

Université Pierre et Marie Curie

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

**Analyse des performances du modèle de prévision GRP pendant
la crue de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire**

Claire VRIGNAUD

Encadrement : Maria-Helena RAMOS



IRSTEA UR Hydrosystèmes et Bioprocédés
1 rue Pierre Gilles de Gennes
92160 ANTONY

Juin 2017



Abstract

Flood forecasting often includes the use of hydrological models to estimate the future discharges of a watercourse, as well as the volume and the propagation of these discharges in response to the precipitation forecast over the upstream area of the watershed. In France, the regional Flood Forecasting Services (SPC) are responsible for anticipating floods through the use of forecasting models, such as the GRP model developed at Irstea, in coordination with the national service SCHAPI.

Between 28 May and 11 June 2016, the Seine and the Loire river basins were affected by an intense and persistent meteorological phenomenon of precipitation, which was at the origin of the overflow of numerous rivers within these basins, and of significant damage on these territories. As a consequence, an evaluation of the forecasts made during the flood event was necessary to better understand the strengths and weakness of the forecasting systems running operationally during the event.

This report aims to evaluate the performance of the GRP model over sub-basins of the Seine and Loire river basins during the May-June 2016 flood event. For this purpose, observed and forecast precipitation data available were used as input to the hydrological model, in order to evaluate the forecast errors coming from the model. The rainfall data used were observed data previously interpolated over the areas of the sub-basins and, forecasts from the AROME model, or from forecast bulletins provided by Météo-France.

The various simulations carried out show an underestimation of the forecast discharges by the GRP model, on this event in the majority of the 101 sub-basins studied. The results show that GRP simulations (using observed rainfall as input to the model) underestimate the observed discharges in 56% of the catchments in the Loire river basin and 94% of the catchments in the Seine river basin. The impact of discharge data assimilation on the quality of the forecasts is clearly shown.

Key words : flood forecasting, hydrological model, exceptional flood event, Seine, Loire, performances, underestimation, overestimation.

Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé et ont participé, directement ou indirectement à la rédaction de mon mémoire et au bon déroulement de mon stage, au sein de la structure qui m'a accueillie, Irstea Antony (voir bas de page).

Je tiens à remercier le SCHAPI, pour leur soutien financier via la convention 2017 Irstea. Ensuite, je remercie tout particulièrement ma responsable de stage, Madame Maria-Helena Ramos, chargée de recherche en hydrologie à Irstea, pour le temps qu'elle m'a accordé et pour tout ce qu'elle m'a transmis, notamment sur le sujet passionnant de la prévisions des crues.

De manière générale, je remercie mes collègues de l'équipe Hydro pour leur disponibilité et pour leur gentillesse.

Structure d'accueil :

Mon stage s'est déroulé au sein de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea). C'est un EPST (Établissement Public à caractère Scientifique et Technologique) qui contribue à la recherche scientifique dans les domaines de l'ingénierie environnementale et agricole. Les recherches Irstea ont pour but d'apporter une aide concrète à des organismes publics, mais aussi parfois privés. Mon stage se déroule sur le site d'Antony, dans le département Eaux, au sein du thème de recherche "aléas et risques liés à l'eau" et, plus particulièrement, dans l'unité Hydrologie des Bassins Versant qui mène des recherches sur l'hydrologie des bassins versants, la prévision des ressources en eaux et des événements extrêmes et l'impact du changement climatique.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Le contexte	6
2.1	L'événement de mai-juin 2016	6
2.1.1	Ce que la presse a relayé	6
2.1.2	Le phénomène météorologique observé	7
2.1.3	Les débits associés observés	8
2.1.4	Les dégâts engendrés	10
2.1.5	Conclusions sur l'événement observé	12
2.2	Prévisions et vigilances	12
2.2.1	Les prévisions hydrologiques	12
2.2.2	La vigilance en France	12
2.2.3	Les vigilances crues lors de la crue de mai-juin 2016	13
2.2.4	Conclusions sur la prévision des crues	14
3	Le modèle GRP et les données utilisées	14
3.1	L'outil : Le modèle de prévision des crues GRP	14
3.1.1	Structure du modèle	15
3.1.2	Les paramètres du modèle	16
3.1.3	L'utilisation de GRP en temps réel et temps différé	17
3.2	Les données	17
3.2.1	Les données observées de précipitations	17
3.2.2	Les données observées de débits	17
3.2.3	Les données prévues de précipitations	18
3.3	Méthodes d'évaluation du modèle	20
3.3.1	Les différences entre maximum en débit et en temps	20
3.3.2	Mean Absolute Error (MAE)	21
3.3.3	Kling Gupta Efficiency (KGE)	21
3.3.4	Les tableaux de contingence	22
4	Les résultats	23
4.1	Les débits simulés par le modèle GRP	23
4.2	Les prévisions de débits avec pluie observée : effet de l'assimilation du dernier débit observé avant la prévision	24
4.3	Les prévisions de débit avec prévisions de pluie AROME-PI	27
4.4	Les prévisions de débit avec les bulletins de prévision	29
4.5	Comparaison des performances du modèle avec les différentes prévisions de précipitations	30
4.5.1	Evaluation par le MAE	32
4.5.2	Evaluation par le KGE	34
4.5.3	Evaluation par tableau de contingence	35
4.6	Conclusion sur les différentes prévisions	38
5	Conclusion	39

1 Introduction

Entre le 28 mai et le 11 juin 2016, un phénomène climatique très pluvieux a touché l'Europe, principalement au niveau de la France et des pays voisins, engendrant des crues de grande ampleur. En France ce sont les bassins de la Seine et de la Loire qui ont subi cet événement exceptionnel. Pour les pays voisins, le cas de l'Allemagne est particulièrement représentatif car elle a été fortement impactée par le phénomène, comme l'explique l'article de Piper *et al.* (2016). Les auteurs associent notamment les nombreux et violents orages qui sont survenus pendant l'événement avec leur tendance convective, pour expliquer les cumuls exceptionnels de précipitation enregistrés à cette période.

Concernant la France, une crue d'une telle importance n'avait pas été observée sur le bassin de la Seine depuis 1982, et il s'agit même de l'inondation la plus importante pour certaines villes du Loiret et de Seine et Marne avec des périodes de retour de plus de 100 ans. Il s'agit de la seconde catastrophe naturelle la plus coûteuse après le cyclone Xynthia de 2010, depuis la création du régime d'indemnisation CatNat en 1982.

La crue de 2016 a été assimilée à celle de 1910 sur le bassin de la Seine, bien qu'elle ne soit pas comparable tant au niveau de son ampleur que de sa dynamique. Cet événement a été beaucoup documenté par la presse, notamment par les quotidiens qui ont publié tous les jours sur le sujet, du 28 mai au 15 juin environ, et moins régulièrement jusqu'à la fin du mois de juin 2016. Les articles portaient sur l'évolution de la crue, les inquiétudes pendant la gestion de crise puis les dégâts et coûts liés aux inondations. D'autres médias (télévision, radio) ont aussi relayé des informations au sujet de cette crue. En effet, une crue de printemps qui a menacé des enjeux économiques importants et a engendré autant de dégâts, sur les bassins de la Seine et de la Loire simultanément, était exceptionnelle.

Des rapports officiels ont été publiés au cours de l'automne 2016 et depuis le début de l'année 2017 comme le rapport de retour d'expérience sur les Inondations de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire (Perrin *et al.*, 2017), dans le but de faire un retour sur cette crue récente, d'analyser les phénomènes météorologiques et hydrologiques, de revenir sur la gestion de crise par les services concernés et de prendre en compte la réaction de la population face à cette catastrophe naturelle rare. Concernant la prévision de crue, ce même rapport de retour d'expérience (Perrin *et al.*, 2017) indique que "Des recalages hasardeux étaient sans doute intervenus sur certains de ces modèles GRP, ce qui expliquerait, au moins en partie, leurs médiocres performances". Ce modèle est utilisé par les Services de Prévision des Crues (SPC) en conditions opérationnelles, il est donc nécessaire de comprendre ce qu'a prévu le modèle GRP (développé à Irstea) pendant l'événement exceptionnel de mai-juin 2016, pour l'améliorer en vue d'un éventuel événement d'ampleur similaire voire supérieure, qui pourrait survenir dans le futur.

Ainsi ce stage s'inscrit dans cette démarche de retour d'expérience, afin de comprendre l'événement de crue et de voir ce qui a été prévu par le modèle de prévision des crues GRP. Pour cela plusieurs points sont développés dans ce rapport :

Dans une première partie, il s'agit de présenter une synthèse de l'événement, avec une revue du phénomène climatique, des conséquences économiques et des dégâts engendrés par le débordement des cours d'eau. Un point est fait sur les différents articles, rapports et autres documents parus pendant et après l'événement, parmi la cinquantaine de publications parcourus (mais les articles lus sont non exhaustifs, et d'autres ont parus pendant et après l'événement). La seconde partie est dédiée à la présentation du modèle de prévision GRP, des données d'entrées du modèle utilisées pour cette étude, ainsi que des méthodes employées pour l'analyse des performances du modèle. Enfin, la troisième partie de ce rapport dresse les conclusions sur la qualité des prévisions réalisées pendant l'événement de crue de mai-juin 2016.

2 Le contexte

2.1 L'événement de mai-juin 2016

La crue de mai-juin 2016 est un événement de grande ampleur, qui a touché 19 départements sur les territoires de deux SPC (Loire Cher Indre (LCI) et Seine moyenne Yonne Loing (SmYL)). Des crues de cette importance sur les bassins de la Seine et de la Loire ne se produisent pas à cette période de l'année, en effet, "les grandes crues historiques de la Seine à Paris ont toutes eu lieu l'hiver" comme le précise V. Andréassian dans un article paru dans le journal Libération (Gévaudan, 2016). Cet événement a paralysé ou fortement perturbé une grande partie des habitants et des activités économiques, commerciales ou touristiques situés en bordures des cours d'eau pendant pratiquement deux semaines.

2.1.1 Ce que la presse a relayé

Plus de 50 articles parus entre le 28 mai et la fin du mois de juin 2016 ont été pris en compte dans le cadre de la revue bibliographique de cette étude, et la figure 2.1.1 montre une sélection de quelques uns de journaux, avec des gros titres plus ou moins alarmants, concernant Paris ou les villes fortement inondées.



FIGURE 1 – Quelques uns de journaux parues pendant la crue de mai juin 2016

Souvent on retrouve de courts articles parus dans des quotidiens, et faisant état de la pluviométrie exceptionnelle enregistrée pour un mois de mai (Vey, 2016; Gévaudan, 2016), de la montée des eaux à Paris (Kille, 2016) et dans les départements touchés au fur et à mesure par une forte et rapide montée de crue (Barroux, 2016; Vandekraats, 2016). Les villes touchées ont tour à tour été citées dans les journaux quotidiens, au fur et à mesure que l'onde de crue se déplaçait vers l'aval. A partir du 2 juin, les articles ont commencé à faire état des dégâts matériels (Laurette, 2016), du coût estimé et des aides qui seront apportées (Raffin, 2016), et également

des premières réactions des victimes alors que la décrue s'amorçait à l'amont du bassin de la Seine et que l'onde de crue se déplaçait vers Paris (Cornevin et Négroni, 2016) et l'aval du bassin. Les articles se tournent ensuite d'avantage vers les risques liés à la décrue une fois le pic passé et le "danger écarté" Roche-Bayardi (2016). Après le 12 juin, une fois la décrue bien évidente à Paris, les articles de presse se font plus rares, mais dans les mois qui suivent, il y a toujours quelques parutions chiffrant les dégâts et les pertes tant pour les particuliers que pour les entreprises. La presse a été particulièrement prolifique à propos de Paris, avec de nombreux titres à la une au sujet de la crue dans la capitale. En effet, la peur de la montée des eaux est encore plus forte, à cause de la forte densité de population qui y réside ou y travaille.

2.1.2 Le phénomène météorologique observé

Du 28 au 31 mai 2016, un événement météorologique persistant a touché le nord de la France et une partie de l'Europe. Ce phénomène a engendré un cumul exceptionnel de précipitations, entraînant une montée importante du niveau des cours d'eaux des bassins de la Seine et de la Loire. Le 30 mai 2016, jour des précipitations les plus intenses de l'épisode, les cumuls sur 24h étaient localement équivalents ou supérieurs à ceux d'un mois de mai entier ordinaire. Par exemple, 66 mm de précipitation en 24h ont été relevés à Trappes, alors que la moyenne de précipitations pour le mois de mai se situe à 63.9 mm pour ce poste pluviométrique. De plus, les régions Bourgogne, Centre, Picardie et Ile de France enregistrent le mois de mai le plus pluvieux sur la période 1959-2016 (Météo-France, 2016). Ces quelques chiffres ne sont pas des cas isolés, et de nombreuses localités ont été touchées par ce phénomène.

Ces cumuls de précipitations exceptionnels sont dûs à la venue d'un flux pluvio-orageux de l'est, et qui a stagné plusieurs jours sur le nord, nord-est de la France et de certains pays d'Europe, à l'Est de la France (Météo-France, 2016). Concernant la France, les cartes en figure 2 montrent le cumul de précipitations enregistrées au mois de mai (a) et juin (b) 2016.

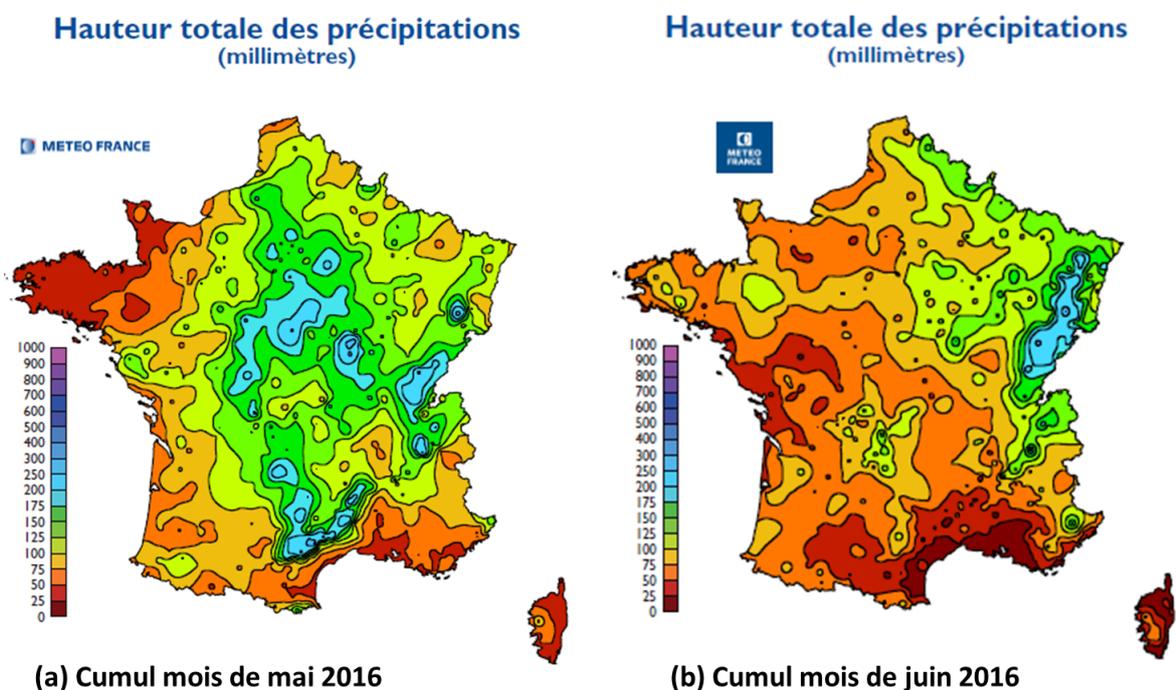


FIGURE 2 – Cumul de précipitations des mois de mai (a) et juin (b) 2016. Source : Météo-France

Les données de pluies observées pendant l'événement, fournies par les deux SCP LCI et SmYL montrent des cumuls allant de 66 mm de à 194 mm de pluie sur la période 28 mai 10 juin 2016. La figure 3 de gauche montre ces cumuls et la figure 3 de droite montre l'intensité maximale horaire des précipitations pendant l'événement.

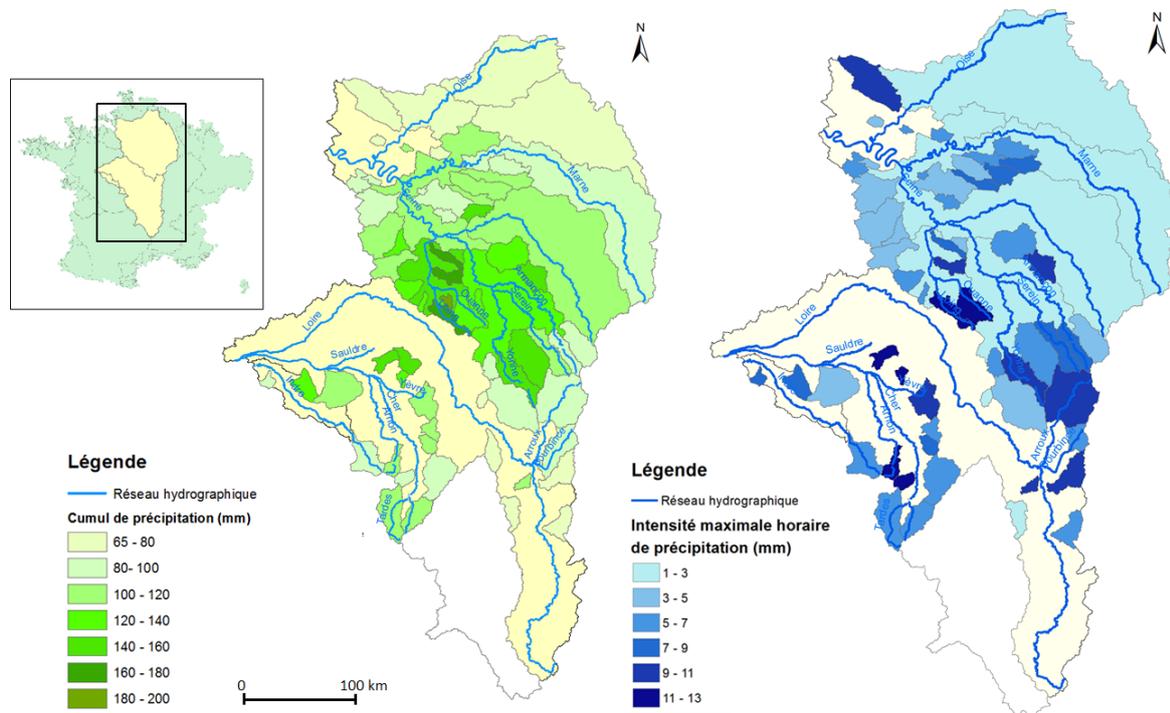


FIGURE 3 – Cumul des précipitations (gauche) et intensité maximale horaire (droite) sur les bassins du SPC LCI et SmYL du 28 mai au 10 juin 2016

La figure 3 montre que les bassins qui enregistrent les plus forts cumuls de précipitations sur cet événement sont bien les mêmes à avoir connus les plus gros dégâts et débordements, à savoir les bassins situés dans le Loiret et la Seine et Marne. Les intensités maximales horaires les plus fortes ne sont pas forcément localisées sur ces bassins, cependant on retrouve des bassins concernés par des précipitations horaires très fortes et probablement prolongées au vu d'un important cumul.

2.1.3 Les débits associés observés

Les chroniques de débits observés, consultables sur des sites tels que la "banque hydro" proviennent des stations de mesures des SPC, et d'autres organismes (syndicats de rivière par exemple) qui surveillent les cours d'eau du territoire. Comme indiqué dans la section "2.2 Prévisions et Vigilances" de ce rapport, les débits observés sont calculés à partir de courbes de tarages, elles même établies grâce à des jaugeages effectués là où sont installées les stations afin de connaître la relation hauteur/débit de la section où est placée la station de mesure hydrométrique.

En crue, la courbe de tarage pour les hauteurs d'eau les plus importantes est souvent interpolée, rendant l'estimation du débit plus incertaine. En effet, les jaugeages en crue sont plus difficiles à effectuer qu'en conditions normales car les sites de jaugeage sont parfois inaccessibles, certaines stations en place peuvent également être immergées, empêchant alors l'acquisition et/ou la transmission de données. De plus, si des débordements du cours d'eau surviennent, la sure-verse devient difficile à prendre en compte dans l'estimation du débit de la

section. Les mesures de débits de crue sont également moins nombreuses, venant du fait qu'il s'agit d'événements exceptionnels donc peu fréquemment observés. Ainsi, les courbes de tarages sont plus incertaines pour les valeurs de forts débits.

