



Rapport de stage de Master 2 Recherche : Système Aquatique et Gestion de l'Eau

Année d'échange universitaire : Ecole des Ponts ParisTech – Ecole Spéciale des Travaux Publics

Quentin STOMP

Stage réalisé à l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et
l'Agriculture du 3 mars au 29 août 2014 sur le site d'Antony

Soutenu à l'Ecole des Ponts ParisTech le 23 Septembre 2014

Comment améliorer les performances du modèle GRP grâce au retour d'expérience sur les événements de crue de mai 2013 sur le bassin Seine ?

Maître de stage : Carina Furusho, Ingénieure de recherche Irstea

Jury :

Éric GAUME

Rapporteur

François PREVOT

Examineur

Bruno TASSIN

Examineur

Gilles VARRAULT

Examineur

Remerciements :

« Remercier c'est reconnaître que sans l'aide apportée, rien n'aurait été possible »

Remercier, est une chose tellement simple à imaginer mais compliquée à réaliser ou écrire tant l'aide reçue n'est pas quantifiable. Cette sobre page précédent les soixante prochaines a pour but de soulever le soutien psychologique, scientifique, technique et sportif qui m'a été apporté.

Je tiens en premier lieu à remercier le jury pour la correction et l'évaluation de ce travail : M. Éric Gaume, M. François Prevot, M. Bruno Tassin et M. Gilles Varrault.

Je tiens tout particulièrement à remercier Carina Furusho qui a su m'épauler, me guider, me rassurer, être pédagogique et ferme et surtout me supporter pendant ces six mois. L'accompagnement fourni a été exceptionnel et indispensable au bon déroulement du stage. Charles Perrin et Vazken Andréassian ont également su être d'excellents conseillers, correcteurs et sources d'inspiration.

L'équipe Hydro, par son ambiance et son accueil m'a donné confiance tant dans mon travail que dans mon jeu au frisbee et c'est pour ça que je leur dois bien ces quelques lignes. Florent, François, Pierre, Pierre, David, Andréa, vous m'avez enseigné qu'être un bon hydrologue ce n'est pas seulement avoir un bon coup droit, avoir une grosse barbe, savoir placer des verres d'eau au-dessus des portes, savoir faire du yoga, prendre neuf fois du café par demie journée ou encore avoir un cheveu sur la langue mais c'est savoir écouter, communiquer, prendre le temps de comprendre et aussi un peu chamberer... Un grand merci aussi au reste de l'équipe, Louise, Laure (pour nos échanges d'objets inter-bureaux par la fenêtre), Olivier (pour tes tee-shirts), Guillaume (malgré ton amour pour le RC Lens), Nathalie (pour ton soutien et ton aide), Carine, Maria-Helena, Tito, Cindy et Madeleine.

Le frisbee à l'Irstea bien plus qu'un sport, une attitude, une religion, un grand merci pour tous ces midis sportifs passés avec vous, Adrien, Simon, Simon et Nastassia.

Merci également à mes amis du B.A qui ont su me changer les idées, me faire lever le pied et le coude et me ramener de la plage dans ces moments difficiles de rédaction de mémoire.

La famille, les proches sans qui bien sur rien n'est possible, merci à vous (maman, tu ne sais toujours pas ce que j'ai fait ces six derniers mois mais ce rapport devrait t'aider à comprendre).

Et enfin mes derniers mots vont pour Solène, parce que je sais que ce n'est pas facile de me supporter dans 19.5m², et je me doute, qu'en période de rédaction, encore moins. Merci à toi pour ton soutien et le sourire quotidien que tu m'apportes.

Bonne lecture !

Résumé :

Les inondations apparaissent aujourd'hui comme une des catastrophes naturelles les plus dangereuses d'un point de vue socio-économique. Les modèles de prévision hydrologiques jouent un rôle indispensable dans la prévision de ces dernières pour les Services de Prévisions des Crues en termes d'anticipation. Les retours d'expériences permettent d'avoir des données supplémentaires et de comprendre les possibles défaillances des modèles. Dans ce rapport nous proposons d'étudier une période particulière correspondant aux événements sur le bassin de la Seine durant mai 2013 pour laquelle le modèle de prévision GRP utilisé par Irstea a été mis en échec et d'en comprendre les causes. La partie centrale du rapport se focalise sur la mise au point d'une méthodologie permettant de discerner les types d'erreurs qui ont entraîné la défaillance du modèle. Pour certains types d'erreurs, des corrections peuvent être apportées, c'est ce qui concentre la deuxième partie de ce mémoire. Nous analyserons enfin l'influence de ces modifications sur les éléments du modèle et généraliserons les résultats sur un échantillon plus large.

Abstract :

Nowadays floods are considered as one of the most dangerous natural disasters regarding social and economic damages. In order to anticipate them, floods forecast services need performant hydrological models. Events feedbacks are a way to get new data and are used to understand models' failures. In this paper, we will study an event which occurred in May 2013 in the Seine's catchment. The aim is to identify the causes of GRP's (Irstea's model) failure. The central point of this paper is the establishment of a methodology in order to identify different error types of GRP. In a second part we will try to correct these errors, when it's possible to do. Finally we will analyse the influence of this modifications on various model's parameters and generalise these tests on a larger scale.

Contenu

I.	Introduction.....	1
I.1.	Contexte et objectifs	1
I.2.	Les outils de prévision hydrologiques et le modèle GRP	2
I.2.1)	Les outils de prévision hydrologiques	2
I.2.2)	Le modèle GRP	4
II.	Caractérisation de l'évènement et de l'échantillon de bassins.....	5
II.1.	L'évènement de mai 2013	5
II.2.	Choix et caractéristique des bassins.....	6
III.	La méthodologie mise en place.....	8
III.1.	Mise en place des critères.....	8
III.2.	Les types d'erreurs pour les bassins sélectionnés.....	12
III.3.	Les différents types d'erreurs.....	13
IV.	Tests et observations des résultats	16
IV.1.	Quelques configurations de calage	16
IV.2.	Influence du seuil de calage	16
IV.3.	Modification de la fonction objectif.....	18
V.	Interprétation des résultats et perspectives.....	24
V.1.	Conséquences sur les paramètres du modèle	24
V.2.	Validation sur un échantillon de bassins plus large	26
VI.	Conclusions et perspectives	28
	<i>Annexes :</i>	30
A.1 :	Schéma simplifié résumant le rôle entre les différents acteurs de la prévention des crues en France.....	30
A.2 :	Le retour d'expérience	31
A.3 :	Bref rappel historique sur les données radar.....	31
A.4 :	Structure du modèle GRP.....	32
A.5 :	Algorithme simplifié de la méthode « pas à pas »	33
A.6 :	L'échantillonnage de la chronique pendant la procédure de calage	34
A.7 :	Courte explication de la détermination d'une période de retour grâce à la méthode de Gumbel	34
A.8 :	Gestion théorique des grands lacs EPTB.....	36
A.9 :	Etat de remplissage des grands lacs pendant les évènements de mai 2013	36
A.10 :	Détail des performances moyennes sur toute la chronique pour chaque bassin	37

A.11 : Analyse des lacunes sur la période de calage (1997-2013) pour une partie des pluviomètres.	38
A.12 : Comparaison des données d'intensité de précipitation pour la station Tonnerre pendant les évènements de mai 2013 entre le radar et celles des pluviomètres.	38
A.13 : Influence du seuil de calage sur le bassin de l'Yonne à Dornecy	39
A.14 : Etude comparée des critères RMSE et EARM en fonction de différentes classes de débit....	39
A.15 : Quelques hydrogrammes montrant l'influence d'une technique de calage par rapport à la configuration de base utilisée sur GRP.....	43
A.16 : Comparaison des performances globales entre les deux techniques de calage sur un échantillon de bassin plus large	44
A.17 : Apports du stage	44
Bibliographie.....	45

Table des figures :

Figure 1 : Schéma des actions mises en place durant le stage.....	2
Figure 2 : Schématisation des éléments temporels utilisés en prévision	3
Figure 3 : Schéma explicatif du réservoir de routage.....	5
Figure 4 : Carte représentant les bassins et périodes de retour	6
Figure 5 : Exemples d'hydrogrammes illustrant le critère qualitatif	9
Figure 6 : Courbe indiquant la relation entre le critère de persistance et le C2MP.....	11
Figure 7 : Influence de la modification du seuil de calage sur l'Armançon à Aisy sur Armançon lors des évènements de mai 2013 en contrôle.....	17
Figure 8 : Exemple illustrant les pas de temps choisis pour le calage en montée en orange	18
Figure 9 : Schéma indiquant les différentes stratégies de calage testées	20
Figure 10 : Graphique radar résumant les performances des trois stratégies de calage en contrôle ..	22
Figure 11 : Exemple des améliorations apportées par optimisation de la configuration de calage.....	23
Figure 12 : Influence sur les paramètres de la stratégie de calage basée sur les montées par rapport à la stratégie classique de calage	24
Figure 13 : Influence de la stratégie de calage sur le paramètre : correction des pluies	25
Figure 14 : Echantillon de 202 bassins versants utilisés pour la généralisation.....	26
Figure 15 : Exemple d'hydrogrammes, traçant l'évolution des débits en fonction des pas de temps, le 0 coïncidant avec le maximum de l'évènement.....	27

I. Introduction

Depuis une dizaine d'années le modèle, de prévision des crues GRP développé par Irstea est utilisé sur le secteur surveillé par les SPC (Service de Prévision des Crues) français. Malgré des prévisions globalement utiles pour les prévisionnistes, le modèle n'a pas réussi à reproduire une crue particulièrement importante ayant touché un certain nombre de bassins versants du SPC SMYL (Seine Moyenne Yonne Loing) en 2013. Est-ce que cet échec remet en cause la robustesse du modèle ? Est-ce que la structure et la conceptualisation même du modèle sont à l'origine de ces erreurs ? Ou existe-t-il une stratégie de calage peut être mieux adaptée à ce type de crue ?

Dans un premier temps nous avons analysé la particularité de l'évènement et des bassins qui sont à l'origine de l'étude. Nous avons ensuite mis au point une méthodologie basée sur un retour d'expérience permettant d'identifier les erreurs du modèle. Enfin, nous avons réalisé, commenté et analysé des tests afin d'optimiser les performances du modèle pour certains types d'erreurs.

I.1. Contexte et objectifs

Les inondations représentent un des plus dangereux risques naturels menaçant directement les Hommes et leurs lieux de vie. Ce constat s'est encore aggravé dans la dernière décennie car des millions de personnes sont touchées chaque année et le montant des dommages socio-économiques croît également partout dans le monde (WMO, 2014). Ce risque ne tend pas à diminuer à cause de l'augmentation de la fréquence d'évènements pluvieux exceptionnels, de la modification constante de l'occupation du sol (déforestation, augmentation de l'urbanisation des villes...) et l'accroissement du nombre de personnes vivant en zones inondables (Blöschl, 2013).

Compte tenu du danger que représentent les inondations, la prévision des crues est donc un enjeu majeur pour l'Etat, qui a mis en place différentes institutions, coordonnées dans le but de prévenir les crues. Les SPC, répartis sur tout le territoire en 19 zones ont pour mission à travers l'élaboration d'une carte de vigilance et de bulletins d'information de diffuser des informations quant à la prévision des crues et l'évolution des situations de crise. Le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Crues), a un rôle de soutien, conseil et formation auprès des SPC mais c'est également lui qui concentre l'information des SPC, la met en cohérence, la diffuse et la rend public à l'échelle nationale. Le lien entre les différents acteurs est représenté dans l'annexe A.1.

Il n'est pas nécessaire de remonter loin dans les archives pour se rendre compte de l'importance des dégâts induits par les inondations. En effet, la communauté scientifique s'accorde sur la menace qu'ont été les inondations en Europe centrale durant les mois de printemps et du début de l'été 2013. Ces évènements ont été considérés comme les plus importants de ces deux derniers siècles (Blöschl, 2013). Sur le Danube la hauteur d'eau atteinte par endroit n'avait pas été mesurée depuis 1501.

C'est d'ailleurs sur l'un des évènements particulièrement intenses de mai 2013, que l'étude se concentre. Pourquoi le modèle développé par Irstea a été mis en échec sévère sur cet évènement ? Afin d'en comprendre la cause il est nécessaire de passer par plusieurs étapes : examiner l'évènement considéré et construire une méthodologie permettant d'analyser les erreurs du modèle.

Pour répondre à ces questions, nous nous sommes appuyés sur le principe de retour d'expérience (exemples et définition en annexe A.2) pour établir une méthode pragmatique d'identification des sources d'erreur.

En définitive, nous disposons d'un modèle et de deux types d'informations :

- Performance globale du modèle sur une période longue 1997-2013
- Observations faites pendant l'évènement mai 2013

L'objectif de l'étude est de mettre en place une méthodologie d'analyse basée sur l'étude des performances globales du modèle ainsi que sur le retour d'expérience de l'évènement mai 2013. Cette méthodologie doit nous conduire à identifier les erreurs et comprendre la particularité de l'évènement de mai 2013. Une deuxième partie de l'étude a pour but de proposer des améliorations afin de minimiser certaines erreurs. Cette démarche est résumée en figure 1.

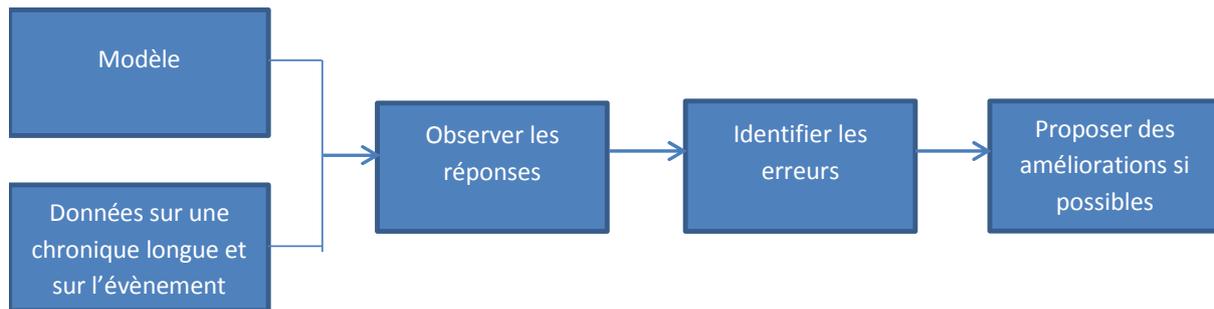


Figure 1 : Schéma des actions mises en place durant le stage

Il est important de noter que l'étude a été réalisée afin de comprendre les erreurs commises par le modèle pendant l'évènement de mai 2013 sur le bassin Seine. Nous présenterons donc tout d'abord la particularité de l'évènement ainsi que la sélection de bassins versants. L'élément central est la mise en place de la méthodologie mêlant retour d'expérience et performance globale. Cette partie présente l'analyse des données, la méthodologie adoptée et l'identification des erreurs. Nous détaillerons ensuite les différents tests menés afin d'apporter des améliorations aux erreurs détectées. Dans une dernière partie, nous analyserons et discuterons des résultats de ces tests.

1.2. Les outils de prévision hydrologiques et le modèle GRP

1.2.1) Les outils de prévision hydrologiques

La prévision hydrologique consiste en l'estimation chiffrée des différentes variables hydrologiques du système en s'interrogeant sur la gestion en temps réel des ressources en eau et les risques hydrologiques (crues, sécheresses). Elle se distingue de la *prédétermination* dans le sens où elle estime l'instant précis d'un évènement alors que *la prédétermination* estime la probabilité qu'un évènement se produise pendant une période sans référence à une date.

Le système de prévision a donc besoin d'une chaîne opérationnelle qui collecte et traite les données en temps réel. Il existe différents outils et méthodes de prévision ayant une efficacité dépendante de l'adéquation entre les caractéristiques du système à étudier (la taille du bassin versant, le type de crue...) et les caractéristiques du modèle (globale/distribuée, physique/conceptuelle, déterministe/probabiliste).

Il est tout d'abord nécessaire de s'interroger sur les différents éléments d'un système de prévision hydrologique. La notion de prévision est indissociable de la notion d'échéance ou de délai de prévision (Roche et al, 2012).

L'échéance d'une prévision est la date jusqu'à laquelle les variables hydrologiques doivent être prévues. L'intervalle de temps entre le moment de la prévision et l'échéance est appelé *l'horizon*

temporel de la prévision. Le *délai de prévision* est la durée de cet intervalle. Si on se place à un délai de prévision fixé, alors l'échéance avance au fil du temps comme schématisé dans la figure 2. Le délai de prévision permet de classer les prévisions en plusieurs classes (Roche et al, 2012) :

- Les *prévisions immédiates* (0 à 6h) et *à court terme* (6 à 72 h) permettent d'obtenir en général les débits et les hauteurs instantanés (si le pas de temps est petit par rapport au temps caractéristique de l'évènement), ce qui trouve son utilité aussi bien dans la protection des personnes et des ouvrages hydrauliques mais aussi dans la navigation.
- Les *prévisions à moyen terme* (72h à 12 jours) concernent le plus souvent les débits et hauteurs d'eau moyennes. Elles sont utiles pour la gestion de la ressource, en période d'étiage par exemple.
- Les *prévisions à long terme* ou saisonnières (≥ 12 jours) se concentrent sur les volumes et permettent en général la constitution de stock stratégique d'eau.

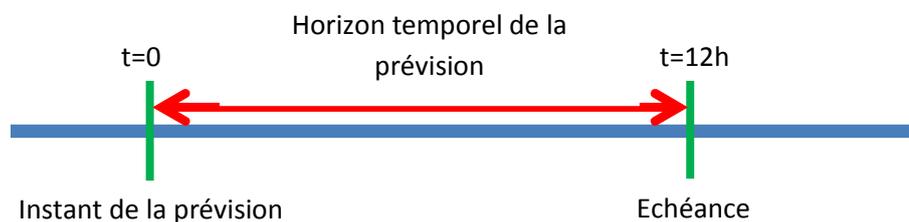


Figure 2 : Schématisation des éléments temporels utilisés en prévision

Les variables de prévision qui sont étudiées aux différents pas de temps sont en règle générale :

- la hauteur d'eau, le débit et la date au maximum de la crue ;
- le volume total de la crue (cela a son importance pour la gestion des ouvrages hydrauliques et de la ressource) ;
- l'instant de dépassement des valeurs seuils pour déclencher les alertes (utile par exemple pour l'organisation des équipes de secours) ;
- les superficies inondées ;
- la vitesse de propagation de la crue.

Un système de prévision est constitué de différents éléments, et même si le modèle a une place importante dans la mesure où il sert à décrire l'évolution de la variable hydrologique considérée, il n'est cependant qu'une composante. En effet, les autres éléments prépondérants sont :

- un réseau de mesure (capteur de hauteur d'eau, piézomètre, pluviomètre, radar...) ;
- un système de collecte en temps réel, de stockage et de validation des données ;
- les différents scénarios disponibles (notamment météo)

Les modèles de prévision à proprement parler peuvent être de différentes natures. Nous avons utilisé pour cette étude un modèle de type « pluie-débit ».

