



HAL
open science

Étude du passage de la modélisation hydrologique de AIGA au pas de temps infra-horaire

D. Organde, A. Maire, P. Javelle

► **To cite this version:**

D. Organde, A. Maire, P. Javelle. Étude du passage de la modélisation hydrologique de AIGA au pas de temps infra-horaire. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.26. hal-02606082

HAL Id: hal-02606082

<https://hal.inrae.fr/hal-02606082>

Submitted on 16 May 2020

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

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



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



PROGRAMME MEDDE (DGPR / SRNH) - Iristea 2015

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère chargé de l'Ecologie

par décision de subvention n°2101527675

Action « prévision des inondations »

AXE III : « Avertissement crues soudaines en site non jaugé »

A. Recherches et développements : Amélioration du produit « Crues Soudaines »

A1. ÉTUDE DU PASSAGE DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE AU PAS DE TEMPS INFRA-HORAIRE

Auteurs : Didier Organde et Alexis Maire (HYDRIS)

Suivi : Pierre Javelle (Iristea)

SOMMAIRE

Avant-propos.....	4
1 Données.....	5
1.1 Données de pluie.....	5
1.2 Données de débit.....	6
2 Analyse préliminaire sur les débits « observés ».....	9
2.1 Méthode.....	9
2.2 Bassins versants retenus pour l'analyse.....	11
2.3 Résultats.....	13
2.3.1 Gain en anticipation.....	13
2.3.2 Détection des dépassements de seuil.....	14
2.4 Conclusion.....	16
3 Application aux débits modélisés.....	17
3.1 Rappel de la modélisation mise en œuvre dans AIGA.....	17
3.2 Passage des paramètres 1h aux paramètres 15 min.....	18
3.3 Méthode d'évaluation.....	19
3.4 Résultats.....	21
Conclusion et perspectives.....	25
Bibliographie.....	26

Table des illustrations

Figure 1 : Médiane des rapports Pradar/Ppluvio pour les cumuls en 24 h supérieurs à 20 mm pour les années 2008 à 2012 (source Météo France).....	5
Figure 2 : Exemple d'une valeur aberrante de pluie (journée du 2 juillet 2012) et incidence sur le débit simulé : le débit « observé » est représenté par la courbe noire, le débit simulé par la courbe rouge.....	6
Figure 3 : Localisation des exutoires des 719 stations retenues.....	7
Figure 4 : Exemples d'hydrogrammes « suspects ».....	8
Figure 5: Exemple d'une crue dont le quantile de période de retour 2 ans est dépassé par l'hydrogramme « observé » (débit instantané, courbe bleue) et par l'hydrogramme de débit moyen horaire, horaire glissant 15 minutes, 15 minutes glissant 5 minutes et 5 minutes (courbes rouges).....	11
Tableau 1 : liste des 26 stations retenues de superficie inférieure à 20 km ²	12
Figure 6: Localisation des 26 stations de moins de 20 km ²	12
Figure 7 : décalage temporel en heure entre le dépassement de seuil « observé » et le déclenchement de l'avertissement en fonction des pas de temps 60 minutes, 60 minutes glissant, 15 minutes, 15 minutes glissant et 5 minutes.....	13
Tableau 2 : Décalage temporel moyen de l'avertissement par rapport au dépassement « observé » selon le pas de temps utilisé.....	14
Tableau 3 : Nombre total d'avertissements selon le pas de temps et le quantile utilisé (Qp : débit de pointe instantané ; QM: débit moyen sur le pas de temps considéré).....	14
Figure 8 : Nombre d'avertissements par bassin versant selon le pas de temps et le quantile utilisé.....	15
Figure 9 : Exemple de 2 crues pour lesquelles la prise en compte du débit moyen horaire conduit à manquer l'avertissement.....	15
Figure 10 : Schéma de principe de la modélisation hydrologique de la méthode AIGA.....	18
Figure 11 : Comparaison entre le critère de Nash (calculé par rapport aux observations aux 719 stations) issu de l'optimisation du modèle horaire et le critère de Nash sur les débits du modèle « 15 min ».....	19
Tableau 4 : Tableau de contingence pour un seuil d'alerte.....	19
Figure 12 : Cartographie des 9 hydro-écorégions (HER).....	21
Figure 13: Critères CSI_ant dans les 3 configurations étudiées selon la zone géographique (à gauche), la superficie du bassin versant (au milieu) et Dmoy (à droite).....	22
Figure 14: Scores de contingences aux 40 plus petits bassins versants de l'échantillon.....	22
Figure 15: Scores de contingences aux 40 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy.....	23
Figure 16: Anticipation en heure aux 40 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy.....	23
Figure 17: Anticipation en heure aux 10 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy.....	24

Avant-propos

Dans le cadre de son action pour la prévision des inondations, le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) prévoit la mise en service (courant 2016) d'un système d'avertissement des crues soudaines basé sur la méthode AIGA améliorée ces dernières années pour être étendue au territoire national. Des pistes d'amélioration du système sont étudiées pour une application ultérieure. Une de ces améliorations consiste à passer le modèle hydrologique du pas de temps horaire au pas de temps infra-horaire.

