HAL
open science

Amélioration de l'approche AIGA par l'intégration des pluies prévues

J. Demargne, P. Javelle

To cite this version:

J. Demargne, P. Javelle. Amélioration de l'approche AIGA par l'intégration des pluies prévues. [Rapport de recherche] irstea. 2013, pp.71. hal-02606074

HAL Id: hal-02606074

https://hal.inrae.fr/hal-02606074v1

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

PROGRAMME MEDDE (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2013
Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Action « Prévision des inondations »
AXE III : « Avertissement crues soudaines en site non jaugé»
Action A2

Amélioration de l'approche AIGA par l'intégration des pluies prévues

Julie Demargne (HYDRIS-Hydrologie)

Coordinateur : Pierre Javelle (Irstea Aix-en-Provence)

Février 2014

Table des Matières

Résumé 3
1. Objectifs et Méthodologies 5
   a) Système d'anticipation des crues rapides AIGA 5
   b) Méthodologies d'intégration des prévisions de pluie dans le système AIGA 7
   c) Types de prévisions de pluie 8
   d) Objectifs de l'étude 9
2. Données et Modélisation Hydrologique 10
   a) Zones d'étude et bassins versants 10
   b) Modélisation hydrologique et données d'observations 11
   c) Prévisions de pluie 14
   d) Sélection des évènements 16
3. Intégration des Prévisions de Pluie 16
   a) Croisement avec la pluie critique de bassin 17
   b) Prévisions de débit 26
4. Evaluation de l'apport des prévisions de pluie 29
   a) Méthodologie d'évaluation de la qualité des alertes 30
   b) Qualité des alertes en zone Meuse-Moselle 33
   c) Apport des prévisions de pluie pour la région Sud-Est 40
   d) Apport des prévisions de pluie pour la région Rhône-Cévennes 46
   e) Intérêt des deux approches d'alerte 50
5. Conclusions et Perspectives 52
6. Références 55
Appendice A : Listes des Bassins Versants 57
Appendice B : Listes des Evènements 66
Appendice C : Liste des Figures et des Tableaux 68

Résumé

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'apport potentiel de l'intégration des prévisions de pluie dans le système d'anticipation des crues rapides AIGA pour améliorer la détection et l'anticipation des phénomènes de crues rapides. Ce travail prépare le développement d'un nouveau service de vigilance de crue pour le SCHAPI et les SPC, sur des bassins dits prioritaires, dont le temps de réaction varie entre 2h et 6h et pour lesquels des enjeux ont été identifiés concernant le risque de crue soudaine.

Deux approches sont proposées pour intégrer les prévisions de pluie. La première approche s'appuie sur l'estimation de la pluie critique de bassin, nécessaire pour initier le dépassement du seuil de débit sur le bassin versant. La pluie critique est alors comparée avec les prévisions de pluie pour émettre ou non un avertissement de dépassement du seuil de débit. La deuxième approche consiste à intégrer directement les prévisions de pluie dans le modèle hydrologique du système AIGA pour générer des prévisions de débit. Cette approche est notamment pertinente grâce à la prise en compte des incertitudes de prévisions de pluie en intégrant des prévisions d'ensembles. Cette deuxième approche permet de considérer la distribution spatio-temporelle des pluies futures, alors que la première approche considère une pluie critique de bassin d'intensité constante et uniforme sur le bassin. Les alertes de dépassement de seuil de débit sont donc exprimées différemment pour chacune des deux approches : dépassement exprimé en termes de pluie par comparaison des prévisions d'ensemble de pluie avec la pluie critique de bassin pour la première approche ; dépassement exprimé en termes de débit pour la seconde approche par comparaison entre les prévisions d'ensemble de débit et le seuil de débit.

Ces deux types d'alerte sont comparés aux alertes obtenues avec le système AIGA actuel, qui n'inclut aucune pluie future, pour illustrer l'apport potentiel de l'intégration de ces prévisions de pluie pour chacune des approches. Les alertes sont aussi comparées aux dépassements observés. L'évaluation porte sur les scores de contingence pour la détection des dépassements du seuil de débit et sur le degré d'anticipation des alertes.

L'étude se base sur les améliorations de la modélisation hydrologique du système AIGA proposées par Organde (2013) pour l'extension du domaine d'applicabilité d'AIGA au territoire national. Trois zones d'étude ont été sélectionnées en partenariat avec le SCHAPI : Meuse-Moselle, Rhône-Cévennes, et Sud-Est.

Les prévisions de pluie mises à disposition par Météo-France sont les prévisions déterministes horaires du modèle AROME, à la résolution de 2,5 km pour une échéance de 30 heures, produites 4 fois par jour. La fine résolution d'AROME permet de modéliser les processus convectifs, qui sont essentiels pour les alertes aux crues rapides. Les prévisions déterministes successives sont utilisées pour produire des prévisions d'ensemble au pas de temps horaire par décalage temporel, appelées AROME-timelag, avec 3 membres pour des échéances de 9h ou 12 h (suivant l'heure d'initialisation de prévision). L'utilisation de prévisions d'ensemble de pluie et débit a permis de définir une prévision probabiliste en fonction du nombre de membres dépassant le seuil considéré. Pour analyser l'apport des prévisions d'ensemble vis-à-vis de prévisions déterministes, différentes prévisions déterministes sont également évaluées : les prévisions déterministes AROME, la moyenne de la prévision d'ensemble AROME-timelag, et la prévision de pluie persistante.

Le risque hydrologique de dépassement du seuil de débit est représenté et analysé avec les informations suivantes :

- les cartes de pluie critique pour tous les bassins (les bassins étant triés par surface décroissante pour visualiser les valeurs sur les bassins emboîtés), afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit ;
- les graphes de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h et 6h pour un seuil de débit donné avec les différentes prévisions de pluie ;
- les cartes de ratio entre prévision de pluie et pluie critique pour une durée et un seuil de débit donnés pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure à la pluie critique ;
- les cartes de probabilité des prévisions d'ensemble de débit de dépasser le seuil de débit pour une mise en alerte des bassins lorsqu'un ou plusieurs membres de la prévision d'ensemble dépassent ce seuil ;
- les cartes d'alerte du système AIGA actuel et les cartes des dépassements observés, avec une représentation par bassin versant similaire aux cartes de pluie critique.

L'analyse des avertissements sur les évènements étudiés montre l'amélioration de la détection des dépassements du débit biennal, ainsi que le gain en anticipation grâce à la prise en compte des pluies futures dans le modèle hydrologique ; l'amélioration est très significative par rapport au système AIGA actuel. Les résultats des ensembles AROME-timelag construits par décalage temporel sont meilleurs que ceux des prévisions déterministes de pluie AROME, y compris pour la prévision déterministe la plus récente et la prévision moyenne des 3 ensembles de pluie. Les erreurs des prévisions de pluie peuvent parfois contrebalancer les erreurs du modèle hydrologique pour obtenir de meilleurs résultats en détection et anticipation en comparaison avec les prévisions de débit issues de la pluie observée. L'intérêt de prendre en compte la distribution spatio-temporelle des prévisions de pluie pour les alertes issues des prévisions d'ensemble de débit (distribution spatio-temporelle qui n'est pas considérée par croisement avec la pluie critique de bassin) est variable selon les évènements et les bassins, mais généralement bénéfique.

Les perspectives d'améliorations pour le système d'alerte AIGA incluent l'intégration de prévisions d'ensemble de pluie plus réalistes, notamment grâce aux prévisions d'ensembles des modèles atmosphériques (telles que les prévisions multi-modèles COSMO-DE-EPS disponibles sur le tiers Nord-Est de la France), et la prise en compte des sources d'incertitude du modèle hydrologique, qui concernent les paramètres de la modélisation hydrologique, les conditions initiales, ainsi que les pluies observées.

Les deux approches qui produisent des alertes en termes de pluie et en termes de débit sont complémentaires. La première approche permet de communiquer une information spatiale de seuils critiques de cumuls de pluie future en faisant l'hypothèse qu'un scenario de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin est réaliste. Cette information de pluie critique peut permettre aux prévisionnistes d'affiner leur expertise des prévisions de pluie en fonction de ces seuils. La seconde approche d'intégration de prévisions d'ensemble de pluie dans la modélisation hydrologique permet de pleinement prendre en compte la distribution spatio-temporelle des pluies futures telle que décrite par les prévisions météorologiques, distribution qui est a priori plus variable pour des échéances de prévision plus longues. Un système de prévision d'ensemble de débit permettra aussi d'intégrer plus facilement d'autres sources d'incertitude, comme les incertitudes hydrologiques ou les incertitudes sur les températures futures si une modélisation des processus de neige est prise en compte, pour produire des prévisions probabilistes de débit potentiellement plus fiables et donc améliorer la qualité des alertes.

1. Objectifs et Méthodologies

Les crues rapides sont typiquement produites par de fortes pluies et par un ruissellement très productif des bassins et correspondent bien souvent à des phénomènes très locaux et évoluant rapidement (Borga *et al*. 2007). L'amélioration des systèmes d'alerte pour les crues soudaines reste critique vu l'impact socio-économique de tels phénomènes (Gaume *et al.* 2009). De nouvelles perspectives d'amélioration sont envisageables, notamment grâce aux développements de modèles hydrologiques globaux ou distribués à plus fine échelle, à la plus grande disponibilité de systèmes de mesure directe ou indirecte des variables hydrométéorologiques (débit, pluie, humidité, etc.), ainsi qu'à l'amélioration des prévisions hydrométéorologiques, et plus particulièrement des prévisions de pluie pour les évènements convectifs (Javelle *et al.* 2013).

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'apport potentiel de l'intégration des prévisions de pluie dans le système d'anticipation des crues rapides AIGA pour améliorer la détection et l'anticipation des phénomènes de crues rapides pour des petits bassins, qu'ils soient jaugés ou non jaugés. Ce travail prépare le développement d'un nouveau service d'avertissements expertisés Crues Soudaines pour le SCHAPI et les SPC, sur des bassins dits prioritaires, dont le temps de réaction varie entre 2h et 6h et pour lesquels des enjeux ont été identifiés concernant le risque de crue soudaine. Sachant que ces bassins ont des temps de réaction inferieure à 6h, il est critique d'identifier au mieux les secteurs géographiques les plus sensibles au risque de crue et d'améliorer l'anticipation des alertes pour ces phénomènes.

L'étude réalisée pour le SCHAPI par Demargne (2013) a porté sur l'application de la méthode opérationnelle américaine d'alerte aux crues rapides, dite Flash Flood Guidance (Georgakakos 2006), au système AIGA. Cette étude a montré l'intérêt de communiquer la sensibilité hydrologique ou le risque de dépassement de seuil de débit des bassins en termes de pluie critique, ainsi que l'amélioration en termes d'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA. Dans la continuité de ce travail, on propose d'affiner l'information de risque de dépassement du seuil de débit par la prise en compte de prévisions d'ensembles de pluie, qui permettent de considérer les incertitudes de la pluie future, notamment pour des phénomènes de pluie intense très localisés et évoluant rapidement. Ces prévisions de pluie peuvent être croisées avec les informations de pluie critique ou utilisées directement en entrée de la modélisation hydrologique pour produire des prévisions de débit dans l'objectif d'améliorer la qualité des alertes du système AIGA. Ces deux approches d'intégration des prévisions de pluie dans le système AIGA sont testées dans cette étude.

a) Système d'anticipation des crues rapides AIGA

Pour l'alerte aux crues rapides sur des bassins non jaugés, Météo-France et Irstea (anciennement appelé Cemagref) ont développé le système d'anticipation des crues rapides AIGA (cf. Figure 1). Le système est opérationnel sur les régions Languedoc-Roussillon et Provences Alpes Côte d'Azur depuis 2005.

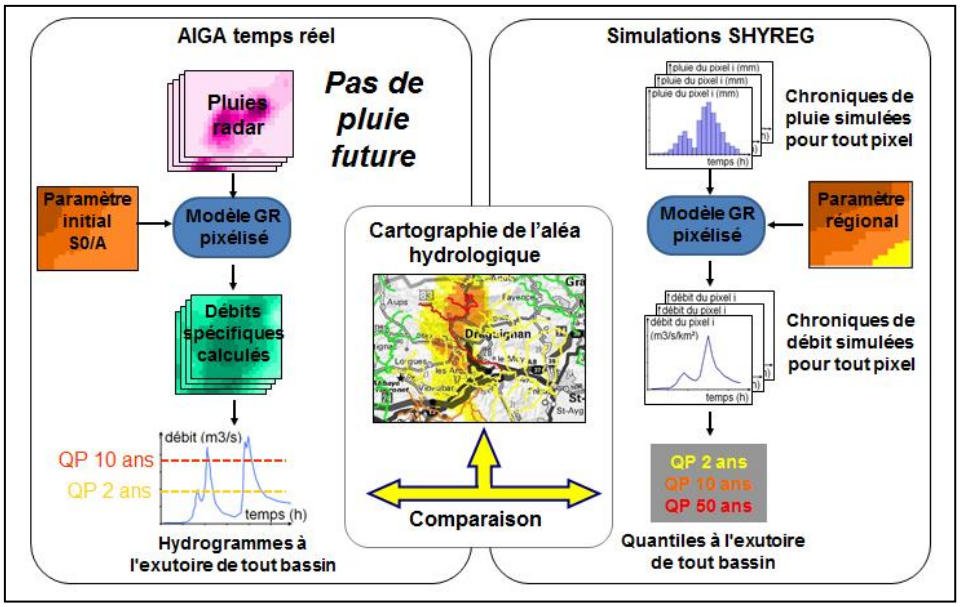

Figure 1 : Chaîne d'alerte aux crues rapides du système AIGA actuel utilisant la base de quantiles de débit estimés par la méthode régionalisée SHYREG (adapté de Ronsoux Fouchier, 2010)

Le système AIGA, opérationnel depuis 2005 sur le pourtour méditerranéen, affiche, en temps réel et toutes les 15 minutes, des cartes de risque hydrologique pour chacun des cours d'eaux de la zone méditerranéenne (Javelle *et al*, 2010 et 2011). Ce système est basé sur un modèle hydrologique distribué de type GR qui intègre, pour chaque pixel de 1x1km^2, les pluies produites par Météo-France (à partir des radars et des stations pluviométriques) pour estimer le débit en chacun des points des cours d'eau. La modélisation hydrologique permet de considérer l'impact de l'état hydrique des sols et des propriétés physiographiques du bassin versant sur sa réponse aux pluies.

En temps réel, les débits de pointe pour chaque bassin sont comparés aux quantiles de débits de pointe préalablement estimés par la méthode régionalisée SHYREG. Cette méthode associe un simulateur stochastique de pluies horaires (Arnaud et al. 2008) au modèle pluie-débit distribué GR à la résolution kilométrique (Arnaud & Lavabre, 2002). Les quantiles de débit de périodes de retour de 2 ans à 100 ans (et pour différentes durées) sont estimés à partir des distributions de fréquence empiriques des valeurs maximales extraites des très longues chroniques de débit simulées au km^2. Une base de quantiles de crues est alors définie en agrégeant les quantiles de crue des pixels du bassin grâce à une règle d'abattement fonction de la surface du bassin versant (Ronsoux Fouchier, 2012). La régionalisation de la méthode SHYREG est décrite par Organde et al. (2012). La base de quantiles de débit de pointe et de débits pour les durées de 1h à 72h pour les périodes de retour de 2 ans à 100 ans est fournie sur la France métropolitaine pour tout bassin versant de superficie comprise entre 10 et 2000 km^2.

Pour décrire le risque hydrologique de crue en temps réel, les débits de pointe estimés le long des cours d'eau sont comparés aux quantiles de débits de pointe de SHYREG. Un code de trois couleurs permet de cartographier la période de retour estimée le long des cours d'eau pour les catégories suivantes : entre 2 et 10 ans, entre 10 et 50 ans, et supérieur à 50 ans. Ces cartes sont réactualisées toutes les 15 minutes et disponibles pour les services du SCHAPI et des SPC des régions du Sud-Est pour leur permettre d'émettre, si nécessaire, les bulletins d'alerte aux crues.

Le système AIGA actuel n'intègre aucune prévision de pluie et se base uniquement sur l'observation fournie par le réseau des radars météorologiques et les stations pluviométriques de Météo-France.

En vue de l'application d'un système d'anticipation de crues rapides sur le territoire français de métropole, des travaux d'étude de faisabilité de l'extension de la méthode AIGA, notamment pour la calibration et régionalisation de la modélisation hydrologique, ont été réalisées en 2012 et 2013 par Organde. En particulier, les travaux de 2013 ont permis de tester différentes options de modélisation hydrologique, évènementielle ou continue, distribuée, semi-distribuée ou globale, ainsi que différents critères de calibration et différentes méthodes de régionalisation, afin de déterminer la ou les modélisations hydrologiques les plus pertinentes pour un système d'alerte national.

Une piste complémentaire d'amélioration du système AIGA consiste à intégrer des prévisions de pluie, notamment grâce aux développements et à la plus grande disponibilité de prévisions de pluie à plus fine échelle spatio-temporelle, issues d'une meilleure modélisation des phénomènes de pluie intense par les modèles atmosphériques numériques. Cette étude a pour objectif de montrer l'apport de prévisions de pluie à fine échelle, en utilisant des prévisions opérationnelles produites par Météo-France. Le travail est mené avec une des modélisations hydrologiques testées par Organde (2013). Cette modélisation hydrologique est actuellement en cours d'amélioration pour définir la modélisation hydrologique qui sera implémentée d'ici à 2015 pour l'extension nationale du système d'alerte AIGA.

b) Méthodologies d'intégration des prévisions de pluie dans le système AIGA

L'objectif de cette étude est de juger de l'apport potentiel de l'intégration de scénarios de pluie future dans le système AIGA, notamment en termes de détection des dépassements de seuils de débit et d'anticipation. Deux approches d'intégration de l'information de pluie future sont proposées dans cette étude.

La première approche s'appuie sur l'estimation de la pluie critique de bassin, à partir de scénarios de pluie future d'intensité constante, de plus en plus pessimistes en termes d'intensité, qui sont intégrés dans la modélisation hydrologique. La pluie critique moyenne de bassin, correspondant à la pluie nécessaire pour initier le dépassement du seuil de débit sur le bassin versant, est alors comparée avec une ou des prévisions de pluie pour déterminer de l'alerte potentielle suivant chacune des prévisions de pluie retenues. Cette approche est actuellement mise en œuvre aux Etats-Unis par le service opérationnel d'alerte aux crues éclairs du National Weather Service (NWS) (Georgakakos 2006, Demargne et Javelle 2012). Elle permet une estimation simple d'une valeur de pluie nécessaire pour initier un débordement en tenant compte de l'état hydrique actuel du bassin et des procédés hydrologiques mis en jeu. Ces valeurs indicatives de pluie critique (appelée Flash Flood Guidance (FFG)) nécessitent d'être interprétées par les prévisionnistes, notamment pour prendre en compte les performances de la modélisation hydrologique et la qualité des observations de pluie et débit utilisées en entrée du modèle. Les cartes de pluie critique facilitent la comparaison avec les données spatialisées de pluie, disponibles en temps réel, pour déterminer les zones de risque d'inondation.

L'étude réalisée pour le SCHAPI par Demargne (2013) a montré l'intérêt de l'information de pluie critique avec le système AIGA, notamment en termes de communication du risque hydrologique potentiel exprimé en termes de pluie. Ceci facilite les discussions entre les prévisionnistes des Services de Prévision de Crue (SPC) et de Météo-France et la prise en compte de la sensibilisation hydrologique aux pluies pour les différents bassins versants. En identifiant les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuils de débit, les cartes de pluie critique peuvent permettre d'affiner les prévisions expertisées de pluie dans les heures à venir pour les secteurs jugés sensibles. L'information de pluie critique peut également être facilement croisée avec une ou des prévisions de pluie choisie(s) par le prévisionniste (prévision expertisée ou non) pour en déduire des avertissements sur les dépassements possibles des seuils de débit considérés.

La deuxième approche consiste à intégrer directement les prévisions de pluie dans le modèle hydrologique du système AIGA pour générer des prévisions de débit. Cette approche est notamment pertinente grâce à la prise en compte des incertitudes de prévisions de pluie en intégrant des prévisions d'ensembles, comme expliqué dans la section suivante. Dans cette deuxième approche, les alertes sont alors basées sur la comparaison des prévisions de débit aux seuils de débit. Cette approche permet de considérer la distribution spatio-temporelle des pluies futures lors de la génération des prévisions de débit, alors que la première approche considère une pluie critique de bassin d'intensité constante et uniforme sur le bassin.

Les alertes de dépassement de seuil de débit sont donc exprimées différemment pour chacune des deux approches :

- dépassement exprimé en termes de pluie par comparaison entre prévision de pluie et pluie critique de bassin relative au seuil de débit choisi pour la première approche ;
- dépassement exprimé en termes de débit par comparaison entre prévision de débit et seuil de débit pour la seconde approche.

Ces deux types d'alerte sont comparés aux alertes obtenues avec le système AIGA actuel, qui n'inclut aucune pluie future, et aux dépassements de seuil de débit observés pour illustrer l'apport potentiel de l'intégration de ces prévisions de pluie pour chacune des approches.

c) Types de prévisions de pluie

Dans cette étude, différentes prévisions de pluie sont utilisées pour estimer la qualité des alertes de dépassement de seuil de débit selon les deux approches. Reconnaissant la nécessité de prendre en compte les incertitudes sur les prévisions de pluie à une échelle spatio-temporelle fine et pour des évènements de pluie intense, l'étude utilise des prévisions d'ensembles de pluie, auxquelles sont comparées des prévisions déterministes.

Les prévisions d'ensembles permettent de quantifier les différentes sources d'incertitude dans un système de prévisions hydrométéorologiques grâce à l'utilisation d'un grand nombre de scenarios équiprobables. Ces incertitudes sont issues de la variabilité (naturelle ou causée par l'homme) des phénomènes modélisés et des variables, des modélisations imparfaites de ces phénomènes, ainsi que des limitations en termes de mesures et données disponibles. Pour un système de prévision hydrométéorologique, on différencie généralement (Demargne et al. 2014):

- les incertitudes météorologiques liées aux observations et prévisions des variables atmosphériques (ex. pluie et température) qui sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques,
- les incertitudes hydrologiques, provenant des états initiaux des modèles hydrologiques, des paramètres de ces modèles, de la structure des modèles, et des régulations potentielles de débit.

Grâce à la prise en compte des incertitudes des prévisions, il est possible d'intégrer ces différents scenarios équiprobables sur des horizons plus longs, même si la prédictibilité de ces prévisions est faible. A partir de prévisions d'ensembles équiprobables, on peut en déduire la probabilité d'un évènement futur, tel que le dépassement d'un seuil. En donnant de manière objective des niveaux de confiance aux prévisions, les prévisionnistes et utilisateurs peuvent considérer des niveaux de risque acceptable pour différentes applications et leur prise de décision peut donc être optimisée (Demargne et al. 2014).

Dans cette étude, seules les incertitudes sur les prévisions de pluie sont considérées. Des perspectives de travail relatives aux incertitudes sur les pluies observées et aux incertitudes hydrologiques, sont données en conclusion. Pour évaluer l'apport des prévisions d'ensemble de pluie par rapport à des prévisions déterministes, différentes prévisions déterministes sont également intégrées au système AIGA :

- la pluie observée, qui correspond à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ;
- la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation de la prévision et constante pour toute l'échéance de la prévision ;
- la moyenne des prévisions d'ensemble de pluie, qui est souvent employée en prévision opérationnelle comme la meilleure prévision déterministe issue d'une prévision d'ensemble.

d) Objectifs de l'étude

Le travail proposé répond aux trois objectifs suivants :

1) intégrer les prévisions d'ensemble de pluie dans le système AIGA pour générer des alertes de dépassement de seuil de débit suivant deux approches complémentaires : i) en estimant la pluie critique moyenne de bassin relative au seuil de débit pour une ou plusieurs durées et en la ou les comparant aux ensembles de pluie ; les alertes sont donc exprimées en terme de pluie ; ii) en intégrant ces prévisions d'ensemble de pluie dans la modélisation hydrologique pour produire les prévisions d'ensemble de débit qui reflètent les incertitudes de pluie et générer des alertes de dépassement de seuil de débit ; les alertes sont exprimées en terme de débit ;
2) proposer des représentations synthétiques des informations de prévisions et d'incertitude obtenues avec les deux approches proposées, notamment en termes de probabilité de dépassement du seuil fixe ou du nombre de membres de l'ensemble dépassant ce seuil, afin de faciliter la prise de décision du prévisionniste ;
3) évaluer la pertinence des prévisions d'ensembles de pluie et de débit vis-à-vis de la prévision déterministe notamment en termes de qualité de l'alerte ; l'évaluation inclut les critères issus des tables de contingence des alertes (ex. taux de bonnes alertes, taux d'alertes manquées) ainsi que le degré d'anticipation des alertes par comparaison des dépassements prévus avec les dépassements de seuil de débit observés et les alertes du système AIGA actuel (sans pluie future) .

2. Données et Modélisation Hydrologique

Le travail de cette étude utilise les données de débit et une des modélisations hydrologiques de l'étude réalisée par Organde (2013) sur la faisabilité d'une extension nationale de la méthode AIGA. Les deux modèles hydrologiques retenus ici ont été calibrés par Organde (2013) sur la période 2002-2006 avec des données de pluie radar ré-analysées. Ils sont utilisés dans cette étude pour générer les simulations et prévisions de débit sur la période 2009-2012 avec les données de pluie radar-pluvio opérationnelles (appelées pluie « Panthère ») sur trois zones d'étude choisis en collaboration avec le SCHAPI.

a) Zones d'étude et bassins versants

Pour évaluer l'apport des prévisions de pluie pour le système AIGA, nous avons choisi trois zones d'étude correspondant à des régimes hydro-climatiques différents et pour lesquelles des enjeux pour les alertes aux crues rapides avaient déjà été identifiées par le SCHAPI et les SPC concernés. Deux des zones d'étude sont situées sur les régions Rhône-Cévennes et Sud-Est, régions couvertes au moins partiellement par le système AIGA actuel (opérationnel sur les régions Languedoc-Roussillon et PACA). La troisième zone est située dans le secteur Meuse-Moselle afin de tester, sur une zone non couverte par le système AIGA actuel, des potentielles améliorations apportées à la modélisation hydrologique pour son application à l'ensemble du territoire de métropole.

Les bassins versants de chacune de ces trois zones d'étude sont issus de la liste des stations hydrométriques banque HYDRO de la base de bassins versants du SCHAPI, ainsi que de la sélection des bassins réalisée par Organde (2013) pour étudier la faisabilité d'une extension nationale de la méthode AIGA. Les critères de sélection des bassins sont les suivants (Organde 2013) :

- les données de débit observées sont disponibles sur la période de calibration et régionalisation de la modélisation hydrologique 2001-2006 avec un taux de lacune inferieur jusqu'à 10% ;
- les stations hydrométriques sont à une distance maximale de 100 km d'un radar opérationnel pour assurer une bonne qualité de la lame d'eau observée issue du signal radar ;
- les surfaces de bassin versant sont inférieures à 1 000 km² ;
- les bassins versant sont « peu influencés » par les ouvrages hydrauliques ; la sélection est basée sur l'indice de confiance de Caruso (2012), estimé pour la méthode SHYREG en tout pixel de 50 m x 50 m et défini comme le ratio entre la superficie drainée par le(s) barrage(s) situé(s) sur le bassin versant et la surface du bassin versant à l'exutoire ; les bassins pour lesquelles l'indice de confiance est inférieur à 0,2 (influence dite faible selon Caruso (2012)) ont été retenus.

La sélection réalisée par Organde (2013) inclut 940 bassins sur le territoire national, ce qui conduit aux sélections suivantes de bassins versants pour les trois zones d'étude :

- zone Meuse-Moselle : sur les 98 bassins de la base de données SCHAPI, 92 bassins sont utilisés pour la calibration de la modélisation hydrologique (cf. Figure 2 avec une représentation des bassins par classes de surface drainée et le graphe de distribution des surfaces) ; la médiane des surfaces est de 186 km^2, la surface variant de 5 km^2 à

997 km^2 ; les caractéristiques des bassins versants (incluant identifiants, noms, quantiles de débit SHYREG version 1) sont données en Appendice A ;

- zone Rhône-Cévennes : sur les 112 bassins de la base de données SCHAPI, 50 bassins ont été calibrés (cf. Figure 3) ; les surfaces des bassins calés varient entre 10 km^2 et 945 km^2 avec une valeur médiane de 81 km^2;
- zone Sud-Est : sur les 73 bassins de la base de données SCHAPI, 35 bassins ont été calibrés (cf. Figure 3) ; les surfaces des bassins calés sont comprises entre 10 km^2 et 584 km^2 avec une valeur médiane de 165 km^2.

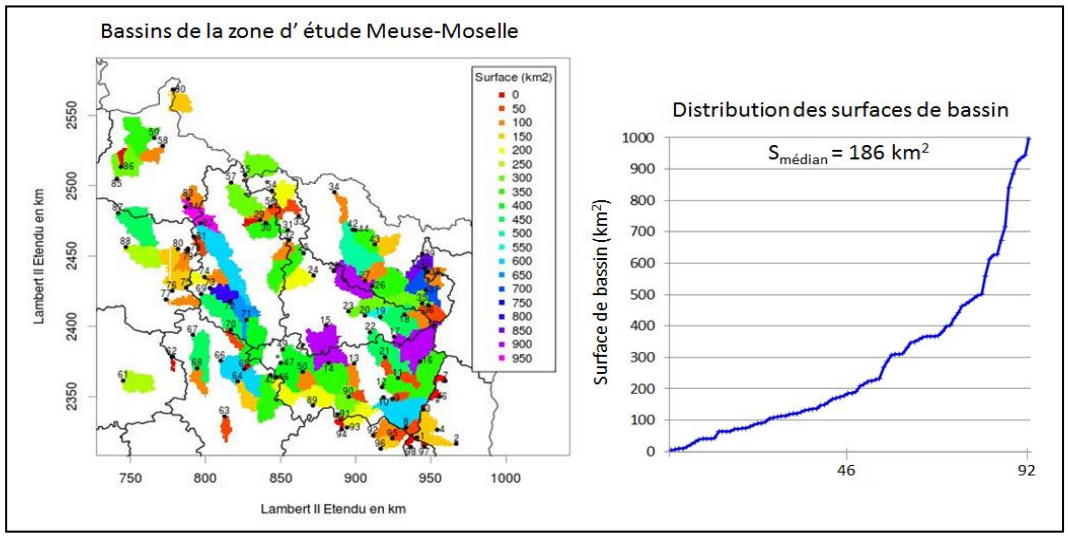

Figure 2 : Localisation des 92 bassins versants de la zone d'étude Meuse-Moselle (bassins représentés par classes de surface de bassin avec leur identifiant de bassin (cf. Appendice A)) et distribution des surfaces de bassin ; les exutoires en gris correspondent aux bassins non calés de la base de données SCHAPI

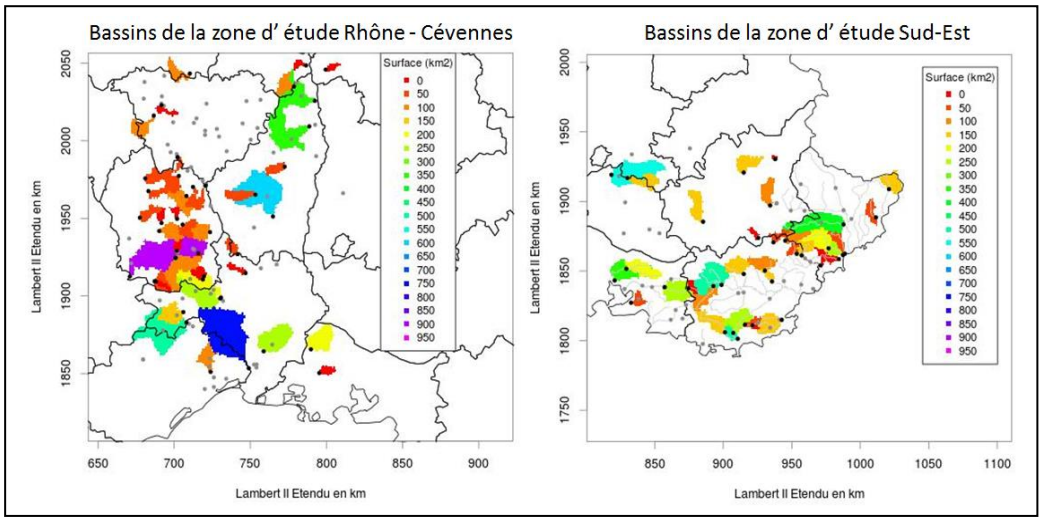

Figure 3 : Localisation des 50 bassins versants calés de la zone d'étude Rhône – Cévennes et des 35 bassins calés de la zone d'étude Sud-Est (bassins représentés par classes de surface) ; les exutoires en gris correspondent aux bassins non calés de la base de données SCHAPI, et en noir aux bassins calés

b) Modélisation hydrologique et données d'observations

La modélisation hydrologique retenue dans cette étude est l'une des modélisations de type GR calibrées et régionalisées par Organde (2013). Comme le montre le schéma de la Figure

4, la modélisation hydrologique s'appuie sur le couplage de deux modèles (cf. Organde 2013 pour plus de détails) :

- le modèle continu global journalier GR4J à quatre paramètres (Edijatno et al., 1999, Perrin, 2002, Perrin et al., 2003), qui fournit le taux de remplissage du réservoir (SAJ) comme indicateur de l'état de saturation des sols pour l'initialisation du réservoir de production du modèle horaire, ainsi que le débit journalier pour l'initialisation du niveau du réservoir de transfert du modèle horaire au début de l'événement (lorsque la pluie journalière de bassin dépasse 10 mm).
- le modèle évènementiel horaire semi-distribué, noté GR-SD, basé sur une adaptation du modèle GR distribué du système AIGA actuel pour utiliser une production distribuée, calculée avec un réservoir de production en chaque pixel du bassin, et un transfert global de bassin, estimé avec un unique réservoir de transfert.