Pendant l'évènement les mesures de hauteurs d'eau réalisées sur le terrain n'étaient pas transposables en débit pour les valeurs extrêmes, car les courbes de tarage ne se prolongeaient pas assez ou étaient approximatives. Les données observées de débits pour le SPC SmYL ont été corrigées au cours de ce stage, avec la rectification des courbes de tarage incomplètes. Dans certains cas, les mesures ont néanmoins pu être rapatriées après la crue et la remise en place des équipements de mesure. Le retour d'expérience du SPC SMYL (Brunelle *et al.*, 2016) liste les 15 stations sur lesquelles des problèmes d'acquisitions de données ont été connus.

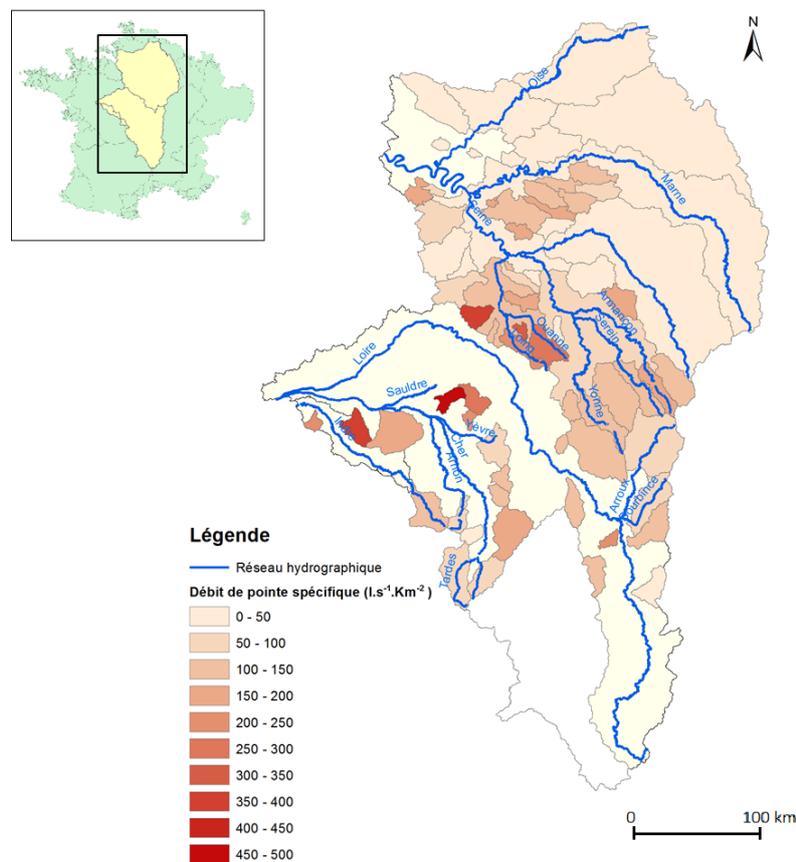


FIGURE 4 – Carte des débits de pointe spécifiques entre le 28 mai et le 11 juin 2016, sur les bassins de la Seine et la Loire

Les débits maximums observés et la date à laquelle ce débit a été enregistré pour chaque bassins sont récapitulés en annexes 5 et 6, tandis que la carte 4 présente les débits de pointe spécifiques de cet événement pour chaque bassin. Les valeurs de débits sont obtenues à partir des données fournies par les SPC et correspondent à une valeur à la station de mesure, pour celles qui sont disponibles. Cette figure 4 montre que les plus forts (jusqu'à $500 l.s^{-1}.km^2$) sont atteints sur les bassins des affluents du Loing, de L'Ouanne et des affluents de la Sauldre.

La carte en figure 5 donne une idée de l'importance du débit maximum pendant cette crue, par bassin, par rapport à leur débit de période de retour 2 ans. Le bassin du Loing ressort sur cette représentation, comme étant le bassin où le débit a été le plus important, avec une valeur de débit de pointe entre 5 et 7 fois plus grande que le débit de période de retour 2 ans, en fonction des sous-bassins.

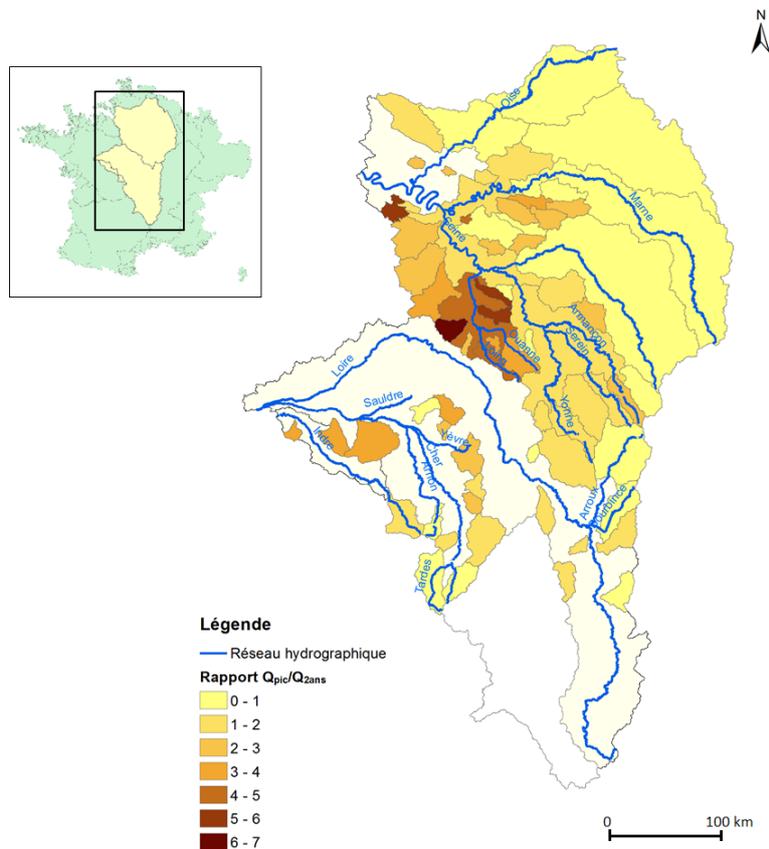


FIGURE 5 – Carte du débit de pointe normalisé par le débit de période de retour deux ans

2.1.4 Les dégâts engendrés

En France, 19 départements ont été concernés par cette crue exceptionnelle. L'état de catastrophe naturelle a été déclaré dans 1500 communes, et les dommages sont considérables dans de nombreux domaines. D'après le rapport "Mission sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine", paru en novembre 2016 (Feuillette *et al.*, 2016), le coût des dégâts liés aux inondations de mai-juin de cette même année est de l'ordre du milliard d'euros, pour plus de 172 000 sinistrés. Cette crue a eu des conséquences économiques et matérielles, mais également humaines, avec 24 blessés et 4 morts. La figure 6 présente quelques photos donnant un aperçu de l'importance des débordements, et de différents secteurs pouvant être impliqués.

- Transports : Les transports et axes routiers et ferroviaires ont été fortement perturbés à cause d'infiltrations d'eau sur les voies. Un millier d'automobilistes ont été bloqués plusieurs heures sur l'autoroute A10 qui est restée bloquée du 1^{er} au 10 juin (Figure 6-3). La réduction des axes accessibles et des lignes de transports en commun fonctionnelles ont mené à des conditions de déplacements chaotiques. Les dégâts et travaux de remise en service ont coûté environ 20 millions d'euros, à l'échelle francilienne (Lettre Méandre n° 52).
- Industries et agriculture : Les pertes économiques sont également très importantes, avec près de 800 industries impactées plus ou moins fortement par la crue, et au total 13 000 entreprises et artisans touchés (Figure 6-5). Concernant le secteur agricole, les pertes s'élèvent à 200 millions d'euros à cause des inondations des cultures (Philippe-Viela, 2016).

- Commerce fluvial : Des dommages au niveau d'infrastructures le long des cours d'eau sont aussi à notifier. La rupture de la digue du canal Briare au niveau de Montcresson figure comme le dégât principal, auquel s'ajoutent quelques autres points de ruptures, notamment en amont de Montargis Marie (2016). Un arrêt total de la navigation pendant une dizaine de jours a porté préjudice aux bateliers, d'autant plus qu'une crise du blé s'est ajouté aux pertes liés à la crue (Duranton et Mougard, 2016).

Au total, le coût de cette crue est estimé entre 800 millions et 1.2 milliards d'euros, tous secteurs confondus.



FIGURE 6 – Quelques photos prises pendant la crue de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire
Chambord¹ ; Paris² ; Orléans³ ; Saint-Mammès⁴ ; Episy⁵ ; Saint-Mammès⁶.

-
1. Château de Chambord (Libération, 2016)
 2. Paris (FranceTVInfo, 2016)
 3. Autoroute A10 à Orléans (InfoClimat, 2016)
 4. Loing à Saint-Mammès (Photo C.Vrignaud)
 5. Loing à Episy (Photo C.Vrignaud)
 6. Confluence Seine-Loire à Saint-Mammès (Photo C.Vrignaud)

2.1.5 Conclusions sur l'événement observé

L'événement de crue survenu en fin de printemps 2016 a été exceptionnel en termes de cumuls de précipitations enregistrés, avec des périodes de retour de 50 ans et même 100 ans localement (Hir, 2016). On y associe des débits de période de retour de plus de 500 ans sur le Loing (station d'Épisy) et plus de centennal à d'autres stations hydrométriques sur les bassins du SPC SmYL. Les débordements conséquents associés à ces débits importants font de cette crue un événement de grande ampleur, et également de par le fait que les intempéries ont provoqué des dégâts dans plus de 2000 communes, dans 19 départements différents (Ramos *et al.*, 2017).

2.2 Prévisions et vigilances

2.2.1 Les prévisions hydrologiques

La prévision des crues est une pratique qui consiste à estimer un débit futur, en fonction de données hydro-météorologiques, à l'aide de modèles informatiques. Ces modèles visent à estimer le débit d'un cours d'eau dans le but de prévoir la montée des eaux en termes de hauteur et de vitesse de montée de crue, afin d'engager par la suite les actions nécessaires à la protection des biens et des personnes potentiellement mis en danger par un débordement de cours d'eau.

Pour effectuer une prévision il faut des données d'entrée du modèle, essentiellement des prévisions de précipitations, fournies par Météo-France, et également des données de débits, si les bassins d'intérêts sont jaugés. C'est le cas des bassins sur lesquels la crue de 2016 a été observée (pour les principaux cours d'eau sur lesquels les SPC fournissent une vigilance). Dans ce cas, le débit peut être prévu avec une connaissance de l'état du cours d'eau au moment du lancement de la prévision, c'est l'assimilation de débit. Les cours d'eau jaugés sont équipés de capteurs, de différents types (radar, bulle) et transmettent l'information sur la hauteur d'eau, interprétée par la suite via les courbes de tarage qui donne la relation hauteur/débit à chaque station de mesure. C'est lors d'événements extrêmes que cette relation devient la plus délicate, car les débits les plus forts sont rarement voir jamais observés. C'est alors une interpolation plus ou moins juste, basé sur un faible nombre d'observations, qui donne une estimation de débit en fonction de la hauteur d'eau.

2.2.2 La vigilance en France

La France s'est tout d'abord dotée de services d'annonces des crues dès 1847, avant d'orienter ces services vers la prévision des crues (SPC) en 2003. Les 52 services d'annonces sont regroupés en 19 SPC, couvrants des bassins hydrologiques assez grands pour réaliser des prévisions cohérentes sur les grands cours d'eau, en prenant en compte les affluents également. Les SPC sont alors chargés de l'organisation de la surveillance, la prévision, et la transmission de l'information vers les préfetures qui sont sur leur zone d'influence. Les SPC travaillent notamment avec les services de Météo-France, de qui ils obtiennent les prévisions de précipitations, essentielles à la réalisation de prévisions hydrométriques (Wikipédia, 2017).

La vigilance, telle qu'elle est utilisée aujourd'hui, se décline en quatre couleurs :

- Vert : Pas de vigilance particulière requise
- Jaune : Risque de crue génératrice de débordements et de dommages localisés ou de montée rapide et dangereuse des eaux, nécessitant une vigilance particulière notamment dans le cas d'activités exposées et/ou saisonnières
- Orange : Risque de crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes
- Rouge : Risque de crue majeure. Menace directe et généralisée de la sécurité des personnes et des biens

Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, SCHAPI, anime l'ensemble des SPC et est en charge de la diffusion des vigilances. Pour communiquer l'information concernant les risques de crues au grand public, le service Vigicrues est mis en place par l'état en 2015, permettant ainsi à n'importe qui d'avoir accès aux vigilances fournies par les SPC, via un site internet. Les SPC sont responsables de la réalisation des prévisions hydrologiques, qu'ils communiquent au SCHAPI, qui va relayer les informations aux autorités compétentes. Ce sont après les élus des communes qui sont en charge du déclenchement des plans d'actions relatifs à leur circonscription, adapté au niveau de vigilance annoncé.

Lors de la crue de mai-juin 2016, les secteurs sous la responsabilité de deux SPC ont été particulièrement touché : celui du SPC Seine moyenne, Yonne, Loing (SmYL) et celui du SPC Loire, Cher, Indre (LCI). Les deux fiches présentées en annexes 1 et 2 présentent ces deux SPC, et le territoire qu'ils surveillent respectivement.

D'après le Rapport de retour d'expérience rédigé par le SPC SmYL, paru en octobre 2016 (Brunelle *et al.*, 2016), le principe de vigilance crue n'est pas très bien compris, et des amalgames sont fait avec les prévisions météorologiques. Ce même rapport annonce que "Les retours du public et des collectivités suite à la crue démontrent une certaine méconnaissance de la vigilance crues et du principe de vigilance intégrée". En effet les prévisions météorologiques comme hydrologiques utilisent le code couleur vert, jaune, orange, rouge, avec une vigilance et des risques associés croissants avec le passage du vert vers le rouge. Cependant, les informations relayées sont différentes, et bien que la prévision hydrologique soit liée aux conditions météorologiques, il n'existe pas de relation simple entre les deux. La vigilance météorologique peut par exemple être faible un jour, mais entraîner une vigilance forte du point de vu hydrologique.

2.2.3 Les vigilances crues lors de la crue de mai-juin 2016

Lors de l'événement, les SPCs, actifs 24h/24h, ont déclenché les vigilances (passage de couleur jaune, orange, rouge) au fur et à mesure de la montée des eaux. Les tables en annexes 4 et 5 résument les couleurs associées à chaque bassin, et la date de passage de la vigilance. On note que sur le territoire de surveillance du SPC SMYL, seul un bassin est resté en vert (pas d'inondation) et trois sur le territoire du SPC LCI. La figure 7 montre la répartition spatiale et temporelle des passages de vigilance orange et rouge entre le 30 mai 2016, passage de la première vigilance orange, et le 04 juin 2016, déclenchement de la dernière vigilance orange.

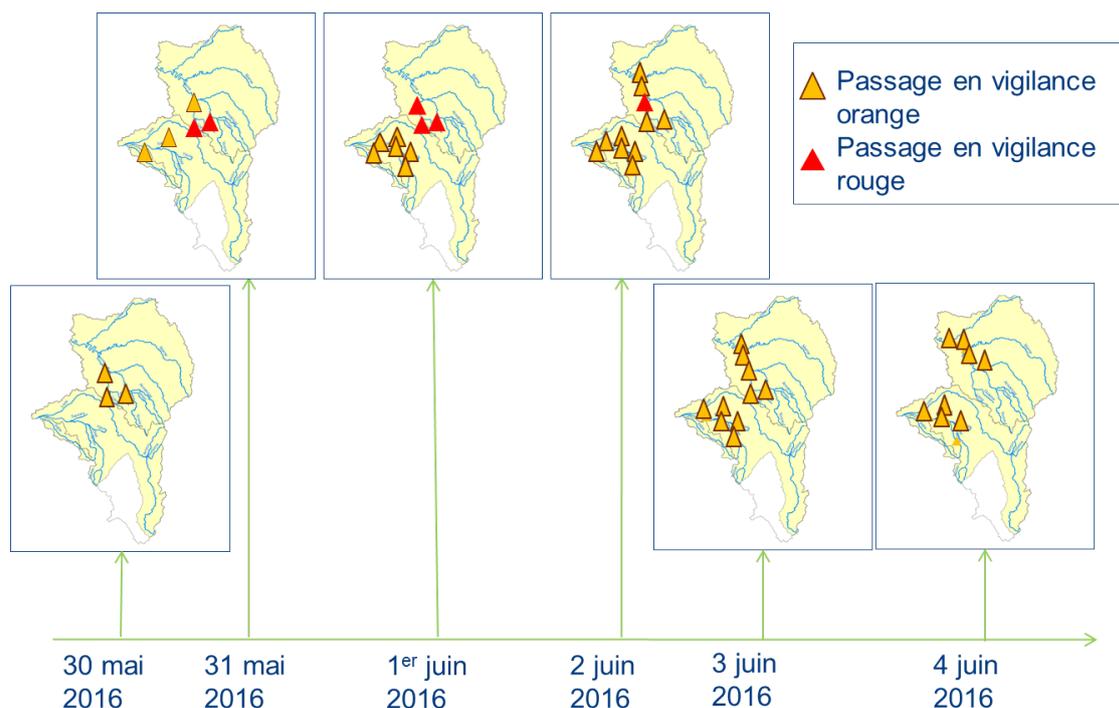


FIGURE 7 – Calendrier des vigilances rouges et oranges, entre le 30 mai et le 04 juin 2016, sur les bassins de la Seine et de la Loire

Cette figure 7, ainsi que les tableaux récapitulatifs en annexes 3 et 4 montrent que jusqu'à 11 bassins ont été placés simultanément en vigilance orange et rouge, sur environ un tiers de la surface totale que représente les deux SPC.

2.2.4 Conclusions sur la prévision des crues

La pratique de prévision des crues est en constante évolution depuis la création des premiers services dédiés à la surveillance des cours d'eau. Il est essentiel de continuer à acquérir des connaissances sur les systèmes complexes de bassins versants, afin de pouvoir réagir de manière adéquate si un phénomène tel que celui de 2016 se produit de nouveau.

3 Le modèle GRP et les données utilisées

Afin d'étudier la qualité des prévisions faites pendant l'événement de crue de mai-juin 2016, le modèle GRP et les différentes données mises à disposition par les SPC, Météo France et Irstea Aix sont décrits dans cette partie.

3.1 L'outil : Le modèle de prévision des crues GRP

La prévision des crues est une pratique qui requiert l'utilisation de modèles, pour aider les SPCs dans leur prise de décisions vis à vis de phénomènes tel que celui observé au printemps 2016. Ces modèles sont en permanence évalués et améliorés, afin de tendre vers la meilleure prévision possible, tout en sachant que la prévision parfaite n'existe pas. Dans ce rapport, ce sont les performances du modèle de prévisions de Génie Rural pour la Prévision, GRP, développé à Irstea, dont les performances sont évaluées, vis-à-vis de l'événement de crue survenu au printemps 2016, sur les bassins de la Seine et de la Loire. Il s'agit d'une analyse sur une courte période (du 28 mai au 11 juin, soit 14 jours), et sur 102 bassins concernés par cette crue.

