afin d'étudier l'influence du débit sur les volumes d'eau échangés, nous avons décidé de calculer les échanges en eau pour plusieurs gammes de débit (bornées par des quantiles). La Figure 21 compare les volumes d'eau échangés des versions *GR4H* et *GR4H-CORR* pour trois gammes de débit différentes.

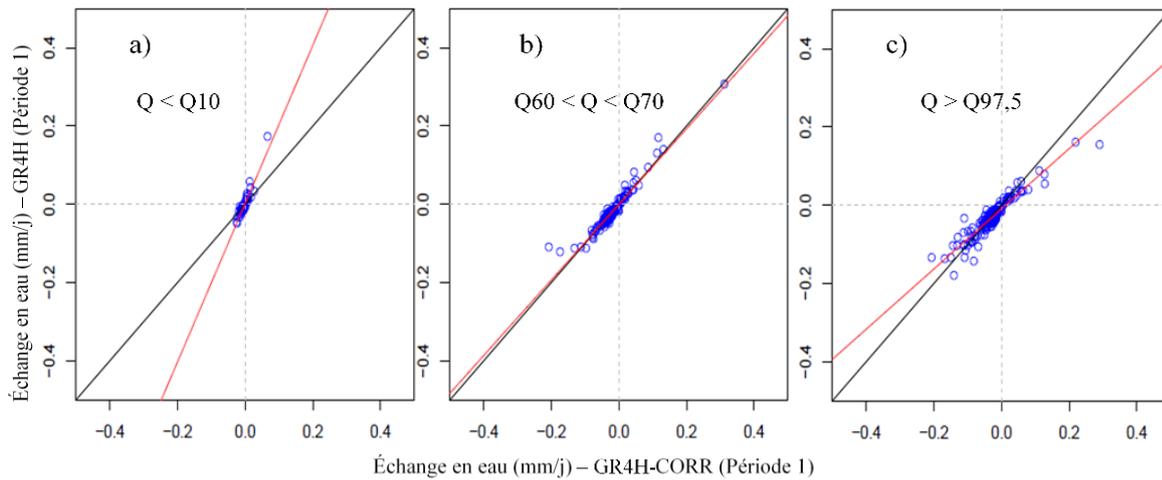


Figure 21 : Comparaison des échanges en eau moyens journaliers obtenus pour les versions GR4H (ordonnée) et GR4H-CORR (abscisse) sur les 266 bassins versants. La figure a) correspond à la gamme de débit inférieure au quantile 10, la figure b) représente la gamme de débit comprise entre le quantile 60 et le quantile 70 et la figure c) correspond à la gamme de débit supérieure au quantile 97,5. Chaque cercle bleu représente l'échange en eau moyen journalier (mm/j) pour un bassin versant. La droite noire représente la première bissectrice et la droite rouge est la droite de corrélation.

Pour les débits faibles, le paramètre CORR a pour effet de diminuer les échanges en eau (pertes et gains plus faibles). Cela peut s'expliquer par le fait que si les pluies sont nulles, CORR agit uniquement sur le volume issu de la percolation du réservoir de production, ce qui va réduire les échanges. À contrario, les échanges au sein de GR4H sont réalisés en partie sur le réservoir de routage : si ce réservoir n'est pas vide, les échanges se poursuivent.

Pour les débits intermédiaires, les volumes d'eau échangés sont très similaires pour ces deux versions. Concernant les débits de hautes eaux, le paramètre CORR semble augmenter les échanges en eau (pertes et gains plus élevés). La plupart des bassins ayant un CORR inférieur à 1, cette observation pourrait confirmer que le paramètre CORR n'est pas idéal pour restituer les volumes en période de crue.