Le calage des deux modèles GR4J et GR-SD a été réalisé à partir des données de pluie radar ré-analysées de Météo-France (COMEPHORE) sur la période 2001-2006. Les critères d'optimisation retenus sont les suivants (cf. Organde 2013 pour plus de détails):

- pour le modèle GR4J, le critère de Nash borné (entre -1 et 1), donné par la formule : Nash/(2-Nash) ; ce critère a des valeurs légèrement inférieures aux valeurs du critère de Nash habituel (ex. valeur de Nash de 0,8 correspondant à une valeur de Nash borné de 0,67) ;
- pour le modèle GR-SD, utilisant en entrée les débits journaliers du modèle GR4J calé, le critère de Nash Pseudo-Continu Décalé (NPCD) ; ce critère correspond au critère de Nash borné calculé sur les débits simulés et observés en mettant les différents évènements de crues bout à bout et avec un décalage de l'hydrogramme simulé pour chaque évènement compris entre 1h et 14h, la valeur retenue du NPCD étant le plus fort Nash borné calculé.

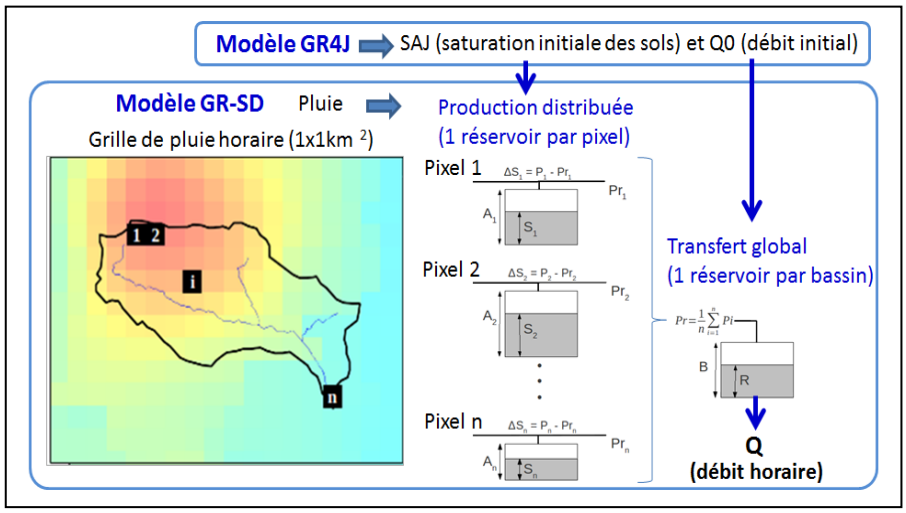

Figure 4 : Schéma du couplage du modèle journalier continu GR4J et du modèle horaire semi-distribué GR-SD utilises pour les simulations et prévisions de débit (adapté de l'étude Organde 2013)

Les données hydrométriques proviennent de la banque HYDRO dans sa version de 2013, avant la critique et l'actualisation de ces valeurs par les SPC. Les informations sur la qualité des données hydrométriques recueillies à l'automne 2013 par le SCHAPI auprès des SPC ont pu être prises en compte par Organde à partir de janvier 2014.

Pour cette étude, les données d'observations de pluie proviennent des données spatialisées opérationnelles (appelées pluie « Panthère ») produites par Météo-France toutes les 15 minutes à la résolution spatiale de 1 km^2, à partir des systèmes radars et des stations pluviométriques (Tabary, 2007; Tabary et al., 2007).

Les Figures 5 et 6 montrent des exemples de simulation des débits par le modèle journalier continu GR4J et par le modèle horaire semi-distribué GR-SD. Les résultats de calibration (donnés en terme de Nash borné pour GR4J et en terme de Nash borné décalé pour GR-SD) ont un impact direct sur la qualité des débits simulés et donc sur la qualité des débits prévus. On peut noter dans les Figures 5 et 6 une tendance à la sous-estimation des crues pour les deux modèles pour le bassin de la Doller à Sewen sur la période 2009-2012.

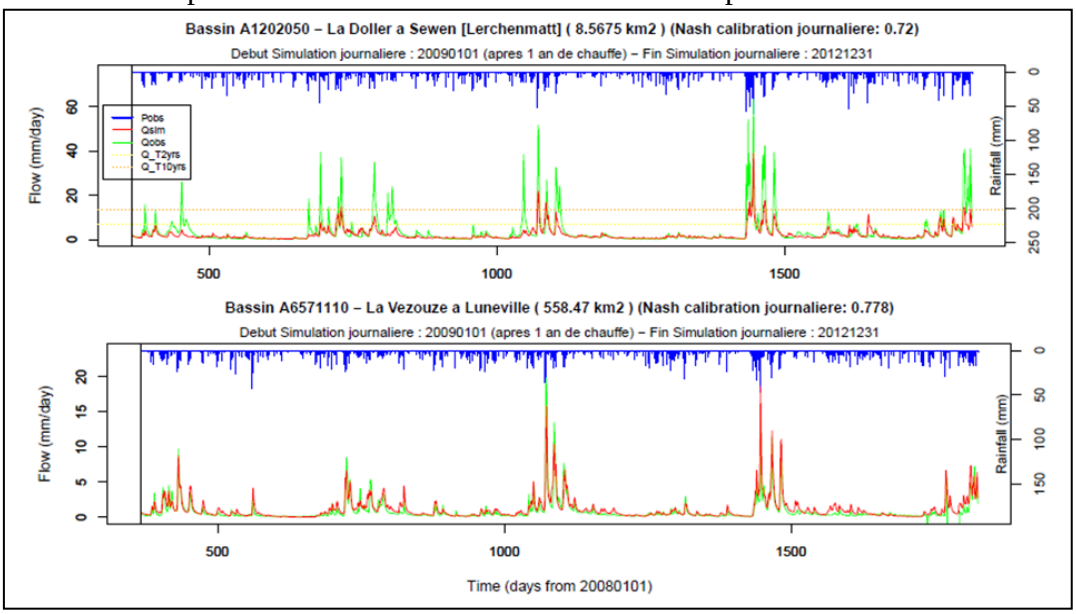

Figure 5 : Exemples de simulation du modèle journalier continu GR4J sur la période 2009-2012 avec les données de pluie Panthère pour deux bassins de la zone Meuse-Moselle ; les paramètres du modèle ont été calibrés par Organde (2013) sur la période 2002-2006 avec les données de pluie réanalysées COMEPHORE

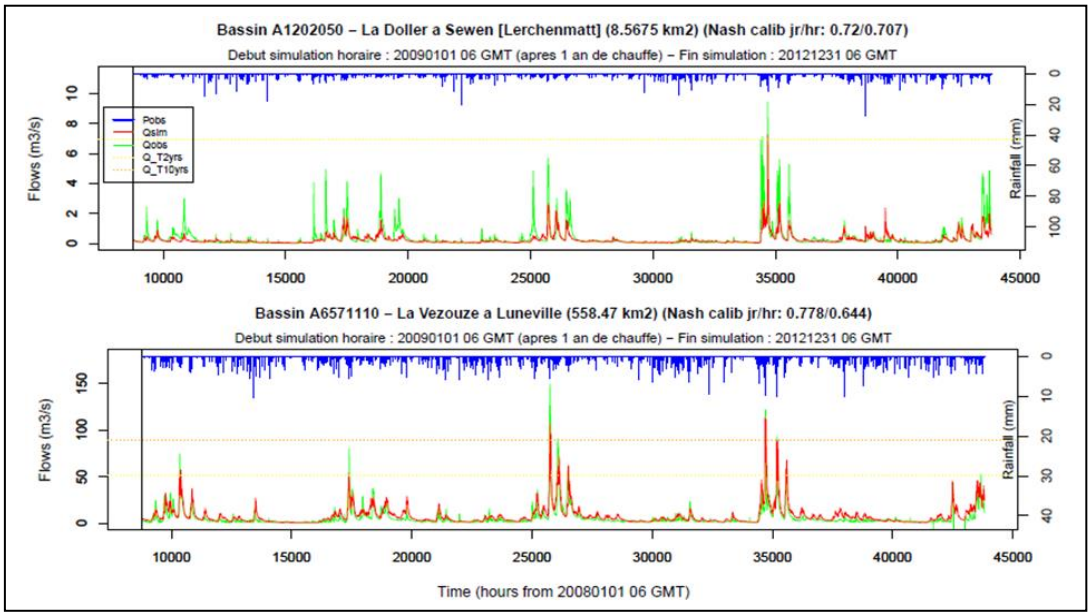

Figure 6 : Exemples de simulation du modèle horaire semi-distribué GR-SD sur la période 2009-2012 avec les données de pluie Panthère pour deux bassins de la zone Meuse-Moselle ; les paramètres du modèle ont été calibrés par Organde (2013) sur la période 2002-2006 avec les données de pluie réanalysées COMEPHORE

c) *Prévisions de pluie*

Pour prendre en compte les incertitudes des prévisions de pluie à l'échelle de 1 km^2 et pour un pas de temps horaire, nous cherchons à intégrer dans le système AIGA des prévisions d'ensembles de pluie. Plusieurs études ont été réalisées par Irstea Antony pour aider à la mise en place d'un outil de vigilance pour le SCHAPI et les SPC (Randrianasolo et Ramos, 2011, et Ramos 2012). Ces études ont montré l'intérêt des prévisions d'ensembles de pluie du modèle ARPEGE, notées PEARP, produites par Météo-France, pour la prévision hydrologique avec le modèle GRP. Les prévisions d'ensemble PEARP incluent 10 membres (issus de dix perturbations de l'état initial de l'atmosphère) et une prévision de contrôle à la résolution spatiale d'environ 25x25 km^2, désagrégée à la maille 8x8km^2. Ces prévisions sont émises une fois par jour, au pas de temps 3h, pour une échéance totale de 48h. Les résultats d'une première expérimentation de l'utilisation de ces données de prévisions d'ensembles PEARP par le système AIGA (avec le modèle horaire distribué) ont été présentés à la conférence EGU en avril 2013. Cependant, cette archive n'inclut pas les nouvelles prévisions PEARP (prévisions avec 35 membres, émises 2 fois par jour avec des échéances plus longues) et le système AIGA nécessite des prévisions de pluie à une échelle spatio-temporelle plus fine pour mieux représenter les cellules convectives.

Depuis décembre 2008, Météo-France produit des prévisions déterministes avec le modèle atmosphérique Application of Research to Operations at Mesoscale (AROME, Seity et al. 2011) à l'échelle de 2,5 km et au pas de temps horaire pour des échéances de 30h à 36h. La fine résolution spatiale d'AROME permet de modéliser les processus convectifs, qui sont essentiels pour les alertes aux crues rapides. Météo-France développe actuellement des prévisions d'ensembles dites AROME-PE pour des tests pré-opérationnels prévus en 2014. Sachant que ces prévisions d'ensembles AROME-PE seront disponibles prochainement à une échelle spatio-temporelle pertinente pour le système AIGA, nous avons choisi de construire des prévisions AROME d'ensembles par décalage temporel de prévisions déterministes successives (prévisions dites d'ensembles timelag). L'utilisation des prévisions AROME pour la prévision de crue fait également l'objet d'une expérimentation dans le cadre du projet CHROME mené par le SCHAPI avec différents modèles hydrologiques sur trois bassins versants cévenols.

La construction d'ensembles par décalage temporel est une approche classique en prévision atmosphérique, du fait de sa relative simplicité de mise en œuvre lorsqu'une archive de prévisions déterministes est disponible (Ben Bouallègue et al. 2013). Elle permet de prendre en compte les incertitudes des prévisions météorologiques en termes d'intensité et de localisation dans l'espace et dans le temps grâce à la dispersion des prévisions déterministes successives (Mittermaier 2007). Cette approche permet de mettre en place dès maintenant les méthodologies et outils pour intégrer les prévisions dans le système AIGA et d'illustrer leur apport pour l'amélioration du système d'alerte.

Pour les trois zones d'étude considérées et pour un jeu de 20 évènements sélectionnés pour chacune des zones (sélection détaillée dans la section suivante), Météo-France nous a fourni les prévisions déterministes AROME avec les caractéristiques suivantes :

- paramètre PRECIP niveau SOL (quantité totale de précipitations en kg.m-2),
- résolution de 2,5 km, pas de temps horaire, échéance maximale de 30h,
- réseaux et délai de mise à disposition (pour une application en opérationnel): 00 UTC +3h, 06 UTC +5h, 12 UTC +4h et 18 UTC +5h.

Dans cette étude, nous avons choisi de construire des prévisions d'ensembles AROME-timelag toutes les 3 heures, en considérant 3 membres pour une échéance totale de 9h ou 12h suivant l'heure d'initialisation de la prévision. Le nombre de membres aurait pu être défini comme variable suivant l'échéance, pour inclure par exemple 4 ou 5 membres pour les échéances plus courtes. Les échéances au-delà de 12h n'ont pas été prises en compte dans cette étude du fait du nombre trop limité de membres (moins de 3) pour une prévision d'ensemble.

La figure 7 présente le schéma de construction des prévisions d'ensembles AROME-timelag pour le jour J avec initialisation des prévisions toutes les 3 heures, en utilisant les différentes prévisions déterministes des jours J-1 et J correspondant aux réseaux de 00, 06, 12 et 18 TU. Ces ensembles construits avec 3 membres ont une échéance de 12h pour les heures d'initialisation de prévision de 00 TU, 03 TU, 06 TU, 12 TU, 15 TU, et 18 TU et une échéance de 9h pour les heures d'initialisation de prévision de 09 TU et 21 TU. Pour chacun des ensembles, le premier membre correspond au réseau le plus récent, le troisième membre au réseau le plus ancien. Par exemple, la prévision d'ensemble AROME-timelag pour l'heure d'initialisation de 00 TU est construite avec :

- le premier membre : la prévision AROME du jour précédent (J-1) du réseau 18 TU pour les échéances de 7h à 18h ;
- le second membre : la prévision AROME du jour précédent (J-1) du réseau 12 TU pour les échéances de 13h à 24h ;
- le troisième membre : la prévision AROME du jour précédent (J-1) du réseau 06 TU pour les échéances de 19h à 30h.

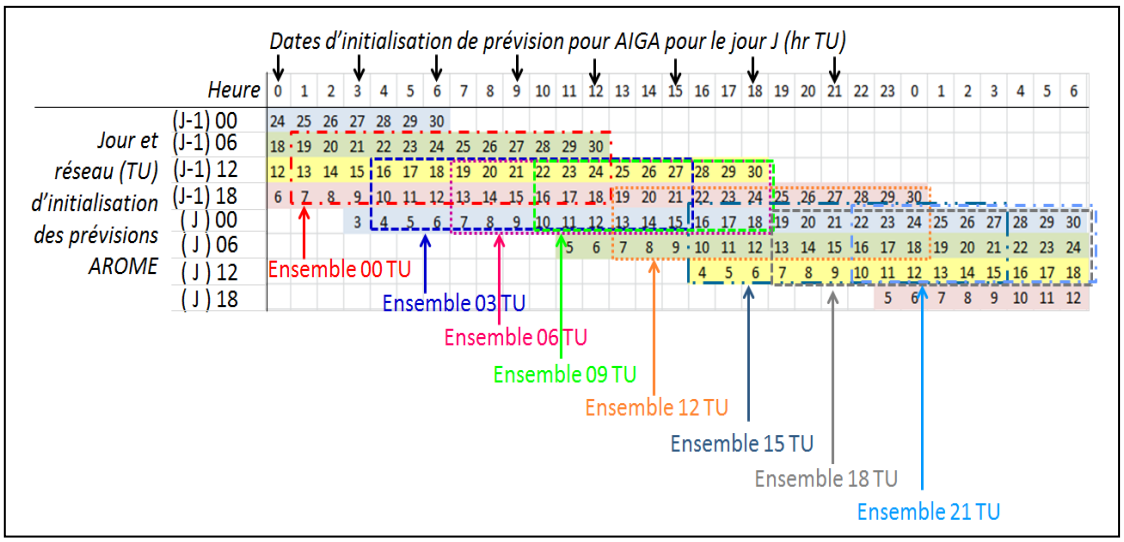

Figure 7 : Construction des ensembles AROME-timelag pour AIGA toutes les 3 heures pour le jour J en utilisant les prévisions déterministes AROME des réseaux 00 TU, 06 TU, 12 TU, 18 TU pour les jours J-1 et J avec une échéance maximale des ensembles de +30h et en prenant en compte les délais de mise à disposition des données AROME en opérationnel

Par la suite, les prévisions utilisées en comparaison aux prévisions d'ensemble AROME-timelag seront construites pour utiliser la même échéance que les ensembles AROME-timelag pour les différentes heures d'initialisation de la prévision :

- échéance de 12h pour les heures d'initialisation de 00 TU, 03 TU, 06 TU, 12 TU, 15 TU, et 18 TU,
- échéance de 9h pour les heures d'initialisation de de 09 TU et 21 TU.

d) Sélection des évènements

Pour faciliter la mise à disposition des prévisions déterministes AROME par Météo-France pour les trois zones d'étude, nous avons choisi de sélectionner 20 évènements sur la période de disponibilité des prévisions AROME, i.e. la période de décembre 2009 à décembre 2012. Le choix des évènements a été réalisé à partir des données d'observation de pluie et de débit des bassins versants sélectionnés pour la calibration des modèles hydrologiques. On a choisi les 20 plus forts évènements en termes de pluie observée et/ou débit observé pour inclure un nombre de dépassements de quantiles de débit SHYREG pour les périodes de retour de 2 et 10 ans (notés QP_2ans et QP_10ans respectivement).

Le Tableau 1 donne les caractéristiques des 20 évènements retenus pour la zone d'étude Meuse-Moselle. Sont inclus le nombre de bassins versants sur les 92 bassins de la zone d'étude, qui dépassent les quantiles de débit biennal et décennal. Par la suite, l'évènement 15 le plus important de décembre 2011 est utilisé pour illustrer les différentes visualisations des informations de prévisions et d'alerte pour le seuil de débit biennal. Les critères de qualité des alertes sont calculés pour les 10 évènements les plus importants en termes de dépassement de seuil de débit: évènements 1 (janvier 2009), 5 (décembre 2009), 8 (août 2010), 9 (novembre 2010), 10 (décembre 2010), 11 (janvier 2011), 14 (août 2011), 15 (décembre 2011), 16 (janvier 2012) et 20 (décembre 2012).

ID Eve	Date de début	Date de fin	Nombre de jours	Nombre de bassins [Qobs>QP_2ans]	Nombre de bassins [Qobs>QP_10ans]
1	2009/01/20 - 06	2009/01/26 - 06	6	11	4
2	2009/05/11- 06	2009/05/16 - 06	5	1	1
3	2009/07/11 - 06	2009/07/17 - 06	6	0	0
4	2009/11/20 - 06	2009/11/28 - 06	8	1	1
5	2009/12/21 - 06	2009/12/27 - 06	6	12	3
6	2010/03/18 - 06	2010/03/23 - 06	5	1	1
7	2010/06/08 - 06	2010/06/13 - 06	5	1	0
8	2010/08/12 - 06	2010/08/19 - 06	7	2	1
9	2010/11/04 - 06	2010/11/16 - 06	12	3	1
10	2010/12/03 - 06	2010/12/11 - 06	8	38	8
11	2011/01/03 - 06	2011/01/15 - 06	12	21	3
12	2011/06/02 - 06	2011/06/10 - 06	8	0	0
13	2011/07/14 - 06	2011/07/19 - 06	5	0	0
14	2011/08/03 - 06	2011/08/09 - 06	6	1	0
15	2011/12/01 - 06	2011/12/19 - 06	18	44	11
16	2011/12/31 - 06	2012/01/08 - 06	8	21	1
17	2012/05/18 - 06	2012/05/27 – 06	9	0	0
18	2012/06/29 - 06	2012/07/16 – 06	17	0	0
19	2012/10/01 - 06	2012/10/17 – 06	16	1	0
20	2012/12/20 - 06	2012/12/30 – 06	10	7	0

Impact hydrologique : dépassement des quantiles débit SHYREG de 2 et 10 ans

- Pas de dépassement
- Dépassements > QP_2ans
- Moins de 5 dépassements > QP_10ans
- Plus de 5 dépassement > QP_10ans

Tableau 1 : Caractéristiques des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Meuse-Moselle avec le nombre de dépassements observés des quantiles de débit biennal et décennal de la base de données SHYREG (version 1) pour les 92 bassins calibrés

Les listes des évènements sélectionnés pour les 3 zones d'étude et leurs caractéristiques respectives sont inclues dans l'Appendice B de ce rapport.

3. Intégration des Prévisions de Pluie

L'intégration des prévisions de pluie est effectuée avec les deux approches complémentaires :

1) estimation de la pluie critique moyenne de bassin pour une ou plusieurs durées et pour un seuil de débit fixé, puis comparaison aux prévisions d'ensembles de pluie ; les alertes de dépassement de seuil de débit sont donc exprimées en terme de pluie ;

2) intégration des prévisions d'ensemble de pluie dans la modélisation hydrologique pour produire les prévisions d'ensemble de débit qui reflètent les incertitudes de pluie et générer des alertes de dépassement de seuil de débit ; les alertes sont exprimées en terme de débit.

Pour chacune de ces approches sont proposées différentes représentations des informations de prévisions et d'incertitude obtenues, notamment en termes de probabilité de dépassement du seuil de débit ou du nombre d'ensembles dépassant ce seuil.

a) Croisement avec la pluie critique de bassin

Estimation de la pluie critique de bassin

L'estimation de la pluie critique pour un bassin donné, pour une durée choisie, et pour un seuil de débit fixé, est basée sur :

- la prise en compte d'un scenario de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin pour la durée considérée,
- la comparaison entre le débit simulé par la modélisation hydrologique avec le scenario de pluie considéré et le débit seuil que l'on cherche à atteindre,
- la pluie critique correspond à la valeur de cumul de pluie future du premier scenario ayant permis d'atteindre le seuil de débit.

Pour chaque date d'initialisation de prévision, notée T0, la pluie utilisée pour la simulation d'AIGA est définie de la façon suivante :

- avant T0, la pluie observée (de la lame d'eau Panthère)
- à partir de T0, la pluie future d'intensité constante sur la durée considérée.

Le premier scenario est défini par une pluie future nulle, qui permet de déterminer si le débit simulé du bassin atteint le seuil de débit considéré avec la pluie observée (jusqu'à T0), sans aucune pluie future, pour les heures à venir. Si le seuil de débit n'a pas été atteint, le scenario de pluie est incrémenté jusqu'à ce que le débit simulé par AIGA dépasse le débit seuil.

Suite à l'étude de Demargne (2013) sur l'application de la méthode de Flash Flood Guidance avec le système AIGA et aux échanges avec les SPC et le SCHAPI, les pluies critiques sont estimées avec les paramètres suivants :

- les seuils de dépassement de débit définis par les quantiles de débit SHYREG pour les périodes de retour de 2 ans et 10 ans ;
- les durées de 3h et 6h puisqu'on s'intéresse ici aux bassins ayant un temps de réaction de l'ordre de 6h ;
- une incrémentation du scenario de pluie future de 5 mm/h pour la durée de 3h et de 2,5 mm/h pour la durée de 6h ;
- une estimation faite toutes les 3 heures, aux dates d'initialisation pour lesquelles les prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag ont été construites.

L'incrémentation du scenario de pluie future conduit à estimer un intervalle de pluie critique, définie par une borne inférieure (notée FFG_{inf}) et une borne supérieure (notée FFG_{sup}). Cet intervalle de pluie critique traduit l'incertitude d'estimation de la pluie critique lors de l'incrémentation du scenario de pluie future. Comme démontré dans l'étude de Demargne (2013), il est nécessaire de considérer l'intervalle de pluie critique pour générer les mises en alerte des bassins.

La Figure 8 donne un exemple d'estimation de la pluie critique relative à la durée de 6h et au seuil de de débit biennal pour le bassin de la Vezouze à Lunéville pour la date d'initialisation de la prévision, notée T0, du 7 décembre 2010 à 06 TU. La pluie utilisée pour la simulation est basée sur la pluie observée, donnée par la lame d'eau Panthère jusqu'à T0 et la pluie future pour les 6 heures suivantes. Les scenarios de pluie future testés sont 0 mm/h (qui n'a pas conduit à dépasser le seuil de débit biennal) et 2,5 mm/h qui conduit à dépasser le seuil de débit ; la pluie critique obtenue est donc de 6x2,5 mm/h=15mm/6h. L'intervalle de pluie critique pour cet exemple est défini par : FFG_{inf}=0mm/6h et FFG_{sup}=15mm/6h.

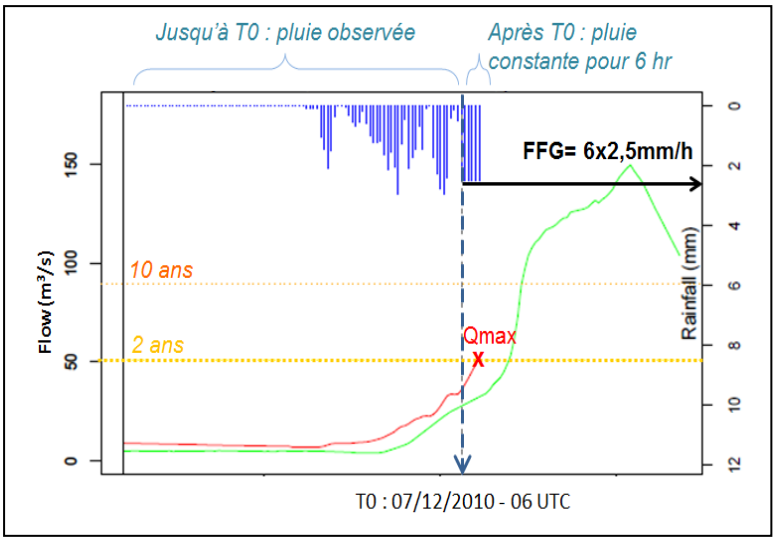

Figure 8 : Exemple d'estimation de la pluie critique pour la durée de 6h pour le bassin de la Vezouze à Lunéville pour la date d'initialisation du 7 décembre 2010 06h (TU) et le seuil de débit biennal ; le débit observé est représenté en vert, le débit simulé en rouge

Croisement de la pluie critique de bassin avec les prévisions de pluie

Les valeurs de pluie critique de bassin pour les deux durées de 3h et 6h et un seuil de débit fixé peuvent être croisées avec les prévisions de pluie pour pouvoir émettre des avertissements de dépassement du seuil de débit. Il faut noter que ces avertissements dépendent de la qualité de simulation des débits par la modélisation hydrologique, et de la qualité des prévisions de pluie.

Un exemple de graphe de comparaison des pluies critiques est donné en Figure 9. Les intervalles de pluie critique sont représentés pour les durées de 3h et 6h et les cumuls des prévisions horaires de pluie sont également ajoutés pour évaluer si l'une des prévisions dépasse éventuellement la borne inférieure et la borne supérieure de l'intervalle de pluie critique pour les 6 prochaines heures.

Comme proposé dans l'étude Demargne (2013), on définit deux niveaux d'avertissement :

- si une prévision de pluie dépasse la borne supérieure FFG_{sup}, le bassin présente un fort risque de dépasser le seuil de débit considéré, d'après les résultats de la simulation avec le scenario de pluie future égale à la valeur FFG_{sup} et si la pluie future observée correspond à la prévision de pluie considérée ; il s'agit d'un avertissement de niveau 2 ;
- si une prévision de pluie dépasse la borne inférieure FFG_{inf}, le risque de dépassement du seuil de débit est moins élevé ; il s'agit d'un avertissement de niveau 1.

Les différentes prévisions de pluie comparées aux intervalles de pluie critique sont :

- la pluie observée, qui correspond à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ;
- la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation de la prévision et constante pour toute l'échéance de la prévision ;
- les 3 membres de la prévision d'ensemble AROME-timelag ;
- la moyenne des prévisions d'ensemble AROME-timelag.

Dans l'exemple de la Figure 9, seule la pluie observée dépasse la valeur FFG_{inf} à partir de la date du 16 décembre 2011 12h (TU). Cet avertissement de niveau 1 est pertinent puisque l'hydrogramme de débit simulé représenté en Figure 10 montre que le débit simulé (issu de la pluie observée) dépasse le débit biennal. De plus, l'hydrogramme des débits observés confirme le dépassement du débit biennal mais pour la date du 16 décembre 2011 09h (TU), soit 3 heures plus tôt que le dépassement pour le débit simulé.

