



Application de la méthode de Flash Flood Guidance avec AIGA pour la prévision des crues éclairs en milieu non jaugé

J. Demargne, P. Javelle

► To cite this version:

J. Demargne, P. Javelle. Application de la méthode de Flash Flood Guidance avec AIGA pour la prévision des crues éclairs en milieu non jaugé. [Rapport de recherche] irstea. 2012, pp.63. hal-02606075

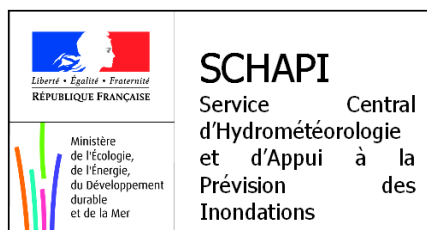
HAL Id: hal-02606075

<https://hal.inrae.fr/hal-02606075>

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.



PROGRAMME MEDDE (DGPR / SRNH) - IRSTEA 2012
Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

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

Application de la méthode de Flash Flood Guidance avec AIGA
pour la prévision des crues éclairs en milieu non jaugé

Dr. Julie Demargne (HYDRIS-Hydrologie)

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

18 janvier 2013

HYDRIS
hydrologie

Table des Matières

Résumé.....	3
1. Introduction	6
2. Méthode de Flash Flood Guidance	7
a) Principe de la méthode.....	7
b) Application au système d’alerte AIGA	9
3. Estimation des Pluies Critiques	12
a) Sélection des évènements et des bassins.....	12
b) Estimation des pluies critiques.....	15
Résumé de l’estimation des pluies critiques avec AIGA.....	20
4. Visualisation et Analyse des Pluies Critiques	21
a) Produits pour l’analyse en temps réel	21
b) Comparaison des avertissements des systèmes AIGA et AIGA-FFG	25
Résumé des produits d’analyse de l’information de pluie critique.....	30
5. Evaluation de l’apport des pluies critiques.....	31
a) Evènement de novembre 2011.....	31
b) Evènement d’octobre 2011.....	41
c) Evènement de juin 2010.....	46
Résumé de l’évaluation de l’apport des pluies critiques.....	51
6. Conclusions et Perspectives.....	52
Points importants sur le système AIGA-FFG	55
7. Références	57
Appendice A : Description des Bassins Versants	58
Appendice B : Liste des Figures et des Tableaux	61

Résumé

Le développement de systèmes d'alerte de crues rapides reste difficile de par la nature de ces événements, souvent très locaux et évoluant rapidement, ainsi que des données d'observations, généralement très limitées sur les petits bassins sujets à ce type d'événements. Deux approches sont envisageables : 1) un suivi en temps réel des observations des stations de jaugeage de pluie et débit, à partir duquel un système d'alerte peut être mis en place, bien que ce service ne concerne que les bassins jaugés et offre une faible anticipation des crues rapides ; 2) la mise en place d'un système de prévision de pluie, pouvant être couplé avec un modèle de prévision de débit, qui permet de considérer les bassins non jaugés et de gagner potentiellement en anticipation. Cependant, les systèmes opérationnels de prévision hydrométéorologique ont souvent une échelle spatio-temporelle supérieure à celle des crues rapides. Et les incertitudes des prévisions, notamment pour les événements pluvieux de type convectif, rendent difficiles l'utilisation directe de prévisions de pluie dans une modélisation hydrologique afin de produire des prévisions de débits avec suffisamment de précision et d'anticipation pour une alerte de crue rapide.

Aux Etats-Unis, le service d'alerte aux crues éclaircies mis en œuvre par le National Weather Service est basé sur un système de prévision hydrométéorologique et la prise en compte de scénarios simples de pluie future afin de produire des cartes de pluie critique nécessaire pour initier les débordements sur les bassins versants. Cette pluie critique est appelée Flash Flood Guidance (FFG). Les pluies critiques FFG sont déterminées pour différentes durées (de 1h à 24h) et sont actualisées 1 à 4 fois par jour. Les valeurs de pluie critique FFG correspondent aux débits seuil de débordement, qui sont estimés au préalable (et qui correspondent généralement au débit de période de retour de 2 ans). En temps réel, les valeurs de FFG sont estimées à partir des courbes pluie-débit construites en utilisant une modélisation hydrologique continue avec différents scénarios de pluie future d'intensité constante et uniforme sur les bassins versants. 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, et donc son débit à l'exutoire. Les cartes de pluie critique FFG facilitent la comparaison avec les données spatialisées de pluie, d'observations et de prévisions, disponibles en temps réel, pour déterminer les zones de risque d'inondation.

Une telle approche peut être utilisée avec d'autres modélisations hydrologiques en milieu jaugé ou non jaugé. L'objectif de cette étude est d'appliquer la méthode de Flash Flood Guidance avec le système d'anticipation des crues AIGA pour évaluer son apport potentiel pour l'aide à la prévision des crues rapides en milieu non jaugé. L'information de pluie critique permet de favoriser le partage de l'expertise des météorologues et des hydrologues pour mieux apprécier la gravité potentielle d'une situation météorologique au regard du risque de crue. Elle peut permettre de focaliser le travail de collaboration et d'analyse des prévisionnistes météorologistes et hydrologistes sur les secteurs géographiques les plus sensibles.

Le système d'anticipation des crues AIGA utilise le modèle hydrologique pluie-débit distribué GR, au pas de temps horaire et à la résolution de 1 km^2 , pour produire des prévisions hydrologiques en milieu non jaugé. Les seuils de débit correspondent aux quantiles de débit estimés par la méthode régionalisée SHYREG (quantiles issus du même modèle hydrologique GR) pour différentes périodes de retour (e.g. 2 ans, 5 ans et 10 ans). L'évaluation porte sur 46 bassins versants identifiés par le SPC Med-Est pour leurs enjeux et inclus dans leur service de vigilance complémentaire.

Trois évènements sont analysés pour tester la mise en alerte dans différentes situations hydrologiques :

- l'évènement de Draguignan du 15-16 juin 2010 avec des sols secs et de très fortes pluies (pour les 13 bassins versants de l'Argens les plus touchés par l'évènement), les données Panthère fournissant les pluies observées au pas de temps horaire ;
- l'évènement du 24-25 octobre 2011 avec des pluies modérées sur des sols secs, les pluies observées correspondant aux données Antilope au pas de temps horaire ;
- l'évènement du 3-9 novembre 2011 avec des problématiques d'accalmies en début d'évènement et de pluie sur des sols très humides ultérieurement, en utilisant les données Antilope.

L'estimation de la pluie critique est mise en œuvre 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, 5 ans et 10 ans ;
- les durées de 3h, 6h, 12h et 24h, auxquelles on a ajouté la durée de 1h ;
- une incrémentation du scénario de pluie future d'intensité constante qui est fonction de la durée considérée : + 5 mm/h pour les durées de 1h et 3h ; + 2,5 mm/h pour la durée de 6h ; + 1,25 mm/h pour la durée de 12h ; et + 1 mm/h pour la durée de 24h ;
- une incertitude d'estimation de la pluie critique définie par le produit incrémentation x durée, conduisant aux incertitudes de : 5 mm pour la durée de 1h ; 15 mm pour les durées de 3h, 6h et 12h ; et 24 mm pour la durée de 24h ;
- une estimation toutes les 3 heures et une réactualisation toutes les heures, complétée par la suite par une estimation toutes les heures.

Le risque hydrologique est analysé avec les informations suivantes :

- les cartes des pluies critiques pour tous les bassins (les bassins étant triés par surface décroissante pour visualiser les valeurs sur les bassins emboîtés), pouvant être produites toutes les heures, afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit ;
- les hydrogrammes de crues simulés par AIGA, correspondant à la pluie critique, pour une durée et un seuil de débit donnés, pour visualiser l'hydrogramme simulé avec le scénario de pluie critique ;
- les graphes de comparaison des pluies critiques pour les différentes durées pour un seuil de débit donné, afin d'aider le prévisionniste à croiser l'information de pluie critique avec les prévisions de pluie ;
- le tableau des pluies critiques pour tous les bassins versants, pour une durée et un seuil de débit donnés et pour les dates d'initialisation récentes, afin d'analyser l'évolution des pluies critiques dans le temps ;
- les cartes de différence entre prévision de pluie (que le prévisionniste devra choisir) et pluie critique pour tous les bassins versants, pour une durée et un seuil de débit donnés pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure ou proche de la valeur de pluie critique (en prenant en compte l'incertitude d'estimation de la 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 de la méthode AIGA-FFG.

Concernant les avertissements du système AIGA-FFG, deux exemples de prévisions de pluie sont utilisés dans cette étude : 1) la pluie observée correspondant à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation et constante pour toute la durée de la pluie critique. L'analyse des avertissements sur les 3 événements étudiés montre le gain en anticipation potentielle (par comparaison avec l'avertissement du système AIGA) pour les 2 types de prévision, grâce à la prise en compte des pluies futures dans le modèle pluie-débit. Dans les exemples présentés, l'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA-FFG, par comparaison avec le système AIGA, varie entre 1 heure et 7 heures lorsque l'on considère les pluies critiques pour les durées de 1h, 3h et 6h. L'utilisation de la prévision parfaite de pluie a montré qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon des alertes manquées. La comparaison entre les avertissements avec les 2 prévisions de pluie, pluie observée et pluie persistante, a permis de montrer que la qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie, avec, par exemple, quelques fausses alertes avec la prévision de pluie persistante mais aussi des exemples de meilleure anticipation potentielle pour les événements d'octobre et novembre 2011.

La qualité des avertissements du système AIGA-FFG dépend également 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 permet une meilleure interprétation des informations de pluie critique, au vu des performances passées du modèle pluie-débit et du système de prévision météorologique, ainsi que de la qualité des observations de pluie et débit.

Les discussions avec les prévisionnistes du SPC Med-Est ont souligné l'attrait de la communication du risque hydrologique sous forme de pluie critique de bassin versant. Cette information, exprimée en termes de pluie, facilite les discussions avec les prévisionnistes 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. Une telle information pourrait potentiellement être utile à d'autres utilisateurs, tels que les services de sécurité civile, pour une mise en veille anticipée sur les secteurs jugés sensibles afin d'améliorer le temps de réaction de ces services lorsque le risque de crue est avéré. Les perspectives d'améliorations pour le système d'alerte AIGA-FFG incluent l'intégration de scénarios de pluie future plus réalistes, notamment grâce aux prévisions d'ensembles produites par Météo-France, et la prise en compte des sources d'incertitude du modèle hydrologique, qui concernent les pluies observées, les conditions initiales et les paramètres du modèle.

1. Introduction

Les crues rapides ont un impact socio-économique très important en France comme dans d'autres pays, notamment en zones méditerranéennes ou montagneuses (Gaume *et al.* 2009). Elles sont l'objet de nombreuses recherches pour l'amélioration de leur anticipation et la mise en place de systèmes opérationnels d'alerte. Ces crues de courte durée sont typiquement produites par de fortes pluies et par un ruissellement très productif des bassins. Elles ont tendance à se produire à des échelles locales et à évoluer rapidement (Borga *et al.* 2007). Deux approches pour la mise en place de systèmes d'alerte sont envisageables : 1) un suivi en temps réel des observations des stations de jaugeage de pluie et débit, à partir duquel un système d'alerte peut être mis en place, bien que ce service ne concerne que les bassins jaugeés et offre une faible anticipation des crues rapides ; 2) la mise en place d'un système de prévision de pluie, pouvant être couplé avec un modèle de prévision de débit, qui permet de considérer les bassins non jaugeés et de gagner potentiellement en anticipation. Cependant, les systèmes opérationnels de prévision hydrométéorologique ont souvent une échelle spatio-temporelle supérieure à celle des crues rapides. Et les incertitudes des prévisions, notamment pour les événements pluvieux de type convectif, rendent difficiles l'utilisation directe de prévisions de pluie dans une modélisation hydrologique. C'est pourquoi il reste difficile de mettre en place des systèmes opérationnels d'alerte permettant d'anticiper les crues rapides avec suffisamment de précision et d'anticipation, notamment en milieu non jaugeé (pour lequel il n'y a pas de stations de mesures hydrographiques).

En France, le service opérationnel de vigilance crues (www.vigicrues.gouv.fr/) est assuré par la collaboration entre Météo-France, le SCHAPI, et les Services de Prévisions des Crues (SPC). Ce service permet notamment de suivre en temps réel les réseaux de stations de mesures hydrographiques et de communiquer au public des cartes de vigilance sur les risques d'inondations pour le réseau hydrographique réglementaire. Par ailleurs, pour prévoir les crues rapides en milieu non jaugeé, Météo-France et Irstea (anciennement appelé Cemagref) ont développé le système d'anticipation des crues rapides AIGA. Ce système, actuellement opérationnel 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). Le système AIGA est basé sur un modèle hydrologique distribué qui intègre, pour chaque pixel de $1 \times 1 \text{ km}^2$, 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. Par comparaison avec des quantiles de débit de pointe (préalablement déterminés par la méthode SHYREG, Arnaud *et al.* 2008) pour les périodes de retour de 2 ans, 10 ans et 50 ans, une carte du risque hydrologique est produite pour chaque cours d'eau. Le système 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.

Afin d'améliorer l'anticipation de ce système, des scénarios potentiels de pluies futures peuvent être intégrés pour l'estimation des débits futurs. Étant donnée la difficulté de déterminer avec précision la pluie future à entrer dans le modèle, une des approches possibles est d'appliquer différents scénarios simples de pluie, de plus en plus pessimistes en terme d'intensité, afin de déterminer, suivant les conditions hydrographiques du moment, les cumuls de pluie permettant d'atteindre un certain seuil de débit. Cette approche est mise en œuvre actuellement aux États-Unis par le service opérationnel d'alerte aux crues éclaircies du National Weather Service (NWS) pour produire des cartes de valeurs de pluie critique nécessaire pour initier les débordements sur les bassins versants. Cette information spatialisée sur les pluies critiques permet de communiquer aux prévisionnistes et au public le risque

hydrologique au vu de la situation actuelle des bassins versants et de sa possible évolution en termes de pluie future pour les heures à venir.

L'objectif de cette étude est d'appliquer le principe de la méthode de Flash Flood Guidance au système d'alerte AIGA pour évaluer son apport pour l'aide à la prévision des crues rapides en milieu non jaugé.

2. Méthode de Flash Flood Guidance

Le service d'alerte aux crues éclairs mis en œuvre aux Etats-Unis par le National Weather Service est basé sur l'estimation de la valeur de pluie critique nécessaire pour initier les débordements sur un bassin versant. Cette pluie critique est appelée Flash Flood Guidance (FFG). Nous décrivons ici le principe de la méthode telle qu'elle est appliquée opérationnellement aux Etats-Unis. Le rapport d'étude intitulé «Service de Prévision des Crues Eclairs du National Weather Service des Etats-Unis » de Demargne et Javelle (2012) fournit les détails concernant la méthode et les améliorations en cours, ainsi que l'organisation du service d'alerte de crue du National Weather Service.

a) Principe de la méthode

Pour anticiper le risque de crue éclair, la méthode d'alerte est basée sur l'estimation de la valeur de pluie moyenne critique, dite Flash Flood Guidance, qui est nécessaire pour initier des débordements pour une zone et une durée spécifiques. Les valeurs de pluie critique FFG sont déterminées pour différentes durées (1h, 3h, 6h, 12h et 24h) et sont actualisées 1 à 4 fois par jour.

Pour chaque bassin versant considéré et pour chaque durée, la valeur de pluie critique correspond au débit seuil de débordement (appelé Threshold Runoff ou ThreshR et exprimé dans la même unité que la pluie). Le débit seuil de débordement est estimé au préalable à partir des séries historiques de débit, des informations locales sur les débordements et leurs conséquences, des propriétés géomorphologiques des bassins versants, ainsi que l'estimation des périodes de retour des débordements. Généralement, la valeur de ThreshR correspond au débit de période de retour de 2 ans. Cette valeur doit être estimée pour chaque durée considérée et pour chaque bassin versant.

En temps réel, les valeurs de pluie critique FFG sont estimées en utilisant la modélisation hydrologique globale et continue, mise en place pour les prévisions hydrologiques, et différents scénarios de pluies futures. Ces scénarios sont définis, pour chaque durée, par une pluie moyenne d'intensité constante, qui est incrémentée successivement en partant de 0 jusqu'à la production d'une valeur de débit spécifique à l'exutoire qui soit supérieure au débit seuil de débordement. Les simulations hydrologiques successives permettent de déterminer la courbe pluie – débit spécifique pour chaque durée considérée. A partir de cette courbe, on extrait la valeur de pluie critique FFG qui correspond à la valeur de débit seuil de débordement ThreshR.

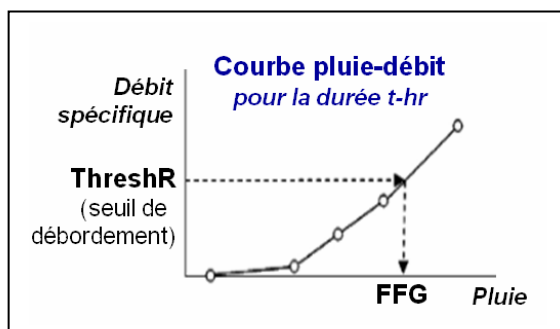


Figure 1 : Méthode américaine de détermination de la pluie critique FFG à partir de la courbe pluie – débit et du débit seuil de débordement

A partir de la pluie critique des bassins versants utilisés par la modélisation hydrologique, on définit les cartes raster de pluie critique FFG sur une grille spatiale d'environ ~4km x 4km, chacun des pixels du bassin recevant la même valeur de pluie critique FFG. Un exemple de carte de pluie critique FFG est donné en Figure 2, la pluie critique pour la durée de 3h étant exprimée en pouces¹ et en mm.

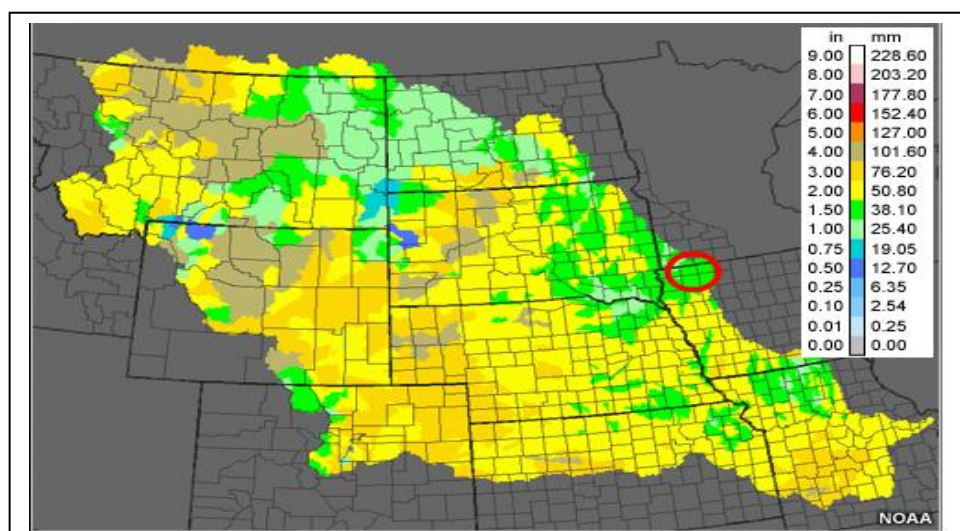


Figure 2 : Exemple de carte de pluie critique FFG produite au National Weather Service au format raster pour la durée de 3h

Cette approche basée sur une modélisation hydrologique globale du bassin versant en continu et en temps réel permet de prendre en compte son état hydrique. Elle permet d'estimer rapidement une valeur de pluie critique moyenne pour le bassin sans avoir recours à des prévisions de pluie future. Ces valeurs de pluie critique sont indicatives de la pluie nécessaire pour initier des débordements sur de petits bassins. Elles nécessitent d'être interprétées par les prévisionnistes, notamment pour prendre en compte les performances de la modélisation hydrologique et la qualité des données de prévisions météorologiques et des observations de pluie et débit (par exemple, l'influence locale des zones urbaines est mal prise en compte par le modèle hydrologique actuel).

Les cartes de pluies critiques FFG facilitent la comparaison avec les données spatialisées de pluie, disponibles en temps réel, pour déterminer les zones de risque d'inondation. En

¹ 1 pouce = 1 inch (in) = 25,4 mm

comparant les cartes de pluies critiques FFG aux pluies observées et pluies futures, les prévisionnistes doivent prendre la décision d'émettre ou non un bulletin d'alerte, notamment lorsque les valeurs de pluies observées et futures sont proches ou supérieures aux valeurs de FFG.

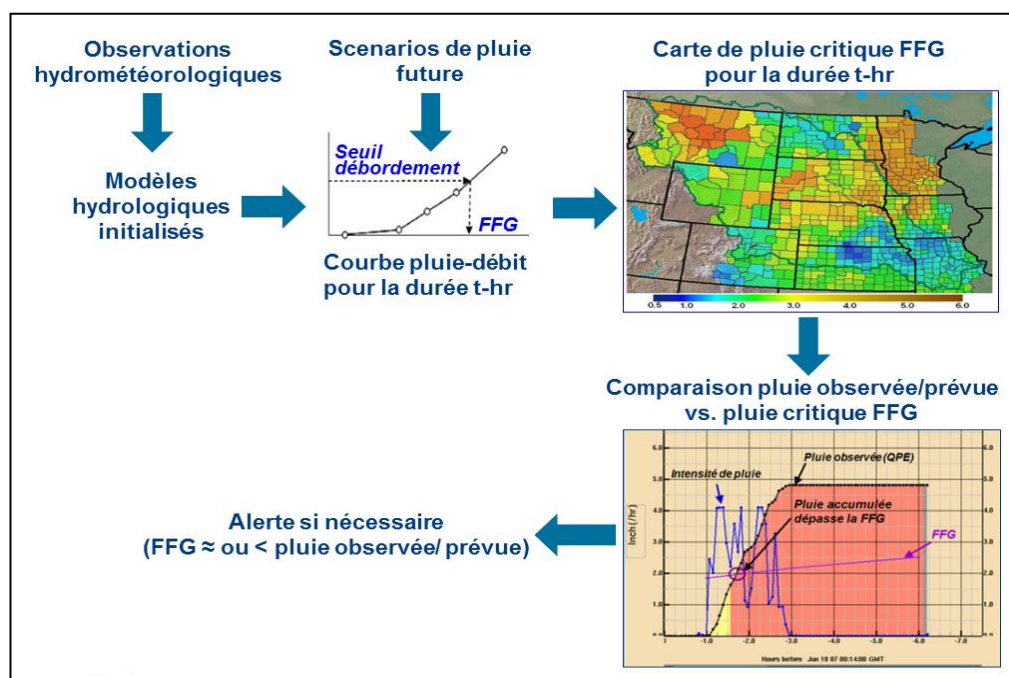


Figure 3 : Chaîne d'alerte des crues éclair du National Weather Service, basée sur l'estimation de la pluie critique FFG et de sa comparaison avec les pluies observées et attendues

Le service de Flash Flood Guidance aux Etats-Unis est assuré par la publication sur internet des bulletins expertisés d'alerte aux crues éclair, ainsi que des estimations de pluie critique, réactualisées 1 à 4 fois par jour, pour l'ensemble du territoire. Un exemple de carte de pluie critique, par mosaïque des cartes de pluie critique produites par les différents centres « régionaux » de prévisions hydrologiques (les River Forecast Centers) est disponible sur le site suivant : <http://www.srh.noaa.gov/rfcshare/ffg.php?duration=3&location=NAT>

Les estimations de pluie critique peuvent également être téléchargées pour une analyse spatiale. Les données d'observations et de prévisions de pluie sont également disponibles sur internet et peuvent donc être croisées par les utilisateurs aux estimations de pluie critique.

b) Application au système d'alerte AIGA

Le système d'anticipation des crues AIGA, qui est opérationnel sur les régions Languedoc-Roussillon (LR) et Provençes Alpes Côte d'Azur (PACA) depuis 2005, affiche en temps réel et toutes les 15 minutes une carte du risque hydrologique pour chacun des cours d'eaux de la zone méditerranéenne. Le risque hydrologique est décrit par catégories de période de retour pour la crue en cours : inférieure à 2 ans, entre 2 et 10 ans, entre 10 et 50 ans, et supérieur à 50 ans. La chaîne d'alerte du système AIGA actuel est décrite en Figure 4.

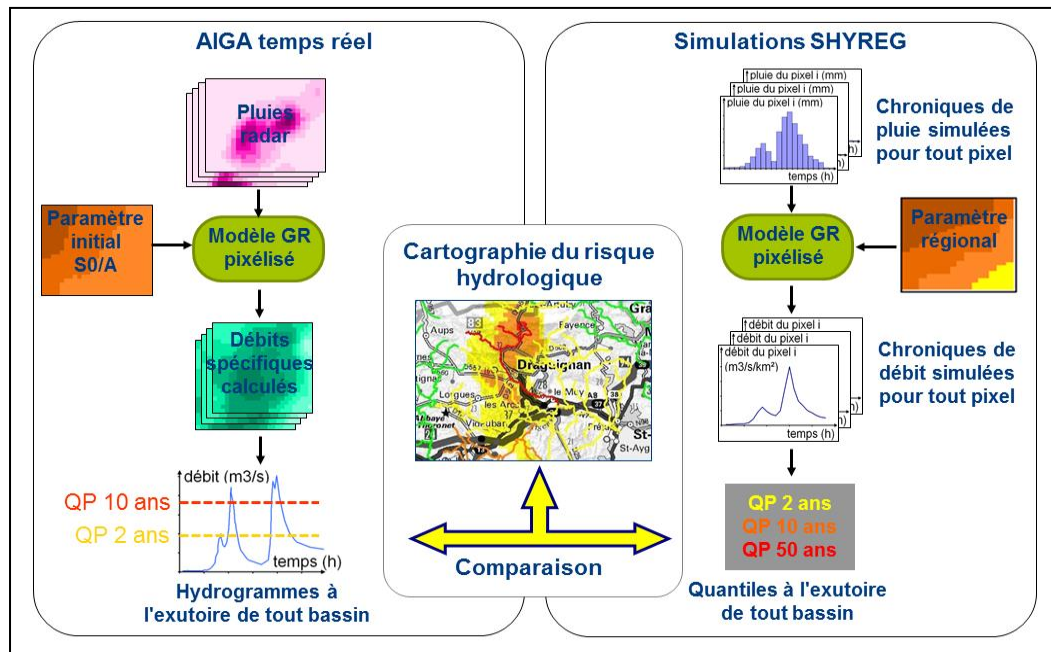


Figure 4 : Chaîne d’alerte aux crues rapides du système AIGA actuel utilisant la base de quantiles de débit estimés par la méthode régionalisée SHYREG (adapté de Ronsoux Fouchier, 2010)

Le système utilise un modèle conceptuel pluie-débit distribué GR au pas de temps horaire et à la résolution spatiale de 1 km^2 . Le modèle inclut un réservoir de production et un réservoir de transfert. Pour prendre en compte l’état hydrique des sols, l’initialisation du réservoir de production est basée sur un indice d’humidité journalier estimé par le modèle hydrologique pluie-débit journalier GR3J (Perrin et al. 2003). La calibration et la régionalisation de ce modèle ont été décrites par Javelle et al. (2010) et Organde (2012).