Dans la mesure où elle utilise directement les observations de précipitation, la prévision « pluie-débit » a en règle générale de courtes échéances et des incertitudes réduites. A la différence de la prévision « débit-débit », elle ne propage pas les débits pour obtenir le débit à l'exutoire. La prévision « pluie-débit » est donc plus performante lorsque les bassins intermédiaires ont une influence non négligeable, les points de contrôle à l'amont ne sont pas représentatifs ou lorsque l'échéance de prévision n'est pas jugée suffisante. Les délais d'anticipation peuvent être augmentés grâce à des prévisions météo de qualité.

I.2.2) Le modèle GRP

Le modèle développé par Irstea (Tangara, 2005 ; Berthet, 2010) utilisé pendant le stage est le modèle GRP (modèle du Génie Rural pour la Prévision des crues). C'est un modèle hydrologique dont le développement a été centré sur la prévision des crues. Il est :

- Continu : Il se sert des conditions météorologiques passées, bien au-delà de l'évènement considéré dans le but de déterminer l'état initial du bassin au début de l'évènement.
- Global : Le bassin est alors considéré comme une entité unique où des relations simples empiriques relient entrées et sorties et ne prend pas en compte la variabilité spatiale, les conditions aux limites ou les caractéristiques géométriques comme le fait un modèle distribué.
- Conceptuel : Il se situe entre le modèle physique (discrétisation fine du bassin) et empirique (relations après analyse des entrées sorties, non basées sur les lois de la physique). Il schématise par des équations fonctionnelles les procédés.

Le modèle GRP est de type réservoir, comme indiqué en annexe A.4. Le module de production va estimer l'interception des précipitations par l'Évapotranspiration potentielle (ETP), puis déterminer le rendement des pluies grâce au réservoir « sol ». Il va ainsi calculer la pluie nette donnant, après multiplication avec le paramètre de correction (paramètre libre) des pluies, la pluie efficace. Le transfert des écoulements se fait grâce à deux fonctions, l'hydrogramme unitaire (paramètre libre : temps de base) et le réservoir de routage (paramètre libre : capacité du réservoir). La dernière étape est l'assimilation, c'est-à-dire la mise à jour du débit simulé par rapport au débit observé.

Au final, on recense trois paramètres libres : la correction des pluies, le temps de base de l'hydrogramme unitaire et la capacité du réservoir de routage.

Il est important de revenir sur deux points qui seront soulevés plus loin dans le mémoire afin de compléter cette brève description du fonctionnement du modèle à savoir : le calage des paramètres libres et l'assimilation.

Le calage consiste à déterminer empiriquement les valeurs des paramètres libres du modèle de façon à décrire au mieux le fonctionnement hydrologique du bassin. Ce calage est optimisé pour un horizon bien précis, l'horizon de calage. Le modèle GRP utilise une procédure de calage qui consiste à rechercher un optimum pour les paramètres via une méthode « pas à pas », développée à Irstea (Michel, 1989 ; Nascimiento, 1995). Il s'agit en réalité de partir d'un vecteur initial de paramètres puis de faire varier successivement chaque paramètre d'un incrément. On calcule à chaque fois la fonction objectif qui correspond à l'erreur de la simulation par rapport à l'observé. Le but de la procédure de calage est de minimiser cette erreur. S'il y a une amélioration de cette fonction, on retient alors le vecteur de paramètres, avec possibilité d'accélérer la recherche si on trouve un certain nombre d'améliorations successives dans le même sens. Si, au contraire, la valeur de la fonction objectif n'est pas améliorée alors on diminue la valeur de l'incrément. On continue cet algorithme jusqu'à atteindre un incrément minimal δ_{mini} que l'on se fixe à priori. En présence de peu de paramètres, cette méthode est particulièrement efficace (Mathevet, 2005). On comprend alors l'importance de la fonction objectif dans la procédure de calage d'un modèle. Ce processus est schématisé en annexe A.5. L'évaluation du modèle GRP utilise la méthode du Split Sample Test (Klemes, 1986) décrite dans l'annexe A.6, qui scinde la période disponible en deux sous-périodes servant alternativement au calage et au contrôle du modèle. Il est important de remarquer que cette procédure de calage peut se faire également en ne considérant que les débits au-dessus d'un seuil, appelé seuil de calage.

L'assimilation, quant à elle, intervient en dernier et pourrait se définir comme une mise à jour et une correction des variables d'état à l'instant de la prévision. En réalité, cette procédure se déroule en

deux étapes distinctes. Tout d'abord il y a une mise à jour du niveau du réservoir de routage en utilisant la valeur de l'avant dernier débit observé (figure 3).

ROUT : taille du réservoir de routage

R = fonction de (Q_{obs})

De manière à avoir $Q_{sim} = Q_{obs}$

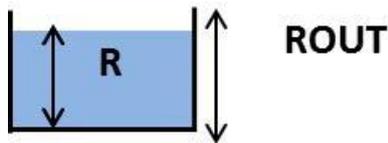


Figure 3 : Schéma explicatif du réservoir de routage

Une fois cette étape réalisée, nous avons donc un nouveau Q_{sim} que l'on peut appeler Q_2 .

La deuxième étape consiste en l'utilisation de l'erreur du modèle au pas de temps précédent (Tangara, 2005). Ainsi le débit final est calculé :

$$Q_2'(t+H) = Q_2 * \frac{Q_{obs}(t)}{Q_{sim}(t/t-H)} \quad (E1)$$

H : le pas de temps

t/t-H : se comprenant comme : « à l'instant t, sachant l'instant t-H »

Il existe d'autres méthodes d'assimilation comme le filtre de Kalman, le filtre à particules ou le réseau de neurones (RNA). Ce dernier a également été implanté en tant que méthode opérationnelle dans GRP (Berthet, 2010).

II. Caractérisation de l'évènement et de l'échantillon de bassins

II.1. L'évènement de mai 2013

L'étude réalisée se concentre sur une période particulière correspondant aux épisodes sur le bassin de la Seine durant mai 2013. En effet il s'agit d'un évènement peu courant par son intensité et la période à laquelle il s'est produit, avec des risques importants en termes de gestion des ressources en eau.

En effet, selon Météo France (bulletin climatique de mai 2013, CMIR-Paris), le mois de mai 2013 a donné lieu à des évènements pluvieux exceptionnels avec des excédents par rapport aux normales de plus de 70% sur le bassin Seine.

Ces évènements ont provoqué de forts débits de pointe, les périodes de retour vont de 1 an à 20.8 ans avec une médiane à 8.3 ans, en particulier dans le sud de la région concernée, avec des périodes de retour allant jusqu'à 20 ans comme l'indique la figure 4 :

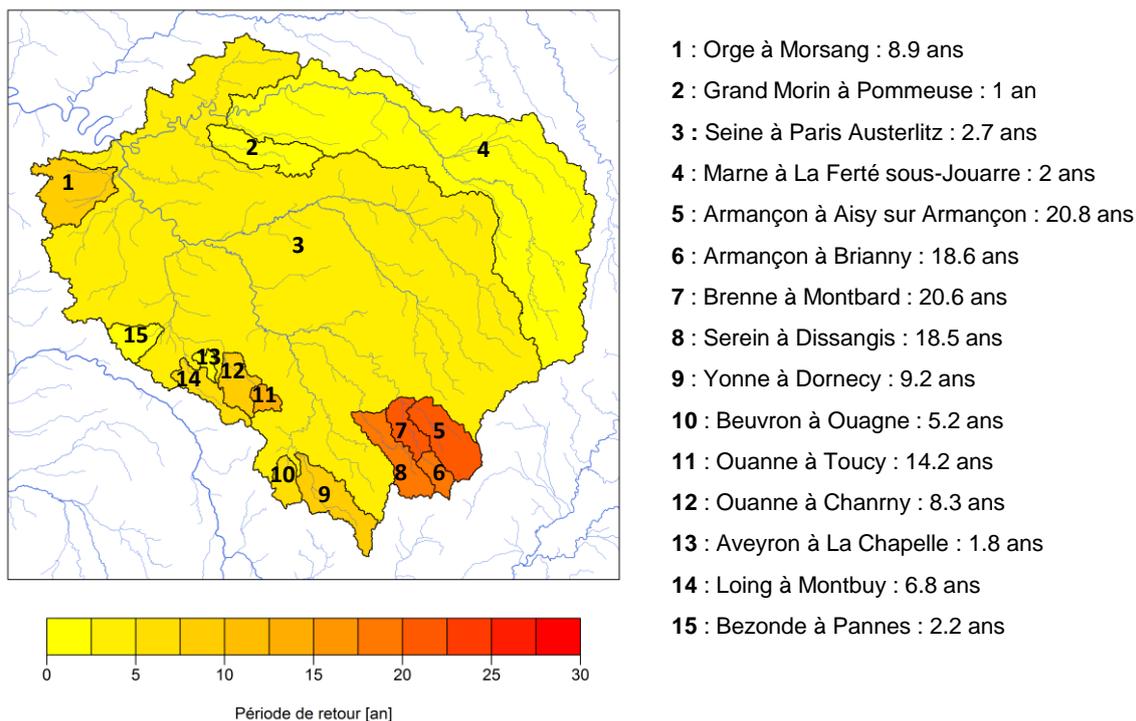


Figure 4 : Carte représentant les bassins et périodes de retour

Nous avons calculé ces périodes de retour en utilisant la méthode Gumbel sur les débits horaires maximums annuels sur la période 1960-2013, puis avons vérifié leurs cohérences avec les données de la banque HYDRO. Une explication de cette méthode est détaillée en annexe A.7.

De plus, le printemps est considéré comme "à risque" pour le bassin Seine car il correspond à la période de fin de remplissage des grands lacs exploités par l'EPTB Seine Grands lacs. En effet la région parisienne dispose de quatre grands lacs réservoirs d'une capacité totale de 800 millions de mètres cubes. Ces quatre lacs, dont trois sont situés en dérivation de la Seine, de la Marne, de l'Aube et le quatrième au fil de l'eau sur l'Yonne, ont pour mission de soutenir l'étiage sur la Seine et ses affluents ainsi que de lutter contre les inondations. Le fonctionnement décrit en annexe A.8 indique que de novembre à mai les ouvrages se remplissent progressivement pour atteindre leurs niveaux maximum en juin de manière à soutenir les étiages en été. Cependant en mai, ces lacs sont remplis à 90%, et l'année 2013 ne fait pas exception, comme l'indique l'annexe A.9. Cette situation est un réel danger car les lacs ne peuvent, dans ce cas pas jouer leur rôle de lutte contre les inondations pendant des événements de crue qui se produisent en mai.

II.2. Choix et caractéristique des bassins

La sélection des bassins a été réalisée en collaboration avec le SPC SMYL. En effet, l'objectif étant d'identifier les erreurs du modèle de prévision, le SPC désire accentuer les recherches sur certains bassins. Pour l'ensemble des 40 bassins initialement prévus, une classification a été faite en fonction de l'ordre de priorité pour le SPC. Il en ressort que 15 bassins sont prioritaires. Cette priorité a été fixée en fonction de l'utilité des bassins pour le SPC : bassins en amont de modèle hydraulique, comportement étrange durant cette crue, courbe de tarage modifiée récemment, etc ... Le tableau 1 présente les bassins (situés sur la figure 4) ainsi que leurs superficies et codes d'identification sur la banque hydro.

Code HYDRO	Nom bassin	Superficie (km ²)
H2051010	Yonne à Dornecy	781
H2062010	Beuvron à Ouagne	264
H2332020	Serein à Dissangis	643
H2402010	Armançon à Brianny	222
H2442340	Brenne à Montbard	732
H2452020	Armançon à Aisy sur Armançon	1350
H3021010	Loing à Montbouy	409
H3023211	Aveyron à La Chapelle	99
H3102010	Ouanne à Toucy	153
H3122010	Ouanne à Charny	562
H3322010	Bezonde à Pannes	339
H4252010	Orge à Morsang	922
H5321010	Marne à La Ferté-sous-Jouarre	8818
H5732010	Grand Morin à Pommeuse	770
H5920010	Seine à Paris-Austerlitz	43800

Tableau 1 : Détail des bassins et de leurs superficies.

La médiane de ces bassins est de 643 km². Il sera intéressant de voir par la suite si les imprécisions du modèle sont liées d'une manière ou d'une autre à la taille des différents bassins.

Le bassin de la Seine est dans son ensemble peu accidenté et présente des altitudes faibles, en général inférieures à 300 m. Cela explique les faibles pentes d'écoulement des cours d'eau se dirigeant pour la plupart vers l'Ouest. La géologie du Bassin Parisien est organisée en cercles concentriques. Les terrains sont sédimentaires avec successivement, depuis l'extérieur vers l'intérieur (D'après des informations du PIREN-Seine : <http://www.sisyphes.upmc.fr/piren>) :

- Une auréole calcaire perméable : infiltration possible sous condition de non urbanisation et saturation du sol ;
- Des argiles et marnes imperméables : infiltration impossible ou extrêmement faible ;
- Une craie perméable des terrains tertiaires (argiles, calcaires et sable) : formation à perméabilité limitée avec donc une infiltration faible.

Les sols du bassin Seine, l'alternance de sols perméables et imperméables (donnant lieu à la formation des aquifères) ainsi que les faibles pentes conditionnent le débit des rivières.

III. La méthodologie mise en place

Comme indiqué dans la partie précédente, l'évènement de mai 2013 était particulièrement intense sur le bassin Seine et a donné lieu à des erreurs de prévision. Nous disposons donc de ce retour d'expérience ainsi que des performances globales du modèle sur une chronique plus longue. L'objectif est de savoir quels types d'erreurs sont à l'origine de la défaillance du modèle pendant cet évènement. Pour cela, il est essentiel de passer par plusieurs étapes à savoir : la mise en place de critères permettant de juger l'efficacité du modèle, l'observation de nos bassins grâce à ces critères et enfin proposer une identification des erreurs.

III.1. Mise en place des critères

Comme le souligne Mathevet (2005), il existe deux types de critères pour évaluer un modèle : qualitatifs et quantitatifs. Les critères qualitatifs reposent en général sur l'observation des hydrogrammes. Ils sont très utilisés pour comparer la performance des modèles en particulier pendant des évènements donnés. Cependant, comme l'a montré Houghton-Carr (1999) cette évaluation est très subjective, elle dépend fortement des attentes du scientifique qui observe. Les critères quantitatifs quant à eux sont largement utilisés pour comparer deux modèles entre eux mais également pour évaluer l'efficacité d'un modèle. Ce type de critères a également des limites que l'on peut soulever : Existe-t-il des valeurs objectives pour chaque critère qui permettent d'affirmer que la prévision d'un modèle est considérée comme bonne ? Quels critères choisir ?

Notre étude trouve une application directe pour le SPC qui se base en grande partie sur l'observation des hydrogrammes. Il est donc important d'utiliser ce critère qualitatif. Cependant, la simple observation des hydrogrammes ne peut suffire. Nous utiliserons donc aussi des critères quantitatifs pour juger de la performance moyenne du modèle sur l'ensemble de la période d'étude. Les deux approches, qualitatives et quantitatives sont complémentaires (Benett et al, 2013).

La première phase est qualitative et permet de classer les réponses du modèle en trois catégories, illustrées dans la figure 5 :

- Bon : le débit simulé suit correctement le débit observé, en s'accordant bien sûr, sur une marge d'incertitude raisonnable ($\approx 80\%$) (l'information est suffisamment fiable du point de vue du SPC pour la prise d'une décision);
- Moyen-mauvais : le débit simulé suit le débit observé cependant il dépasse une bande d'incertitude que l'on se fixe à 80%. Se classent également dans cette catégorie les bassins dont la réaction du modèle ne détecte pas le dépassement des seuils de vigilance ou avec un retard significatif (l'information n'est pas assez fiable pour induire une prise de décision de la part du SPC);
- Très mauvais : les débits prévus ne suivent absolument pas les débits observés.

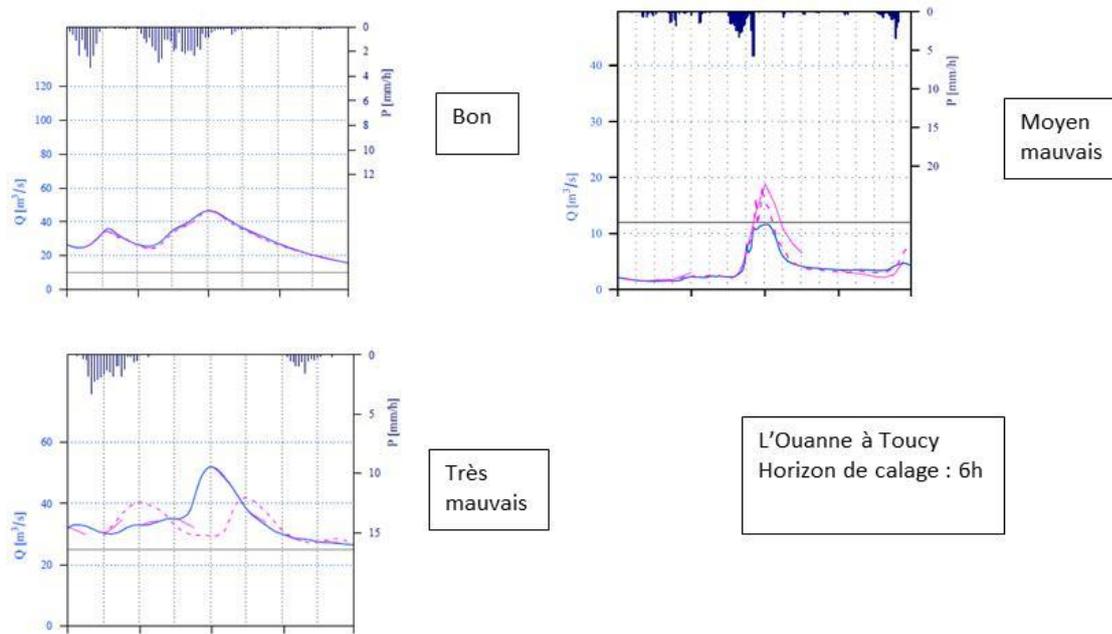


Figure 5 : Exemples d'hydrogrammes illustrant le critère qualitatif

Dans un second temps, il est essentiel de mettre en place les critères quantitatifs que nous allons utiliser.

Dans la littérature, il existe un grand nombre de critères permettant de juger de l'efficacité d'un modèle (Green, 1986 ; Weglarczyk, 1998 ; Bennett et al, 2013). Néanmoins il n'existe pas de critère idéal, tout dépend des besoins de l'étude (Perrin, 2000). Dans notre cas il serait intéressant de disposer de plusieurs critères de telle sorte que l'on puisse : comparer l'efficacité du modèle entre les bassins, connaître l'efficacité de notre modèle pendant les périodes de crue et enfin si modifications sur le modèle de notre part il y a, juger de leurs pertinences.