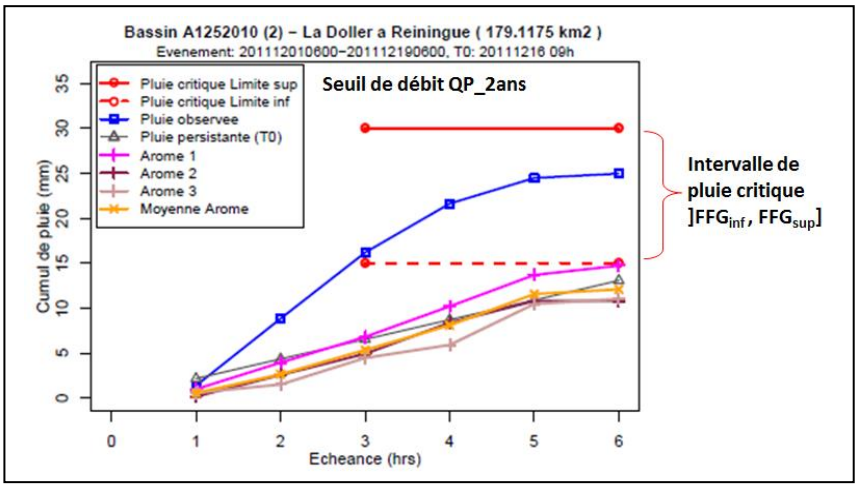

Figure 9 : Exemple de graphe de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h et 6h et le seuil de débit biennal avec les différentes prévisions de pluie pour le bassin de La Doller à Reiningue pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 09h (TU)

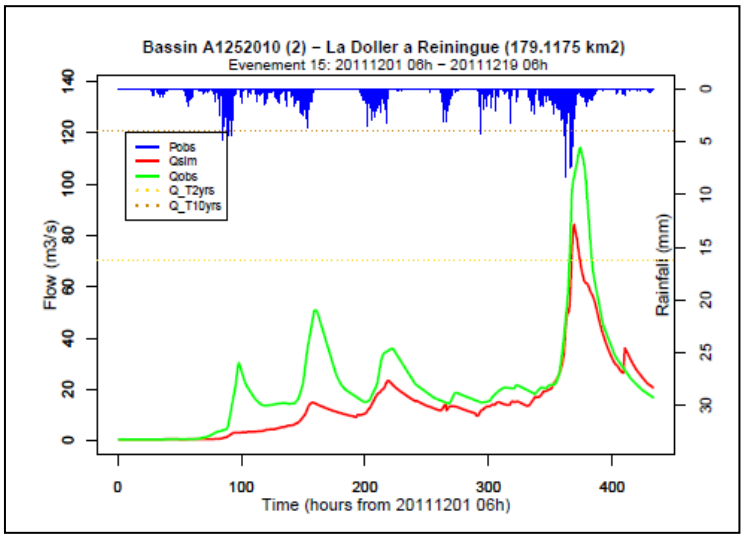

Figure 10 : Hydrogrammes de débit simulé et de débit observé pour le bassin de La Doller à Reiningue pour l'évènement de décembre 2011, montrant le retard (de 3h) du dépassement du seuil de débit biennal avec le débit simulé en comparaison au débit observé

Visualisation des avertissements pour l'ensemble de l'évènement

Afin de pouvoir comparer les pluies critiques et les prévisions sur les différentes dates d'initialisation des prévisions T0 (définies toutes les 3 heures) et de faciliter la visualisation des avertissements potentiels, on propose de représenter les ratios Prévision/FFG_{sup} et Prévision/FFG_{inf} (on pourrait également choisir de représenter les différences entre la prévision et la pluie critique, ce qui permettrait de garder une variable exprimée en mm/durée). Lorsque la valeur FFG_{sup} ou FFG_{inf} est égale à 0, on fixe la valeur du ratio Prévision/FFG_{sup} ou Prévision/FFG_{inf} à 1,25 (une valeur constante supérieure à 1 pour montrer que la prévision est égale ou dépasse la valeur nulle de pluie critique FFG_{sup} ou FFG_{inf}). Les avertissements pour les différentes prévisions sont donc définis avec les ratios par les 2 niveaux suivants:

- avertissement de niveau 1 : Prévision/$FFG_{inf} \geq 1$ et Prévision/$FFG_{sup} < 1$;
- avertissement de niveau 2 : Prévision/$FFG_{inf} \geq 1$ et Prévision/$FFG_{sup} \geq 1$.

La Figure 11 représente, sur la gauche, le graphe de comparaison de la Figure 9 pour la date d'initialisation de prévision unique du 16 décembre 2011 09h (TU), date à laquelle le débit observé dépasse le débit biennal. Sur la droite, est représenté le graphe des ratios Prévision/FFG_{sup} (en trait continu) et des ratios Prévision/FFG_{inf} (en pointillé) pour les différentes dates d'initialisation de prévision (dates définies toutes les 3 heures). Les valeurs de la borne supérieure FFG_{sup} sont également représentées (barres en haut du graphe et échelle sur l'axe de droite) pour visualiser les pas de temps pour lesquels le débit simulé sans pluie future dépasse le débit seuil, correspondant à FFG_{sup}=0.

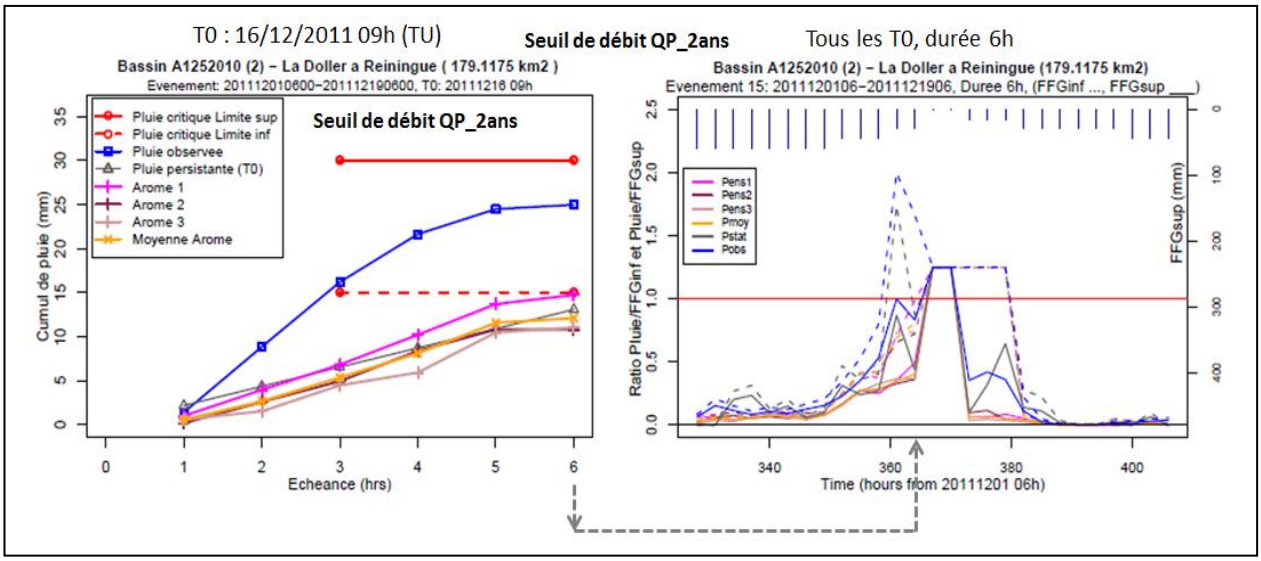

Figure 11 : Graphes de comparaison des pluies critiques pour le seuil de débit biennal avec les différentes prévisions de pluie pour le bassin de La Doller à Reiningue à gauche, pour les 2 durées de 3h et 6h et pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 09h (TU) et à droite pour la durée de 6h et pour les différentes dates d'initialisation pour l'évènement de décembre 2011

Cette représentation des ratios Prévision/FFG_{sup} et Prévision/FFG_{inf} permet de visualiser les avertissements du dépassement du débit seuil pour toutes les prévisions sur l'ensemble de l'évènement (ou, pour un prévisionniste en temps réel, jusqu'au plus récent T0). En Figure 11, on observe que la pluie observée et la pluie persistante ont donné des avertissements de niveau 1 (i.e. ratio représenté en pointillé dépassant la valeur de 1) pour les 3 dates d'initialisation de prévision précédant le dépassement du débit simulé (correspondant aux pas de temps où FFG_{sup}=0), c'est-à-dire 9 heures en avance. La pluie observée donne un avertissement de niveau 2 (i.e. ratio représenté en trait plein dépassant la valeur de 1) 3

heures en avance (vis-à-vis du dépassement par le débit simulé). Le premier membre de la prévision d'ensemble AROME-timelag donne également un avertissement de niveau de niveau 1 avec une anticipation de 3 heures. Ces avertissements sont relatifs au débit simulé (et non débit observé). Pour ce bassin en particulier, pour lequel le dépassement du débit biennal par le débit simulé est détecté avec 3 heures de retard (cf. Figure 10), la prise en compte de l'avertissement de niveau 1 permet de regagner en quelque sorte en anticipation. Mais il faut remarquer que les avertissements de niveau 1 peuvent également donner de fausses alertes.

La Figure 12 illustre les avertissements des différentes prévisions par comparaison avec la pluie critique pour l'évènement de décembre 2011 pour 2 bassins de la zone Meuse-Moselle. Pour le premier bassin du Madon à Mirecourt, le débit simulé anticipe le dépassement du débit biennal par le débit observé. L'anticipation des avertissements de niveau 1 est supérieure à 6 heures pour toutes les prévisions et pour les 3 prévisions d'ensembles AROME-timelag et la prévision moyenne, l'avertissement de niveau 2 est également donné avec une anticipation de 3 heures. Pour le bassin de la Semouse à Saint-Loup-sur-Semouse, le débit simulé sous-estime l'observation et donc il ne produit aucun dépassement du débit biennal. On peut noter que la pluie observée et les autres prévisions considérées produisent des avertissements de niveau 1.

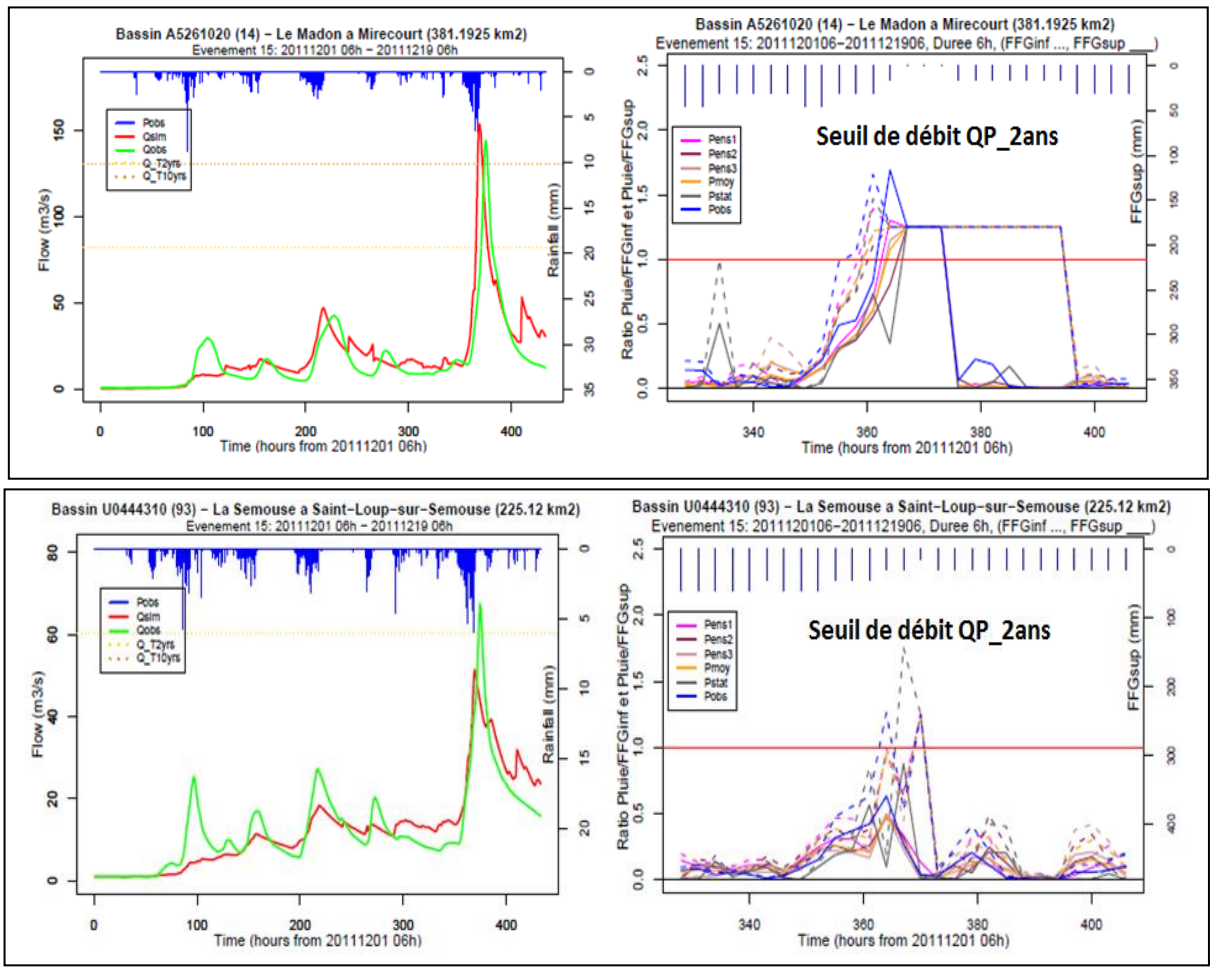

Figure 12 : Hydrogrammes des débits observé et simulé et graphes de comparaison des ratios Prévision/FFG pour le seuil de débit biennal et la durée de 6h avec les différentes prévisions de pluie pour 2 bassins de la zone Meuse-Moselle et pour l'évènement de décembre 2011

Visualisation des cartes de pluie critique et des cartes d'alerte

Pour compléter la visualisation des informations de pluie critique par bassin, on propose des cartes pour visualiser les zones géographiques les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit. Cette analyse spatiale de la pluie critique et de leur comparaison avec les prévisions de pluie s'appuie sur les produits suivants :

- les cartes de pluie critique pour une durée et un seuil de débit donnés, qui sont produites toutes les 3 heures pour représenter la sensibilité hydrologique de tous les bassins;
- les cartes de comparaison entre prévision de pluie et pluie critique pour une durée et un seuil de débit donnés pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue dépasse la borne supérieure FFG_{sup} ou la borne inférieure FFG_{inf} de pluie critique ;
- les cartes d'alerte du système AIGA actuel avec une représentation par bassin versant, similaire aux cartes de pluie critique, pour faciliter la comparaison des avertissements du système AIGA avec les avertissements des prévisions de pluie ;
- les cartes des dépassements observés pour juger de la pertinence des avertissements avec les prévisions de pluie et les alertes du système AIGA.

A noter que, pour toutes les cartes, les bassins versants sont triés par ordre de surface décroissante pour permettre de visualiser les valeurs pour les bassins emboités (ex. bassins amont et aval d'un même cours d'eau).

La carte de pluie critique représente, pour une durée donnée, un seuil de débit et une date d'initialisation de prévision, les plages de valeurs de pluie critique (correspondant à $]FFG_{inf}, FFG_{sup}]$). Cette carte permet d'identifier les bassins versants les plus sensibles aux pluies futures et qui pourraient atteindre le seuil de débit considéré, en prenant en compte l'état hydrique du bassin et sa réactivité aux pluies. Les bassins les plus susceptibles de dépasser le seuil de débit ont les valeurs de pluie critique les plus faibles. Un exemple de carte de pluie critique est représenté en Figure 13 pour l'évènement de décembre 2011. Les valeurs de pluie critique sont données sur cette carte par les intervalles suivants : 0 mm, $0 < \leq 15$mm, $15 < \leq 30$mm, $30 < \leq 45$mm etc.

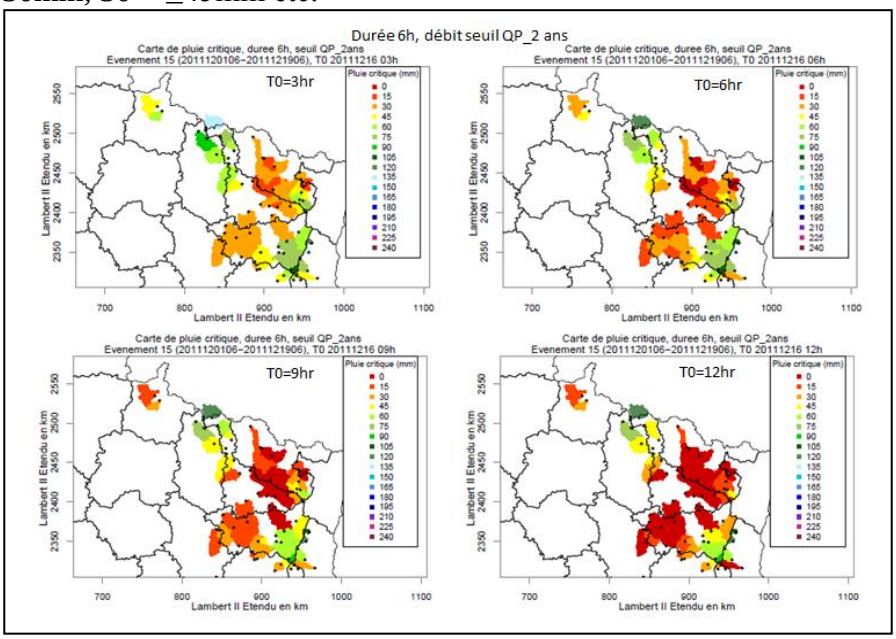

Figure 13 : Carte de pluie critique pour la durée de 6h et le seuil de débit biennal pour 4 dates d'initialisation du 16 décembre 2011 de 03h à 12h (TU) pour la zone Meuse-Moselle

Le croisement de la pluie critique avec la prévision de pluie peut également être présenté sous forme de carte suivant la valeur des ratios Prévision/FFG_{sup} et Prévision/FFG_{inf} pour visualiser les avertissements pour l'ensemble des bassins.

La Figure 14 présente la carte des avertissements par croisement de la prévision d'ensemble de pluie AROME-timelag avec la pluie critique. On représente alors la probabilité de dépasser la borne inférieure FFG_{inf} pour un avertissement de niveau 1 et la probabilité de dépasser la borne supérieure FFG_{sup} pour un avertissement de niveau 2 ; dans cette étude qui utilise une prévision d'ensembles avec 3 membres, on présente l'information avec le nombre de membres de la prévision dépassant la borne FFG considérée (les membres de l'ensemble étant équiprobables). A noter que cette carte pour les 2 bornes de pluie critique avec 6 classes de couleur impose que le dépassement par un seul membre de la borne supérieure FFG_{sup} soit plus important que le dépassement par 2 ou 3 membres de la borne inférieure $FFG_{inf.}$ On peut également envisager 2 cartes pour chacune des bornes de pluie critique, ou bien une seule carte mais avec un plus grand nombre de classes de couleurs pour comptabiliser plus finement la probabilité des avertissements de niveau 1 et 2.

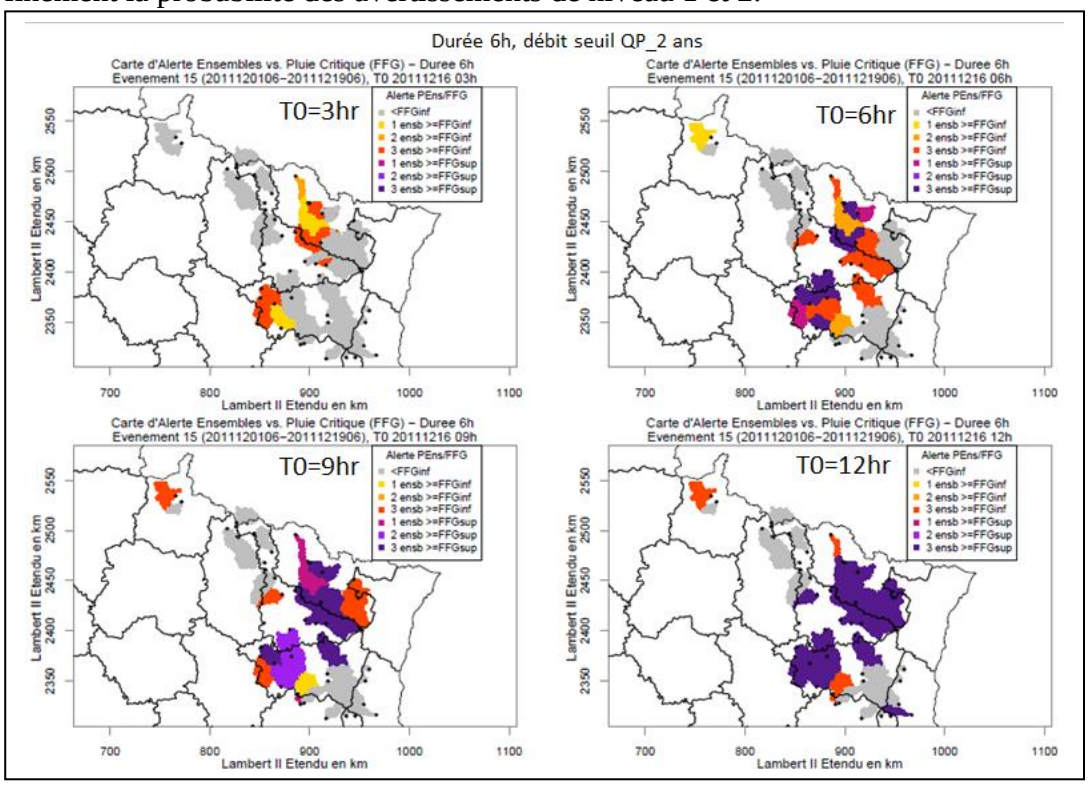

Figure 14 : Carte des avertissements par croisement de la prévision d'ensemble AROME-timelag avec la pluie critique pour la durée de 6h et le seuil de débit biennal pour 4 dates d'initialisation du 16 décembre 2011 de 03h à 12h (TU) pour la zone Meuse-Moselle

La carte des avertissements des prévisions d'ensemble de pluie AROME-timelag peut être comparée avec la carte des alertes du système AIGA, qui est donnée en Figure 15, pour juger de la qualité de ces avertissements en comparaison avec les avertissements issus du débit simulé. On peut également comparer ces deux cartes d'avertissements avec la carte des dépassements observés (cf. Figure 16) pour juger de la qualité des avertissements des prévisions d'ensemble et des alertes AIGA sur les différents bassins.

Il faut remarquer que ces cartes présentent les avertissements et les alertes par bassin, et non par cours d'eau, pour faciliter la comparaison avec l'information spatiale de pluie observée et pluie prévue.

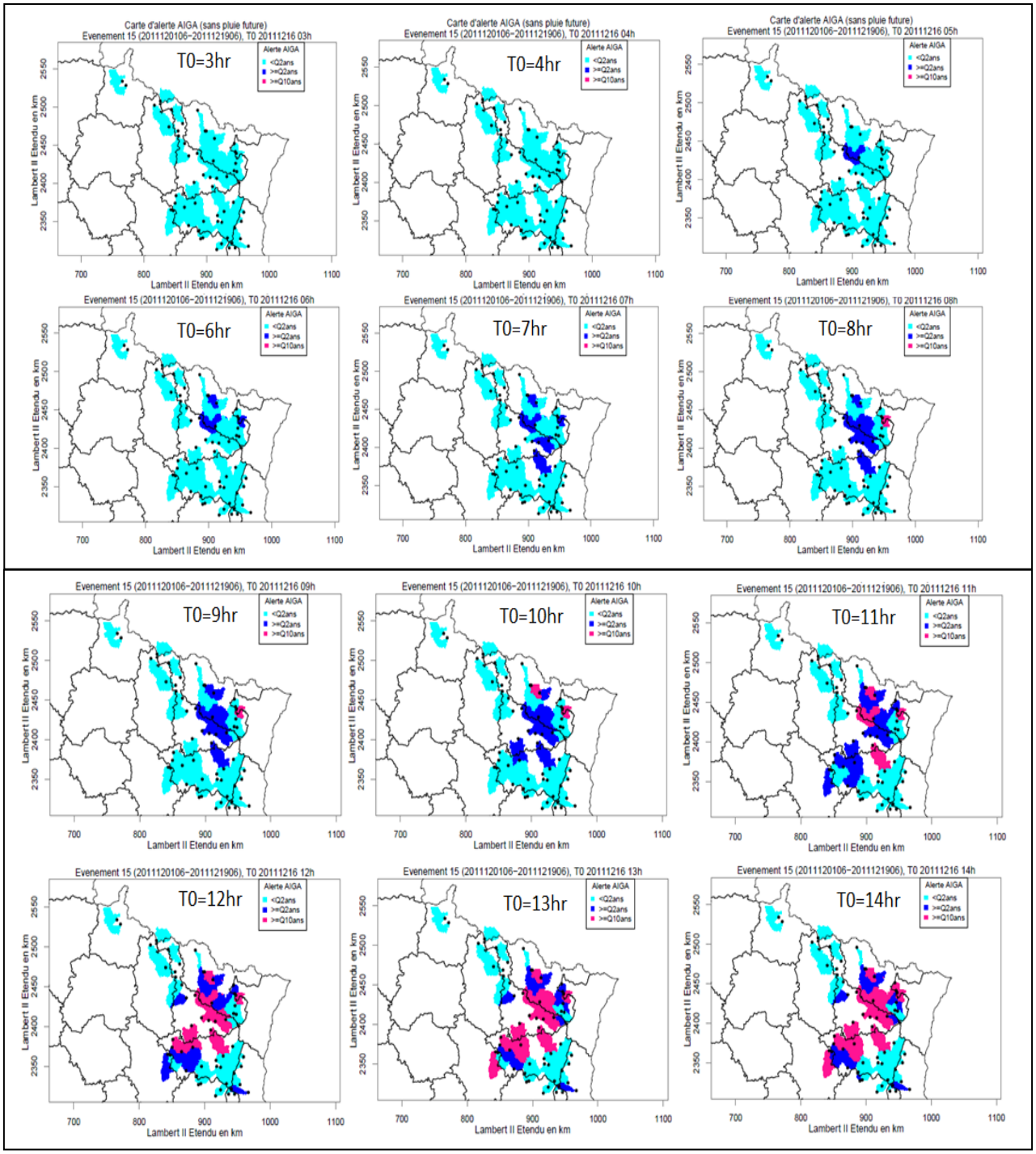

Figure 15 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 16 décembre 2011 de 03h à 14h (TU) pour la zone Meuse-Moselle

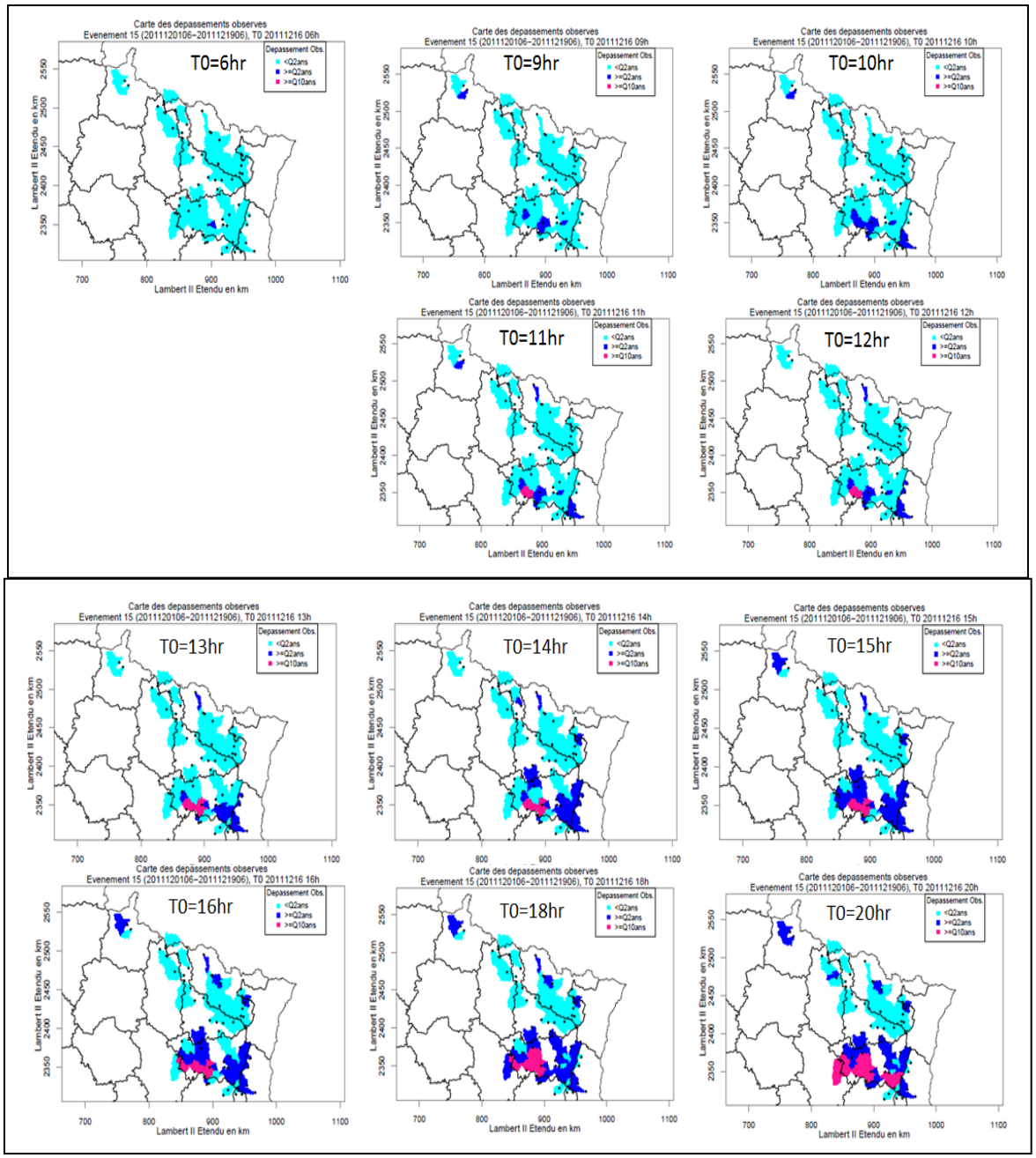

Figure 16 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 16 décembre 2011 de 06h à 20h (TU) pour la zone Meuse-Moselle

L'intégration des prévisions d'ensemble de pluie pour produire des avertissements de dépassement de débit biennal s'est effectuée en croisant la pluie critique moyenne de bassin pour une ou plusieurs durées avec les prévisions d'ensemble. Les avertissements sont donc exprimés en termes de pluie et sont visualisés sous forme de carte, pour être confrontés aux alertes du système AIGA et aux dépassements de débit observés.

L'autre intégration des prévisions d'ensemble de pluie est de produire avec la modélisation hydrologique les prévisions de débit correspondant aux prévisions de pluie.

b) Prévisions de débit

La deuxième approche pour intégrer les prévisions d'ensemble de pluie au système AIGA consiste à produire avec chaque membre de l'ensemble de pluie la prévision de débit. On obtient ainsi une prévision d'ensemble de débit qui reflète l'incertitude sur la pluie future. Les prévisions d'ensemble de débit sont ensuite comparées au seuil de débit pour produire des avertissements de dépassement de seuil.

Estimation des prévisions d'ensemble de débit

Comme pour l'estimation de la pluie critique, la prévision de débit est obtenue avec la modélisation hydrologique retenue dans cette étude (modèle continu journalier GR4J et modèle évènementiel horaire semi-distribué GR-SD) avec la pluie observée jusqu'à la date d'initialisation de prévision T0 et ensuite la prévision de pluie. Les prévisions d'ensemble de débit sont obtenues à partir des 3 membres de la prévision d'ensemble AROME-timelag.