Les données d’observations de pluie proviennent des données spatialisées 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). Toutes les 15 minutes, les données de pluies sont accumulées au pas de temps horaire pour être intégrées dans le modèle hydrologique. Pour chaque pixel, le modèle hydrologique produit un débit élémentaire en considérant les 2 réservoirs de production et de transfert. Le débit à l’exutoire du bassin est obtenu par une sommation sans décalage temporel des débits élémentaires de chaque pixel.

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) et le modèle pluie-débit distribué GR (utilisé par AIGA en temps réel) 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 km².

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 3 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 LR-PACA pour leur permettre d'émettre, si nécessaire, les bulletins d'alerte aux crues.

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser le principe de la méthode de Flash Flood Guidance avec le système d'alerte AIGA comme décrit dans la Figure 5, pour utiliser les cartes de pluie critique FFG dans l'évaluation du risque potentiel de crue dans les heures à venir.

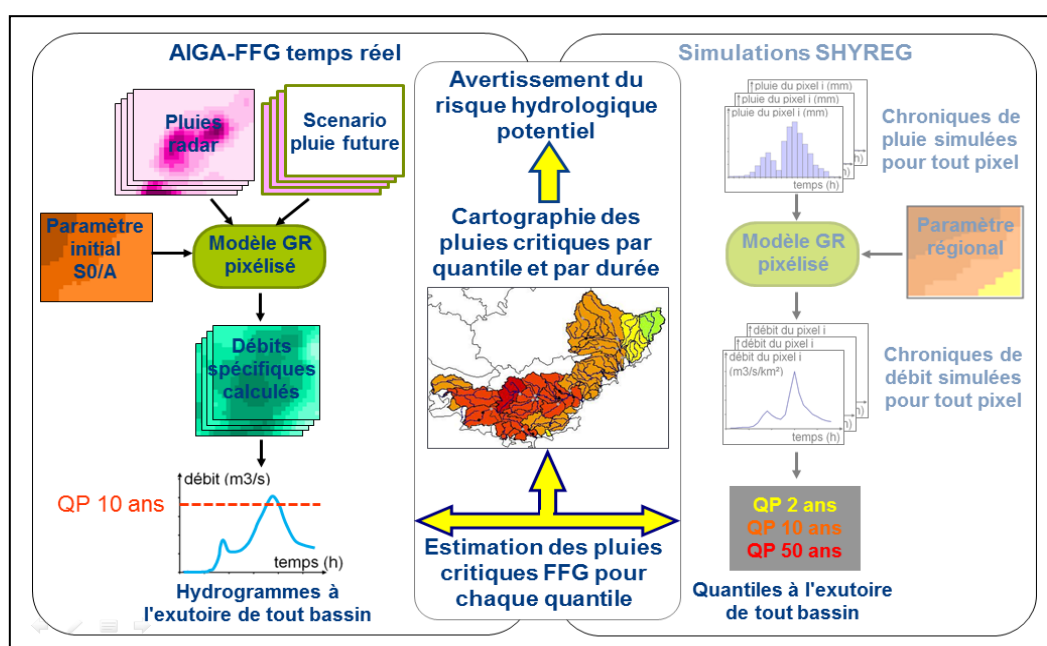


Figure 5 : Couplage du système AIGA et de la méthode Flash Flood Guidance pour la cartographie des pluies critiques de bassin par quantile de débit et par durée

Comme dans le principe de la méthode FFG, le modèle pluie-débit distribué GR intègre les pluies observées jusqu'à l'instant initial et, pour les pas de temps futurs, un scénario de pluie future d'intensité constante et uniforme spatialement sur le bassin versant pour la durée considérée. Pour chaque bassin et chaque quantile de débit considéré, le scénario de pluie future est incrémenté jusqu'à ce que le débit futur estimé par le modèle GR atteigne le quantile de débit. La pluie critique du bassin pour la durée considérée et le quantile de débit choisi est alors définie comme le cumul de pluie future. Cette estimation des pluies critiques peut être réalisée pour différentes durées et différents quantiles de débit pour mieux évaluer la réponse hydrologique des bassins versants à la pluie future.

3. Estimation des Pluies Critiques

Le couplage du système AIGA et de la méthode FFG est mis en œuvre en utilisant le système AIGA opérationnel des régions LR-PACA sur un jeu de bassins versants de la zone du SPC Med-Est.

a) Sélection des évènements et des bassins

Pour une première évaluation de couplage AIGA-FFG, 3 évènements ont été sélectionnés suite aux discussions avec le SCHAPI et le SPC Med-Est :

- l'évènement du 15-16 juin 2010 dans la région de Draguignan, pour lequel de très fortes pluies (Figure 7) sur des sols secs ont entraîné des débits de période de retour supérieure à 50 ans;
- l'évènement du 24-26 octobre 2011 avec des pluies modérées (Figure 10) sur des sols secs, pour lequel les périodes de retour des débits de pointe n'ont pas atteint le seuil de 2 ans ;
- l'évènement du 3-9 novembre 2011 pour lequel des pluies fortes (Figure 10), avec des accalmies, sur des sols humides ont entraîné diverses inondations.

La date de début d'un événement pluvieux est définie par le premier jour pour lequel la pluie journalière d'au moins un des bassins étudiés dépasse 10 mm. La date de fin d'évènement est fixée 24 h après le premier des jours suivants présentant un cumul journalier inférieur à 10 mm pour tous les bassins étudiés. Ce décalage de 24h par rapport au seuil de pluie de 10 mm est nécessaire pour s'assurer de simuler la pointe de crue.

Evènement du 15-16 juin 2010

Pour cet évènement, 13 bassins versants, de surface comprise entre 20 km² et 2661 km², ont été sélectionnés pour l'analyse des pluies critiques (Figure 6). Le tableau des caractéristiques des bassins versants est donné en Appendice A.

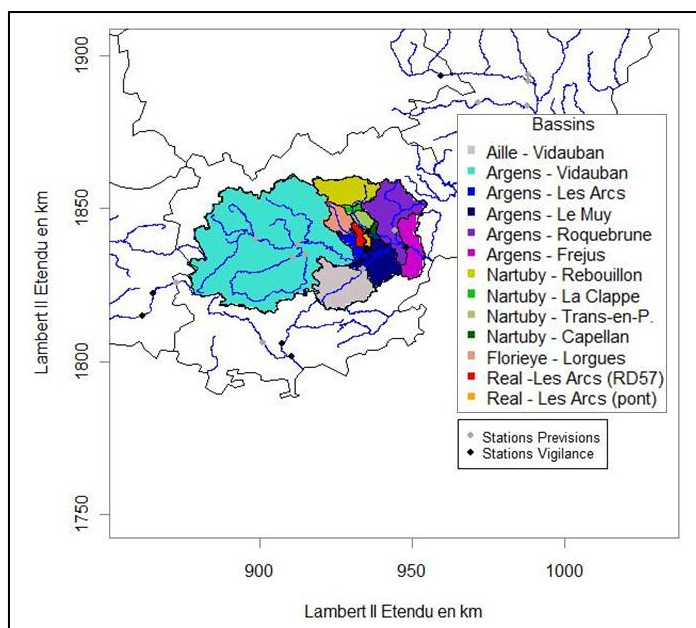


Figure 6 : Carte des 13 bassins versants sélectionnés pour l'évènement du 15-16 juin 2010

La pluie observée qui est utilisée pour simuler les débits avec AIGA est la lame d'eau Panthère de Météo-France, qui correspond aux données de pluies disponibles en temps réel toutes les 15 minutes pour les prévisionnistes du SCHAPI et des SPC (Figure 7).

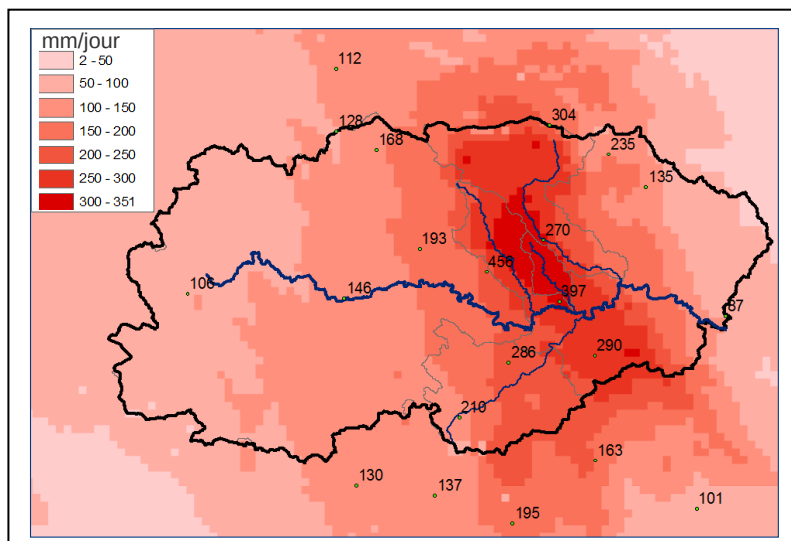


Figure 7 : Cumul journalier de pluie du 15 juin 2010 6TU au 16 juin 2010 6TU pour les stations pluviométriques et la lame d'eau Panthère issu du système radar de Météo-France

Le modèle pluie-débit distribué GR du système AIGA a simulé des débits dépassant le seuil de 50 ans pour les 11 bassins versants sur l'Aille, l'Argens, la Nartuby et le Florièye, et un débit dépassant le seuil de 10 ans pour les 2 bassins sur le Réal. Deux exemples d'hydrogrammes de crue simulés par AIGA sont donnés en Figure 8.

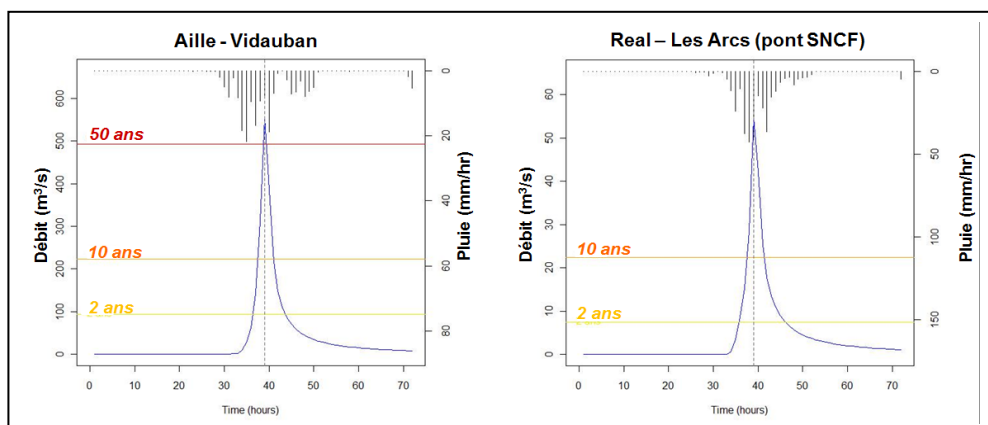


Figure 8 : Hydrogrammes de crue simulés par AIGA du 14 juin 2010 0:45TU au 16 juin 2010 23:45TU pour l'Aille à Vidauban et le Réal au pont SNCF des Arcs

Evènements d'octobre et novembre 2011

Pour ces 2 évènements, le SPC Med-Est a sélectionné un jeu de 46 bassins à enjeux sur la région PACA, pour lesquels le SPC a mis en place un service de veille complémentaire. La carte des 46 bassins et la distribution de leurs surfaces (de 25 km² à 2812 km²) sont données en Figure 9. La table des caractéristiques des bassins versants donnée dans l'appendice A.

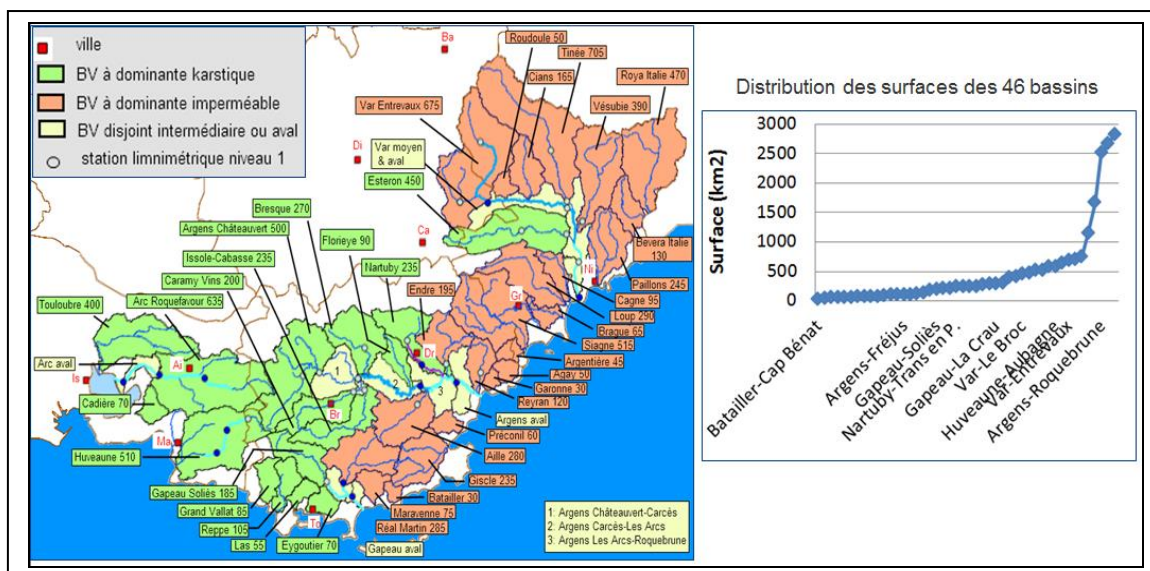


Figure 9 : Carte des 46 bassins versants à enjeux sélectionnés par le SPC Med-Est pour les événements d'octobre et novembre 2011 et graphe de distribution de leurs surfaces

Les données de pluie observée pour les événements d'octobre et novembre 2011 sont issues des lames d'eau Antilope de Météo-France, qui intègrent une correction des pluies estimées à partir du signal radar en utilisant les valeurs mesurées aux stations pluviométriques (Figure 10).

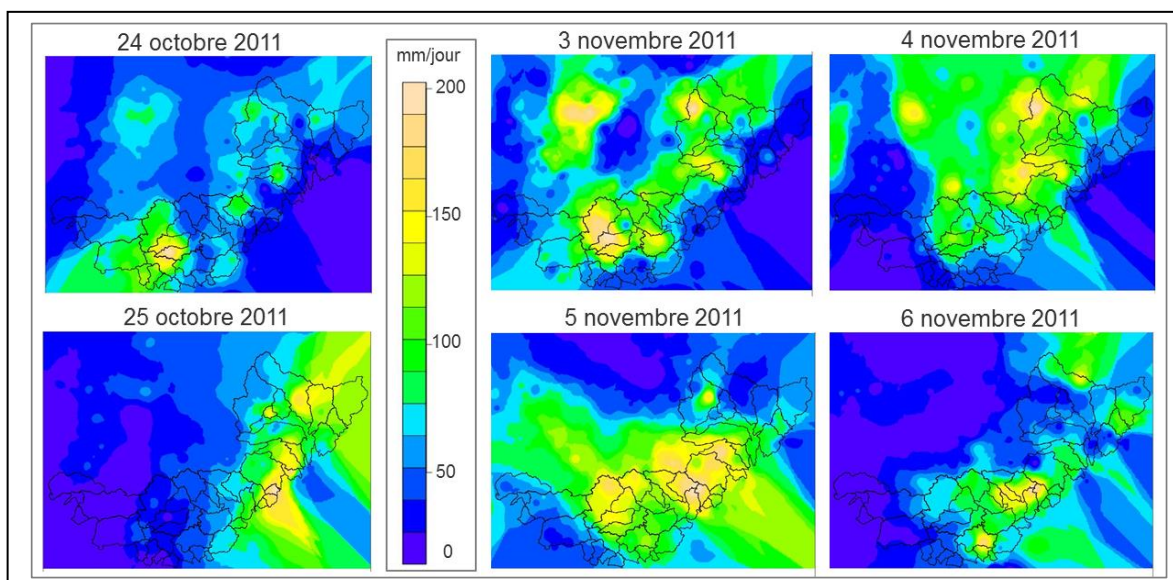


Figure 10 : Cumul journalier de pluie pour les événements d'octobre et novembre 2011 pour la lame d'eau Antilope de Météo-France, issue du signal radar corrigé par les mesures des stations pluviométriques

Ces 3 événements sont utilisés pour proposer au SCHAPI et aux SPC des outils d'analyse de l'information de pluie critique et analyser l'intérêt de cette approche, en termes d'identification des bassins versants les plus sensibles au risque de crue et de meilleure anticipation des avertissements.

b) Estimation des pluies critiques

L'estimation des pluies critiques est basée sur :

- la prise en compte d'un scénario de pluie future d'intensité constante et uniforme sur le bassin pour la durée considérée,
- la comparaison entre le débit simulé par AIGA avec le scénario de pluie considéré et le débit seuil que l'on cherche à atteindre.

La pluie critique est la valeur de cumul de pluie future du premier scénario ayant permis d'atteindre le seuil de débit. Cette pluie critique est estimée pour :

- chacun des bassins,
- chaque durée considérée,
- chaque seuil de débit (i.e. quantile de débit SHYREG),
- et chaque pas de temps de l'évènement qui définit l'instant initial T0 de la simulation.

Pour l'instant initial T0 considéré, 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 ou Antilope)
- à partir de T0, la pluie future d'intensité constante sur la durée considérée.

Le premier scénario 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, sans aucune pluie future, pour les heures à venir. Si le seuil de débit n'a pas été atteint, le scénario de pluie est incrémenté jusqu'à ce que le débit simulé par AIGA dépasse le débit seuil.

Paramètres utilisés dans cette étude

Les discussions avec le SPC Med-Est et le SCHAPI ont conduit à estimer les pluies critiques avec les paramètres suivants :

- les durées de 3h, 6h, 12h et 24h ; ces durées paraissent pertinentes pour caractériser des événements pluvieux courts de type systèmes multicellulaires, et des événements pluvieux plus longs, tels que les pluies orographiques, la durée de 24h correspondant à l'échéance de vigilance ;
- les seuils de débit définis par les quantiles de débit SHYREG pour les périodes de retour de 2 ans, 5 ans et 10 ans, le système d'alerte AIGA opérationnel utilisant les quantiles de débit de 2 ans et 10 ans (ainsi que 50 ans).

Par la suite, la durée de 1h est également considérée pour évaluer son apport pour le prévisionniste lorsque le risque de crue semble avéré.

Le modèle pluie-débit distribué GR du système d'AIGA est défini au pas de temps horaire. Les pluies critiques sont estimées toutes les 3 heures et réactualisées pour chacune des 2 heures suivantes en soustrayant aux valeurs de pluies critiques la pluie observée.

L'incrémentation du scénario de pluie future d'intensité constante est définie pour chaque durée par :

- pour la durée de 1h, + 5 mm/h,
- pour la durée de 3h, + 5 mm/h,
- pour la durée de 6h, + 2,5 mm/h
- pour la durée de 12h, + 1,25 mm/h,
- pour la durée de 24h, + 1 mm/h.

Cette incrémentation conduit aux valeurs de pluie critique suivantes :

- pour la durée de 1h, valeurs de pluie critique de 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, etc.
- pour les durées de 3h, 6h et 12h, valeurs de pluie critique de 0 mm, 15 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm, etc.
- pour la durée de 24h, valeurs de pluie critique de 0 mm, 24 mm, 48 mm, 72 mm, 96 mm, etc.

L'incrémentation des scénarios de pluie future pourrait être définie de façon plus fine mais elle doit permettre une comparaison rapide et pertinente entre les pluies critiques et les prévisions de pluie. Au vu des incertitudes provenant des prévisions de pluie et de la modélisation hydrologique d'AIGA, ainsi que du type d'événements pluvieux sur la zone méditerranéenne, il semble que l'incrémentation proposée soit pertinente pour la zone du SPC Med-Est. Il faut noter que cette incrémentation a une conséquence directe sur le temps de calcul de l'estimation des pluies critiques.

Incertitude d'estimation des pluies critiques

L'incrémentation des scénarios de pluie future induit une incertitude sur la valeur de pluie critique correspondant au produit : incrémentation x durée. L'incertitude (notée Incertitude_{ffg} par la suite) pour les différentes durées considérées est donc de :

- 5 mm pour la durée de 1h,
- 15 mm pour les durées de 3h, 6h et 12h,
- 24 mm pour la durée de 24h.

Cette incertitude ne décrit pas l'ensemble des sources d'incertitudes lors de l'estimation des pluies critiques (sources d'incertitude qui incluent les observations de pluie, l'estimation du taux d'humidité du bassin, les paramètres du modèle hydrologique GR, les simplifications et la structure du modèle hydrologique GR, et les impacts humains). Elle traduit uniquement une incertitude d'estimation lors de l'incrémentation du scénario de pluie future. Si cette information ne décrit que partiellement l'incertitude sur la pluie critique, elle doit cependant être prise en compte lors de l'analyse des informations de pluie critique et de mise en alerte des bassins.

Ainsi, la visualisation des valeurs de pluie critique est basée sur les plages de valeurs de pluie critique, chaque plage de valeurs correspondant à la valeur de l'incertitude pour la durée considérée. Par exemple, pour les durées de 3h, 6h et 12h, les plages de valeurs de pluie critique sont les suivantes : FFG=0 mm, $0 < \text{FFG} \leq 15\text{mm}$, $15 < \text{FFG} \leq 30\text{mm}$, $30 < \text{FFG} \leq 45\text{mm}$...

Caractéristiques des pluies critiques dans cette étude

Les caractéristiques de durée, incrémentation du scenario de pluie future, incertitude d'estimation de la pluie critique, et plages des valeurs de pluie critique pour cette étude sont données dans le Tableau 1.

Durée de pluie critique	Incrémentation du scenario de pluie future	Incertitude d'estimation	Plages de valeurs des pluies critiques (mm/durée)
1 h	+5 mm/h	5 mm	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45...
3 h	+5 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120...
6 h	+2,5 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120...
12 h	+1,25 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120...
24 h	+1 mm/h	24 mm	0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168...

Tableau 1 : Caractéristiques des pluies critiques pour les durées de 1h à 24h

Exemple d'estimation des pluies critiques

La Figure 11 donne un exemple d'estimation de pluie critique relative à la durée de 3h et au seuil de quantile de débit SHYREG de période de retour de 10 ans pour le bassin du Réal au pont SNCF des Arcs pour l'instant initial T0 du 15 juin 2010 à 11h45 TU.

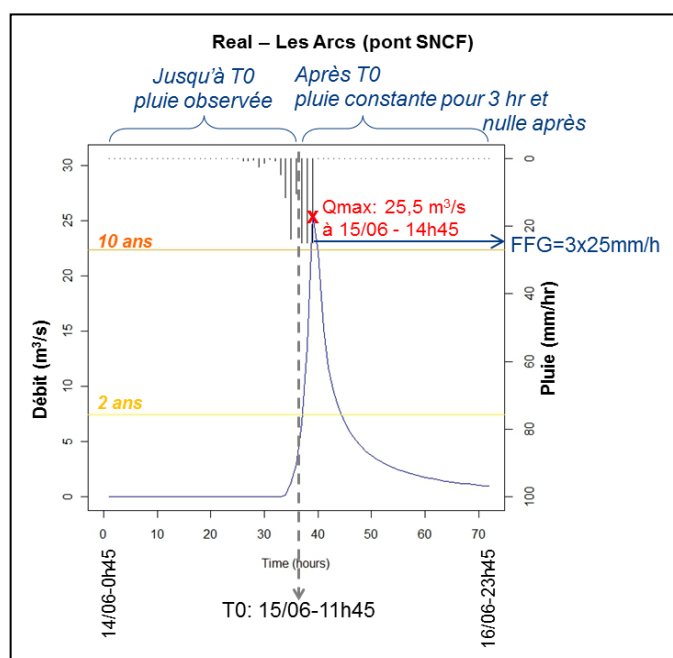


Figure 11 : Hydrogramme de crue simulé par AIGA correspondant à la pluie critique FFG de 75mm/3h pour la date du 15 juin 2010 11h45 (TU) et le seuil de débit décennal pour le bassin du Réal au pont SNCF des Arcs

La pluie utilisée pour la simulation est basée sur :

- la pluie observée (lame d'eau Panthère pour cet événement) pour la période du 14/06/2010 0h45 TU (début de la simulation) jusqu'au 15/06/2010 11h45 TU
- la pluie future définie du 15/06/2010 11h45 TU jusqu'au 15/06/2010 14h45 TU pour couvrir la durée de 3h ; les scenarios de pluie future testés sont : 0 mm/h, 5 mm/h, 10 mm/h, 15 mm/h, 20 mm/h, et 25 mm/h.