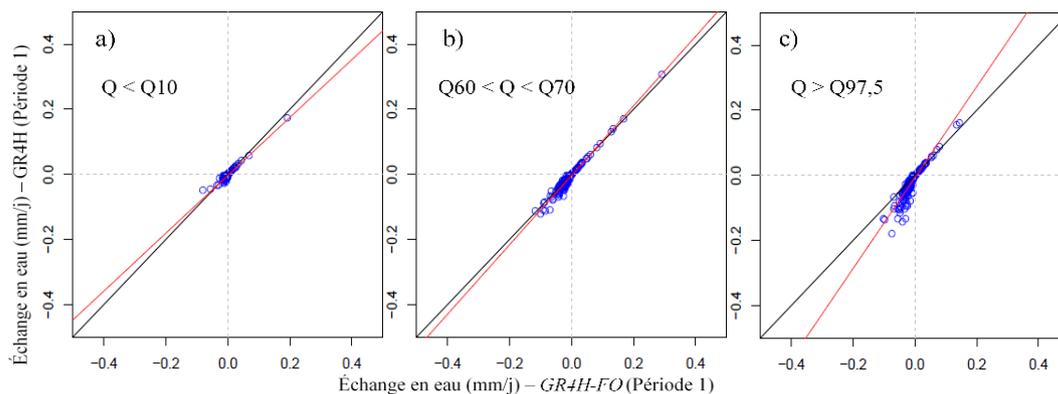


Figure 22 : Comparaison des échanges en eau moyens journaliers obtenus pour les versions GR4H (ordonnée) et GR4H-FO (abscisse) pour les 266 bassins. La figure a) correspond à la gamme de débit inférieure au quantile 10, la figure b) représente la gamme de débit comprise entre le quantile 60 et le quantile 70 et la figure c) correspond à la gamme de débit supérieure au quantile 97,5. Chaque cercle bleu représente l'échange en eau moyen journalier (mm/j) pour un bassin versant. La droite noire représente la première bissectrice et la droite rouge est la droite de corrélation.

La version GR4H-FO, qui consiste à placer la fonction d'échange de GR4H au même endroit que le paramètre CORR dans GRP, engendre une légère d'augmentation des échanges en eau

pour les bas débits (Figure 22). Les échanges en eau pour les débits intermédiaires sont similaires. Toutefois, on peut observer une diminution des échanges en eau pour les hauts débits. Ceci correspond au fait que les quantités d'eau disponibles sont moins importantes que dans le réservoir de routage.

Nous avons ensuite étudié les volumes d'eau écoulés en crue pour ces différentes versions. Cette analyse a été effectuée sur les 18 plus forts événements de crue (sélectionnés par GRP) par bassins versants. Pour chaque événement, les cumuls de débit observés et simulés ont été calculés, permettant ainsi d'établir le ratio : $R = \frac{V_{sim}}{V_{obs}}$. Lorsque ce ratio tend vers 1, les volumes d'eau observés et simulés sont proches, la crue est donc relativement bien simulée en termes de volume. Le volume est sous-estimé quand R est inférieur à 1 et surestimé lorsqu'il est supérieur à 1. La comparaison de ce ratio entre les différentes versions testées permet de déterminer celle qui restitue au mieux les volumes de crue.

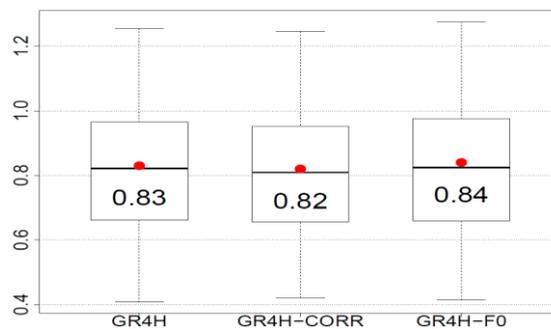


Figure 23 : Distribution du ratio R selon les versions $GR4H$, $GR4H-CORR$ et $GR4H-F0$

Le modèle $GR4H$ permet en moyenne de restituer 83 % (Figure 23) du volume d'eau écoulé lors des crues, indiquant une tendance nette à la sous-estimation du volume. De plus, 25 % des événements présentent une sous-estimation de plus de 40 %. La version $GR4H-CORR$ diminue légèrement le volume d'eau restitué et ne permettra donc pas d'améliorer la simulation des crues. Enfin, la version $GR4H-F0$ permet d'augmenter en moyenne de 1 % le volume de crue, ce qui est une amélioration limitée.

Nous avons ensuite adapté deux versions de GRP reprenant les modifications effectuées dans la version $GR4H-F0$ ainsi que l'ajout d'un réservoir d'interception de capacité fixée. La première version, nommée $GR3PI-FE$, emploie la fonction d'échange puissance de $GR4H$ (V.1). La seconde version, nommée $GR3PI-FL$, utilise une fonction d'échange linéaire (mais garde la même formulation), similairement à ce qui a été proposé par Le Moine (2008) mais sans paramètre supplémentaire :

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right) \quad (\text{V.2})$$

Analyse des performances

Ces versions permettent une légère amélioration de l'EARM (Tableau 17) pour les horizons supérieurs à 6h. Cependant, l'ajout simple du réservoir d'interception ($GR3PI$) permet une amélioration similaire. De plus, le critère C2MP est dégradé avec ces versions tandis qu'on observe une légère amélioration avec la version $GR3PI$. Il semblerait donc, selon les critères continus, que les performances du modèle soient plus sensibles à l'ajout d'un réservoir d'interception qu'à la modification de la fonction d'échange.