Pour montrer l'apport de la prévision d'ensemble vis-à-vis d'une prévision déterministe, les prévisions déterministes de débit sont également produites à partir de :

- la pluie observée, qui correspond à la pluie future « parfaite », connue *a posteriori*, les valeurs de débit correspondant au débit simulé (noté Qsim) ; pour les comparaisons des dépassements de seuil issus des prévisions de débit, on différenciera par la suite la prévision de débit du système AIGA actuel, sans pluie future, correspondant au débit simulé obtenu à la date d'initialisation T0 (« prévision sans échéance » notée Qsimu), et la prévision de débit issue de la pluie observée pour la même échéance que la prévision d'ensemble (prévision notée Qpobs);
- la pluie persistante (ou pluie stationnaire) ; la prévision de débit générée pour la même échéance que la prévision d'ensemble est notée Qpstat ;
- et la moyenne des prévisions d'ensemble de pluie AROME-timelag, la prévision de débit étant noté Qmoy.

On rappelle que, par construction des ensembles de pluie AROME-timelag, l'échéance de prévision est de 12 heures pour les heures d'initialisation de 00 TU, 03 TU, 06 TU, 12 TU, 15 TU, et 18 TU, et de 9h pour les 2 heures d'initialisation de 09h et de 21h TU (cf. section 1.c). Les prévisions de débit sont générées pour ces mêmes échéances et toutes les 3 heures.

La Figure 17 présente un exemple des hydrogrammes de débits prévus avec les différentes prévisions de pluie et du débit observé avec une échéance de prévision de 12 heures. Dans cet exemple, avec le système AIGA actuel, le débit simulé (noté Qsim) à la date T0 est en-dessous du seuil de débit biennal. Sur toute l'échéance de prévision, les 3 prévisions d'ensemble de pluie AROME-timelag sous-estiment largement la pluie observée, ce qui conduit à une prévision d'ensemble de débit en sous-estimation vis-à-vis du débit simulé issu de la pluie observée (Qsim après la date d'initialisation T0 correspondant à la prévision de débit notée Qpobs par la suite). Alors que la prévision de débit simulé et la prévision de débit issu de la pluie persistante conduisent sur les 12 prochaines heures à un dépassement du débit biennal (avec un léger retard vis-à-vis du dépassement observé), aucun membre de la prévision d'ensemble de débit ne conduit à dépasser le débit biennal.

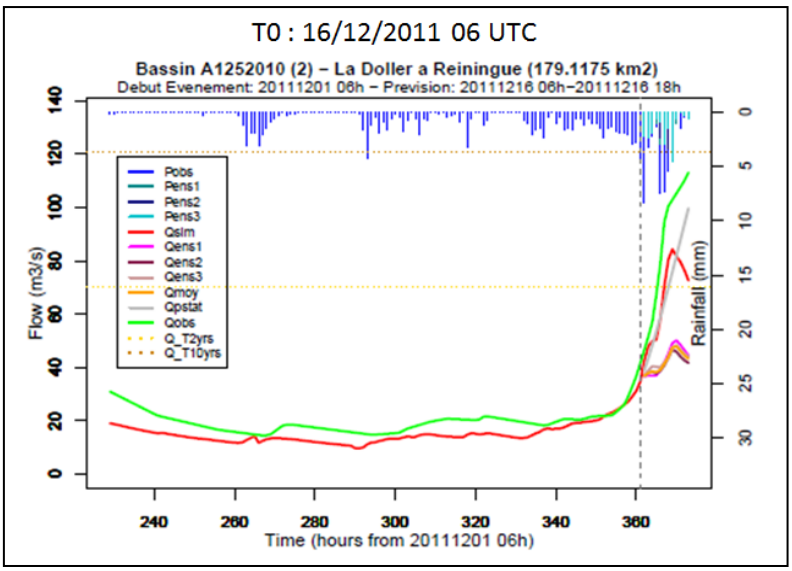

Figure 17 : Hydrogrammes des débits simulé et prévus avec les différentes prévisions de pluie pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 à 06h (TU) en comparaison avec l'hydrogramme de débit observé pour le bassin de La Doller à Reiningue

Alertes avec les prévisions d'ensemble de débit

La Figure 18 présente des exemples de prévisions de débit pour l'échéance de 12h pour différents bassins pour la date d'initialisation de prévision du 16 décembre 2011 à 18h (TU). Concernant le dépassement d'un seuil de débit, les prévisions d'ensemble de débit conduisent à estimer une probabilité de dépassement du seuil, qui est fonction du nombre de membres dépassant le seuil (les membres de l'ensemble étant tous équiprobables). A noter que cette estimation de la probabilité de dépassement ne présume aucunement de la qualité des prévisions d'ensemble ; l'objectif est de comparer la qualité des avertissements du système AIGA actuel avec celle des avertissements issus des prévisions de débit de type ensembliste et déterministe.

Dans les exemples de la Figure 18, on considère la probabilité de 1/3, un seul ensemble dépassant le débit seuil étant suffisant pour donner une alerte de dépassement. On indique alors si les prévisions d'ensemble de débit conduisent à :

- une bonne alerte lorsqu'au moins un des membres de la prévision d'ensemble de débit et le débit observé dépassent le seuil de débit sur l'échéance de prévision ;
- une alerte manquée lorsqu'aucun des ensembles de débit ne dépasse le seuil de débit alors que le débit observé le dépasse ;
- et une fausse alerte lorsqu'un des ensembles de débit dépasse le débit seuil et que le débit observé lui reste inférieur.

On peut noter dans les 6 exemples ci-dessous que la qualité des alertes des prévisions en comparaison aux dépassements de débit observés dépend des facteurs suivants :

- la qualité de l'initialisation du modèle hydrologique à T0, et donc de la qualité de simulation du modèle journalier GR4J,
- la qualité de simulation du modèle horaire semi-distribué GR-SD,
- et la qualité des prévisions de pluie.

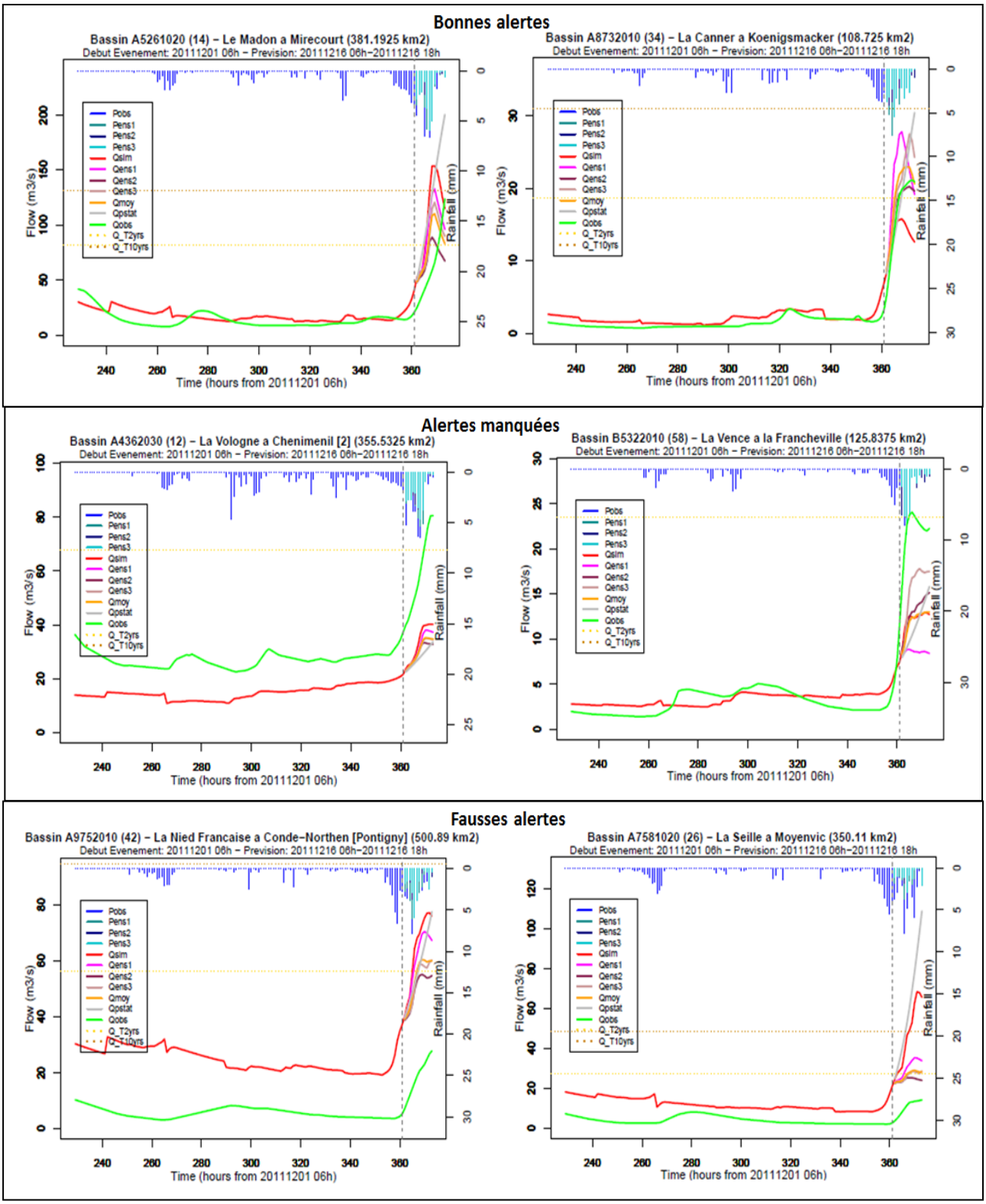

Figure 18 : Exemples de bonnes alertes, alertes manquées et fausse alertes avec les débits simulé et prévus issus des différentes prévisions de pluie en comparaison aux dépassements observés pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 à 06h (TU) pour des bassins de la zone Meuse-Moselle

L'évaluation de la qualité des alertes de prévisions de débit, et notamment de leur anticipation, est présentée dans la partie 4 de ce rapport.

Comparaison des avertissements issus des ensembles de pluie et des ensembles de débit

Les alertes (ou avertissements) issus des prévisions d'ensemble de débit peuvent être présentées sous forme d'une carte similaire aux cartes des avertissements des ensembles de pluie. Alors que les ensembles de pluie sont comparés avec les bornes inférieure et supérieure de la pluie critique pour la durée considérée, les ensembles de débit sont directement comparés au seuil de débit pour toute l'échéance de prévision. Pour chaque bassin, on représente la probabilité de dépasser ou le nombre de membres dépassant le débit seuil. La Figure 19 illustre les différences que l'on peut obtenir entre les avertissements basés sur les ensembles de pluie et les avertissements basés sur les ensembles de débit. Il faut noter que l'estimation de pluie critique est relative à la durée de 6h, alors que les prévisions de débit ont une échéance de 12 heures pour les heures d'initialisation de 00 TU, 03 TU, 06 TU et de 9 heures pour l'initialisation à 09 TU. Les différences s'expliquent aussi par le fait que les avertissements issus des ensembles de pluie ne prennent pas en compte la distribution spatiale et temporelle de la pluie future utilisée en entrée de la modélisation hydrologique.

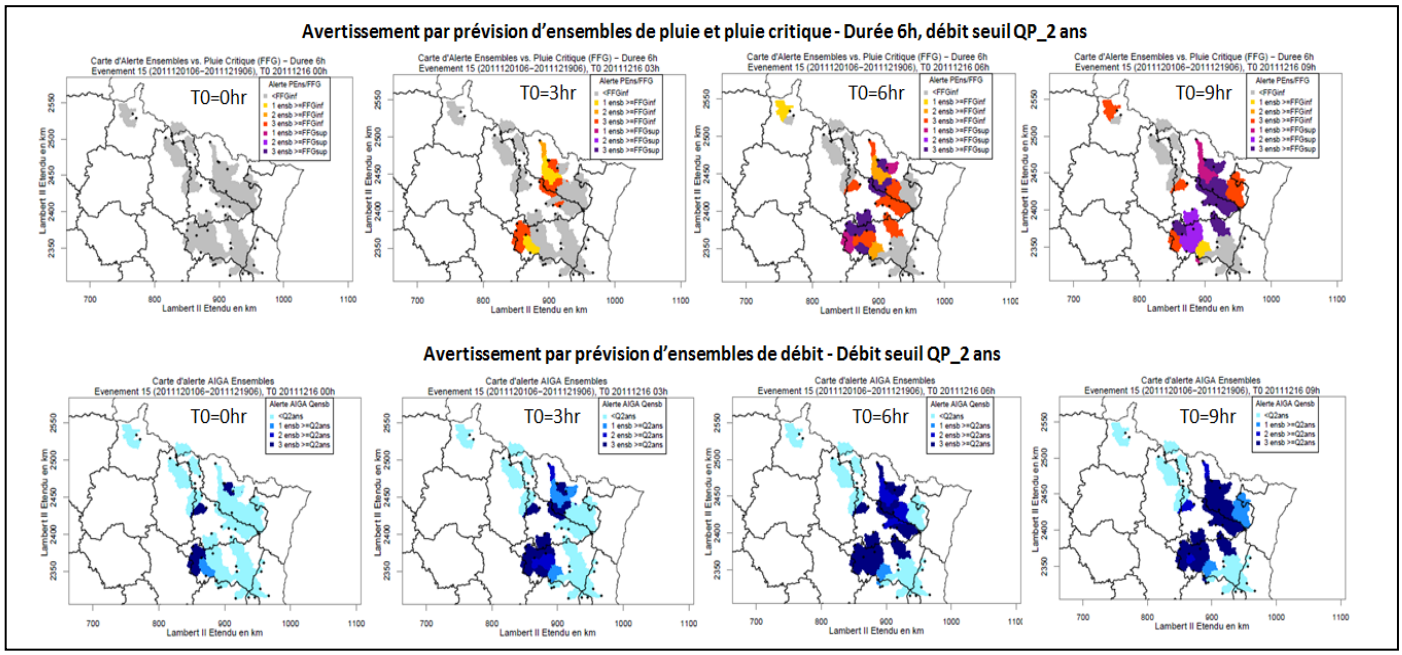

Figure 19 : Comparaison des cartes d'avertissement issus de la comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h et des cartes d'avertissements issus des prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal pour le 16 décembre 2011 de 0h à 9h (TU) pour la zone Meuse-Moselle

Les cartes correspondant aux alertes du système AIGA actuel et aux dépassements observés sont données en Figures 15 et 16 (en pages 25 et 26).

4. Evaluation de l'apport des prévisions de pluie

Cette partie concerne l'évaluation de l'apport des prévisions de pluie par l'analyse de la qualité des alertes de dépassement de seuil de débit. Cette analyse de la qualité des alertes nécessite d'intégrer plusieurs critères de vérification pour quantifier les différents aspects de leur qualité, en termes notamment de fiabilité, justesse, et anticipation (Jolliffe et Stephenson 2003, Wilks 2011, WMO 2013). Les prévisions déterministes sont également évaluées pour montrer l'apport potentiel des ensembles qui permettent de prendre en compte les incertitudes de pluie future.

L'évaluation des alertes issues des prévisions de pluie et de débit est basée sur la comparaison avec les dépassements de débit observés. Une telle évaluation permet de considérer l'impact de l'ensemble des sources d'incertitude et d'erreur sur les débits futurs. On peut remarquer qu'une évaluation réalisée avec les alertes issues du débit simulé (à partir de la pluie observée) permet de ne pas prendre en compte les sources d'incertitude et d'erreur liées au modèle hydrologique puisque le débit simulé comme les prévisions d'ensembles sont impactés par les erreurs du modèle hydrologique.

Il faut également noter que les alertes de dépassement d'un seuil de débit pour les prévisions peuvent être définies non pas avec le quantile de débit, mais avec une valeur de seuil issue des simulations de débit avec le modèle hydrologique. Cette approche permet de prendre en compte le biais potentiel du modèle ; dans ce cas, la valeur de seuil de débit pour définir un dépassement diffère entre les débits simulés ou prévus et les débits observés.

Dans la suite, on évalue les alertes issues des prévisions de pluie et de débit, ainsi que les alertes du système AIGA actuel (sans pluie future), par comparaison avec les dépassements observés en utilisant une unique valeur de seuil de débit : le débit biennal tel que défini dans la base de données SHYREG version 1 (les quantiles de période de retour 2 ans, 10ans et 50 ans sont inclus dans l'Appendice A donnant les listes des bassins sélectionnés pour les 3 zones d'étude).

a) Méthodologie d'évaluation de la qualité des alertes

L'évaluation de la qualité des alertes utilise les scores de contingence des dépassements de seuil par le débit observé et par les différentes prévisions de débit, ainsi que du croisement des prévisions de pluie avec la pluie critique. Les scores sont calculés pour chaque type de prévision pour le jeu d'évènements étudiés et les différents bassins. L'évaluation concerne également le degré d'anticipation des alertes vis-à-vis des dépassements de seuil observés.

Estimation des scores de contingence des dépassements de seuil de débit

Le tableau de contingence se définit pour un évènement donné, c'est-à-dire pour un seuil fixé (et unique) qui définit si oui ou non l'observation ou la prévision a dépassé le seuil considéré. Dans cette première évaluation, on ne prend pas en considération l'échéance de la prévision : la prévision dépasse le seuil si pour une des échéances, il y a dépassement. De plus, on comptabilise les dépassements du débit observé et du débit prévu pour chaque évènement dans son ensemble (i.e. pour toutes les dates d'initialisation de prévision de l'évènement). Sur le jeu d'évènements étudiés, on comptabilise les dépassements de seuil issus des observations et des prévisions de la façon suivante :

Evènement : dépassement d'un seuil donné		Evènement observé	
		Oui	**Non**
Evènement prévu	**Oui**	**a** (correct/hit)	**b** (fausse alerte/false alarm)
	Non	**c** (manqué/miss)	**d** (correct négatif/ true negative)

A partir du tableau de contingence, on définit les scores d'évaluation suivants (WMO 2013):

- **Biais en fréquence** ou **Frequency Bias** (FB), qui décrit si les prévisions ont tendance à produire trop de fausses alertes ou trop d'alertes manquées : FB = (a+b)/(a+c); score optimal FB=1.
- **Taux de bonne détection** ou **Probability Of Detection** (POD) (encore appelé Hit Rate), qui est conditionné par les dépassements observés : POD = a/(a+c) ; le score varie entre 0 (toutes les alertes observées sont manquées) et 1 (toutes les alertes observées sont détectées), avec un score optimal égal à 1.
- **Probability Of False Detection** (POFD) (ou False Alarm Rate), qui est conditionné par les non-dépassements observés : POFD = b/(b+d) ; le score varie entre 0 (aucune fausse alerte) et 1 (des alertes prévues pour tous les non-dépassements observés), avec un score optimal égal à 0.
- **Taux d'alerte correcte** ou **Success Ratio** (SR), qui est conditionné par les alertes prévues pour mesurer la fiabilité des prévisions : SR=a/(a+b) ; le score varie entre 0 (aucune alerte prévue qui soit correcte) et 1 (aucune fausse alerte), avec un score optimal égal à 1.
- **Critical Success Index** (CSI) qui permet de considérer les alertes manquées et les fausses alertes (mais sans différencier ces erreurs); CSI=a/(a+b+c) ; le score varie entre 0 et 1, avec un score optimal égal à 1.

<u>Prise en compte de l'anticipation des alertes</u>

L'analyse des critères de contingence est complétée par l'estimation de l'anticipation des alertes issues des prévisions sur l'ensemble de l'évènement. L'anticipation est définie vis-à-vis des alertes observées, i.e. par rapport à la date à laquelle le débit observé dépasse le seuil de débit biennal. L'anticipation est positive lorsque la prévision à une date d'initialisation T0 produit un dépassement du seuil de débit avant la date de dépassement effectif par le débit observé. A noter que pour cette analyse relative à l'ensemble d'un évènement, on ne garde que l'anticipation la plus grande qui est relative à la première date de dépassement par la prévision de débit. L'anticipation est négative lorsque la première date du dépassement prévu T0 intervient après le dépassement effectif du débit observé. On peut donc comparer sur un même jeu de bassins l'anticipation des alertes issues des différents types de prévisions.

De plus, pour compléter la première analyse des critères de contingence estimés sans prendre en compte l'échéance des prévisions et pour l'ensemble de l'évènement, ces critères sont également calculés en prenant en compte l'anticipation du dépassement de seuil par la prévision. En effet, l'objectif est de pouvoir détecter les dépassements de seuil par anticipation vis-à-vis des dépassements observés. Afin de prendre en compte l'anticipation, il est décidé de pénaliser les dépassements de seuil détectés avec retard (i.e. la première date T0 de dépassement prévu étant plus tardive que la date du dépassement effectif du débit observé), qui sont alors considérés comme alerte manquée (au lieu de correcte). Dans ce cas, le dépassement de seuil est comptabilisé comme une bonne alerte si la prévision de dépassement a une anticipation égale ou supérieure à 0 vis à vis du dépassement observé ; sinon le dépassement prévu est comptabilisé comme manqué. A noter que cela n'a pas d'impact sur le critère POFD (qui n'utilise pas le nombre d'alertes correctes ou manquées).

Alertes issues des prévisions d'ensembles de débit

L'évaluation des alertes basées sur les débits prévus est présentée pour les prévisions de débit suivantes :

- la « prévision » de débit du système AIGA actuel, sans pluie future, correspondant au débit simulé obtenu à la date d'initialisation T0, prévision (d'échéance nulle) notée Qsimu ; cette prévision permet de montrer le gain potentiel vis-à-vis du système AIGA actuel ;
- la prévision de débit issue de la pluie observée pour la même échéance que la prévision d'ensemble (échéance de 9 heures ou 12 heures suivant l'heure d'initialisation de prévision cf. section 1.c), prévision notée Qpobs ; cette prévision permet d'estimer les performances du système lorsque la prévision de pluie correspond à la pluie future « parfaite » (en négligeant les erreurs de la pluie observée) ; lorsque cette prévision est comparée aux prévisions d'ensemble de débit, on peut évaluer l'impact des erreurs de la pluie future sur les alertes ;
- la prévision de débit (pour la même échéance que la prévision d'ensemble) issue de la pluie persistante (ou pluie stationnaire), prévision notée Qpstat ;
- la prévision de débit issue de la moyenne des prévisions d'ensemble de pluie AROME-timelag, qui est notée Qpmoy ; ceci permet de montrer l'intérêt d'utiliser une prévision d'ensemble de pluie et non pas une moyenne d'ensembles pour générer des prévisions de débit.

Pour la prévision sans pluie future et la prévision issue de la pluie observée, elles sont toutes les deux issues des valeurs de débit simulé. Cependant la prévision issue de la pluie observée avec la même échéance que les prévisions d'ensembles inclut quelques valeurs supplémentaires de débit simulé pour les derniers pas de temps de chaque évènement. Les critères de contingence sont donc quasiment identiques pour ces deux prévisions lorsque l'anticipation n'est pas prise en compte.

Pour les prévisions d'ensemble, l'évaluation est réalisée avec deux types de prévisions probabilistes de dépassement du seuil de débit :

- la première prévision qui produit un dépassement lorsqu'au moins 1 des 3 membres dépasse le débit seuil ; cette prévision est notée Q1/3ens ;
- la seconde prévision qui produit un dépassement lorsqu'au moins 2 membres dépassent le débit seuil ; cette prévision est notée Q2/3ens.

Pour une prévision d'ensemble incluant un plus grand nombre de membres, la prévision de dépassement est définie en considérant différents niveaux de probabilité.

Alertes issues des prévisions d'ensembles de pluie

On évalue également la qualité des avertissements issus du croisement de la pluie critique avec les prévisions de pluie. Ceci permet d'évaluer si la qualité de détection et d'anticipation des alertes est dégradée en utilisant uniquement une estimation de pluie critique (basée sur un scenario de pluie future constante dans le temps et uniforme sur le bassin) pour prévoir les éventuels dépassements de seuil. L'évaluation de la qualité de ces avertissements est présentée avec la borne inférieure de l'intervalle de la pluie critique pour la durée de 6h. La borne inférieure de pluie critique a été choisie afin d'anticiper au mieux les dépassements de seuil de débit, même si cela peut potentiellement engendrer un plus grand nombre de fausses

alertes. Il faut également noter que les résultats sont présentés ici pour la pluie critique de durée 6 heures, limitant ainsi l'échéance de prévision de pluie qui est considérée pour les alertes (alors que les prévisions de débit ont une échéance de 9 ou 12 heures). Le choix d'utiliser la borne inférieure de l'intervalle de pluie critique permet en quelque sorte de regagner de l'anticipation pour les alertes issues des pluies.

La qualité des avertissements est présentée pour les prévisions de pluie suivantes (le terme pluie critique faisant ici référence à la borne inférieure de l'intervalle de la pluie critique) :

- la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag produisant un avertissement lorsqu'au moins 1 des 3 membres dépasse la pluie critique sur les 6 prochaines heures ; l'avertissement issu de cette prévision est noté P1/3ens_FFG ;
- la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag produisant un avertissement lorsqu'au moins 2 des 3 membres dépasse la pluie critique sur les 6 prochaines heures ; l'avertissement issu de cette prévision est noté P2/3ens_FFG ;
- la pluie observée, l'avertissement étant noté Pobs_FFG ; ceci permet d'estimer les performances du système lorsque la prévision de pluie correspond à la pluie future « parfaite » (en négligeant les erreurs de la pluie observée).

Les résultats sont présentés pour le seuil de débit biennal en considérant tous les bassins de la zone d'étude pour lesquels les prévisions d'ensemble ont pu être produites. Ceci permet d'inclure un plus grand nombre d'évènements observés et prévus, et donc d'obtenir des statistiques plus robustes, en faisant l'hypothèse que les scores de contingence ont des caractéristiques homogènes pour tous les bassins de la zone d'étude. Pour la zone Meuse-Moselle, les scores sont calculés pour une sélection des 10 évènements de crue ayant entrainé le plus de dépassements en débit, pour ne pas biaiser les scores avec un grand nombre de non-dépassements observés et prévus. Pour les zones d'étude de Rhône-Cévennes et Sud-Est, les résultats sont présentés pour l'évènement entrainant le plus de dépassements de seuil de débit pour le jeu de bassins sélectionnés.

Il faut donc noter que les statistiques présentées ci-dessous sont basées sur des échantillons réduits de bassins et d'évènements. Ces résultats sont indicatifs de l'apport potentiel des prévisions d'ensemble de pluie pour les alertes de crues rapides.

b) Qualité des alertes en zone Meuse-Moselle

L'évaluation des alertes sur les bassins de la zone Meuse-Moselle concerne les 10 évènements suivants : évènements 1 (janvier 2009), 5 (décembre 2009), 8 (août 2010), 9 (novembre 2010), 10 (décembre 2010), 11 (janvier 2011), 14 (août 2011), 15 (décembre 2011), 16 (janvier 2012) et 20 (décembre 2012).

Qualité des alertes issues des prévisions d'ensembles de débit

La Figure 20 montre les scores de contingence pour les deux types de prévisions probabilistes (Q1/3ens et Q2/3ens), la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), correspondant au système AIGA actuel, et la prévision avec la pluie observée (Qpobs). Les scores sont estimés sans et avec prise en compte de l'anticipation de dépassement prévu ; ils sont naturellement dégradés lorsque l'anticipation est prise en compte.

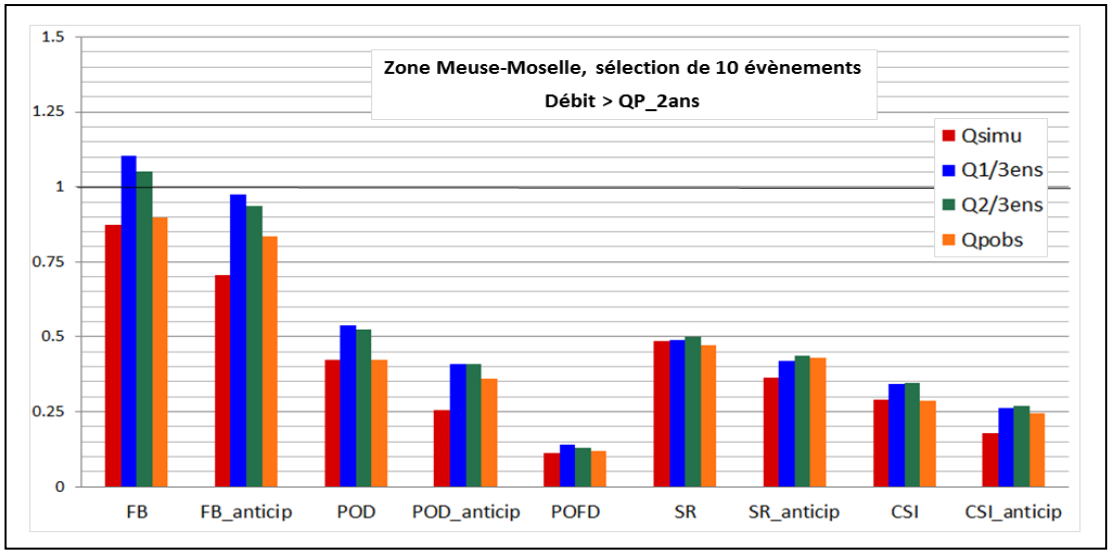

Figure 20 : Scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle

Les résultats en Figure 20 montrent que les 2 prévisions d'ensemble Q1/3ens et Q2/3ens sont supérieures à la prévision sans pluie future et, dans une moindre mesure, supérieures à la prévision avec la pluie observée pour tous les critères de contingence excepté le critère de fausse alerte (POFD). Ce critère, dont la valeur optimale est égale à 0, est légèrement dégradé avec les prévisions d'ensembles, qui produisent un peu plus de fausses alertes sur les non-dépassements de seuil observés. Le biais en fréquence (score FB) montre une tendance à produire trop d'alertes manquées avec la prévision sans pluie future et la prévision avec la pluie observée, avec une modélisation hydrologique qui sous-estime les débits pour ces évènements. Ce biais en fréquence (score FB sans prendre en compte l'anticipation) est inversé par l'utilisation des prévisions de pluie AROME-timelag, qui produisent plus de fausses alertes que d'alertes manquées du fait que ces pluies qui ont tendance à sur-estimer les pluies observées peuvent compenser les erreurs de sous-estimation du modèle hydrologique. La prise en compte de l'anticipation dans l'estimation des critères de contingence renforce le gain des prévisions d'ensembles vis-à-vis de la prévision sans pluie future pour détecter par anticipation les dépassements de seuil. A l'inverse, les gains avec les prévisions d'ensemble en comparaison avec la prévision issue de la pluie observée sont moindres, notamment pour le score de fiabilité SR_anticip et pour l'indice CSI_anticip. Mais ces gains montrent l'intérêt d'inclure, dans la modélisation hydrologique étudiée, des prévisions de pluie AROME, même imparfaites, pour améliorer la détection de dépassement de seuil de débit par compensation des erreurs de sous-estimation du modèle hydrologique.

On peut aussi noter que, généralement, la prévision Q2/3ens est légèrement supérieure à la prévision Q1/3ens. Cependant la prévision Q2/3ens inclut moins d'alertes que la prévision Q1/3ens (alerte donnée pour 2 ensembles dépassant le seuil vs. 1 seul ensemble dépassant le seuil). Le score de biais prenant en compte l'anticipation (score FB_anticip) est alors dégradé pour Q2/3ens avec une tendance à produire trop d'alertes manquées par rapport aux fausses alertes. Ayant accès aux prévisions d'ensemble et pouvant lui-même fixer le seuil de probabilité déclenchant une alerte, le prévisionniste aura à juger s'il est préférable ou non de produire plus de fausses alertes afin de diminuer les alertes manquées.