3.1.1 Structure du modèle

Le modèle de prévision des crues GRP est un modèle hydrologique global, qui dérive des modèles GR, également développés à l'Irstea. Il fonctionne à pas de temps horaire, avec une structure à trois réservoirs comme le montre la figure 8 :

- Le module d'accumulation et de fonte de la neige : Module permettant de séparer les précipitations liquides et solides pour les bassins influencés par la neige. Dans le cas des bassins et de l'événement étudié, il n'y a pas d'utilisation de ce module appelé CemaNeige.
- Le module de production qui est constitué par :
 - . L'interception des précipitations par l'évapotranspiration potentielle
 - . Le réservoir de production qui permet de transformer les précipitations en pluie efficace, et qui a une capacité fixée à 275 mm
 - . Le paramètre CORR, qui permet un ajustement volumétrique de la pluie efficace en fonction de chaque bassin
- Le module de transfert : composé d'un hydrogramme unitaire et d'un réservoir de routage

Le modèle de prévision GRP est utilisable en simulation, comme les autres modèles GR, mais aussi en mode prévision. Dans ce cas, le modèle assimile les données de débits observés, pour mettre à jour le réservoir de routage et ainsi donner un débit de début de prévision égal au dernier débit observé. Il y a aussi l'exploitation de l'erreur antérieure qui peut se faire de deux manières : soit par une correction de type autorégressive (méthode Tangara), soit par un réseau de neurones artificiels (méthode RNA). Dans le cas de la méthode Tangara, on calcule le ratio entre le débit observé et le débit prévu à 1 pas de temps de la dernière prévision, élevé à la puissance 0,45. Les débits prévus aux pas de temps futurs sont ensuite multipliés par ce coefficient correctif. La méthode RNA prend en entrée : le débit observé à l'instant t et les erreurs additives aux pas de temps $t-1$ et t , où t est le dernier pas de temps avant l'instant de prévision (IRSTEA, 2017).

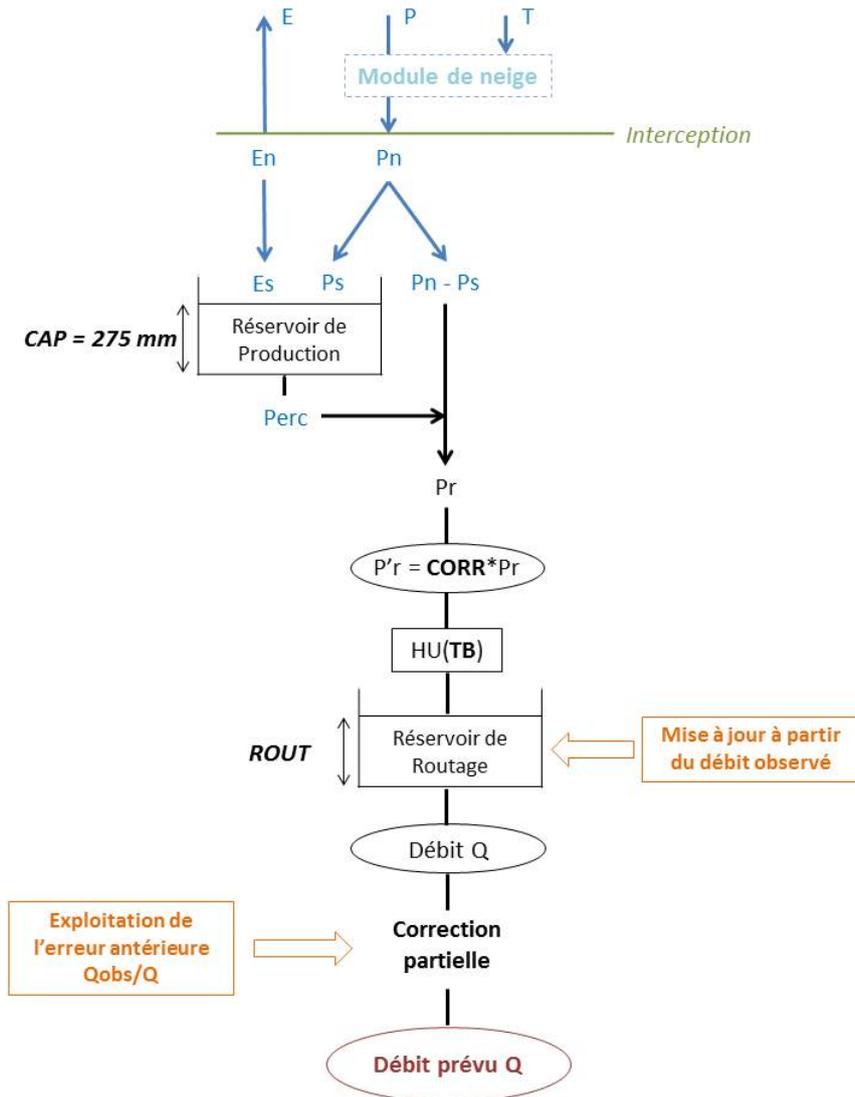


FIGURE 8 – Structure du modèle GRP. Source : IRSTEA (2017)

3.1.2 Les paramètres du modèle

Le modèle GRP possède trois paramètres libres qui sont fixés pour chaque bassin :

- CORR (sans unité) : un coefficient d'ajustement de la pluie efficace qui permet un ajustement du bilan du modèle
- TB (h) : le temps de base de l'hydrogramme unitaire qui influence le temps de réponse du bassin
- ROUT (mm) : la capacité du réservoir de routage, qui correspond au maximum de capacité du réservoir à la fin du pas de temps.

Dans le cadre de cette étude, les valeurs de ces paramètres sont celles déterminées par les SPCs et n'ont pas été modifiées, bien que cela puisse être une piste pour d'éventuelles améliorations sur des bassins où les prévisions sont peu satisfaisantes.

Le modèle possède également des paramètres fixes, dont la capacité du réservoir de production CAP, calé à 275 mm. Ce pourrait aussi être un paramètre à modifier pour certains bassins, mais cela impliquerait un nouveau paramètre à caler pour chaque bassin. Ces modifications possibles du modèle ne font pas l'objet de ce travail.

3.1.3 L'utilisation de GRP en temps réel et temps différé

Ce modèle de prévision peut être utilisé en temps réel par les services de l'état qui sont en charge de la prévision des crues, mais aussi en temps différé, afin de rejouer un événement observé et d'analyser les prévisions produites par le modèle *a posteriori*, par ces mêmes services opérationnels, mais aussi par d'autres services, dont l'Irstea, qui a développé et amélioré ce modèle. Ce rejeu peut être effectué avec les données utilisées en temps réel, mais aussi avec d'autres données de précipitations, de débits, ou encore des paramétrisations différentes. Dans cette étude, ce sont plusieurs données de précipitations observées et prévues qui sont fournies en entrée de modèle. Elles seront listées en détail dans la partie "3.2 Les données" de ce rapport.

L'utilisation du modèle en mode "temps différé" permet de comparer ce qui a été prévu pendant la gestion de crise, avec les prévisions qui pourraient être faites avec d'autres données d'entrée, et de mesurer l'impact de ces données sur la qualité des sorties du modèle. Le temps différé fonctionne comme le temps réel, sauf que l'on choisit la date de la prévision que l'on veut effectuer. Pour cette étude, le modèle a été lancé entre le 28 mai à 5h et le 11 juin à 23h, à pas de temps horaire, soit 348 initialisations pour l'analyse de cet événement.

Le modèle GRP étant un modèle continu, il nécessite une période de mise en route pour que les réservoirs décrits à la section "3.1.1 Structure du modèle" soit mis à jour et mis au bon état initial pour la période désirée. Cela requiert au moins un an de données de pluie et d'ETP précédant les instants de prévisions qui veulent être rejoués.

3.2 Les données

Pour étudier le rejeu de la prévision de la crue de mai-juin 2016 sur les bassins des SPC SmYL et LCI, les données d'entrées utilisées dans cette étude sont à la fois des données observées qui rendent compte de la réalité de l'événement et de données prévues, qui permettent de refaire des prévisions comme en situation de gestion de crise. Les données d'entrées du modèle GRP dans cette étude sont celles de débit observé, pour l'assimilation du débit antérieur, et des données de pluies, prévues et observées.

3.2.1 Les données observées de précipitations

Les données de pluies observées proviennent des mesures des postes pluviométriques des SPC, interpolées en pluies de bassin pour les besoins de mise en forme des données d'entrée de GRP. Ces pluies observées servent en premier lieu à la mise à jour des états internes du modèle avant l'instant de prévision. Dans le cadre d'un rejeu d'événement, ces pluies sont utilisées comme pluie "parfaitement connues", pour évaluer la qualité du modèle en s'affranchissant autant que possible des biais apportés par des prévisions de précipitations. Cependant, comme la donnée de pluie observée provient de mesures ponctuelles de pluviomètres, il existe toujours des incertitudes liées à ces mesures physiques, ce qui peut expliquer que la valeur ne soit pas représentative de l'ensemble de la précipitation du bassin dans tout les cas.

3.2.2 Les données observées de débits

Les données de débit observées proviennent de mesures aux stations hydrométriques des SPC. Ce sont des mesures de hauteurs d'eau qui sont ensuite traduites en débits via des courbes de tarage, qui sont faites et mises à jour par les SPCs. Lors de la crue du printemps 2016, des débits extrêmes jamais observés ont été enregistrés sur certains cours d'eau, tels que le Loing, ce qui a entraîné une difficulté à obtenir des estimations de débits réalistes à la fois pendant la crue mais également tant que les courbes de tarage n'avaient pas été recalculées.

Les débits réévalués avec les nouvelles relations hauteur/débit sont disponibles sur le site de la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>). Ce sont les débits fournis par les SPCs qui ont dans un premier temps été utilisés dans cette étude, puis les débits recalculés ont été récupérés sur la Banque Hydro pour les bassins du SPC SmYL, ceux du SPC LCI étant les débits corrigés disponibles dès le début de ce stage.

3.2.3 Les données prévues de précipitations

En conditions opérationnelles, les prévisionnistes disposent uniquement de prévisions de précipitations pour réaliser les prévisions de débit. Ainsi, pour visualiser des débits prévus aussi proches que possible de ceux obtenus pendant la crue de mai-juin 2016, nous avons utilisé plusieurs données d'entrées de précipitations issues de différents modèles :

- Bulletins de Prévision (BP) : Météo-France fourni aux SPCs des bulletins de prévision avec les valeurs minimales, moyennes et maximum de précipitations prévues pour une date et les bassins du service concerné. C'est par le biais des SPC que les BP ont été obtenus.
- AROME-PI (Demargne et Javelle, 2017) : Le modèle est régional, et couvre la France métropolitaine, avec des mailles de 1,3 km². Il fournit des prévisions immédiates par modélisation des convections avec une actualisation horaire. Les prévisions AROME-PI utilisés dans cette étude ont été fournis par Météo-France à Irstea Aix-en-Provence. Il s'agit de prévisions déterministes à une échéance de 6h, avec un seul membre couvrant les 6h (Demargne et Javelle, 2017).

Les données AROME-PI obtenues pour l'événement couvrent la période du 28 mai 2016 à 6h au 11 juin à 23h, soit 348 instants de prévision. Les bulletins de prévisions couvrent la même période, mais ne sont pas des prévisions actualisées à toutes les heures. Du 28 mai au 1^{er} juin trois BP par jour ont été récupérés, à 6h, 12h et 18h, puis 1 à 2 BP par jour jusqu'au 11 juin 2016, chaque BP prévoyant les précipitations jusqu'à +64h.

Les données de précipitations observées sont comparées à celles prévues uniquement par tracé de nuage de points. L'idée est simplement d'estimer si les prévisions de débits analysées plus loin dans ce rapport sont déjà biaisées par les prévisions de précipitations insérées en entrée du modèle.

Les données de pluie observées disponibles sur toute la chronique et tous les bassins sont d'abord comparées aux pluies AROME-PI sur les six heures de prévisions disponibles, à chaque instant de prévision, et pour 35 bassins sur lesquelles les données AROME-PI ont été récupérées et traitées.

On peut observer des exemples de comparaisons de pluies observées et prévues avec AROME-PI sur les graphiques en nuages de points, en figure 9. On voit que les prévisions ne sont pas identiques, mais relativement groupées autour de l'origine. Une telle comparaison n'exclue pas que les prévisions soient bonnes en valeur mais simplement décalées de une heure par exemple. Elle ne permet qu'une comparaison valeur par valeur, sans marge d'erreur temporelle possible, mais la figure montre une légère sous-estimation des prévisions. De plus, le rapport de J.Demargne (Demargne et Javelle, 2017) annonce que les prévisions AROME-PI ont plutôt tendance à sous-estimer les précipitations, ce qui confirme ce qui semble se dessiner sur la figure 9.

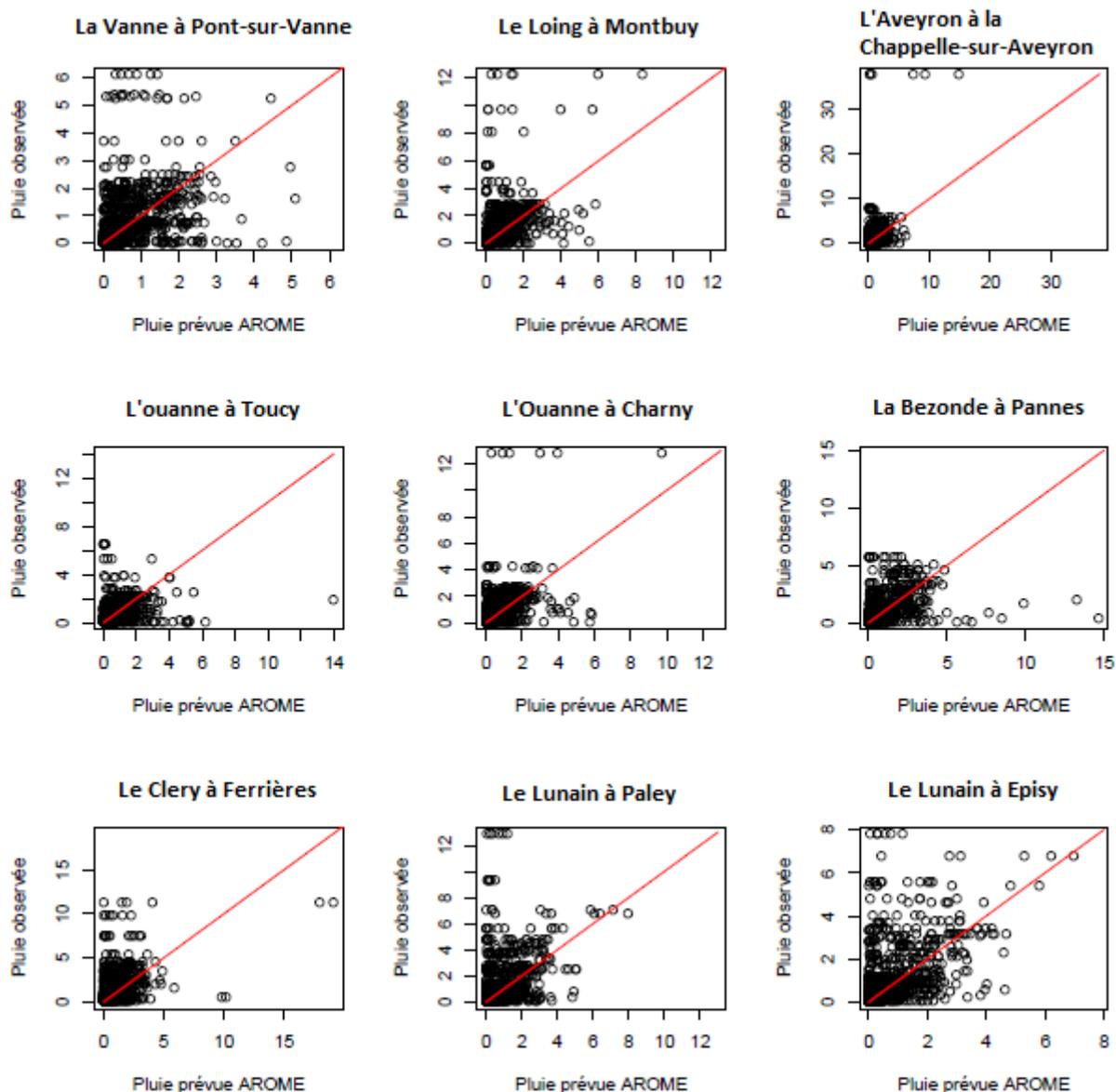


FIGURE 9 – Comparaison de pluie observée et pluie prévue (en mm/h) avec AROME-PI sur quelques bassins du SPC SmYL

Dans un second temps, c'est la comparaison entre pluies prévues avec les bulletins de prévisions et pluies observées qui est regardée. De la même manière, seuls quelques bassins sont présentés ici, échantillonnés parmi les bassins de la Seine, le SPC SmYL ayant transmis des bulletins de prévisions facilement exploitables pour une mise en entrée de modèle. On réalise la comparaison sur les six premières heures de prévisions, avec le bulletin de prévision moyen, afin d'être à la même échéance que pour les pluies AROME-PI.

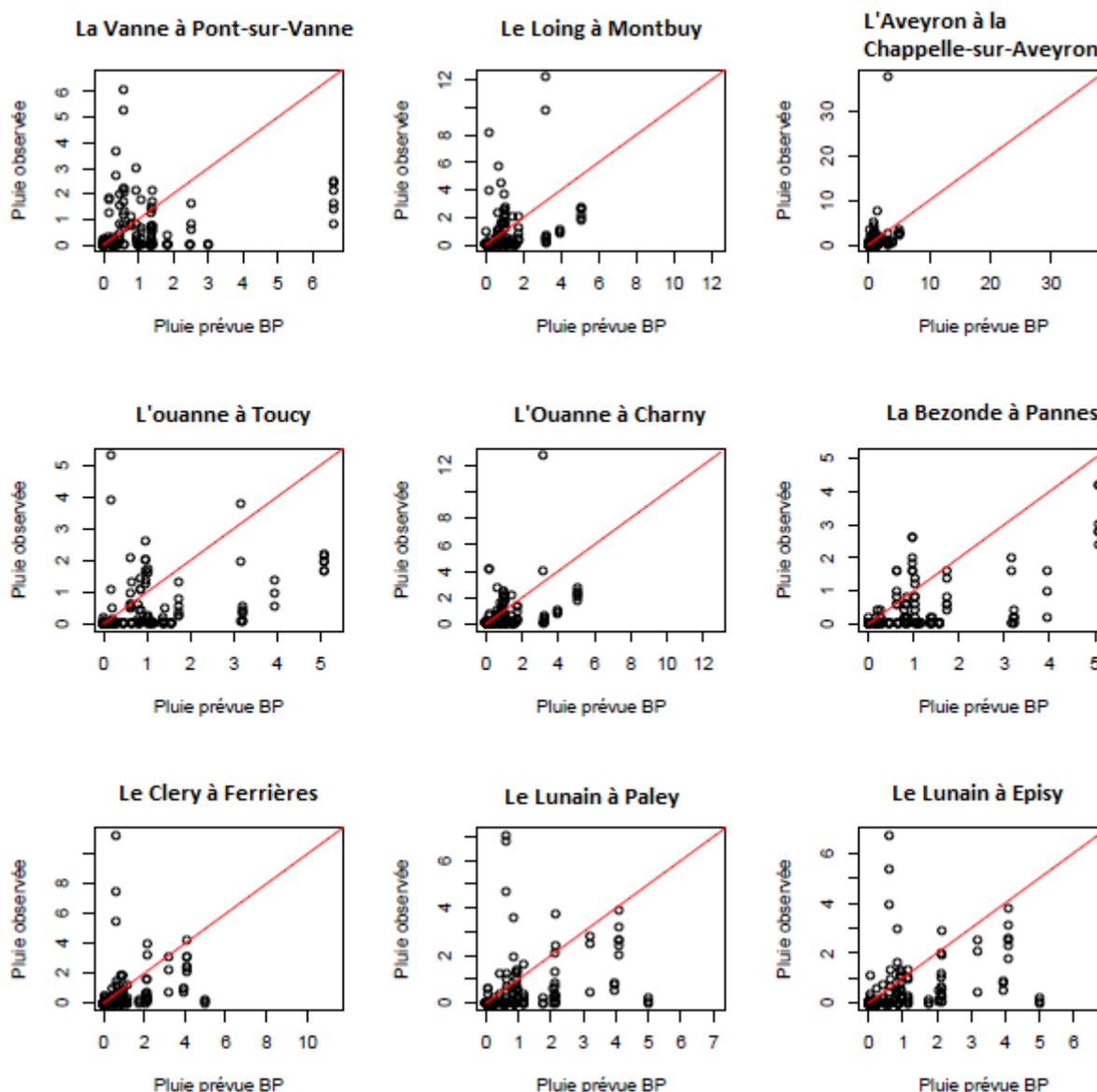


FIGURE 10 – Comparaison de pluie observée et pluie prévue avec les BP moyens (en mm/h) sur quelques bassins du SPC SmYL

Il y a moins de points de comparaison avec les bulletins de prévisions, pour lesquels il y a 32 instants de prévisions, répartis de façon non régulière du 28 mai au 11 juin 2016. Malgré tout, la comparaison entre pluie observée et prévue par les bulletins de prévisions (ici c'est le bulletin de prévision moyen uniquement qui a été regardé), visible en figure 10, semble montrer que la prévision est moins bonne qu'avec les pluies AROME-PI. Les pluies du bulletin de prévision moyen à chaque instant de prévision sont surestimées par rapport à la pluie observée.