Le scenario de 25 mm/h correspond au premier dépassement du seuil de débit 10 ans dans les 3 heures suivants. Par conséquent, la pluie critique FFG est définie par :
 $FFG = 3 \times 25 \text{ mm/h} = 75 \text{ mm/3h}$ pour $T_0 = 15/06/2010 \text{ 11h45}$.

L'incertitude d'estimation de la pluie critique pour la durée de 3h est de $5 \times 3 = 15 \text{ mm}$. Ainsi, pour cette date d'initialisation, le bassin versant atteint le seuil de débit de 10 ans si le cumul de pluie future est strictement supérieur à 60 mm/h et inférieur ou égal à 75 mm dans les 3 prochaines heures (à noter que le cumul de 60 mm/3h, préalablement testé avec le scenario de 20 mm/h, n'a pas entraîné de dépassement du seuil de débit).

La valeur de pluie critique peut être réactualisée pour les 2 heures suivant la date d'initialisation, en soustrayant à la pluie critique la pluie observée (provenant de la lame d'eau Panthère pour cet événement). Si la valeur obtenue est négative, la pluie critique est définie comme nulle (le bassin a atteint le seuil critique de débit avec la pluie observée).

Dans l'exemple de la Figure 11, on obtient les estimations suivantes de pluie critique :

- à 15/06/2010 11h45 TU, $FFG = 75 \text{ mm/3h}$
- à 15/06/2010 12h45 TU, $FFG = 75 - 37,60 = 37,4 \text{ mm/2h}$
- à 15/06/2010 13h45 TU, $FFG = 37,4 - 42,8$ donc $FFG = 0 \text{ mm/h}$.

Pour ce bassin, la pluie observée entre 11h45 et 13h45 a atteint la valeur de pluie critique et donc le débit du bassin a dépassé le seuil critique à 13h45 TU.

Il faut noter que la réactualisation horaire des pluies critiques produit une information pour différentes durées de pluie future. Dans l'exemple ci-dessus, ces durées sont de 3h lorsque la pluie critique a été estimée, 2h pour le pas de temps de réactualisation suivant, et enfin 1h pour le dernier pas de temps de réactualisation. Cette variation de la durée relative aux valeurs de pluie critique pourrait compliquer l'interprétation de cette information. C'est pourquoi nous avons considéré, par la suite, une estimation des pluies critiques toutes les heures. Cette estimation horaire des pluies critiques paraît notamment pertinente lorsque le risque de crue semble avéré et qu'un suivi plus fin du risque hydrologique est nécessaire.

Mise en œuvre pratique de l'estimation des pluies critiques en temps réel

Concernant la mise en place pratique en temps réel, l'estimation des pluies critiques s'effectue en complément du système AIGA avec des boucles supplémentaires de simulation du débit par le modèle pluie-débit distribué GR. Chaque simulation supplémentaire correspond à un scenario de pluie future d'intensité constante et uniforme spatialement pour une liste de bassins pour lesquels un événement est en cours (à noter que la définition de début de l'événement en temps réel se fait sur un seuil de pluie journalière au pixel). Dans la description qui suit et par souci de clarté, l'incrémentation sera la même pour toutes les durées. Ainsi, la simulation par le modèle GR peut être effectuée pour la durée la plus longue (dans cette étude, 24h), pour pouvoir calculer les valeurs de débit simulé pour l'ensemble des pas de temps (de $T_0 + 1h$ à $T_0 + 24h$). La donnée de pluie, définie sur la durée la plus longue, avec une intensité constante et uniforme spatialement sur tous les bassins versants, est incrémentée à chaque boucle.

Les différentes étapes de l'estimation des pluies critiques sont les suivantes :

- 1) pour la première boucle de simulation par le modèle GR, on définit la liste des bassins (pour lesquels un évènement est en cours) et la donnée de pluie future comme nulle pour tous les bassins de la liste et pour la durée la plus longue ;
- 2) on fait tourner le modèle pluie-débit pour tous les bassins de la liste et pour la durée la plus longue pour obtenir les débits simulés ;
- 3) on compare, pour chaque bassin versant, pour chacune des durées considérées (dans cette étude, de 1h à 24h) et pour chaque seuil de débit (ici pour les quantiles de débit SHYREG de périodes de retour de 2 ans, 5 ans et 10 ans), les valeurs du débit simulé pour tous les pas de temps de la durée concernée à la valeur du seuil de débit (par exemple pour la durée de 3h, les débits simulés correspondent aux pas de temps T_0+1h , T_0+2h et T_0+3h) ;
- 4) si pour un des pas de temps, le débit simulé dépasse le seuil de débit, on définit la pluie critique comme le cumul du scénario de pluie future considéré pour cette simulation ;
- 5) si le bassin dépasse le seuil de débit pour toutes les durées considérées et pour le seuil de débit le plus élevé, le bassin est exclus de la liste des bassins pour la simulation suivante ;
- 6) si la liste des bassins contient encore au moins un bassin, on définit la nouvelle donnée de pluie avec incrémentation du scénario de pluie future pour les bassins versants de la liste (i.e. bassins n'ayant pas encore atteint le seuil de débit le plus élevé pour toutes les durées considérées) et on reprend les étapes 2 à 6 ;
- 7) si la liste des bassins ne contient plus aucun bassin, le programme prend fin ; tous les bassins versants ont atteint le seuil de débit le plus élevé pour toutes les durées considérées et donc les valeurs de pluie critique ont été estimées pour tous les bassins, toutes les durées et tous les seuils de débit.

Le temps de calcul pour ces simulations successives du modèle pluie-débit dépend du temps de calcul en temps réel d'AIGA, ainsi que des facteurs suivants :

- nombre de pas de temps pour la durée de pluie critique la plus longue,
- incrémentation des scénarios de pluie future,
- seuil de débit le plus élevé pour évaluer les dépassements,
- et nombre de bassins versants.

A noter qu'il est difficile dans cette étude de donner des ordres de grandeur des temps de calcul car ces estimations sont faites en utilisant la version expérimentale du code AIGA, programmée en langage R pour des simulations *a posteriori*, et sur des machines différentes de celles de Météo-France.

Résumé de l'estimation des pluies critiques avec AIGA

L'estimation de la pluie critique est mise en œuvre dans cette étude avec le système AIGA pour 46 bassins de la zone du SPC Med-Est 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, 5 ans et 10 ans ;
- les durées de 3h, 6h, 12h et 24h, auxquelles on a ajouté la durée de 1h ;
- une incrémentation du scenario de pluie future d'intensité constante qui est fonction de la durée considérée : + 5 mm/h pour les durées de 1h et 3h ; + 2,5 mm/h pour la durée de 6h ; + 1,25 mm/h pour la durée de 12h ; et + 1 mm/h pour la durée de 24h ;
- une incertitude d'estimation de la pluie critique définie par le produit incrémentation x durée, conduisant aux incertitudes de : 5 mm pour la durée de 1h ; 15 mm pour les durées de 3h, 6h et 12h ; et 24 mm pour la durée de 24h ;
- une estimation toutes les 3 heures et une réactualisation toutes les heures, complétée par la suite par une estimation toutes les heures.

Les caractéristiques des pluies critiques pour cette étude en termes de durée, incrémentation du scenario de pluie future, incertitude d'estimation, et plages des valeurs sont données dans le tableau suivant.

Durée de pluie critique	Incrémentation du scenario de pluie future	Incertitude d'estimation	Plages de valeurs des pluies critiques (mm/durée)
1 h	+5 mm/h	5 mm	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35...
3 h	+5 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90...
6 h	+2,5 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90...
12 h	+1,25 mm/h	15 mm	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90...
24 h	+1 mm/h	24 mm	0, 24, 48, 72, 96, 120...

4. Visualisation et Analyse des Pluies Critiques

Pour évaluer l'apport potentiel de l'information de pluie critique, différents formats de visualisation des pluies critiques, ainsi que du croisement (par le prévisionniste) des pluies critiques avec des prévisions de pluie sont présentés dans cette partie.

a) Produits pour l'analyse en temps réel

L'analyse de l'information de pluie critique en temps réel est proposée à partir des produits suivants :

- les cartes des pluies critiques FFG pour tous les bassins versants pour une durée donnée, un seuil de débit et une date d'initialisation, qui peuvent être produites toutes les heures (en incluant les valeurs réactualisées de pluies critiques ou, par la suite, les estimations horaires des pluies critiques), afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque d'inondation (exemples donnés en Figures 12, 13 et 15) ;
- les hydrogrammes de crues simulés par AIGA correspondant à la pluie critique pour chaque bassin versant et pour une durée donnée, un seuil de débit et une date d'initialisation, qui peuvent être produits lors de l'estimation de la pluie critique (exemple donné en Figure 11) ;
- les graphes de comparaison des pluies critiques pour les différentes durées pour chaque bassin versant et pour un seuil de débit et une date d'initialisation donnés, afin d'aider le prévisionniste à croiser l'information de pluie critique avec les prévisions de pluie (exemple donné en Figure 14) ;
- le tableau des pluies critiques pour tous les bassins versants pour une durée et un seuil de débit donnés pour les dates d'initialisation récentes, afin d'analyser l'évolution des pluies critiques dans le temps (exemple donné dans le Tableau 2).

Carte de pluie critique

La carte de pluie critique permet de représenter, pour une durée donnée, un seuil de débit et une date d'initialisation, les plages de valeurs de pluie critique (en prenant en compte l'incertitude d'estimation) pour tous les bassins versants. 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.

A noter que les bassins versants sont triés par ordre de surface décroissante pour permettre de visualiser les valeurs de pluies critiques pour les bassins emboîtés (ex. bassins amont et aval d'un même cours d'eau). Les bassins pour lesquels le débit simulé dépasse le seuil sans aucune pluie future (FFG=0mm/durée) sont également identifiés pour donner l'alerte de dépassement de seuil, alerte qui correspond à l'alerte d'AIGA pour un des pas de temps futur de la durée considérée (ex. pour la durée de 3h, T0+1h, T0+2h ou T0+3h).

Un exemple de carte de pluie critique est donné dans la Figure 12 pour l'évènement de novembre 2011. Les plages des valeurs de pluie critique FFG pour la durée de 3h sur cette carte sont les suivantes : FFG=0 mm, $0 < \text{FFG} \leq 15\text{mm}$, $15 < \text{FFG} \leq 30\text{mm}$, $30 < \text{FFG} \leq 45\text{mm}$, ..., et $225 < \text{FFG} \leq 240\text{mm}$ (cf. Tableau 1).

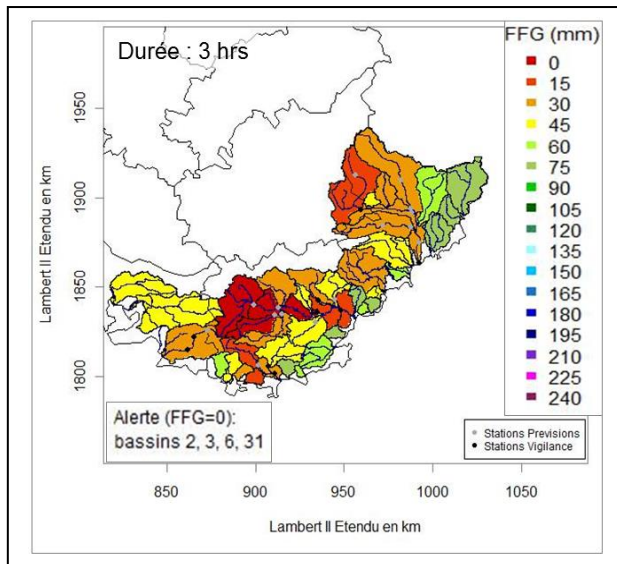


Figure 12 : Carte des pluies critiques pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour la date d'initialisation du 5 novembre 2011- 14TU

Dans l'exemple de carte de pluie critique de la Figure 12, il faut noter la variabilité des estimations de pluie critique sur l'ensemble de la zone du SPC Med-Est, variabilité qui dépend de l'état hydrique des bassins versants et de leur réactivité aux pluies. On peut noter que les bassins du Caramy (#2) et de l'Argens amont (#3, 6 et 31) seront en crue dans les 3 prochaines heures (FFG=0). Les valeurs de pluie critique de 15 mm/3h donnent un avertissement pour le Var amont, l'Argens aval et le Gapeau amont. En comparaison, les petits bassins côtiers et les bassins de la Vesubie et du Roya (de la zone Nord-Est), pour lesquels les pluies critiques sont égales à 60mm/3h et 75mm/3h, sont moins susceptibles de dépasser le seuil de débit.

Cependant, il faut noter que, d'après l'expérience des prévisionnistes de SPC Med-Est, le signal radar de Météo-France aurait tendance à sous-estimer la pluie observée pour la zone Nord-Est. Cette sous-estimation des pluies observées entraînerait un état hydrique plus sec des bassins de la Vesubie et du Roya, donc des valeurs de pluie critique plus élevées que pour les bassins voisins. Cet exemple illustre le fait que la qualité des estimations de pluie critique dépend de la qualité du modèle hydrologique et des données d'observation utilisées pour l'initialisation du modèle. L'expertise du prévisionniste du SPC peut donc permettre une meilleure interprétation des informations de pluies critiques, grâce à ses connaissances relatives aux performances passées du modèle hydrologique et des systèmes d'observation de pluie et de débit.

Les valeurs de pluie critique varient avec la durée considérée, comme le montrent les cartes de la Figure 13 pour les durées de 6h et 24h correspondant à la carte de la Figure 12 pour la durée de 3h. Les plages de valeurs de pluie critique pour la durée de 24h sont également différentes dû à l'incrément de 1 mm/h (il en est de même pour la durée de 1h) (cf. Tableau 1). Cependant, la correspondance des couleurs dans la légende facilite la comparaison des pluies critiques pour les différentes durées.

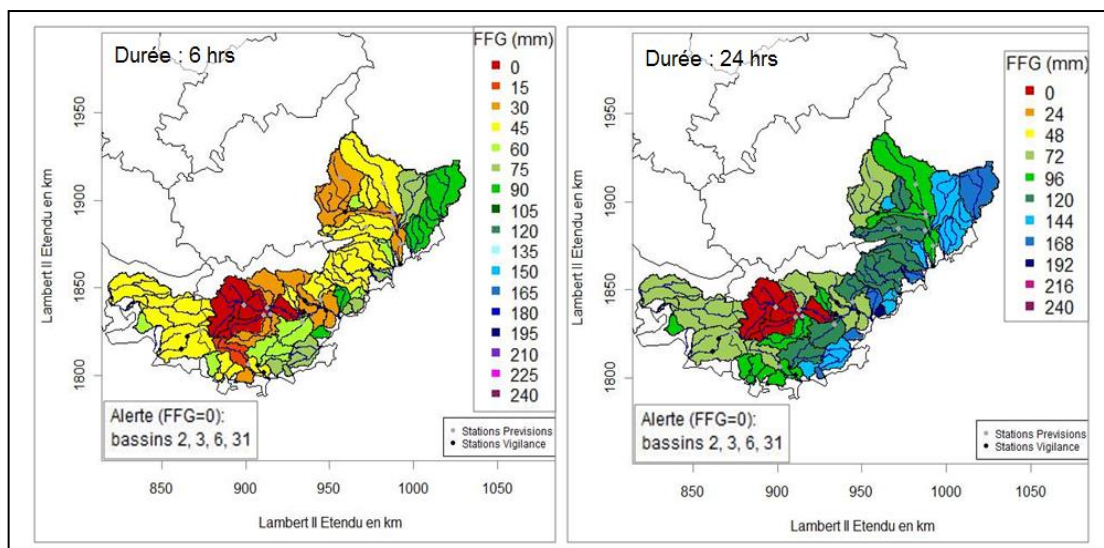


Figure 13 : Cartes des pluies critiques pour les durées de 6h et 24h et le seuil de débit décennal pour la date d'initialisation du 5 novembre 2011- 14TU

Comparaison des pluies critiques pour différentes durées

Pour chaque bassin versant, on peut comparer les pluies critiques pour les différentes durées pour un seuil de débit et une date d'initialisation donnés. Un exemple de graphe de comparaison des pluies critiques est donné en Figure 14 pour le bassin de l'Argens (#3). On représente les valeurs de pluie critique pour les durées de 3h, 6h, 12h et 24h, ainsi que leurs incertitudes d'estimation respectives (15mm pour les durées de 3h, 6h et 12h et 24mm pour la durée de 24h). Sur ce graphe, le prévisionniste peut ajouter une ou des prévisions de pluie pour les différentes échéances et évaluer, par comparaison entre la pluie critique et la pluie prévue, si le bassin présente un risque de dépasser le seuil de débit considéré (des exemples de graphes avec pluie critique et prévisions de pluie sont donnés dans la partie suivante du rapport).

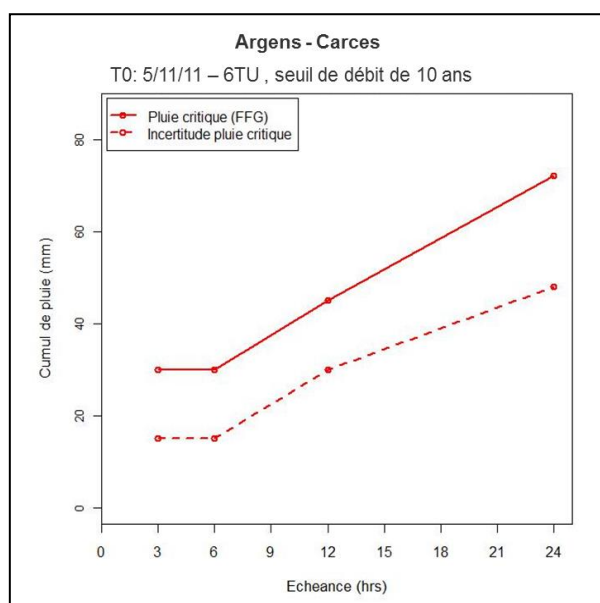


Figure 14 : Graphe de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h à 24h et le seuil de débit décennal pour la date d'initialisation du 5 novembre 2011- 6TU

Evolution temporelle des pluies critiques

L'estimation des pluies critiques toutes les 3 heures et la réactualisation pour les 2 heures suivantes permet de suivre heure par heure l'évolution temporelle des valeurs de pluie critique pour les bassins.

La Figure 15 montre un exemple pour le 5 novembre 2011 pour 4 dates différentes. La pluie critique a été estimée pour les dates du 05/11/2011 à 11TU et 14TU, et réactualisées à 12TU et 13TU, ainsi qu'à 15TU. A noter que la durée associée à la valeur de pluie critique est différente pour les valeurs réactualisées de pluie critique.

Pour cet exemple, le Tableau 2 (qui suit la Figure 15) donne les valeurs de pluie critique pour les bassins identifiés dans l'alerte (FFG=0), et 2 bassins supplémentaires pour lesquels la pluie critique est inférieure ou égale à 15mm. On rappelle que l'incertitude d'estimation de la pluie critique est de 15 mm pour la durée de 3h. Du fait de cette incertitude d'estimation ainsi que des incertitudes sur les valeurs de pluie observée (pluie Antilope pour cet événement), on estime que les valeurs de pluie critique pour les bassins de l'Argens-Roquebrune (#10) et de l'Argens aval (#11) indiquent un dépassement potentiel du seuil de débit décennal pour les 2 derniers pas de temps considérés (le débit simulé pour ces 2 bassins dépassera le seuil à 20TU). Egalement, l'avertissement donné par des valeurs de pluie critique dans la plage $0 < \leq 15\text{mm}$ pour les bassins du Caramy (#2), de l'Argens-Carcès (#3) et de l'Argens-Les Arcs (#6) à 12TU et 13TU est vérifié puisque les débits simulés pour ces bassins dépassent effectivement le seuil de débit décennal à 14TU.

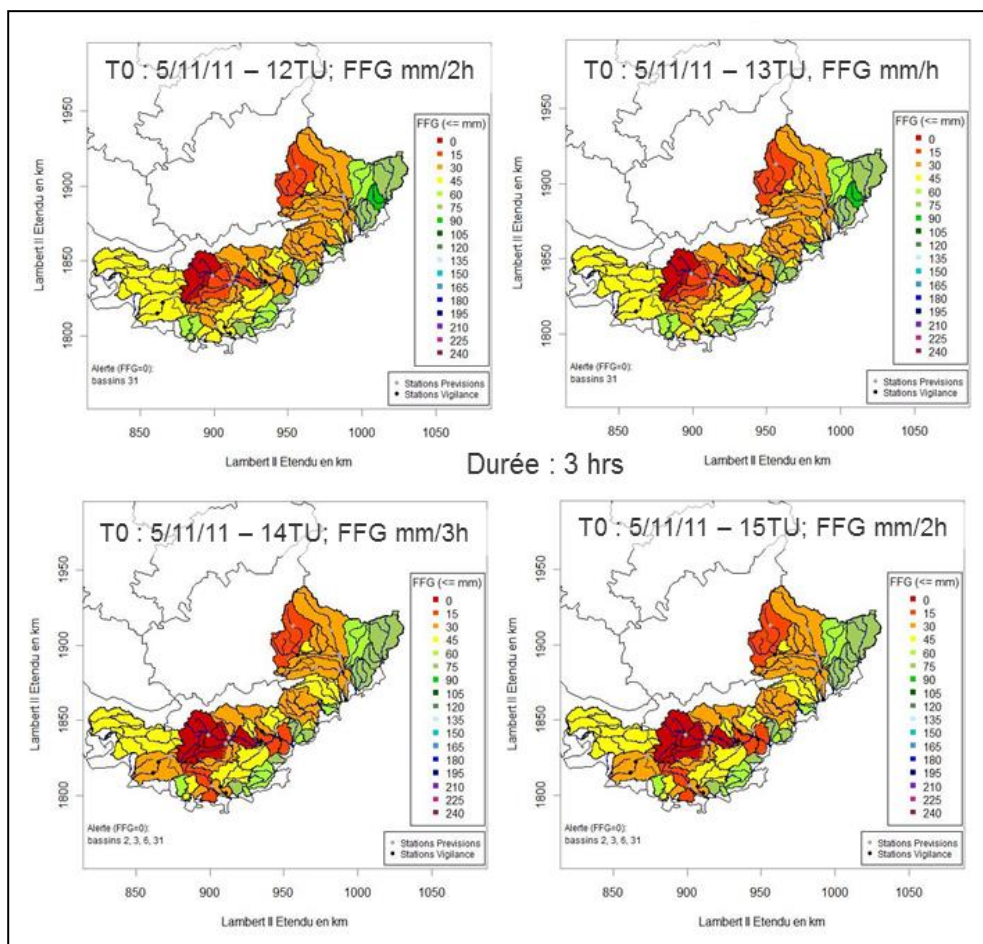


Figure 15 : Evolution du 5 novembre 2011 de 12TU à 15TU des cartes de pluies critiques, avec réactualisation horaire, pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal

ID AIGA	ID SPC	Bassin	05/11-12TU FFG mm/2h (réactualisée)	05/11-13TU FFG mm/h (réactualisée)	05/11-14TU FFG mm/3h (estimée)	05/11-15TU FFG mm/2h (réactualisée)
2	27	Caramy - Vins	14	7	0	0
3	34	Argens - Carcès	13	7	0	0
6	61	Argens - Les Arcs	13	9	0	0
10	82	Argens - Roquebrune	29	26	15	13
11	95	Argens aval	29	26	15	13
31	868	Argens - Châteauvert	0	0	0	0

Tableau 2 : Evolution du 5 novembre 2011 de 12TU à 15TU des valeurs de pluie critique, avec réactualisation horaire, pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal

A noter que, du fait de la réactualisation horaire, la durée relative aux valeurs de pluie critique varie toutes les heures, ce qui peut compliquer l'interprétation de cette information par le prévisionniste. C'est pourquoi nous proposons une estimation horaire des pluies critiques, notamment pour les durées les plus courtes de 3h et 6h, lorsque le risque de crue sur la région considérée semble avéré, pour produire, toutes les heures, des cartes de pluie critique relatives à une même durée. Cette information peut être complétée par l'estimation des pluies critiques pour la durée de 1h, qui permettrait au prévisionniste de croiser cette pluie critique avec les prévisions immédiates de pluie.

b) Comparaison des avertissements des systèmes AIGA et AIGA-FFG

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer si la prise en compte de scénarios simples de pluie future par le système AIGA-FFG permet d'identifier par anticipation les bassins versants susceptibles de dépasser les seuils de débit. Pour évaluer l'apport potentiel de la méthode AIGA-FFG, les informations de pluie critique de bassin doivent donc être croisées avec des prévisions de pluie. Cette prise en compte de prévisions de pluie permet de proposer des avertissements de dépassement de seuil de débit par la méthode AIGA-FFG, qui peuvent alors être comparés aux avertissements produits par le système AIGA actuel. Cette comparaison des avertissements AIGA et AIGA-FFG est donc établie avec les produits suivants :

- des cartes d'alerte AIGA avec une représentation par bassin versant, similaire aux cartes de pluie critique, pour faciliter la comparaison des avertissements ;
- des cartes de différence entre pluie prévue et pluie critique pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure ou proche de la valeur de pluie critique (en prenant en compte l'incertitude d'estimation de la pluie critique).

Deux types de prévisions sont considérés : 1) la pluie observée, correspondant à une prévision parfaite connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, égale à la pluie observée de la dernière heure (avant la date d'initialisation) pour toute la durée considérée.

Cartes d'alerte AIGA par bassin versant

Les cartes d'alerte du système AIGA sont produites avec une représentation par bassin versant, similaire à la présentation des cartes de pluies critiques.

La Figure 16 présente les 2 cartes d'alerte AIGA pour les dates du 5/11/11 à 16TU et 17TU. Les bassins pour lesquels le débit simulé par AIGA dépasse le débit décennal (à cette date) sont identifiés pour permettre de comparer ces alertes AIGA avec les avertissements de dépassement de seuil basés sur l'information de pluie critique.