Comparaison avec les alertes des prévisions déterministes de débit

Les scores de contingence pour les différentes prévisions déterministes sont présentés en Figure 21. Les 3 membres de la prévision d'ensemble de débit, prévisions notées Qens1 (correspondant à la prévision déterministe la plus récente), Qens2 et Qens3 (correspondant à la prévision la plus ancienne), sont également évalués comme prévisions déterministes.

Les scores obtenus montrent que les prévisions probabilistes Q1/3ens et Q2/3ens sont généralement supérieures aux 3 membres considérés individuellement, ainsi qu'à la prévision issue de la moyenne des ensembles de pluie (prévision notée Qpmoy). Comme attendu, les scores des 2 prévisions déterministes les plus anciennes (Qens2 et Qens3), issues à 6 et 12 heures d'écart vis-à-vis de la prévision la plus récente (Qens1), sont légèrement dégradés lorsque le degré d'anticipation est pris en compte. La prévision issue de la pluie persistante (Qpstat) conduit naturellement à un fort biais en produisant un trop grand nombre de fausses alertes. Le gain en taux de bonne détection (scores POD et POD_anticip) est contrebalancé par une dégradation du taux POFD et des indices de fiabilité (scores SR et SR_anticip).

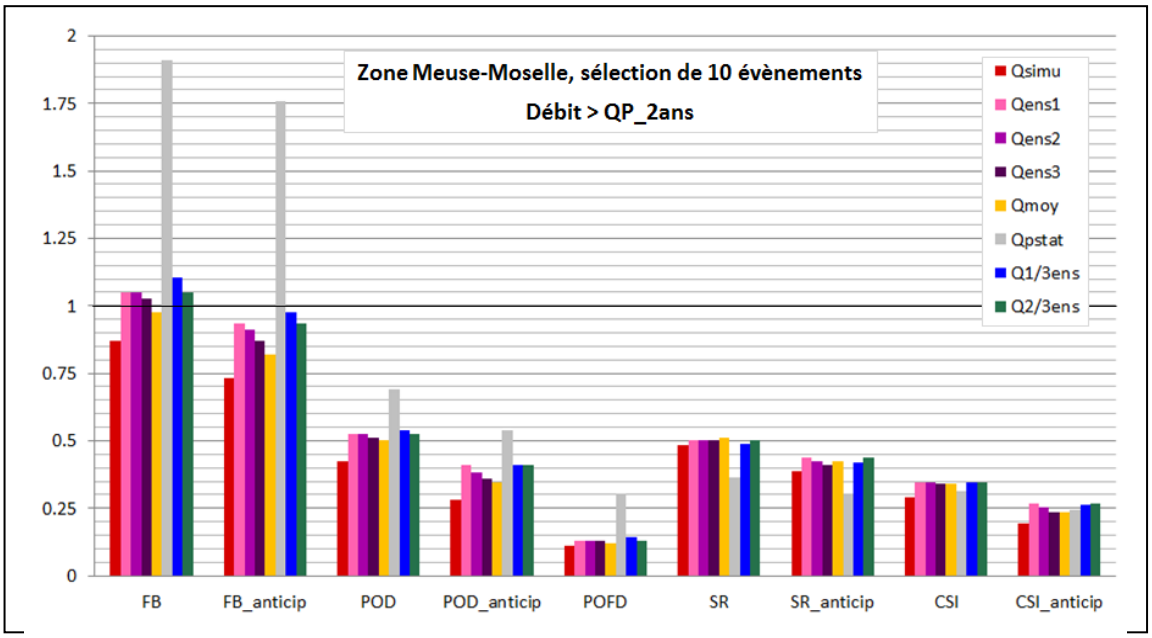

Figure 21 : Scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec les différentes prévisions déterministes de débit et les prévisions probabilistes de débit AROME pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle

Comparaison entre alertes de débit et alertes basées sur la pluie critique

La Figure 22 permet de comparer les scores de contingence pour les avertissements issus de différentes prévisions de débit avec ceux obtenus pour les avertissements basés sur le croisement entre la borne inférieure de l'intervalle de pluie critique de durée 6h (appelée pluie critique par la suite) et les prévisions de pluie. Il faut noter que les scores ont également été calculés pour les alertes basées sur la pluie critique de durée 9h (mais ces résultats ne sont pas présentés dans ce rapport). Les scores obtenus pour la durée de 9h sont très légèrement dégradés vis-à-vis de ceux relatifs à la durée 6h (moyenne des écarts de 0.02 pour Q1/3ens et de 0.01 pour Q2/3ens sur l'ensemble des scores), dû à une légère hausse des fausses alertes.

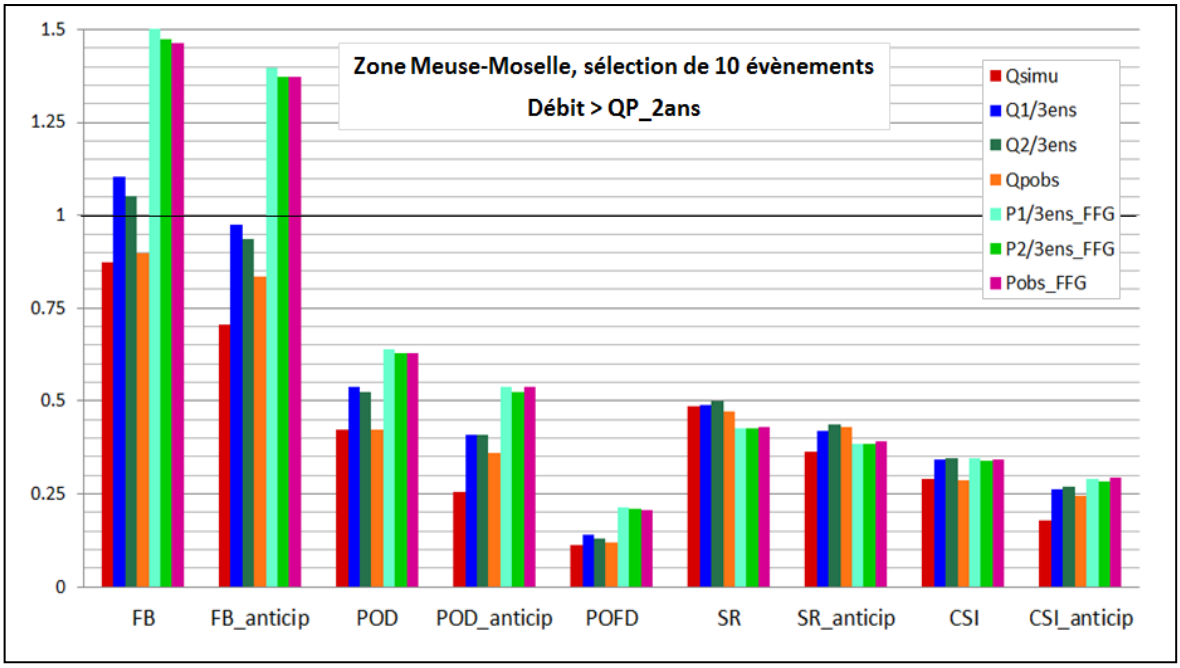

Figure 22 : Comparaison des scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions de débit et différentes prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle

Le biais en fréquence (score FB) des alertes basées sur la pluie critique et les prévisions de pluie (prévisions probabilistes AROME-timelag, P1/3ens_FFG et P2/3ens_FFG, et pluie observée, Pobs_FFG) montre une tendance à produire plus de fausses alertes que d'alertes manquées. Le critère de fausse alerte (POFD) est également dégradé avec les prévisions de pluie, qui produisent plus de fausses alertes sur les non-dépassements de seuil observés. On peut noter une dégradation des indices de fiabilité (scores SR et SR_anticip). Cependant, ceci est contrebalancé par une amélioration du gain en taux de bonne détection (scores POD et POD_anticip). Les indices CSI et CSI_anticip sont similaires pour les prévisions de débit AROME et les prévisions de pluie AROME-timelag.

Cette première évaluation des alertes basée sur les scores de contingence des dépassements du débit observé et des débits prévus, ainsi que du dépassement de la pluie critique par les prévisions de pluie, montre l'intérêt d'intégrer des prévisions d'ensemble de pluie pour améliorer la qualité de détection des dépassements de seuil. Du fait des erreurs de sous-estimation du modèle hydrologique, les prévisions donnent généralement des résultats supérieurs à la prévision basée sur la pluie observée, les erreurs sur les pluies futures venant contrebalancer les erreurs du modèle hydrologique. Sur les 10 évènements étudiés, les résultats montrent également que l'estimation d'une pluie critique avec un scénario de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin ne dégrade que légèrement la fiabilité des alertes et améliore le taux en bonne détection, en comparaison aux ensembles de débit (notamment grâce à la prise en compte de la borne inférieure de l'intervalle de pluie critique).

Cependant, les indices de fiabilité et taux de bonne détection restent relativement faibles pour ces bassins pour lesquels les 2 modèles hydrologiques ont été calés (l'étape suivante étant d'utiliser les modèles régionalisés pour juger de la qualité des alertes en milieu non jaugé) : un taux de bonne détection POD de 0,5 indique qu'un dépassement observé est une alerte manquée une fois sur deux ; un indice de fiabilité SR de 0,5 indique qu'un dépassement prévu correspond à une fausse alerte une fois sur deux.

Cette première évaluation est complétée par l'analyse de l'amélioration potentielle du degré d'anticipation de ces dépassements observés grâce aux prévisions de débit et de pluie.

Anticipation des alertes issues des prévisions d'ensembles de débit

Les résultats sont présentés pour la zone Meuse-Moselle pour quelques évènements pour lesquels des dépassements du débit biennal sont observés et prévus pour au moins 3 bassins.

La Figure 23 permet de comparer l'anticipation des alertes avec la prévision probabiliste Q1/3ens, la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), correspondant au système AIGA actuel, et la prévision avec la pluie observée (Qpobs) pour les dépassements observés. Les résultats sont représentés par valeurs décroissantes de l'anticipation avec la prévision avec pluie future nulle, les derniers bassins correspondant aux alertes manquées avec les 2 prévisions issus du débit simulé (se reporter à l'Appendice A pour la liste des bassins avec leurs identifiants). La localisation des bassins mis en alerte est donnée en Figure 24.

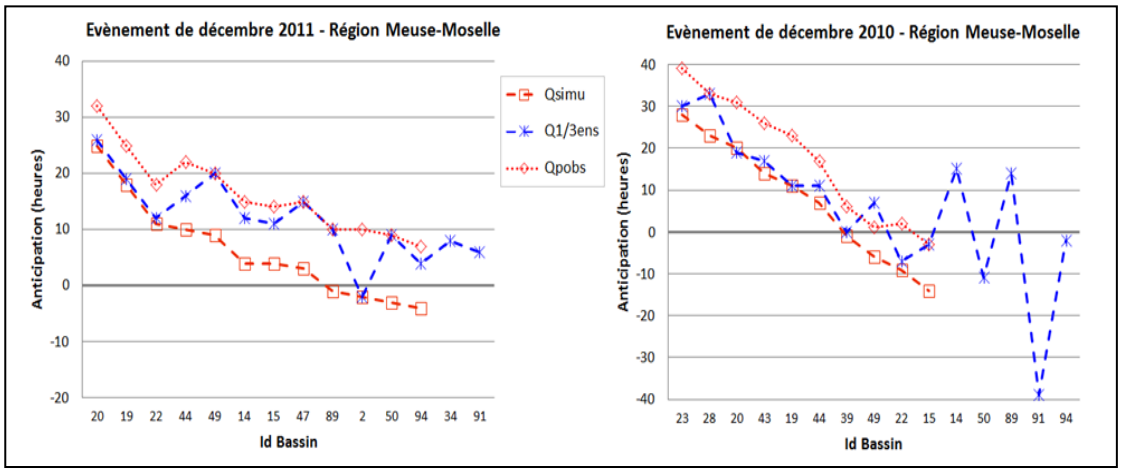

Figure 23 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et la prévision probabiliste de débit AROME (Q1/3ens) pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle

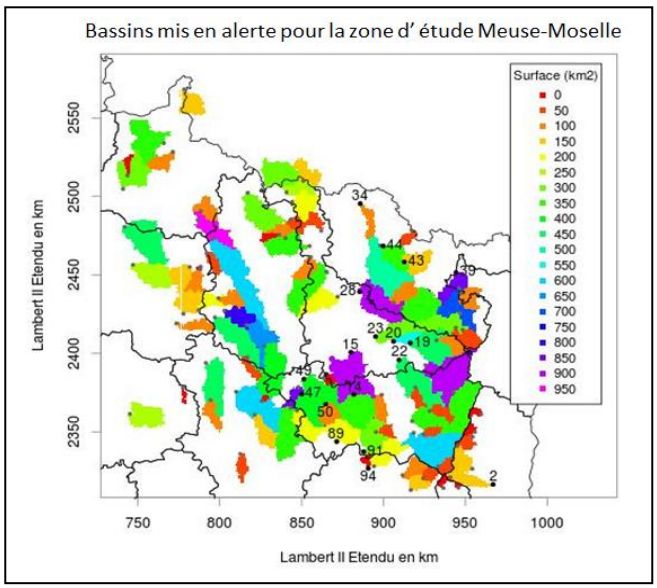

Figure 24 : Localisation des bassins mis en alerte pour le dépassement du débit biennal pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle

Pour les deux évènements de décembre 2010 et décembre 2011, correspondant aux évènements les plus forts sur la zone d'étude, l'anticipation est positive pour une large majorité de bassins pour les trois prévisions considérées. Comme remarqué lors de l'analyse des résultats de contingence, on note une diminution du nombre d'alertes manquées avec la prévision probabiliste Q1/3ens en comparaison aux dépassements des deux prévisions issues du débit simulé.

Il faut noter que les très fortes valeurs d'anticipation du débit simulé sans pluie future correspondent à une large surestimation du débit observé par le débit simulé (cette surestimation du débit peut être renforcée par la prévision de pluie si celle-ci surestime également la pluie observée). Si cette tendance à la surestimation du débit est générale pour un bassin, cela entraine une augmentation des fausses alertes. Dans le cas d'une simulation parfaite du débit, l'anticipation de l'alerte avec le débit simulé sans pluie future (équivalent au système AIGA actuel) serait nulle (le dépassement du débit simulé correspondant au dépassement du débit observé) et l'anticipation de la prévision issue de la pluie observée serait égale à l'échéance maximale de cette prévision (soit 9h ou 12h suivant l'heure d'initialisation de la prévision). Dans cette étude, l'analyse ne porte pas sur les erreurs de simulation de la modélisation hydrologique et sur son degré d'anticipation (aspects qui sont traités dans l'étude Organde 2013) mais sur l'apport potentiel de l'intégration de prévision de pluie, notamment en termes d'augmentation de l'anticipation des alertes.

En comparaison avec la prévision sans pluie future, l'anticipation de la prévision probabiliste est significativement améliorée, pour une majorité de bassins. Si l'on considère l'anticipation pour les dépassements détectés par la prévision sans pluie future (i.e. en excluant les alertes manquées du système actuel AIGA, ce qui correspond à limiter l'analyse aux 12 des 14 bassins pour décembre 2011 et aux 10 des 15 bassins pour décembre 2010), la moyenne du gain en anticipation avec la prévision probabiliste Q1/3ens est de 6,5h pour l'évènement de décembre 2011 et de 5h pour l'évènement de décembre 2010.

La comparaison avec la prévision issue de la pluie observée montre la dégradation de l'anticipation des dépassements due aux erreurs sur les pluies prévues définies à partir des prévisions AROME. Il n'y a qu'un seul bassin pour l'évènement de décembre 2010 (le bassin 49 du Vair à Soulosse-sous-Saint-Elophe) pour lequel l'anticipation avec la prévision probabiliste est améliorée. Pour les bassins pour lesquels les dépassements ont été détectés par la prévision issue de la pluie observée, la moyenne de la dégradation de l'anticipation avec la prévision probabiliste Q1/3ens due aux erreurs des prévisions de pluie est de 3,8h pour l'évènement de décembre 2011 et de 6h pour l'évènement de décembre 2010. Cependant, pour les bassins où l'anticipation de la prévision issue de la pluie observée est positive, cette dégradation due aux erreurs sur les prévisions de pluie entraine des retards (i.e. une anticipation négative) pour un seul bassin pour chacun des deux évènements (bassin 2 pour décembre 2011 et bassin 22 pour décembre 2010).

Cette analyse sur l'amélioration du degré d'anticipation montre à nouveau l'intérêt d'inclure, dans la modélisation hydrologique étudiée, des prévisions de pluie AROME, même imparfaites, pour améliorer l'anticipation des détections de dépassement de seuil vis-à-vis des détections du système actuel sans pluie future. Cependant, les erreurs des prévisions de pluie entrainent une dégradation du degré d'anticipation vis-à-vis des prévisions issues de la pluie observée, dégradation plus ou moins importante suivant les bassins et l'évènement étudiés.

Comparaison avec l'anticipation des prévisions déterministes

La Figure 25 permet de comparer l'anticipation obtenue avec toutes les prévisions déterministes, et notamment avec les 3 membres de la prévision d'ensemble AROME considérés individuellement comme des prévisions déterministes (notées Qens1, Qens2 et Qens3).

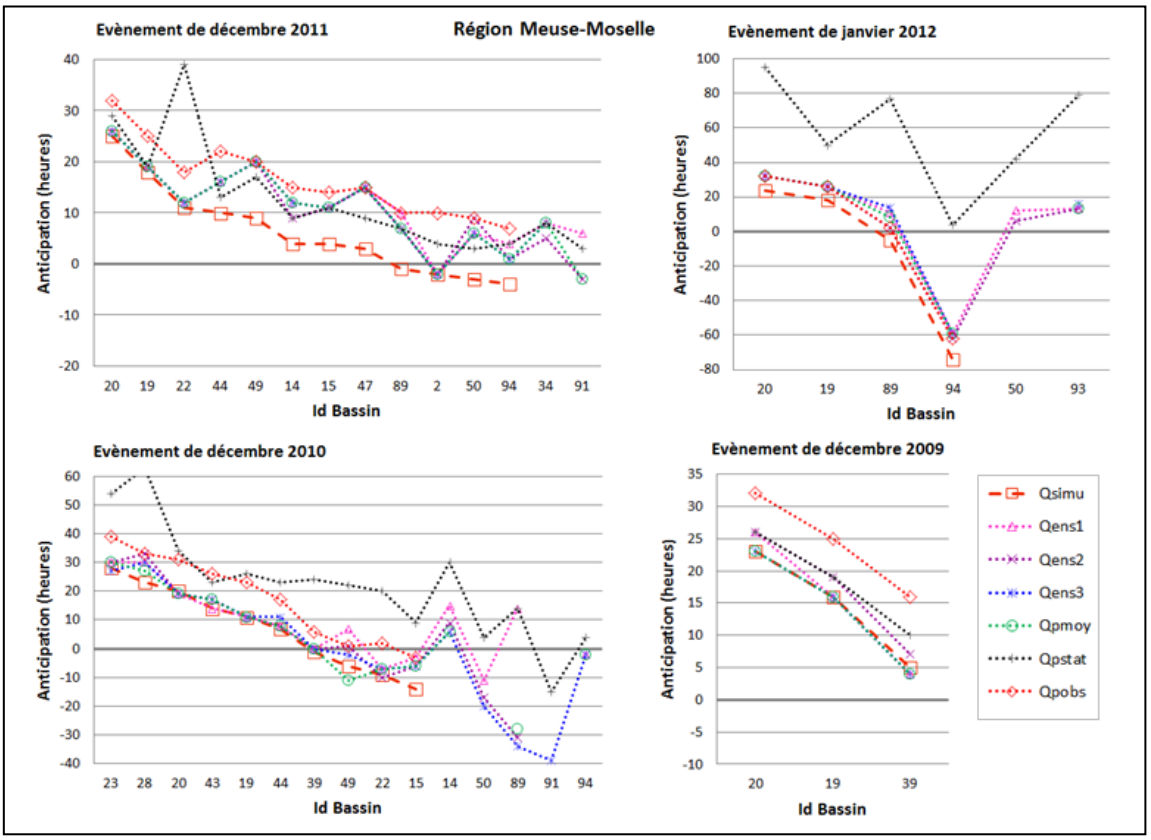

Figure 25 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec les différentes prévisions déterministes et les 3 membres de la prévision d'ensemble de débit AROME pour les évènements de décembre 2009, 2010 et 2011, et de janvier 2012 en zone Meuse-Moselle

Les 3 membres de la prévision AROME ont des degrés d'anticipation généralement similaires, cependant avec quelques différences pour certains bassins. On peut noter que la prévision AROME la plus récente (Qens1) n'obtient pas toujours l'anticipation la plus forte. Egalement, la prévision issue de la moyenne des prévisions d'ensemble de pluie (Qpmoy) aura tendance à dégrader l'anticipation. Pour les évènements de décembre 2010 et janvier 2012, la prévision issue de la pluie persistante (Qpstat) améliore très fortement l'anticipation. Mais ces statistiques d'anticipation ne reflètent que les dépassements observés. Or, les critères de contingence présentés précédemment (Figures 21 et 22) soulignent la forte dégradation de la qualité de détection des dépassements de seuil avec cette prévision, dû au grand nombre de fausses alertes.

Comparaison entre l'anticipation des alertes de débit et anticipation des alertes basées sur la pluie critique

La Figure 26 permet de comparer l'anticipation des alertes basées sur les prévisions de débit avec les alertes issues du croisement entre la borne inférieure de pluie critique de durée 6h et les prévisions de pluie. On peut noter que l'anticipation avec la pluie critique est légèrement dégradée vis-à-vis de l'anticipation avec les prévisions de débit pour l'évènement de

décembre 2011 mais légèrement accrue pour l'évènement de décembre 2010, que ce soit en utilisant les prévisions de pluie (comparaison Q1/3ens vs. P1/3_FFG) ou la pluie observée (comparaison Qpobs vs. Pobs_FFG). Cette différence de performance entre les 2 évènements illustre le fait que, pour les évènements ayant une plus forte variabilité spatiale et/ou temporelle, l'utilisation d'une pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin est plus préjudiciable pour l'anticipation des crues. Egalement il faut noter que les prévisions de débit ont une échéance de 9h à 12h alors que la pluie critique est relative à la durée de 6h. Les résultats (non présentés dans ce rapport) pour les alertes issues de la pluie critique de durée 9h et des prévisions probabilistes de pluie en comparaison avec les alertes issues de la pluie critique de durée 6h montrent pour l'évènement de décembre 2011 des anticipations améliorées de 3 heures ou 6 heures pour 6 des 14 bassins et une anticipation dégradée de 3 heures pour le bassin 20. Les résultats sont donc variables en fonction de l'échéance considérée, de la qualité des prévisions de pluie et des caractéristiques des évènements. Mais ils montrent une nette amélioration de l'anticipation avec les alertes de pluie et de débit en comparaison avec le système actuel sans pluie future.

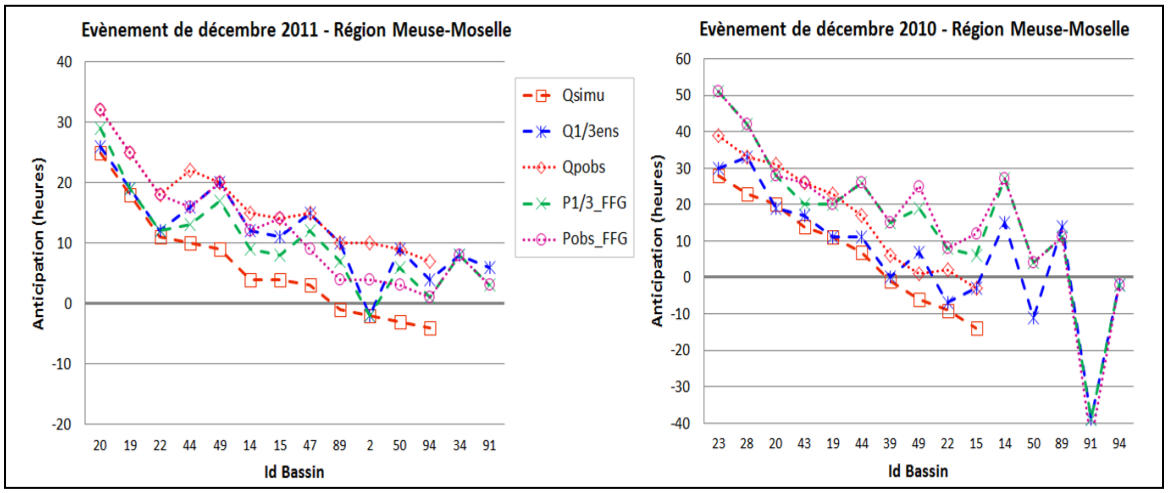

Figure 26 : Comparaison de l'anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur les prévisions de pluie (prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et prévision issue de la pluie observée (Pobs_FFG)) croisées avec la pluie critique pour la durée de 6h pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle

Ces résultats illustrent l'intérêt d'intégrer des prévisions de pluie, soit directement dans la modélisation hydrologique pour obtenir des prévisions de débit, soit par croisement avec une estimation de pluie critique, pour détecter les éventuels dépassements de seuil de débit dans les prochaines heures. L'intérêt de pleinement prendre en compte la distribution spatio-temporelle des prévisions de pluie pour les alertes issus des prévisions d'ensemble de débit (et non une pluie critique de bassin) est variable selon les évènements. Pour un évènement caractérisé par une plus forte variabilité spatiale et/ou temporelle de pluie, l'utilisation d'une pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin sera potentiellement plus préjudiciable à la qualité de l'alerte.

c) Apport des prévisions de pluie pour la région Sud-Est

Cette section vise à illustrer l'apport des prévisions de pluie pour la zone d'étude Sud-Est pour l'évènement de crue ayant entrainé le plus de dépassements des débits biennal et

décennal pour les bassins sélectionnés : l'évènement de novembre 2011. Les deux modèles GR4J et GR-SD ont été calibrés par Organde (2013) et les simulations de débit, ainsi que les prévisions de pluie et de débit, ont été générées pour novembre 2011 pour 35 bassins. Vu le petit nombre de bassins pour un évènement unique, les résultats sont donnés en terme de contingence des bonnes alertes, alertes manquées, fausses alertes et alertes négatives correctes (et non en terme de scores de contingence).

Cartes des avertissements issus des prévisions de pluie et de débit avec les dépassements observés et les alertes du système AIGA

La Figure 27 présente les dépassements observés pour le début de cet évènement, qui sont à comparer avec les alertes AIGA basées sur le débit simulé de la Figure 28.

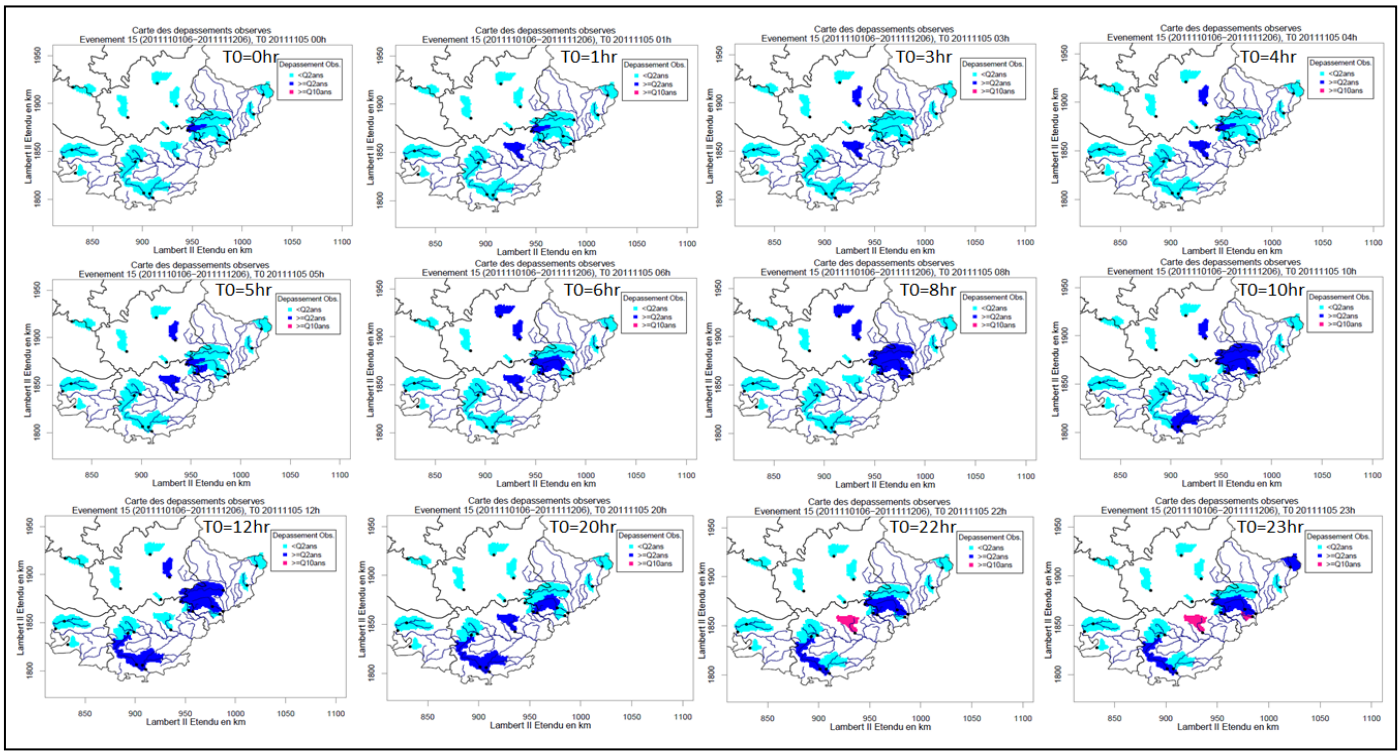

Figure 27 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 5 décembre 2011 de 00h à 23h (TU) pour la zone Sud-Est

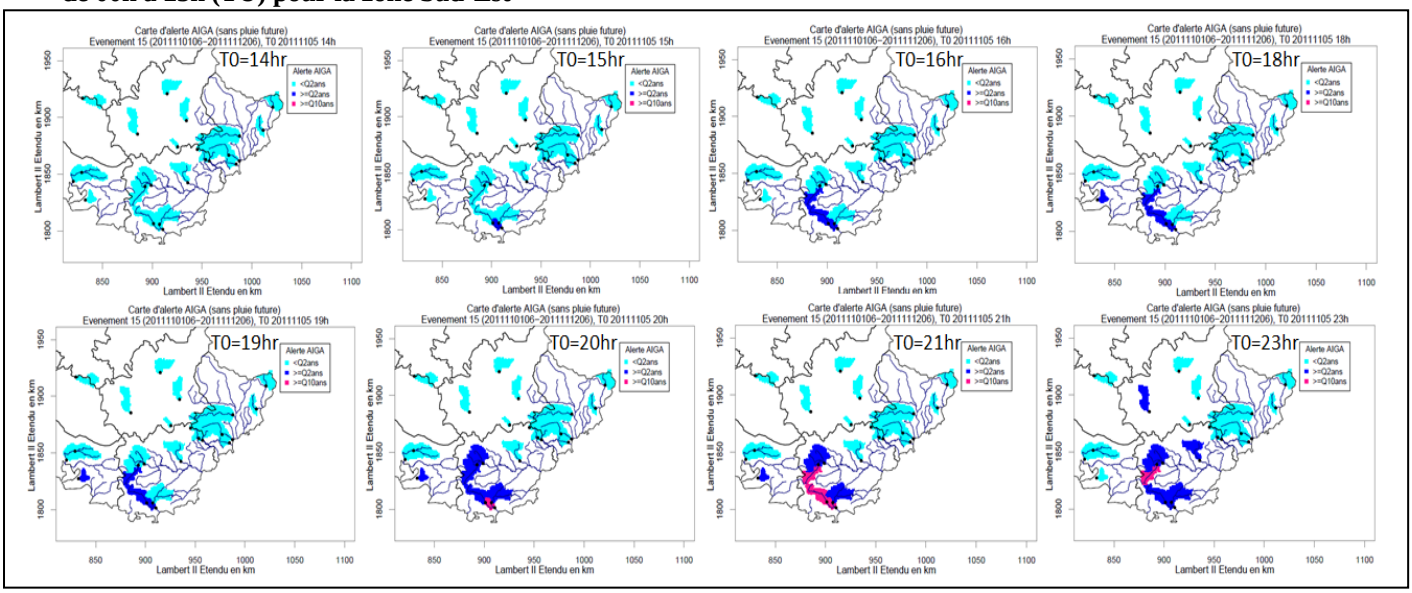

Figure 28 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 5 décembre 2011 de 14h à 23h (TU) pour la zone Sud-Est

La comparaison entre alertes issues des débits simulés et dépassements observés illustre le problème de sous-estimation des simulations hydrologiques, conduisant à des alertes manquées, ainsi que le retard dans les dépassements pour certains bassins (cf. Figure 31 ci-dessous).