Un critère couramment utilisé est l'erreur quadratique moyenne exprimée en m^3/s .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim})^2} \quad (E2)$$

Avec : Q_i^{obs} : Le débit observé au pas de temps i

Q_i^{sim} : Le débit simulé au pas de temps i

H : Le délai de prévision (exprimé en nombre de pas de temps)

N : Le nombre de pas de temps total

Ce critère donne l'erreur quadratique moyenne, mais il est préférable de prendre en compte pour l'évaluation du modèle, un autre critère nous donnant une erreur relative pour chaque pas de temps rapporté au débit moyen. En effet avec le critère RMSE, il est compliqué de comparer les bassins entre eux car cela dépend de la taille du bassin. D'où la nécessité de prendre en compte un critère adimensionnel (Mathevet, 2005). Cela peut se faire par exemple avec l'EARM (Erreur Absolue Relative Moyenne), adimensionnel, permettant une comparaison plus facile entre évènements ou périodes.

$$EARM = \frac{\sum_{i=1}^n |(Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim})|}{\sum_{i=1}^n Q_{i+H}^{obs}} \quad (E3)$$

Ce dernier indice nous permet donc de comparer plus aisément l'erreur du modèle de manière relative entre les bassins. Nous allons considérer à présent un second indice qui va nous permettre d'estimer l'efficacité du modèle par rapport à une prévision naïve. Pour cela, nous allons utiliser un critère classiquement utilisé en hydrologie le critère de persistance (Benett et al, 2013 ; Allchin, 2001).

$$PI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-H} (Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n-H} (Q_{i+H}^{obs} - Q_i^{obs})^2} \quad (E4)$$

Ce critère permet de juger l'efficacité du modèle par rapport à une estimation naïve qui reviendrait à prendre comme prévision la valeur du débit observé au moment où est réalisée la prévision. Ce critère s'interprète de la manière suivante :

- $PI < 0$: La prévision du modèle est moins bonne que la prévision du modèle de persistance ;
- $PI = 0$: La prévision du modèle est équivalente à la prévision du modèle de persistance ;
- $0 < PI < 1$: Plus la valeur du critère s'approche de 1, plus la prévision du modèle est utile car il apporte une information supplémentaire à la connaissance du débit observé à l'instant de prévision ;
- $PI = 1$: La prévision est parfaite.

Il va nous être utile dans la mesure où il va permettre de comparer certaines modifications apportées au modèle. Cependant ce critère possède un inconvénient majeur : il peut donner des valeurs largement négatives, ce qui peut rendre difficile l'interprétation des résultats moyens sur l'échantillon de bassins versants.

Nous avons alors besoin d'un critère borné, le C2MP:

$$C2MP = \frac{PI}{2-PI} \quad (\text{Mathevet, 2005}) \quad (E5)$$

- $-1 < C2MP < 0$: La prévision du modèle est moins bonne que la prévision du modèle de persistance
- $C2MP = 0$: La prévision du modèle est équivalente à la prévision du modèle de persistance ;
- $0 < C2MP < 1$: La prévision est meilleure que la prévision du modèle de persistance.

L'avantage de ce critère est qu'il est borné, donc plus facile à interpréter, son zéro coïncide avec celui du critère de persistance. Enfin un autre avantage est que dans sa partie positive, il est légèrement inférieur au critère de persistance ce qui réduit le caractère « optimiste » du critère d'efficacité, comme l'indique la figure 6.

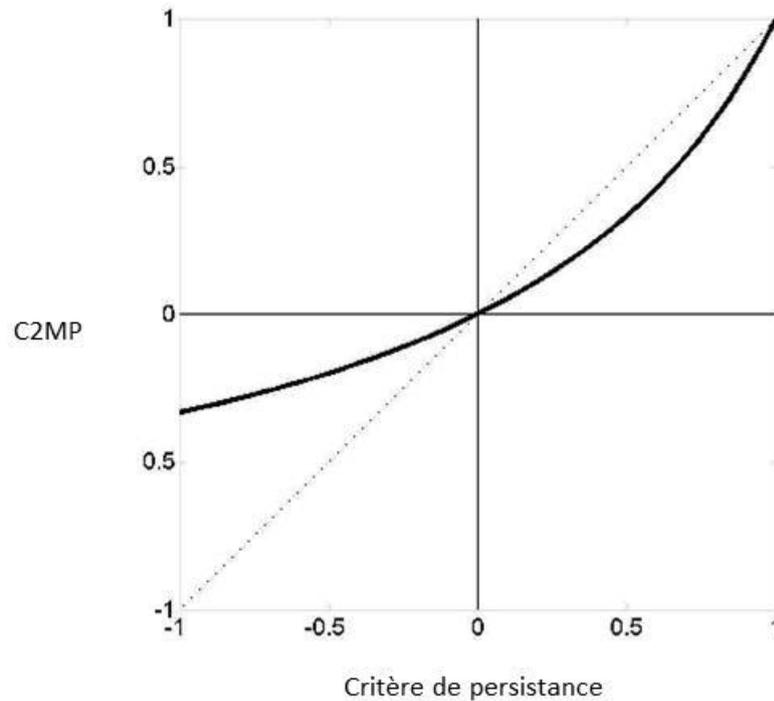


Figure 6 : Courbe indiquant la relation entre le critère de persistance et le C2MP

(Mathevet, 2005)

Afin de présenter un intérêt opérationnel, il est important que notre modèle ne dépasse pas à tort un seuil de vigilance, ce qui signifierait une fausse alerte ou au contraire qu'il ne détecte pas un dépassement de seuil d'alerte. Pour cela, nous allons utiliser le critère CSI (*Critical Success Index*), permettant de juger la qualité de la prévision du dépassement d'un seuil d'alerte :

	Dépassement observé	Non-dépassement observé
Dépassement prévu	A	B
Non-dépassement prévu	C	D

Tableau 2 : Tableau de contingence du calcul du critère CSI

A : Nombre de pas de temps observés au-dessus du seuil de vigilance et prévus au-dessus par le modèle.

B : Nombre de pas de temps observés au-dessous du seuil de vigilance et prévus au-dessus par le modèle.

C : Nombre de pas de temps observés au-dessus du seuil de vigilance et prévus au-dessous par le modèle.

D : Nombre de pas de temps observés au-dessous du seuil de vigilance observés et prévus au-dessous par le modèle.

$$\text{Avec } CSI = \frac{A}{A+B+C} \quad (\text{E6})$$

Le CSI correspond en réalité à une combinaison de deux critères à savoir :

- La probabilité de détection (POD) : probabilité conditionnelle de prévoir un dépassement sachant que celui-ci est observé : $POD = \frac{A}{A+C}$ (E7)

- Le taux de fausses alertes (FAR) : probabilité de faire une fausse alerte : $FAR = \frac{B}{A+B}$ (E8)

On peut alors écrire le CSI sous une autre forme :

$$CSI = \frac{1}{\frac{1}{1-FAR} + \frac{1}{POD} - 1} \quad (\text{E9})$$

Une bonne simulation correspond donc à une valeur élevée de POD et faible de FAR. Ainsi le CSI est d'autant meilleur qu'il se rapproche de la valeur 1. Ce critère est également important pour notre étude car la détection ou non des crues combinée au ratio du nombre de fausses alertes peut nous donner des informations sur la réaction du modèle.

Critère	Signification	Fonction
EARM	Erreur Relative Absolue Moyenne	Comparaison entre les bassins
C2MP	Persistance bornée	Evaluation des modifications apportées
CSI	Prévision de dépassement d'un seuil d'alerte	Evaluation d'un point de vue opérationnel des performances du modèle

Tableau 3 : Synthèse des différents critères choisis

III.2. Les types d'erreurs pour les bassins sélectionnés

Avant d'identifier les erreurs possibles il est nécessaire d'observer les réponses du modèle grâce aux différents critères mis en place dans la partie précédente.

Critère qualitatif :

Il s'agit ici d'utiliser le retour d'expérience, complété par les observations sur 18 évènements les plus importants en termes de débit sur l'ensemble de la chronique, avec la méthodologie que nous avons mis en place précédemment. Nous pouvons ainsi classer nos bassins comme nous l'avons établi précédemment :

Type 1(bon)	Type2 (moyen-mauvais)	Type3 (très mauvais)
Aveyron à la Chapelle	Armançon à Brianny (-)	Seine à Austerlitz
Brenne à Montbard	Armançon à Aisy (-)	Marne à La Ferté
Bezonde à Pannes	L'Yonne à Dornecy (-)	Ouanne à Charny
	L'Ouanne à Toucy (+et-)	
	Le Serreain à Dissangis (+et-)	
	Beuvron à Ouagne (+et-)	
	Grand Morin (-)	
	Loing à Montbuy (-)	

(-) : sous-estimation du modèle (+) : surestimation

Tableau 4 : Classement des bassins selon le critère qualitatif

Critères quantitatifs :

Nous avons calculé les indices que nous avons mis en place à savoir le C2MP (critère de persistance borné), l'EARM (Erreur Absolue Relative Moyenne) et le CSI (critère de dépassement de seuil). Ces indices sont calculés sur toute la chronique 1997-2013 et donnent donc une idée de la performance globale du modèle.

Voici un tableau résumant les performances moyennes des 15 bassins, sachant qu'un détail pour chaque bassin est dressé en annexe A.10.

Critères	Moyenne	Min	Max
C2MP	0.360	0.038	0.576
CSI	42.8	18.3	59.2
EARM	8.50	14.05	6.00

Tableau 5 : Performances moyennes des 15 bassins en fonction des critères

Le C2MP paraît peu élevé. Cela vient des quelques bassins que le modèle n'arrive pas du tout à représenter, l'écart type est d'ailleurs relativement important puisqu'il est de 0.18.

III.3. Les différents types d'erreurs

En résumé nous observons trois types de réponse du modèle à savoir :

- Une bonne réponse pendant les événements intenses de crue et une performance globale correcte
- Une sous-estimation ou surestimation lors des événements de crues intenses et une performance globale correcte
- Une réponse très mauvaise lors des forts événements de crues et une performance globale plutôt moyenne voire mauvaise

Il s'agit à présent de savoir quels sont les types d'erreurs qui sont susceptibles de donner ces différentes réponses.

La littérature (Allchin, 2001) indique des classifications possibles des types d'erreurs. Pour notre étude il est possible de classer les erreurs en trois catégories, à savoir : les erreurs induites par les données, une mauvaise configuration du modèle et la conceptualisation du modèle.

Les erreurs induites par les données

La qualité des données collectées peut être une source importante d'erreur à ne surtout pas négliger. En effet cela peut induire des erreurs et perturbations que le modèle seul ne pourra pas corriger:

- **Des pluviomètres défectueux pendant l'évènement considéré et/ou une mauvaise répartition spatiale du réseau de pluviomètre :** Un pluviomètre défectueux se repère par exemple en analysant des données radars ou celles de pluviomètres voisins. L'influence d'une mauvaise répartition spatiale du réseau de pluviomètre est accrue lorsque l'on retrouve une faible densité de pluviomètres sur un bassin et que l'évènement est convectif (très localisé, courte durée, forte intensité). On peut corriger cette erreur en observant les

images radar, par pas de temps successifs, ou en incluant des pluviomètres proches du bassin.

- **Les données débitométriques** : Cette erreur intervient lorsque les courbes de tarage ne sont pas de bonnes qualités, de manière générale ou au niveau des extrapolations. Cette lacune l'évaluation du modèle et en particulier pendant les épisodes de forts débits.

La configuration du modèle

Une fois les données analysées et corrigées si besoin, il est important de considérer un autre type d'erreur : la configuration que l'on va apporter au modèle pour répondre le mieux possible à l'étude. Il s'agit de vérifier que les éléments et paramètres que l'on choisit pour l'étude vont dans le sens des objectifs visés. C'est sur ce point que les recherches durant le stage ont porté.

- **La fonction objectif** : Comme il a été explicité dans la première partie, cette fonction joue un rôle important dans le calage du modèle et donc dans ses performances. L'important est de choisir la stratégie de calage et donc une fonction qui est en accord avec l'étude et les objectifs que l'on se fixe (période de crue, étiage...);
- **Configurations diverses** : La stratégie de calage joue un rôle important mais elle n'est pas la seule configuration à avoir une importance sur les performances du modèle. En effet, il est également possible de modifier d'autres éléments comme la méthode d'assimilation de débits, optimiser les seuils et horizons de calage... De mauvaises configurations peuvent entraîner des performances médiocres.

La conceptualisation du modèle

Ce type d'erreur concerne la structure même du modèle. Certains phénomènes et bassins sont difficilement modélisables lorsque la structure du modèle n'est pas adaptée.

- **Un modèle global ou distribué** : Il est impossible de savoir a priori quel type de modèle est le mieux adapté pour un bassin donné. Le choix d'un modèle de type global ou distribué est donc de taille puisqu'il va avoir induire des différences quant à la qualité des prévisions.
- **La structure du modèle** : Il s'agit ici du nombre de paramètres utilisés, le nombre de réservoirs, types d'équations utilisés... Ce sont des questions de fond qui sont à la base de la conception du modèle, ces problématiques n'ont pas été abordées pendant le stage puisque nous nous sommes basés sur le modèle GRP existant.

Nous pouvons dès à présent faire le lien entre les réponses du modèle et ces différents types d'erreurs. En effet des erreurs dans les données peuvent perturber la réponse du modèle et donc provoquer des prévisions incohérentes. Une analyse des données est donc indispensable, c'est ce qui est fait dans la partie suivante. Un problème de conceptualisation du modèle provoque des réponses globales et en particulier sur les forts événements, incohérentes. Enfin les erreurs induites par une mauvaise configuration du modèle peuvent être identifiés lors d'un échec de prévision des événements particuliers. Ce type d'erreurs peut être à l'origine des réactions du type : bonne performance globale mais sous-estimation ou surestimation en période de crue. Par la suite, nous allons vérifier la cohérence des données et nous concentrer sur ce dernier type d'erreurs.

III.4 Commentaires sur les données

Les données pluviométriques

L'étude se base sur un réseau de 114 pluviomètres au total, ce qui fait en moyenne 1 pluviomètre pour 5 km². Il est important de connaître le taux de lacune de chaque pluviomètre pour

se rendre compte de la quantité des données disponibles. Dans notre cas, 80% des pluviomètres ont un taux de lacune inférieur à 5% et 85% des pluviomètres couvrent la période de calage : 1997-2013. Une analyse des lacunes sur l'ensemble de la période de calage a été tracée en annexe A.11. Ceci nous permet de connaître la quantité de pluviomètres disponibles. Cependant nous avons également besoin d'être informés sur la qualité de ces informations. Pour cela nous pouvons comparer la hauteur des précipitations obtenues à partir des pluviomètres et les données radar. C'est ce qui a été fait par exemple sur la station de Tonnerre pendant les événements de mai 2013 en annexe A.12. Ces deux jeux de données doivent être cohérents entre eux, ce qui est le cas. Un bref rappel historique sur les données radar est fourni en annexe A.3.

Les données débitométriques

Les informations débitométriques sont fournies par des organismes tels que la DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) dans notre cas, possédant des stations automatiques de mesure des hauteurs d'eau. Ces hauteurs d'eau sont converties en débit via des courbes de tarage. Ces courbes sont tracées par des techniciens d'hydrométrie ou des jaugeurs qui mesurent directement le débit lors de campagnes de jaugeage. Ce dernier est mesuré par différentes méthodes, à savoir, cinématique (exploration du champ de vitesse, moulinet, flotteur...), hydraulique ou physique par dilution par exemple. Elles sont employées en fonction de l'ordre de grandeur du débit, la géométrie du site ou la précision recherchée.

L'observation des chroniques de débit nous permettent de critiquer ces mesures et d'écarter les données douteuses.

III.5 Conclusion de la partie méthodologie

Cette partie est primordiale puisqu'elle a permis de relier les réponses du modèle à différents types d'erreurs comme l'illustre le tableau 6. La dernière phase a permis d'écarter les erreurs induites par les données. En définitive nous avons donc trois types de bassins sur notre échantillon :

Niveaux de qualité des prévisions, types d'erreurs	Performance globale	Performance durant de forts événements de crues
Efficacité satisfaisante	Bonne	Bonne
Structure du modèle non adaptée	Mauvaise	Très mauvaise
Configuration du modèle non adaptée	Bonne	Mauvaise

Tableau 6 : Lien entre les types d'erreurs et les performances des bassins

La suite de l'étude consiste à apporter des améliorations en vue d'optimiser les performances du modèle. Il est évident que nous n'allons pas nous concentrer sur les bassins qui ne présentent pas d'erreurs. De plus, les erreurs de type conceptuel ne seront pas traitées également car cela reviendrait à modifier la structure même du modèle, ce qui n'est pas l'objet de ce stage. Nous allons donc nous intéresser aux erreurs induites par une mauvaise configuration du modèle. Il s'agit dans la suite de trouver des configurations qui permettent d'optimiser les performances du modèle en période de crues. Et ce en jouant sur plusieurs facteurs comme : la stratégie de calage, les seuils de calage, les méthodes d'assimilation ... Nous allons donc effectuer différents tests et en étudier les influences.

IV. Tests et observations des résultats

La configuration joue un rôle primordial lorsque l'on étudie les performances du modèle dans un cas bien spécifique. Le retour d'expérience de l'évènement mai 2013 nous indique que nous nous plaçons dans un contexte de crue particulièrement importante. La partie précédente nous a permis de savoir qu'une configuration plus adaptée du modèle pourrait améliorer les performances de ce dernier en période de crues. Nous allons donc dans cette partie, proposer des modifications en vue d'optimiser la configuration du modèle.

IV.1. Quelques configurations de calage

Nous avons testé principalement l'influence de deux éléments : le seuil de calage et la fonction objectif. Néanmoins, il a également été testé s'il était possible de modifier l'horizon de la prévision. Cependant cela n'a eu aucune incidence sur les performances du modèle.

Nous avons également testé deux méthodes de correction des erreurs : la méthode autorégressive proposée par Tangara (Tangara, 2005) et le réseau de neurone (RNA) (Berthet, 2010). Cependant sur notre échantillon de bassins, ces deux méthodes n'obtiennent pas de performances significativement différentes tant sur des évènements de crues particuliers que sur la performance globale. Nous avons donc décidé pour la suite de conserver la méthode de correction des erreurs autorégressive de Tangara, utilisée par le SPC SMYL.

IV.2. Influence du seuil de calage

Le seuil de calage fixe le débit observé minimum que la procédure de calage doit prendre en compte pour optimiser les paramètres. Le seuil de calage est un élément modifiable directement par le service opérationnel et a originellement deux fonctions principales, à savoir :

- S'affranchir de l'influence des ouvrages hydrauliques (barrages, réservoirs...)
- Se concentrer sur les plus forts débits

C'est ce deuxième point qui est intéressant pour notre étude dans la mesure où nous nous positionnons en période de crue et donc sur les forts débits.

Pour les bassins qui ont tendance à sous-estimer les pics de crue, nous remarquons qu'en augmentant progressivement le seuil de calage, les épisodes de crue sont mieux suivis. C'est ce qu'indique la figure 7, sur l'Armançon à Aisy sur Armançon pendant les évènements de mai 2013.