3.3 Méthodes d'évaluation du modèle

Afin de déterminer la qualité des prévisions avec les différentes données d'entrée disponibles, plusieurs méthodes d'analyse et différents scores ont été employés.

3.3.1 Les différences entre maximum en débit et en temps

Dans un premier temps une analyse sur les valeurs de débits de pointe prévus et observés a été effectuée. La valeur de pointe uniquement est regardée, il n'y a pas de marge temporelle ou

volumique prise en compte autour de cette valeur. C'est une comparaison entre valeurs précises qui est effectuée. Pour cette valeur de débit de pointe, les décalages temporel et volumique sont relevés, comme le présente la figure 11.

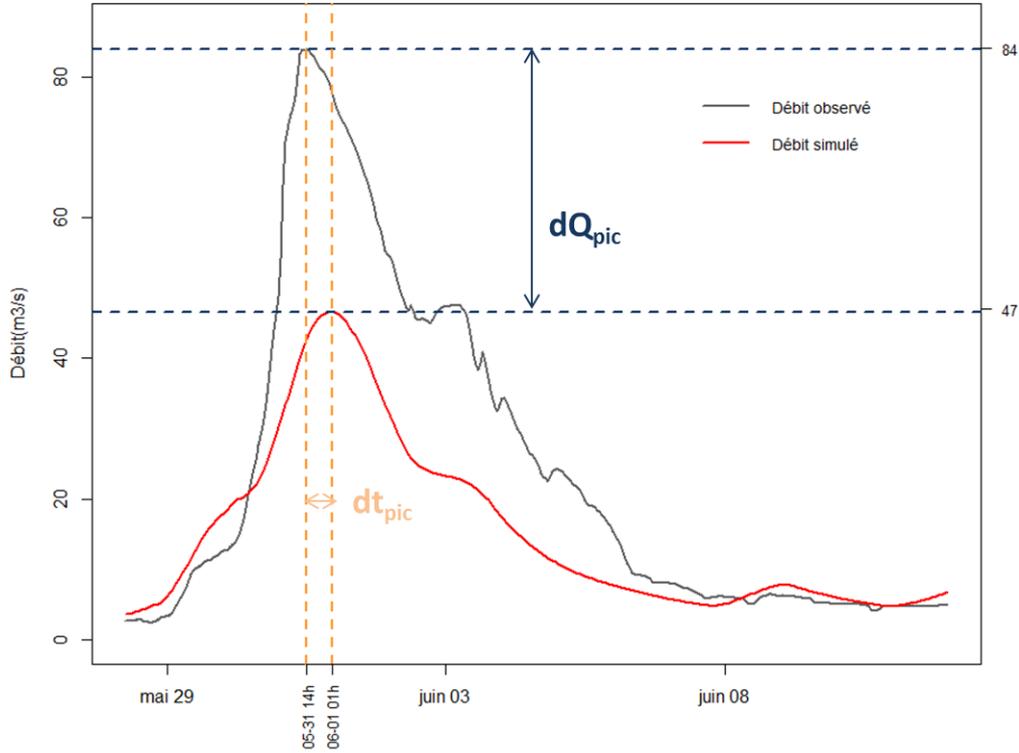


FIGURE 11 – Différence temporelle (dt) et différence volumique (dQ) entre le débit observé et le débit simulé de pointe sur le bassin du Loing à Montbouy

Les résultats de cette analyse permettent de séparer les prévisions (avec tout les produits de pluie) selon quatre critères :

- Sous-estimation du débit
- Surestimation du débit
- Retard par rapport à l'observation(h)
- Avance par rapport à l'observation(h)

3.3.2 Mean Absolute Error (MAE)

Le score de type MAE permet une comparaison simple entre les observations et prévisions d'après l'équation 1. Il s'agit de la moyenne des erreurs sur l'ensemble de la chronique.

$$\frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs(i)} - Q_{prev(i)}|}{N} \quad (1)$$

3.3.3 Kling Gupta Efficiency (KGE)

Un autre score utilisé pour mesurer la performance du modèle est le KGE, formulé selon l'équation 2.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2)$$

Avec les paramètres :

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sqrt{(F - \bar{F})(O - \bar{O})}}{\sqrt{(F - \bar{F})^2} \sqrt{(O - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

Le paramètre α (équation 3) et le paramètre β (équation 4) peuvent être regardés pour savoir si le modèle a tendance à sous-estimer ou surestimer la prévision par rapport à l'observation.

3.3.4 Les tableaux de contingence

Les tableaux de contingence sont une autre façon d'estimer la qualité d'une prévision. Le principe est exposé dans le tableau 1. Ce tableau de contingence est basé sur des dépassements de seuils, calculés comme étant les deux tiers du débit de pointe du bassin pour cet événement de crue. L'idée ici n'est pas de voir si on se trouve au dessus ou en dessous d'un seuil pour quantifier la gravité de l'évènement, comme le font les SPCs avec les seuils de vigilance (jaune, orange et rouge), mais bien d'évaluer la performance du modèle et de comparer les observations aux prévisions.

		événement observé	
		oui	non
événement prévu	oui	succès	fausse alerte
	non	alerte manquée	rejet correct

Tableau 1 – Principe du tableau de contingence

A ce tableau de contingence on associe des scores de valeurs allant de 0 à 1 :

- Le FAR : Taux de fausses alertes :

$$FAR = \frac{fausses\ alertes}{succès + fausses\ alertes} \quad (6)$$

- Le POD : Probabilité de détection

$$POD = \frac{succès}{succès + alertes\ manquées} \quad (7)$$

- Le CSI : Indice critique de succès

$$CSI = \frac{succès}{succès + alertes\ manquées + fausses\ alertes} \quad (8)$$

- Le BIAS :

$$BIAS = \frac{succès + fausses\ alertes}{succès + alertes\ manquées} \quad (9)$$

Chacun de ces scores donne une idée de la qualité du modèle, en indiquant si les prévisions ont plutôt tendance à être des fausses alertes (FAR, équation 6), à être bien prévues (POD, équation 7 et CSI, équation 8), ou encore si la prévision sous-estime ou surestime d'avantage le débit avec le calcul de BIAS (équation 9).

4 Les résultats

Les résultats de prévisions de débit par le modèle GRP, avec les différentes données d'entrées exposées précédemment sont analysés avec les scores décrits.

Ce travail d'analyse des prévisions se décompose en plusieurs parties. Dans un premier temps on regarde les résultats de simulation, après on analyse les prévisions avec pluie observée, puis celles avec les pluies prévues (AROME-PI et BP) pour enfin faire une comparaison de toutes ces sorties du modèle GRP.

4.1 Les débits simulés par le modèle GRP

La simulation de débit est calculée avec les pluies observées en entrée, et ne réalise pas d'assimilation du débit antérieur. Elle donne alors des informations sur la performance du modèle en lui même, sans insérer de biais liés aux prévisions de précipitations, ou d'ajustement par le débit observé au pas de temps précédent. La simulation peut être réalisée sur l'ensemble de la chronique, sans échéance à prendre en compte.

La figure 12 montre l'exemple d'une simulation sur l'ensemble de l'événement, sur le bassin du Cousin à Avallon. Sur cet hydrogramme la simulation sous-estime le débit sur l'ensemble de l'événement. C'est le cas pour 56% des bassins du SPC LCI et pour 94% des bassins du SPC SmYL. Le reste des cas, pour lesquels les simulations sont semblables ou légèrement supérieures aux observations, correspondent à des bassins avec des débits assez faibles (maximum $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

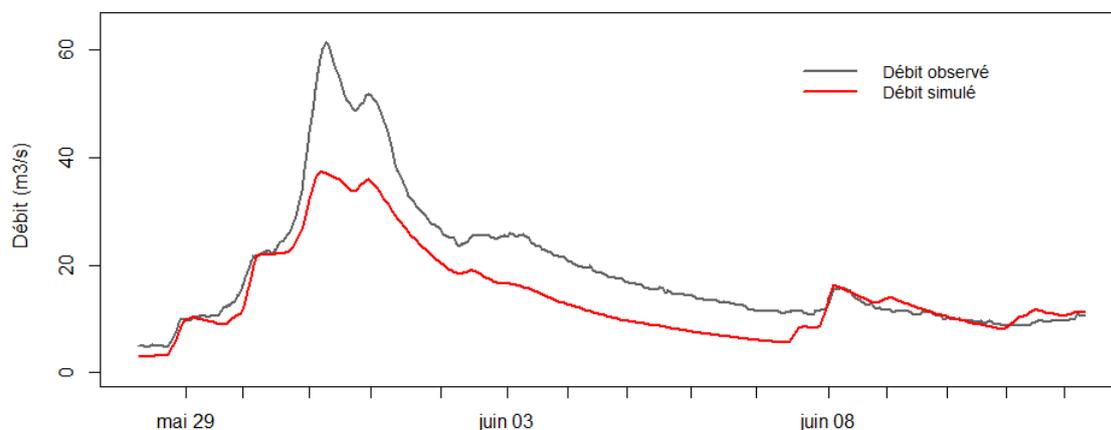


FIGURE 12 – Débit observé et simulé du 28 mai au 11 juin 2016 sur le bassin du Cousin, mesuré à la station d'Avallon

La carte en figure 13, montre la répartition de la qualité de la simulation sur l'ensemble des bassins de l'étude, en terme de décalage temporel et de magnitude de débit de pointe, entre le débit observé et simulé.

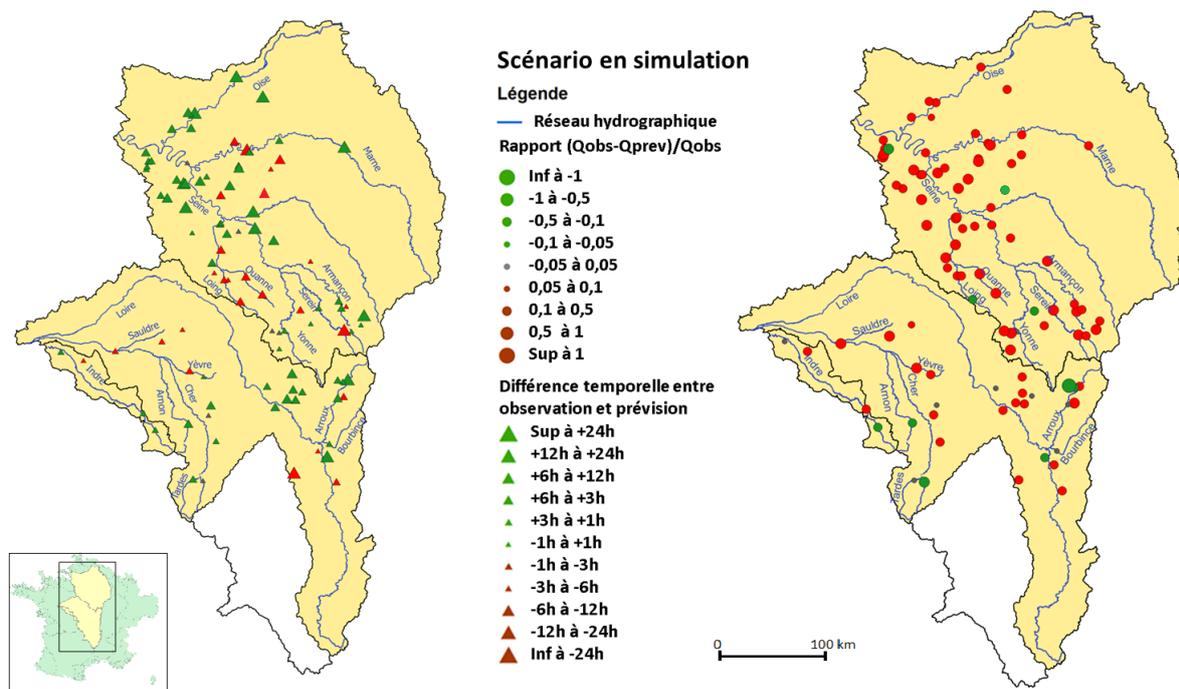


FIGURE 13 – Carte de différences temporelle (figure de gauche) et de magnitude (figure de droite) de débit de pointe, entre débit observé et débit simulé pour l'événement de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire

Les simulations qui sous-estiment fortement le débit sont localisées sur des bassins où les débordements ont été exceptionnels pendant l'événement, comme on le constate à la confluence du Loing et de la Seine. L'exemple le plus important de débordement est celui du Loing à Episy, avec un débit de pointe enregistré pour cet événement de presque $500\text{m}^3/\text{s}$ contre environ $25\text{m}^3/\text{s}$ en moyenne habituellement à cette époque de l'année (Banque Hydro).

Sur les grands bassins, dont il est difficile de prévoir la dynamique car les temps de réaction sont longs (plusieurs jours voir semaines), les décalages en temps entre débit de pointe observé et prévu est plus important que le décalage en magnitude de débit de pointe. En effet, les paramètres libres du modèles sont ajustés pour chaque bassin, mais lorsque le temps de réaction est trop élevé, on constate que la prévision montre un pic de crue moins étalé que l'observation. Cela est valable pour les grands bassins, comme celui de la Seine à Paris.

4.2 Les prévisions de débits avec pluie observée : effet de l'assimilation du dernier débit observé avant la prévision

Les résultats de prévisions avec la pluie observée en entrée et assimilation du débit antérieur donne une idée de la performance du modèle GRP, sans ajouter de biais liés aux incertitudes de prévisions de pluie, mais en prenant en compte un état du bassin mis à jour.

Un des problèmes de la modélisation est la dégradation des prévisions avec l'augmentation de l'échéance. En effet on constate que les prévisions sont moins bonnes (en temps et/ou en débit) plus l'échéance est grande. La figure 14 montre ce phénomène. Ce n'est cependant pas un cas général, certains bassins sont moins soumis à cette dégradation de la prévision.

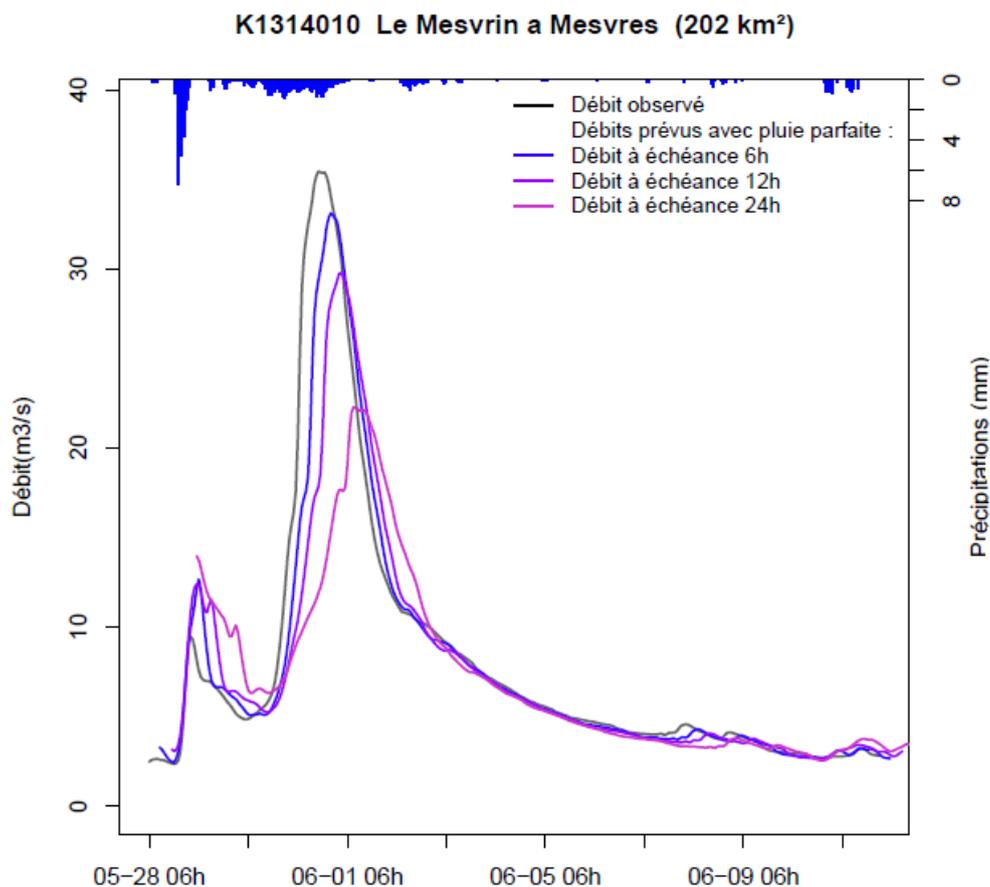


FIGURE 14 – Dégradation des prévisions avec augmentation de l'échéance, exemple du Mesvrin à la station de Mesvres

Les cartes 15, 16 et 17 montrent également cet impact d'une augmentation de l'échéance avec une dégradation visible des prévisions. Les prévisions de débit sont majoritairement meilleures sur les bassins de la Loire que de la Seine, comme dans le cas avec les résultats de simulation. Sur les cartes 15, 16 et 17 les surestimations du débit de pointe prévu par rapport au débit observé, en terme de magnitude de débit, sont représentés par des ronds verts. Les ronds rouge correspondent à un débit de pointe prévu sous-estimé. Concernant les différences temporelles de débit de pointe, elles sont représentées sur les mêmes cartes par des triangles verts si la prévision est en avance sur l'observation, et en rouge si la prévisions est en retard. Sur la grande majorité des bassins, la prévisions avec pluie observée sous-estime le débit de pointe par rapport à l'observation, et la sous-estimation est d'autant plus importante que l'échéance est grande. Les prévisions sont légèrement moins sous-estimées sur les bassins de la Loire que ceux de la Seine, mais reste tout de même dans une même tendance.