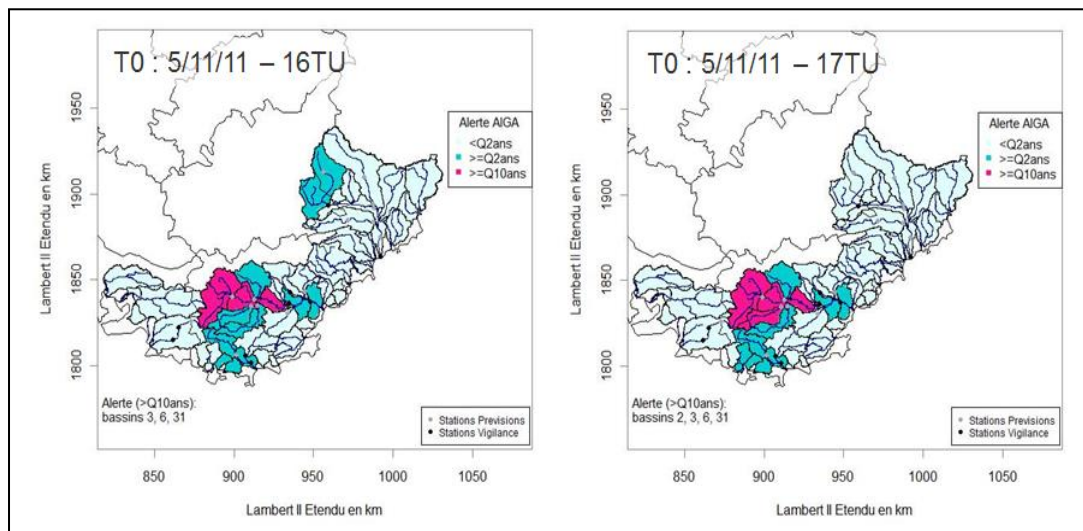


Figure 16 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU

Cartes des différences entre pluie prévue et pluie critique

Pour évaluer l'apport potentiel de l'information de pluie critique en temps réel pour les prévisionnistes qui ont accès à des prévisions de pluie, nous considérons une carte des différences de pluie entre une prévision de pluie et la pluie critique. Cette carte des différences de pluie permet d'identifier les bassins pour lesquels la pluie critique est inférieure ou proche de la pluie attendue, et donc d'identifier les bassins versants susceptibles de dépasser le seuil de débit. Deux types de prévisions de pluie sont considérés pour toute la durée relative à la pluie critique : 1) la pluie observée, comme prévision parfaite connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, correspondant à la pluie observée dans la dernière heure.

Pour comparer les avertissements de la méthode AIGA-FFG, basés sur les cartes de différences de pluie, avec les avertissements AIGA, les différences de pluie (notées $P_{future-FFG}$) sont représentées pour tous les bassins versants pour 4 catégories différentes, en prenant en compte l'incertitude d'estimation des pluies critiques (notée $Incertitude_{ffg}$) :

- catégorie 1 : $P_{future-FFG} < 2 \times Incertitude_{ffg}$ indiquant que la pluie future est bien inférieure à la pluie critique ;
- catégorie 2 : $2 \times Incertitude_{ffg} \leq P_{future-FFG} < Incertitude_{ffg}$ qui indique que la pluie future s'approche de la pluie critique, étant donné l'incertitude d'estimation de la pluie critique, et donc qu'un premier niveau d'avertissement est donné pour suivre les bassins concernés dans les heures à venir ;
- catégorie 3 : $Incertitude_{ffg} \leq P_{future-FFG} < 0$ pour avertir le prévisionniste que la pluie future est dans la zone d'incertitude d'estimation de la pluie critique, ce qui donne un second niveau d'avertissement pour le suivi des bassins concernés ;
- catégorie 4 : $P_{future} \geq FFG$ qui avertit le prévisionniste que la pluie future dépasserait la pluie critique et que le prévisionniste, au vu de la situation et de son expertise, doit décider d'émettre un bulletin d'alerte.

On rappelle que l'incertitude de l'estimation des pluies critiques est définie par le produit : incrémentation x durée. Elle est donc de 15 mm pour les durées de 3h, 6h et 12h, de 24 mm pour la durée de 24h, et de 5mm pour la durée de 1h (cf. Tableau 1).

Avertissements du système AIGA-FFG à partir des cartes de différences de pluie

La carte des différences de pluie peut être simplifiée en ne prenant pas en compte le premier niveau d'avertissement : les catégories 1 et 2 des différences de pluie sont représentées par une seule catégorie sans produire d'avertissement au prévisionniste. Les valeurs de seuil des catégories peuvent être modifiées pour refléter les caractéristiques des événements pluvieux et des incertitudes sur les pluies futures et les pluies critiques. Plus généralement, le choix des valeurs de seuil pour ces cartes, conduisant à la définition des niveaux d'avertissement pour le prévisionniste, doit être fait en coordination entre le SCHAPI et les SPC en fonction de leurs attentes en termes de fausses alertes et d'alertes manquées.

Pour la suite de cette étude, nous choisissons une représentation en 3 catégories pour simplifier la comparaison entre les avertissements d'AIGA-FFG, basés sur les cartes de différences de pluie, et les avertissements d'AIGA :

- catégorie 1 : $P_{future}-FFG < Incertitude_{ffg}$, pas d'avertissement ;
- catégorie 2 : $Incetitude_{ffg} \leq P_{future}-FFG < 0$ pour un avertissement de niveau 1 ;
- catégorie 3 : $P_{future} \geq FFG$ pour un avertissement de niveau 2.

Par ailleurs, pour croiser ces cartes d'avertissement de la méthode AIGA-FFG avec les cartes d'alerte AIGA, nous évaluons également si le débit simulé par AIGA à la date d'initialisation T_0 dépasse déjà le seuil de débit (utilisé lors de l'estimation de pluie critique). Ces bassins, qui dépassent le seuil de débit à T_0 (sans considérer de scénario de pluie future), sont ajoutés aux bassins donnant un avertissement de niveau 2 (i.e. bassins dépassant le seuil de débit avec une pluie future égale à la pluie critique) pour donner au prévisionniste un avertissement du risque hydrologique depuis la date d'initialisation T_0 jusqu'à $T_0+durée$.

Pour cette étude, les cartes de différences de pluie sont produites pour 2 types de prévisions de pluie : la pluie observée et la pluie persistante de la dernière heure avant l'initialisation. Pour une application de cette approche en temps réel, le prévisionniste doit définir la prévision de pluie, ou les scénarios de pluie future, qu'il souhaite croiser avec l'information de pluie critique.

Cartes des différences de pluie et avertissements avec la prévision de pluie parfaite

Pour se placer dans le cas le plus favorable, on considère la pluie observée (lame d'eau Panthère ou Antilope) comme la pluie future parfaite, connue *a posteriori*. Une telle analyse permet de montrer l'anticipation potentielle maximale que le système AIGA-FFG permettrait d'obtenir, en comparaison du système AIGA qui ne prend pas en compte de pluie future. Cette évaluation est donc indicative de l'anticipation d'alerte qu'un prévisionniste pourrait obtenir dans le cas où les pluies futures seraient parfaitement connues et où le modèle pluie-débit du système AIGA produirait des débits parfaits (i.e. les dépassements de seuil de débit simulés correspondent à des dépassements de seuil observés).

La Figure 17 montre les cartes de différences entre pluie observée (i.e. prévision parfaite connue *a posteriori*) et pluie critique pour la durée de 3h pour le 5/11/11 à 16TU et 17TU (dates utilisées pour les cartes de la Figure 16). Les cartes sont produites avec 3 plages de couleurs pour produire les 2 niveaux d'avertissement proposés :

- avertissement de niveau 1 lorsque la pluie prévue est suffisamment large pour être dans la plage d'incertitude de la pluie critique ;
- avertissement de niveau 2 lorsque la pluie prévue dépasse la pluie critique et/ou le débit du bassin à T0 dépasse déjà le seuil de débit.

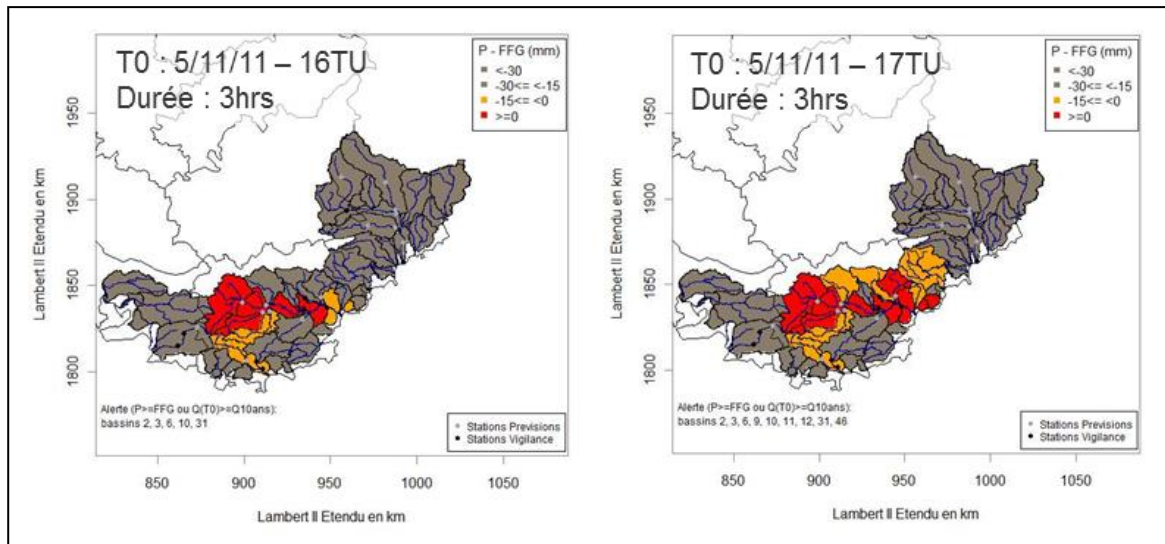


Figure 17 : Cartes des différences entre prévision de pluie parfaite et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU

Lorsque l'on compare ces cartes de différences de pluie (Figure 17) avec les cartes d'alerte AIGA (Figure 16), on peut noter qu'un plus grand nombre de bassins ont été identifiés comme susceptibles de dépasser le seuil de débit décennal dans les 3 heures à venir avec les 2 niveaux d'avertissement choisis pour cette étude. L'analyse de la pertinence de ces avertissements doit prendre en compte les cartes d'alerte AIGA pour les 3 prochaines heures suivant la date d'initialisation T0. Cette analyse sera faite dans la prochaine partie de cette étude.

Cartes des différences de pluie et avertissements avec la prévision de pluie persistante

Pour utiliser une prévision de pluie pouvant être connue en temps réel, nous utilisons la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation. Cette pluie future persistante, d'intensité constante pour toute la durée de la pluie critique, peut correspondre à un scénario de prévision réaliste pour les durées courtes et pour certaines conditions météorologiques sur la zone du SPC Med-Est. Elle permet ici de démontrer l'apport potentiel de la méthode AIGA-FFG par croisement avec une prévision de pluie, qui, pour un système d'avertissement en temps réel, devra être choisie par le prévisionniste.

La Figure 18 montre les cartes de différences de pluie pour la durée de 3h pour le 5/11/11 à 16TU et 17TU (dates utilisées pour les cartes des Figures 16 et 17).

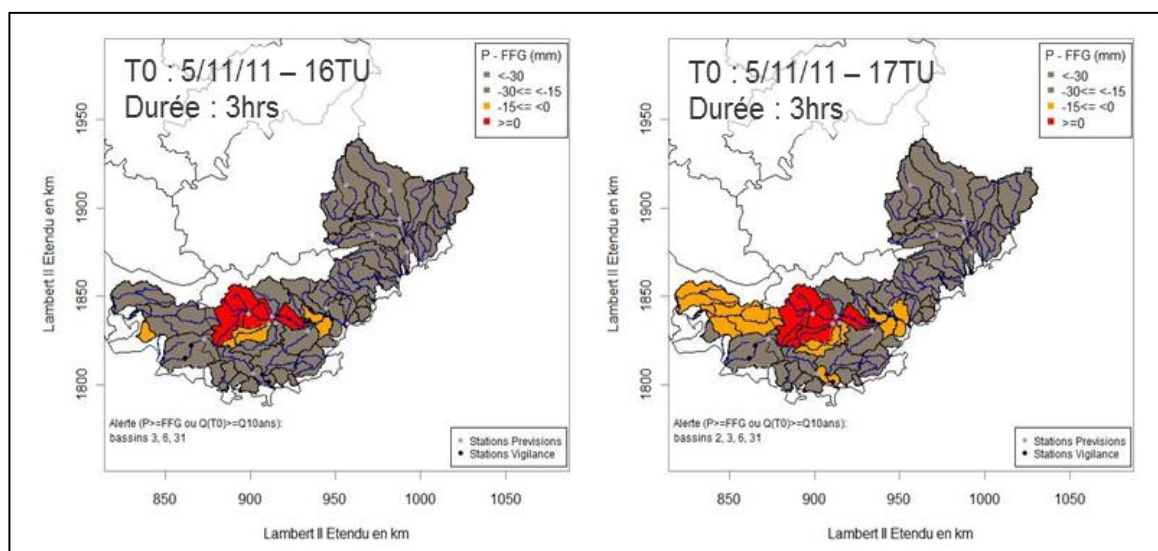


Figure 18 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU

Lorsque l'on compare ces cartes de différences entre pluie persistante et pluie critique (Figure 18) avec les cartes de différences entre pluie future parfaite et pluie critique (Figure 17), on peut noter que peu de bassins sont identifiés avec la pluie persistante pour le risque de niveau 2. En effet, pour cette date, le cumul de pluie persistante est généralement inférieur au cumul de la pluie observée ; par conséquent, moins de bassins sont identifiés avec cette pluie persistante pour le risque de niveau 2. Pour le risque de niveau 1, les bassins identifiés sont localisés plus à l'Est, sur les bassins de l'Arc et de la Touloubre.

Les différents produits d'analyse des pluies critiques et des avertissements des systèmes AIGA et AIGA-FFG sont utilisés pour l'évaluation de l'apport potentiel de l'information de pluie critique pour les 3 événements de juin 2010, octobre 2011 et novembre 2011. Cette évaluation ne concerne que les avertissements donnés à partir des débits simulés par le modèle pluie-débit du système AIGA, pour démontrer si les pluies critiques permettent potentiellement de mieux anticiper les risques hydrologiques. Ainsi, l'évaluation de l'apport du système AIGA-FFG ne porte pas sur la qualité des alertes AIGA et des alertes AIGA-FFG par comparaison avec les débits observés ; la performance du système d'AIGA est l'objet d'autres articles et études (ex. Javelle et al. 2012, Maire 2012, Organde 2012, et Ronsoux Fouchier 2012).

Résumé des produits d'analyse de l'information de pluie critique

L'analyse de l'information de pluie critique est proposée à partir des produits suivants :

- les cartes des pluies critiques pour tous les bassins versants, pour une durée et un seuil de débit donnés, qui peuvent être produites toutes les heures, afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit ;
- les hydrogrammes de crues simulés par AIGA correspondant à la pluie critique pour chaque bassin versant et pour une durée et un seuil de débit donnés, pour visualiser l'hydrogramme simulé avec le scénario de pluie critique ;
- les graphes de comparaison des pluies critiques pour les différentes durées pour chaque bassin versant et pour un seuil de débit donné, afin d'aider le prévisionniste à croiser l'information de pluie critique avec les prévisions de pluie ;
- le tableau des pluies critiques pour tous les bassins versants, pour une durée et un seuil de débit donnés pour les dates d'initialisation récentes, afin d'analyser l'évolution des pluies critiques dans le temps ;
- les cartes de différence entre prévision de pluie (que le prévisionniste devra choisir) et pluie critique pour tous les bassins versants, pour une durée et un seuil de débit donnés pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure ou proche de la valeur de pluie critique (en prenant en compte l'incertitude d'estimation de la 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 de la méthode AIGA-FFG.

Il faut noter que la qualité des estimations de pluie critique et des produits dérivés dépend de la qualité du modèle hydrologique et des données d'observation utilisées pour l'initialisation du modèle.

Concernant les avertissements du système AIGA-FFG, 2 exemples de prévisions de pluie sont utilisés dans cette étude : 1) la pluie observée correspondant à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation et constante pour toute la durée de la pluie critique.

Les avertissements du système AIGA-FFG pour une prévision de pluie donnée (notée P_{future}) sont donnés par les 2 niveaux suivants:

- avertissement de niveau 1 : $Incertitude_{ffg} \leq P_{future-FFG} < 0$;
- avertissement de niveau 2 : $P_{future} \geq FFG$ et/ou le débit simulé par AIGA à la date d'initialisation T_0 dépasse le seuil de débit.

5. Evaluation de l'apport des pluies critiques

L'évaluation du système d'AIGA-FFG est basée sur les estimations des pluies critiques pour les différentes durées et leur comparaison avec les 2 prévisions de pluie. Le croisement des pluies critiques avec les 2 types de prévision permet de produire des avertissements au prévisionniste lorsque la prévision est suffisamment proche de la pluie critique pour dépasser l'incertitude d'estimation de pluie critique (pour un avertissement de niveau 1), ou lorsque la prévision dépasse la pluie critique (pour un avertissement de niveau 2). En temps réel, c'est au prévisionniste de choisir la ou les prévisions de pluie qu'il veut croiser avec les pluies critiques pour évaluer le risque hydrologique.

Les avertissements du système AIGA-FFG, déduits de chacune des 2 prévisions de pluie, sont comparés avec les alertes données par le système AIGA, sans considérer de pluie future. Pour les différents bassins, l'alerte potentielle pour chacune des deux prévisions est évaluée. Nous rappelons que cette évaluation ne concerne que les débits simulés par AIGA (et non pas la comparaison avec les débits observés) pour juger de l'apport de l'information de pluie critique pour le prévisionniste. C'est pourquoi nous utilisons le terme d'anticipation *potentielle* car il ne s'agit pas d'une anticipation de l'alerte par comparaison avec un dépassement de seuil de débit observé.

L'analyse présentée dans cette étude est basée sur :

- les cartes de pluie critique pour une première évaluation des bassins les plus sensibles au risque hydrologique,
- les cartes de différences de pluie pour les 2 prévisions considérées, qui permettent de visualiser les avertissements du système AIGA-FFG,
- les graphes de comparaison des cumuls de prévisions de pluie avec les pluies critiques pour une analyse plus détaillée de l'anticipation potentielle du système AIGA-FFG,
- et les cartes d'alerte AIGA, pour visualiser les avertissements du système AIGA à comparer avec les avertissements du système AIGA-FFG.

Les estimations de pluie critique et les différents produits de l'analyse sont initialement dérivés toutes les 3 heures, puis toutes les heures lorsque le risque de dépassement de seuil est avéré. Seuls quelques exemples de produits sont inclus dans ce rapport pour illustrer l'apport potentiel de l'information de pluie critique dans différentes situations.

a) Evènement de novembre 2011

Pour cet évènement, nous considérons le seuil de dépassement du débit décennal, qui concerne un grand nombre des 46 bassins étudiés. Le premier dépassement a lieu le 5 novembre 2011 à 2TU avec le bassin du Var à Entrevaux.

Cartes de pluie critique et cartes d'alerte du système AIGA

Les cartes de pluie critique sont présentées en Figure 19 pour les durées de 3h, 6h et 24h dans la journée précédant le premier dépassement de seuil, et pour les dates d'initialisation définies toutes les 6 heures. Ces cartes permettent d'identifier les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil.

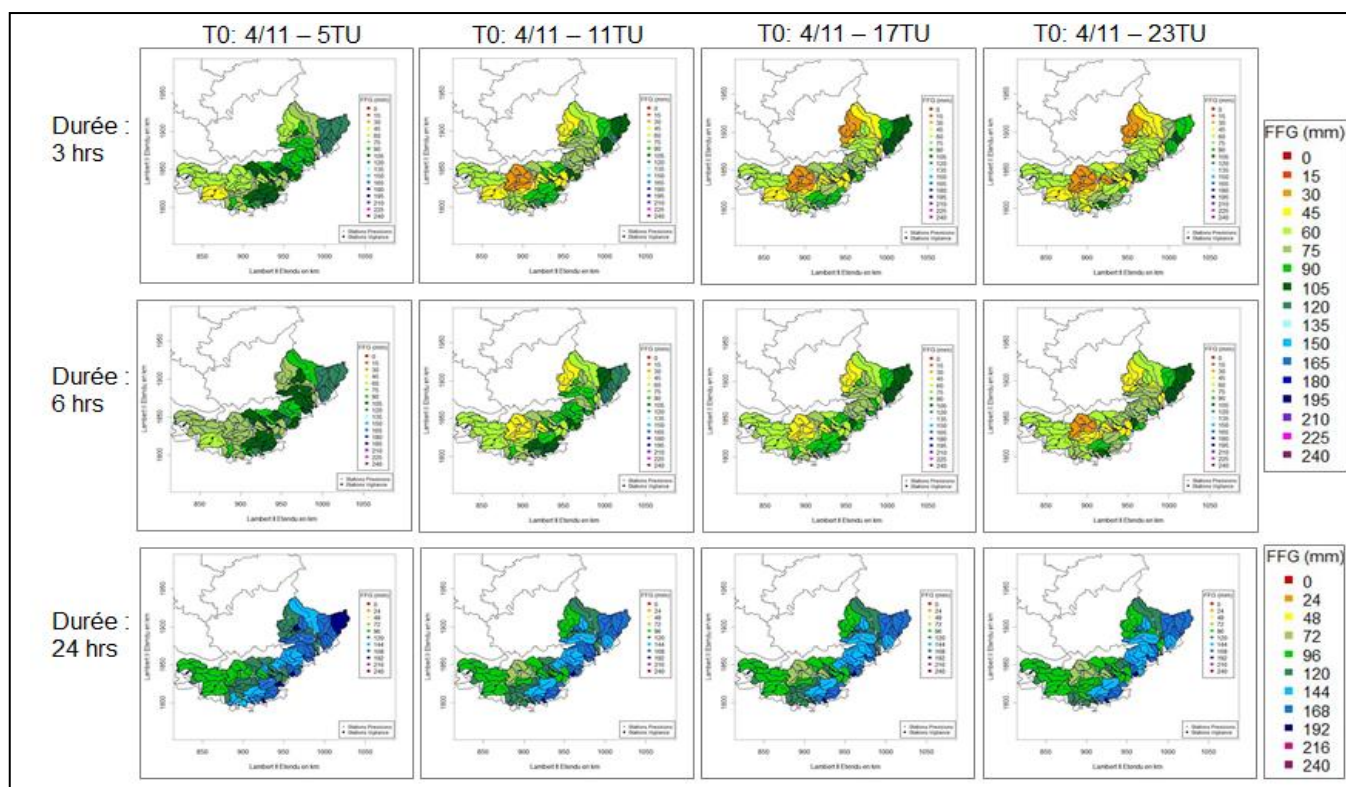


Figure 19 : Cartes de pluies critiques pour les durées de 3h, 6h et 24h pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 4 novembre 2011 de 5TU à 23TU

Pour le 4 novembre à 5TU, le bassin identifié comme le plus sensible pour les durées de 3h et 6h est le bassin de l'Huveaune-Aubagne (#24) : la pluie critique pour la durée de 3h est de 45mm. Les autres bassins identifiés comme les plus sensibles sont situés dans la zone Sud-Est, notamment sur les bassins de l'Argens, ainsi que le bassin de Var-Entrevaux (#20) : la pluie critique pour la durée de 3h est de 60mm.

Pour les autres dates d'initialisation, le risque hydrologique augmente pour les bassins amont de l'Argens (bassins du Caramy (#2), de l'Argens-Châteauvert Carcès (#3), de l'Argens-Châteauvert (#31), et de l'Argens-Carcès Les Arcs (#6)), ainsi que pour le bassin de Var-Entrevaux (#20). C'est le bassin de Var-Entrevaux qui dépasse le seuil le premier le 5 novembre à 2TU ; les bassins amont de l'Argens ne commenceront à dépasser le seuil qu'après 11TU (cf. les cartes d'alerte AIGA en Figures 21 et 22).

Pour le 5 novembre, la Figure 20 permet de comparer les estimations de pluie critique pour la durée de 3h de 5TU à 7TU. Les alertes AIGA correspondant aux heures suivantes sont présentées en Figure 21. A 5TU, les estimations de pluie critique donnent un risque plus élevé pour les bassins de l'Argens (pluie critique de 15 à 30 mm/3h) que pour les bassins de la Siagne (#15 et 38) (pluie critique de 45mm/3h). A 6TU, le risque hydrologique pour le bassin amont de la Siagne (#15) augmente avec une pluie critique de 30mm/3h. Cependant, ce sont d'abord les 2 bassins de la Siagne qui dépassent le débit décennal à 7TU, avant les bassins amont de l'Argens, qui ne dépassent le seuil qu'après 11TU (cf. les cartes d'alerte AIGA en Figures 21 et 22).