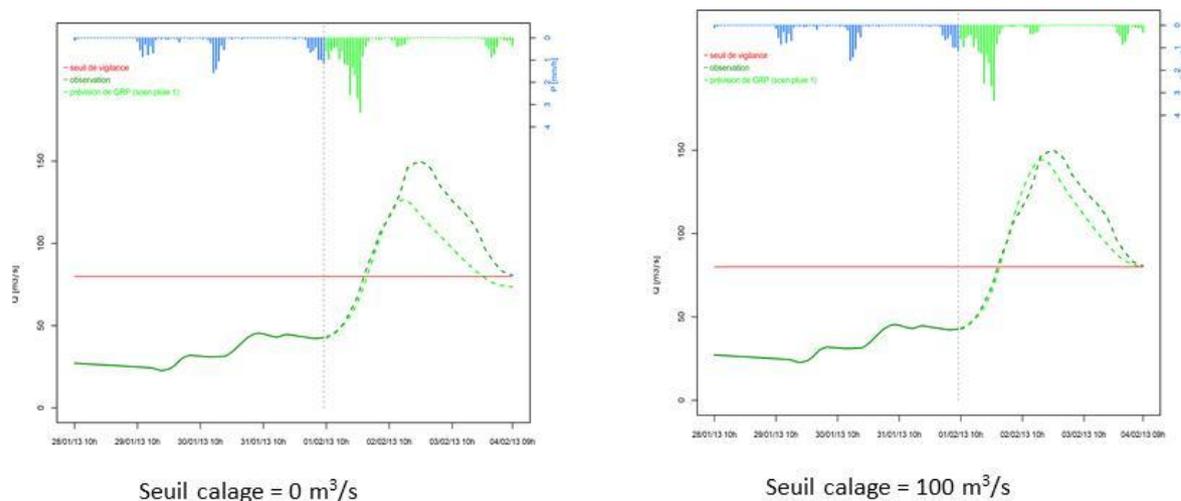


Figure 7 : Influence de la modification du seuil de calage sur l'Armançon à Aisy sur Armançon lors des événements de mai 2013 en contrôle

Un autre exemple est donné sur le bassin de l'Yonne à Dornecy en annexe A.13.

Les illustrations précédentes indiquent qu'augmenter le seuil de calage est efficace lors des événements de crue pour les bassins qui sous-estiment les pics de crue. Cependant, l'objectif est d'augmenter l'efficacité en période de crue mais sans détériorer l'efficacité moyenne sur toute la chronique (tableau 7).

Bassin	Qvig (m ³ /s)	Seuil calage (m ³ /s)	CSI	C2MP (1997-2013)
Armançon à Aisy	80	0	44,8	0,75
		80	50	0,757
		100	50,4	0,757
		120	48,2	0,669
Armançon Brianny	6,4	0	43,1	0,616
		5	41	0,623
		15	38	0,612
		50	52,9	0,626
Yonne à Dornecy	55	0	48,6	0,593
		35	51,9	0,63
		50	52,9	0,626

Tableau 7 : Evolution de l'efficacité sur toute la chronique en fonction du seuil de calage

Le seuil de calage trouve donc son intérêt sur les bassins qui ont tendance à sous-estimer les pics de crue.

En analysant les paramètres du modèle plus en détail, on remarque pour ces bassins, une forte augmentation du paramètre de correction des pluies. Autrement dit, lorsque l'on se fixe un seuil de débits minimums pour le calage, le modèle apporte plus d'eau pour pouvoir réagir.

Une question reste malgré tout en suspens : peut-on trouver un seuil de calage optimal ? Sur nos quinze bassins, il s'est avéré que le seuil de calage optimal se trouvait entre 70 et 80% de la moyenne des 18 pics de crue les plus importants de la chronique. Il apparaît très compliqué de déduire une règle générale pour déterminer le seuil de calage optimal. Il peut néanmoins être obtenu par itérations successives de manière empirique pour chaque bassin.

IV.3. Modification de la fonction objectif

La fonction objectif utilisée par GRP est l'erreur quadratique moyenne calculée sur les débits (E2), exprimée en m^3/s .

Le but est bien sûr de rendre cette erreur le plus proche possible de zéro. Cette fonction objectif a été choisie au départ car sa forme quadratique privilégie les forts débits (Michel, 1989). Pour revenir sur cette affirmation, on trouve souvent dans la littérature que les critères de type quadratique accordent plus de poids aux plus forts débits. Pour s'en convaincre, nous avons décidé de réaliser une étude, en annexe A.14, en comparant un critère de type quadratique : le RMSE et un critère non quadratique : l'erreur absolue (EA).

La question que l'on se pose est : cette fonction objectif est-elle optimisée pour notre étude ? La littérature propose un grand nombre de critères de calage. Il n'existe pas de fonction objectif universelle (Perrin, 2000), tout dépend de la finalité de l'étude: masse d'eau globale en vue de la gestion des ressources, étiage, crue...

La fonction objectif RMSE, est cohérente avec notre étude dans la mesure où nous nous concentrons sur les débits en période de crue. Pourtant si l'on se place maintenant d'un point de vue opérationnel, on se rend compte que ce qui importe le plus le prévisionniste est de suivre l'évolution de la montée et le pic de crue. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'axer la procédure de calage en particulier sur les montées de crue comme indiqué en orange sur la figure 8.

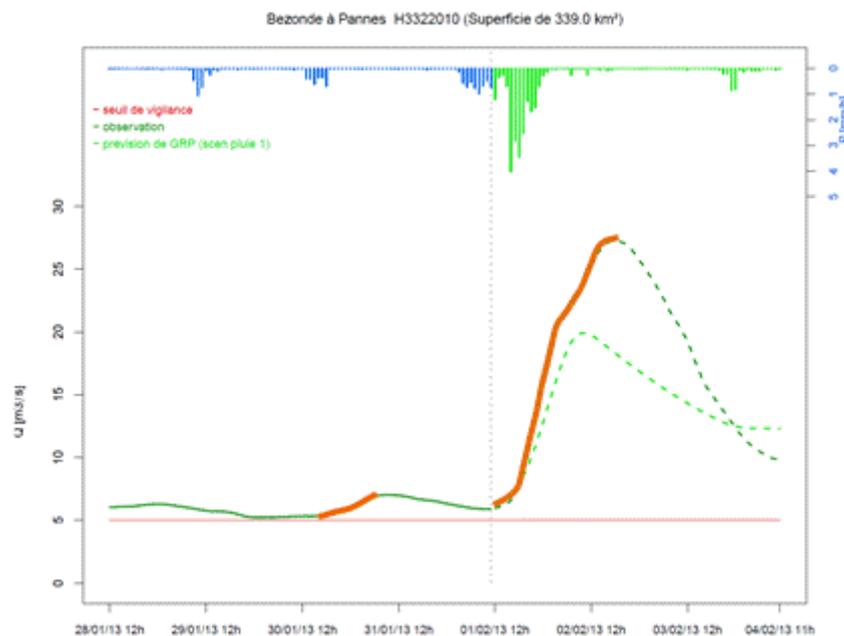


Figure 8 : Exemple illustrant les pas de temps choisis pour le calage en montée en orange

Pour mettre en place cette nouvelle procédure de calage nous avons besoin de répondre à plusieurs interrogations :

- Quelle fonction objectif utiliser ?
- Quelles stratégies de calage mettre en place ?

Comme l'indique la littérature, (Berthet, 2010), les périodes de crue sont mal représentées par les critères appliquant une transformation préalable sur les débits du type logarithmique ou racine, plutôt réservés aux périodes d'étiage.

Nous allons conserver le critère de l'erreur quadratique moyenne calculée sur les débits pour deux raisons. C'est un critère qui, comme l'a montré l'annexe A.14, se concentre sur les forts débits et est donc intéressant pour nous. De plus il s'agit de la fonction de calage d'origine de GRP et il est important de conserver cette référence comme outil de comparaison.

1^{ère} fonction choisie : RMSE (E2)

Il serait également intéressant d'utiliser un critère de type non quadratique, comme l'erreur moyenne absolue, car ce critère est efficace si l'on veut être aussi proche que possible de la valeur observée à chaque pas de temps (Perrin, 2000), ce qui est utile dans un contexte de montée de crue.

2^{ème} fonction choisie : $EA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim}|$ (E10)

Nous allons enfin utiliser un troisième critère proposé par Gupta et al (2009), le KGE. Cet indice a été testé, au sein de l'équipe HYDRO d'Antony (Gérard, 2010). Il en ressort que le critère KGE utilisé en fonction objectif sous-estime moins les pics de crue mais a le défaut d'être moins robuste. Il serait donc intéressant de tester ce critère dans notre contexte spécifique de montée de crue.

3^{ème} fonction choisie : $KGE = 1 - ED$ (E11)

Avec : ED, une distance euclidienne : $ED = \sqrt{(r - 1)^2 + -(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ (E12)

α , rapport de variance des débits : $\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$

β , erreur de bilan normée : $\beta = \frac{(\mu_{obs} - \mu_{sim})^2}{\sigma_{obs}^2}$

μ_{obs} et μ_{sim} , les moyennes des débits observés et simulés

r , coefficient de corrélation entre les débits observés et simulés :

$$r = \frac{1}{n} \sum_i \frac{(Q_i^{obs} - \mu_{obs})(Q_i^{sim} - \mu_{sim})}{\sigma_{obs} \cdot \sigma_{sim}}$$

Nous avons décidé dans la partie précédente de tester trois fonctions objectif. Il nous faut maintenant définir des stratégies de calage afin de pouvoir répondre à l'objectif : améliorer la performance du modèle en période de montée de crue.

Comme dans la partie précédente, nous allons conserver le calage d'origine de GRP afin d'avoir une comparaison sur les modifications que nous apportons.

1^{ère} stratégie de calage : calage sur toute la période.

Dans un second temps, nous allons mettre en place une méthode pour ne caler que sur les montées depuis la base de l'ascension jusqu'au pic, donc nous allons caler uniquement si :

$$Q_i^{obs} < Q_{i+H}^{obs} \quad (E13)$$

H : Le délai de prévision (exprimé en nombre de pas de temps)

2^{ème} stratégie de calage : calage uniquement sur les montées de crue.

En résumé :



Figure 9 : Schéma indiquant les différentes stratégies de calage testées

L'objectif de cette partie est de présenter les résultats des différents tests effectués sur la stratégie de calage. Notre première évaluation est qualitative. Nous avons ainsi visualisé les hydrogrammes correspondant aux différentes méthodes de calage et répertorié les bassins pour lesquelles les stratégies de calage apportent des améliorations en période de crue par rapport au RMSE sur la période entière (tableau 8).

Stratégie utilisée	RMSE Montée	EARM Période entière	EARM Montée	KGE Période entière	KGE Montée
Nombre de bassins améliorés	9	1	7	0	5
Pourcentage du nombre de bassins améliorés	60%	6.6%	46.6%	0%	30%

Tableau 8 : Résultats qualitatifs du changement de stratégie de calage

Pour exemple, nous présentons en annexe A.15 quelques hydrogrammes montrant l'influence d'une technique de calage par rapport à la configuration de base utilisée sur GRP. Sur cet exemple, on remarque une légère amélioration au niveau du pic et de la montée pour les deux nouvelles techniques de calage : RMSE et EARM uniquement en montée.

Observons à présent les performances moyennes. Nous avons testé en tout trois fonctions objectifs, chacune dans deux configurations différentes : calage sur toute la période et calage sur les débits correspondant aux montées. Le tableau 9 récapitule les performances moyennes de ces méthodes pour l'ensemble des bassins.

Stratégie utilisée	RMSE Période entière	RMSE Montée	EARM Période entière	EARM Montée	KGE Période entière	KGE Montée
C2MP	0.36	0.39	0.32	0.37	0.30	0.32
CSI	42.82	43.44	32.65	38.47	35.40	41.81

Tableau 9 : Résultats quantitatifs en contrôle du changement de stratégie de calage

- En prenant pour élément de comparaison la fonction objectif de base RMSE sur la période entière, nous remarquons que l'efficacité (C2MP) est améliorée en utilisant les fonctions

objectifs : RMSE montée et EARM montée. Le critère CSI n'est amélioré uniquement pour : RMSE montée.

- Quelle que soit la fonction objectif utilisée (KGE, EARM ou RMSE), les deux critères sont améliorés lorsque l'on cale uniquement sur les montées plutôt que sur la période entière.
- Le critère KGE utilisé en calage, obtient des performances légèrement plus faibles que les deux autres. Cela confirme les études menées au préalable sur ce critère, montrant qu'il est plus adapté en simulation qu'en prévision (Gérard, 2010). L'erreur vient également du fait que l'on évalue les performances sur le C2MP en contrôle.

L'objectif étant de trouver la stratégie de calage la plus appropriée. Nous allons donc abandonner à ce stade la fonction objectif KGE ainsi que l'EARM sur l'ensemble de la période pour cause de performances globales trop faibles.

Pour différencier les trois méthodes restantes, nous allons devoir mettre en place un critère permettant de mieux apprécier et quantifier les performances lors des crues. Il s'agit d'un indice utilisé lors d'évènement mono-pic, comme l'évènement de mai 2013 sur le bassin Seine, qui mesure le pourcentage d'erreur du pic de crue : PEP (*Percent Error in Peak*), (Benett et al, 2013).

$$PEP = \left| \frac{\max(Q_i^{obs}) - \max(Q_i^{sim})}{\max(Q_i^{obs})} \right| * 100 \quad (E14)$$

Ce critère varie de 0 à 100, la valeur 0 étant une restitution parfaite du pic de la part du modèle. Nous calculons cet indice sur la durée complète de la crue.

Etant dans un contexte de retour d'expérience, nous avons calculé ce critère pour l'évènement de mai 2013 sur tous les bassins puis fait la moyenne pour les trois méthodes :

Stratégie utilisée	RMSE Période entière	RMSE montée	EARM montée
PEP	18.65	13.99	11.79

Tableau 10 : Valeur du PEP en fonction des stratégies de calage

Pour résumer, nous avons tracé un graphique radar en figure 10, résumant la performance de chaque stratégie de calage sur plusieurs critères à savoir : C2MP, EARM, CSI, PEP.

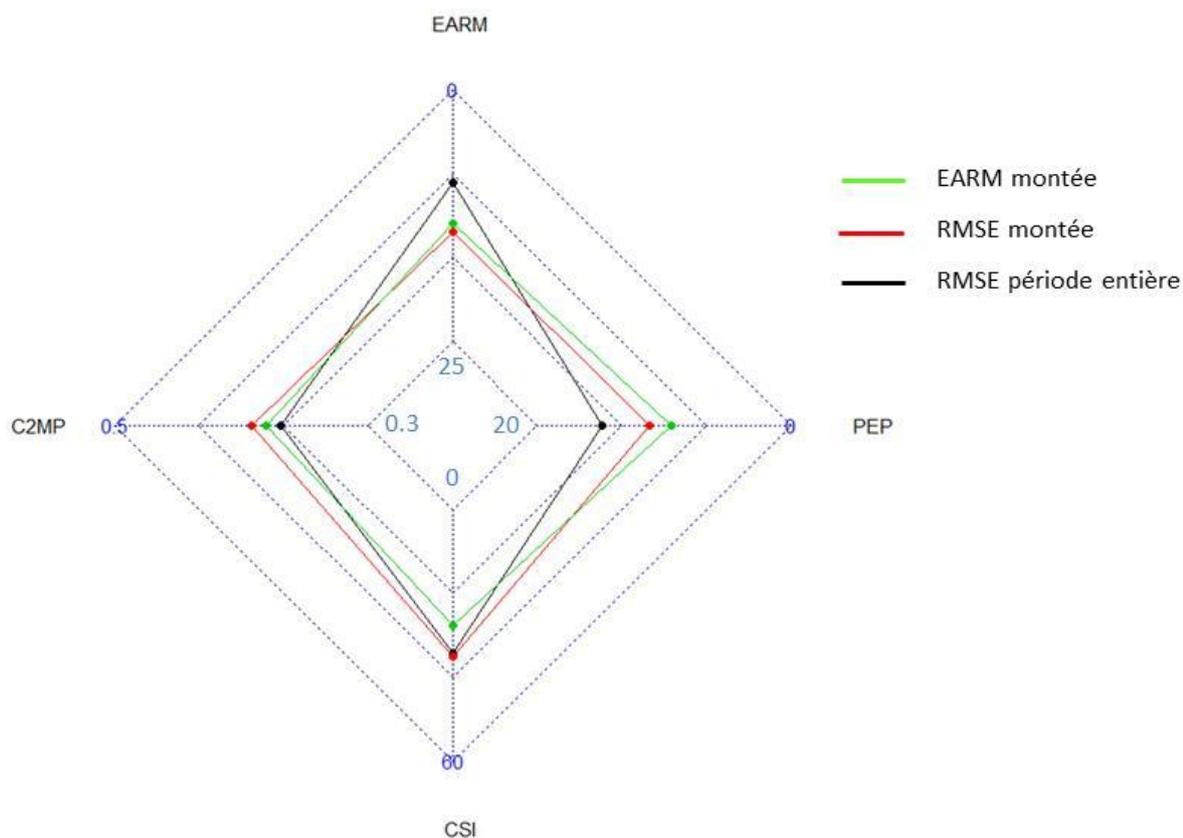


Figure 10 : Graphique radar résumant les performances des trois stratégies de calage en contrôle

Ce graphique permet d'obtenir une comparaison des méthodes de calage sur plusieurs critères. On observe que le calage sur les montées avec le RMSE est plus performant sauf pour l'erreur absolue moyenne relative. Le critère de validation EARM apporte moins d'importance aux forts débits que les autres critères, or caler uniquement sur les montées s'intéresse justement aux périodes de crues. Cela peut être une explication des moins bonnes performances des fonctions en montée sur ce critère.

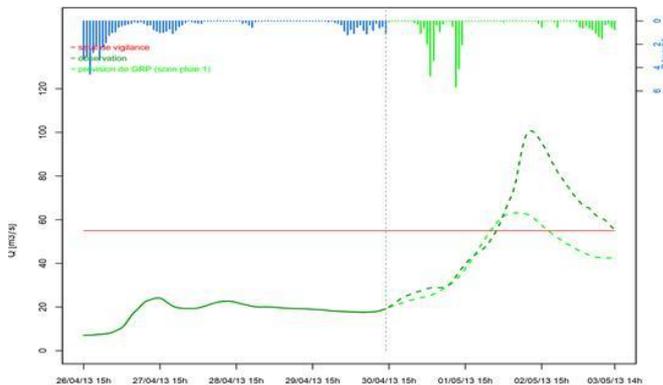
Ces résultats semblent donc en faveur du calage sur les montées avec l'erreur absolue ou le RMSE comme fonction objectif. Cependant il faut se méfier de l'indice se basant sur le pic de crue (PEP) car comme décrit plus haut il est calculé sur toute la durée de la crue (6 jours), il ne tient donc pas compte du retard du pic de crue. Nous allons donc écarter la fonction objectif EARM en montée à cause de ses performances globales plus faibles et du retard mis en évidence sur les hydrogrammes.

En conclusion, la fonction objectif RMSE sur les montées paraît la meilleure solution en termes de performance globale et suivi de la montée et du pic de crue. En effet, sur tous les bassins qui sous-estiment le pic de crue (6 bassins), nous trouvons une amélioration au niveau des hydrogrammes sans pour autant baisser les performances moyennes (au contraire sur nos 15 bassins, l'efficacité est augmentée de 5%).