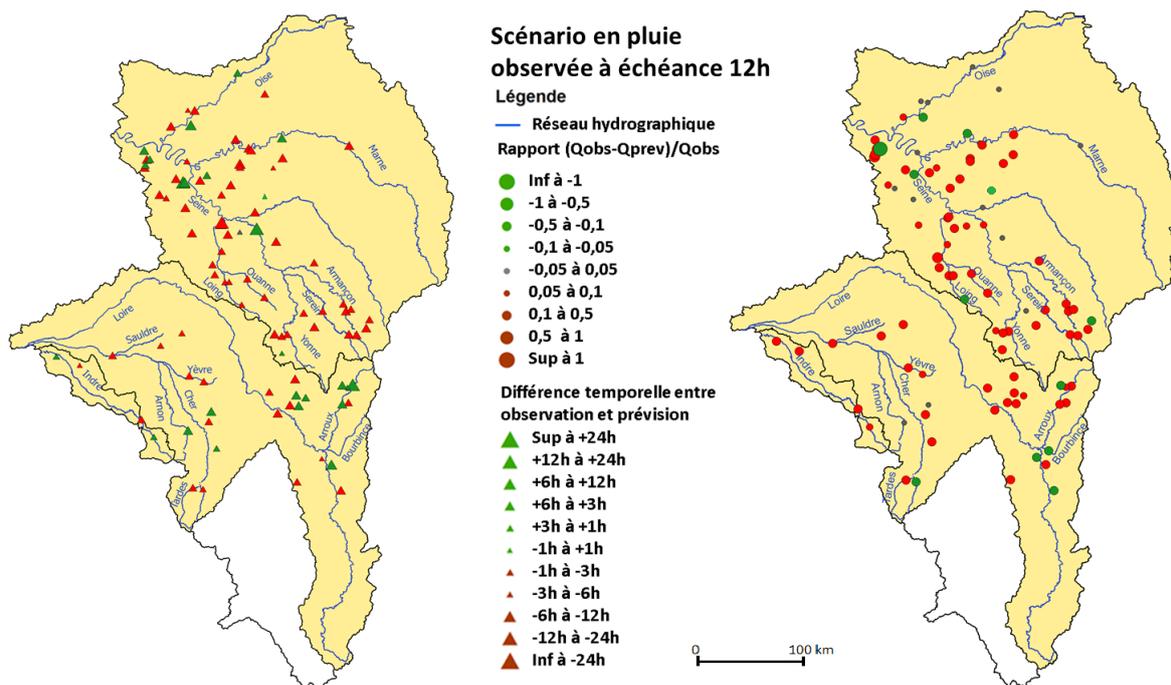


FIGURE 15 – Carte de différences temporelle (figure de gauche) et de magnitude (figure de droite) de débit de pointe, entre débit observé et débit prévu avec la pluie observée, à échéance 12 heures, sur l'événement de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire

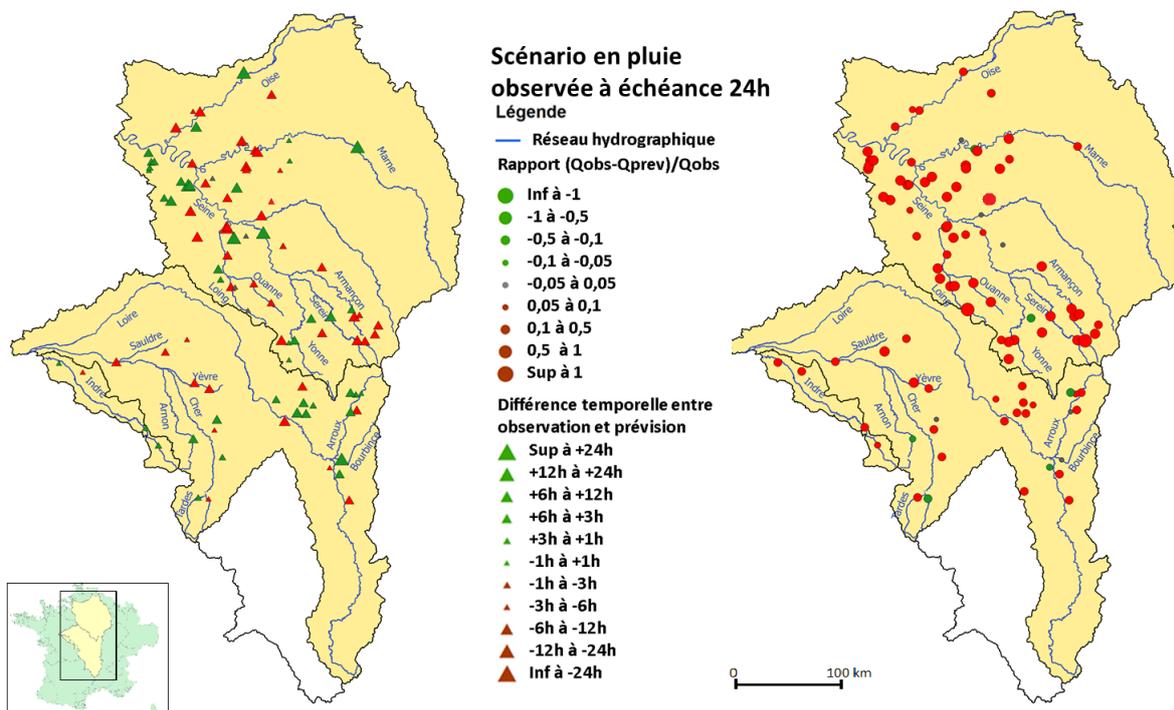


FIGURE 16 – Carte de différences temporelle (figure de gauche) et de magnitude (figure de droite) de débit de pointe, entre débit observé et débit prévu avec la pluie observée, à échéance 24 heures, sur l'événement de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire

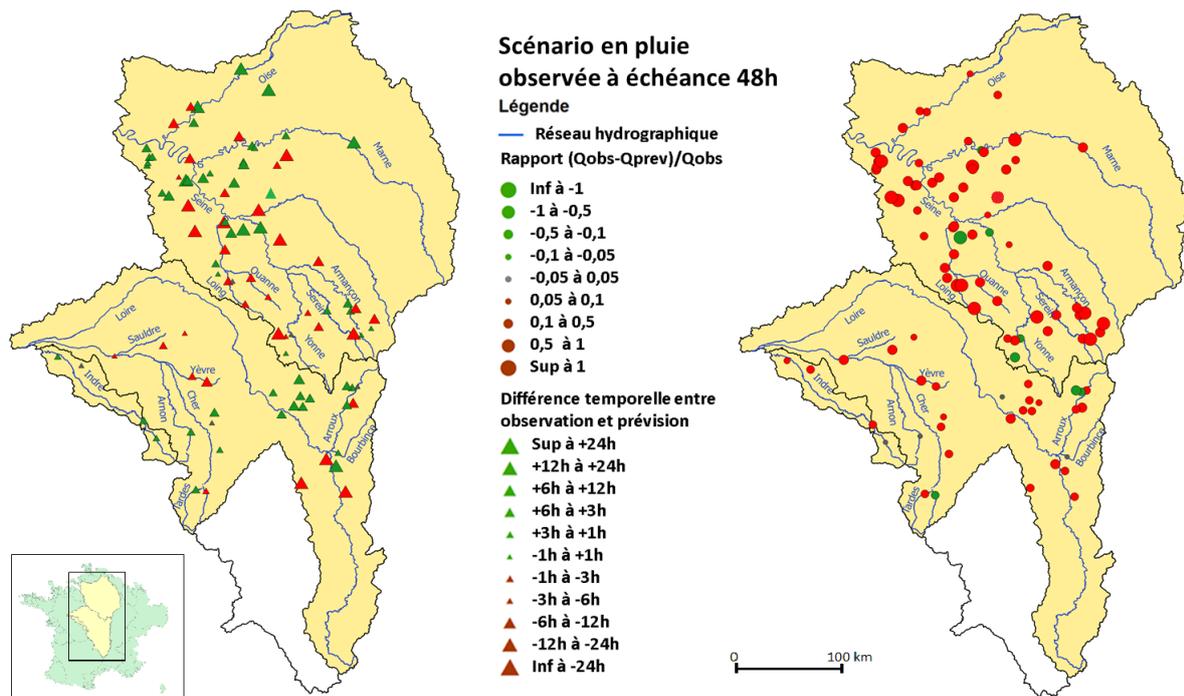


FIGURE 17 – Carte de différences temporelle (figure de gauche) et de magnitude (figure de droite) de débit de pointe, entre débit observé et débit prévu avec la pluie observée, à échéance 48 heures, sur l'événement de mai-juin 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire

Ces différences de qualité entre les prévisions peuvent venir du fait que les bassins de la Loire ont connus des débordements moins importants que ceux du bassins de la Seine (avec notamment les hauteurs d'eau exceptionnelles atteintes sur les bassins du Loing). Cela peut aussi venir d'un meilleur calage des paramètres sur les bassins du SPC LCI, mais cela ne pourrait être confirmé que par une étude sur les paramètres, ce qui n'a pas été fait dans le cadre de cette étude.

4.3 Les prévisions de débit avec prévisions de pluie AROME-PI

L'introduction des prévisions de précipitations en entrée du modèle implique une incertitude supplémentaire sur la prévision de débit réalisée. Cependant, les prévisions de précipitations AROME-PI n'étant disponibles qu'à 6h d'échéance, la prévision de pluie est assez semblables aux observations, comme vu précédemment.

Ce qui rend les prévisions du débit à courte échéance particulièrement correctes, c'est l'assimilation de débit antérieur. Elle permet de "raccrocher" le débit prévu au débit observé, comme le montre la figure 18. Cette assimilation utilisée par le modèle GRP permet, particulièrement pour une courte échéance comme avec les prévisions de pluie AROME-PI, de se rapprocher du débit observé, quel que soit la qualité de la prévision en soit.

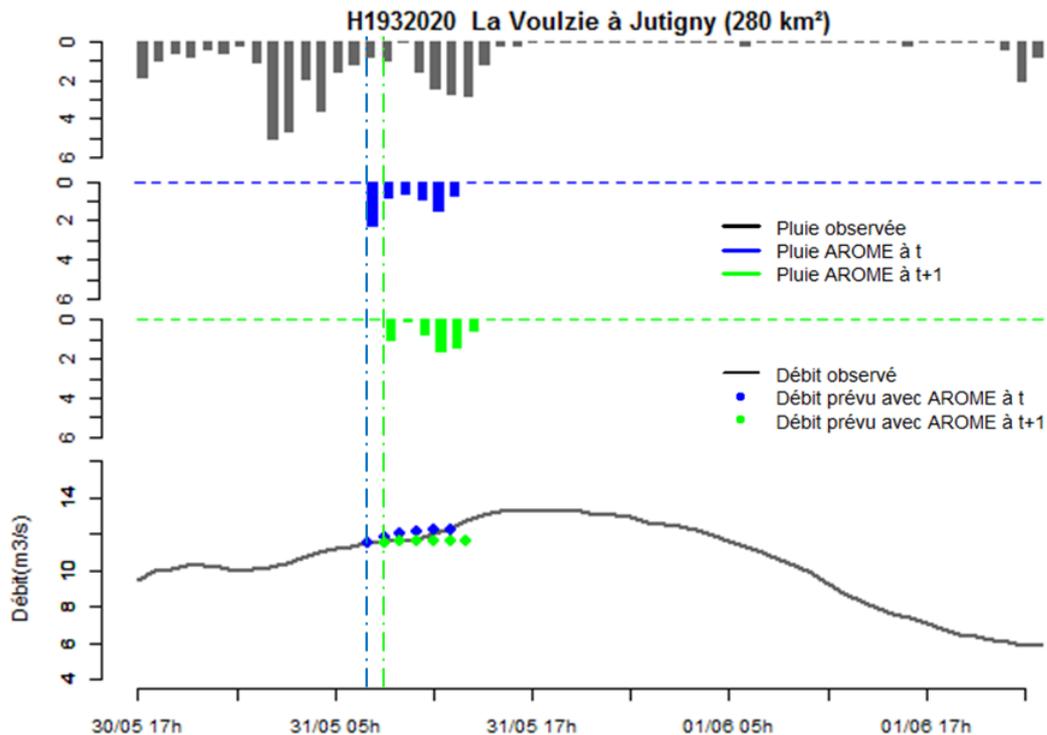


FIGURE 18 – Principe d’assimilation de débit avec les prévisions de pluie AROME-PI à 6 heures d’échéance

Cela amène en effet à des prévisions sur l’ensemble de la chronique telles que le montre la figure 19(a) avec les pluies prévues AROME-PI à échéance 6h, qui sont quasiment identiques à ce qui est obtenu avec des prévisions de débits faites à partir des pluies observées (figure 19(b)), même si la prévision de précipitations était un peu différente de la pluie observée. Ces prévisions, faites à une courte échéance, sont correctes dans l’ensemble grâce à l’assimilation de débit, même si la dynamique de crue ne correspond pas à la dynamique observée, car souvent la décrue est amorcée trop tôt d’après ce qu’on constate sur les hydrogrammes, ce qui amène à dire que le modèle a tendance à sous-estimer le débit prévu. On voit en effet un début de tendance à la décrue sur la prévision à l’instant t+1 (points verts) de la figure 18, alors que le pic de l’observation n’est pas encore atteint. On voit également que cela peut provenir de la légère sous-estimation des précipitations dans ce cas (1 à 2 mm prévus par heure contre 3 à 4 mm observés).

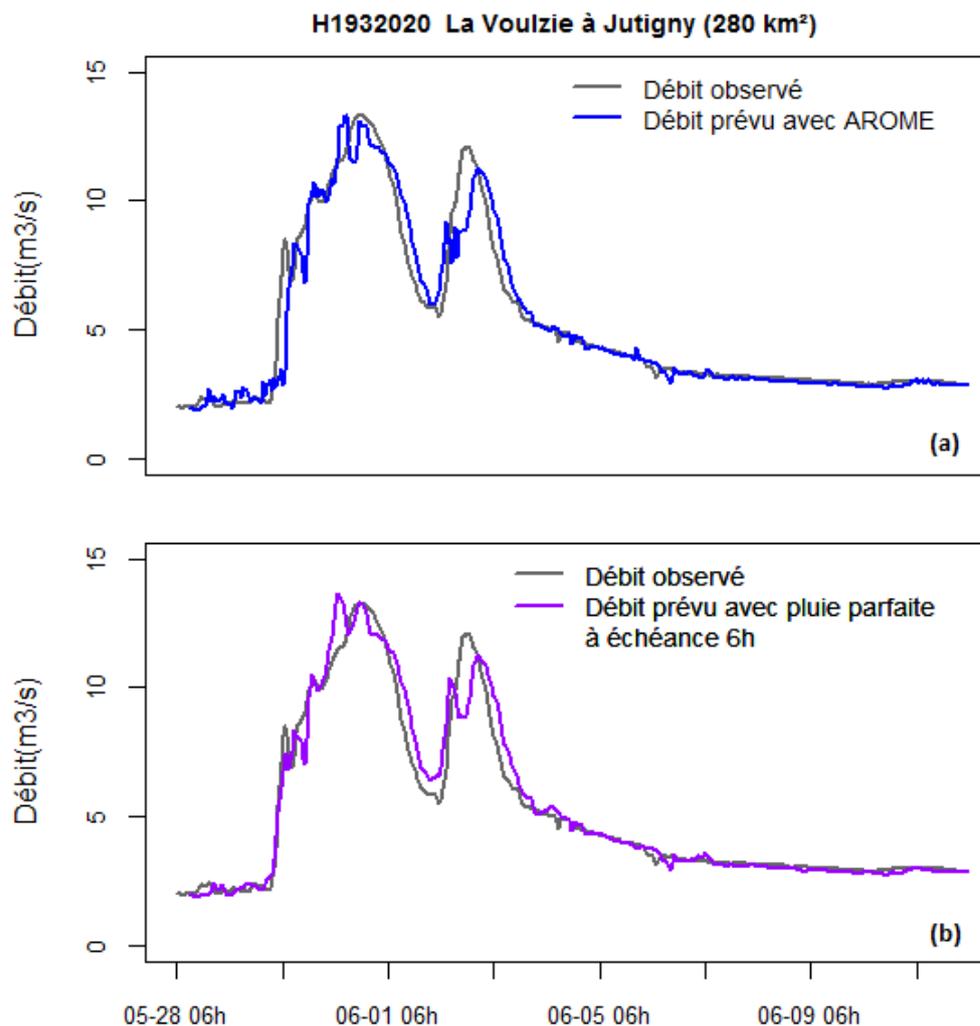


FIGURE 19 – Hydrogrammes de la Voulzie à Jutigny des débits observés et des débits prévus à échéance 6h, avec données de pluie AROME-PI (a) et avec données de pluie observées (b))

4.4 Les prévisions de débit avec les bulletins de prévision

Le débit prévu avec les bulletins de prévision est celui utilisé par les SPCs pour la prévision des crues en contexte opérationnel. Seuls les BP pour le SPC SmYL ont été récupérés sous un format utilisable directement en entrée du modèle GRP, et ceux pour le SPC LCI n'ont pas pu être mis en forme assez rapidement pour faire parti de l'étude. Ainsi les résultats ne sont traités que pour les bassins du SPC SmYL.

La chronique reconstituée avec les bulletins de prévisions est moins lissée que celle reconstituée avec les prévisions AROME-PI, car il y a moins d'instantants de prévision auxquels initialiser celle-ci. Cependant, la fourchette de débit donnée par les BP minimum, moyen et maximum permet une estimation relativement correcte en volume, bien que peu précise en terme de propagation de l'onde de crue. De même, la date du débit de pointe a tendance à être décalée, comme le montre les hydrogrammes de la figure 20.

H7913035 La Mauldre a Aulnay-sur-Mauldre (375 km²)

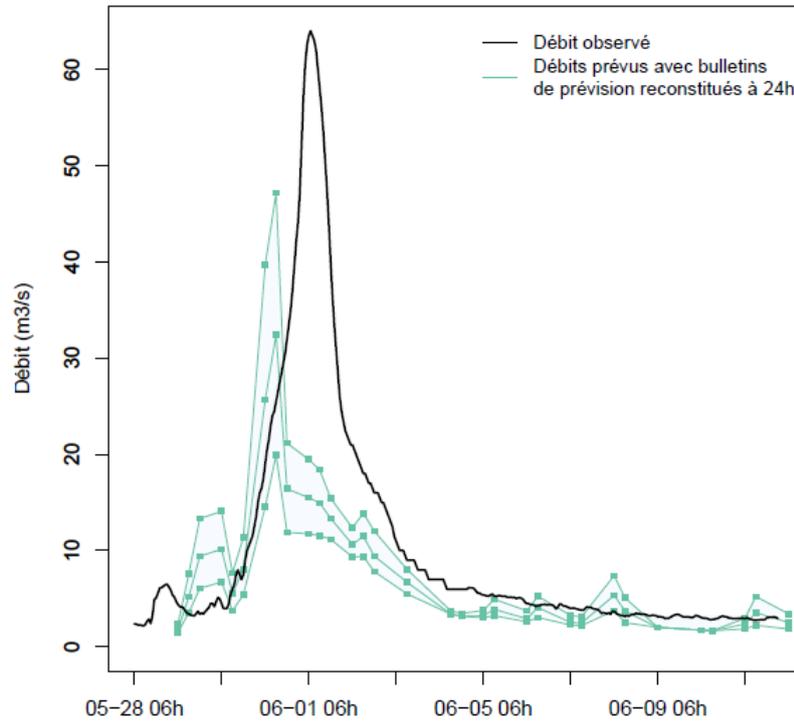


FIGURE 20 – Hydrogrammes observé et prévu de la Mauldre à Aulnay-sur-Mauldre sur l'événement de crue du 28 mai au 11 juin 2016, avec bulletins de prévisions en entrée, à échéance 24h

Cette figure 20 met en évidence le problème des bulletins de prévisions, qui donne une fourchette de prévisions, donc potentiellement correcte mais imprécise.

4.5 Comparaison des performances du modèle avec les différentes prévisions de précipitations

On confronte finalement toutes les prévisions, faites avec chaque données de précipitations à disposition, en simulation et en prévision.

Les figures 21 et 22 représentent les hydrogrammes prévus en simulation, avec pluie observée et avec bulletins de prévisions, pour un bassin où les prévisions sont assez proches de l'observation, La Voulzie à Jutigny, et un où les prévisions sont largement sous-estimées, le Loing à Episy.