L'objectif du travail présenté dans ce rapport est, d'une part d'évaluer le gain en anticipation sur le déclenchement des avertissements que peut apporter le passage au pas de temps infra-horaire, et d'autre part de vérifier la pertinence des avertissements émis en fonction du pas de temps utilisé.

Pour répondre à ces questions, les travaux suivants ont été réalisés :

- Tout d'abord, une étude préliminaire uniquement sur les **débits observés** qui a consisté à évaluer l'impact de la discrétisation à différents pas de temps ;
- Ensuite, une analyse similaire en considérant les **débits modélisés** par la méthode AIGA.

Dans les deux cas (débits observés et modélisés), la référence des alertes est constituée par les **débits observés instantanés**.

Le présent rapport constitue le livrable 0040 de la commande n°4500261229 du 14/04/2015 du marché « Mise en œuvre de la méthode AIGA » n°2014-01-16 conclu entre IRSTEA et Hydris-hydrologie.

1 Données

1.1 Données de pluie

Météo France a mis à notre disposition, par l'intermédiaire du SCHAPI, les lames d'eau PANTHERE au pas de temps 15 min et les lames d'eau ANTILOPE V2 au pas de temps horaire sur la période de juillet 2006 à juillet 2015. La qualité de la lame d'eau radar s'étant significativement améliorée à partir de l'année 2009 (voir figure 1, rapport des pluies radar et des pluies au sol pour des cumuls supérieurs à 20 mm en 24h), nous choisissons d'exploiter la période 2009-2015. Néanmoins, l'année 2008 servira à initialiser les niveaux des réservoirs des modèles journaliers (« année de chauffe »).

Les simulations au pas de temps horaire et infra-horaire utilisent la donnée PANTHERE, les simulations au pas de temps 24h utilisent la donnée ANTILOPE V2.

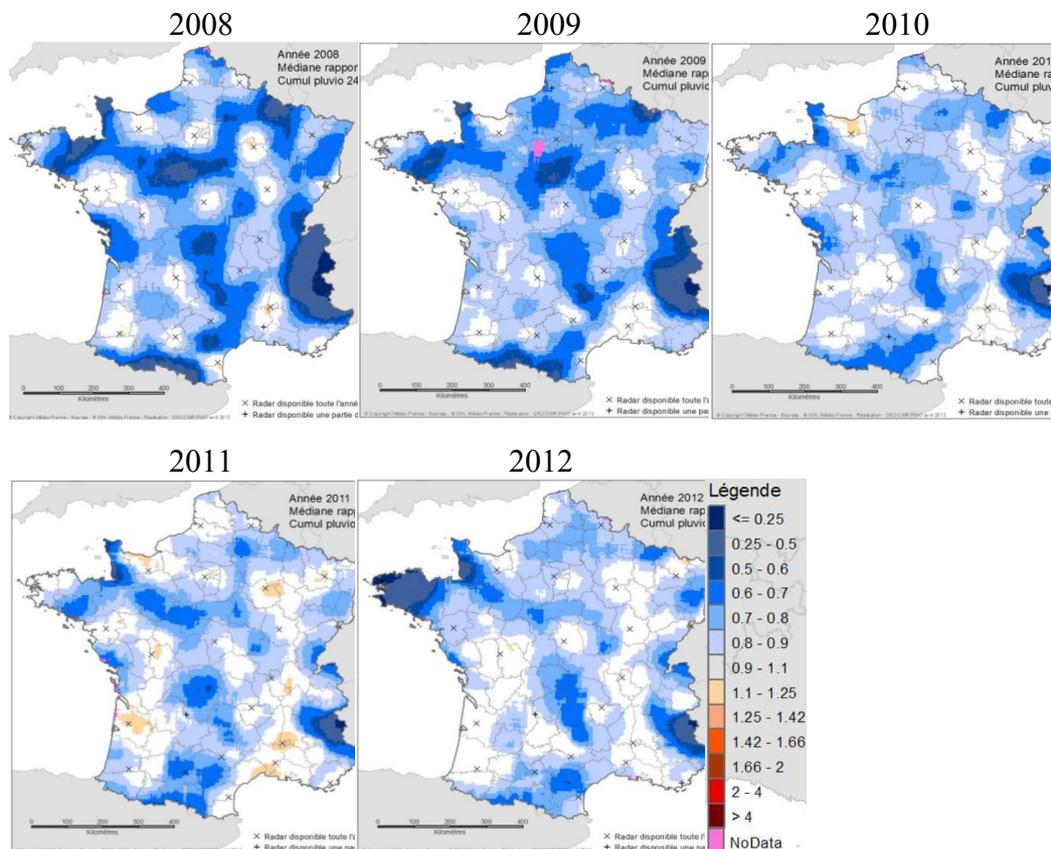


Figure 1 : Médiane des rapports Pradar/Ppluvio pour les cumuls en 24 h supérieurs à 20 mm pour les années 2008 à 2012 (source Météo France)

Notons que pour l'année 2013, les seules données mises à notre disposition pour la lame d'eau PANTHERE 15 minutes, sont une journée au mois de juin et 10 journées au mois de décembre.