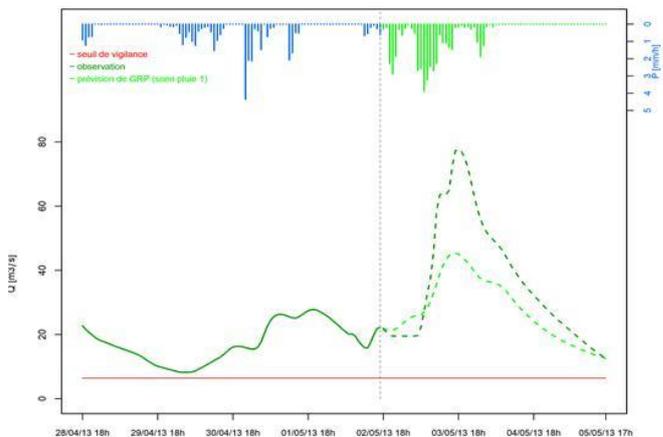
La figure 11 présente un résumé des deux tests (fonction objectif et seuil de calage) pour deux bassins sous-estimant le pic de crue pendant l'évènement de mai 2013. Ces améliorations confirment l'importance de la configuration de calage mise en évidence dans l'identification des erreurs.



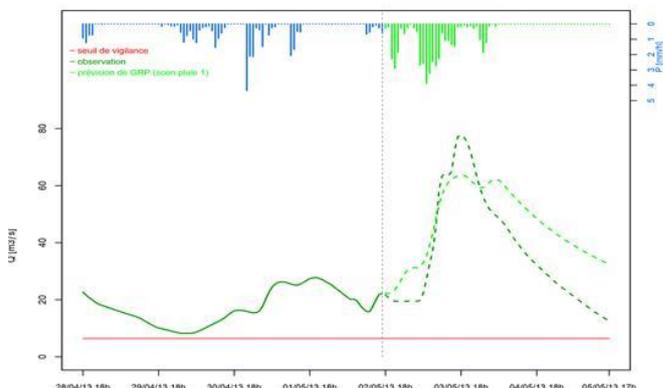
Yonne à Dornecy
Stratégie de calage:
RMSE sur toute la chronique sans seuil de calage
Cru de mai 2013



Yonne à Dornecy
Stratégie de calage :
RMSE sur les montées et seuil de calage
Cru de mai 2013



Armançon à Brianny
Stratégie de calage:
RMSE sur toute la période sans seuil de calage
Cru de mai 2013



Armançon à Brianny
Stratégie de calage:
RMSE sur les montées avec seuil
Cru de mai 2013

Figure 11 : Exemple des améliorations apportées par optimisation de la configuration de calage

Dans le 1^{er} cas (Yonne à Dornecy), on observe que la montée est mieux suivie et même si le pic de crue n'est pas correctement simulé, le dépassement du seuil de vigilance est largement meilleur qu'avec la configuration classique. Dans le cas de l'Armançon à Brianny on observe clairement que la montée et le pic de crue sont mieux suivis.

V. Interprétation des résultats et perspectives

Après avoir réalisé les tests et obtenu les résultats bruts, il est important d'exploiter ces derniers et d'évaluer leur généralité. Nous avons décidé de revenir pour cela sur l'interprétation des paramètres et de réaliser les memes tests sur un plus grand échantillon de bassins.

V.1. Conséquences sur les paramètres du modèle

Dans la partie précédente, nous avons vu que caler grâce au RMSE uniquement sur les montées augmentait les performances pour notre échantillon de bassins. Il est intéressant d'étudier alors l'influence de cette modification sur les paramètres du modèle.

Pour cela, nous avons calculé les quotients suivants pour les quinze bassins :

$$I_{ROUT} = \frac{X_1^{\text{calage sur les montées uniquement}}}{X_1^{\text{calage sur toute la période}}} \quad (E15)$$

X_1 : paramètre portant sur la capacité du réservoir de routage

$$I_{CORR} = \frac{X_2^{\text{calage sur les montées uniquement}}}{X_2^{\text{calage sur toute la période}}} \quad (E16)$$

X_2 : paramètre portant sur la correction des pluies

$$I_{TB} = \frac{X_3^{\text{calage sur les montées uniquement}}}{X_3^{\text{calage sur toute la période}}} \quad (E17)$$

X_3 : paramètre portant sur le temps de base de l'hydrogramme unitaire

Avec : X technique de calage utilisée
numéro du paramètre considéré

Le graphique en figure 12 indique que l'influence sur les paramètres est très homogène sur les quinze bassins :

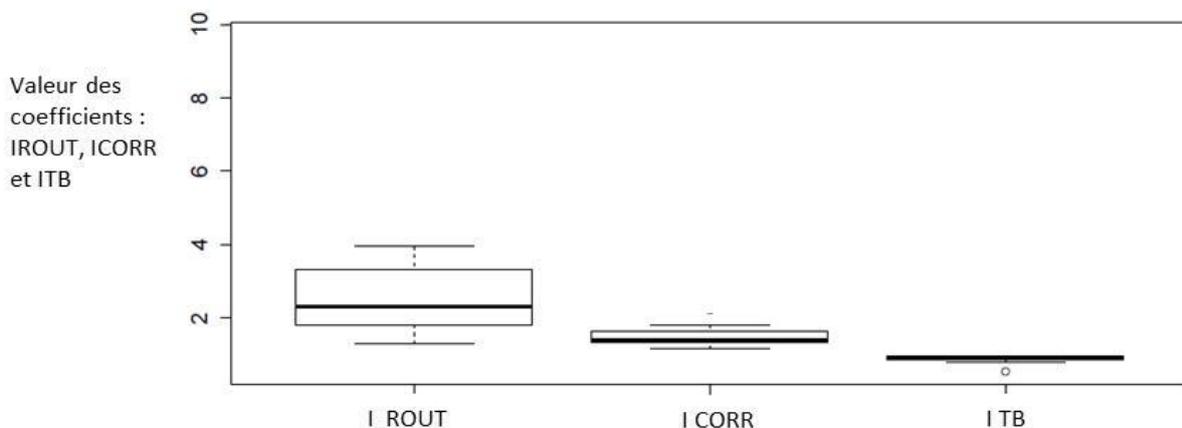


Figure 12 : Influence sur les paramètres de la stratégie de calage basée sur les montées par rapport à la stratégie classique de calage

- On trouve une augmentation de 2.5 fois en moyenne la capacité du réservoir de routage.
- La correction des pluies est augmentée de 80% en moyenne.
- Le temps de base diminue très légèrement, de 10%.

En définitive, l'amélioration de la réaction du bassin en période de crue est gérée par le modèle de deux manières :

- Un apport d'eau plus important : c'est le paramètre de correction des précipitations
- Une dynamique améliorée : c'est l'augmentation de la capacité du réservoir de routage

Observons un peu plus en détail la modification du paramètre de correction des pluies. Le graphique en figure 13 indique que, pour tous les bassins, le paramètre de correction des pluies augmente mais également que pour 60% des bassins, il passe d'une valeur inférieure à 1 à une valeur supérieure à 1. Ce qui veut dire qu'avec le calage de base de GRP, le modèle réduisait l'apport d'eau en le multipliant par un coefficient inférieur à 1 alors qu'avec un calage uniquement sur les montées, il a besoin d'un apport d'eau supplémentaire (coefficient de correction des pluies supérieur à 1) pour pouvoir réagir et de ce fait être moins « mou » pendant les épisodes de crue.

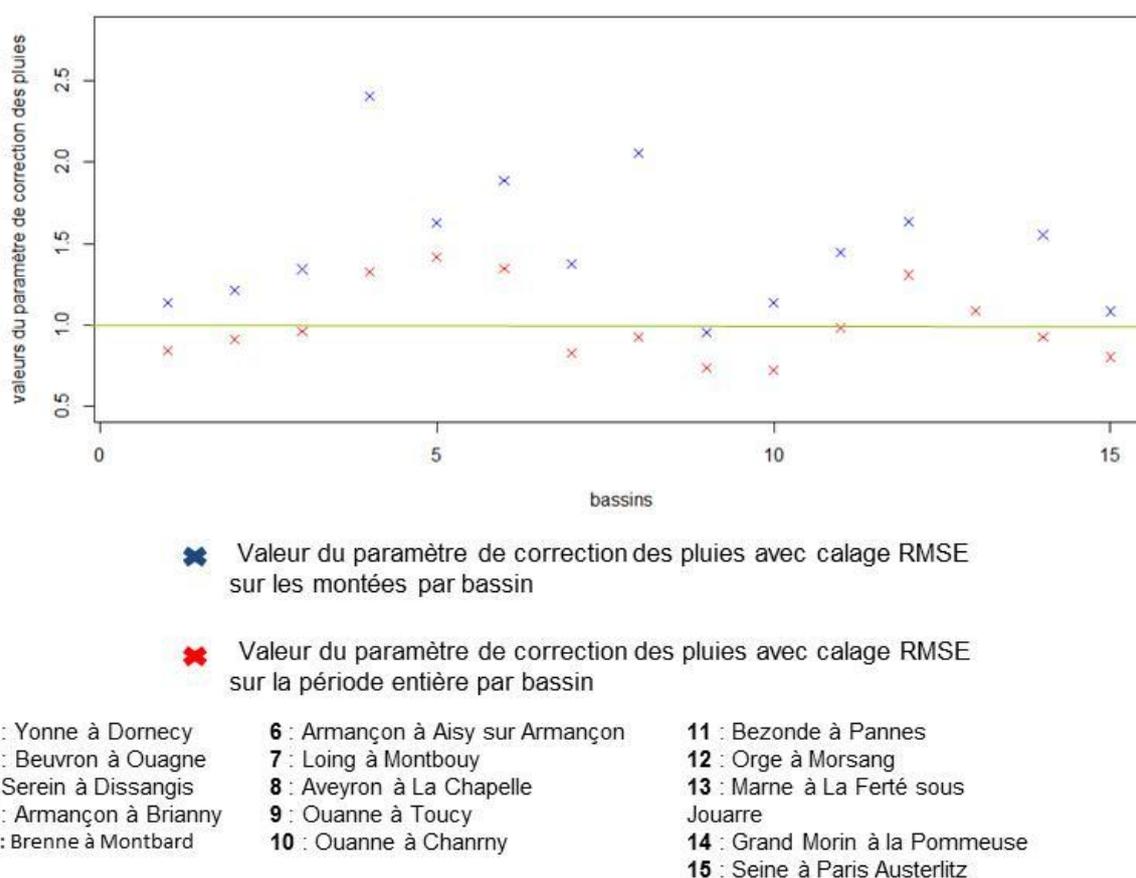


Figure 13 : Influence de la stratégie de calage sur le paramètre : correction des pluies

V.2. Validation sur un échantillon de bassins plus large

Les tests précédents sur la modification de la stratégie de calage étaient réalisés sur un échantillon de quinze bassins. Il était donc important d'évaluer la généralité des solutions proposées sur un échantillon de bassins plus large. Pour cela nous avons utilisé un échantillon déjà utilisé à IRSTEA (Bourgin, 2014). Il s'agit d'un échantillon de 202 bassins, représentés en figure 14.

Dans un premier temps, comme nous l'avons fait depuis le début de ce mémoire, nous avons observé qualitativement les résultats par comparaison d'hydrogrammes en période de crue. Nous remarquons des améliorations lorsque le modèle avait tendance à sous-estimer les pics et montées de crue, comme l'indiquent ces deux exemples sur la figure 15.

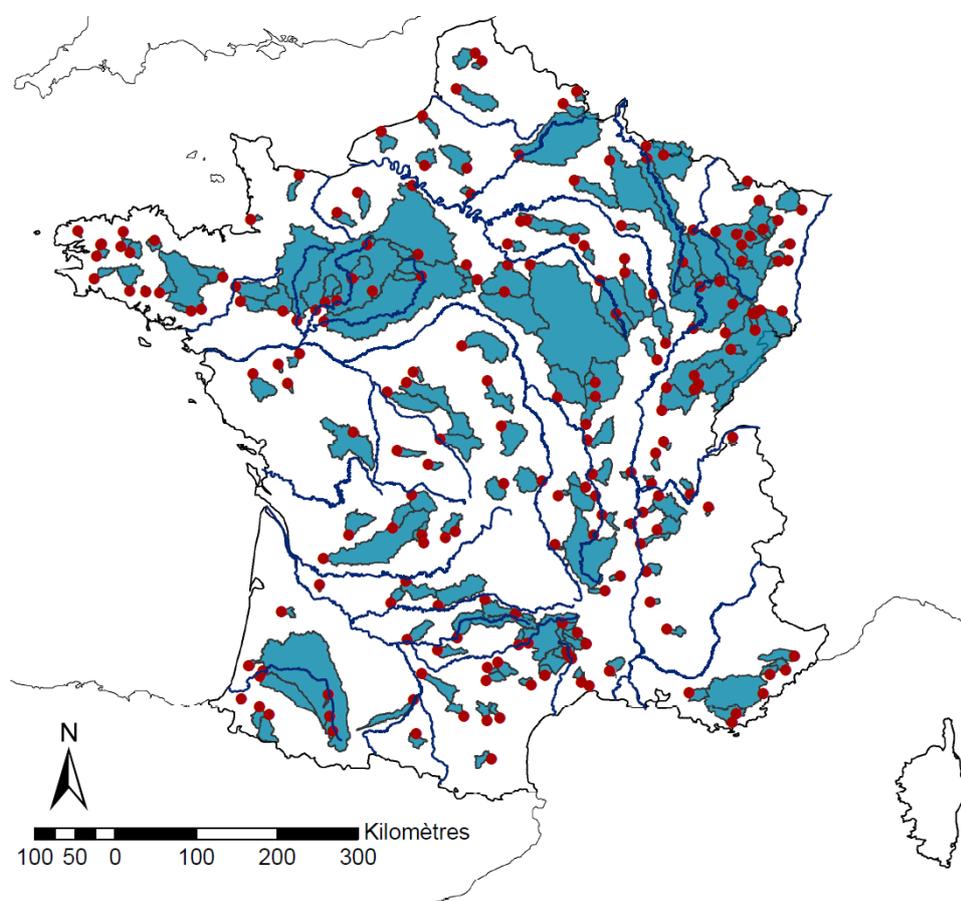


Figure 14 : Echantillon de 202 bassins versants utilisés pour la généralisation

Il était également important de ne pas altérer l'efficacité moyenne suite à ce changement de stratégie de calage. Pour cela nous avons calculé le C2MP (défini précédemment), sur l'ensemble de la période d'étude. Nous n'obtenons quasi pas de baisse de performance comme l'indique l'annexe A.16. Cela reste correct et confirme ce que nous avons observé sur notre échantillon plus restreint de quinze bassins (même si sur les 15 bassins les performances globales étaient même améliorées).

Il est intéressant d'observer l'évolution des paramètres du modèle sur ce nouvel échantillon de bassin afin de savoir si l'on retrouve les mêmes tendances. Pour cela nous allons utiliser les mêmes ratios que nous avons calculés dans le paragraphe précédent à savoir : I ROUT (E15), I CORR (E16), I TB (E17) et les avons comparé à l'échantillon précédent dans le tableau 11.

	I ROUT	I CORR	I TB
Petite échantillon : 15 bassins	2.50	1.80	1.10
Echantillon plus large : 202 bassins	2.65	1.21	1.01

Tableau 11 : Comparaison des ratios I ROUT, I CORR et I TB entre les deux échantillons de bassins

Au niveau des paramètres, on remarque que les tendances observées sur notre premier échantillon de bassin, se retrouvent sur le deuxième. A savoir, une augmentation des paramètres : taille du réservoir de routage et correction des pluies.

Horizon ■ 1 ■ 6 ■ 12 ■ 24 ■ 48 ■ 72

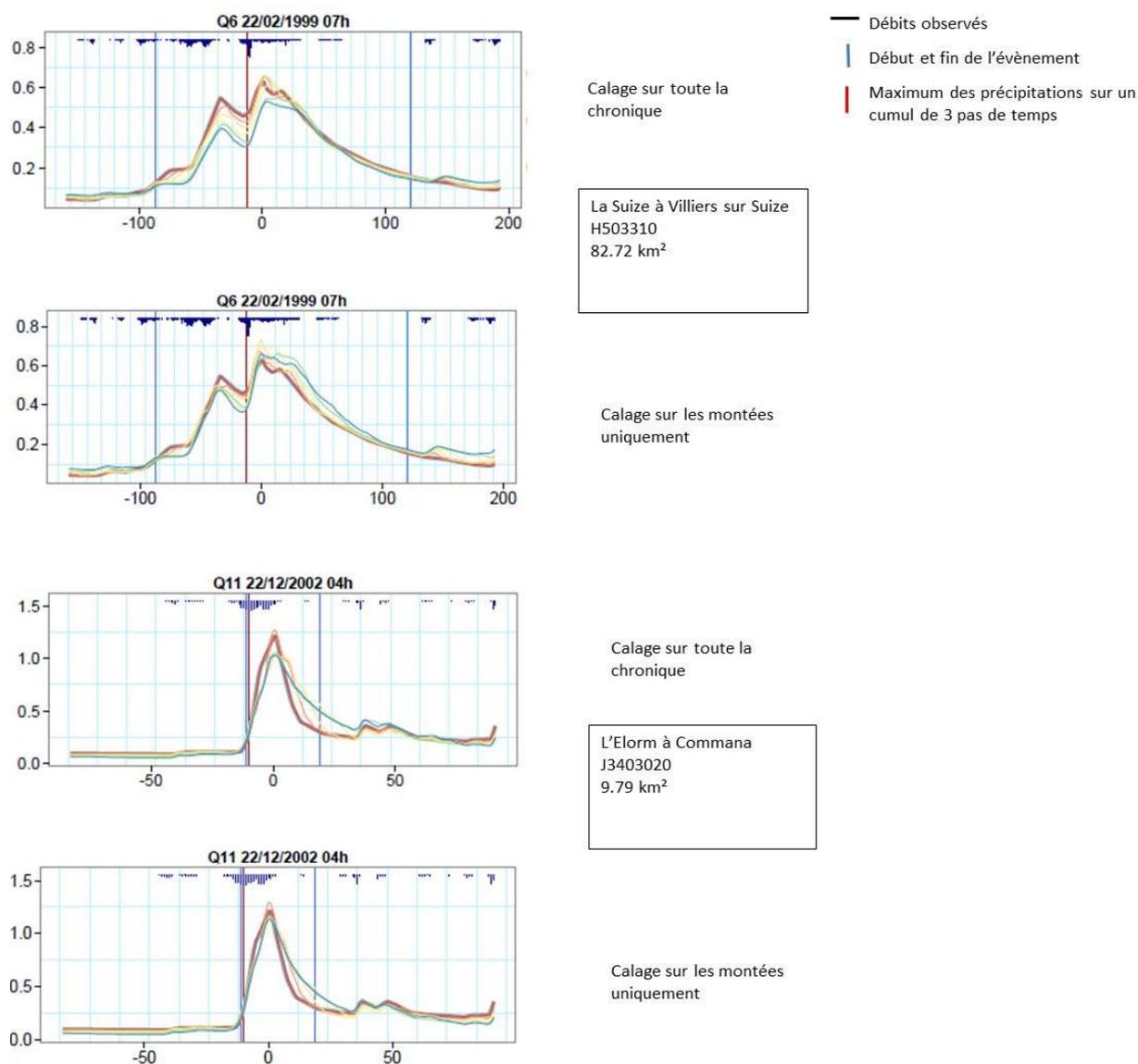


Figure 15 : Exemple d'hydrogrammes, traçant l'évolution des débits en fonction des pas de temps, le 0 coïncidant avec le maximum de l'évènement.