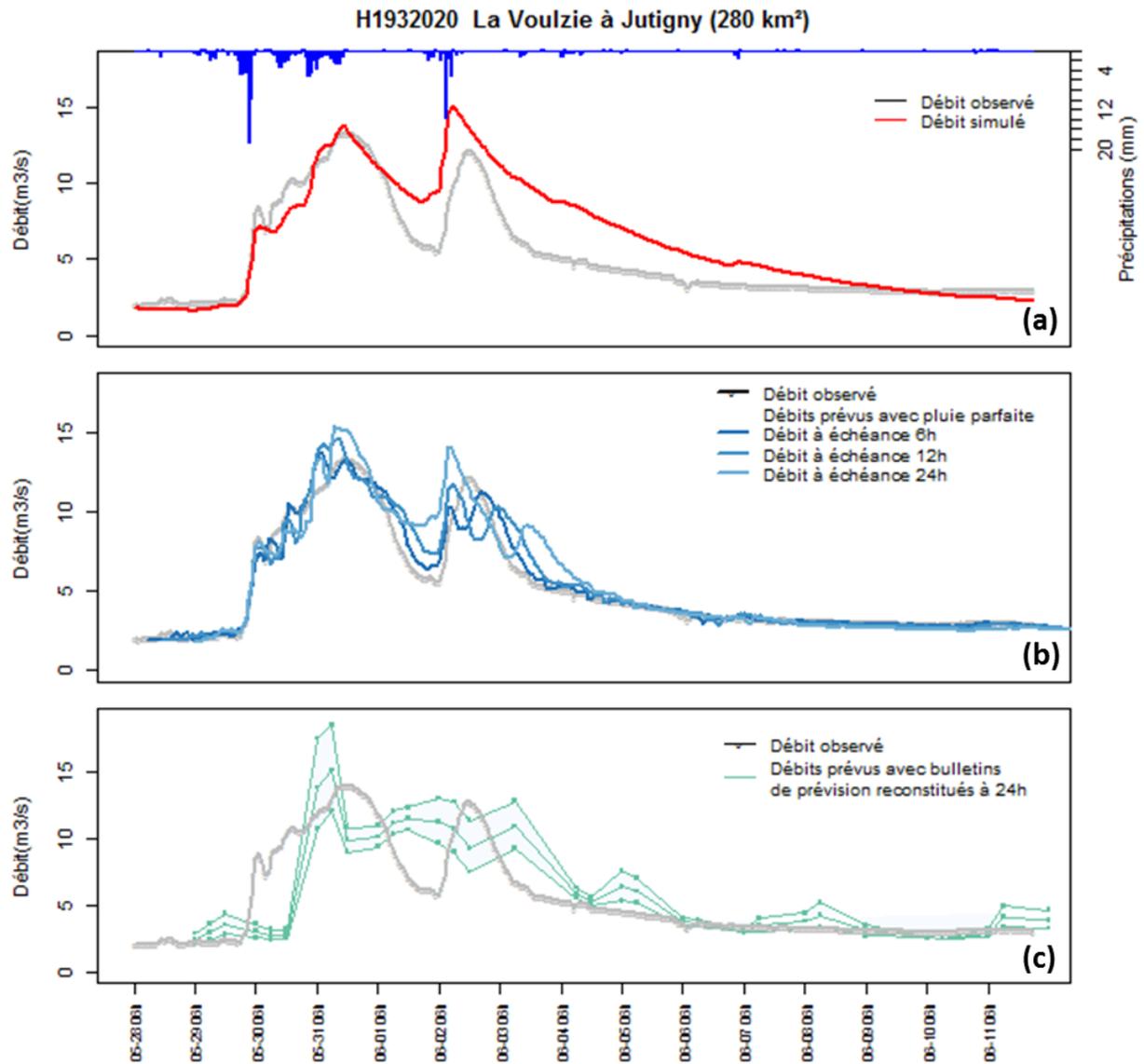


FIGURE 21 – Hydrogrammes de la Voulzie à Jutigny des débits observés et des débits prévus en simulation (a) prévus avec données de pluie observées (b) et prévus avec des bulletins de prévision (c)

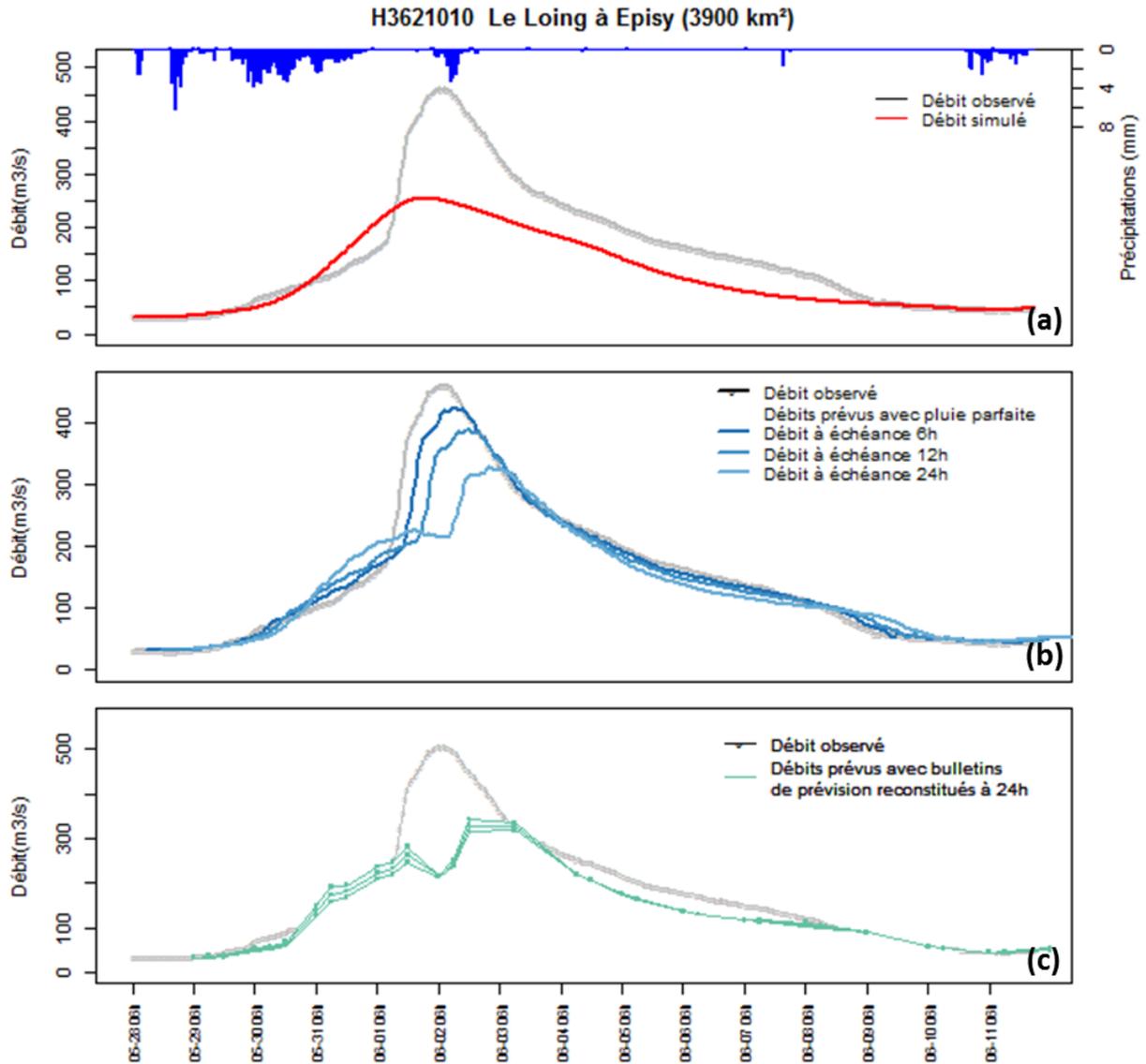


FIGURE 22 – Hydrogrammes du Loing à Episy des débits observés et des débits prévus en simulation (a) prévus avec données de pluie observées (b) et prévus avec des bulletins de prévision (c))

Les figures 21 et 22 permettent de confirmer que, lorsque la simulation est mauvaise, seule l'assimilation de débit, pour une prévision à courte échéance permet d'obtenir une prévision cohérente avec l'observation. Tandis que si la simulation est bonne, les prévisions ont tendance à l'être aussi, quelque soit le produit de pluie utilisé en entrée du modèle. La figure 21(b) montre que l'augmentation de l'échéance ne diminue que très peu la qualité de la prévision sur ce bassin.

4.5.1 Evaluation par le MAE

Un première évaluation des prévisions de débits en fonction des différentes données de pluie disponibles et en fonction des échéances est représentée par la figure 23, par un calcul de MAE. La MAE est très proche de zéro pour une échéance très faible (de 1h à 6h) et augmente avec une augmentation de l'échéance. Sur la figure 23, les boxplot des MAE pour chaque SPC et chacun des types de données de pluie en entrée de modèle sont donnés.

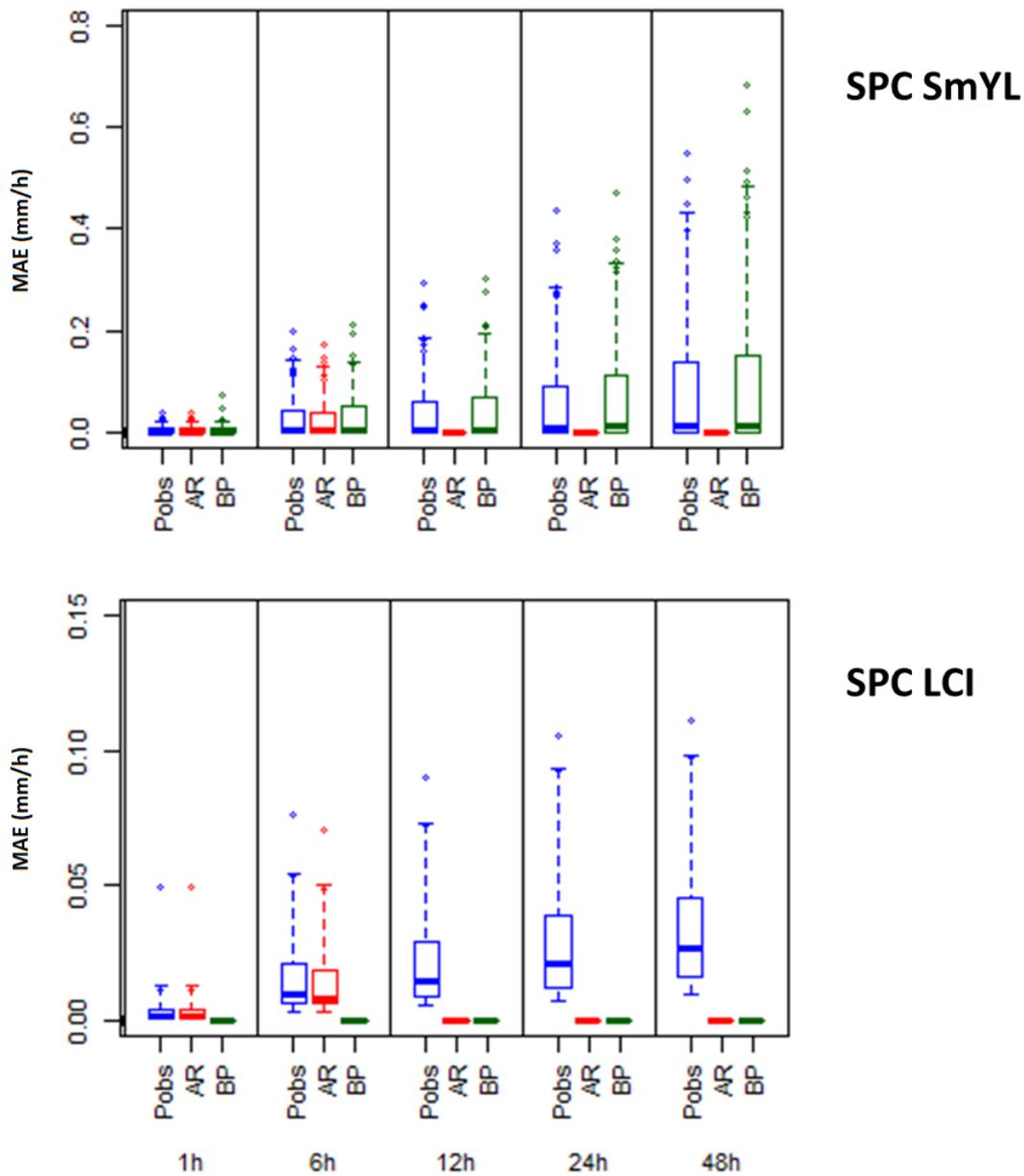


FIGURE 23 – Graphique de dispersion de MAE (mm/h) sur les débits prévus en fonction des données d’entrée de pluie et de l’échéance

Toutes les données d’entrée ne sont pas disponibles aux même échéances, ni sur tous les bassins, ainsi les conclusions qui peuvent être faites ne sont valables que sur ces données et ces bassins. Mais il semble que les résultats sont meilleurs sur les bassins de la Loire que sur les bassins de la Seine d’après la figure 23. Il est également remarquable, pour les deux SPC que les résultats sont très légèrement meilleurs avec les données AROME-PI qu’avec les autres. Ce calcul permet néanmoins de montrer l’impact de l’échéance à laquelle la prévision est faite. Les valeurs de MAE augmentent de manière exponentielle avec l’échéance.

4.5.2 Evaluation par le KGE

Le KGE est calculé pour les sorties de GRP en simulation et en prévision à échéance 12h. Cela permet de rendre compte de la nette amélioration apportée par l'assimilation du débit antérieur en prévision. La carte 24 montre les valeurs de KGE par bassin pour les deux types de données de précipitation citées. Elles montrent à la fois que la prévision avec assimilation de débit donne de meilleurs résultats, mais également que les bassins du Loing, des Morins et de la Sauldre ont des résultats plutôt faibles dans les deux cas. On retrouve cette tendance avec les autres critères d'évaluation.

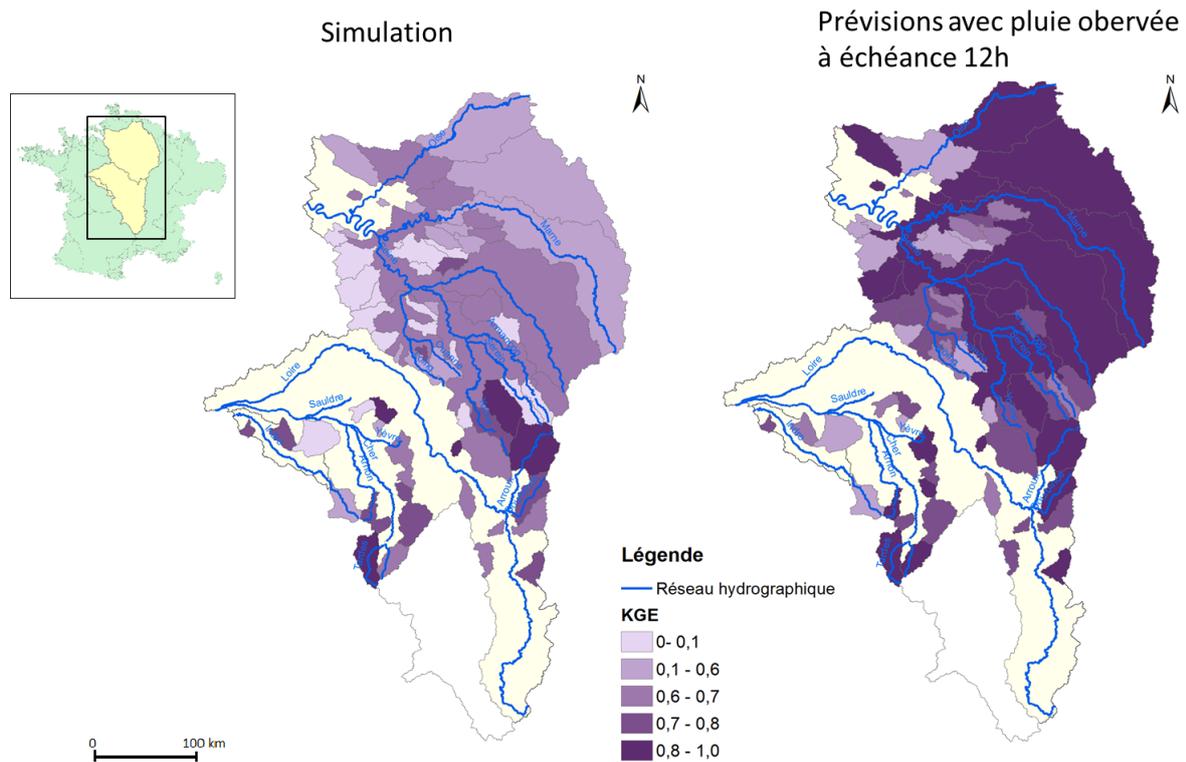


FIGURE 24 – Cartes représentant la valeur du KGE par bassin, en simulation et en prévision à échéance 12h

Les résultats des paramètres du KGE, notamment α et β (voir équations 3 et 4) sont également pris en compte. Le paramètre α donne une indication sur la variabilité des débits, tandis que le paramètre β informe sur la variabilité du débit moyen. Dans les deux cas la variabilité est interprété en terme de sur ou sous-estimation de la simulation ou prévision par rapport à l'observation.

Les résultats sont évalués selon une fourchette telle que :

- si α ou $\beta < 0,95$: sous-estimation
- si $0,95 < \alpha$ ou $\beta < 1,05$: prévision conforme à l'observation
- si α ou $\beta > 1,05$: surestimation

Les résultats sont triés par SPC et par paramètres dans les tableaux 2 et 3.

Paramètre α	SPC LCI	SPC SmYL
sous-estime	10	33
bon	23	32
surestime	1	2

Tableau 2 – Tableaux comptant le nombre de bassins selon la qualité des prévisions d’après le paramètre α du KGE

Paramètre β	SPC LCI	SPC SmYL
sous-estime	23	45
bon	11	20
surestime	0	2

Tableau 3 – Tableaux comptant le nombre de bassins selon la qualité des prévisions d’après le paramètre β du KGE

Les fourchettes de valeurs sont les mêmes mais les résultats de ces rapports α et β n’amènent pas aux mêmes conclusions.

Le paramètre α amène à dire que la variabilité des débits en prévision est plus faible que celle des débits observés. Au vu des autres analyses faites dans ce rapport, ces résultats vont dans le sens d’un débit de pointe prévu plus faible que le débit de point observé, avec donc une dynamique de crue moins variable que celle réellement observée.

De plus, il y a bien une idée de sous-estimation du débit moyen qui se dégage des résultats du paramètre β (tableau en figure 3), ce qui n’indique pas une sous-estimation à un moment précis de l’événement mais laisse voir un problème récurrent sur une majorité des bassins, tout du moins sur cet épisode, qui est que le débit prévu est plus faible que le débit observé.

4.5.3 Evaluation par tableau de contingence

Le tableau de contingence permet de compter le nombre de fausses alertes, alertes manquées, alertes réussies et rejet correct. On associe des scores à ces catégories, permettant de voir, pour chaque bassin versant concerné par l’événement, si la prévision a été efficace ou non. Pour simplifier le calcul, l’observation et la prévision sont comparées à l’instant t , sans prise en compte de marge d’erreur. Les deux valeurs sont comparées à un seuil fixé à deux tiers du débit de pointe observé lors de l’événement, pour le bassin considéré.

La carte en figure 25 présente la dispersion spatiale des Critical Success Index pour cet événement, avec en entrée du modèle les pluies prévues. Ce sont les données les plus complètes et elles sont suffisantes pour évaluer la qualité des prévisions avec cette méthode.

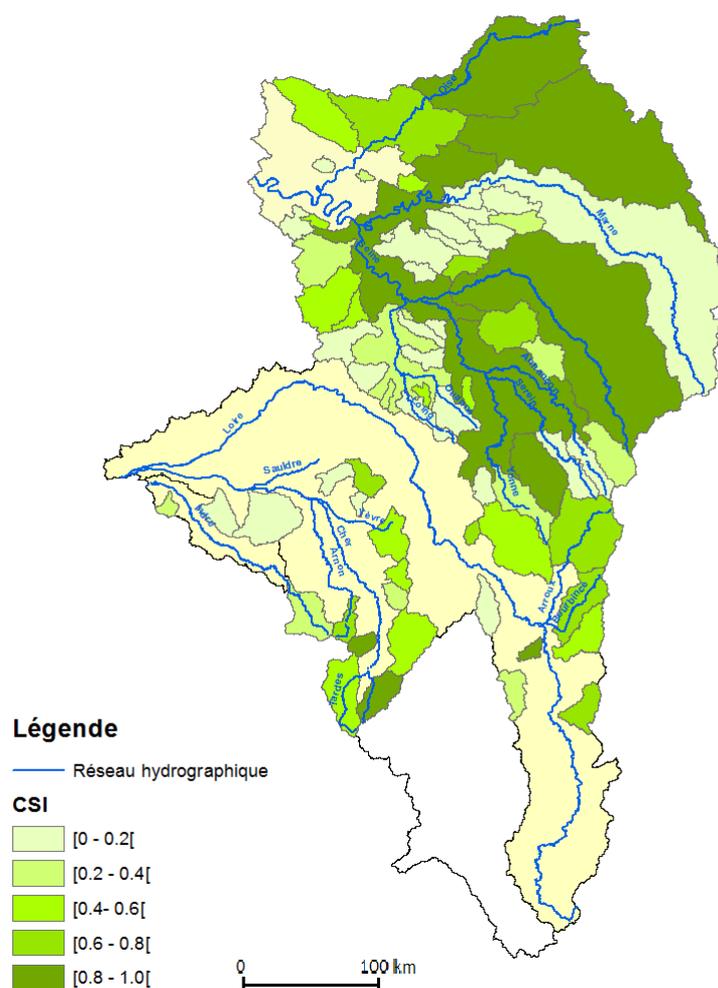


FIGURE 25 – Carte représentant la valeur du CSI par bassin pour l'événement du 28 mai au 11 juin 2016

Sur cette carte on note que les valeurs de CSI les plus basses sont localisées aux niveaux des bassins ayant connus les montées des eaux les plus importantes, c'est à dire les bassins autour du Loing et des Morins pour le SPC SmYL, et vers la Sauldre pour le SPC LCI.