		<i>EARM</i>						
		<i>1 h</i>	<i>3 h</i>	<i>6 h</i>	<i>9 h</i>	<i>12 h</i>	<i>24 h</i>	<i>48 h</i>
<i>GRP0</i>		0,01	0,04	0,08	0,11	0,13	0,19	0,26
<i>GR3PI</i>		0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,25
<i>GR3PI-FE</i>		0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,24
<i>GR3PI-FL</i>		0,01	0,04	0,08	0,10	0,12	0,18	0,25
		<i>C2MP</i>						
<i>GRP0</i>		0,44	0,32	0,35	0,39	0,43	0,51	0,58
<i>GR3PI</i>		0,44	0,31	0,34	0,38	0,42	0,51	0,59
<i>GR3PI-FE</i>		0,43	0,31	0,33	0,37	0,40	0,50	0,57
<i>GR3PI-FL</i>		0,44	0,31	0,33	0,37	0,41	0,50	0,58

Tableau 17 : Médiane des distributions des critères *C2MP* et *EARM* pour quatre versions du modèle *GRP* (*GRP0*, *GR3PI* et deux versions avec réservoir d'interception et modification de la fonction d'échange)

La modification de la fonction d'échange permet de réduire l'erreur en amplitude de la pointe de crue pour tous les horizons de prévision (Figure 25). Cette fonction d'échange (puissance ou linéaire) engendre donc une meilleure restitution des volumes de crue par rapport à la correction multiplicative de *GRP0*. Le modèle est cette fois plus sensible à la modification de la fonction d'échange qu'à l'ajout d'un réservoir d'interception, la version *GR3PI* ne permet en effet qu'une faible amélioration de ce critère (Tableau 8).

De toutes les versions testées au cours de ce stage, la version *GR3PI-FE* est celle qui réduit le plus la sous-estimation du pic de crue.

Les gains obtenus avec les versions *GRPI-ROUT-TB*, *GRP-FE* et *GRP-FL*, qui présentent toutes les trois les plus grandes capacités du réservoir de routage (Figure 24), semblent indiquer que la détermination de ce paramètre est un point important pour l'efficacité du modèle.

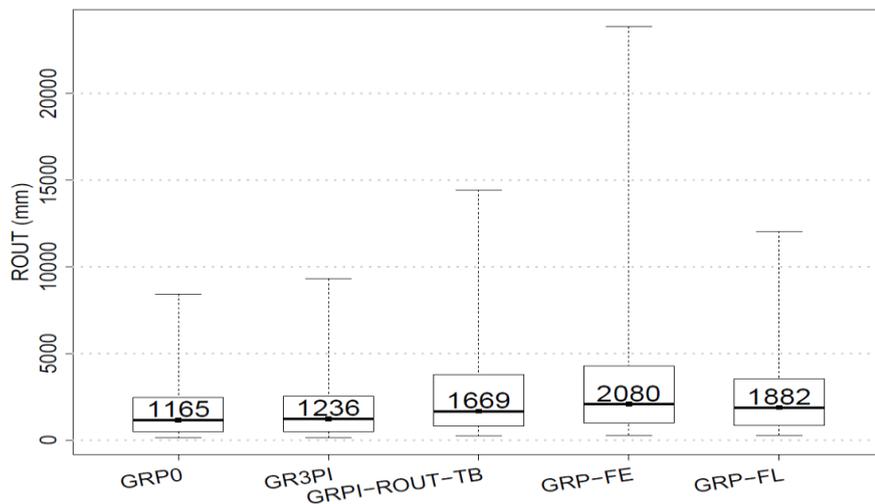


Figure 24 : Distribution de la capacité du réservoir de routage (*ROUT*) pour cinq versions du modèle *GRP* (*GRP0*, *GR3PI*, *GRPI-ROUT-TB* et deux versions avec modification de la fonction d'échange).