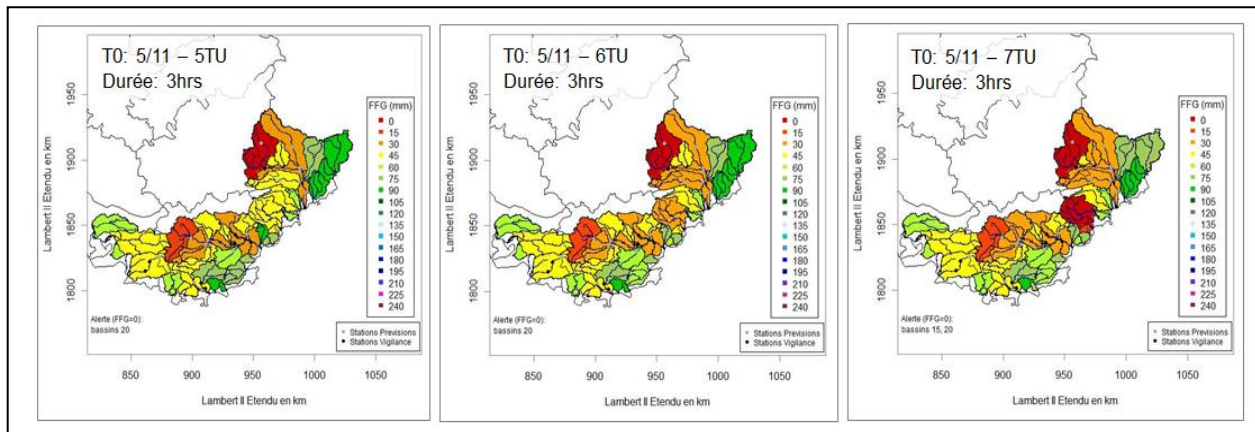


Figure 20 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 5TU à 7TU

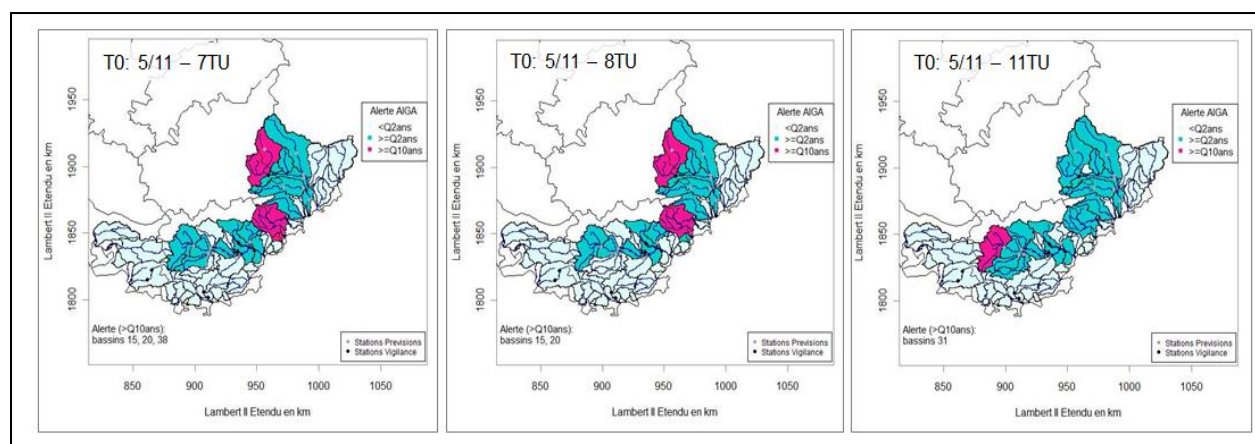


Figure 21 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 7TU à 11TU

On observe donc que, pour ce début d'évènement, l'information de pluie critique a permis d'identifier le risque de dépassement du débit décennal pour les bassins de l'Argens avec une anticipation potentielle supérieure aux bassins du Var et de la Siagne.

Cartes d'avertissement du système AIGA-FFG et cartes d'alerte du système AIGA

Une analyse basée sur les cartes d'avertissement du système AIGA-FFG avec les 2 prévisions de pluie est présentée pour la suite de l'évènement, à partir du 5 novembre 2011 à 11TU.

La Figure 22 présente les cartes d'alerte AIGA pour les dates du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU. Ces alertes du système AIGA sont à comparer avec les alertes du système AIGA-FFG pour les 2 prévisions considérées : 1) la prévision parfaite de pluie correspondant à la pluie observée, dont les avertissements sont donnés en Figure 23; 2) la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation et constante pour toute la durée de la pluie critique, pour laquelle la Figure 24 donne les avertissements.

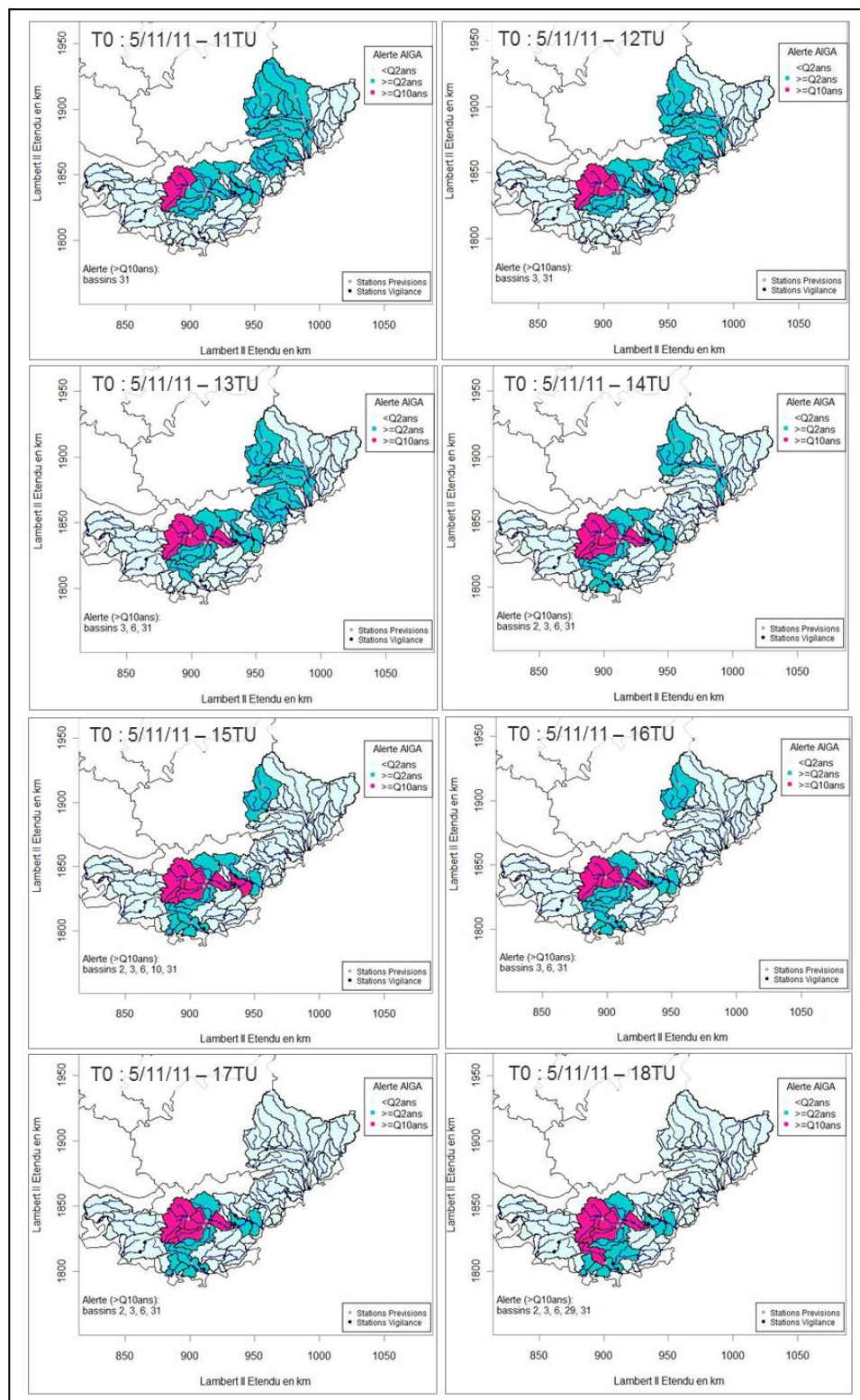


Figure 22 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU

Les Figures 23 et 24 présentent les cartes d'avertissement du système AIGA-FFG du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU avec la prévision parfaite de pluie et la prévision de pluie persistante, pour permettre de comparer ces avertissements aux avertissements du système AIGA présentés en Figure 22.

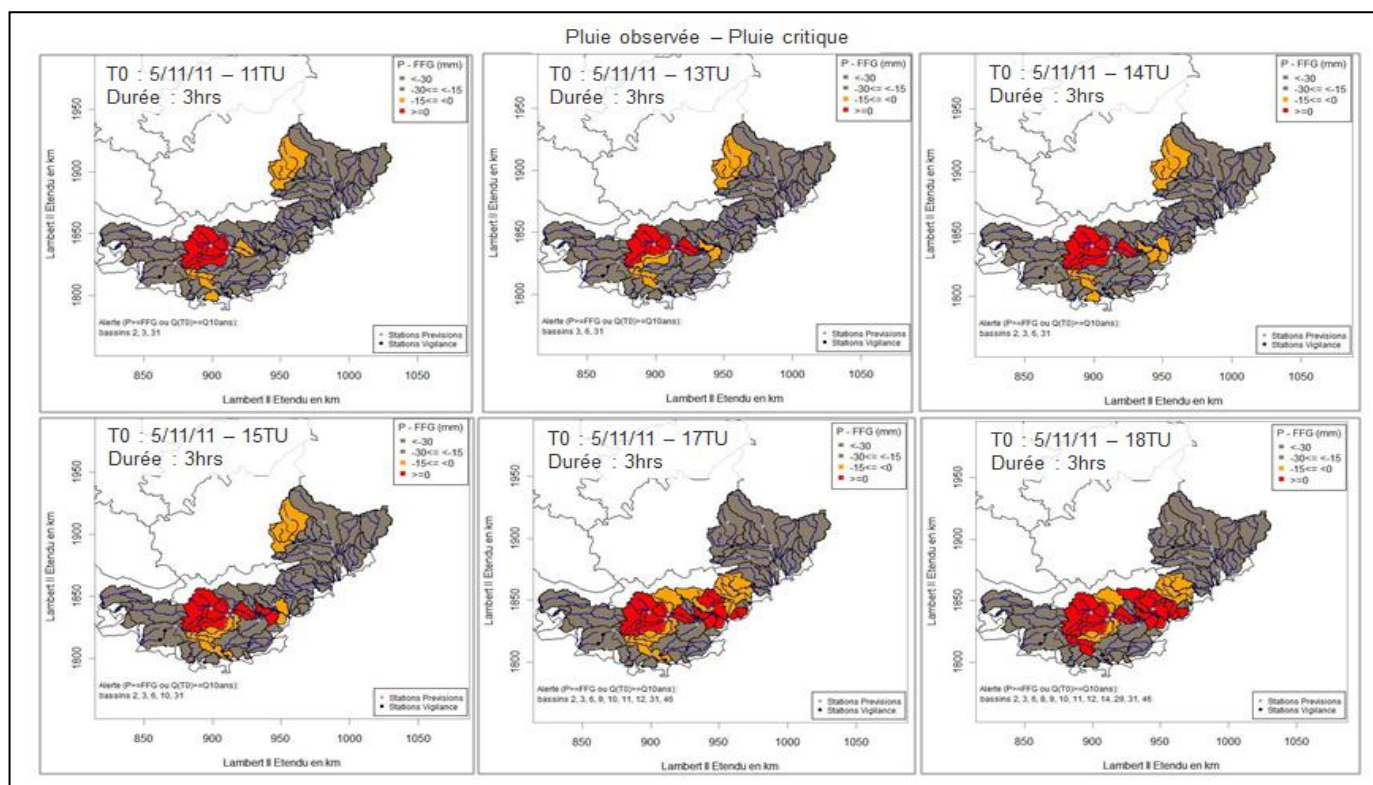


Figure 23 : Cartes des différences entre prévision parfaite de pluie et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU

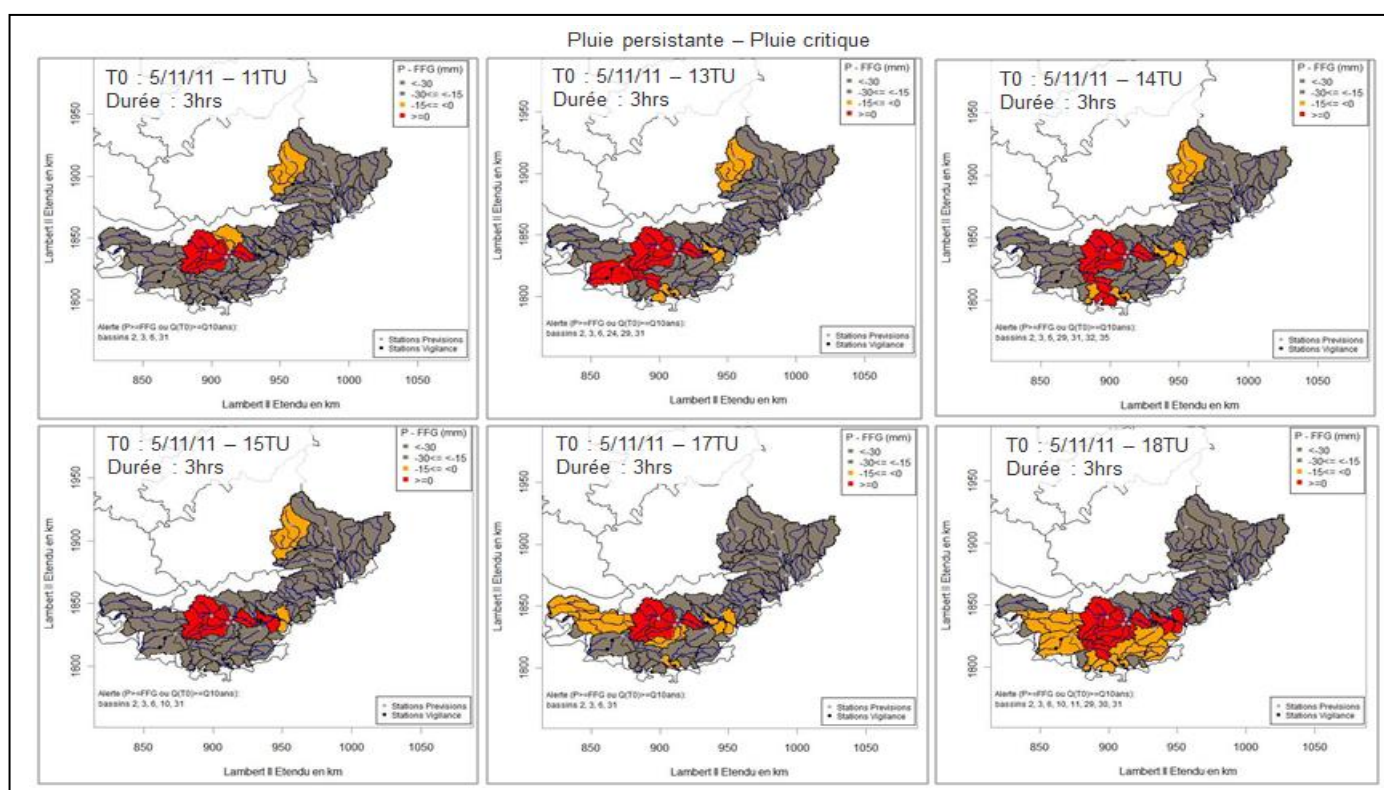


Figure 24 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU

Le Tableau 3 résume les bassins mis en alerte avec le système AIGA et les bassins pour lesquels un avertissement de niveau 2 est donné avec le système AIGA-FFG pour la pluie critique de durée 3h avec chacune des 2 prévisions. Les caractéristiques des bassins sont données en Appendice A ; on rappelle les noms des principaux cours d'eau. Les avertissements du système AIGA-FFG concernent les 3 heures à venir puisqu'ils sont déduits uniquement de la pluie critique de la durée de 3h. Concernant la qualité des avertissements, on note : 1) en gras, les bassins avec anticipation potentielle (pour le premier T0 de leur mise en alerte) ; 2) en italique souligné, les bassins avec fausse alerte ; et 3) en souligné, les bassins sans anticipation avec l'avertissement de niveau 2 (mais pour lesquels un avertissement de niveau 1 a pu être donné).

Heure T0 du 5/11/2011	Bassins en alerte pour AIGA	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision parfaite de pluie	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision de pluie persistante
11TU	31 (Argens)	2, 3, 31	2, 3, 6, 31
12TU	3 (Argens), 31	2, 3, 31	3, 31
13TU	3, 6 (Argens), 31	3, <u>6</u> , 31	2, 3, 6, <u>24 (Huveaune)</u> , 29 , 31
14TU	2 (Caramy), 3, 6, 31	2, 3, 6, 31	2, 3, 6, 29, 31, <u>32 (Eygoutier)</u> , <u>35 (Reppe)</u>
15TU	2, 3, 6, 10 (Argens), 31	2, 3, 6, <u>10</u> , 31	2, 3, 6, <u>10</u> , 31
16TU	3, 6, 31	2, 3, 6, 10, 31	3, 6, 31
17TU	2, 3, 6, 31	2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 31, 46	2, 3, 6, 31
18TU	2, 3, 6, 29 (Gapeau), 31	2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 29, 31, 46	2, 3, 6, 10, 11, 29, 30, 31
19TU	2, 3, 6, 10, 11 (Argens), 29, 30 (Caramy), 31	-	-
20TU	2, 3, 6, 8 (Nartuby), 9 (Argens), 10, 11, 12 (Argens), 14 (Argens), 30, 31, 46 (Argens)	-	-
21TU	2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 31, 46	-	-

Tableau 3 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit décennal et les dates du 5 novembre 2011 de 11TU à 21TU

Pour 11TU, la prévision parfaite de pluie donne un avertissement de niveau 2 pour les bassins du Caramy (#2) et de l'Argens-Carcès (#3), qui dépassent le seuil de débit décennal à 14TU et 12TU respectivement ; donc l'anticipation potentielle est de 3 heures et d'1 heure pour ces 2 bassins avec la prévision parfaite de pluie. La prévision de pluie persistante donne également un avertissement de niveau 2 pour le bassin de l'Argens-Carcès Les Arcs (#6) avec une anticipation potentielle de 2 heures.

A 13TU, le bassin de l'Argens-Carcès Les Arcs (#6) dépasse le seuil de débit décennal, alors qu'aucun avertissement de niveau 2 n'a été donné avec la prévision parfaite de pluie ; donc le bassin est noté comme une alerte manquée. Cependant, dès 11TU, un avertissement de niveau 1 avait été donné pour ce bassin (cf. carte en Figure 23). Cet exemple illustre la nécessité de

prendre en compte l'incertitude d'estimation des valeurs de pluie critique et les avertissements de niveau 1, au risque sinon d'avoir de nombreuses alertes manquées.

Egalement, à 13TU, la prévision de pluie persistante donne un avertissement de niveau 2 pour le bassin de l'Huveaune (#24), alors que celui-ci ne va pas dépasser le seuil de débit décennal dans les 3 heures à venir (ni dans les heures suivantes). Il s'agit donc d'une fausse alerte pour ce bassin avec la prévision de pluie persistante.

Le tableau montre que la prévision parfaite de pluie a donné des avertissements de niveau 2 avec anticipation pour tous les bassins à l'exception de 3 bassins (#6, 10, 29), pour lesquels un avertissement de niveau 1 avait été donné (cf. Figures 27 et 28 pour une analyse plus détaillée de l'anticipation potentielle des bassins #10 et 29). En effet, il est attendu que la pluie observée, utilisée pour les cartes d'alerte AIGA, permette d'identifier par anticipation tous les bassins dépassant le seuil de débit. Cependant, l'incertitude d'estimation des pluies critiques nécessite de prendre en compte les 2 niveaux d'avertissement. Il faut noter que tous les bassins avec un avertissement de niveau 1 ne dépasseront pas nécessairement le seuil de débit.

La prévision de pluie persistante a donné des avertissements de niveau 2 avec anticipation pour une majorité de bassins. Un avertissement de niveau 1 avait aussi été donné pour le bassin #10 (cf. Figure 27). Par contre, la prévision a également donné 3 fausses alertes. En effet, les avertissements du système AIGA-FFG permettent de mieux anticiper le risque hydrologique grâce à la prise en compte d'une prévision simple de pluie mais la qualité de ces avertissements va dépendre de la qualité de la prévision de pluie.

Graphes de comparaison des pluies critiques et des cumuls de prévision de pluie

Pour analyser plus en détail les anticipations potentielles du système AIGA-FFG en utilisant les 2 prévisions de pluie, les Figures 27 à 31 présentent les graphes de comparaison des pluies critiques pour les durées de 1h, 3h et 6h avec les cumuls des prévisions de pluie pour quelques bassins identifiés dans les cartes d'alerte AIGA. On rappelle que le système AIGA-FFG donne un avertissement de niveau 1 lorsque la prévision de pluie dépasse l'incertitude d'estimation de la pluie critique et un avertissement de niveau 2 lorsque la prévision de pluie dépasse la valeur de pluie critique. L'analyse ci-dessous montre que le prévisionniste n'a pas toujours accès à un avertissement de niveau 2 en anticipation de l'évènement, mais peut bénéficier d'un avertissement de niveau 1, avec une anticipation qui varie en fonction du bassin.

Le bassin de l'Argens-Carcès (#3) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 12TU (pour le débit de simulation, l'analyse ne concernant que les débits simulés par AIGA).

Avec la prévision de pluie parfaite (pluie observée), on constate qu'à 8TU, cette prévision dépasse l'incertitude de pluie critique pour la durée de 3h pour 11TU. Ce signal donne un premier avertissement de niveau 1 au prévisionniste. La prévision dépasse la pluie critique pour la durée de 6h pour 14TU (il faut noter que la pluie observée ne dépasse pas les valeurs de pluie critique pour les durées de 1h et 3h avant le dépassement de seuil à 12TU).

L'anticipation potentielle du dépassement du seuil de débit est d'environ 4 heures avec ces avertissements de niveaux 1 et 2.

Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 10TU que cette prévision dépasse la pluie critique pour la durée d'1h pour 11TU ; le dépassement de la pluie critique pour la durée de 3h est constaté pour 12TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 2 heures avec cet avertissement de niveau 2.

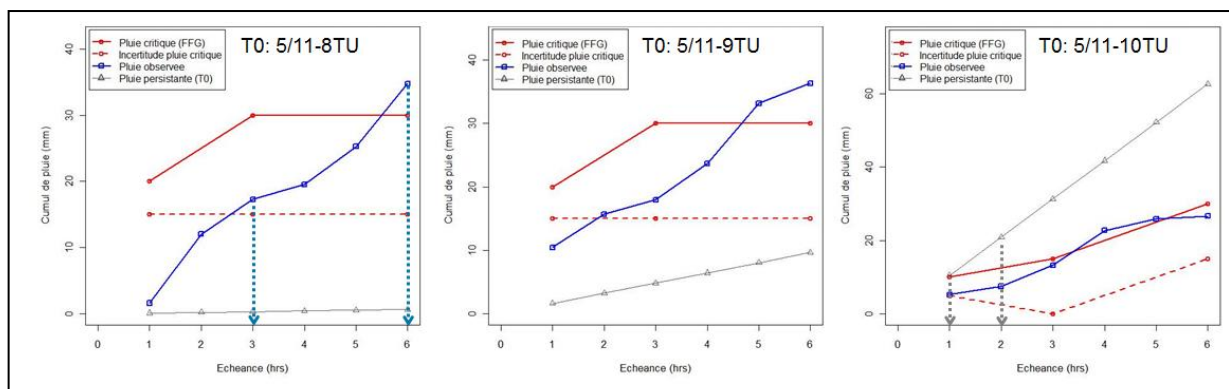


Figure 25 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 10TU pour le bassin de l'Argens – Carcès (#3)

Le bassin du Caramy (#2) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 14TU.

La prévision de pluie parfaite (pluie observée) dépasse à 8TU l'incertitude de pluie critique pour la durée de 3h pour 11TU. Ce premier avertissement de niveau 1 donne au prévisionniste une anticipation potentielle d'environ 6 heures. L'avertissement de niveau 2 est donné à 11TU, lorsque la prévision dépasse la pluie critique pour la durée de 3h pour 14 TU ; l'anticipation potentielle est donc d'environ 3 heures pour l'avertissement de niveau 2. Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 10TU que cette prévision dépasse l'incertitude de la pluie critique pour la durée d'1h pour 11TU et dépasse la pluie critique pour la durée de 3h pour 13TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 4 heures avec ces avertissements de niveaux 1 et 2.

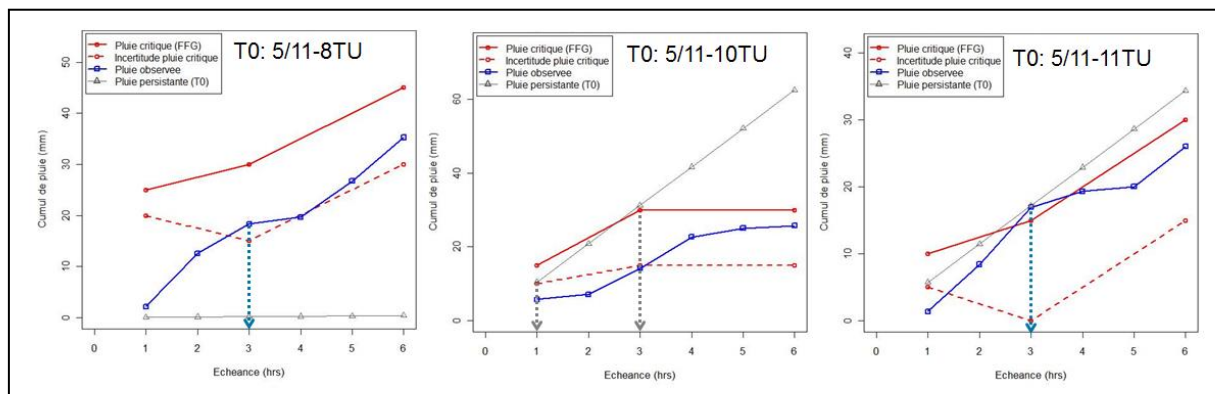


Figure 26 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 11TU pour le bassin du Caramy (#2)

Le bassin de l'Argens-Les Arcs Roquebrune (#10) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 15TU.

Pour la prévision de pluie parfaite (pluie observée), c'est à 8TU qu'elle dépasse l'incertitude de pluie critique pour la durée de 6h à partir de 12TU. A 10TU, la prévision approche tout juste la valeur d'incertitude de la pluie critique pour la durée de 6h pour 15TU. C'est à 13TU que la prévision dépasse les incertitudes de pluie critique pour les durées de 1h à 6h pour un dépassement de seuil à partir de 14TU. Mais jusqu'à 15TU, la pluie observée ne dépassera pas les valeurs de pluie critique. Pour ce bassin, le prévisionniste n'a qu'un avertissement de niveau 1, avec une anticipation d'environ 7 heures.

Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 10TU que cette prévision dépasse l'incertitude de la pluie critique pour la durée de 3h pour 12TU et dépasse la pluie critique pour la durée

de 6h pour 14TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 5 heures avec ces avertissements de niveaux 1 et 2.

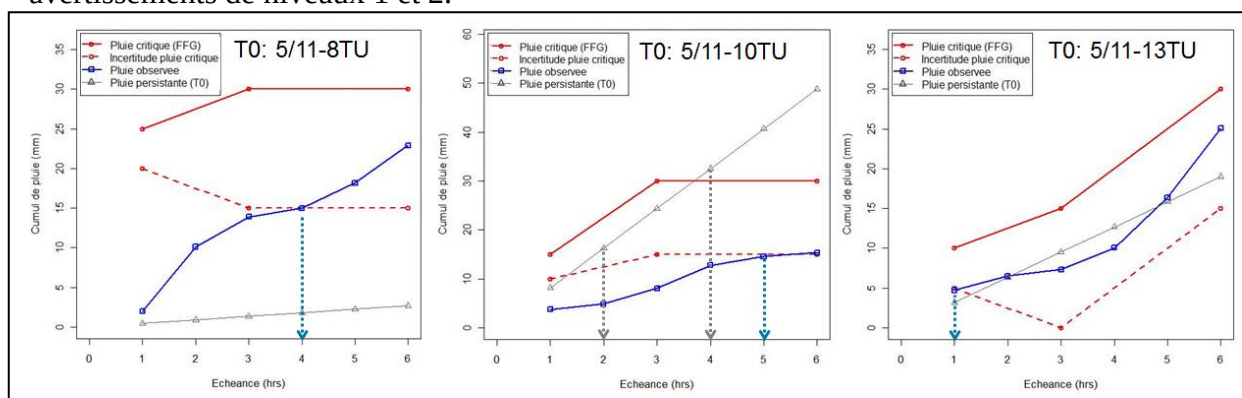


Figure 27 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 13TU pour le bassin de l'Argens-Les Arcs Roquebrune (#10)

Le bassin du Gapeau-Soliès (#29) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 18TU.

La prévision de pluie parfaite (pluie observée) dépasse à 8TU l'incertitude de pluie critique pour la durée de 6h pour 14TU. A 10TU, ce premier avertissement est confirmé lorsque la prévision dépasse l'incertitude de pluie critique pour la durée de 3h à partir de 13TU. Avec ce premier avertissement de niveau 1, l'anticipation potentielle est d'environ 10 heures. C'est à 14TU (figure non incluse) que la prévision dépasse la valeur de pluie critique pour la durée de 6h à partir de 18TU. L'anticipation potentielle est d'environ 4 heures pour l'avertissement de niveau 2.

Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 13TU que cette prévision dépasse l'incertitude de la pluie critique pour la durée de 3h pour 15TU et dépasse la pluie critique pour la durée de 3h pour 16TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 5 heures avec ces avertissements de niveaux 1 et 2.

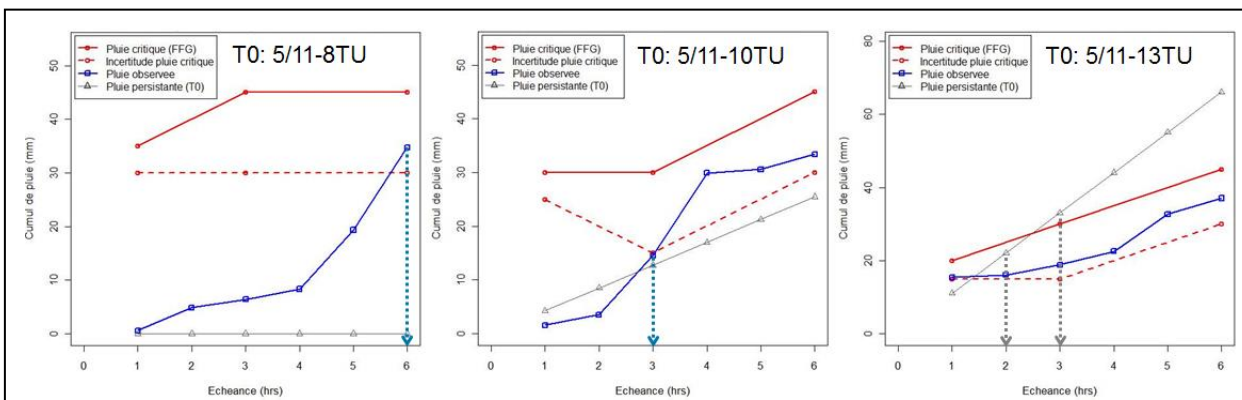


Figure 28 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 13TU pour le bassin du Gapeau-Soliès (#29)

Le bassin de l'Argens-Reyran (#14) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 20TU.

Pour la prévision de pluie parfaite (pluie observée), on constate qu'à 15TU, elle dépasse l'incertitude de pluie critique pour la durée de 6h pour 20TU. A 17TU, la prévision est égale à la pluie critique pour la durée de 3h pour 20TU. Avec l'avertissement de niveau 1, l'anticipation potentielle est d'environ 5 heures et avec l'avertissement de niveau 2, environ 3 heures.

Pour la prévision de pluie persistante, ce n'est seulement qu'à 19TU que cette prévision dépasse la pluie critique pour la durée d'1h pour 20TU, ce qui permet une anticipation d'environ 1 heure.

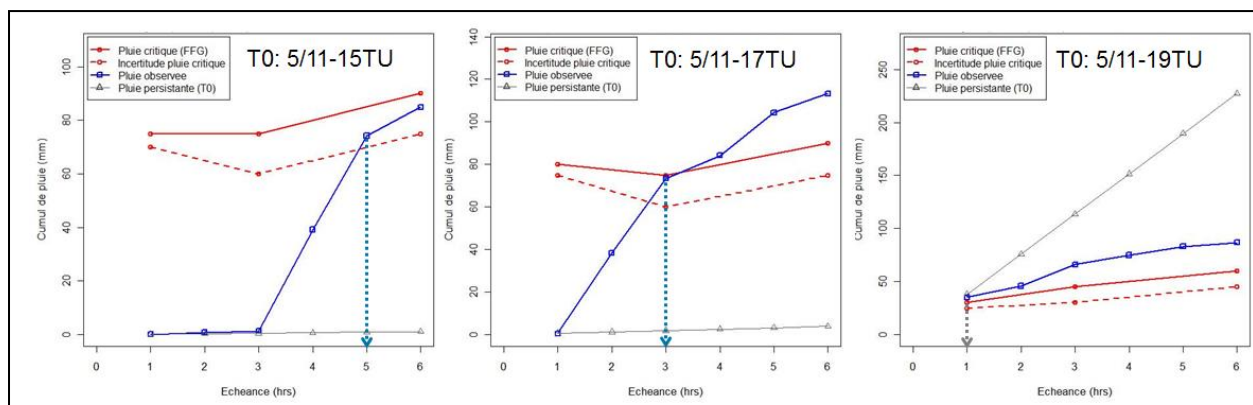


Figure 29 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 15TU à 19TU pour le bassin de l'Argens-Reyran (#14)

Le bassin de la Siagne (#15) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 23TU.

La prévision de pluie parfaite (pluie observée) dépasse à 17TU l'incertitude de pluie critique pour la durée de 3h pour 20TU. A 19TU, la prévision dépasse la pluie critique pour la durée de 6h pour 23TU. L'anticipation potentielle est d'environ 6 heures avec l'avertissement de niveau 1 et d'environ 4 heures avec l'avertissement de niveau 2.

Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 19TU que cette prévision dépasse l'incertitude de la pluie critique pour la durée de 3h pour 22TU ; à 20TU, elle dépasse la pluie critique pour la durée de 1h pour 21TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 4 heures avec l'avertissement de niveau 1 et d'environ 3 heures avec l'avertissement de niveau 2.

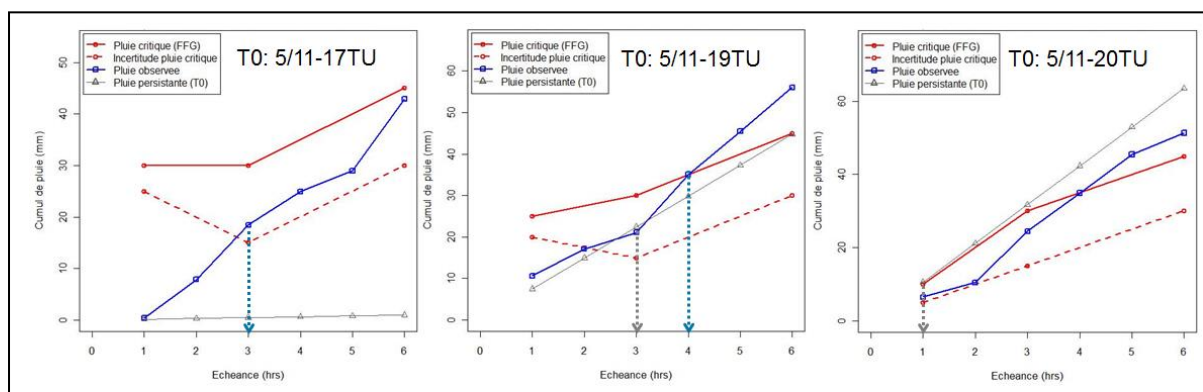


Figure 30 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 17TU à 20TU pour le bassin de la Siagne (#15)

Le bassin du Loup (#16) dépasse son débit décennal le 5 novembre à 24TU.

Pour la prévision de pluie parfaite (pluie observée), c'est à 19TU qu'elle dépasse l'incertitude de pluie critique pour la durée de 6h pour 24TU. A 21TU, la prévision dépasse quasiment la pluie critique pour la durée de 3h pour 24TU et dépasse la pluie critique pour la durée de 6h pour l'heure suivante. L'anticipation potentielle est d'environ 4 heures avec l'avertissement de niveau 1 et d'environ 3 heures avec l'avertissement de niveau 2.

Avec la prévision de pluie persistante, c'est à 21TU que cette prévision dépasse l'incertitude de la pluie critique pour la durée de 3h pour 24TU ; à 23TU, elle dépasse la pluie critique pour la durée de 1h pour 24TU. L'anticipation potentielle est donc d'environ 3 heures avec l'avertissement de niveau 1 et de seulement 1 heure avec l'avertissement de niveau 2.

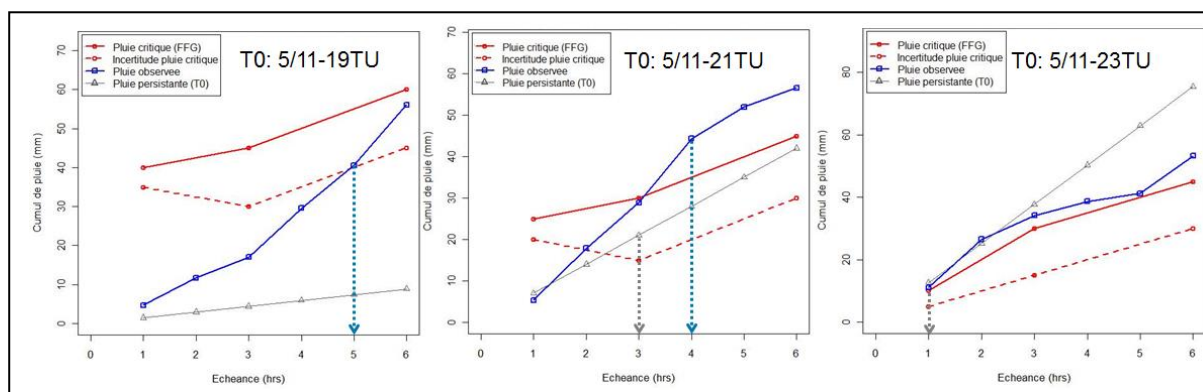


Figure 31 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 19TU à 23TU pour le bassin du Loup (#16)

Cette première analyse du début de l'évènement de novembre 2011 a permis de montrer l'intérêt de l'information de pluie critique du système AIGA-FFG. Le prévisionniste peut identifier par anticipation les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit grâce aux cartes de pluie critique. Il peut également facilement croiser la pluie critique avec une ou plusieurs prévisions de pluie. Ce croisement permet de donner par anticipation des avertissements de dépassement de seuil de débit. L'utilisation de la pluie observée comme prévision parfaite a permis de démontrer qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique lors de cette analyse pour prendre en compte les avertissements de niveaux 1 et 2, au risque sinon d'engendrer de nombreuses alertes manquées. La comparaison des avertissements fournis par les 2 prévisions, prévision parfaite et prévision de pluie persistante, a montré que la qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie. Cette qualité des avertissements du système AIGA-FFG dépend également de la qualité d'estimation de la pluie critique, ainsi que de la performance du modèle pluie-débit du système (la performance du modèle n'étant pas évaluée dans cette étude).

b) Evènement d'octobre 2011

Cet évènement concerne des pluies modérées, pour lesquelles les débits simulés par AIGA ne dépassent pas le seuil de débit de période de retour de 2 ans, à l'exception de 5 bassins. L'analyse de la performance du système AIGA-FFG est donc présentée pour les dépassements du seuil de débit biennal.

La Figure 32 présente les cartes d'alerte AIGA pour le 25 octobre 2011, qui identifient les bassins dépassant le seuil : bassin de l'Huveaune (#24) à 3TU, bassin de l'Eygoutier (#32) à 4TU, les bassins du Grand Vallat (#33) et de la Reppe (#35) à 6TU, et le bassin de la Grande Frayère (#34) à 11TU. Il n'y a plus de dépassement dans les heures suivantes.

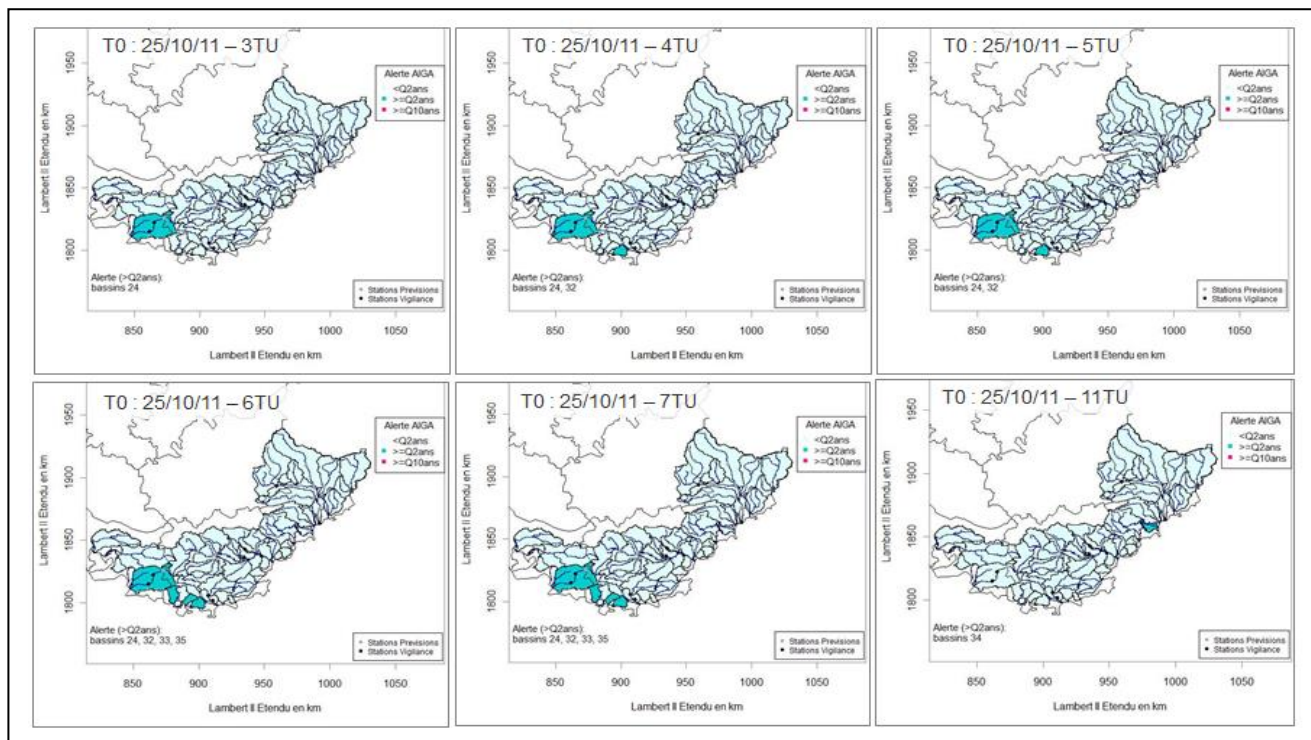


Figure 32 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit biennal pour les dates du 25 octobre 2011 de 3TU à 7TU, ainsi qu'à 11TU

Les cartes de pluie critique pour la durée de 3h sont en Figure 33.

Dès 0TU, les bassins de l'Eygoutier (#32) et de l'Huveaune (#24) sont identifiés comme plus sensibles au risque de dépassement du seuil de débit biennal (pluie critique de 30mm/3h).

C'est à 2TU que la pluie critique du bassin de la Reppe (#35) est de 30mm/3h.

A 5TU, les bassins du Grand Vallat (#33) et de la Grande Frayère (#34) ont une pluie critique de 45mm/3h.

C'est à 9TU et 10TU que la pluie critique pour la Grande Frayère (#34) est de 30mm/3h (cartes non incluses dans la figure).

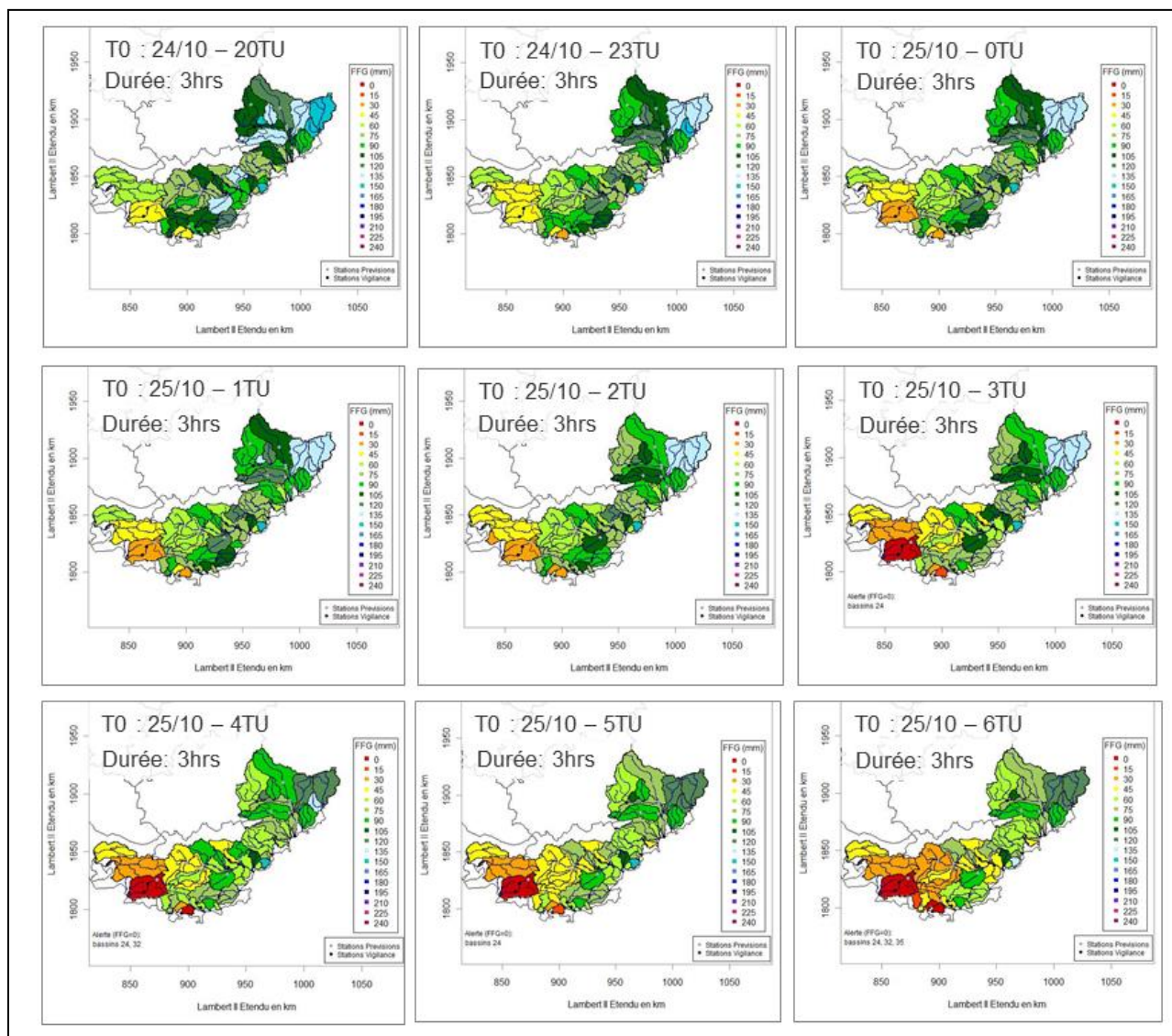


Figure 33 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 24 octobre 2011-20TU au 25 octobre 2011-6TU

Les cartes des différences de pluie avec les 2 prévisions (prévision parfaite de pluie et prévision de pluie persistante) sont présentées en Figures 34 et 35 pour analyser la qualité des avertissements du système AIGA-FFG en comparaison avec les avertissements du système AIGA.

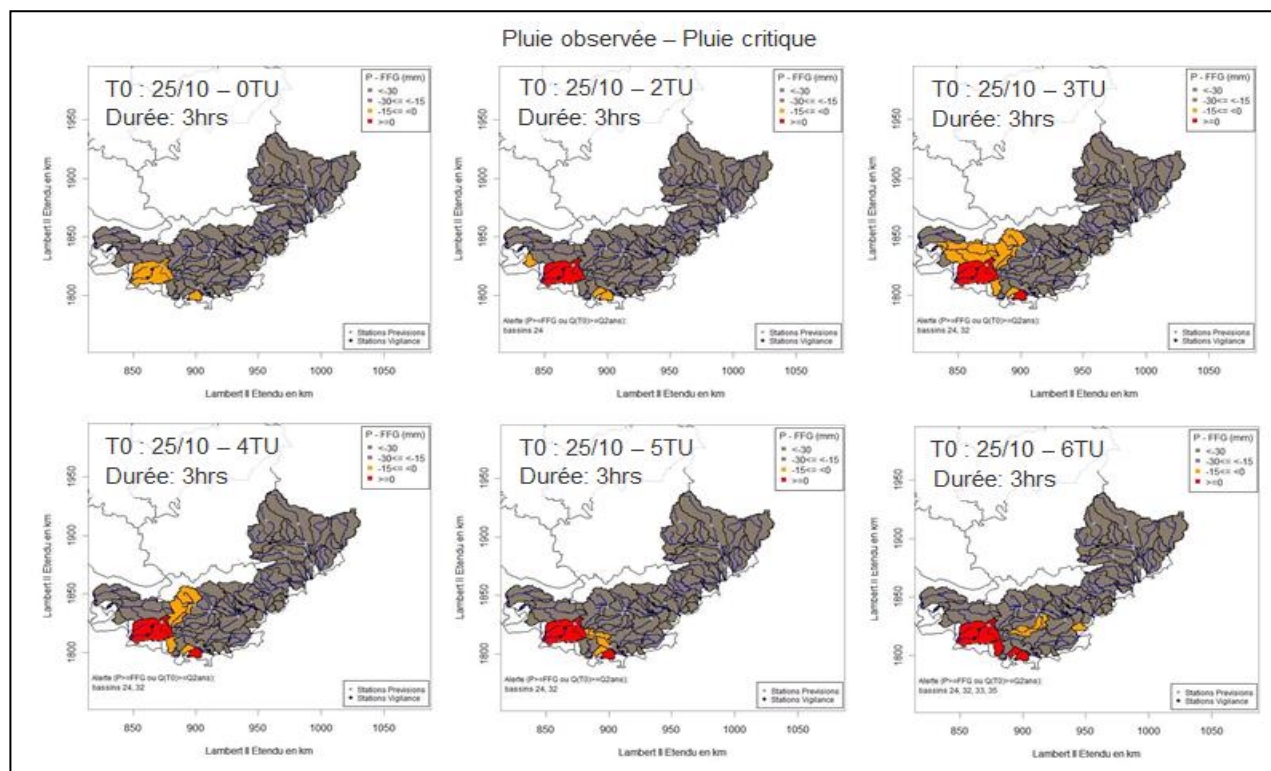


Figure 34 : Cartes des différences entre prévision parfaite de pluie et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 25 octobre 2011 de 0TU à 6TU

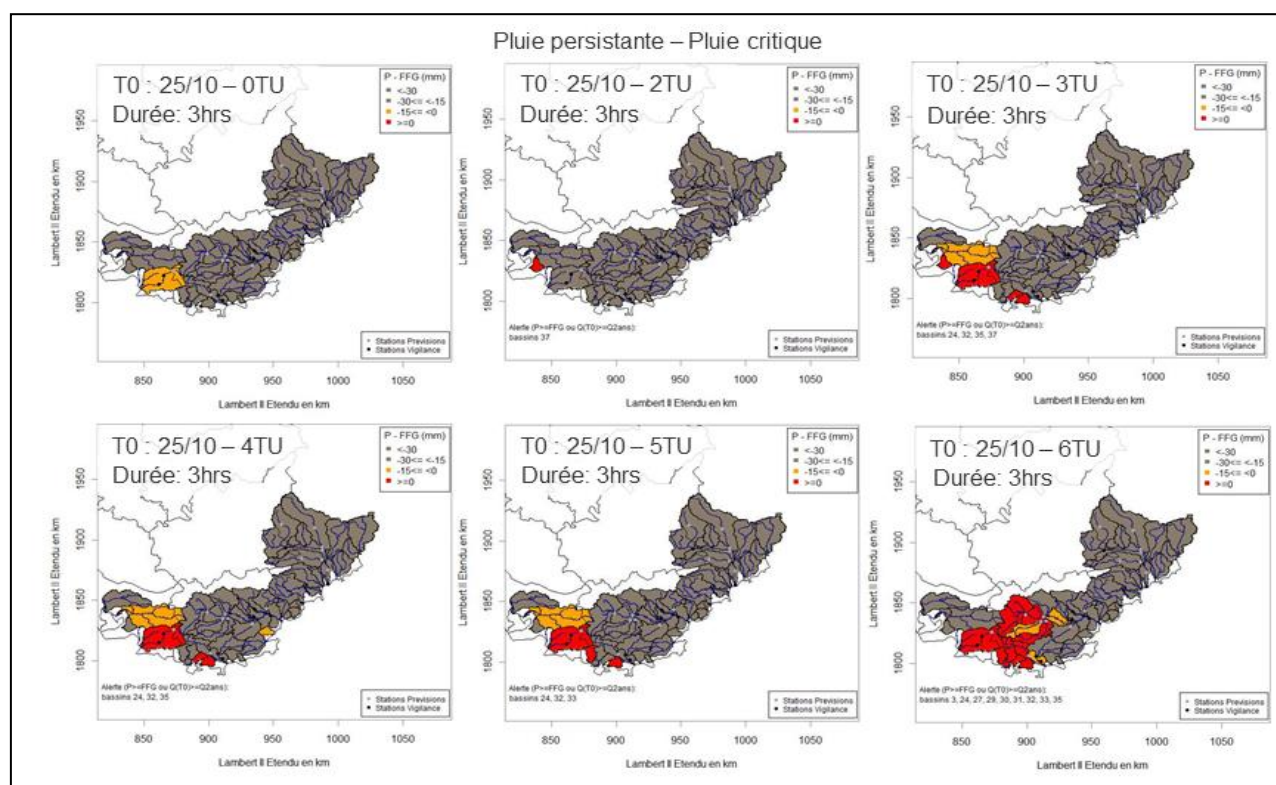


Figure 35 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 25 octobre 2011 de 0TU à 6TU

Le Tableau 4 indique les bassins mis en alerte avec le système AIGA et les bassins pour lesquels un avertissement de niveau 2 est donné avec le système AIGA-FFG pour la pluie critique de durée 3h en comparaison avec les 2 types de prévision. Les caractéristiques des bassins sont données en Appendice A. Les avertissements du système AIGA-FFG sont déduits de la pluie critique de la durée de 3h donc ils concernent les 3 prochaines heures. La qualité des avertissements est décrite de la manière suivante : 1) en gras, les bassins avec anticipation potentielle (pour le premier T0 de leur mise en alerte), 2) en italique souligné, les bassins avec fausse alerte, et 3) en souligné, les bassins sans anticipation avec l'avertissement de niveau 2 (mais pour lesquels un avertissement de niveau 1 a pu être donné).