La Figure 29 présente les avertissements issus de la comparaison entre les prévisions d'ensemble de pluie AROME-timelag et l'intervalle de pluie critique (borne inferieure notée FFGinf et borne supérieure FFGsup) pour la durée de 6h pour le seuil de débit biennal. Grâce à la prise en compte de la pluie future sur les 6 prochaines heures, des avertissements peuvent

être donnés par anticipation mais leur qualité dépend de la qualité de simulation des débits et de la qualité des prévisions de pluie.

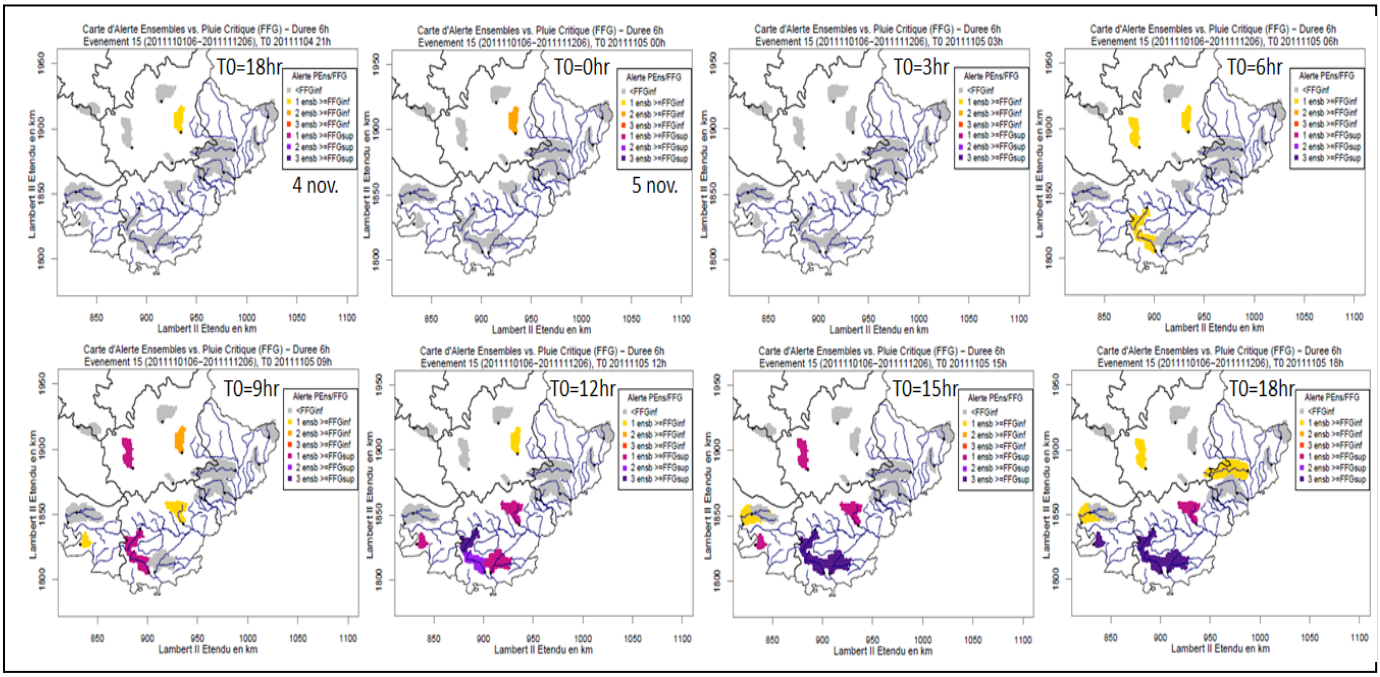

Figure 29 : Cartes d'avertissement par comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h pour le dépassement du débit biennal du 4 novembre 2011 à 18h (TU) au 5 novembre à 18h (TU) pour la zone d'étude Sud-Est

Dans la Figure 30, les avertissements issus des prévisions d'ensemble de débit AROME sont représentés pour le dépassement du débit biennal.

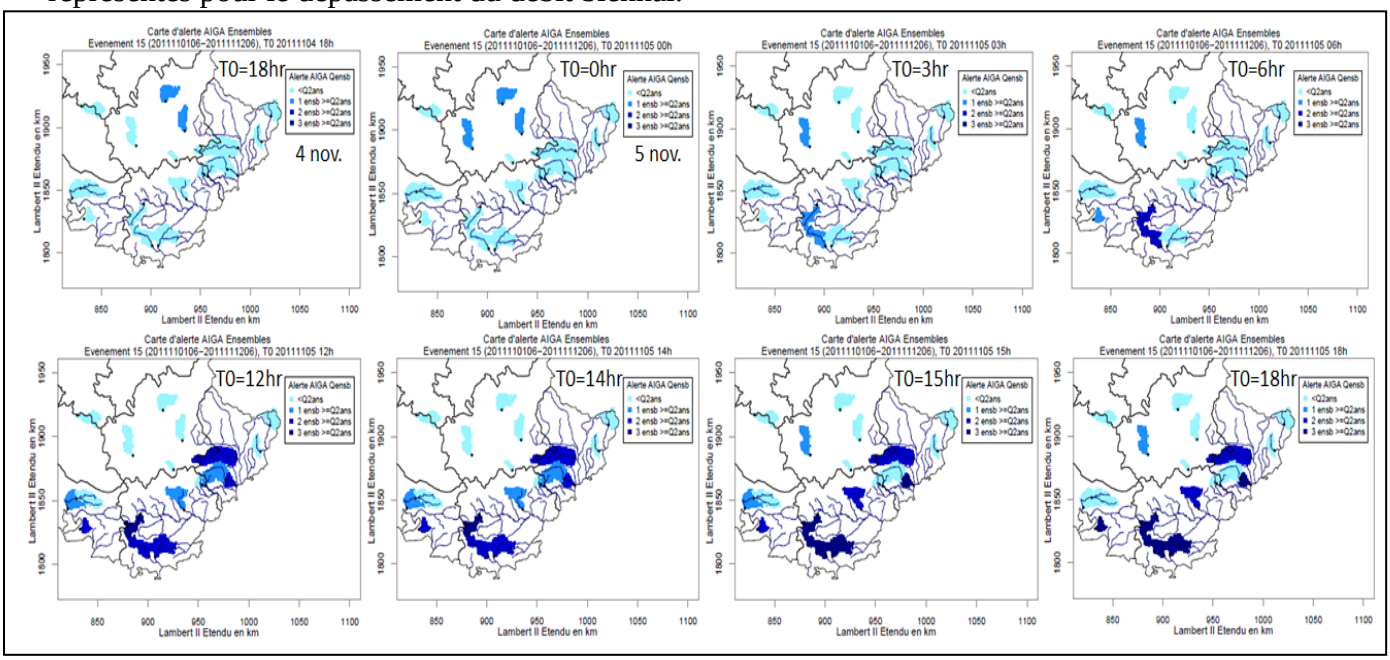

Figure 30 : Cartes d'avertissement avec les prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal du 4 novembre 2011 à 18h (TU) au 5 novembre à 18h (TU) pour la zone d'étude Sud-Est

Statistiques de contingence des alertes

Les statistiques de contingence pour cet évènement de novembre 2011 sont représentées en Figure 31 pour les prévisions suivantes : la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat). Le nombre total de dépassements observés sur cet évènement est de 19. Pour les alertes correctes et manquées, les statistiques sont données sans et avec prise en compte de l'anticipation des alertes (vis-à-vis des dépassements observés).

Pour les alertes AIGA, relatives à la prévision de débit simulé sans pluie future, elles ont été données pour 8 des 19 bassins mais sans aucune anticipation (Hit=8 et Hit_anticip=0 pour Qsimu). La prévision probabiliste Q1/3ens obtient de meilleurs résultats que la prévision Q2/3ens, et que la prévision issue de la pluie observée à l'exception d'une fausse alerte supplémentaire.

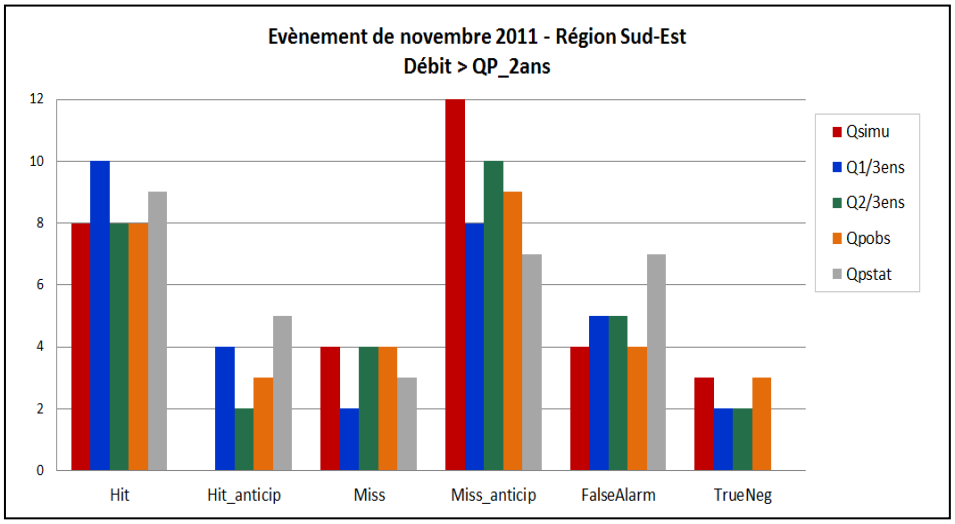

Figure 31 : Statistiques de contingence (nombres d'alertes correctes (Hit), alertes correctes avec anticipation (Hit_anticip), alertes manquées (Miss), alertes manquées ou sans anticipation (Miss_anticip), fausses alertes (FalseAlarm) et alertes correctes négatives) pour le dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs), la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est

En Figure 32, on compare les scores de contingence obtenus pour les 3 alertes issues des prévisions de débit et les 2 alertes issus du croisement entre la borne inférieure de pluie critique et les prévisions de pluie future, alerte basée sur la prévision AROME-timelag P1/3ens_FFG et alerte basée sur la pluie observée Pobs_FFG. La prévision probabiliste Q1/3ens obtient de meilleurs résultats pour cet évènement et pour les bassins retenus, résultats très similaires à ceux de P1/3ens_FFG et Pobs_FFG.

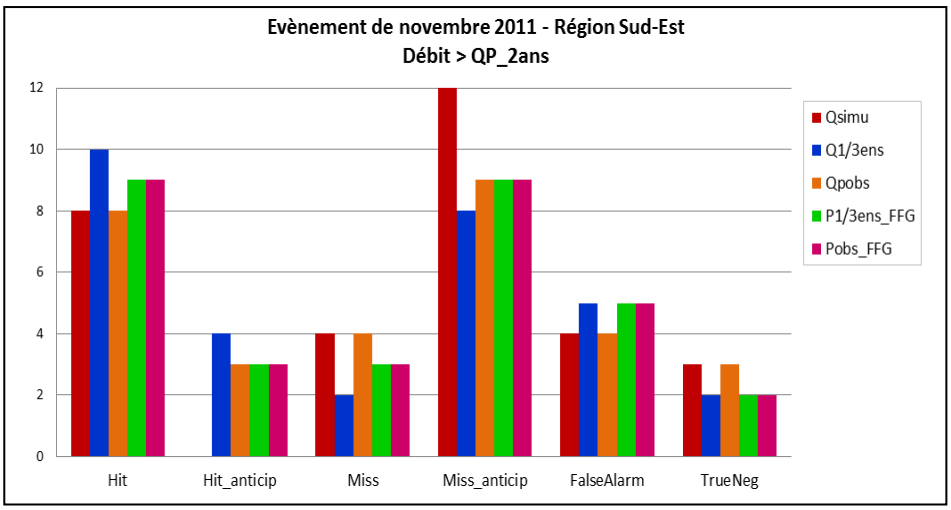

Figure 32 : Comparaison des statistiques de contingence pour le dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit et les prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est

Anticipation des alertes

Le degré d'anticipation des différentes prévisions de débit est donné en Figure 33, accompagné de la carte de localisation des bassins mis en alerte. L'anticipation de la prévision probabiliste de débit Q1/3ens est positive pour 4 des 10 bassins. Cependant, pour 6 des 10 bassins, elle est supérieure à l'anticipation de la prévision Qpobs, montrant que les erreurs de prévision de pluie contrebalancent les erreurs de la modélisation hydrologique.

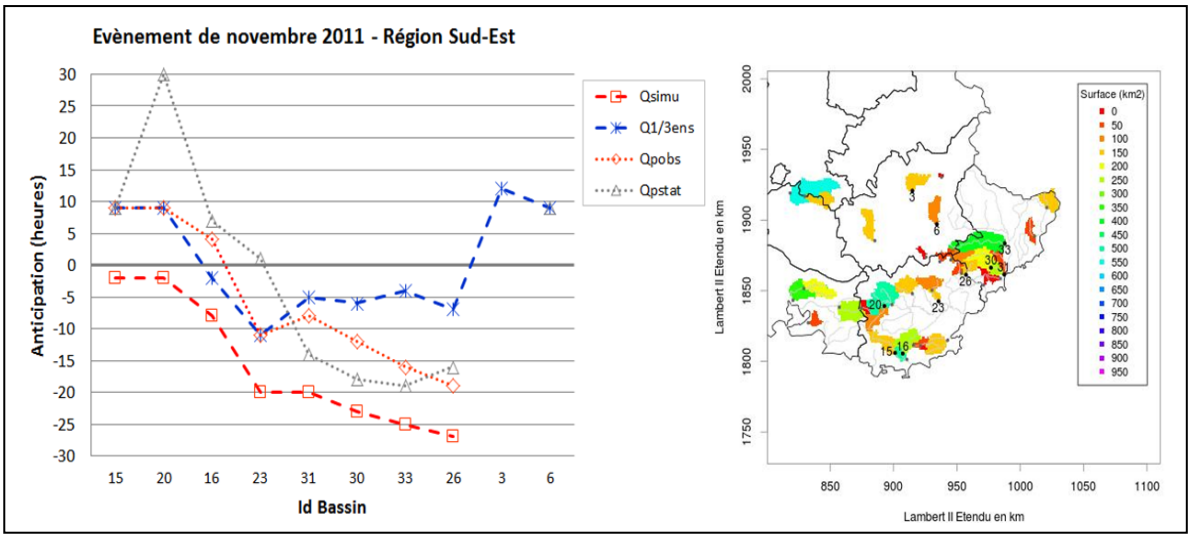

Figure 33 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions déterministes de débit et la prévision probabiliste de débit AROME Q1/3ens pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est et carte de localisation des bassins concernés

La Figure 34 permet de comparer l'anticipation des prévisions de débit aux prévisions de pluie croisées avec la pluie critique. A l'exception d'un seul bassin, l'anticipation de la prévision probabiliste de débit Q1/3ens est meilleure que celle de la prévision probabiliste de pluie P1/3ens_FFG, montrant pour cet évènement et les bassins sélectionnés une plus grande importance de la prise en compte de la distribution temporelle et spatiale des pluies futures pour améliorer l'anticipation des alertes.

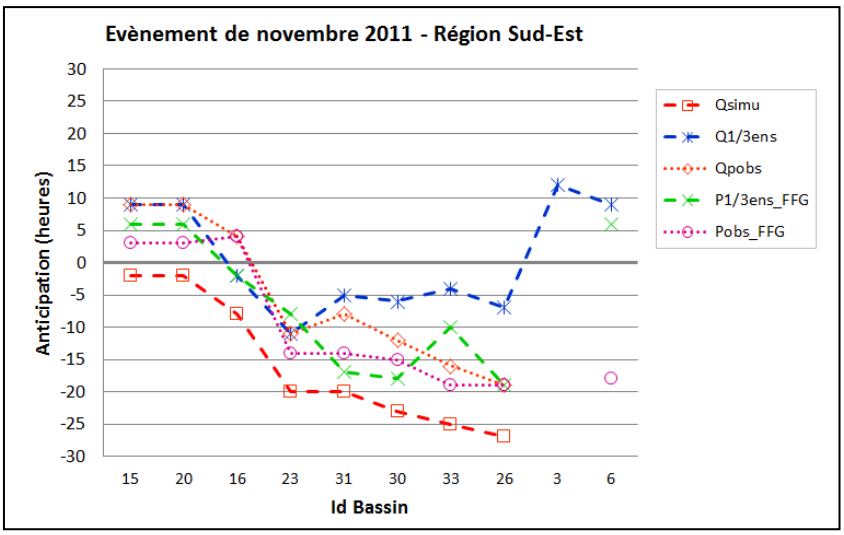

Figure 34 : Comparaison de l'anticipation des alertes issues des prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur la pluie critique pour la durée de 6h croisée avec la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et la pluie observée (Pobs_FFG) pour le dépassement du débit biennal et pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est

d) Apport des prévisions de pluie pour la région Rhône-Cévennes

L'apport des prévisions de pluie pour la zone d'étude Rhône-Cévennes est présenté pour l'évènement de novembre 2011, ayant également entrainé le plus de dépassements des débits biennal et décennal pour les bassins sélectionnés. Comme pour les deux autres régions, les deux modèles GR4J et GR-SD ont été calibrés par Organde (2013) et les simulations de débit, ainsi que les prévisions de pluie et de débit ont été générées pour 50 bassins.

<u>Cartes des avertissements issus des prévisions de pluie et de débit avec les dépassements observés et les alertes du système AIGA</u>

Les cartes de dépassements observés et des alertes du système AIGA (sans pluie future) sont représentées pour le début de l'évènement en Figures 35 et 36 respectivement.

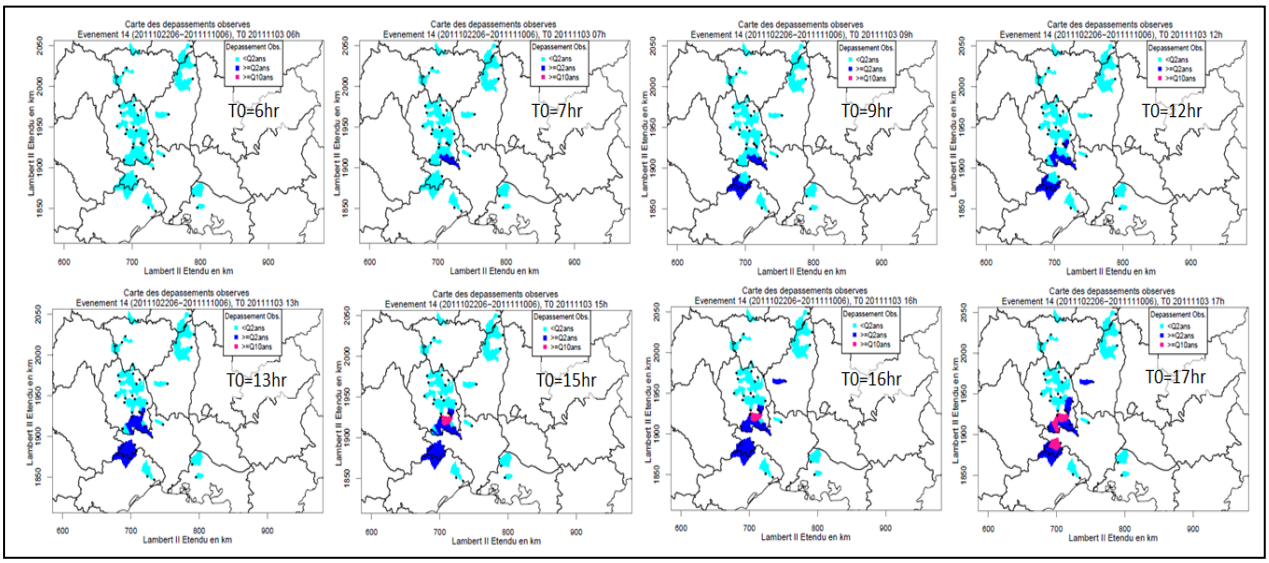

Figure 35 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 3 novembre 2011 de 6h à 17h (TU) pour la zone Rhône-Cévennes

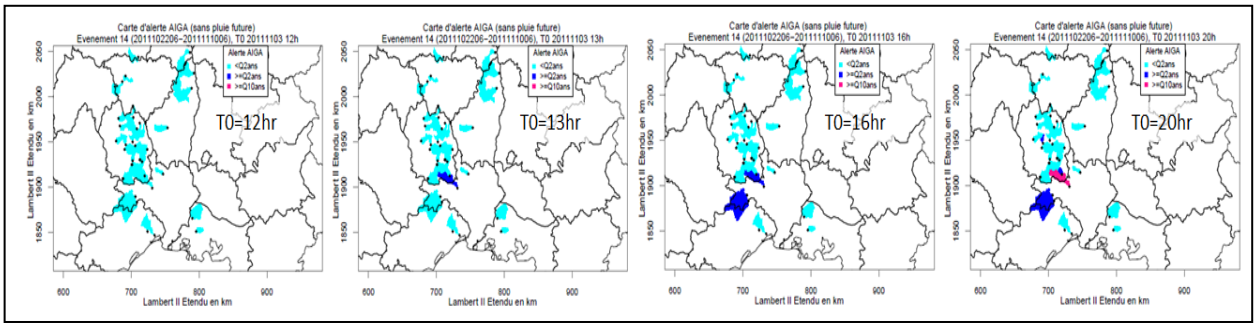

Figure 36 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 3 novembre 2011 de 12h à 20h (TU) pour la zone Rhône-Cévennes

Ces cartes sont à comparer avec les cartes d'avertissements issus du croisement entre prévision d'ensemble de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h et avec les cartes d'avertissements issus des prévisions d'ensemble de débit AROME, cartes représentées en Figures 37 et 38.

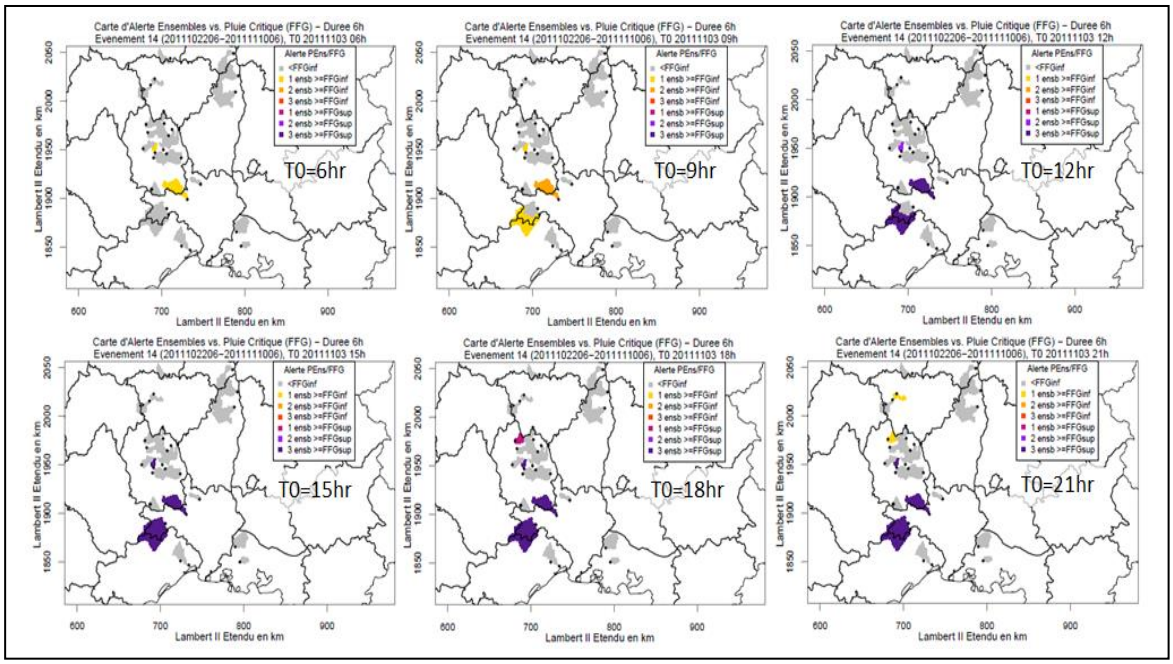

Figure 37 : Cartes d'avertissement par comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h pour le dépassement du débit biennal du 3 novembre 2011 de 6h (TU) à 21h (TU) pour la zone d'étude Rhône-Cévennes

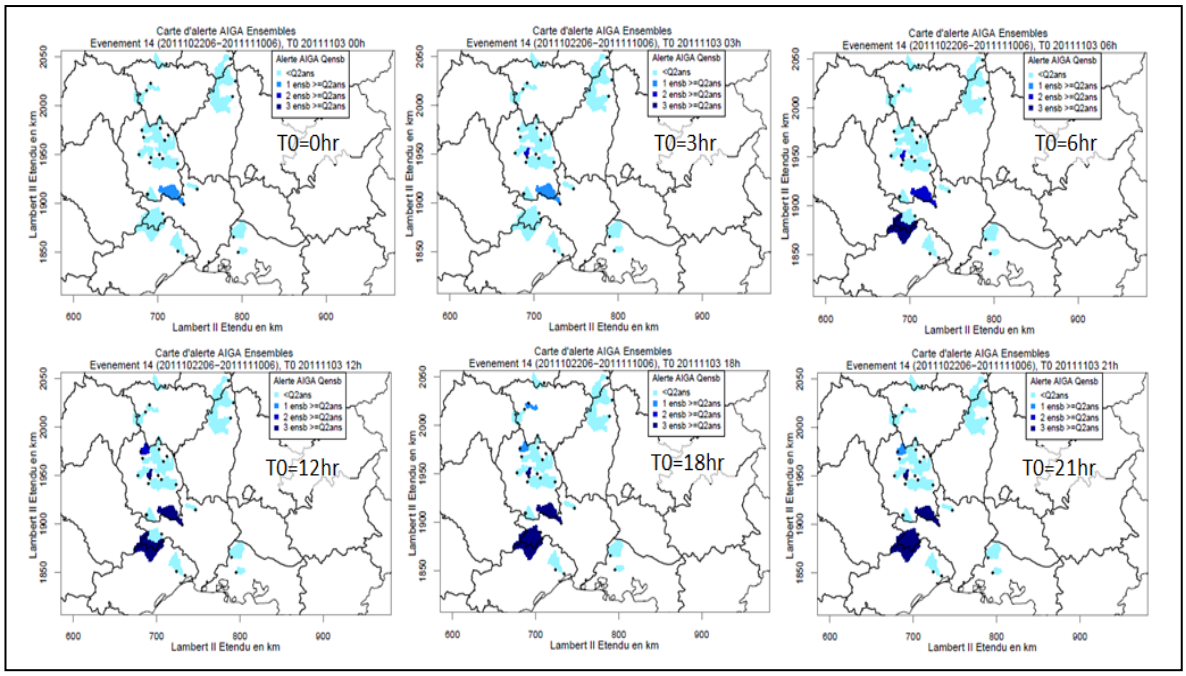

Figure 38 : Cartes d'avertissement avec les prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal du 3 novembre 2011 de 0h (TU) à 21h (TU) pour la zone d'étude Rhône-Cévennes

Statistiques de contingence des alertes

Les statistiques de contingence pour cet évènement de novembre 2011 sont représentées en Figure 39 pour les prévisions suivantes : la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat). Pour cet évènement, la prévision probabiliste Q2/3ens est légèrement meilleure que la prévision Q1/3ens.

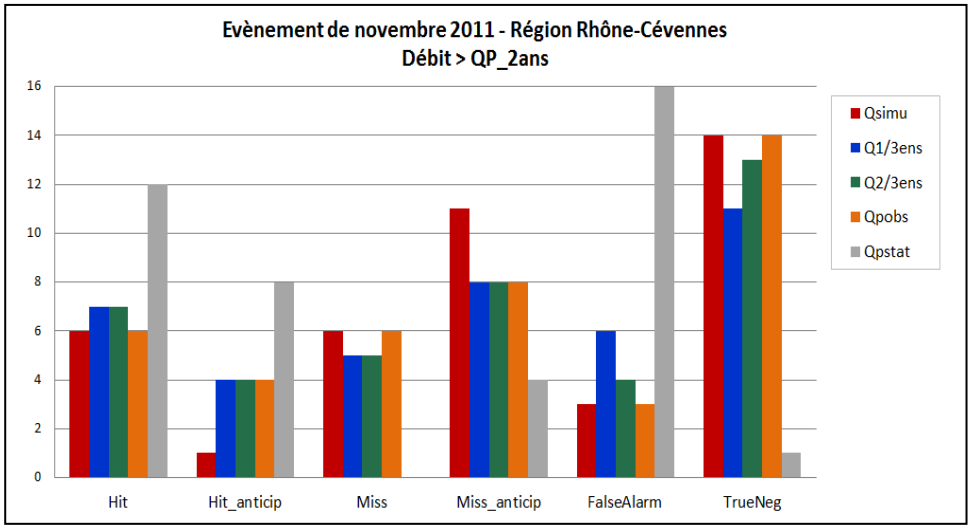

Figure 39 : Statistiques de contingence (nombres d'alertes correctes (Hit), alertes correctes avec anticipation (Hit_anticip), alertes manquées (Miss), alertes manquées ou sans anticipation (Miss_anticip), fausses alertes (FalseAlarm) et alertes correctes négatives) pour le dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs), la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes

La comparaison des statistiques de contingence entre les prévisions de débit et les prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de la Figure 40 ne montre aucune différence entre la prévision probabiliste de débit Q1/3ens et la prévision probabiliste de pluie P1/3ens_FFG.