Les graphiques 26 et 27 montrent les résultats des calculs de POD et FAR pour les deux SPCs, classés par ordre croissant pour chacun, afin de faire ressortir la valeur médiane et la répartition des valeurs. Les numéros de bassins entre POD et FAR ne sont donc pas forcément concordants. Les figures donnent une idée de la répartition des deux paramètres POD et FAR, mais pas de leur relation entre eux.

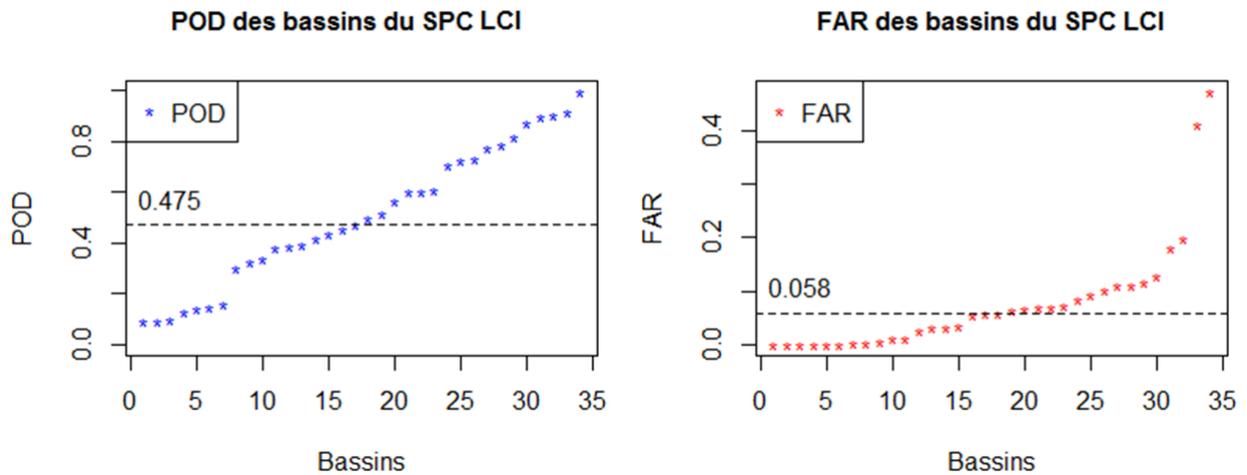


FIGURE 26 – Graphiques montrant les valeurs atteintes par le POD et le FAR sur les bassins du SPC LCI

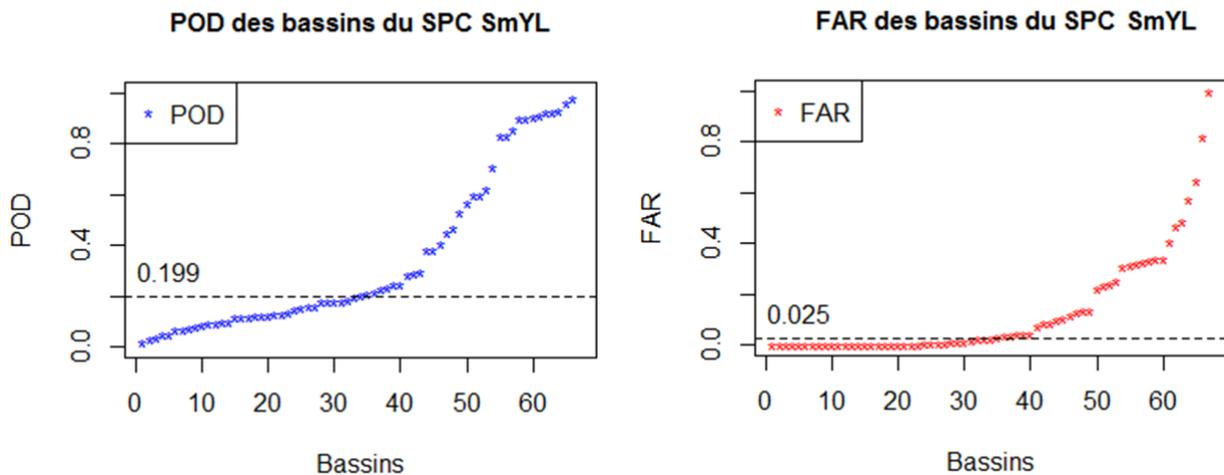


FIGURE 27 – Graphiques montrant les valeurs atteintes par le POD et le FAR sur les bassins du SPC SmYL

Sur les figures 26 et 27, les lignes en pointillées représentent la valeur médiane de POD et FAR respectivement pour chaque graphique et chaque série de bassins par SPC. La médiane du POD et FAR est plus faible sur les bassins du SPC SmYL que ceux du SPC LCI. Dans les deux cas le POD est inférieur à 0.5, ce qui signifie que la probabilité de dépasser le seuil (fixé à deux tiers du débit de pointe observé) est faible, et donc que le débit prévu est majoritairement sous-estimé par le modèle.

En ce qui concerne le FAR, il est également très faible, inférieur à 0.1, ce qui va dans le sens de prévisions sous-estimées. En effet, si la prévision est presque constamment sous-estimée, il y a peu de risques de faire une prévision qui ne soit pas justifiée.

4.6 Conclusion sur les différentes prévisions

Les analyses avec les données disponibles amènent à conclure que les prévisions sont surtout mauvaises sur les bassins ayant connus des débordements exceptionnels pour cette période de l'année, avec des précipitations très intenses sur une période très brève. Le modèle GRP est pour autant efficace sur des petits bassins, avec un débit peu important (maximum 15 à 20 m³.s⁻¹). Les quelques scores employés et les analyses visuelles d'hydrogrammes confirment ces conclusions.

Les écarts entre prévisions et observations vont surtout dans le sens de la sous-estimation de la prévision, et cela quelque soit la donnée de pluie utilisée en entrée de modèle.

Il apparaît également qu'à faible échéance (six heures) les prévisions sont toujours bonnes grâce à l'assimilation du débit antérieur, alors que la simulation n'est pas satisfaisante sur le même bassin, et que les prévisions se dégradent souvent rapidement avec l'augmentation de l'échéance.

5 Conclusion

La crue de mai-juin 2016, qui a touché les bassins sur les territoires des SPCs Seine moyenne, Yonne, Loing et Loire, Cher, Indre a été une crue exceptionnelle. En effet, des débits de période de retour très élevée ont été relevés sur certains bassins (plus de 500 ans sur le Loing) et le phénomène était géographiquement assez étendu, puisque deux SPCs en France ont été concernés, et que le même phénomène climatique a également été à l'origine de débordements importants dans les pays d'Europe voisins.

L'analyse du modèle de prévision GRP dans le cadre de ce rapport porte uniquement sur cet événement. Les conclusions sur ces performances ne concernent donc que cette crue qui a été exceptionnelle sur certains bassins.

Les points principaux qui se dégagent de cette étude sont que les prévisions sont souvent sous-estimées pour cet événement, et particulièrement sur les bassins du SPC SmYL. Les plus mauvais résultats de prévisions sont observés sur les bassins où les débordements sont les plus forts et les périodes de retour les plus grandes. Sur les bassins où les inondations ont été moins importantes, les prévisions sont meilleures, même si la tendance reste à la sous-estimation. Le modèle semble donc avoir du mal à prévoir des scénarios extrêmes.

Concernant les différentes prévisions de débit faites avec plusieurs données de précipitations, prévues ou observées, fournies en entrée de modèle, elle sont d'avantage complémentaires que comparables. En effet les prévisions AROME-PI ne sont disponibles qu'à échéance courte de 6h maximum mais à chaque instant de prévision (horaire) entre le 28 mai et le 11 juin, les bulletins de prévisions sont disponibles à échéance 72h, mais sur 32 instants de prévisions, répartis inégalement entre le 28 mai et le 11 juin.

Les différentes sorties du modèles qui ont été réalisées et étudiées confirment que le modèle a tendance à sous-estimer le débit et à initier la décrue quelques heures avant le débit de pointe réellement observé. Ces conclusions sont d'autant plus flagrantes sur les bassins du SPC SmYL, possiblement à cause des débordements plus importants qui ont eut lieu sur ces bassins que sur ceux du SPC LCI, ou encore à cause d'un paramétrage plus adéquat sur ces derniers.

Il faudrait compléter cette étude par un travail similaire sur d'autres périodes de crues, sur les mêmes bassins, pour savoir si ces derniers ont réagi trop différemment sur cet événement ou alors si les prévisions vont toujours dans le sens d'une sous-estimation. Au vu des résultats de cette étude, il est également nécessaire de s'intéresser aux paramètres du modèle, afin de voir s'il est possible d'ajuster les prévisions, sur cet événement et sur les mêmes bassins. Les phénomènes naturels ne sont cependant pas faciles à appréhender.

Références

- Barroux, R. (2016). Inondations : le centre de Nemours évacué. *Le Monde*, 3 juin, p.8
- Brunelle, J., Diribarne, J. et Solignac, J. (2016). Episodes de crue de mai-juin 2016 sur le bassin de la Seine. Rapport de retour d'expérience. Rapport technique, DRIEE IdF
- Cornevin, C. et Négroni, A. (2016). Inondations : décrue dans le centre, Paris en alerte orange. *Le Figaro*, 3 juin, p.2-3
- Duranthon, J.-P. et Mougard, S. (2016). Impact de la crue de mai-juin 2016 du bassin de la Seine sur la filière fluviale passagers et marchandises. Rapport technique, CGEDD.
- Feuillette, S., Akopian, M. et Raout, F. (2016). Mission sur le fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine. Rapport technique, AESN; DRIEE IdF.
- France TV Info (2016). *Inondations : à Paris, la Seine sur le point de passer le pic de 1982*. Disponible sur : <https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/direct-inondations-la-seine-attendue-a-son-plus-haut-a-paris_1481495.html>
- Gévaudan, C. (2016). Crues : Des cumuls de pluie tels qu'on en voit tous les cinquante ans. *Libération*, 1^{er} juin. Disponible sur : <http://www.liberation.fr/sciences/2016/06/01/cruces-des-cumuls-de-pluie-tels-qu-on-en-voit-tous-les-cinquante-ans_1456664>
- Hir, P. L. (2016). Des pluies qui surviennent une fois par demi-siècle ou par siècle. *Le Monde*, 4 juin, p.11
- InfoClimat (2016). Episode pluvieux intense sur le nord du pays, vigilance rouge sur le Loiret. Disponible sur : <<http://mobile.infoclimat.fr/actu-meteo-lire.php?id=12567>>
- IRSTEA (2017). Fonctionnement détaillé du modèle GRP. Disponible sur : <<https://webgr.irstea.fr/modeles/modele-de-prevision-grp/fonctionnement-grp/>>
- Kille, L. W. (2016). Paris les risques de crue sous haute surveillance. *The Conversation*, 1^{er} juin. Disponible sur : <<http://theconversation.com/a-paris-les-risques-de-crue-sous-haute-surveillance-6035>>
- Laurette, E. (2016). Suite aux inondations, les communes font l'inventaire des dégâts. *La Voix du Nord*, 2 juin, p.6217
- Libération (2016). Transport, agriculture, électricité, tourisme : le point sur les crues. *Libération*, 3 juin. Disponible sur : <http://www.liberation.fr/france/2016/06/03/transports-agriculture-electricite-tourisme-le-point-sur-les-cruces_1457089>
- Marie, A. (2016). Eboulement le long du canal de Briare en amont de Montargis : une situation d'urgence. *La République du Centre*, 3 juin. Disponible sur : <https://www.larep.fr/montargis/vie-pratique-consommation/2016/06/03/eboulements-le-long-du-canal-de-briare-en-amont-de-montargis-une-situation-durgence-mis-a-jour_11942901.html>
- Météo France. *Le modèle à maille fine Arome*. Disponible sur : <<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/le-modele-a-maille-fine-arome>>

- Météo France (2016). Bilan climatique du printemps 2016. Disponible sur : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2016/bilan-du-printemps-2016>>
- Perrin, F., Sauzey, P., Menoret, B. et Roche, P.-A. (2017). Retour d'expérience inondations de mai-juin 2016 sur les bassins moyens de la Seine et de la Loire. Rapport technique, IGA, CGEDD.
- Philippe-Viela, O. (2016). Inondations : Quelles conséquences sur les villes et les champs. *20 Minutes*, 1^{er} juin. Disponible sur : <https://www.20minutes.fr/societe/1856883-20160601-inondations-consequences-agriculture-infrastructures-urbaines>>
- Piper, D., Kunz, M., Ehmele, F., Mohr, S., Muhr, B., A.Kron et Daniell, J. (2016). Exceptional sequence of severe thunderstorms and related flash floods in may and june 2016 in germany part 1 meteorological background. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12):2835–2850.
- Raffin, N. (2016). Inondations : un fond exceptionnel de soutien annoncé par Valls, nouvelles pluies annoncées. *La Tribune*, 3 juin, p.34
- Ramos, M.-H., Perrin, C., Viatgé, J. et Andréassian, V. (2017). Assessment report on the 2016 flood event on the Seine and Loire basins (france). Report for the European flood awareness system (EFAS). Disponible sur : https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2017/09/Report_Irstea_EFAS_DC_2016_Seine-Loire_VF_20170421.pdf>
- Roche-Bayardi, X. (2016). Faut-il craindre un effet retard après les inondations ? *La Nouvelle République*, 6 juin, p.13
- Vandekraats, W. (2016). Après les fortes pluies qui ont provoqué de nombreuses inondations les cours d'eau débordent. *L'Yonne Républicaine*, 1^{er} juin, p.2
- Vey, T. (2016). Précipitations records sur une grande partie de la france. *Le Figaro*, 1^{er} juin, p.11
- Wikipédia (2017). Prévission des crues en france. Wikipédia, l'encyclopédie libre. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Inondations_européennes_de_2016>

Annexe 1 : Fiche présentation SPC SMYL

Le service de Prédiction des crues Seine Moyenne Yonne Loing

Le SPC Seine Moyenne Yonne Loing, rattaché à la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie d'Ile-de-France (DRIEE IDF) est basé à Paris, et a été créé en juillet 2006. Il est en charge de la surveillance et prévision des crues sur les secteurs de :

- de la Seine, de son entrée en région Île-de-France jusqu'à Poses
- de l'Yonne, de Dornecy à sa confluence avec la Seine
- de l'Armançon et du Serein, de leur entrée dans le département de l'Yonne à leur confluence avec l'Yonne
- du Loing, de son entrée dans le département du Loiret à sa confluence avec la Seine
- de l'Ouanne, de son entrée dans le département du Loiret à sa confluence avec le Loing
- de la Marne et de l'Oise, dans leur partie francilienne.

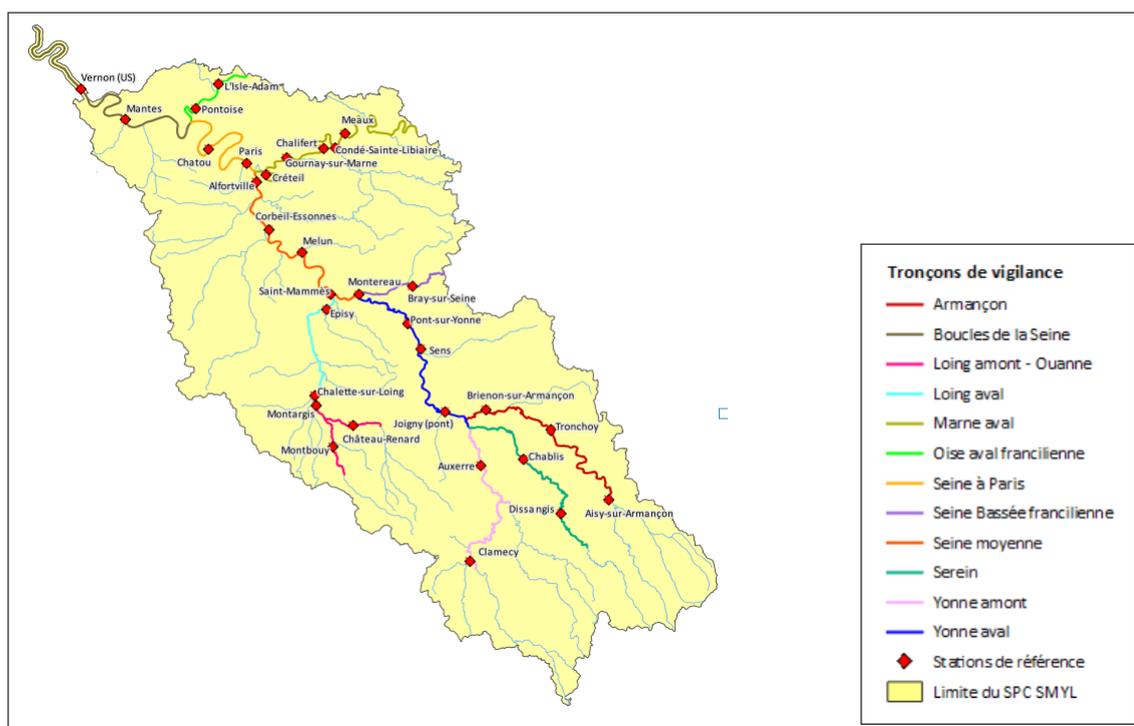


FIGURE 28 – Bassin et tronçons surveillés par le SPC SMYL

Le relief est très faible sur l'ensemble du bassin, et l'altitude moyenne est aux alentours de 100 m. Le bassin géré par le SPC SMYL est un territoire à forts risques, avec l'agglomération parisienne qui est très urbanisée, et qui concentre des enjeux économiques importants. Le sud du bassin est plus rural, les enjeux sont moins forts. L'occupation du sol est surtout agricole en zone non urbaine (hors zone francilienne). Les crues rapides, avec des montées en quelques heures, sont localisées en tête de bassin. Pour le reste, ce sont des montées de crue de quelques jours en moyenne.

(Source : Plaquette de présentation du SPC SmYL, www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr)

Annexe 2 : Fiche présentation SPC LCI

Le service de Prévision des crues Loire Cher Indre

Le Service de Prévision de Crues Loire Cher Indre (SPC LCI) est rattaché à la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de la région Centre et est basé à Orléans.

Il est en charge de la surveillance et de la prévision des crues sur le bassin de la Loire depuis sa source jusqu'à sa confluence avec la Vienne. Le SPC surveille donc la Loire (amont), le Cher, l'Indre et leurs principaux affluents : l'Arroux, le Tardes, l'Yèvre, l'Arnon et la Sauldre.

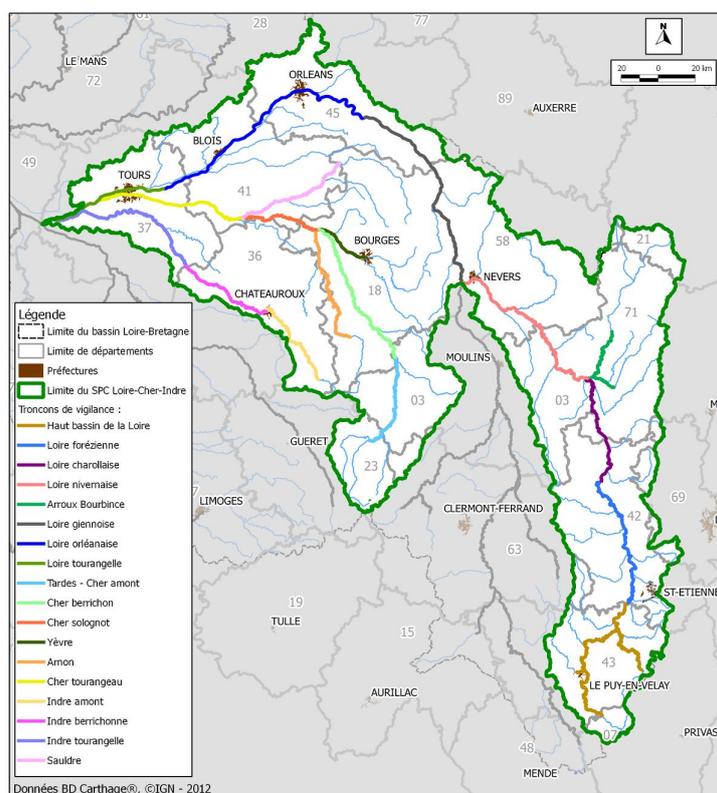


FIGURE 29 – Bassin et tronçons de surveillance du SPC LCI

Le bassin est caractérisé par sa diversité géographique, et donc des climats variables. Au nord, dans le Loiret, le climat est sous influence océanique, et l'altitude dans cette zone avoisine les 100 à 200 m. Le sud du bassin localisé dans le département de la Haute-Loire, est sous un climat montagnard, et culmine autour de 600 m d'altitude.