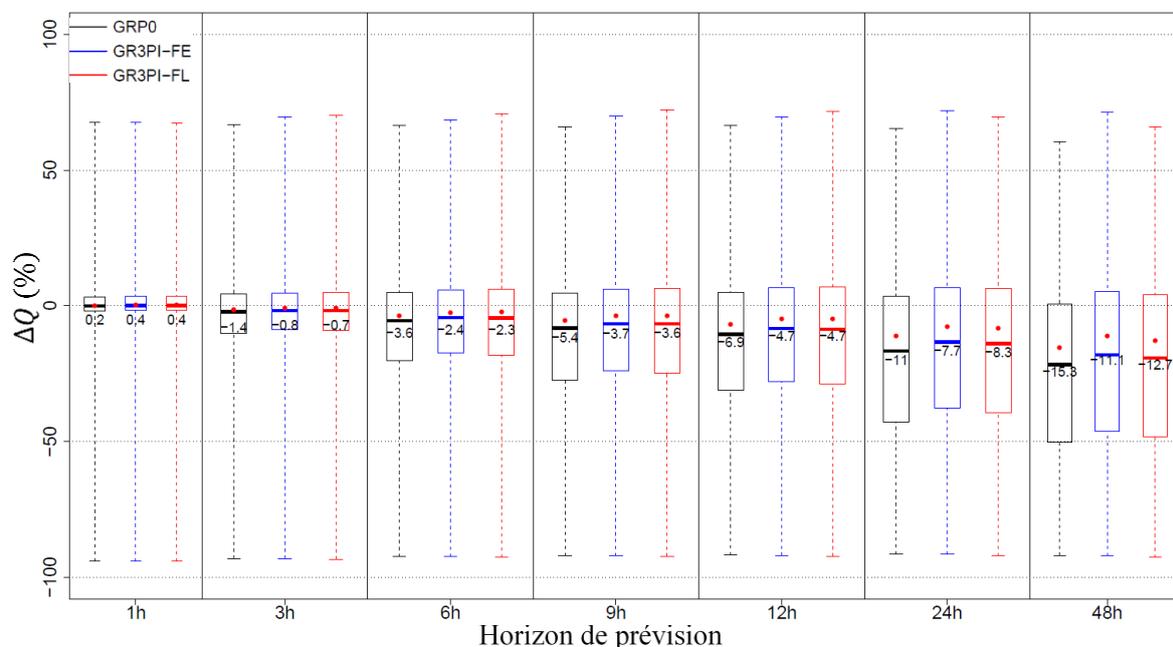


Figure 25 : Distributions du critère d'erreur en amplitude de la pointe de crue (ΔQ) pour trois versions du modèle GRP ($GRP0$ et deux versions avec modification de la fonction d'échange).

La modification de la fonction d'échange ne permet pas de diminuer le retard de la pointe de crue. À contrario, le retard à la montée est diminué pour toutes les échéances avec la version $GRP-FE$ et pour les horizons inférieurs à 24h pour $GRP-FL$ (Tableau 18).

	R_p						
	1 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h	48 h
$GRP0$	-0,02	-0,08	-0,13	-0,16	-0,16	-0,11	-0,08
$GRP-FE$	-0,02	-0,08	-0,14	-0,17	-0,18	-0,12	-0,08
$GRP-FL$	-0,02	-0,08	-0,14	-0,16	-0,17	-0,11	-0,08
	R_m (h)						
$GRP0$	-0,14	-0,84	-1,44	-1,7	-1,76	-1,23	-0,58
$GRP-FE$	-0,13	-0,78	-1,35	-1,54	-1,52	-0,97	-0,32
$GRP-FL$	-0,13	-0,79	-1,37	-1,58	-1,64	-1,22	-0,67

Tableau 18 : Médiane des distributions des critères d'erreur temporels R_p et R_m

V.7 Versions potentiellement adaptables à l'outil opérationnel

Parmi toutes ces versions testées, certaines semblent être une bonne alternative au modèle GRP actuel. Au vu des résultats obtenus, il semble raisonnable d'opter pour la version $GRPI-ROUT-TB$ qui consiste à caler les paramètres $ROUT$ et TB en simulation et d'ajouter un réservoir d'interception de capacité fixée. Cette version permet d'améliorer, d'une manière générale, les performances du modèle GRP. En effet, tous les critères calculés présentent un gain de performance comparé à la version initiale $GRP0$. De plus, cette version n'a pas engendré de grosses modifications du code FORTRAN et pourrait donc être facilement adaptée à l'outil opérationnel.