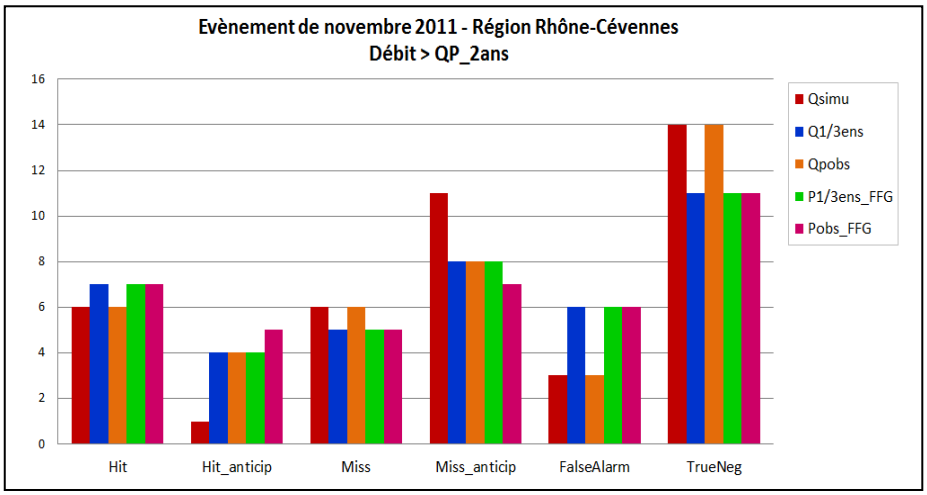

Figure 40 : Comparaison des statistiques de contingence pour le dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit et les prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes

Anticipation des alertes

Le degré d'anticipation des différentes prévisions de débit est donné en Figure 41, accompagné de la carte de localisation des bassins mis en alerte. L'anticipation de la prévision probabiliste de débit Q1/3ens est positive pour 4 des 7 bassins. La différence d'anticipation de cette prévision avec la prévision issue de la pluie observée, Qpobs, montre l'impact des erreurs de prévision de pluie, qui, pour le bassin 37 (et dans une moindre mesure le bassin 43), contrebalancent de façon positive les erreurs de la modélisation hydrologique.

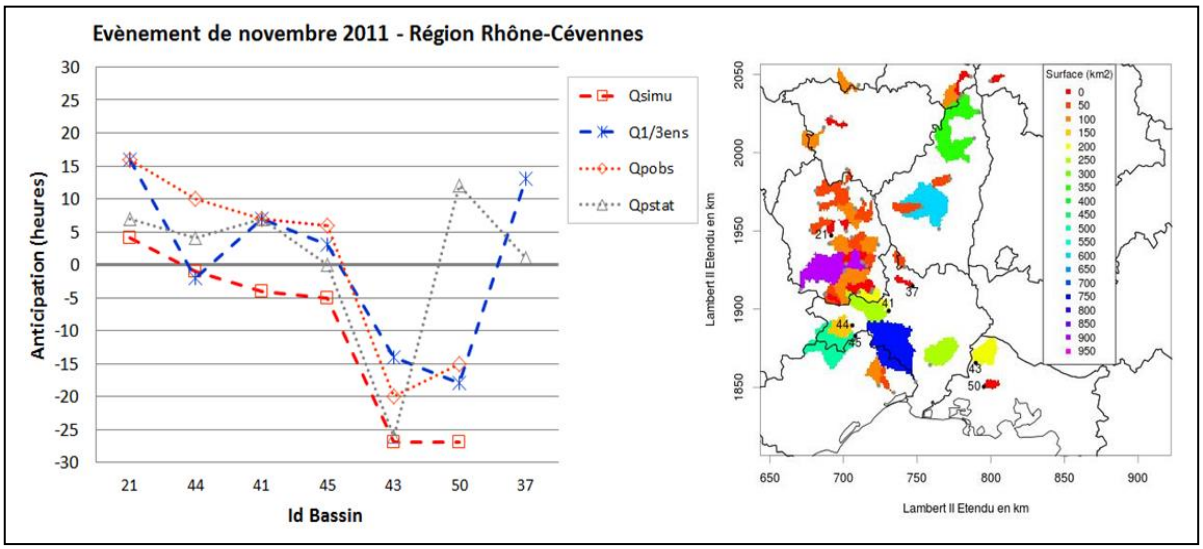

Figure 41 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions déterministes de débit et la prévision probabiliste de débit AROME Q1/3ens pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes et carte de localisation des bassins concernés

En Figure 42, on compare l'anticipation des prévisions de débit avec celle des prévisions de pluie croisées avec la pluie critique. L'anticipation de la prévision probabiliste de débit Q1/3ens est meilleure que celle de la prévision probabiliste de pluie P1/3ens_FFG pour une majorité de bassins, montrant pour l'évènement et les bassins considérés une relative importance de la prise en compte de la distribution spatio-temporelle des pluies futures.

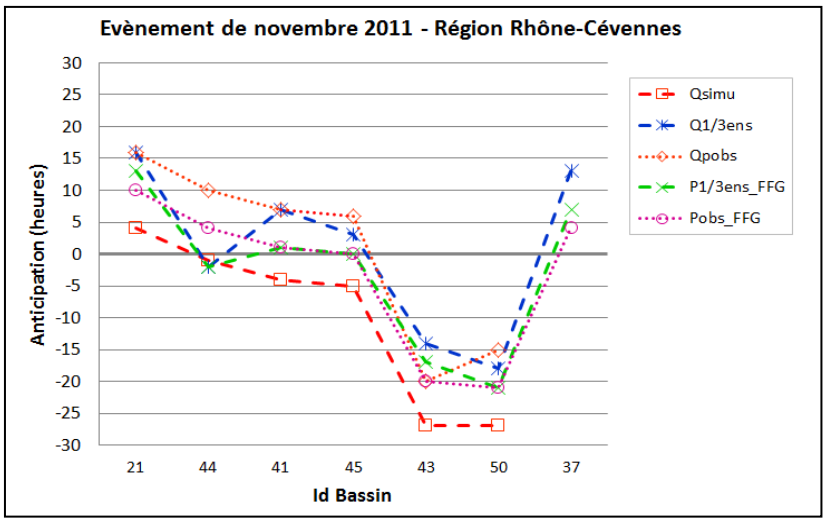

Figure 42 : Comparaison de l'anticipation des alertes issues des prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur la pluie critique pour la durée de 6h croisée avec la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et la pluie observée (Pobs_FFG) pour le dépassement du débit biennal et pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes

e) Intérêt des deux approches d'alerte

Dans cette étude, l'évaluation de la qualité de détection des dépassements de seuil de débit observés et de leur anticipation sur les trois zones sélectionnées illustre l'intérêt d'intégrer des prévisions de pluie, soit directement dans la modélisation hydrologique pour obtenir des prévisions de débit, soit par croisement avec une estimation de pluie critique. Malgré l'échantillon réduit de bassins et d'évènements de crue, il apparait clairement que ces prévisions de pluie permettent d'améliorer la qualité des alertes vis-à-vis du système AIGA actuel, surtout en termes d'anticipation. Les résultats des ensembles AROME-timelag construits par décalage temporel sont également meilleurs en comparaison aux résultats des prévisions déterministes de pluie AROME, y compris pour la prévision déterministe la plus récente et la prévision moyenne des 3 ensembles de pluie. Les erreurs des prévisions de pluie peuvent parfois contrebalancer les erreurs du modèle hydrologique pour obtenir de meilleurs résultats en détection et anticipation en comparaison avec les prévisions de débit issues de la pluie observée.

Cependant, les résultats en termes de fiabilité des alertes et taux de bonne détection restent relativement modestes sur ces bassins calés. L'intérêt de prendre en compte la distribution spatio-temporelle des prévisions de pluie pour les alertes issues des prévisions d'ensemble de débit (distribution spatio-temporelle qui n'est pas considérée par croisement avec la pluie critique de bassin) est variable selon les évènements et les bassins, mais généralement bénéfique. Il faut également noter que les avertissements avec la pluie critique sont basés sur la borne inférieure de l'intervalle de pluie critique, et non la borne supérieure, pour réduire le nombre d'alertes manquées et gagner en anticipation.

Les deux approches pour des alertes en termes de débit ou de pluie sont complémentaires pour identifier les bassins les plus sujets à des dépassements de seuil de débit en réponse aux pluies des prochaines heures. L'estimation d'une pluie critique permet de communiquer des seuils critiques de cumuls de pluie future, ce qui facilite le dialogue avec les prévisionnistes de la météo pour affiner l'expertise des prévisions de pluie en fonction de ces seuils. L'intégration de prévisions d'ensemble de pluie dans la modélisation hydrologique permet de pleinement prendre en compte la distribution spatio-temporelle des pluies futures telle que décrite par les modèles de prévisions météorologiques. L'impact de cette distribution des pluies est forcément variable en fonction de l'évènement pluvieux et des caractéristiques du bassin. Cependant, la prise en compte de cette distribution des pluies futures est a priori d'autant plus importante que l'échéance considérée est longue : le scenario de pluie d'intensité constante et uniforme sur l'ensemble du bassin sur tous les futurs pas de temps est généralement plus réaliste à de plus courte échéance pour un évènement de crue soudaine.

En ce qui concerne la mise en œuvre en opérationnel, l'estimation de pluie critique pour une durée donnée requiert l'intégration successive de scenarios de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin versant qui soient de plus en plus pessimistes pour comparer le débit prévu avec le seuil de débit considéré. Une fois la pluie critique estimée, les prévisions d'ensemble de pluie doivent être cumulées sur la durée considérée et sur le bassin versant pour chaque membre de l'ensemble pour être ensuite comparées aux intervalles de pluie critique. La seconde approche repose tout d'abord sur le traitement des prévisions de pluie pour en extraire les grilles de pluie future relative au bassin versant pour chacun des pas de temps futurs et pour chacun des membres de la prévision d'ensemble. Le modèle hydrologique utilise ensuite chaque membre de la prévision d'ensemble de pluie pour produire successivement les membres de la prévision d'ensemble de débit. Le nombre de simulations hydrologiques successives dépend donc du nombre de membres de la prévision d'ensemble et peut être plus couteux que les simulations hydrologiques avec les scenarios de pluie critique successifs pour la première approche.

Par ailleurs, les deux approches bénéficient de la prise en compte des incertitudes de pluie future (grâce à des prévisions de pluie d'ensembles de type timelag dans cette étude), ce qui est critique pour les évènements de crues soudaines caractérisés par une fine échelle spatio-temporelle. Cependant, les incertitudes de type hydrologique (issues de la paramétrisation du modèle hydrologique, des conditions initiales et de la structure du modèle) doivent également être prises en compte pour produire des prévisions probabilistes de débit plus fiables. Par le futur, il sera également possible de prendre en compte les températures pour une meilleure modélisation des processus de neige, ce qui impliquera également des incertitudes sur les températures futures. La prise en compte de ces différentes sources d'incertitude sera alors facilitée par un système de prévision d'ensemble de débit qui intègre les prévisions d'ensembles de pluie et de température et qui peut alors combiner les incertitudes météorologiques et les incertitudes hydrologiques.

5. Conclusions et Perspectives

Deux approches ont été proposées pour intégrer les prévisions d'ensemble de pluie dans le système d'alerte AIGA. La première approche s'appuie sur l'estimation de la pluie critique de bassin, nécessaire pour initier le dépassement du seuil de débit. La pluie critique est comparée aux prévisions d'ensemble de pluie pour émettre ou non un avertissement de dépassement du seuil de débit. La deuxième approche consiste à intégrer directement les prévisions d'ensemble de pluie dans le modèle pluie-débit pour générer des prévisions d'ensemble de débit. Les alertes de dépassement de seuil de débit sont donc exprimées différemment pour chacune des deux approches : dépassement exprimé en termes de pluie par comparaison des prévisions d'ensemble de pluie avec la pluie critique de bassin pour la première approche ; dépassement exprimé en termes de débit pour la seconde approche par comparaison entre les prévisions d'ensemble de débit et le seuil de débit. La deuxième approche permet de considérer la distribution spatio-temporelle des pluies futures, alors que la première approche considère une pluie critique de bassin d'intensité constante et uniforme sur le bassin.

Ces deux types d'alerte sont comparés aux alertes obtenues avec le système AIGA actuel, qui n'inclut aucune pluie future, pour illustrer l'apport potentiel de l'intégration de ces prévisions de pluie pour chacune des approches. Les alertes sont aussi comparées aux dépassements observés. L'évaluation porte sur les scores de contingence pour la détection des dépassements du seuil de débit et sur le degré d'anticipation des alertes.

L'étude se base sur une des modélisations hydrologiques proposées et testées par Organde (2013) avec un couplage modèle continu journalier et modèle évènementiel horaire semi-distribué. Le travail utilise les prévisions de pluie déterministes du modèle AROME de Météo-France, qui modélise les processus convectifs. Ces prévisions sont disponibles au pas de temps horaire, à la résolution de 2,5 km pour une échéance de 30 heures, et sont produites 4 fois par jour. Les prévisions déterministes successives ont permis de produire des prévisions d'ensemble par décalage temporel, appelées AROME-timelag, avec 3 membres pour des échéances de 9h ou de 12 h suivant l'heure d'initialisation de prévision. L'utilisation de prévisions d'ensemble de pluie et débit a permis de définir la prévision probabiliste pour 2 niveaux de probabilité en fonction du nombre de membres dépassant le seuil considéré. Différentes prévisions déterministes ont également été considérées (les prévisions déterministes AROME, la moyenne de la prévision d'ensemble AROME-timelag, et la prévision de pluie persistante) pour analyser l'apport des prévisions d'ensemble vis-à-vis de prévisions déterministes.

Le risque hydrologique de dépassement du seuil de débit est représenté et analysé avec les informations suivantes :

- les cartes de pluie critique pour tous les bassins (les bassins étant triés par surface décroissante pour visualiser les valeurs sur les bassins emboîtés), afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit ;
- les graphes de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h et 6h pour un seuil de débit donné avec les différentes prévisions de pluie ;
- les cartes de ratio entre prévision de pluie et pluie critique pour une durée et un seuil de débit donnés pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure à la pluie critique ; il faut noter que les résultats des alertes en terme de pluie ont été basés sur le dépassement de la borne inférieure de l'intervalle de pluie critique (et non la borne supérieure) pour réduire le nombre d'alertes manquées et gagner en anticipation ;

- les cartes de probabilité des prévisions d'ensemble de débit de dépasser le seuil de débit pour une mise en alerte des bassins lorsqu'un ou plusieurs membres de la prévision d'ensemble de débit dépassent ce seuil ;
- les cartes d'alerte du système AIGA actuel et les cartes des dépassements observés, avec une représentation par bassin versant similaire aux cartes de pluie critique.

L'analyse des avertissements pour le débit biennal sur les évènements définis pour les 3 zones d'étude montre l'intérêt d'intégrer des prévisions d'ensemble de pluie dans le modèle hydrologique pour améliorer les alertes. La modélisation hydrologique testée ici tend à sous-estimer les débits et donc à produire trop d'alertes manquées. La prise en compte des prévisions de pluie AROME-timelag, prévisions imparfaites, contrebalancent les erreurs du modèle hydrologique pour produire plus de fausses alertes que d'alertes manquées et améliorer la qualité de détection et d'anticipation des alertes. Les résultats obtenus montrent que la prise en compte de la distribution spatio-temporelle des prévisions de pluie pour les alertes issues des prévisions d'ensemble de débit (distribution spatio-temporelle qui n'est pas considérée par croisement avec la pluie critique de bassin) a un impact variable suivant les évènements pluvieux et les caractéristiques de bassin, même si cet impact est généralement bénéfique sur les évènements étudiés. Par ailleurs, la prise en compte de la distribution des pluies futures est a priori d'autant plus importante que l'échéance considérée est longue : le scenario de pluie d'intensité constante et uniforme sur l'ensemble du bassin sur tous les futurs pas de temps est généralement plus réaliste à de plus courte échéance pour un évènement de crue soudaine.

Cependant, les résultats de cette étude ont été obtenus à partir d'un échantillon réduit de bassins versants et d'évènements de crue. D'autre part, les indices de fiabilité et taux de bonne détection restent relativement faibles pour ces bassins pour lesquels les 2 modèles hydrologiques ont été calés. L'étape suivante serait d'évaluer les modèles régionalisés pour juger de la qualité des alertes en milieu non jaugé. La critique des données hydrométriques est également à prendre en compte pour la sélection des bassins utilisés lors de la calibration et la régionalisation de la modélisation hydrologique et pour l'évaluation de la qualité des alertes. De plus, les prévisions d'ensemble de pluie et de débit doivent également être évaluées pour chacune des échéances par comparaison directe avec les données d'observations, pour compléter l'analyse présentée ici de la qualité en termes de dépassement d'un unique seuil.

La qualité des avertissements du système AIGA avec des prévisions de pluie dépend de la qualité de ces prévisions, des performances du modèle pluie-débit et de la qualité des données observées utilisées pour l'initialisation du modèle. L'expertise des prévisionnistes des SPC et de Météo-France peut donc permettre une meilleure interprétation des informations, grâce à leurs connaissances des performances passées du modèle pluie-débit et du système de prévision météorologique, ainsi que de la qualité des observations de pluie et débit.

Des perspectives d'amélioration sont proposées :

- la qualité de détection et d'anticipation des dépassements de débit peut être analysée avec une réactualisation des prévisions tous les quarts d'heures en intégrant les dernières observations (dans cette étude, les prévisions sont produites toutes les 3 heures); le prévisionniste pourra alors analyser la cohérence et la persistance des alertes issues de plusieurs dates de prévision successives ;
- les seuils de débit utilisés dans cette étude (issus des quantiles de débit SHYREG de la base de données version 1) peuvent être redéfinis à partir des débits

simulés pour prendre en compte les biais du modèle pluie-débit ; les seuils peuvent également être modulés en fonction des enjeux, pour une prise en compte de la vulnérabilité et fournir ainsi des avertissements sur le risque (par croisement entre les informations d'aléa et de vulnérabilité) ;

- il est nécessaire de poursuivre l'évaluation des performances avec le modèle hydrologique régionalisé pour juger de sa qualité pour des bassins non jaugés ; l'évaluation peut aussi utiliser des retours sur les dégâts observés sur le terrain pour ne pas limiter l'analyse aux résultats en bassins jaugés ;
- l'estimation des incertitudes de pluie peut être améliorée, notamment par la prise en compte d'autres prévisions d'ensemble de pluie, telles que les prévisions d'ensemble COSMO-DE-EPS produites 8 fois par jour, à partir de plusieurs modèles atmosphériques, pour générer 20 membres avec une échéance maximale de 21h ; le modèle COSMO-DE (Gebhardt et al. 2011) du Deutscher Wetterdienst (DWD), qui est opérationnel depuis décembre 2010, permet comme le modèle AROME de modéliser à la résolution de 2,8 km les processus convectifs ; les prévisions d'ensemble sont disponibles sur le tiers Nord-Est de la France ; il serait également intéressant de tester l'apport de prévisions d'ensemble immédiates issues des données radar des dernières heures (prévisions de très court terme issues de techniques de nowcasting) car ces prévisions ont vocation à être utilisées en complément des prévisions produites par les modèles atmosphériques tels qu'AROME ou COSMO-DE ;
- les incertitudes hydrologiques sont également à prendre en compte, en utilisant par exemple les jeux de paramètres développés lors de la régionalisation du modèle pluie-débit et en améliorant l'initialisation du modèle, notamment grâce aux informations sur les derniers débits observés pour des bassins jaugés voisins.

Les deux approches qui produisent des alertes en termes de pluie et en termes de débit sont complémentaires. La première approche permet de communiquer une information spatiale de seuils critiques de cumuls de pluie future en faisant l'hypothèse qu'un scenario de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin est réaliste. Cette information de pluie critique peut permettre aux prévisionnistes (et notamment aux prévisionnistes de la météo) d'affiner leur expertise des prévisions de pluie en fonction de ces seuils. Pour la seconde approche, l'intégration de prévisions d'ensemble de pluie dans la modélisation hydrologique permet de pleinement prendre en compte la distribution spatio-temporelle des pluies futures telle que décrite par les prévisions météorologiques (sachant que les ensembles de pluie décrivent l'incertitude de cette distribution spatio-temporelle vue par les modèles de prévision météorologique). Un système de prévision d'ensemble de débit permettra aussi d'intégrer plus facilement d'autres sources d'incertitude, comme les incertitudes hydrologiques ou les incertitudes sur les températures futures si une modélisation des processus de neige est prise en compte, pour produire des prévisions probabilistes de débit potentiellement plus fiables et donc améliorer la qualité des alertes.

6. Références

Arnaud, P., J. Lavabre, 2002. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research*, 38(6), 111-1111.

Arnaud, P., Lavabre, J., Sol B., Desouches, Ch., 2008. Régionalisation d'un générateur de pluies horaires sur la France métropolitaine pour la connaissance de l'aléa pluviographique. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 34-46.

Ben Bouallègue, Z., Theis, S. E., Gebhardt, C. 2013. Enhancing COSMO-DE-EPS ensemble forecasts by inexpensive techniques. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(1), 49-59.

Demargne, J., Wu, L., Regonda, S., Brown, J.D., Lee, H., He, M., Seo, D.-J., Hartman, R., Fresch, M., Schaake, J., and Zhu, Y. 2014. The science of NOAA's operational Hydrologic Ensemble Forecast Service. *Bulletin of American Meteorological Society*, 20 p. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00081.1

Demargne J., 2013. Application de la méthode de Flash Flood Guidance avec AIGA pour la prévision des crues éclairs en milieu non jaugé. *Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie*, 63 p.

Demargne J., Javelle P., 2012. Service de prévision des crues éclaires du National Weather Service des Etats-Unis. *Rapport d'étude*, 48 p.

Gebhardt, C., Theis, S. E., Paulat, M., Ben Bouallègue, Z. 2011. Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. *Atmospheric Resources*, 100(2-3), 168–177.

Georgakakos, K.P., 2006. Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, 317(1-2), 81-103.

Javelle P., Pansu J., Arnaud P., Bidet Y., Janet B., 2011. The AIGA method: an operational method using radar rainfall for flood warning in the South of France. Weather Radar and Hydrology conference. Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011.

Javelle P., Fouchier C., Arnaud P. and Lavabre J., 2010. Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 267-274.

Javelle P., Demargne J., Defrance D. et Arnaud P., 2013. Evaluating flash flood warnings at ungauged locations: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological Sciences Journal*, accepté pour publication.

Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2003. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, Wiley and Sons, Chichester, England, 2003, 254 p.

Maire, A., Javelle, P., 2012. Extension nationale de la méthode AIGA : Comparaison à des avertissements basés sur des dépassements de seuil de pluie. *Rapport d'étude*, 44 p.

Mittermaier, M. P., 2007. Improving short-range high-resolution model precipitation forecast skill using time-lagged ensembles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 1487–1500.

Organde, D., Arnaud P., Fine J.-A., Fouchier C., Folton N. et Lavabre J., 2013. Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26 (1) : 65-78.

Organde D., 2012. Extension nationale de la méthode AIGA. Evaluation de AIGA débit sur un échantillon de bassins versants du territoire national. *Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie*, 38 p.

Organde D., 2013. Amélioration de l'approche AIGA par l'extension nationale de son domaine d'application. *Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie*, 33 p.

Perrin, C., C. Michel, et al., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.

Ramos, M.H., 2013 : Evaluation de la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble GRP à partir des prévisions météorologiques d'ensemble de Météo-France (PEARP), Evaluation au pas de temps tri-horaire. *Rapport de Synthèse, Convention DGPR/SCHAPI - Irstea*, 50 p.

Randrianasolo, A., Ramos, M.H., 2011 : Evaluation de la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble construites à partir des prévisions météorologiques d'ensemble de Météo-France (PEARP). *Rapport de Synthèse, Convention Cemagref-SCHAPI*, 31 p.

Randrianasolo, A., Ramos, M.H., Andreassian, V., 2011: Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: using neighbour catchments for model setup and updating. *Advances in Geosciences*, 29, 1-11.

Ronsoux Fouchier C., 2010. Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse de doctorat, université de Montpellier 2, 266 p.

Ronsoux Fouchier C., 2012. Evaluation des alertes du système AIGA avec une base de dégâts terrain. *Rapport d'étude*, xx p.

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V. 2010. The AROME–France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139, 976-991.

Wilks D.S., 2006. Statistical Methods in Atmospheric Sciences, Academic Press, San Diego, California, 627 p.

World Meteorological Organization (WMO), 2013. Forecast Verification – Issues, Methods and FAQ, WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification, http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/

Appendice A : Listes des Bassins Versants

Zone Meuse-Moselle

Tableau 2 : Liste des 92 bassins calibrés pour la zone Meuse-Moselle
Sont inclus les attributs suivants : identifiant du bassin (ID bassin), code de la base de données SCHAPI (Code), surface de bassin (de la base de données SCHAPI), nom du bassin (Nom), identifiant de l'exutoire du bassin (ID Exutoire), indice d'influence de la méthode SHYREG (Influence SHYREG), quantiles de la base de données SHYREG version 1.0 pour les périodes de retour de 2 ans, 10 ans et 50 ans.

ID bassin	Code	Surface (km2)	Nom	ID Exutoire	Influence SHYREG	QP_2ans (m3/s)	QP_10ans (m3/s)	QP_50ans (m3/s)
1	A1202050	9	La Doller a Sewen [Lerchenmatt]	RS_12184	0.00	6.98	13.54	23.46
2	A1252010	179	La Doller a Reiningue	RS_4096	0.05	70.39	120.6	192.1
3	A1402020	8	La Thur a Wildenstein	RS_10861	0.00	6.58	11.99	19.66
4	A1432010	158	La Thur a Willer-sur-Thur	RS_6181	0.13	54.14	95.81	155.53
6	A2023030	44	La Petite Fecht a Stosswihr [Village]	RS_11193	0.01	13.7	26.86	46.68
7	A2113010	39	La Behine a Lapoutroie	RS_2785	0.00	8.36	16.28	27.1
8	A4020610	71	La Moselle a Fresse-sur-Moselle	MEMO_4219	0.00	62.79	105.99	163.9
9	A4173010	63	La Cleurie a Cleurie	MEMO_5462	0.00	25.65	40.45	60.43
10	A4200630	626	La Moselle a Saint-Nabord [Noir Gueux]	MEMO_2640	0.00	268.13	426.91	647.33
11	A4333010	95	Le Neune a Laveline-devant-Bruyeres	MEMO_3674	0.00	19.29	31.41	46.9
12	A4362030	356	La Vologne a Chenimenil [2]	MEMO_2130	0.00	68.02	109.29	161.47
13	A4632010	105	L'Aviere a Frizon [Basse Frizon]	MEMO_2448	0.15	25.47	42.11	64.57
14	A5261020	381	Le Madon a Mirecourt [station annonce de crue]	MEMO_1515	0.00	82.4	130.99	193.6
15	A5431010	944	Le Madon a Pulligny	MEMO_890	0.00	162.48	254.67	368.21
16	A6051020	368	La Meurthe a Saint-Die	MEMO_730	0.00	54.73	93.68	140.91
17	A6311010	934	La Meurthe a Baccarat [mairie]	MEMO_769	0.01	104.78	180.06	269.51
18	A6431120	114	La Vezouze a Blamont	MEMO_3118	0.00	16.01	28.82	44.75
19	A6541110	472	La Vezouze a Thiebaumenil	MEMO_928	0.00	45.76	80.19	121.82
20	A6571110	558	La Vezouze a Luneville	MEMO_941	0.00	51.19	89.29	135.46

21	A6653010	64	L'Arentele a Saint-Gorgon	MEMO_4045	0.00	10.05	17.36	27.23
22	A6731220	496	La Mortagne a Gerbeviller	MEMO_908	0.00	62.31	102.91	152.85
23	A6872010	306	Le Sanon a Dombasle-sur-Meurthe	MEMO_3273	0.00	41.38	69.66	106.25
24	A7122010	229	L'Esch a Jezainville	MEMO_3562	0.00	16.77	31.61	50.99
25	A7352010	365	Le Rupt de Mad a Onville	MEMO_972	0.12	47.48	80.27	120.73
26	A7581020	350	La Seille a Moyenvic	MEMO_2190	0.00	27.31	48.37	76.26
27	A7642010	149	La Petite Seille a Chateau-Salins	MEMO_1720	0.00	16.34	29.05	46
28	A7821010	923	La Seille a Nomeny	MEMO_1688	0.00	61.6	107.96	166.87
29	A8006210	42	Le ruisseau de Vaux a Morgemoulin	MEMO_5297	0.00	8.89	14.82	22.45
30	A8021010	135	L'Orne a etain	MEMO_1157	0.00	22.17	36.63	54.81
31	A8071010	397	L'Orne a Boncourt	MEMO_1177	0.00	57.19	91.96	134.24
32	A8122000	131	L'Yron a Hannonville-Suzemont [Hannonville]	MEMO_1775	0.00	26.45	43.78	66.76
33	A8322010	75	Le Woigot a Briey	MEMO_5601	0.00	16.22	27.26	41.63
34	A8732010	109	La Canner a Koenigsmacker	MEMO_1829	0.00	18.69	30.89	46.75
35	A9001050	65	La Sarre Blanche a Laneuveville-les-Lorquin	RS_9081	0.00	10.28	18.62	29.14
36	A9013050	90	La Sarre Rouge a Vasperviller	RS_6636	0.00	11.62	21.96	34.57
37	A9021010	310	La Sarre a Sarrebourg	RS_4209	0.00	37.5	65.88	99.88
38	A9072050	147	L'Isch a Postroff	RS_4252	0.00	18.37	33.28	52.15
39	A9091050	885	La Sarre a Keskastel	RS_3805	0.07	85.74	148.33	222.41
40	A9091060	715	La Sarre a Diedendorf	RS_3790	0.05	72.14	125.51	188.73
42	A9752010	501	La Nied Francaise a Conde-Northen [Pontigny]	MEMO_3299	0.00	56.13	94.78	143.65
43	A9832010	186	La Nied Allemande a Faulquemont	MEMO_1007	0.00	20.72	36.51	57.48
44	A9862010	367	La Nied Allemande a Varize	MEMO_1040	0.00	34.67	60.25	93.35
45	B0220010	367	La Meuse a Goncourt	MEMO_47	0.00	69.62	110.88	163.53
46	B1052010	214	Le Mouzon a Sommerecourt	MEMO_2108	0.00	46.45	73.59	108.64
47	B1092010	403	Le Mouzon a Circourt-sur-Mouzon [Villars]	MEMO_2116	0.00	74.31	115.88	167.39
49	B1282010	441	Le Vair a Soulosse-sous-Saint-elophe	MEMO_429	0.00	71.49	113.06	163.52
50	B1322010	137	Le Vair a Belmont-sur-Vair	MEMO_406	0.00	23.54	38.39	57.93
54	B4132010	210	La Crusnes a Pierrepont	MEMO_2570	0.00	14.78	28.31	44.57

55	B4224310	311	Le Ton a ecouviez	MEMO_1364	0.00	53.77	82.96	117.12
56	B4310200	85	L'Othain Ã Spincourt [Houdelaucourt]	MEMO_2762	0.00	10.82	18.76	28.95
57	B4572010	347	Le Loison a Han-les-Juvigny	MEMO_1244	0.00	54.66	85.83	123.54
58	B5322010	126	La Vence a la Francheville	MEMO_3726	0.00	23.48	39.01	58.48
59	B5572010	369	La Sormonne a Belval	MEMO_3066	0.00	51.64	82.08	118.67
60	B7322010	186	La Houille a Landrichamps	MEMO_1453	0.00	55.23	84.99	122.42
61	H0702010	269	La Barse a Montieramey	SN_1371	0.00	18.29	33.14	52.46
62	H1333010	22	La Laine a Soulaines-Dhuys	SN_18068	0.00	1.6	3.23	5.58
63	H5033310	90	La Suize a Villiers-sur-Suize	SN_8168	0.00	11.22	19.52	30
64	H5042010	170	Le Rognon a Bourdons-sur-Rognon [Lacrete]	SN_8218	0.00	22.92	39.7	60.23
65	H5053210	15	La Manoise a Humberville	SN_4759	0.00	4.51	7.74	12.06
66	H5062010	614	Le Rognon a Doulaincourt-Saucourt	SN_1398	0.00	70.5	117.58	171.72
67	H5083050	463	La Blaise a Louvemont [Pont-Varin]	SN_8267	0.00	33.96	61.59	94.63
68	H5083070	120	La Blaise a Daillancourt	SN_8248	0.00	9.7	18.26	28.78
69	H5102030	478	La Saulx a Mogneville	SN_1998	0.00	32.43	61.68	96.53
70	H5102040	75	La Saulx a Montiers-sur-Saulx	SN_10595	0.00	9.87	18.08	28.63
71	H5112310	424	L'Ornain a Saint-Joire	SN_1873	0.00	37.5	70.06	108.2
72	H5122340	672	L'Ornain a Tronville-en-Barrois	SN_1894	0.00	56.48	103.64	158.06
73	H5122350	842	L'Ornain a Val-d'Ornain [Varney]	SN_1917	0.00	69.6	126.69	192.47
74	H5142610	113	La Chee a Villotte-devant-Louppy [Villote devant Loupy]	SN_12550	0.00	15.33	26.51	40.48
75	H5142620	223	La Chee a Bettancourt-la-Longue	SN_9140	0.00	24.3	42.22	64.33
76	H5153010	191	La Viere a Val-de-Viere	SN_6597	0.00	7.94	15.14	24.79
77	H5173110	118	Le Bruxenelle a Brusson	SN_5058	0.00	11.46	19.95	31.13
78	H6021020	5	L'Aisne a Verrieres	SN_6662	0.00	0.71	1.3	2.15
79	H6023210	110	L'Ante a Chatrices	SN_17174	0.00	9.72	17.73	27.89
80	H6033210	174	L'Auve a Dommartin-Dampierre	SN_5333	0.00	5.06	10.26	17.41
81	H6053010	80	La Biesme au Claon	SN_14292	0.00	9.26	16.12	25.11
82	H6122010	628	L'Aire a Varennes-en-Argonne	SN_3280	0.00	65.99	113	167.72
83	H6153020	133	L'Agron a Verpel	SN_5746	0.00	15.28	26.71	40.75

84	H6162010	997	L'Aire a Chevieres	SN_3297	0.00	90.19	154.61	228.48
85	H6233020	332	La Vaux a ecly	SN_11760	0.00	55.34	89.11	133.32
86	H6233110	41	La Draize a Justine-Herbigny	SN_20012	0.00	13.21	22.37	35.06
87	H6313030	489	La Suippe a Selles	SN_8686	0.00	5.33	10.75	18.63
88	H6402010	286	La Vesle a Bouy	SN_5437	0.00	3.91	8.42	15.24
89	U0020010	232	La Saone a Monthureux-sur-Saone	Rhone_11280	0.00	42.17	67.69	100.31
90	U0104010	63	Le Coney a Xertigny	Rhone_16410	0.00	7.09	13.66	22.09
91	U0124010	313	Le Coney a Fontenoy-le-Chateau	Rhone_9056	0.00	42.38	71.89	108.38
92	U0415010	122	Le Breuchin a la Proiseliere-et-Langle	Rhone_5022	0.00	56.45	89.36	135.15
93	U0444310	225	La Semouse a Saint-Loup-sur-Semouse	Rhone_5162	0.00	60.14	93.98	138.02
94	U0460510	40	Le Planey a Anjeux [Le Triquet]	Rhone_20962	0.00	7.24	12.46	19.5
95	U1004010	71	L'Ognon a Servance [Fourguenons]	Rhone_5047	0.00	47.39	79.62	125.58
96	U1014020	168	L'Ognon a Montessaux	Rhone_5059	0.00	65.81	108.92	168.57
97	U2305210	9	Le St-Nicolas a Rougemont-le-Chateau	Rhone_24465	0.00	6.61	11.6	19
98	U2345020	30	La Savoureuse a Giromagny	Rhone_10585	0.00	25.62	46.64	76.8

Zone Rhône-Cévennes

Tableau 3 : Liste des 50 bassins calibrés pour la zone Rhône-Cévennes
Sont inclus les attributs suivants : identifiant du bassin (ID bassin), code de la base de données SCHAPI (Code), surface de bassin (de la base de données SCHAPI), nom du bassin (Nom), identifiant de l'exutoire du bassin (ID Exutoire), indice d'influence de la méthode SHYREG (Influence SHYREG), quantiles de la base de données SHYREG version 1.0 pour les périodes de retour de 2 ans, 10 ans et 50 ans.