Heure T0 du 25/11/2011	Bassins en alerte pour AIGA	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision parfaite de pluie	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision de pluie persistante
2TU		24	<u>37 (Berre)</u>
3TU	24 (Huveaune)	24, 32	<u>24, 32, 35, 37 (Berre)</u>
4TU	24, 32 (Eygoutier)	24, 32	24, 32, 35
5TU	24, 32	24, 32	24, 32, 33
6TU	24, 32, 33 (Grand Vallat), 35 (Reppe)	24, 32, <u>33, 35</u>	<u>3 (Argens), 24, 27 (Reppe), 29 (Gapeau), 30 (Caramy), 31 (Argens), 32, 33, 35</u>
7TU	24, 32, 33, 35	24, 32, 33, 35	<u>1 (Gapeau), 2 (Caramy), 24, 30 (Caramy), 32, 33, 35</u>
8TU			<u>28 (Giscle), 40 (Giscle)</u>
9TU		34	<u>38 (Argens), 46 (Argens)</u>
10TU			34
11TU	34 (Grande Frayère)	-	-

Tableau 4 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit biennal et les dates du 25 octobre 2011 de 2TU à 11TU

La prévision de pluie parfaite (pluie observée) permet d'anticiper les dépassements pour 3 des 5 bassins, avec des anticipations potentielles de 1 heure à 2 heures pour les avertissements de niveau 2 listés dans le Tableau 4. Pour les bassins du Grand Vallat (#33) et de la Reppe (#35), pour lesquels aucun avertissement de niveau 2 n'a été donné, des avertissements de niveau 1 ont été émis à 2TU pour la Reppe (pour une anticipation potentielle de 4 heures) et à 3TU pour le Grand Vallat (pour une anticipation potentielle de 3 heures).

La prévision de pluie persistante permet aussi d'anticiper les dépassements pour 4 des 5 bassins, avec des anticipations potentielles d'1 heure à 3 heures. En comparaison avec la prévision parfaite de pluie, les avertissements de niveau 2 ont concerné un bassin supplémentaire, le bassin de la Reppe (#35), et avec une anticipation potentielle également supérieure à celle des autres bassins. Mais, pour cet événement, la prévision de pluie persistante donne beaucoup de fausses alertes (12 bassins au total). Pour les bassins de l'Huveaune (#24) et de l'Eygoutier (#32), il n'y a aucun avertissement de niveau 1 ou 2. Pour cet événement, du fait des caractéristiques de la pluie observée (cf. cartes de pluie journalière en Figure 10), la prévision de pluie persistante (déduite de la pluie observée de la dernière

heure) n'est pas de bonne qualité car elle a tendance à surestimer les pluies, ce qui engendre un grand nombre de fausses alertes.

Ainsi, l'analyse de ce deuxième évènement d'octobre 2011 confirme les observations obtenues pour l'évènement de novembre 2011. L'information de pluie critique du système AIGA-FFG est bénéfique pour identifier par anticipation les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit. Lorsque le prévisionniste croise la pluie critique avec une ou plusieurs prévisions de pluie pour en déduire des avertissements, il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon de nombreuses alertes manquées. La qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie, avec, pour cet évènement, plus de fausses alertes données par la prévision de pluie persistante qui a tendance à surestimer les pluies des bassins.

c) Evènement de juin 2010

L'évènement de juin 2010 est analysé pour les 13 bassins de l'Argens (cf. Appendice A pour les caractéristiques des bassins).

Les alertes du système AIGA sont présentées en Figure 36 pour le 15 juin 2010 de 12:45TU à 16:45TU. Les pluies très fortes de cet évènement ont entraîné une augmentation très rapide des débits. D'après les simulations du système AIGA, le débit décennal est dépassé entre 13:45TU et 16:45TU pour 10 des 13 bassins.

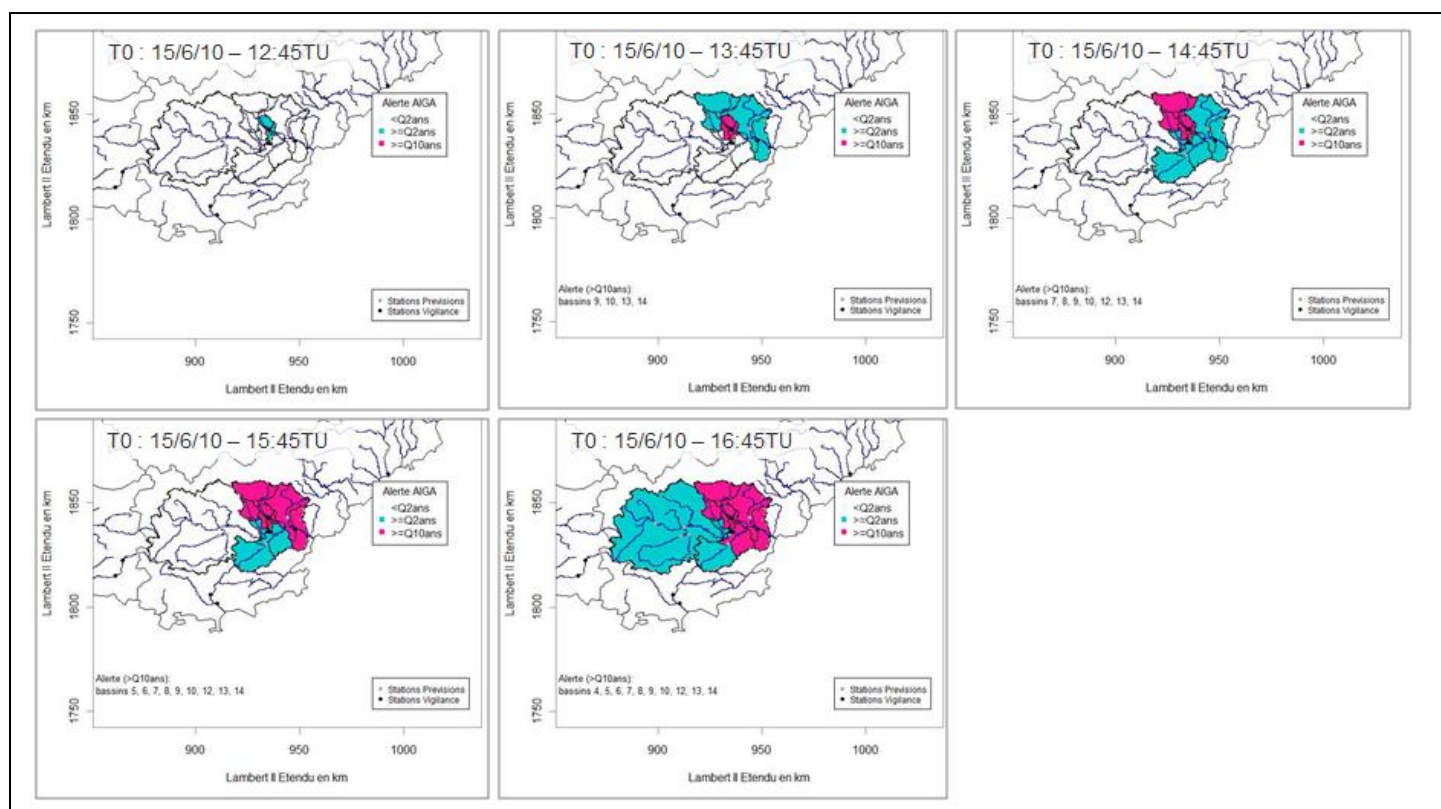


Figure 36 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 15 juin 2010 de 12:45TU à 16:45TU

La Figure 37 montre les cartes de pluie critique pour la durée de 3h de 11:45TU à 16:45TU. Entre 12:45TU et 13:45TU, les valeurs de pluies critiques chutent pour tous les bassins sauf les 2 bassins amont de l'Argens (Vidauban #2 et Les Arcs #3); elles atteignent 0 pour les 3 bassins aval de la Nartuby (#8, 9 et 10) et du Réal (#13 et 14).

Le bassin amont de la Nartuby (#7) et le bassin du Florièye (#12) ont une pluie critique nulle à 14:45TU.

A 16:45TU, la pluie critique des 2 bassins aval de l'Argens (#5 et 6) devient nulle. Les bassins de l'Aille (Vidauban #1), l'Argens-Les Arcs (#3) et l'Argens-Le Muy (#4) ont une pluie critique de 30mm/3h.

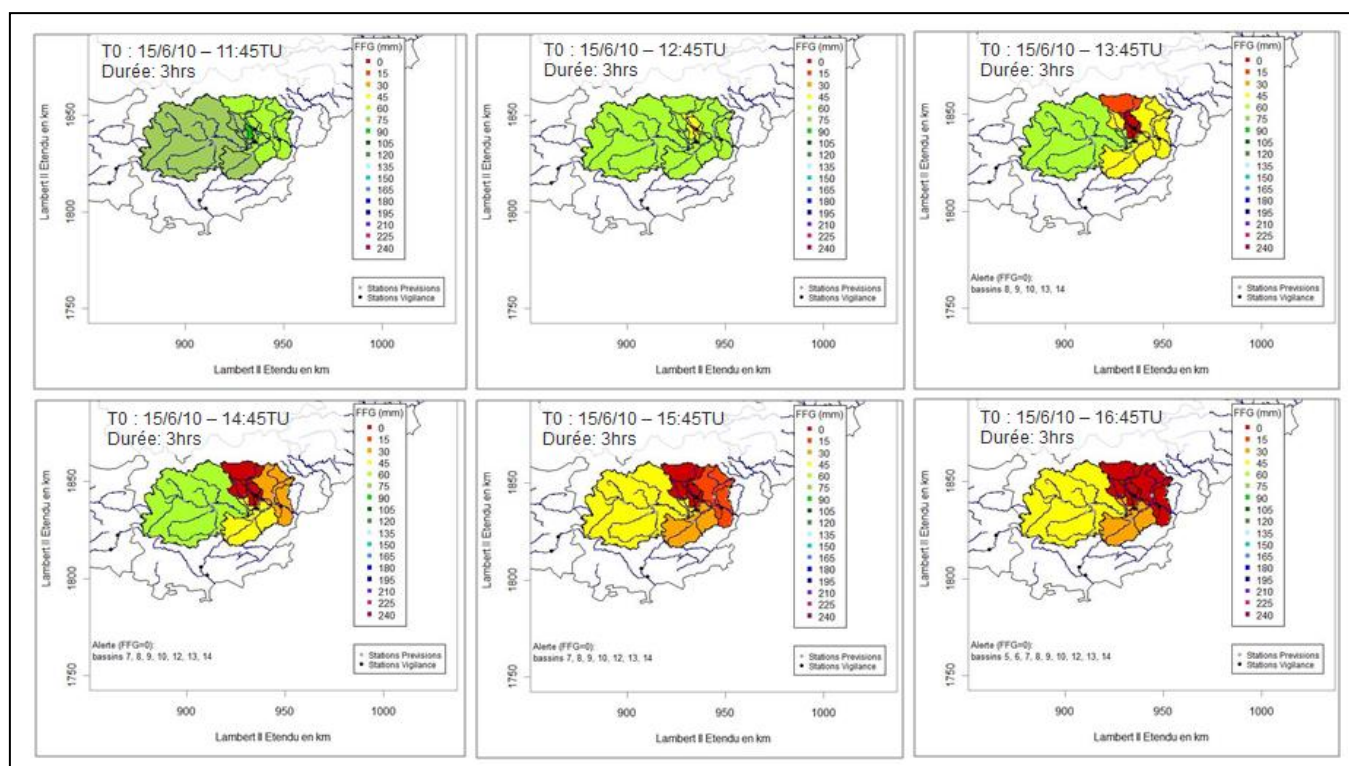
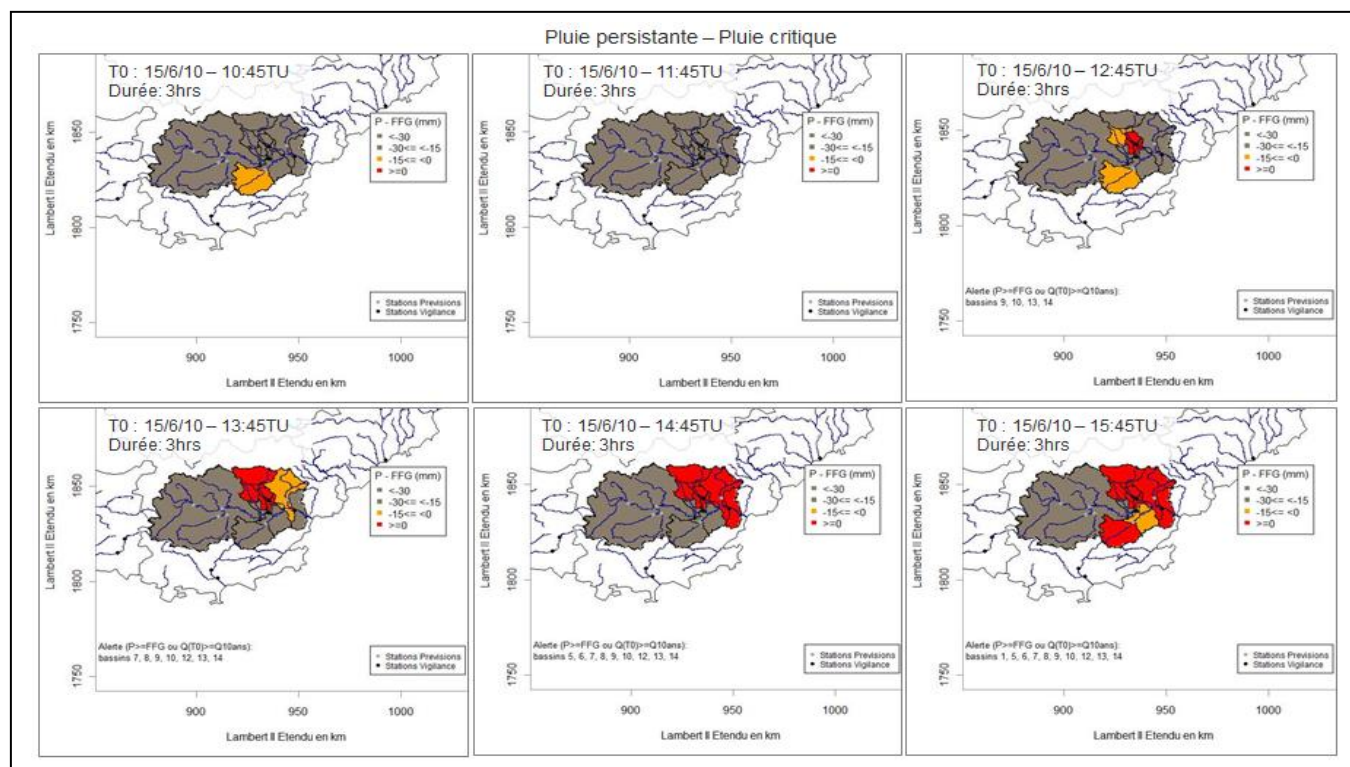
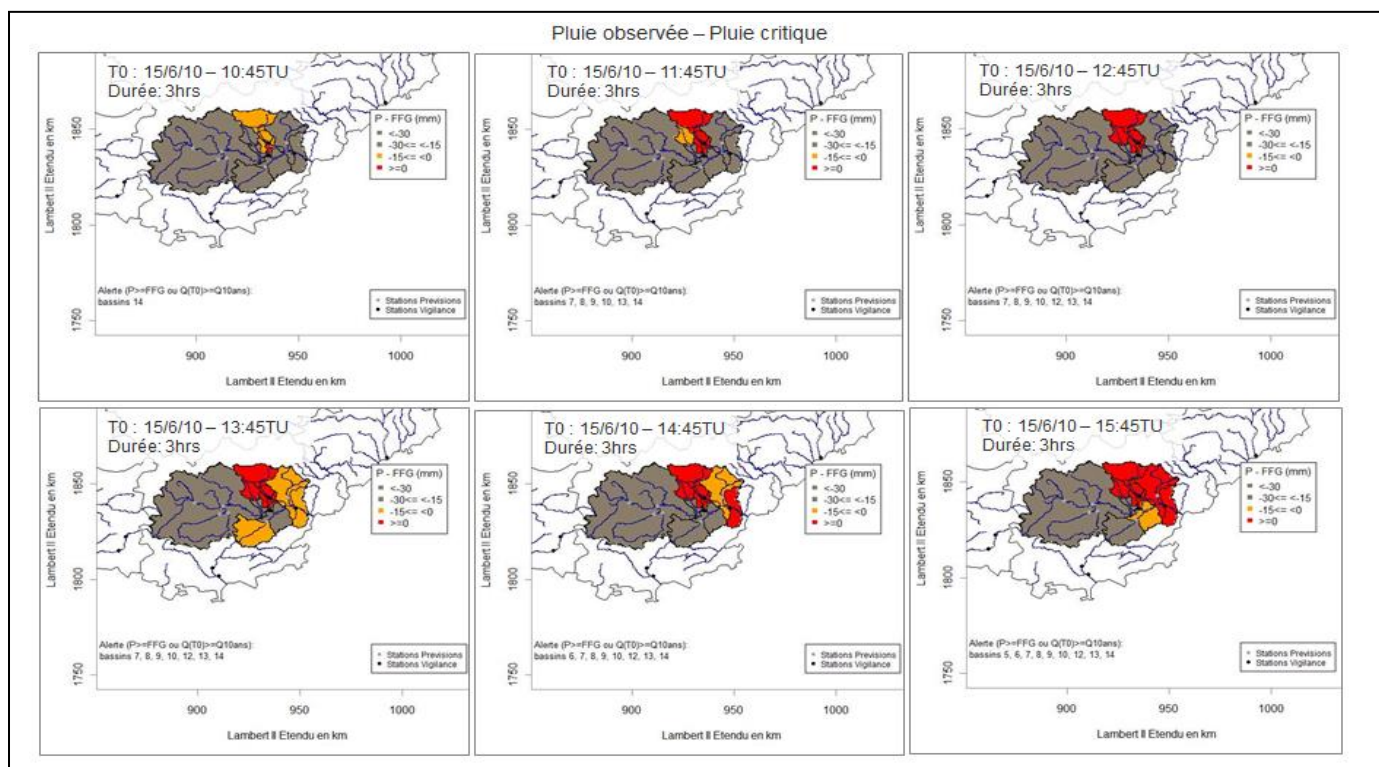


Figure 37 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit décennal pour les dates du 15 juin 2010 de 11:45TU à 16:45TU

Les cartes des différences de pluie avec les 2 prévisions (prévision parfaite de pluie et prévision de pluie persistante) sont présentées en Figures 38 et 39 pour analyser la qualité des avertissements du système AIGA-FFG par comparaison aux avertissements du système AIGA.



Le Tableau 5 indique les bassins mis en alerte avec le système AIGA et les bassins pour lesquels un avertissement de niveau 2 est donné avec le système AIGA-FFG pour la pluie critique de durée 3h. On rappelle que les avertissements du système AIGA-FFG concernent les 3 prochaines heures.

La qualité des avertissements est décrite de la manière suivante : 1) en gras, les bassins avec anticipation potentielle (pour le premier T0 de leur mise en alerte), 2) en italique souligné, les bassins avec fausse alerte, et 3) en souligné, les bassins sans anticipation avec l'avertissement de niveau 2 (mais pour lesquels un avertissement de niveau 1 a pu être donné).

Heure T0 du 15/06/2010	Bassins en alerte pour AIGA	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision parfaite de pluie	Bassins en avertissement 2 pour AIGA-FFG pour la durée de 3h avec prévision de pluie persistante
10:45TU		14	
11:45TU		7, 8, 9, 10, 13, 14	
12:45TU		7, 8, 9, 10, 12 , 13, 14	9, 10, 13, 14
13:45TU	9 (Nartuby), 10 (Nartuby), 13 (Réal), 14 (Réal)	7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	7, 8 , 9, 10, 12 , 13, 14
14:45TU	7 (Nartuby), 8 (Nartuby), 9, 10, 12 (Florièye), 13, 14	6 , 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	5, 6 , 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14
15:45TU	5 (Argens), 6 (Argens), 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	<u>5</u> , 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	<u>1 (Aille)</u> , 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14
16:45TU	4 (Argens), 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	<u>4</u> , 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14	<u>4</u> , 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14

Tableau 5 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit décennal et les dates du 15 juin 2010 de 10:45TU à 16:45TU

Pour cet évènement avec de très fortes pluies horaires localisées sur l'ensemble de la zone d'étude, les deux prévisions sont de qualité relativement comparable en termes d'avertissement de niveau 2, avec une anticipation potentielle pour 8 des 13 bassins.

L'anticipation potentielle avec la prévision de pluie parfaite (pluie observée) reste supérieure à celle de la prévision de pluie persistante : elle varie d'1 heure à 3 heures avec la pluie observée, alors que celle de la pluie persistante est d'1 heure. La pluie persistante ne donne qu'une seule fausse alerte pour le bassin de l'Aille à 15:45TU.

Concernant les bassins sans anticipation pour les avertissements de niveau 2, des avertissements de niveau 1 ont été donnés pour tous les bassins avec une anticipation potentielle d'1 heure : pour le bassin de l'Argens-Roquebrune (#5) à 14:45TU avec la pluie observée, et pour le bassin de l'Argens-Le Muy (#4) à 15:45TU avec les 2 prévisions de pluie.

Ainsi, l'analyse pour l'évènement de juin 2010, comme celle des évènements de novembre et octobre 2011, confirme l'apport potentiel de l'information de pluie critique du système AIGA-FFG pour identifier par anticipation les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit et pour déduire des avertissements lorsque la pluie critique est comparée à une ou plusieurs prévisions de pluie. L'utilisation de la prévision parfaite de pluie a montré qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon des alertes manquées. La comparaison entre les avertissements avec les 2 prévisions de pluie, pluie observée et pluie persistante, a permis de montrer que la

qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie. Dans les exemples présentés pour les 3 évènements, l'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA-FFG, par comparaison avec le système AIGA, varie entre 1 heure et 7 heures lorsque l'on considère les pluies critiques pour les durées de 1h, 3h et 6h. La pluie persistante a donné de nombreuses fausses alertes pour l'évènement d'octobre 2011 car elle avait tendance à surestimer les pluies de bassin. Mais elle peut aussi mieux anticiper le risque de dépassement de seuil dans certains cas.

Il est évident que la qualité des estimations de pluie critique et des avertissements du système AIGA-FFG dépend également des performances du modèle pluie-débit et des données d'observation utilisées pour l'initialisation du modèle. C'est pourquoi les prévisionnistes des SPC doivent expertiser les estimations de pluie critique, produites avec le modèle pluie-débit, ainsi que les prévisions de pluie en collaboration avec les prévisionnistes de Météo-France. Cette expertise des prévisionnistes permet une meilleure interprétation des informations au vu des performances passées du modèle pluie-débit et du système de prévision météorologique, ainsi que de la qualité des observations de pluie et débit.

Résumé de l'évaluation de l'apport des pluies critiques

L'évaluation du système d'AIGA-FFG est basée sur les estimations des pluies critiques pour les différentes durées et leur comparaison avec les 2 prévisions de pluie. Le croisement des pluies critiques avec les 2 types de prévision permet de produire des avertissements au prévisionniste lorsque la prévision est suffisamment proche de la pluie critique pour dépasser l'incertitude d'estimation de pluie critique (pour un avertissement de niveau 1), ou lorsque la prévision dépasse la pluie critique (pour un avertissement de niveau 2). En temps réel, c'est au prévisionniste de choisir la ou les prévisions de pluie qu'il veut croiser avec les pluies critiques pour évaluer le risque hydrologique.