Il semblerait aussi que la version $GR3PI-FE$, proposant d'ajouter un réservoir d'interception de capacité fixée et de modifier la fonction d'échange en eau (V.1), pourrait aussi être une bonne alternative au modèle GRP actuel. Cette version permet en effet d'obtenir des gains de performance significatifs, elle permet tout particulièrement d'obtenir l'erreur en amplitude de la pointe de crue la plus faible des versions testées. De plus, cette version permet de conserver un

modèle parcimonieux car elle n'ajoute pas de paramètre supplémentaire à optimiser (3 paramètres) et les modifications du code FORTRAN réalisées sont légères. Enfin, il aurait été intéressant de tester une variante de cette version en calant le paramètre de la fonction d'échange (ECH) sans mise-à-jour. Par ailleurs, le couplage de ces deux versions pourrait peut-être permettre d'obtenir un nouveau gain de performance.

Une analyse visuelle des hydrogrammes de crue a été réalisée pour ces deux versions, ce qui représente une expertise manuelle d'environ 4500 événements par version.

On s'aperçoit que la version *GRPI-ROUT-TB* permet d'améliorer une bonne partie des hydrogrammes prévus comparé à la version actuelle. Une grande part des événements restant ne subissent pas d'améliorations majeures mais ne sont cependant presque jamais dégradés. Soit ces événements étaient déjà bien modélisés, soit ils présentaient des comportements très étonnants et erratiques. Les données de pluie, traitées à partir d'un réseau pluviométrique au sol parfois peu dense, pourraient en être la cause car elles ne permettraient pas une bonne représentation spatio-temporelle des pluies.

La Figure 26 présente un exemple d'événement de crue survenu entre le 14/12/2008 et le 18/12/2008 sur le bassin du Gapeau à Hyères. On remarque bien l'amélioration apportée par la version *GRPI-ROUT-TB* sur l'estimation d'un des deux pics de crue ainsi qu'une légère amélioration entre ces deux pics.

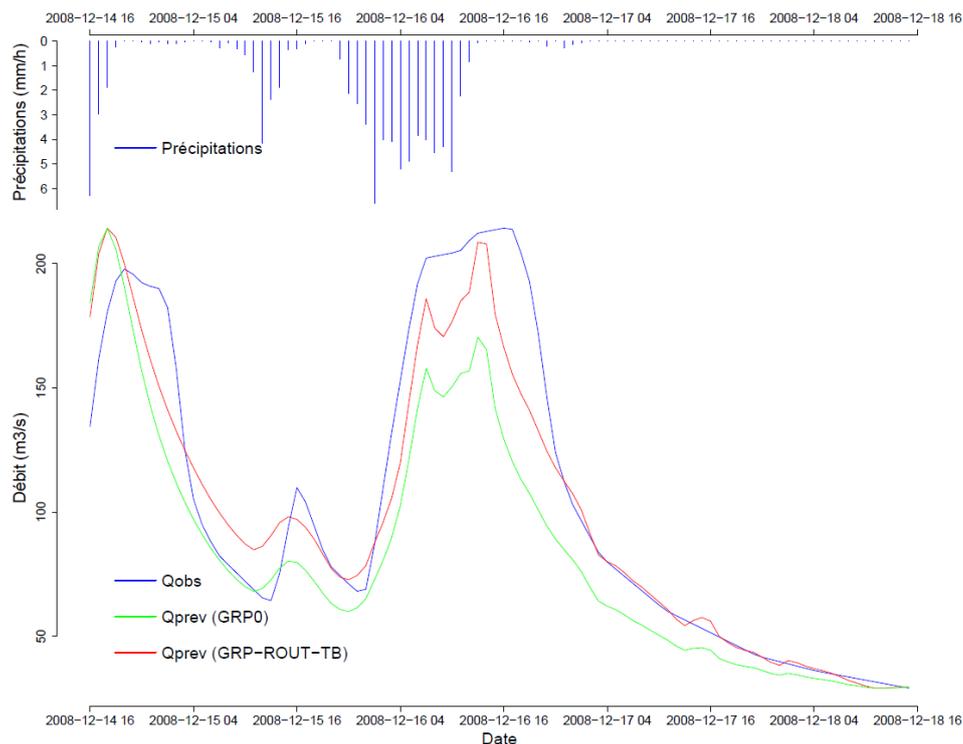


Figure 26 : Hydrogramme et hyétogramme d'un événement de crue survenu entre le 14 et le 18 décembre 2008 sur le bassin versant du Gapeau à Hyères (Y4624010). Les courbes bleue, rouge et verte représentent respectivement les débits observés et la trace des débits prévus à 48h par la version *GRPI-ROUT-TB* et la version actuelle *GRP0*.