VI. Conclusions et perspectives

Conclusion générale

L'étude à la base de ce stage se focalisait sur un évènement et un échantillon de bassins particuliers. En effet le modèle de prévision GRP utilisé par le SPC SMYL qui habituellement est performant n'a pas donné de bons résultats. L'objectif était donc d'en comprendre les causes.

L'évènement de mai 2013 était très intense et localisé, il a engendré de fortes précipitations et de fortes périodes de retour sur le bassin Seine. Ce retour d'expérience nous indique que nous nous plaçons dans un contexte de crue exceptionnelle pour ces bassins.

Nous devons donc savoir quelles étaient les causes de cet échec. Pour cela, nous avons mis en place des critères quantitatifs et qualitatifs permettant de juger de la performance du modèle. En les appliquant sur l'échantillon de bassins nous avons pu observer et analyser les réponses du modèle. Il s'agissait ensuite d'identifier des types d'erreurs qui correspondaient à ces réponses.

Cette analyse nous a conduits à dégager trois grands types d'erreurs : les erreurs induites par les données, une configuration du modèle non optimale et la conceptualisation du modèle. Le retour d'expérience de l'évènement mai 2013 était au centre de cette étude puisque c'est lui qui nous a permis de dresser la méthodologie d'identification des erreurs en se basant sur des évènements intenses et la performance globale.

Une étude des données nous a permis d'écartier un type d'erreur. Nous avons ensuite rapproché les bassins qui en performance globale comme sur des évènements de crues intenses donnaient de très mauvais résultats, du type d'erreur portant sur la conceptualisation du modèle. En effet si le modèle n'est pas adapté au bassin sur sa globalité et encore moins lors d'évènements intenses, c'est que la structure même du modèle n'est pas adaptée à ces bassins. Un modèle d'un autre type serait probablement plus performant sur ces bassins (semi-distribué ou distribué).

Enfin nous nous sommes intéressés aux bassins qui avaient de bonnes performances globales mais qui donnaient de mauvais résultats lors d'évènements intenses de crues. Nous avons identifié cette erreur comme étant induite par une configuration du modèle non optimale. Une fois l'identification des erreurs faite, nous avons poursuivi sur ce point. N'est-il pas possible d'optimiser la configuration de calage afin de s'adapter à des évènements de crues intenses ?

Tout d'abord nous avons réalisé des tests sur le seuil de calage. En effet nous avons augmenté de manière progressive les seuils de calage sur des bassins où le modèle sous-estimait les pics de crue, et observé les résultats. Cette modification a apporté des améliorations nettes en période de crue. De plus cela n'altère pas la performance globale du bassin.

Dans un second temps, nous avons décidé de modifier la procédure de calage au niveau de la fonction objectif. Afin de privilégier les performances du modèle en période de crue, nous avons décidé de tester une stratégie de calage basée uniquement sur les montées. En plus de cela nous avons voulu tester deux fonctions objectifs autres que celle utilisée sur GRP : l'EARM et le KGE. Sur notre premier échantillon de quinze bassins, il s'est avéré que pour n'importe laquelle des fonctions objectifs, la stratégie de calage sur les montées étaient plus efficaces en période de crue ainsi qu'en

performance globale. Les fonctions objectifs EARM et KGE avaient des performances moindres en termes d'efficacité et de robustesse par rapport au RMSE.

Par la suite nous avons voulu valider le fait que caler sur les montées avec la fonction objectif RMSE augmentait l'efficacité globale et en particulier en période de crue sur un échantillon plus large de 202 bassins. Il s'est avéré que l'efficacité moyenne est quasiment inchangée alors que la lecture des hydrogrammes en période de crue, indique des améliorations pour les bassins qui avaient des tendances à la sous-estimation ou surestimation des pics de crue.

Il était important par la suite de voir l'influence de ce changement de stratégie de calage sur les paramètres. Il s'avère que sur notre premier échantillon et sur l'échantillon plus large, on retrouve les mêmes tendances : une augmentation de la taille du réservoir de routage ainsi que du paramètre de correction des pluies et un changement négligeable dans le paramètre définissant le temps de base de l'hydrogramme unitaire. De plus, on remarque que pour la plupart des bassins, le paramètre de correction des pluies passe d'une valeur inférieure à un à une valeur supérieure à un. Autrement dit, pour pouvoir mieux s'adapter aux montées de crues, le modèle a besoin d'un apport de pluie plus important que les pluies observées.

Cette étude montre qu'il est possible à partir d'un retour d'expérience de trouver différents types d'erreurs qui peuvent correspondre à la défaillance du modèle sur un évènement particulier. Il s'avère envisageable de comprendre plus en détail les réponses du modèle. Lorsque cela est possible de réduire certaines erreurs détectées, il est également intéressant d'observer l'influence sur l'efficacité et les paramètres du modèle de ces modifications.

Perspectives

Nous avons mis en évidence l'importance d'un seuil de calage pour les bassins qui avaient une tendance à la sous-estimation, cependant il serait intéressant de mener une étude plus poussée. En effet grâce, à une méthode itérative, à définir, il serait possible de trouver un seuil de calage optimal.

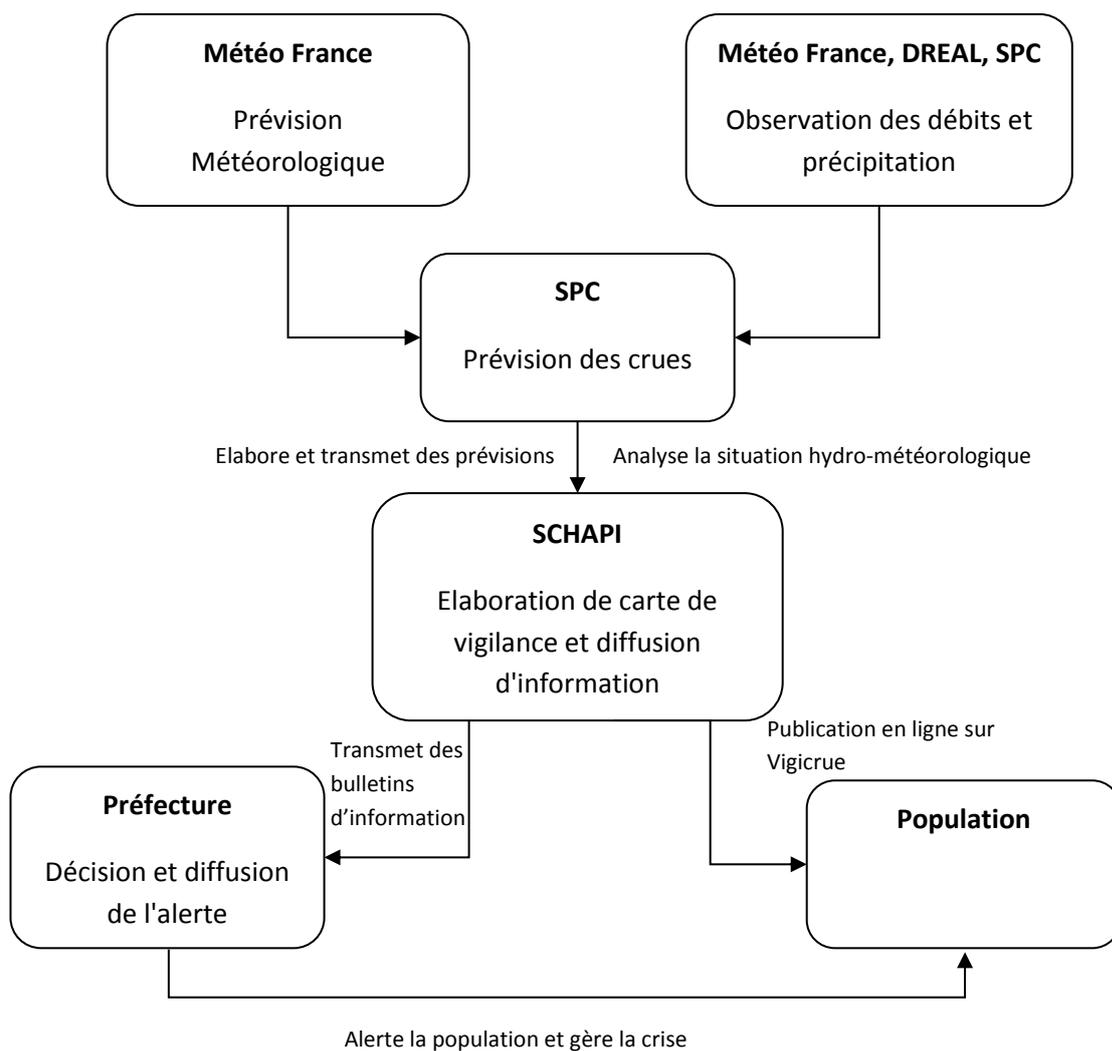
Dans un second temps il pourrait être envisagé de pondérer la stratégie de calage sur les montées, qui s'appliquerait à tous les débits de la chronique mais accorderait un poids plus conséquent (à définir en fonction de l'importance de la sous-estimation) aux débits en montées.

Il serait également intéressant de voir l'influence de cette stratégie de calage sur les incertitudes qui y sont liées (Bourgin, 2014).

Afin de valider l'affirmation disant que le modèle n'a pas une structure approprié pour certains bassins, un test sur différents types de modèles (en termes d'architecture, de distribution...) pourrait être utilisé en guise d'éléments de comparaisons au modèle GRP.

Annexes :

A.1 : Schéma simplifié résumant le rôle entre les différents acteurs de la prévention des crues en France.



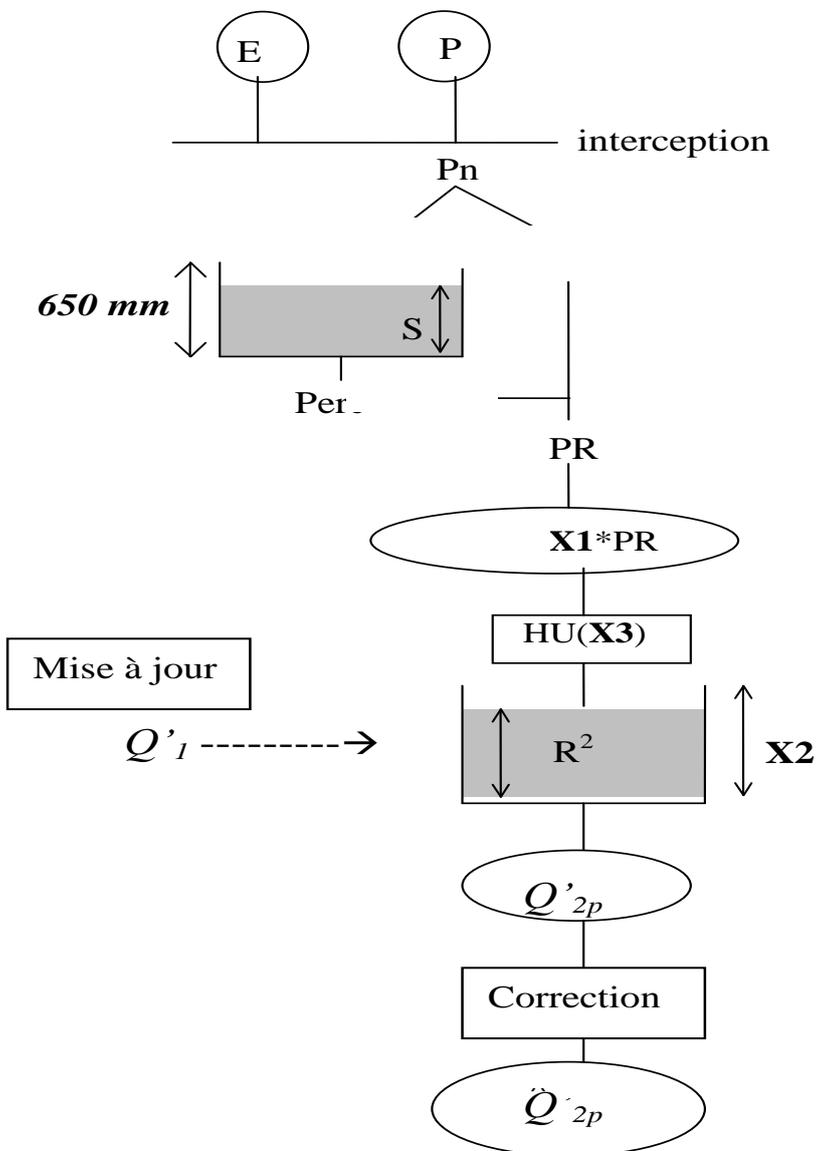
A.2 : Le retour d'expérience

L'analyse d'un évènement particulier s'appelle un retour d'expérience (REX). Dans la littérature, il existe un grand nombre de définitions du retour d'expérience grâce à son utilité sur plusieurs pôles tels que : organisationnel, humain et technique. A l'origine étant adapté à l'industrie, il était défini comme suit : « Le retour d'expérience, en matière de fiabilité des systèmes industriels, a pour objectif principal de rassembler des informations liées à la fréquence d'apparition des défaillances, aux modes de défaillances, à leurs causes et leurs effets sur la disponibilité des installations. Plus largement, il peut aussi rassembler les informations sur les modes, temps, et coûts d'intervention liés aux activités de maintenance corrective ou préventive. » (Zwingelstein, 1999). Cette définition insiste sur l'identification des dysfonctionnements techniques et sur les mesures préventives à adopter. D'autres insistent sur l'importance de l'aspect humain (Blondeaux, 1999) ou privilégient la gestion de la crise en mettant en avant le coté organisationnel (Lagadec, 1991). D'un point de vue purement hydrologique, nous pouvons définir le retour d'expérience comme étant : *une démarche, se basant sur l'étude d'un évènement particulier, ayant pour but d'observer et d'identifier les défaillances afin de corriger ou proposer des améliorations pour réduire ces dernières.*

A.3 : Bref rappel historique sur les données radar

Hormis les pluviomètres, une autre manière de collecter les données de pluie est le RADAR météorologique. Ces informations sont fournies par *Météo France*. En effet le réseau ARAMIS dans les années 90 constituait le premier réseau radar (13 radars) et apportait une grande avancée en permettant la visualisation en temps réel à cadence rapide de déplacement d'évènements météorologique. D'autres projets ont fait évoluer le réseau de radar, comme le projet PANTHERE (Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et Renouvellement), qui a porté le nombre de radars à 24. Les technologies des radars ont également largement évolué avec le temps et permettent une estimation précise des lames d'eau et ainsi ont une véritable utilisation quantitative notamment dans le domaine de l'hydrologie. Ces radars sont calés à partir du réseau de pluviomètres au sol depuis 2006. C'est l'enjeu du projet ANTILOPE (Analyse par spatialisatiOn hOraire des PrEcipitations) dont le fonctionnement se fait à partir de la rétrodiffusion par les gouttelettes des ondes électromagnétiques émises par le radar. Ils s'imposent comme un outil indispensable pour les hydrologues car ils fournissent une information précieuse, à savoir la variabilité spatiale de la pluie. Cependant ils sont soumis à plusieurs sources d'erreurs : influence de la réflexion de la neige, échos du sol, atténuation du signal... Le réseau de pluviomètres reste donc indispensable.

A.4 : Structure du modèle GRP



Données d'entrée du modèle :

E : Evapotranspiration

P : Pluie

Q : Débit

Paramètres libres :

X1 : Facteur de correction des pluies

X2 : Capacité du réservoir de routage (mm)

X3 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire (h)

Les autres lettres représentent des variables internes :

Pn : Pluie nette

PR : Pluie réelle

S : Niveau dans le réservoir de production

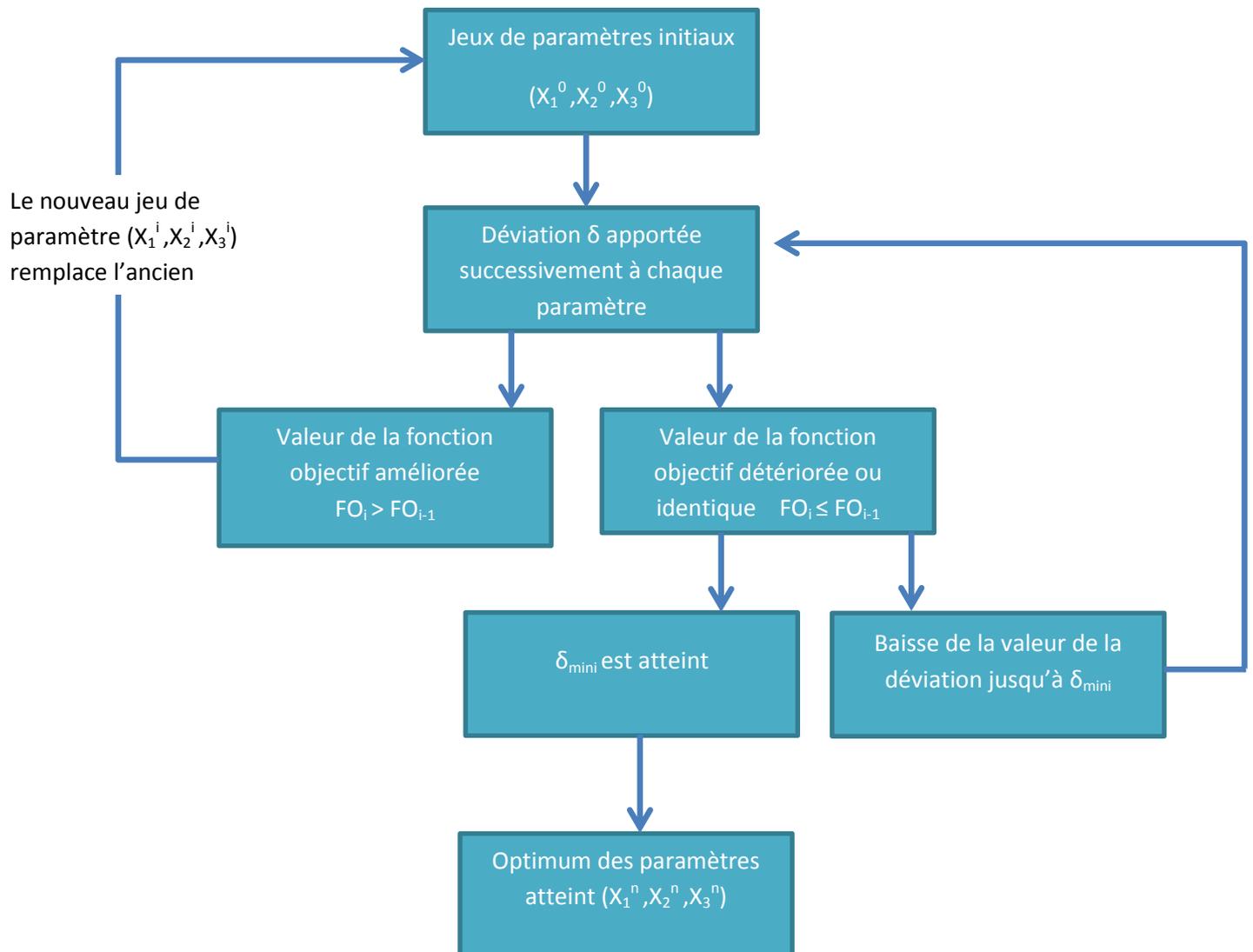
R : Niveau dans le réservoir de routage

Q'1 : Débit au pas de temps précédent

Q'2p : Débit prévu avant correction

Q2p : Débit prévu après correction

A.5 : Algorithme simplifié de la méthode « pas à pas »



A.6 : L'échantillonnage de la chronique pendant la procédure de calage

Comme il l'a été décrit en première partie, le calage consiste en la détermination d'un jeu de paramètres par optimisation d'une fonction calculant l'erreur entre la simulation et l'observation. L'échantillon temporel pris en compte pour réaliser cette procédure joue un rôle important. La chronique de données d'étude va être divisée en deux périodes (Klemes, 1986), c'est la méthode du *split sample test*. GRP cherche deux périodes aussi longues que possible sans lacunes de pluie, puis va ajuster les trois paramètres du modèle sur la période la plus longue d'entre elles et va réaliser une vérification sur la seconde. Puis inversement, il va ajuster les paramètres sur la seconde période et les contrôler sur la première. Ceci permet de vérifier la performance sur l'ensemble des années de données historiques disponibles, tout en gardant l'indépendance entre les données de calage et de validation. GRP permet de sélectionner une chronique totale de 18 ans, comprenant une année de mise en route.