Le domaine surveillé par le SPC LCI est un secteur assez faiblement urbanisé, avec seulement quelques villes moyennes : Orléans, Tours, Bourges. L'occupation du sol est pour le reste majoritairement forestière et agricole.

(Sources : Présentation du SPC LCI, Plaquette de présentation du SPC LCI,)

Annexe 3 : Planning des vigilances sur les tronçons du SPC SMYL

Bassins	Date	Heure	Vigilance
Armaçon	30/05/2016	16:00	Jaune
	06/06/2016	10:00	Vert
	08/06/2016	10:00	Jaune
	11/06/2016	10:00	Vert
Serein	29/05/2016	10:00	Jaune
	05/06/2016	10:00	Vert
	08/06/2016	10:00	Jaune
	11/06/2016	10:00	Vert
Yonne amont	30/05/2016	16:00	Jaune
	05/06/2016	10:00	Vert
Yonne aval	30/05/2016	16:00	Jaune
	06/06/2016	10:00	Vert
Loing amont - Ouanne	29/05/2016	16:00	Jaune
	30/05/2016	19:25	Orange
	31/05/2016	12:00	Rouge
	02/06/2016	10:00	Orange
	04/06/2016	06:00	Jaune
	05/06/2016	10:00	Vert
Loing aval	30/05/2016	10:00	Jaune
	30/05/2016	19:25	Orange
	01/05/2016	08:00	Rouge
	03/06/2016	10:00	Orange
	06/06/2016	16:00	Jaune
	09/06/2016	10:00	Vert
Seine Bassée francilienne			
Seine moyenne	30/05/2016	16:00	Jaune
	02/06/2016	06:00	Orange
	08/06/2016	10:00	Jaune
	10/06/2016	16:00	Vert
Marne aval	30/05/2016	16:00	Jaune
	08/06/2016	10:00	Vert
Seine Paris	30/05/2016	16:00	Jaune
	02/06/2016	16:00	Orange
	07/02/2016	10:00	Jaune
	11/06/2016	16:00	Vert
Oise Francilienne	03/06/2016	10:00	Jaune
	06/06/2016	16:00	Vert
Boucles de Seine	31/05/2016	16:00	Jaune
	04/06/2016	10:00	Orange
	06/06/2016	10:00	Jaune
	10/06/2016	16:00	Vert

Tableau 4 – Passage des vigilances sur le bassin de la Seine - Source : Rapport de retour d'expérience SPC SMYL

Annexe 4 : Planning des vigilances sur les tronçons du SPC LCI

Bassins	Date	Heure	Vigilance
Loire forézienne			
Loire charollaise			
Loire Nivernaise	31/05/2016	16:00	Jaune
	05/06/2016		Vert
Arroux - Bourbince	29/05/2016	10:00	Jaune
	03/05/2016		Vert
Loire giennoise	02/06/2016	10:00	Jaune
	05/06/2016		Vert
Loire orléanaise			
Loire tourangelle	03/06/2016	16:00	Jaune
	07/06/2016		Vert
Tardes - Cher amont	01/06/2016	16:00	Jaune (non atteinte)
	02/06/2016	16:00	Vert
Cher berrichon	31/05/2016	22:30	Jaune
	07/06/2016	10:00	Vert
Yèvre	30/05/2016	16:00	Jaune
	01/06/2016	00:00	Orange
	07/06/2016	10:00	Jaune
	10/06/2016	10:00	Vert
Arnon	30/05/2016	16:00	Jaune
	01/06/2016	10:00	Orange
	05/06/2016	~10:00	Jaune
	07/06/2016	10:00	Vert
Sauldre	30/05/2016	10:00	Jaune
	31/05/2016	10:00	Orange
	05/06/2016	~10:00	Jaune
	07/06/2016	10:00	Vert
Cher solognot	31/05/2016	22:30	Jaune
	03/06/2016	10:00	Orange
	07/06/2016	10:00	Jaune
	08/06/2016	~16:00	Vert
Cher tourangeau	31/05/2016	22:30	Jaune
	01/06/2016	16:00	Orange
	07/06/2016	16:00	Jaune
	09/06/2016	16:00	Vert
Indre amont	30/05/2016	16:00	Jaune
	03/06/2016	10:00	Vert
Indre berrichone	31/05/2016	22:30	Jaune
	06/06/2016	16:00	Vert
Indre tourangelle	31/05/2016	16:00	Jaune
	01/06/2016	10:00	Orange
	03/06/2016	10:00	Jaune
	07/06/2016	10:00	Vert

Tableau 5 – Passage des vigilances sur le bassin de la loire - Source : Rapport de retour d'expérience SPC LCI

Annexe 5 : Tableau des débits maximum atteints sur le SPC SmYL et carte de localisation des bassins

Code station figure	Nom station	Date	Heure	Surface bassin (km ²)	Débit max (m ³ .s ⁻¹)
H1932020	La Voulzie à Jutigny	31/05/2016	13 :00	280	13
H1940020	La Seine à Bazoches les Bray	11/06/2016	22 :00	10083	223
H2051010	L'Yonne à Dornecy	01/06/2016	06 :00	753	94
H2062010	Le Beuvron à Ouagne	01/06/2016	01 :00	263	37
H2062020	Le Beuvron à Brinon sur Beuvron	31/05/2016	11 :00	46	6
H2073110	Le Sauzay à Corvol L'Orgueilleux	01/06/2016	00 :00	80	6
H2172320	Le Cousin à Avallon	31/05/2016	03 :00	348	61
H2182010	La Cure à Arcy sur Cure	31/05/2016	16 :00	1180	159
H2322010	Le Serein à Bierre les Semur	28/05/2016	19 :00	265	122
H2332020	Le Serein à Dissangis	01/06/2016	06 :00	650	88
H2402010	L'Armançon à Brianny	31/05/2016	04 :00	222	31
H2412010	L'Armançon à Quincy le Vicomte	01/06/2016	04 :00	477	88
H2422310	La Brenne à Brain	31/05/2016	02 :00	136	22
H2433190	L'Ozerain à Hauteroche	30/05/2016	23 :00	201	11
H2434010	L'Oze à Darcey	07/06/2016	17 :00	729	20
H2442340	La Brenne à Montbard	31/05/2016	22 :00	1353	77
H2452020	L'Armançon à Aisy sur Armançon	01/06/2016	11 :00	480	163
H2473010	L'Armançe à Chessy les Pres	31/05/2016	20 :00	133	82
H2513110	Le Tholon à Champvallon	31/05/2016	22 :00	131	7
H2622010	La Vanne à Pont sur Vanne	02/06/2016	16 :00	874	16
H2701030	L'Yonne à Pont sur Yonne	04/06/2016	20 :00	10443	628
H3001020	Le Loing à Saint-Martin-des-Champs	30/05/2016	15 :00	126	8
H3021010	Le Loing a Montbouy	31/05/2016	09 :00	409	84
H3023211	L'Aveyron a la Chapelle sur Aveyron	30/05/2016	20 :00	97	34
H3102010	L'Ouanne a Toucy	30/05/2016	23 :00	154	31
H3122010	L'Ouanne a Charny	31/05/2016	07 :00	562	144
H3203310	Le Puiseaux a Saint Hilaire sur Puiseaux	31/05/2016	18 :00	87	11
H3322010	La Bezonde a Pannes	01/06/2016	06 :00	338	131
H3403102	La Clery a Ferrieres	31/05/2016	14 :00	272	48
H3613010	Le Lunain à Paley	01/06/2016	11 :00	169	15
H3613020	Le Lunain à Episy	02/06/2016	07 :00	220	19
H3621010	Le Loing à Episy	02/06/2016	07 :00	3896	461
H3623010	L'Orvanne à Blennes	NA	NA	108	NA
H3623020	L'Orvanne à Diant	31/05/2016	08 :00	103	5
H3923010	Le ru d'Ancoeur à Blandy	31/05/2016	10 :00	181	33
H4022020	L'Essonne à Guigneville-sur-Essonne	05/06/2016	07 :00	835	30
H4022030	L'Essonne à Boulancourt	02/06/2016	07 :00	604	36
H4042010	L'Essonne à Ballancourt-sur-Essonne	06/06/2016	03 :00	1870	34
H4202020	L'Orge à Saint-Chéron	01/06/2016	14 :00	111	3
H4223110	La Remarde à Saint-Cyr-sous-Dourdan	31/05/2016	20 :00	151	15
H4232040	L'Orge à à Epinay-sur-Orge	02/06/2016	04 :00	633	24
H4243010	L'Yvette à Villebon-sur-Yvette	01/06/2016	07 :00	224	25
H4252010	L'Orge à Morsang-sur-Orge	02/06/2016	04 :00	922	48
H4322030	L'Yerres à Courtomer	02/06/2016	07 :00	429	80
H4332030	L'Yerres à Boussy-Saint-Antoine	02/06/2016	15 :00	902	126
H4333410	Le Réveillon à Férolles-Attilly	30/05/2016	18 :00	49	11

Code station figure	Nom station	Date	Heure	Surface bassin (km ²)	Débit max (m ³ .s ⁻¹)
H5201010	La Marne à Châlons-sur-Marne	10/06/2016	05 :00	6280	251
H5302010	Le Surmelin à Saint-Eugène	31/05/2016	17 :00	454	49
H5321010	La Marne à la Ferté-sous-Jouarre	02/06/2016	23 :00	8764	271
H5412010	Le Petit Morin à Montmirail	31/05/2016	20 :00	354	18
H5412020	Le Petit Morin à Jouarre	01/06/2016	04 :00	605	67
H5613020	La Théroutte à Congis-sur-Théroutte	01/06/2016	00 :00	167	3
H5702010	Le Grand Morin à Meilleray	31/05/2016	16 :00	336	45
H5732010	Le Grand Morin à Pommeuse	01/06/2016	04 :00	770	114
H5743040	L'Aubetin à Pommeuse	02/06/2016	10 :00	265	44
H5920014	La Seine à Paris	03/06/2016	18 :00	43751	1721
H6501020	L'Aisne à Soissons	11/06/2016	20 :00	7350	138
H7401010	L'Oise à Sempigny	09/06/2016	13 :00	4290	88
H7611010	L'Oise à Creil	11/06/2016	06 :00	14200	231
H7742020	Le Thérain à Maysel	02/06/2016	07 :00	1200	24
H7833540	L'Ysieux à Luzarches	31/05/2016	01 :00	55	2
H7853010	Le Sausseron à Nesles-la-Vallée	31/05/2016	21 :00	102	3
H7913020	La Mauldre à Beynes	31/05/2016	20 :00	223	54
H7913035	La Mauldre à Aulnay-sur-Mauldre	01/06/2016	06 :00	375	64
H7913410	La Guyonne à Mareil-le-Guyon	31/05/2016	14 :00	34	14
H7913620	Le Lieutel à Neauphle-le-Vieux	31/05/2016	13 :00	77	22
H7914120	Le ru de Gally à Thiverval-Grignon	31/05/2016	07 :00	93	8

Tableau 6 – Liste des bassins versants sous la surveillance du SPC SmYL avec le débit maximum atteint lors de la crue de mai-juin 2016



FIGURE 30 – Carte référençant les bassins de l'étude pour le SPC SmYL. Noms correspondants aux codes dans le tableau de l'annexe 5

Annexe 6 : Tableau des débits maximum atteints sur le SPC LCI et carte de localisation des bassins

Code station figure	Nom station	Date	Heure	Surface bassin (km ²)	Débit max (m ³ .s ⁻¹)
K1533010	La Vouzance à Saint Leger sur Vouzance	29/05/2016	03 :00	130	52
K1063010	Le Sornin à Charlieu	29/05/2016	06 :00	138	72
K1414010	La Bourbince à Vitry en Charollais	29/05/2016	07 :00	819	32
K0983010	Le Rhins à Saint Cyr de Favieres	29/05/2016	18 :00	427	37
K1273110	Le Ternin à Tavernay	31/05/2016	11 :00	257	16
K1314010	Le Mesvrin à Mesvres	31/05/2016	16 :00	202	35
K1251810	L'Arroux à Dracy Saint Loup	31/05/2016	19 :00	776	135
K1724210	L'Aron à Châtillon en Bazois	31/05/2016	19 :00	179	19
K1284810	La Selle à la Celle en Morvan	31/05/2016	21 :00	138	11
K1914510	L'Acolin à Saint Germain Chassenay	31/05/2016	22 :00	384	13
K1321810	L'Arroux à etang sur Arroux	01/06/2016	09 :00	1798	177
K1383010	La Bourbince à Ciry le Noble	01/06/2016	10 :00	343	65
K1173210	L'Arconce à Montceaux l'étoile	01/06/2016	19 :00	599	63
K1753110	La Dragne à Vandenesse	01/06/2016	19 :00	115	45
K1764010	L'Alene à Cercy la Tour	01/06/2016	21 :00	338	21
K1713010	La Besbre à Saint Prix	02/06/2016	00 :00	360	16
K1833010	L'Aron à Verneuil	02/06/2016	09 :00	1465	46
K1773010	La Canne à Montigny sur Canne	02/06/2016	11 :00	179	198
K7514010	L'Échandon à Saint-Branchs	01/06/2016	01 :00	127	25
K7433030	L'Indrois à Genillé	31/05/2016	22 :00	396	148
K7202610	L'Indre à Ardentes	31/05/2016	15 :00	697	93
K7022620	L'Indre à Montgivray	31/05/2016	22 :00	227	21
K6593020	Le Fouzon à Meusnes	31/05/2016	23 :00	1008	183
K6453010	La Rère à Theillay	31/05/2016	19 :00	252	114
K6373020	La Petite Sauldre à Ménétréol-sur-Sauldre	31/05/2016	20 :00	318	96
K6022420	L'Arnon à Loye-sur-Arnon	01/06/2016	20 :00	268	20
K5623010	L'Auron au Pondy	01/06/2016	15 :00	207	27
K5574100	Le Moulon à Asnieres les Bourges	31/05/2016	08 :00	104	33
K5552300	L'Yèvre à Savigny-en-Septaine	02/06/2016	22 :00	540	48
K5433020	La Marmande à Saint-Pierre-les-Étieux	01/06/2016	05 :00	206	23
K5383020	L'Aumance à Hérisson	01/06/2016	06 :00	928	133
K5234010	La Magieure à Vaux	31/05/2016	19 :00	194	23
K5183020	La Tardes à Chambon-sur-Voueize	01/06/2016	14 :00	854	68
K5090900	Le Cher à Chambonchard	01/06/2016	05 :00	517	41

Tableau 7 – Liste des bassins versants sous la surveillance du SPC LCI avec le débit maximum atteint lors de la crue de mai-juin 2016

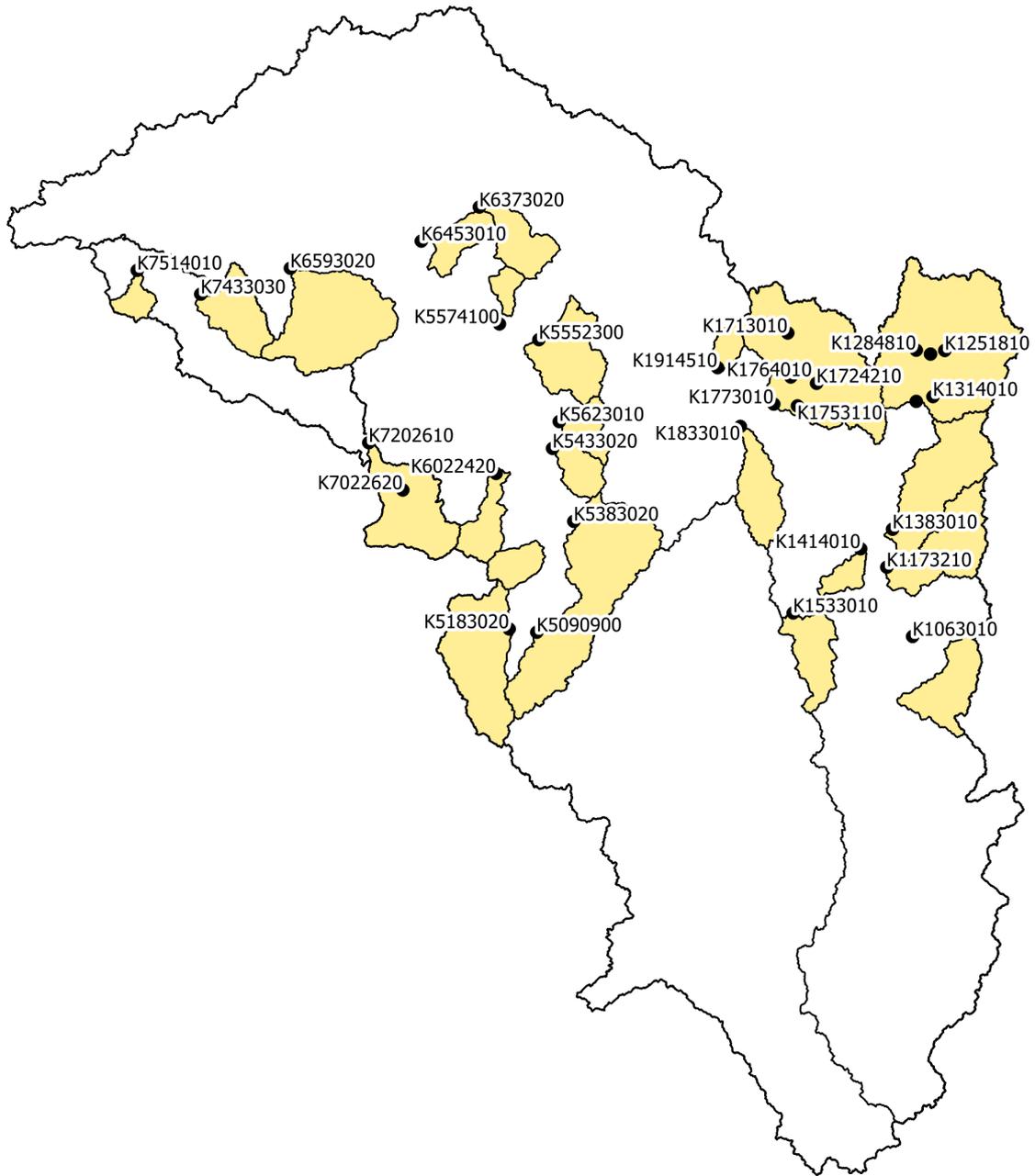


FIGURE 31 – Carte référençant les bassins de l'étude pour le SPC LCI. Noms correspondants aux codes dans le tableau de l'annexe 6

Résumé

La prévision des inondations consiste en l'utilisation de modèles hydrologiques pour estimer, en termes de volume et de propagation, le comportement d'un cours d'eau en réponse à des précipitations. Ce sont les Services de Prévisions des Crues (SPC), services de l'Etat qui sont responsables de l'anticipation des crues, par le biais de l'utilisation de modèles de prévision, tel que le modèle GRP développé à Irstea.

Entre le 28 mai et le 11 juin 2016, les bassins de la Seine et de la Loire ont été touchés par un phénomène météorologique intense et persistant, à l'origine de débordements de nombreux cours d'eau, et de dégâts importants sur ces territoires.

De ce fait, un retour sur les prévisions faites pendant l'évènement de crue de la fin du printemps 2016 était nécessaire, pour comprendre si le modèle avait si mal prévu la crue que ce que laissaient entendre les rapports officiels.

Pour cela, des données d'entrée de précipitation, de différents types étaient à disposition, afin d'estimer la part de responsabilité du modèle et des entrées du modèle. Les données de pluies étaient des données observées, prévues par le modèle AROME-PI, et de type bulletins de prévisions.

Les différentes simulations réalisées montrent une sous-estimation assez générale des prévisions du modèle GRP, sur cet événement et sur les 102 bassins étudiés, avec des différences de prévisions de débit liées notamment à la qualité des prévisions de pluie en entrée et surtout à l'échéance à laquelle cette prévision de débit est réalisée. L'évaluation des performances du modèle nous permet de conclure à la sous-estimation majoritaire des débits prévus sur les bassins du SPC SmYL, et moindre sur les bassins du SPC LCI.

Mots clés : prévisions des crues, modèle hydrologique, crue exceptionnelle, Seine, Loire, performances.