La Figure 27 permet de comparer la versions *GRP0* et la version *GR3PI-FE* pour un événement de crue survenu entre le 01/07/2008 et le 05/07/2008 sur le bassin du Bedat à Saint-Laure. La version *GRP0* présentait un retard de la pointe de crue, qui a été corrigé par la versions *GR3PI-FE*.

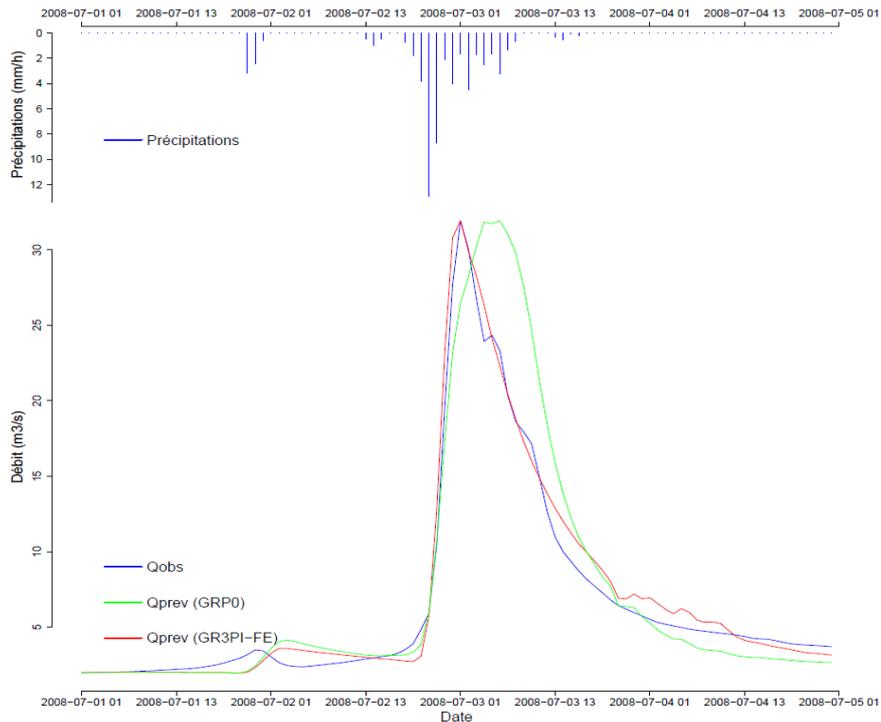


Figure 27 : Hydrogramme et hyétogramme d'un événement de crue survenu entre le 01 juillet 2008 et le 05 juillet 2008 sur le bassin versant du Bedat à Saint-Laure (K2773120). Les courbes bleue, rouge et verte représentent respectivement les débits observés et la trace des débits prévus à 24h par la version GRP3I-FE et la version actuelle GRP0.

Au-delà de ces deux exemples, nous avons réalisé l'analyse visuelle de plusieurs milliers d'événements de crue sur notre échantillon. D'une manière générale, il semble que, de manière qualitative, la version *GR3PI-FE* soit un peu moins performante que la version *GRPI-ROUT-TB*. En effet, d'après l'analyse visuelle effectuée, il est apparu qu'un nombre plus important d'événements était moins bien prévu avec la version *GR3PI-FE* qu'avec la version actuelle.

VI Conclusion et perspectives

Le but de ce stage était d'explorer diverses pistes d'améliorations possibles pour le modèle GRP en se basant sur de récents travaux de recherche et retours d'expérience (travaux de Facundo Alonso) (Ficchi, 2017; Viatgé & Perrin, 2016). Afin de répondre à cet objectif, une analyse bibliographique a été effectuée au cours de la première phase de ce stage pour identifier les options de modifications qui semblaient les plus prometteuses. Dans un second temps, nous avons pris en main un large échantillon de 266 bassins versants français présentant des caractéristiques hydroclimatiques et physiques variées de manière à assurer une bonne généralité à nos résultats. Nous avons ensuite mis en place un protocole d'analyse visant à appréhender les différentes améliorations possibles. Une batterie de critères visant à évaluer le modèle sous différents angles a été mise en place, incluant des critères continus comme cela avait été fait dans de précédents travaux sur le modèle mais également des critères à l'échelle événementielle pour donner une vision plus précise sur l'efficacité du modèle en crue.