A.7 : Courte explication de la détermination d'une période de retour grâce à la méthode de Gumbel

Dans le but d'estimer la période de retour d'une crue, il est nécessaire de disposer d'une chronique longue (au moins 30 ans) avec des données fiables. Nous disposons des données vérifiées et fournies par le SPC sur la chronique 1960-2013. Il est tout d'abord nécessaire de recenser et de trier par ordre décroissant les débits horaires maximums annuels. La loi de Gumbel va être utilisée pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition de cette loi s'exprime comme suit :

$$F_{\text{Gumbel}} = e^{-e^{-\frac{x-a}{b}}}$$

$$\text{avec } u = \frac{x-a}{b}$$

la variable réduite de la fonction de répartition

a et b des paramètres du modèle de Gumbel.

u a ainsi pour expression $u = -\ln(-\ln(F_{\text{Gumbel}}))$.

Il est nécessaire maintenant d'ajuster la loi de probabilité de Gumbel sur la série de données que nous disposons. Dans ce but, les débits vont être classés par ordre décroissant et la fréquence empirique de Cunan (1978) va être utilisée. La fonction de répartition de cette fréquence empirique s'exprime comme suit :

$$F = \frac{r-0.3}{n+0.4}$$

Avec r le rang dans la série de données classée par valeurs décroissantes et n la taille de l'échantillon.

Ensuite l'objectif est d'estimer les paramètres a et b . Pour cela nous utilisons la méthode des moments. Dans cette méthode les paramètres a et b sont déduits à partir de la moyenne et de l'écart type, que nous noterons respectivement μ et σ .

La méthode des moments indique que :

$$\mu = a + b \cdot \gamma \quad \text{et} \quad \sigma^2 = b^2 \cdot \frac{\pi^2}{6}$$

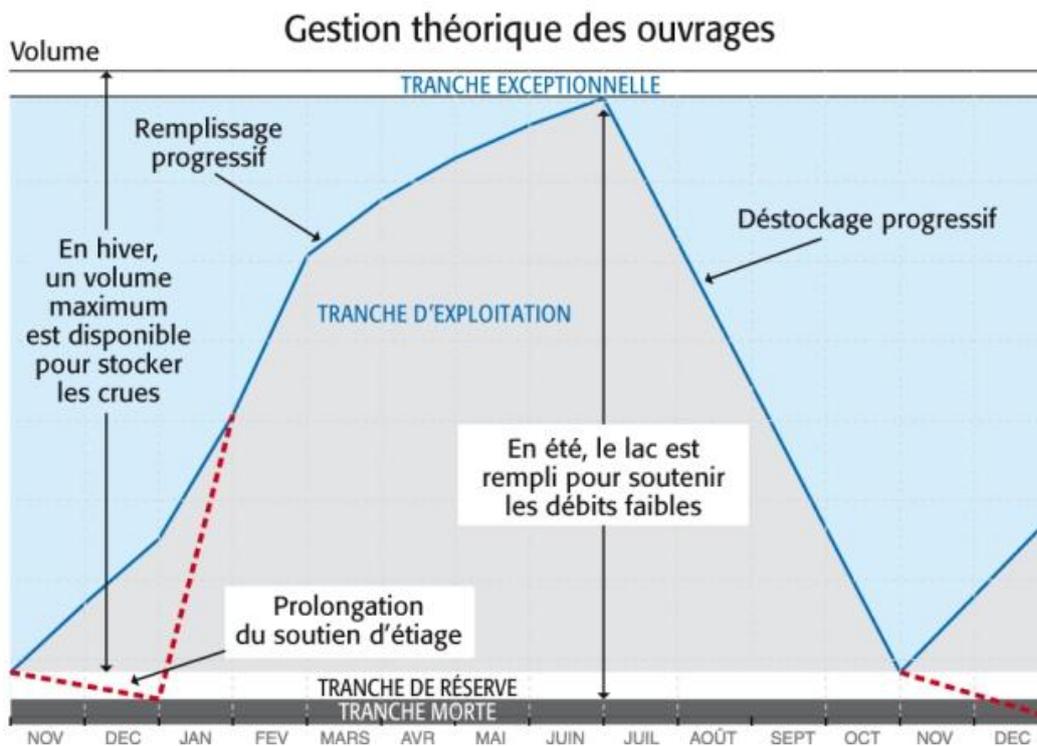
Avec γ étant la constante d'Euler, égale à 0.5772.

En inversant ces deux expressions, on obtient facilement l'expression des paramètres a et b .

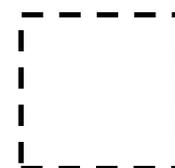
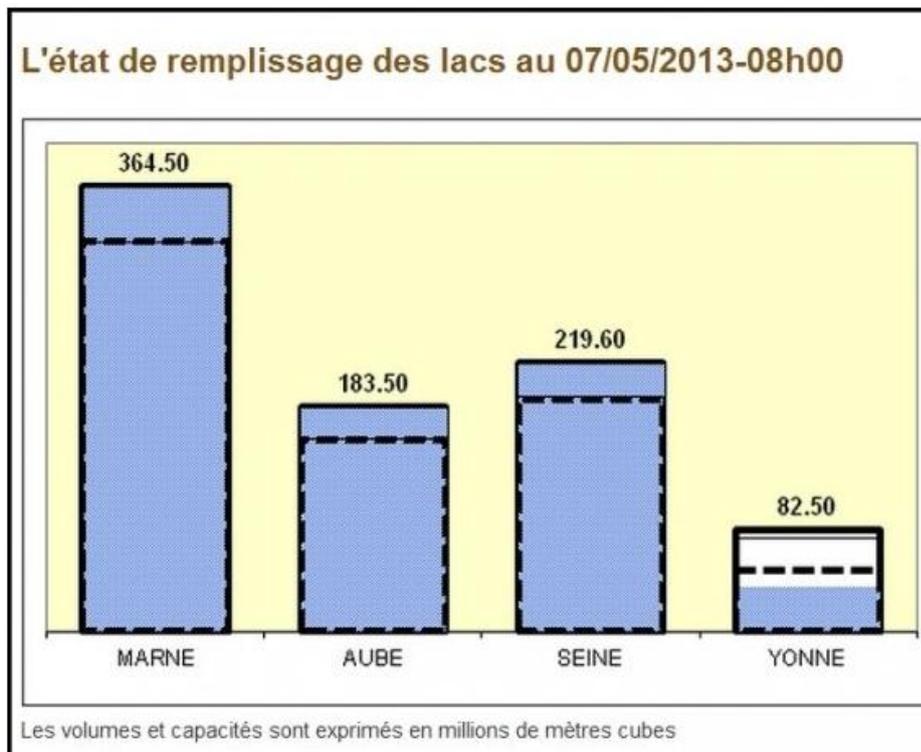
On a ensuite accès à F_{Gumbel} puis à la période de retour T grâce à la formule :

$$T = \frac{1}{1 - F_{\text{Gumbel}}}$$

A.8 : Gestion théorique des grands lacs EPTB



A.9 : Etat de remplissage des grands lacs pendant les évènements de mai 2013

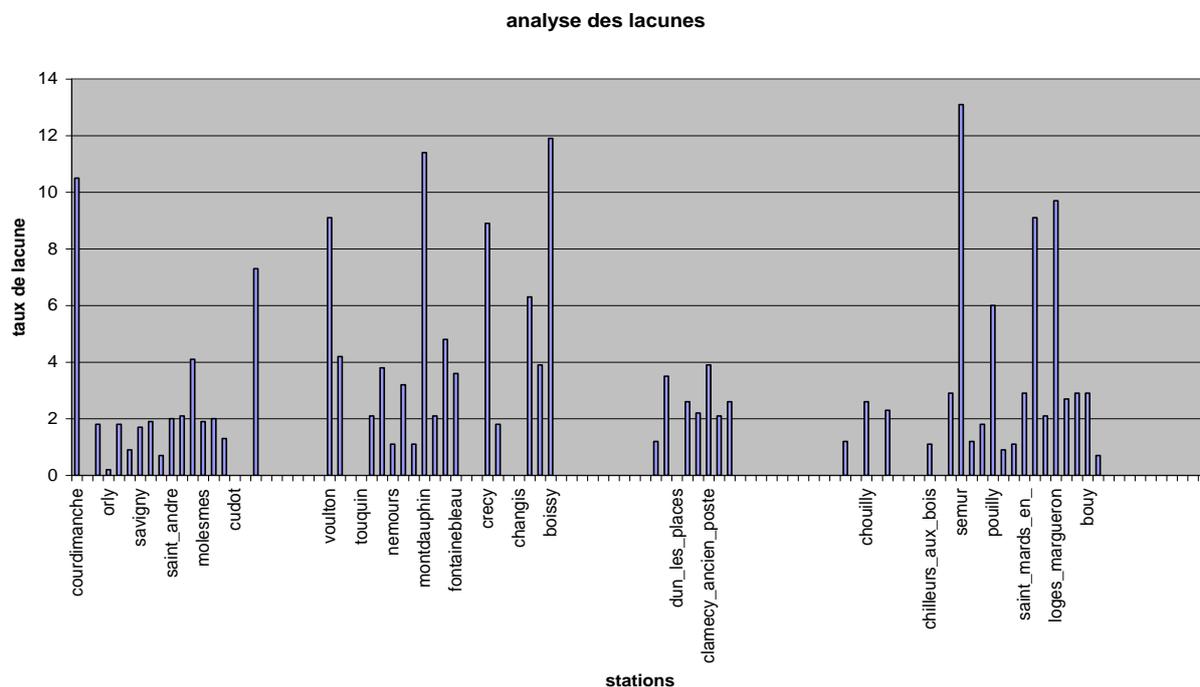


Remplissage théorique des lacs à cette période de l'année

A.10 : Détail des performances moyennes sur toute la chronique pour chaque bassin

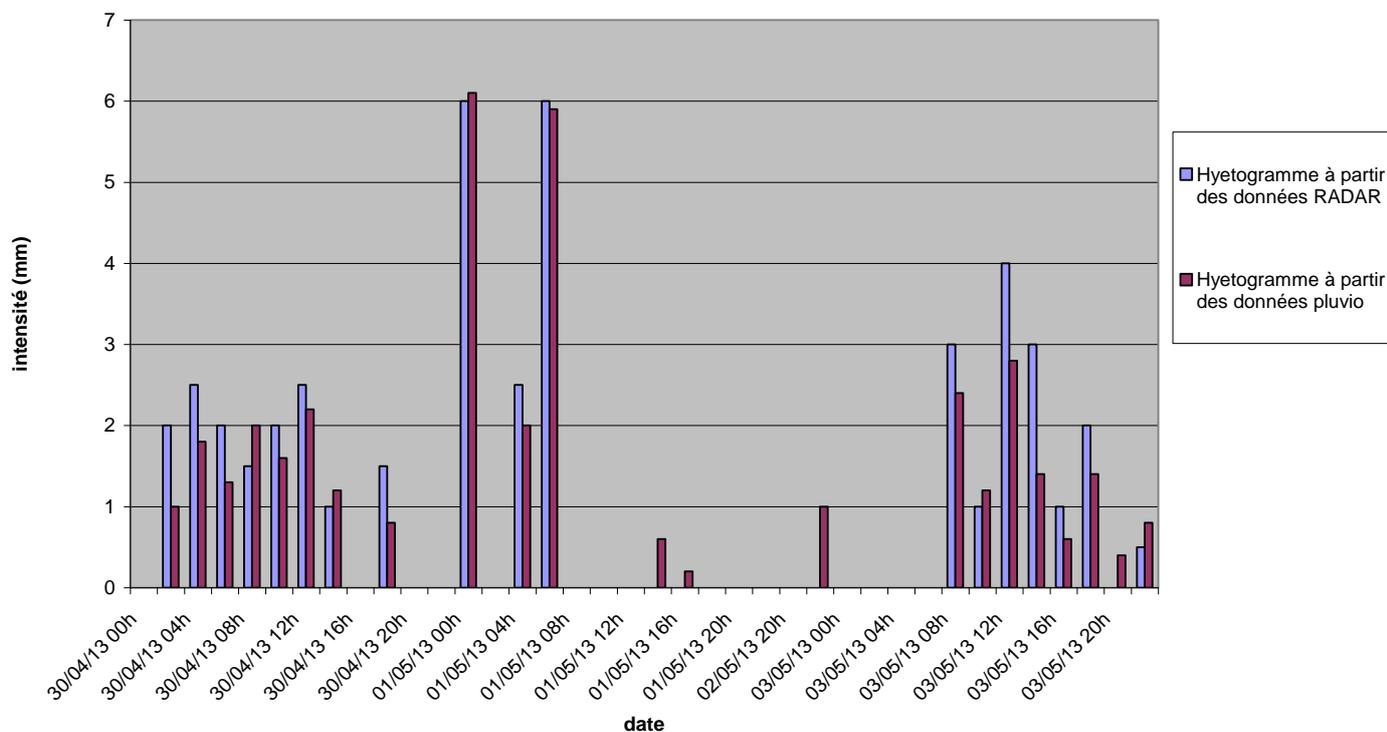
Code HYDRO	Nom bassin	C2MP	EARM (%)	Hc (h)
H2051010	Yonne à Dornecy	0.388	9.65	12
H2061010	Beuvron à Ouagne	0.549	11.85	12
H2332020	Serein à Dissangis	0.390	12.55	12
H2402010	Armançon à Brianny	0.397	11.55	6
H2442340	Brenne à Montbard	0.546	6.90	12
H2452020	Armançon à Aisy	0.528	9.25	12
H3021010	Loing à Montbuy	0.197	14.05	12
H3023211	Aveyron à La Chapelle	0.444	12.45	6
H3102010	Ouanne à Toucy	0.457	12.50	12
H3122010	Ouanne à Charny	0.441	13.40	12
H3322010	Bezonde à Pannes	0.344	12.90	12
H4252010	Orge à Morsang	0.038	11.00	6
H5321010	Marne à La Ferté	0.061	6.00	18
H5732010	Grand Morin	0.576	11.15	12
H5920010	Sein à Austerlitz	0.126	9.20	24

A.11 : Analyse des lacunes sur la période de calage (1997-2013) pour une partie des pluviomètres.

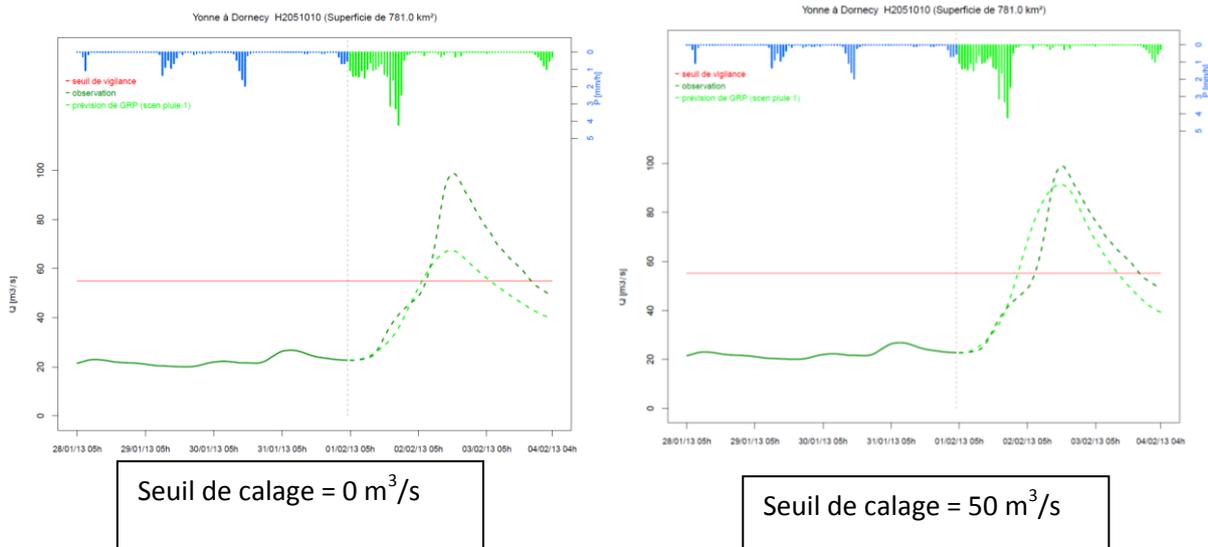


A.12 : Comparaison des données d'intensité de précipitation pour la station Tonnerre pendant les évènements de mai 2013 entre le radar et celles des pluviomètres.