ID bassin	Code	Surface (km2)	Nom	ID Exutoire	Influence SHYREG	QP_2ans (m3/s)	QP_10ans (m3/s)	QP_50ans (m3/s)
1	K2064010	66	Le Langouyrou a Langogne	Loire_17808	0.00	31.84	68.42	134.13
2	K2123010	125	Le Chapeauroux a Chateauneuf-de-Randon [Hermet]	Loire_13437	0.00	26.91	51.33	93.5
3	K2134010	50	La Clamouze a Chastanier	Loire_17046	0.00	11.55	26.12	57.81
4	K2163110	71	Le Grandrieu a Grandrieu	Loire_17245	0.00	15.13	27.78	48.18
5	K2223020	81	L'Ance du Sud a Saint-Prejet-d'Allier [Chambonnet]	Loire_22887	0.00	11.34	21.17	37.08
6	K2226010	81	Le Panis a Saint-Prejet-d'Allier [Panis]	Loire_22886	0.00	11.34	21.16	37.07
7	K2316210	125	La Cronce a Aubazat	Loire_1168	0.00	11.73	22.85	42.19
8	K2365510	47	Le Lidenne a Couteuges	Loire_9639	0.00	7.23	14.35	26.25
9	K2821910	105	La Dore a Dore-l'eglise	Loire_1217	0.00	14.28	26.35	44.35
10	O3006710	10	La Goudech a Saint-Maurice-de-Ventalon [La Cepede]	GiroChar_13393	0.00	23.04	53.44	98.18
11	O3011010	65	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	GiroChar_13398	0.00	69.96	180.88	346.22
12	O3015520	21	Le Rieumalet au Pont-de-Montvert	GiroChar_12260	0.00	19.63	56.08	115.13
13	O3035210	26	Le Briancon aux Bondons [Cocures]	GiroChar_5404	0.00	11.01	25.51	53.98
14	O3064010	130	Le Tarnon a Florac	GiroChar_6710	0.00	168.74	333.92	576.64
15	O3084320	126	La Mimente a Florac	GiroChar_5342	0.00	169.96	338.81	581.24
16	O3141010	945	Le Tarn a Mostuejouls [La Muse]	GiroChar_2144	0.00	423.68	850.63	1493.43
17	O3165010	34	La Breze a Meyrueis	GiroChar_17503	0.00	31.92	77.47	152.59
18	O3194010	98	La Jonte a Meyrueis [aval]	GiroChar_14032	0.00	61.92	145.77	289.36
19	O7001510	94	Le Lot a Bagnols-les-Bains	GiroChar_8012	0.00	35.87	77.42	154.82

20	O7015810	33	L'Esclancide a Pelouse [Les Salces]	GiroChar_11115	0.00	9.63	18.44	33.55
21	O7021530	31	Le Lot a Mende [aval]	GiroChar_8033	0.00	6.5	12.41	22.04
22	O7035010	117	Le Bramont a Saint-Bauzile [Les Fonts]	GiroChar_6832	0.00	30.61	58.03	105.6
23	O7085010	82	Le Coulagnet a Marvejols	GiroChar_10281	0.00	18.42	33.6	57.28
24	O7202510	71	La Truyere a Serverette	GiroChar_16011	0.00	10.25	19.01	32.86
25	O7265010	78	La Limagnole a Fontans ['St-Alban']	GiroChar_14750	0.00	9.93	18.52	32.09
26	V3315010	36	La Valencize a Chavanay	Rhone_8569	0.00	4.74	10.15	20.56
27	V3335010	30	La Sanne a Saint-Romain-de-Surieu	Rhone_13116	0.00	7.72	16.99	35.1
28	V3515010	106	La Deume a Saint-Julien-Molin-Molette [La Gariniere]	Rhone_17632	0.00	30.03	57.77	105.31
29	V3517010	25	Le Ternay a Savas [Ternay]	Rhone_16105	0.00	6.88	14.17	27.78
30	V3524010	380	La Cance a Sarras	Rhone_5814	0.07	87.47	169.11	311
31	V3724010	380	Le Doux a Colombier-le-Vieux	Rhone_1699	0.03	133.01	274.37	524.05
32	V4145210	71	La Glueyre a Gluiras [Tisoneche]	Rhone_5717	0.00	52.54	126.74	250.13
33	V5004030	99	L'Ardeche a Meyras [Pont Barutel]	Rhone_5654	0.00	123.02	285.17	522.34
34	V5014010	621	L'Ardeche a Vogue	Rhone_5683	0.20	482.34	1000.58	1742.13
35	V5046610	103	L'Altier a Altier [La Goulette]	Rhone_12327	0.00	103.88	233.86	429.33
36	V5425210	58	La Gagniere a Banne	Rhone_12309	0.00	110.18	215.37	363.61
37	V5445010	43	L'Auzonnet aux Mages	Rhone_7032	0.00	57.46	127.64	235.52
38	V7104010	30	Le Gardon de St-Martin a Saint-Etienne-Vallee-Francaise [Roq.]	Rhone_22253	0.00	21.34	66.17	144.52
39	V7105210	31	Le Gardon de St-Germain a Saint-Germain-de-Calberte [Bastide]	Rhone_16514	0.00	22.63	70.98	152.65
40	V7115010	48	Le Gardon de Ste-Croix a Gabriac [Pont Ravagers]	Rhone_10753	0.00	53.59	126.82	243.49
41	V7124010	244	Le Gardon de Mialet a Generargues [Roucan]	Rhone_10766	0.00	182.03	430.35	815.7
42	V7135010	261	Le Gardon de St-Jean a Corbes [Roc Courbe]	Rhone_544	0.00	282.6	592.53	1041.23
43	V7216510	210	Le Vigueirat a Tarascon [St-Gabriel]	Rhone_394	0.00	22.91	50.52	110.03
44	Y2015010	154	L'Arre au Vigan [La Terrisse]	MedOuest_580	0.00	146.22	350	659.75
45	Y2035010	500	La Vis a Saint-Laurent-le-Minier	MedOuest_959	0.00	260.43	644.99	1272.52
46	Y3204010	115	Le Lez a Montferrier-sur-Lez [Lavalette]	MedOuest_1732	0.00	76.87	163.6	305.44
47	Y3315080	53	Le Salaison a Mauguio	MedOuest_2868	0.00	34.88	76.34	147.02
48	Y3464010	778	Le Vidourle a Marsillargues	Rhone_5304	0.00	585.02	1075.96	1775.77

49	Y3514020	286	Le Vistre a Bernis	Rhone_6905	0.00	90.42	187.71	362.43
50	Y4306510	47	La Chapelette a Arles [Caparon]	Rhone_10646	0.00	5.57	11.99	24.52

Zone Sud-Est

Tableau 4 : Liste des 35 bassins calibrés pour la zone Sud-Est
Sont inclus les attributs suivants : identifiant du bassin (ID bassin), code de la base de données SCHAPI (Code), surface de bassin (de la base de données SCHAPI), nom du bassin (Nom), identifiant de l'exutoire du bassin (ID Exutoire), indice d'influence de la méthode SHYREG (Influence SHYREG), quantiles de la base de données SHYREG version 1.0 pour les périodes de retour de 2 ans, 10 ans et 50 ans.

ID bassin	Code	Surface (km2)	Nom	ID Exutoire	Influence SHYREG	QP_2ans (m3/s)	QP_10ans (m3/s)	QP_50ans (m3/s)
1	V6035010	156	Le Toulourenc a Malaucene [Veaux]	Rhone_13003	0.00	38.31	73.48	136.74
2	V6052010	584	L'Ouveze a Vaison-la-Romaine	Rhone_11867	0.00	136.31	249.05	438.68
3	X1225010	165	Le Bes a la Javie [Esclangon-Peroure]	Rhone_798	0.00	54.1	94.12	156.94
4	X1335010	172	Le Lauzon a Villeneuve	Rhone_472	0.00	47.32	89.57	161.08
5	X2002020	10	Le Verdon a Allos [La Foux]	Rhone_22329	0.00	4.88	9.72	18.28
6	X2114010	138	L'Issole a Saint-Andre-les-Alpes [Mourefrey]	Rhone_14556	0.00	39.01	69.25	117.95
7	X2305010	67	Le Jabron a Comps-sur-Artuby [Pont de l'Evescat]	Rhone_12712	0.09	27.73	56.35	107.19
8	X2315010	32	Le Baux a Rougon [Pont de la D952]	Rhone_21874	0.00	16.56	33.92	64.17
9	X2414030	105	L'Artuby a la Bastide [Taulane]	Rhone_289	0.00	38.81	83.46	166.08
10	Y4002010	50	L'Arc a Pourrieres	MedEst_741	0.00	20.16	40.44	75.62
11	Y4022010	296	L'Arc a Meyreuil [Pont de Bayeux]	MedEst_502	0.00	53.73	103.93	188.86
12	Y4214010	212	La Touloubre a la Barben [La Savonniere]	MedEst_185	0.00	21.81	45.39	87.57
13	Y4214040	394	La Touloubre a Cornillon-Confoux [La Glaciere]	MedEst_127	0.00	34.58	71.91	138.94
14	Y4225610	71	La Cadiere a MarigNAe [stade St-Pierre]	MedEst_1400	0.00	17.02	37.01	72.89
15	Y4604020	187	Le Gapeau a Sollies-Pont	MedEst_785	0.00	47.3	108.03	225.41
16	Y4615020	282	Le Real Martin a la Crau [Decapris]	MedEst_1234	0.00	87.03	184.24	357.03
17	Y4615610	71	Le Real Collobrier a Pierrefeu-du-Var [Pont de Fer]	MedEst_1243	0.02	29.29	68.92	141.92
18	Y4616220	13	Le ruisseau de la Maliere a Collobrieres [Gour de l'Astre]	MedEst_2173	0.00	10.02	23.55	47.21
19	Y4624010	534	Le Gapeau a Hyeres [Ste-Eulalie]	MedEst_672	0.00	131.48	277.42	540.13
20	Y5005210	144	Le Cauron a Bras [Pont de l'Avocade]	MedEst_1029	0.00	19.43	44.63	99.02

21	Y5032010	507	L'Argens a Chateauvert	MedEst_868	0.00	56.93	122.82	255.86
22	Y5115020	168	La Bresque a Salernes [Les Vingalieres]	MedEst_210	0.00	17.75	37.46	78.25
23	Y5235010	195	La Nartuby a Trans-en-Provence	MedEst_1217	0.00	38.59	82.27	171.95
24	Y5235030	150	La Nartuby a Chateaudouble [Rebouillon]	MedEst_1207	0.00	26.67	58.78	127.44
25	Y5444010	195	La Giscle a Cogolin [Les Ajusts]	MedEst_700	0.18	58.14	134.69	277.93
26	Y5514040	165	La Siagne a Callian [Ajustadoux]	MedEst_923	0.00	68.25	141.73	266.37
27	Y5515410	54	La Siagnole a Mons [Le Moulin]	MedEst_1286	0.00	25.81	54.13	102.97
28	Y5535410	43	La Mourachonne a Pegomas	MedEst_1705	0.00	33.46	69.49	128.57
29	Y5605210	42	La Brague a Biot [Plan St-Jean]	MedEst_2151	0.00	29.61	61.75	116.71
30	Y5615010	206	Le Loup a Tourrettes-sur-Loup [Les Vallettes]	MedEst_263	0.00	57.7	149.33	327.92
31	Y5615030	289	Le Loup a Villeneuve-Loubet [Moulin du Loup]	MedEst_275	0.00	82.73	196.83	413
32	Y5625020	96	La Cagne a Cagnes-sur-Mer	MedEst_1687	0.00	47.38	103.58	201.4
33	Y6434010	441	L'Esteron au Broc [La Clave]	MedEst_296	0.00	141.81	300.79	576.64
34	Y6614010	168	La Roya a Tende [St-Dalmas-de-Tende]	MedEst_413	0.00	86.11	182.43	338.63
35	Y6635010	96	La Bevera a Sospel [Pont D 2204]	MedEst_952	0.00	37.88	83.08	162.25

Appendice B : Listes des Evènements

Zone Meuse-Moselle

Tableau 5 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Meuse-Moselle
Sont inclus le nombre de dépassements observés des quantiles de débit biennal et décennal de la base de données SHYREG (version 1) pour les 92 bassins calibrés.

ID Eve	Date de début	Date de fin	Nombre de jours	Nombre de bassins [Qobs>QP_2ans]	Nombre de bassins [Qobs>QP_10ans]
1	2009/01/20 - 06	2009/01/26 - 06	6	11	4
2	2009/05/11- 06	2009/05/16 - 06	5	1	1
3	2009/07/11 - 06	2009/07/17 - 06	6	0	0
4	2009/11/20 - 06	2009/11/28 - 06	8	1	1
5	2009/12/21 - 06	2009/12/27 - 06	6	12	3
6	2010/03/18 - 06	2010/03/23 - 06	5	1	1
7	2010/06/08 - 06	2010/06/13 - 06	5	1	0
8	2010/08/12 - 06	2010/08/19 - 06	7	2	1
9	2010/11/04 - 06	2010/11/16 - 06	12	3	1
10	2010/12/03 - 06	2010/12/11 - 06	8	38	8
11	2011/01/03 - 06	2011/01/15 - 06	12	21	3
12	2011/06/02 - 06	2011/06/10 - 06	8	0	0
13	2011/07/14 - 06	2011/07/19 - 06	5	0	0
14	2011/08/03 - 06	2011/08/09 - 06	6	1	0
15	2011/12/01 - 06	2011/12/19 - 06	18	44	11
16	2011/12/31 - 06	2012/01/08 - 06	8	21	1
17	2012/05/18 - 06	2012/05/27 – 06	9	0	0
18	2012/06/29 - 06	2012/07/16 – 06	17	0	0
19	2012/10/01 - 06	2012/10/17 – 06	16	1	0
20	2012/12/20 - 06	2012/12/30 – 06	10	7	0

Impact hydrologique : dépassement des quantiles débit SHYREG de 2 et 10 ans

- Pas de dépassement
- Dépassements > QP_2ans
- Moins de 5 dépassements > QP_10ans
- Plus de 5 dépassement > QP_10ans

Zone Rhône-Cévennes

Tableau 6 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Rhône-Cévennes
Sont inclus le nombre de dépassements observés des quantiles de débit biennal et décennal de la base de données SHYREG (version 1) pour les 50 bassins calibrés

ID Eve	Date de début	Date de fin	Nombre de jours	Nombre de bassins [Qobs>QP_2ans]	Nombre de bassins [Qobs>QP_10ans]
1	20081227 - 06	20090102 - 06	6	1	0
2	20090130 - 06	20090209 - 06	10	10	3
3	20090408 - 06	20090414 - 06	6	2	1
4	20090822 - 06	20090828 - 06	6	0	0
5	20091019 - 06	20091025 - 06	6	1	0
6	20100508 - 06	20100514 - 06	6	1	1
7	20100613 - 06	20100619 - 06	6	1	0
8	20100904 - 06	20100910 - 06	6	3	1
9	20101027 - 06	20101103 - 06	7	6	1
10	20101112 - 06	20101123 - 06	11	2	1
11	20101219 - 06	20101226 - 06	7	4	1
12	20110310 - 06	20110319 - 06	9	6	1
13	20110710 - 06	20110716 - 06	6	0	0
14	20111022 - 06	20111110 - 06	19	24	7
15	20120402 - 06	20120418 - 06	16	1	1
16	20120426 - 06	20120508 - 06	12	1	1
17	20120518 - 06	20120530 - 06	12	2	1
18	20120629 - 06	20120704 - 06	5	0	0
19	20121023 - 06	20121029 - 06	6	0	0
20	20121124 - 06	20121201 - 06	7	2	0

Impact hydrologique : dépassement des quantiles débit SHYREG de 2 et 10 ans

- Pas de dépassement
- Dépassements > QP_2ans
- Moins de 5 dépassements > QP_10ans
- Plus de 5 dépassement > QP_10ans

Zone Sud-Est

Tableau 7 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Sud-Est
Sont inclus le nombre de dépassements observés des quantiles de débit biennal et décennal de la base de données SHYREG (version 1) pour les 35 bassins calibrés.

ID Eve	Date de début	Date de fin	Nombre de jours	Nombre de bassins [Qobs>QP_2ans]	Nombre de bassins [Qobs>QP_10ans]
1	20090202 - 06	20090208 - 06	6	2	1
2	20090913 - 06	20090921 - 06	8	4	2
3	20091019 - 06	20091025 - 06	6	1	1
4	20091127 - 06	20091202 - 06	5	1	1
5	20091219 - 06	20091227 - 06	8	11	1
6	20100105 - 06	20100111 - 06	6	4	1
7	20100328 - 06	20100406 - 06	9	1	1
8	20100612 - 06	20100619 - 06	7	5	1
9	20101002 - 06	20101007 - 06	5	2	1
10	20101028 - 06	20101103 - 06	6	8	2
11	20101219 - 06	20101226 - 06	7	7	1
12	20110313 - 06	20110318 - 06	5	6	1
13	20110602 - 06	20110607 - 06	5	1	0
14	20111022 - 06	20111028 - 06	6	1	0
15	20111101 - 06	20111112 - 06	11	19	10
16	20120518 - 06	20120523 - 06	5	1	0
17	20121023 - 06	20121029 - 06	6	4	0
18	20121102 - 06	20121113 - 06	11	8	1
19	20121124 - 06	20121201 - 06	7	4	0
20	20121212 - 06	20121217 - 06	5	4	1

Impact hydrologique : dépassement des quantiles débit SHYREG de 2 et 10 ans

- Pas de dépassement
- Dépassements > QP_2ans
- Moins de 5 dépassements > QP_10ans
- Plus de 5 dépassement > QP_10ans

Appendice C : Liste des Figures et des Tableaux

Liste des Figures

Figure 1 : Chaîne d'alerte aux crues rapides du système AIGA actuel utilisant la base de quantiles de débit estimés par la méthode régionalisée SHYREG (adapté de Ronsoux Fouchier, 2010) 6

Figure 2 : Localisation des 98 bassins versants de la zone d'étude Meuse-Moselle (bassins représentés par classes de surface de bassin avec leur identifiant de bassin (cf. Appendice A)) et distribution des surfaces de bassin 11

Figure 3 : Localisation des 112 bassins versants de la zone d'étude Rhône – Cévennes et des 73 bassins de la zone d'étude Sud-Est (bassins représentés par classes de surface de bassin en km^2) 11

Figure 4 : Schéma du couplage du modèle journalier continu GR4J et du modèle horaire semi-distribué GR-SD utilises pour les simulations et prévisions de débit (adapté de l'étude Organde 2013) 12

Figure 5 : Exemples de simulation du modèle journalier continu GR4J sur la période 2009-2012 avec les données de pluie Panthère pour deux bassins de la zone Meuse-Moselle ; les paramètres du modèle ont été calibrés par Organde (2013) sur la période 2002-2006 avec les données de pluie réanalysées COMEPHORE 13

Figure 6 : Exemples de simulation du modèle horaire semi-distribué GR-SD sur la période 2009-2012 avec les données de pluie Panthère pour deux bassins de la zone Meuse-Moselle ; les paramètres du modèle ont été calibrés par Organde (2013) sur la période 2002-2006 avec les données de pluie réanalysées COMEPHORE 13

Figure 7 : Construction des ensembles AROME-timelag pour AIGA toutes les 3 heures pour le jour J en utilisant les prévisions déterministes AROME des réseaux 00 TU, 06 TU, 12 TU, 18 TU pour les jours J-1 et J avec une échéance maximale des ensembles de +30h et en prenant en compte les délais de mise à disposition des données AROME en opérationnel 15

Figure 8 : Exemple d'estimation de la pluie critique pour la durée de 6h pour le bassin de la Vezouze à Lunéville pour la date d'initialisation du 7 décembre 2010 06h (TU) et le seuil de débit biennal 18

Figure 9 : Exemple de graphe de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h et 6h et le seuil de débit biennal avec les différentes prévisions de pluie pour le bassin de La Doller à Reiningue pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 09h (TU) 19

Figure 10 : Hydrogrammes de débit simulé et de débit observé pour le bassin de La Doller à Reiningue pour l'évènement de décembre 2011, montrant le retard du dépassement du seuil de débit biennal avec le débit simulé en comparaison au débit observé 19

Figure 11 : Graphes de comparaison des pluies critiques pour le seuil de débit biennal avec les différentes prévisions de pluie pour le bassin de La Doller à Reiningue à gauche, pour les 2 durées de 3h et 6h et pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 09h (TU) et à droite pour la durée de 6h et pour les différentes dates d'initialisation pour l'évènement de décembre 2011 20

Figure 12 : Hydrogrammes des débits observé et simulé et graphes de comparaison des ratios Prévision/FFG pour le seuil de débit biennal et la durée de 6h avec les différentes prévisions de pluie pour 2 bassins de la zone Meuse-Moselle et pour l'évènement de décembre 2011 .. 21

Figure 13 : Carte de pluie critique pour la durée de 6h et le seuil de débit biennal pour 4 dates d'initialisation du 16 décembre 2011 de 03h à 12h (TU) pour la zone Meuse-Moselle 22

Figure 14 : Carte des avertissements par croisement de la prévision d'ensemble AROME-timelag avec la pluie critique pour la durée de 6h et le seuil de débit biennal pour 4 dates d'initialisation du 16 décembre 2011 de 03h à 12h (TU) pour la zone Meuse-Moselle 23
Figure 15 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 16 décembre 2011 de 03h à 14h (TU) pour la zone Meuse-Moselle 24
Figure 16 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 16 décembre 2011 de 06h à 20h (TU) pour la zone Meuse-Moselle.....25
Figure 17 : Hydrogrammes des débits simulé et prévus avec les différentes prévisions de pluie pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 à 06h (TU) en comparaison avec l'hydrogramme de débit observé pour le bassin de La Doller à Reiningue.....27
Figure 18 : Exemples de bonnes alertes, alertes manquées et fausse alertes avec les débits simulé et prévus issus des différentes prévisions de pluie en comparaison aux dépassements observés pour la date d'initialisation du 16 décembre 2011 à 06h (TU) pour des bassins de la zone Meuse-Moselle 28
Figure 19 : Comparaison des cartes d'avertissement issus de la comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h et des cartes d'avertissements issus des prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal pour le 16 décembre 2011 de 0h à 9h (TU) pour la zone Meuse-Moselle.....29
Figure 20 : Scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle.....34
Figure 21 : Scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec les différentes prévisions déterministes de débit et les prévisions probabilistes de débit AROME pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle 35
Figure 22 : Comparaison des scores de contingence des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions de débit et différentes prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour 10 évènements de crue en zone Meuse-Moselle.....36
Figure 23 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs) et la prévision probabiliste de débit AROME (Q1/3ens) pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle.....37
Figure 24 : Localisation des bassins mis en alerte pour le dépassement du débit biennal pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle 37
Figure 25 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec les différentes prévisions déterministes et les 3 membres de la prévision d'ensemble de débit AROME pour les évènements de décembre 2009, 2010 et 2011, et de janvier 2012 en zone Meuse-Moselle 39
Figure 26 : Comparaison de l'anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur les prévisions de pluie (prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et prévision issue de la pluie observée (Pobs_FFG)) croisées avec la pluie critique pour la durée de 6h pour les évènements de décembre 2011 et de décembre 2010 en zone Meuse-Moselle.....40
Figure 27 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 5 décembre 2011 de 00h à 23h (TU) pour la zone Sud-Est.....42
Figure 28 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 5 décembre 2011 de 14h à 23h (TU) pour la zone Sud-Est.....42

Figure 29 : Cartes d'avertissement par comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h pour le dépassement du débit biennal du 4 novembre 2011 à 18h (TU) au 5 novembre à 18h (TU) pour la zone d'étude Sud-Est...43
Figure 30 : Cartes d'avertissement avec les prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal du 4 novembre 2011 à 18h (TU) au 5 novembre à 18h (TU) pour la zone d'étude Sud-Est 43
Figure 31 : Statistiques de contingence (nombres d'alertes correctes (Hit), alertes correctes avec anticipation (Hit_anticip), alertes manquées (Miss), alertes manquées ou sans anticipation (Miss_anticip), fausses alertes (FalseAlarm) et alertes correctes négatives) pour le dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs), la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est....44
Figure 32 : Comparaison des statistiques de contingence pour le dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit et les prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est....45
Figure 33 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions déterministes de débit et la prévision probabiliste de débit AROME Q1/3ens pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est et carte de localisation des bassins concernés 45
Figure 34 : Comparaison de l'anticipation des alertes issues des prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur la pluie critique pour la durée de 6h croisée avec la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et la pluie observée (Pobs_FFG) pour le dépassement du débit biennal et pour l'évènement de novembre 2011 en zone Sud-Est 46
Figure 35 : Carte des dépassements observés pour les débits biennal et décennal pour le 3 novembre 2011 de 6h à 17h (TU) pour la zone Rhône-Cévennes....46
Figure 36 : Carte des alertes AIGA (basées sur le débit simulé) pour les débits biennal et décennal pour le 3 novembre 2011 de 12h à 20h (TU) pour la zone Rhône-Cévennes 47
Figure 37 : Cartes d'avertissement par comparaison entre prévisions d'ensembles de pluie AROME-timelag et pluie critique pour la durée de 6h pour le dépassement du débit biennal du 3 novembre 2011 de 6h (TU) à 21h (TU) pour la zone d'étude Rhône-Cévennes....47
Figure 38 : Cartes d'avertissement avec les prévisions d'ensembles de débit AROME pour le dépassement du débit biennal du 3 novembre 2011 de 0h (TU) à 21h (TU) pour la zone d'étude Rhône-Cévennes 48
Figure 39 : Statistiques de contingence (nombres d'alertes correctes (Hit), alertes correctes avec anticipation (Hit_anticip), alertes manquées (Miss), alertes manquées ou sans anticipation (Miss_anticip), fausses alertes (FalseAlarm) et alertes correctes négatives) pour le dépassement du débit biennal avec la prévision de débit simulé sans pluie future (Qsimu), la prévision de débit issue de la pluie observée (Qpobs), la prévision de débit issue de la pluie persistante (Qpstat) et les prévisions probabilistes de débit AROME (Q1/3ens et Q2/3ens) pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes....48
Figure 40 : Comparaison des statistiques de contingence pour le dépassement du débit biennal avec les prévisions de débit et les prévisions de pluie croisées avec la pluie critique de durée 6h pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes 49
Figure 41 : Anticipation des alertes de dépassement du débit biennal avec différentes prévisions déterministes de débit et la prévision probabiliste de débit AROME Q1/3ens pour

l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes et carte de localisation des bassins concernés.....49
Figure 42 : Comparaison de l'anticipation des alertes issues des prévisions de débit avec l'anticipation des avertissements basés sur la pluie critique pour la durée de 6h croisée avec la prévision probabiliste de pluie AROME-timelag (P1/3ens_FFG) et la pluie observée (Pobs_FFG) pour le dépassement du débit biennal et pour l'évènement de novembre 2011 en zone Rhône-Cévennes.....50

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Meuse-Moselle avec le nombre de dépassements observés des quantiles de débit biennal et décennal de la base de données SHYREG (version 1) pour les 98 bassins sélectionnés.....16
Tableau 2 : Liste des 98 bassins sélectionnés pour la zone Meuse-Moselle 57
Tableau 3 : Liste des 112 bassins sélectionnés pour la zone Rhône-Cévennes.....61
Tableau 4 : Liste des 73 bassins sélectionnés pour la zone Sud-Est.....64
Tableau 5 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Meuse-Moselle 66
Tableau 6 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Rhône-Cévennes.....66
Tableau 7 : Liste des 20 évènements sélectionnés pour la zone d'étude Sud-Est 67