La version actuelle du modèle GRP a servi de « référence » pour évaluer les différentes versions testées. Les versions testées au cours de ce stage correspondent à des modifications structurelles (ajout d'un réservoir d'interception ou modification de la fonction d'échange), à

des modifications concernant le paramétrage (ajout d'un paramètre à optimiser : la capacité du réservoir de production) et enfin à la modification de la stratégie de calage (calage séquentiel).

Les principaux résultats de cette étude montrent que :

- l'ajout d'un réservoir d'interception, de capacité fixe (évaluée préalablement de manière climatique), apporte de légères améliorations ;
- l'optimisation du paramètre gérant la capacité du réservoir de production apporte une amélioration modeste des performances, confirmant de précédents résultats ;
- des versions proposant une stratégie de calage séquentiel (calage de certains paramètres sans assimilation puis d'autres avec assimilation) permettent aussi une amélioration des performances. Le calage du paramètre *ROUT* sans assimilation conduit à une valeur du paramètre *CORR* plus proche de 1 en moyenne, diminuant ainsi l'erreur en amplitude. En outre, le calage en simulation du paramètre *TB* permet d'améliorer légèrement la restitution temporelle des événements en réduisant le retard à la montée et entre le pic de crue prévu et observé. La version combinant le calage des paramètres *ROUT* et *TB* sans assimilation donne les meilleurs gains de performance.
- la modification de la fonction d'échanges, consistant à remplacer le coefficient multiplicateur constant de *GRP* (*CORR*) par la fonction de *GR4* qui est variable dans le temps et bornée, a permis une diminution de la sous-estimation des volumes de crue (la plus importante des versions testées) ainsi qu'une réduction du retard à la montée.

Les résultats ont montré un gain de performance, plus significatif pour les horizons lointains. Les performances du modèle ne s'améliorent pas pour les échéances courtes et sont donc relativement peu sensibles à l'estimation des paramètres. Par ailleurs, les résultats obtenus pour les différentes versions montrent que les critères continus sont relativement insensibles aux modifications effectuées, tandis que les résultats obtenus pour les critères événementiels montrent des améliorations. Ces résultats pourraient tendre à indiquer que des critères continus ne seraient pas forcément les meilleurs pour l'optimisation des paramètres, et que d'autres fonctions objectif pourraient être employées.

Les résultats du calage séquentiel indiquent que ce serait plutôt les paramètres de routage (*TB* et *ROUT*) qui gagneraient à être optimisés sans assimilation des débits. L'assimilation des débits masque peut-être une partie de l'information dont aurait besoin le modèle pour bien caler ces paramètres dynamiques de la relation pluie-débit.

Les améliorations obtenues sont certes limitées, mais elles n'engendrent pas d'augmentation de la complexité du modèle. On peut donc considérer qu'elles sont obtenues à « moindre coût » et qu'elles pourraient être introduites dans le modèle opérationnel.

Les résultats indiquent que le modèle reste cependant déficient sur certains aspects et que l'on ne corrige que faiblement certains défauts majeurs. Il reste de nombreuses voies qui n'ont pas pu être explorées (ou approfondies) au cours de ce stage. Il faudrait notamment poursuivre l'étude en analysant la procédure d'assimilation des débits observés, la mise-à-jour du réservoir de routage semblant avoir un rôle prépondérant sur les performances du modèle, en particulier pour les échéances courtes. Il faudrait aussi tester d'autres fonctions-objectif permettant de mieux prendre en compte les erreurs d'amplitudes et temporelles à l'échelle événementielle. Enfin, les résultats sur le calage séquentiel seront à mettre en relation avec les travaux sur le calage multi-objectif en cours dans la thèse de Facundo Alonso.