Comparaison du hyetogramme obtenu à partir des données RADAR et pluvio sur la station : Tonnerre



A.13 : Influence du seuil de calage sur le bassin de l'Yonne à Dornecy

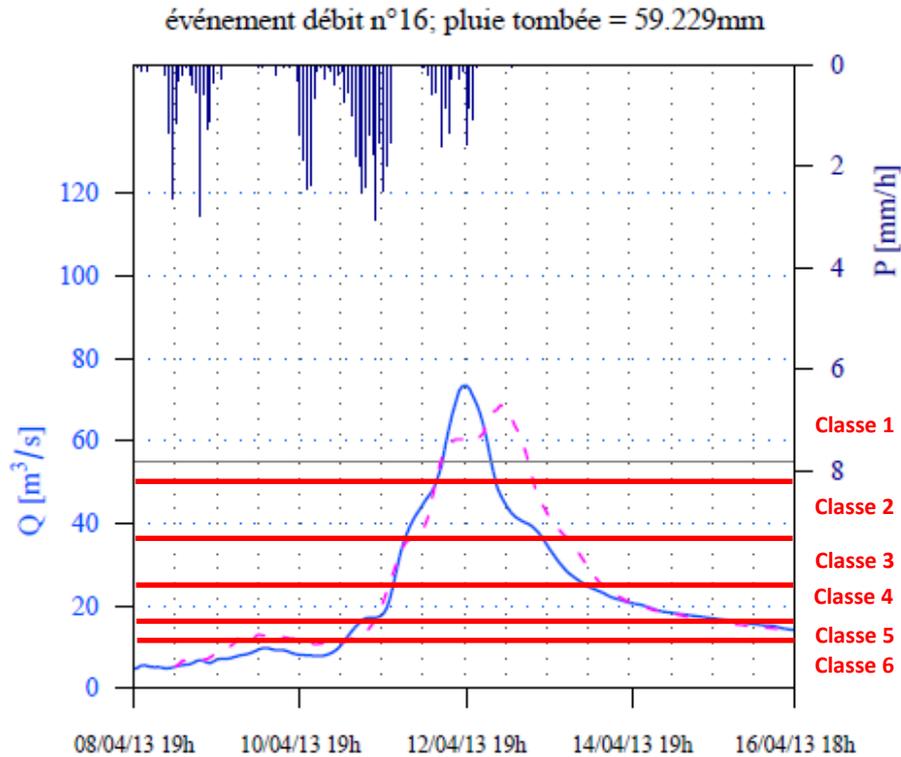


A.14 : Etude comparée des critères RMSE et EARM en fonction de différentes classes de débit

On trouve souvent dans la littérature que les critères de type quadratique comme le RMSE, accordent plus de poids aux forts débits et qu'utiliser un critère de type non quadratique, comme l'erreur moyenne absolue (EA), est efficace si l'on veut être aussi proche que possible de la valeur observée à chaque pas de temps (Perrin, 2000), ce qui est utile dans un contexte de prévision. Dans la mesure où nous cherchons une fonction objectif qui soit en accord avec un calage en montée de crue nous décidons d'analyser ces deux types de critère. Pour cela nous avons choisi de faire une étude sur plusieurs bassins de superficies différentes : l'Ouanne à Charny (562 km²) le Beuvron à Ouagne (264 km²) et l'Yonne à Dornecy (781 km²). Notre objectif est de connaître l'influence de chaque classe de débit (des débits les plus importants aux débits les plus faibles) sur l'Erreur Absolue (EA) et la fonction RMSE. Nous allons réaliser ce test en considérant deux événements de crue pour chaque bassin d'une durée de 8 jours.

- Les critères de type quadratiques accordent-ils réellement plus de poids aux forts débits en période de crue ?
- Les critères de type non quadratiques accordent-ils autant d'importance que les critères de type quadratiques en période de crue ?

Il nous faut d'abord définir nos classes de débit. Pour la totalité de la période, nous prenons l'ensemble des débits observés, les trions par ordre décroissant et les classons en six catégories (chaque catégorie comportant le même nombre de débit) : la classe 1 regroupant tous les débits les plus forts et la classe 6 : tous les débits les plus faibles. Comme l'indique le schéma ci-dessous :



Ci-dessus un exemple de répartition des classes de débit. Nous prenons des évènements de 8 jours donc de 192 pas de temps horaires. Nous trions les débits observés par ordre décroissant puis formons six classes de débit égales soit 32 pas de temps.

La fonction RMSE s'exprime de la façon suivante :

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

$$\text{Or: } \sum_{i=1}^n (Q_{i+H}^{\text{obs}} - Q_{i+H}^{\text{sim}})^2 = \sum_{C1} (Q_{i+H}^{\text{obs}} - Q_{i+H}^{\text{sim}})^2 + \sum_{C2} (Q_{i+H}^{\text{obs}} - Q_{i+H}^{\text{sim}})^2 + \dots + \sum_{C6} (Q_{i+H}^{\text{obs}} - Q_{i+H}^{\text{sim}})^2$$

C1, C2, ..., C6 représentant les différentes classes de débit selon le découpage établi précédemment.

Posons : $k1 = \sum_{C1} (Q_{i+H}^{\text{obs}} - Q_{i+H}^{\text{sim}})^2$ pour les débits de la première classe.

Ainsi nous définissons de même : k2, k3, k4, k5 et k6 les sommes des différences entre débits observés et simulés pour les classes de 2 à 6.

$$\text{Donc: } \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} (k1 + k2 + k3 + k4 + k5 + k6)}$$

Ce qui revient à écrire que :

$$\frac{k1^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} + \frac{k2^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} + \frac{k3^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} + \frac{k4^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} + \frac{k5^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} + \frac{k6^2}{n \cdot \text{RMSE}^2} = 1$$

L'influence d'une classe de débit sur le RMSE total de l'évènement est donnée par l'expression :

$$\frac{k_i^2}{n \cdot RMSE^2}$$

i prenant des valeurs entre 1 et 6 en fonction de l'influence de la classe de débit à étudier.

Il est tout à fait possible d'étudier l'influence des classes de débit de la même manière pour la fonction non quadratique : $EA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim}|$

En posant cette fois :

$$k_i = \sum C_i |Q_{i+H}^{obs} - Q_{i+H}^{sim}|$$

Ainsi de même que pour le RMSE, on peut établir que :

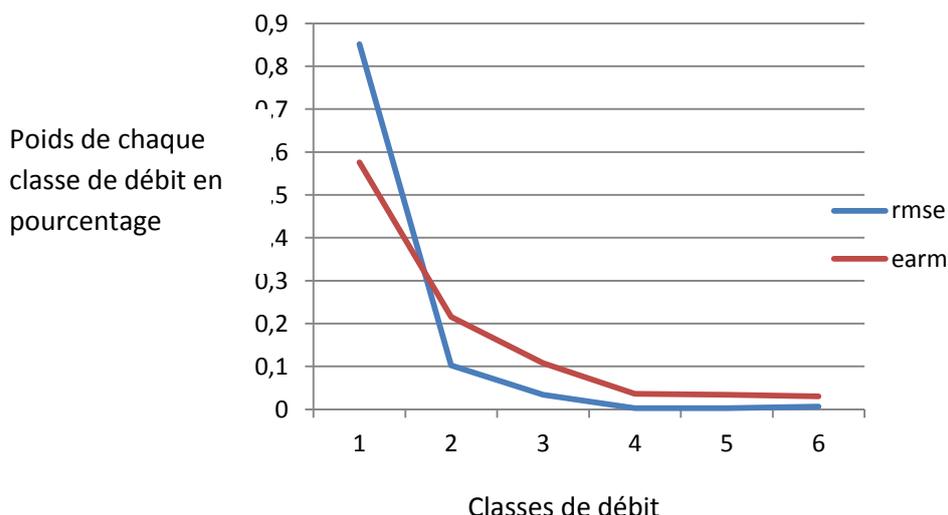
$$EA = \frac{1}{n} (k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6)$$

$$\text{Et que : } \frac{k_1}{n \cdot EA} + \frac{k_2}{n \cdot EA} + \frac{k_3}{n \cdot EA} + \frac{k_4}{n \cdot EA} + \frac{k_5}{n \cdot EA} + \frac{k_6}{n \cdot EA} = 1$$

L'influence d'une classe de débit sur l'EA totale de l'évènement est donnée par l'expression : $\frac{k_i}{n \cdot EA}$

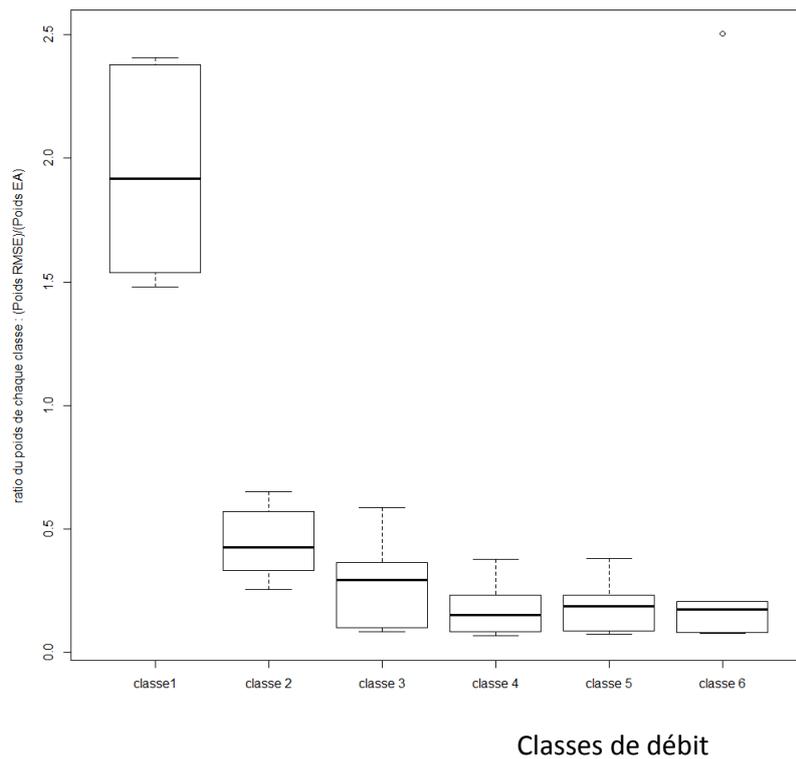
i prenant des valeurs entre 1 et 6 en fonction de l'influence de la classe de débit à étudier.

Si nous représentons pour nos six évènements de crue, sur nos trois bassins, l'influence des différentes classes de débit sur l'EA et le RMSE nous obtenons pour tous les évènements un graphique type représenté ci-dessous :



Afin de comparer les influences des classes de débit sur le calcul du RMSE et de l'EA, observons les tendances qui se dégagent sur nos six bassins. Le graphique suivant représente le ratio entre :

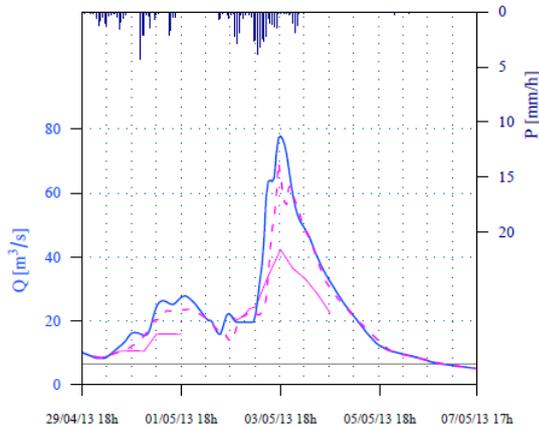
$$\frac{\text{Poids en pourcentage accordé par la fonction RMSE}}{\text{Poids en pourcentage accordé par la fonction EA}}$$



Ces deux graphiques nous apportent plusieurs renseignements :

- La fonction RMSE accorde beaucoup plus de poids aux débits les plus élevés (de classe 1), 83% en moyenne sur nos six événements et donc de faibles poids aux classes inférieures avec une influence décroissante.
- La fonction EA accorde également un poids plus important aux forts débits puis des poids décroissants aux autres classes mais dans une moindre mesure puisqu'en moyenne sur nos six bassins, la classe 1 représente 44% de l'EA totale.
- Enfin le deuxième graphique confirme ce que l'on peut trouver dans la littérature (Perrin, 2000), car le RMSE accorde un poids beaucoup plus important que l'EA, aux débits les plus élevés (85% de plus) et des poids beaucoup moins importants aux débits n'étant pas parmi les plus élevés.

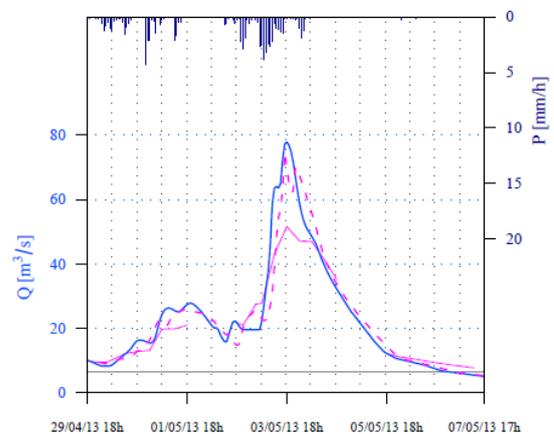
A.15 : Quelques hydrogrammes montrant l'influence d'une technique de calage par rapport à la configuration de base utilisée sur GRP.



Le Serein à Dissangis. Hc =12h.

Fonction objectif : fonction de base
de GRP : RMSE sur la période
entière

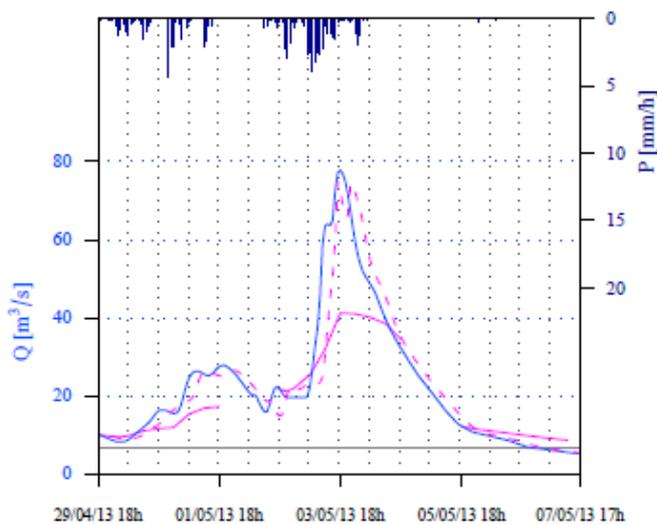
Crue de Mai 2013



Le Serein à Dissangis. Hc =12h.

Fonction objectif : RMSE
uniquement sur les débits en
montée

Crue de Mai 2013



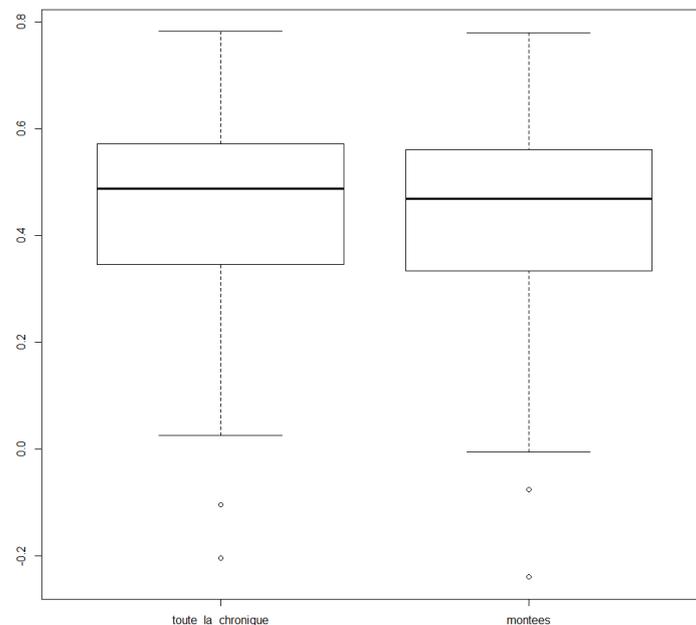
Le Serein à Dissangis. Hc =12h.

Fonction objectif : EARM
uniquement sur les débits en
montée

Crue de Mai 2013

- Débit observé
- - - Débit simulé : ensemble
de prévisions à horizon de 12 h
- Débit simulé : cheveux
indiquant des prévisions jusqu'à
48h, émises toutes les 72h

A.16 : Comparaison des performances globales entre les deux techniques de calage sur un échantillon de bassin plus large



A.17 : Apports du stage

La bibliographie en amont de tout projet est une chose nécessaire que j'ai apprise durant ce stage pour plusieurs raisons. Cette recherche apprend à définir clairement le sujet, à voir apparaître les premières pistes de réflexion et à cadrer l'étude. C'est une étape primordiale à ne surtout pas négliger.

La justification de chaque nouveau point apporté est également quelque chose dont je n'avais pas le réflexe et qui pourtant est la base de tout raisonnement correcte. En effet, l'important dans une idée nouvelle n'est pas l'idée en elle-même, mais plutôt de savoir l'expliquer, l'argumenter et préciser ce que l'on veut montrer. Cette justification est utile bien sûr pour les gens qui vont exploiter cette idée mais elle l'est également pour pouvoir exploiter au maximum l'idée tout en ayant à l'esprit ce qui est à la base du raisonnement.

Le paradoxe que j'ai également relevé est que dans un tel milieu, il faut savoir faire preuve d'une grande autonomie sans pour autant négliger la discussion. En effet ce type de travail peut paraître complètement autonome et solitaire cependant il est important de savoir discuter et échanger afin d'avoir des points de vue et des idées différentes qui feront avancer la problématique.

Bibliographie

- Allchin. (2001). Error Types. *Perspectives on Science*, 9:38-59.
- Anctil. (2003). ANN output updating of lumped conceptual. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5), 1269-1279.
- Benett et al. (2013). Environmental Modelling and Software, Characterising performance of environmental models. *Elsevier*, 40, 1-20.
- Berthet. (2010). *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. Thèse de doctorat AgroParisTech (Paris).
- Blondeaux. (1999). groupe de travail " facteurs humains". *Institut de Sureté de Fonctionnement*, p. 247.
- Blöschl. (2013). The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons. *Hydrology and Earth System Science*.
- Bourgin, F. (2014). *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants*. Thèse de doctorat, AgroParisTech (Paris), Irstea (Antony).
- Garcon et al. (2002). Dans *Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation du risque d'inondation* (p. 76).
- Garrick. (1978). A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 38:375-381.
- Gérard. (2010). *Sensibilité des performances d'un modèle de prévision des crues au critère de calage*. Rapport de stage ENSEIHT.
- Green. (1986). *Preliminary notes on the processing and analysis of hydrological data for groundwater assesment*. Govt of Fiji: Internal Document.
- Gupta et al. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- Houghton-Carr. (1999). *Flood Estimation Handbook*. Wallingford: Institute of Hydrology.
- Klemes. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Lagadec. (1991). *La gestion des crises : outils de décision à l'usage des décideurs*.
- Mathevet. (2005). *Quels modèles pluie-débit au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Thèse de doctorat ENGREF.
- Michel. (1989). Dans *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux* (p. 530). Cemagref Antony.

- Nascimento. (1995). *Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant*. Thèse de doctorat ENPC.
- Perrin. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de doctorat, INPG.
- Roche et al. (2012). *Hydrologie quantitative*. Springer.
- Tangara. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, Ecole pratique des hautes études de Paris.
- Weglarczyk. (1998). The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *J. Hydrol*, 206(1) : 98-103.
- WMO. (2014). *Compte rendu annuel de l'OMM*, Geneve.
- Zwingelstein. (1999). Méthode stratégies. Dans *Fonction maintenance* (pp. 40-44, n°8).