Les avertissements du système AIGA-FFG, déduits de chacune des 2 prévisions de pluie, sont comparés avec les alertes données par le système AIGA, sans considérer de pluie future. On évalue pour les différents bassins l'alerte potentielle pour chacune des deux prévisions (nous utilisons le terme d'anticipation *potentielle* car il ne s'agit pas d'une anticipation de l'alerte par comparaison avec un dépassement de seuil de débit observé).

Deux exemples de prévisions de pluie sont utilisés : 1) la pluie observée correspondant à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation et constante pour toute la durée de la pluie critique.

L'information de pluie critique du système AIGA-FFG permet d'identifier par anticipation les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit. Dans les exemples présentés, l'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA-FFG, par comparaison avec le système AIGA, varie entre 1 heure et 7 heures lorsque l'on considère les pluies critiques pour les durées de 1h, 3h et 6h. L'utilisation de la prévision parfaite de pluie a montré qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon des alertes manquées. La comparaison entre les avertissements avec les 2 prévisions de pluie, pluie observée et pluie persistante, a permis de montrer que la qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie.

La qualité des avertissements du système AIGA-FFG dépend également des performances du modèle pluie-débit (cf. études d'Irstea et d'HYDRIS sur la performance d'AIGA) et de la qualité des données observées utilisées pour l'initialisation du modèle. L'expertise des prévisionnistes des SPC et de Météo-France permet une meilleure interprétation des informations, au vu des performances passées du modèle pluie-débit et du système de prévision météorologique, ainsi que de la qualité des observations de pluie et débit.

6. Conclusions et Perspectives

Le système AIGA-FFG permet d'intégrer une information simple de pluie future dans un modèle hydrologique, en estimant la pluie critique de bassin nécessaire pour dépasser le seuil de débit dans les heures à venir. Elle permet de communiquer une carte du risque hydrologique potentiel de dépassement de seuil de débit en identifiant les bassins versants les plus sensibles à ce risque. Cette information étant fournie en mm pour une certaine durée, elle facilite les discussions entre les prévisionnistes météorologistes et les prévisionnistes hydrologues pour déterminer si le risque de dépassement des estimations de pluie critique serait avéré dans les heures à venir. L'information cartographique permet d'identifier les secteurs géographiques les plus sensibles, pour lesquels les prévisionnistes peuvent, si nécessaire (par exemple lorsque la prévision de pluie est relativement proche de l'estimation de pluie critique), affiner leur expertise des prévisions de pluie, ainsi que des observations de pluie (utilisées pour l'initialisation du modèle hydrologique), et également affiner leur expertise des performances du modèle pluie-débit sur les bassins versants concernés.

Il peut également être envisagé de partager l'information de pluie critique (expertisée ou non expertisée par le prévisionniste) avec les utilisateurs, en publiant par exemple les estimations et cartes de pluie critique sur internet (comme les Etats-Unis le font pour leur service de Flash Flood Guidance). Cette information facilite le suivi du risque hydrologique car l'utilisateur peut la comparer facilement avec les données de pluie, également disponibles sur internet. Cette mise à disposition automatique des informations de pluie critique, par exemple pour les services de sécurité civile, peut permettre de réduire les temps de réaction lorsque le risque de crue est avéré, mais sera également sujette aux fausses alertes produites par les erreurs du modèle hydrologique et des données d'observation et de prévisions météorologiques.

L'apport de l'information de pluie critique a été évalué en termes d'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA-FFG, en comparaison des avertissements donnés par le système d'alerte AIGA, pour 3 événements de juin 2010, octobre et novembre 2011 sur un jeu de bassins du SPC Med-Est. L'analyse des avertissements sur ces 3 événements a montré un gain en anticipation potentielle (par comparaison avec l'avertissement du système AIGA) pour les 2 types de prévision, grâce à la prise en compte des pluies futures dans le modèle pluie-débit d'AIGA. L'utilisation de la prévision parfaite de pluie a montré qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon des alertes manquées. La comparaison entre les avertissements avec les 2 prévisions de pluie, pluie observée et pluie persistante, a permis de montrer que la qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie, avec, par exemple, quelques fausses alertes avec la prévision de pluie persistante mais aussi un exemple de meilleure anticipation potentielle pour l'événement de novembre 2011.

La qualité des avertissements du système AIGA-FFG dépend également 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.

Le système d'alerte AIGA-FFG pourrait être amélioré en prenant en compte les remarques suivantes :

- l'estimation des pluies critiques peut être affinée avec une plus faible incrémentation du scénario de pluie future pour réduire l'incertitude d'estimation de la pluie critique et proposer des plages de valeurs de pluies critiques adaptées aux événements observés sur la zone d'étude ; cependant le scénario, tel que mis en œuvre dans cette première approche, reste simple, avec une intensité constante et une pluie spatialement homogène, sans prendre en compte les incertitudes des données de pluie, et l'incrémentation choisie ne doit pas conduire à une précision des pluies critiques bien supérieure à la précision des prévisions de pluie car une telle information ne pourra pas être valorisée ;
- les pluies critiques peuvent être estimées plus fréquemment pour les prévisionnistes des SPC (toutes les heures par exemple, comme il a été proposé dans l'analyse des 3 événements) pour permettre de suivre l'évolution des secteurs les plus sensibles au risque hydrologique ; il semble que cette estimation plus fréquente des pluies critiques pourrait être déclenchée lorsque les pluies critiques atteignent des valeurs plus faibles (ex. 45 mm/3h) et donc que le risque hydrologique potentiel est plus important ; si les pluies critiques ne sont pas recalculées, les valeurs de pluie critique peuvent être réactualisées dès qu'une information sur les pluies observées est disponible ;
- les seuils d'avertissement définis pour les différences entre une prévision de pluie et pluie critique (et qui pourraient également être définis pour les estimations de pluie critique pour déclencher une mise en éveil des prévisionnistes) sont à définir en fonction des caractéristiques des événements pluvieux et de la qualité des prévisions de pluie, ainsi que de la sensibilité des utilisateurs aux fausses alertes ; ces seuils d'avertissement doivent être définis par les prévisionnistes du SCHAPI et des SPC ;
- les seuils de débit utilisés dans cette étude (quantiles SHYREG de périodes de retour 2 ans et 10 ans) pour définir les avertissements des 3 événements étudiés correspondent aux seuils de débit du système AIGA opérationnel pour décrire l'aléa hydrologique ; elle ne prend pas en compte la vulnérabilité et donc serait à redéfinir en fonction des enjeux, en partenariat entre les prévisionnistes et les acteurs locaux, pour une prise en compte de la vulnérabilité et ainsi fournir des avertissements sur le risque (par croisement entre les informations d'aléa et de vulnérabilité) ;
- il serait nécessaire d'établir, avec les développeurs du modèle pluie-débit d'AIGA et les prévisionnistes, le domaine d'applicabilité du système AIGA (et donc du système AIGA-FFG), fonction principalement de la taille et des caractéristiques du bassin (le modèle pluie-débit actuel n'étant pas adapté pour les bassins karstiques et fortement anthropisés) et de la qualité des pluies observées, ces 2 facteurs ayant une influence directe sur la qualité de la simulation des débits par le modèle pluie-débit distribué GR.

Par ailleurs, le système AIGA-FFG devrait être testé en incluant les dernières améliorations d'AIGA, concernant, par exemple, le débit initial et l'étalement temporel des débits au sein du bassin, ainsi que la régionalisation du modèle pour permettre d'améliorer les résultats en milieu non jaugé (Organde 2012). L'évaluation de la qualité des avertissements des systèmes AIGA et AIGA-FFG doit se poursuivre en s'appuyant sur des retours terrain pour comprendre la qualité actuelle des avertissements vis-à-vis des événements observés sur le

terrain et pour proposer des pistes d'améliorations futures, ainsi que pour prendre en compte les informations concernant la vulnérabilité.

D'autre part, il semble intéressant d'affiner les estimations de pluie critique de bassin en prenant en compte les sources d'incertitude de la chaîne d'avertissement AIGA-FFG. Cette approche permettrait d'enrichir les informations données aux prévisionnistes et aux utilisateurs pour de meilleures prises de décision. Les incertitudes du couplage système météorologique et modèle hydrologique proviennent principalement des observations et des prévisions de pluies, ainsi que du modèle hydrologique (en incluant les incertitudes sur les paramètres, les conditions initiales, et la structure du modèle). Dans un premier temps, des prévisions d'ensembles de pluie pourraient être intégrées dans le modèle pluie-débit, pour produire des prévisions d'ensemble de débit ; on peut alors extraire des probabilités de dépassement de seuil de débit à partir des ensembles de débit. Par la suite, une analyse de sensibilité des différentes sources d'incertitudes pourrait permettre de déterminer les principales sources d'incertitudes du système AIGA afin de mettre en œuvre une approche de type prévisions d'ensembles pour améliorer le système d'avertissement aux crues rapides grâce aux informations de pluie critique de type probabiliste.

Points importants sur le système AIGA-FFG

Le système AIGA-FFG permet d'estimer, pour une liste de durées et de seuils de débit, les valeurs de pluie critique FFG pour que le bassin atteigne le seuil de débit dans les heures à venir. Il est basé sur l'incrémentation d'un scénario simple de pluie future d'intensité constante et uniforme spatialement sur le bassin versant.

Les cartes de pluies critiques FFG facilitent la comparaison avec les données spatialisées de pluie, disponibles en temps réel, pour déterminer les zones de risque d'inondation. En comparant les cartes de pluies critiques FFG aux pluies observées et pluies futures, les prévisionnistes doivent prendre la décision d'émettre ou non un bulletin d'alerte.

Dans cette étude, l'estimation de la pluie critique est mise en œuvre pour :

- les durées de 1h, 3h, 6h, 12h et 24h ;
- les quantiles de débit SHYREG pour les périodes de retour de 2 ans, 5 ans et 10 ans ;
- les incrémentations du scénario de pluie future d'intensité constante de : + 5 mm/h pour la durée de 3h ; + 2,5 mm/h pour la durée de 6h ; + 1,25 mm/h pour la durée de 12h ; et + 1 mm/h pour la durée de 24h ;
- une estimation des pluies critiques toutes les 3 heures (avec réactualisation toutes les heures) et toutes les heures si le risque de crue semble avéré.

L'analyse de l'information de pluie critique en temps réel est proposée à partir des produits suivants :

- les cartes des pluies critiques FFG pour tous les bassins versants pour une durée donnée et un seuil de débit, qui peuvent être produites toutes les heures, afin d'identifier les bassins les plus sensibles au risque d'inondation ;
- les hydrogrammes de crues simulés par AIGA correspondant à la pluie critique pour chaque bassin, qui peuvent être produits toutes les 3 heures lors de l'estimation de la pluie critique ;
- le tableau des pluies critiques pour tous les bassins versants pour une durée et un seuil de débit donnés, afin d'analyser l'évolution du risque hydrologique potentiel dans le temps ;
- les cartes de différence entre prévision de pluie (que le prévisionniste devra choisir) et pluie critique pour tous les bassins versants pour une mise en alerte des bassins pour lesquels la pluie prévue est supérieure ou proche de la valeur de pluie critique (en prenant en compte l'incertitude d'estimation de la 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 de la méthode AIGA-FFG.

Les avertissements du système AIGA-FFG sont déduits des cartes de différence de pluie avec 2 exemples de prévision de pluie : 1) la pluie observée correspondant à la pluie future parfaite, connue *a posteriori* ; 2) la pluie persistante, d'intensité égale à la pluie observée dans la dernière heure précédant la date d'initialisation et constante pour toute la durée de la pluie critique.

Pour les 3 événements de juin 2010, octobre et novembre 2011 pour la zone du SPC Med-Est, l'information de pluie critique du système AIGA-FFG a permis d'identifier par

anticipation les bassins les plus sensibles au risque de dépassement de seuil de débit. Dans les exemples présentés, l'anticipation potentielle des avertissements du système AIGA-FFG, par comparaison avec le système AIGA, varie entre 1 heure et 7 heures lorsque l'on considère les pluies critiques pour les durées de 1h, 3h et 6h. L'utilisation de la prévision parfaite de pluie a montré qu'il est nécessaire de considérer l'incertitude d'estimation de la pluie critique, au risque d'engendrer sinon des alertes manquées. La comparaison entre les avertissements avec les 2 prévisions de pluie, pluie observée et pluie persistante, a permis de montrer que la qualité des avertissements dépend de la qualité de la prévision de pluie.

La qualité des avertissements du système AIGA-FFG dépend également 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 permet une meilleure interprétation des informations, au vu des performances passées du modèle pluie-débit et du système de prévision météorologique, ainsi que de la qualité des observations de pluie et débit.

L'information de pluie critique étant fournie en mm pour une certaine durée, elle facilite les discussions entre les prévisionnistes météorologistes et hydrologues pour déterminer si le risque de dépassement des estimations de pluie critique serait avéré dans les heures à venir. L'information cartographique permet d'identifier les secteurs géographiques les plus sensibles, pour lesquels les prévisionnistes peuvent, si nécessaire (par exemple lorsque la prévision de pluie est relativement proche de l'estimation de pluie critique), affiner leur expertise concernant les prévisions de pluie, les observations de pluie (utilisées pour l'initialisation du modèle hydrologique), et les simulations de débit du modèle pluie-débit sur les bassins versants concernés.

Il peut également être envisagé de partager l'information de pluie critique (expertisée ou non expertisée par le prévisionniste) avec les utilisateurs, comme le font les Etats-Unis en publiant les estimations et cartes de pluie critique sur internet pour leur service de Flash Flood Guidance.

7. Références

- Arnaud, P. and 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.
- Demargne J. et Javelle P., 2012. Service de Prévision des Crues Eclairs du National Weather Service des Etats-Unis. Rapport d'étude, 48pp.
- 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., Pansu J. et Arnaud P., 2012. Evaluating flash flood warnings at ungauged locations: a case study with the AIGA warning system. *Soumis à Hydrological Sciences Journal.*
- Maire, A. et al., 2012. Comparaison de la méthode AIGA a une alerte sur les pluies. *Rapport d'étude*, 20pp.
- Organde, D., Arnaud P., Fine J.-A., Fouchier C., Folton N. et Lavabre J., 2012. Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté pour publication).
- 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*, 38pp.
- Perrin, C., C. Michel, et al., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Ronsoux Fouchier C., 2010. Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. *Thèse de doctorat, université de Montpellier 2*, 266 pp.
- Ronsoux Fouchier C., 2012. Evaluation des alertes du système AIGA avec une base de dégâts terrain. *Rapport d'étude*, xxpp.

Appendice A : Description des Bassins Versants

Tableau des 13 bassins sélectionnés pour l'évènement de juin 2010

ID AIGA	Cours d'eau	Nom du bassin	Surface (km ²)
1	Aille	Vidauban	228,3
2	Argens	Vidauban – RD 48	1550
3	Argens	Les Arcs	1654
4	Argens	Le Muy – A8	2047
5	Argens	Roquebrune	2491
6	Argens	Fréjus - Saint Aygulf	2661
7	Nartuby	Rebouillon	149,5
8	Nartuby	Draguignan – La Clappe	164
9	Nartuby	Trans-en-Provence	195,8
10	Nartuby	Capellan	209
12	Florièye	Lorgues – RD562	64,6
13	Réal	Les Arcs – RD57 (en amont)	20
14	Réal	Les Arcs – Pont SNCF	30,8

Tableau des 46 bassins sélectionnés pour les événements d'octobre et novembre 2011 (en bleu, bassins de la banque HYDRO)

ID AIGA	ID SPC	Nom station	ID BD Hydro	Description	Dénomination carte	Surface (km ²)
1	9	Hyères	NA	Côtiers du Gapeau au cap Bénat	Gapeau aval	566
2	27	Vins	Y5105010	Le Caramy	Caramy Vins 200	202
3	34	Châteauvert (aval)	Y5112010	L'Argens du Caramy à la Bresque incluse	Argens Châteauvert-Carcès	1144
4	36		NA	L'Argens du Caramy à la Bresque incluse	Bresque 270	269
5	59		NA	L'Argens du Florièye inclus à l'Aille	Florièye 90	89
6	61	Les Arcs	Y5202010	L'Argens du Florièye inclus à l'Aille	Argens Carcès-Les Arcs	1656
7	66	Vidauban	NA	L'Argens du Florièye inclus à l'Aille	Aille 280	279
8	74	Trans en Provence	NA	La Nartuby	Nartuby 235	229
9	78	Le Muy	NA	L'Argens de la Nartuby à l'Endre inclus	Endre 195	196
10	82	Roquebrune	Y5312010	L'Argens de l'Endre à la grande Garonne	Argens Les Arcs-Roquebrune	2512
11	95		NA	L'Argens de la grande Garonne inclus à la mer Méditerranée	Argens aval	2664
12	105		NA	Côtiers de l'Argens à la Siagne	Agay 50	54
13	129		NA	La Touloubre du vallon de Boulery inclus à l'étang de Berre	Touloubre 400	407
14	159	Fréjus	NA	L'Argens de la grande Garonne inclus à la mer Méditerranée	Reyran 120	91
15	255		NA	La Siagne du Biançon à la mer Méditerranée et la grande Frayère	Siagne 515	512
16	276		NA	Le Loup	Loup 290	289
17	289		Y6442010	Le Var de l'Esteron à la mer Méditerranée	Var moyen & aval	2812
18	297	Le Broc	NA	Le Var de la Vésubie à l'Esteron inclus (zones Y640 à Y642 exclues)	Esteron 450	446
19	336	Cros d'Utelle	NA	La Vésubie du vallon Barma Longa inclus au Var	Vesubie 390	392
20	342	Entrevaux	Y6042010	Le Var du Coulomp à la Roudoule	Var Entrevaux 675	674
21	348		NA	Le Var de la Roudoule incluse au Cians	Roudoule 50	49
22	351		NA	Le Cians	Cians 165	166
23	362	Tournefort	NA	La Tinée du vallon de Bramafam inclus au Var	Tinee 705	743
24	468	Aubagne	NA	L'Huveaune du Merlançon à la mer Méditerranée	Huveaune 510	574
25	521	Roquefavour	Y4122040	L'Arc du Grand Ruisseau à l'étang de Berre	Arc Roquefavour 635	635

26	528		Y4122020	L'Arc du Grand Ruisseau à l'étang de Berre	Arc aval	692
27	687		NA	Côtiers de la Reppe à l'Eygoutier	Reppe 105	107
28	704		NA	La Gisle de la Môle à la mer Méditerranée	Giscle 235	234
29	785	Soliès	Y4604020	Le Gapeau de sa source au Réal Martin	Gapeau Soliès 185	187
30	835	Cabasse	Y5106610	Le Caramy	Issole Cabasse 235	235
31	868	Châteauvert	Y5032010	L'Argens de l'Eau Salée au Caramy	Argens Châteauvert 500	507
32	995		NA	Côtiers de l'Eygoutier inclus au Gapeau	Eygoutier 70	68
33	1006		NA	Côtiers du Grand Vallat inclus à la Reppe incluse	Grand Vallat 85	89
34	1144	Grande Frayère	NA	Côtiers de la grande Frayère au Loup	Brague 65	68
35	1158	Reppe	NA	Côtiers de la Reppe à l'Eygoutier	Las 55	54
36	1234	La Crau	Y4615020	Le Gapeau du Réal Martin au vallon des Borrels	Réal Martin 285	282
37	1401		NA	L'étang de Berre (Arc et Touloubre exclus)	Cadiere 70	71
38	1478		NA	Côtiers de l'Argens à la Siagne	Argentiere 45	47
39	1687		Y5625020	Côtiers du Loup au Var	Cagne 95	96
40	2091		NA	Côtiers de la Gisle à l'Argens	Preconil 60	58
41	2256		NA	Côtiers du Gapeau au cap Bénat	Maravenne 75	77
42	2749		NA	Côtiers du cap Bénat au vallon de Valescure	Batailler 30	25
43	2830		NA		Roya Italie 470	471
44	2851		NA	Le Paillon du Paillon de Contes à la mer Méditerranée	Paillons 245	241
45	2904		NA		Bevera Italie 130	133
46	1125_1126		NA	Côtiers de l'Argens à la Siagne	Garonne 30	30

Appendice B : Liste des Figures et des Tableaux

Figure 1 : Méthode américaine de détermination de la pluie critique FFG à partir de la courbe pluie – débit et du débit seuil de débordement	8
Figure 2 : Exemple de carte de pluie critique FFG produite au National Weather Service au format raster pour la durée de 3h	8
Figure 3 : Chaîne d’alerte des crues éclairs du National Weather Service, basée sur l’estimation de la pluie critique FFG et de sa comparaison avec les pluies observées et attendues	9
Figure 4 : 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)	10
Figure 5 : Couplage du système AIGA et de la méthode Flash Flood Guidance pour la cartographie des pluies critiques de bassin par quantile de débit et par durée	11
Figure 6 : Carte des 13 bassins versants sélectionnés pour l’évènement du 15-16 juin 2010 .12	
Figure 7 : Cumul journalier de pluie du 15 juin 2010 6TU au 16 juin 2010 6TU pour les stations pluviométriques et la lame d’eau Panthère issu du système radar de Météo-France .13	
Figure 8 : Hydrogrammes de crue simulés par AIGA du 14 juin 2010 0:45TU au 16 juin 2010 23:45TU pour l’Aille à Vidauban et le Réal au pont SNCF des Arcs	13
Figure 9 : Carte des 46 bassins versants à enjeux sélectionnés par le SPC Med-Est pour les évènements d’octobre et novembre 2011 et graphe de distribution de leurs surfaces	14
Figure 10 : Cumul journalier de pluie pour les évènements d’octobre et novembre 2011 pour la lame d’eau Antilope de Météo-France, issue du signal radar corrigé par les mesures des stations pluviométriques	14
Figure 11 : Hydrogramme de crue simulé par AIGA correspondant à la pluie critique FFG de 75mm/3h pour la date du 15 juin 2010 11h45 (TU) et le seuil de débit décennal pour le bassin du Réal au pont SNCF des Arcs	17
Figure 12 : Carte des pluies critiques pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour la date d’initialisation du 5 novembre 2011- 14TU	22
Figure 13 : Cartes des pluies critiques pour les durées de 6h et 24h et le seuil de débit décennal pour la date d’initialisation du 5 novembre 2011- 14TU	23
Figure 14 : Graphe de comparaison des pluies critiques pour les durées de 3h à 24h et le seuil de débit décennal pour la date d’initialisation du 5 novembre 2011- 6TU	23
Figure 15 : Evolution du 5 novembre 2011 de 12TU à 15TU des cartes de pluies critiques, avec réactualisation horaire, pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal	24
Figure 16 : Cartes d’alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU	26
Figure 17 : Cartes des différences entre prévision de pluie parfaite et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d’initialisation du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU	28
Figure 18 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d’initialisation du 5 novembre 2011 à 16TU et 17TU	29

Figure 19 : Cartes de pluies critiques pour les durées de 3h, 6h et 24h pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 4 novembre 2011 de 5TU à 23TU.....	32
Figure 20 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 5TU à 7TU	33
Figure 21 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 7TU à 11TU	33
Figure 22 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU	34
Figure 23 : Cartes des différences entre prévision parfaite de pluie et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU	35
Figure 24 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 11TU à 18TU	35
Figure 25 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 10TU pour le bassin de l'Argens – Carcès (#3).....	38
Figure 26 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 11TU pour le bassin du Caramy (#2).....	38
Figure 27 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 13TU pour le bassin de l'Argens-Les Arcs Roquebrune (#10)	39
Figure 28 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 8TU à 13TU pour le bassin du Gapeau-Soliès (#29)	39
Figure 29 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 15TU à 19TU pour le bassin de l'Argens-Reyran (#14).....	40
Figure 30 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 17TU à 20TU pour le bassin de la Siagne (#15).....	40
Figure 31 : Graphe de comparaison des pluies critiques et des 2 cumuls de prévisions de pluie pour le seuil de débit décennal et les dates d'initialisation du 5 novembre 2011 de 19TU à 23TU pour le bassin du Loup (#16).....	41
Figure 32 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit biennal pour les dates du 25 octobre 2011 de 3TU à 7TU, ainsi qu'à 11TU	42
Figure 33 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 24 octobre 2011-20TU au 25 octobre 2011-6TU.....	43
Figure 34 : Cartes des différences entre prévision parfaite de pluie et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 25 octobre 2011 de 0TU à 6TU	44

Figure 35 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit biennal pour les dates d'initialisation du 25 octobre 2011 de 0TU à 6TU	44
Figure 36 : Cartes d'alerte AIGA pour le seuil de débit décennal pour les dates du 15 juin 2010 de 12:45TU à 16:45TU	46
Figure 37 : Cartes de pluie critique pour la durée de 3h pour le seuil de débit décennal pour les dates du 15 juin 2010 de 11:45TU à 16:45TU	47
Figure 38 : Cartes des différences entre prévision parfaite de pluie et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 15 juin 2010 de 10:45TU à 15:45TU	48
Figure 39 : Cartes des différences entre prévision de pluie persistante et pluie critique pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal pour les dates d'initialisation du 15 juin 2010 de 10:45TU à 15:45TU	48
Tableau 1 : Caractéristiques des pluies critiques pour les durées de 1h à 24h	17
Tableau 2 : Evolution du 5 novembre 2011 de 12TU à 15TU des valeurs de pluie critique, avec réactualisation horaire, pour la durée de 3h et le seuil de débit décennal	25
Tableau 3 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit décennal et les dates du 5 novembre 2011 de 11TU à 21TU	36
Tableau 4 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit biennal et les dates du 25 octobre 2011 de 2TU à 11TU	45
Tableau 5 : Evolution des bassins mis en alerte avec le système AIGA et avec des avertissements de niveau 2 pour le système AIGA-FFG avec les 2 types de prévision pour le seuil de débit décennal et les dates du 15 juin 2010 de 10:45TU à 16:45TU	49