VII Bibliographie

- Andreassian, V., Hall, A., Chahinian, N., Schaake, J., 2006. Introduction and synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets?, in: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307. pp. 1–5.
- Berthet, L., 2010. Prédiction des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat. AgroParisTech, Cemagref (Irstea) Antony, 604 pages.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software* 94, 166–171. doi:10.1016/j.envsoft.2017.05.002
- European Environment Agency (EEA), 2003. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe (No. 35). Environmental issue report, Copenhagen, 54 pages.
- Ficchi, A., 2017. An adaptive hydrological model for multiple time-steps: Diagnostics and improvements based on fluxes consistency. Thèse de doctorat. UPMC, Irstea, 258 pages.
- Garambois, P.-A., 2012. Etude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français. Elaboration de méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés. Thèse de doctorat. INP, Toulouse, 355 pages.
- Garçon, R., 1996. Prédiction opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche* 71–76. doi:10.1051/lhb/1996056
- Gerrits, A.M.J., 2010. The role of interception in the hydrological cycle.
- Gupta, H.V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., Andréassian, V., 2014. Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 463–477. doi:10.5194/hess-18-463-2014
- Irstea, 2017. Calage et application opérationnelle du modèle de prédiction de crue GRP - Manuel d'utilisation. Irstea, UR HBAN (Antony).
- Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31, 13–24. doi:10.1080/02626668609491024
- Lobligeois, F., 2014. Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de doctorat. AgroParisTech, Irstea (Antony), 310 pages.
- Marchandise, A., 2007. Caractérisation des processus de formation des crues éclair en région méditerranéenne. Application à la prédiction de crues. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2, 215 pages.
- Mathevet, T., Michel, C., Andreassian, V., Perrin, C., 2006. A bounded version of the Nash-sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins, in: Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. *International Association of Hydrological Sciences*, pp. 211–219.
- Moore, R.J., Bell, V.A., Jones, D.A., 2005. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geoscience* 337, 203–217. doi:10.1016/j.crte.2004.10.017
- Mouelhi, S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat. ENGREF (AgroParisTech), 323 pages.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat. INPG, 287 pages.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279, 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Savenije, H.H.G., 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrol. Process.* 18, 1507–1511. doi:10.1002/hyp.5563
- Sigma, 2017. Catastrophes naturelles et techniques en 2016 : une année de dommages tous azimuts (No. 2). Swiss Re Institute.
- Singh, V.P. (Ed.), 1995. Computer models of watershed hydrology, Rev. ed. ed. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo.
- Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), 2002. Mathematical models of small watershed hydrology and applications. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo.
- Tangara, M., 2005. Nouvelle méthode de prédiction de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat. Cemagref (Irstea), Antony, 374 pages.
- Viatgé, J., Perrin, C., 2016. Analyse du comportement du modèle GRP sur des bassins versants du SPC Méditerranée Est. Rapport REX. Irstea, UR HBAN (Antony), 42 pages.
- Yang, X., 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prédiction des crues en temps réel. Thèse de doctorat. ENPC, 205 pages.

RÉSUMÉ

La prévision des crues présente de forts enjeux sociétaux. L'amélioration des modèles de prévision doit ainsi permettre, entre autres, d'améliorer la protection de la population et des biens. Le modèle GRP, largement utilisé par les Services de Prévisions des Crues en France, a fait l'objet d'un certain nombre de travaux de recherche récents ainsi que de plusieurs retours d'expérience, notamment lors de la crue survenue en mai/juin 2016. Ces retours d'expérience ont mis en évidence la tendance qu'a le modèle à sous-estimer les volumes de crue et à prévoir en retard. L'objectif de cette étude a donc été d'explorer différentes pistes d'amélioration visant à pallier les faiblesses du modèle hydrologique GRP.

Cette étude s'est basée sur un échantillon de 266 bassins versants provenant d'une part de la base de données réalisée par Andrea Ficchi lors de ses travaux de thèses (240 bassins versants) et d'autre part des SPC Seine moyenne-Yonne-Loing (SmYL) et Loire-Cher-Indre (LCI) qui ont fourni des bassins versants fortement impactés par la crue de 2016 (26 bassins versants). Les données hydrométéorologiques sont disponibles au pas de temps horaire du 1er juillet 2004 au 31 juillet 2013 et proviennent essentiellement de la banque HYDRO et des réanalyses SAFRAN de Météo-France.

Au cours de ce stage, 16 versions modifiées du modèle GRP ont été réalisées afin de tester différentes voies d'amélioration concernant la structure du modèle (ajout d'un réservoir d'interception ou modification de la fonction d'échange), le paramétrage du modèle (ajout d'un paramètre à optimiser : la capacité du réservoir de production) et enfin la stratégie de calage du modèle (calage séquentiel des paramètres). Nous avons mis en place un protocole de test et d'analyse visant à quantifier les évolutions de performance entre les versions testées. Pour ce faire, nous avons utilisé un éventail de critères permettant d'évaluer le modèle sous différents angles (critères continus, événementiels, temporels).

Ce travail de recherche a permis de proposer une nouvelle version du modèle GRP présentant des améliorations, légères mais significatives, par rapport à la version originale, sans en augmenter la complexité globale. Cette version pourrait potentiellement être intégrée à l'outil opérationnel GRP.

Mots-clés : modélisation hydrologique, prévision de crues, modèle GRP