Une inspection visuelle des données de pluie ANTILOPE V2 a mis en évidence des cumuls anormalement forts. Nous avons tracé les cartes de pluie des 50 plus forts cumuls journaliers

de la chronique 2008-2015 et bon nombre de ces cartes semblent contenir des valeurs aberrantes.

La détermination des événements pour évaluer la modélisation étant effectuée sur un seuil de cumul de pluie journalière de bassin dépassant 10 mm, ces artefacts peuvent conduire à générer des fausses alertes par le modèle hydrologique.

Les graphiques de la figure 2 traduisent, avec l'exemple du 2 juillet 2012, l'incidence sur les débits simulés de ces données de pluie. On note un cumul en 24 h de 988 mm qui impacte le bassin versant U2305210. La simulation hydrologique conduit à un débit de pointe (courbe rouge) de l'ordre de 50 m³/s (plus forte crue simulée sur la période étudiée) alors que le débit observé est proche de 0 (courbe noire).

Aussi, avons-nous décidé de ne pas retenir d'événements les jours où de tels artefacts sont observés, c'est à dire les journées suivantes : 04-10-2010, 19-11-2011, 20-11-2011, 02-07-2012 et 03-07-2012.

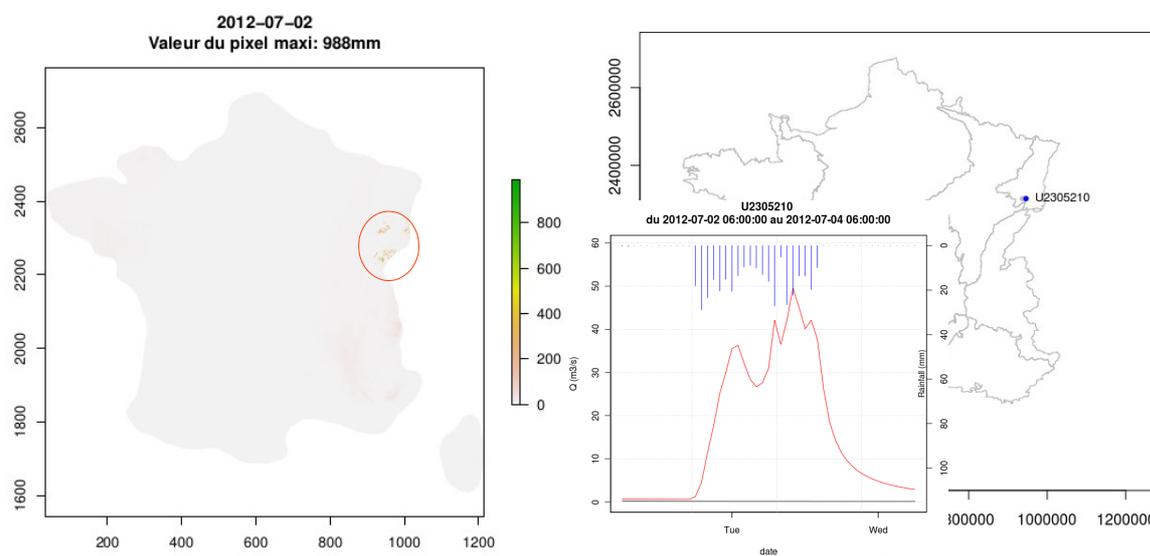


Figure 2 : Exemple d'une valeur aberrante de pluie (journée du 2 juillet 2012) et incidence sur le débit simulé : le débit « observé » est représenté par la courbe noire, le débit simulé par la courbe rouge

1.2 Données de débit

Les données QTVAR des 719 stations (figure 3) ayant servi à l'élaboration de la version 2014 de AIGA sont utilisées (Organde, 2013, 2014).

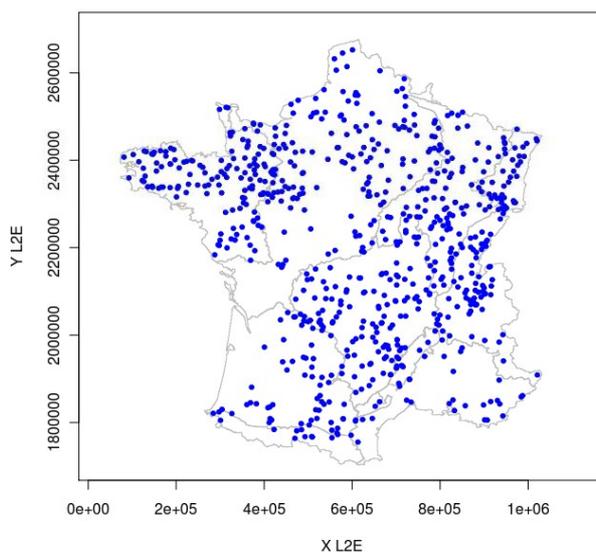


Figure 3 : Localisation des exutoires des 719 stations retenues

Une inspection visuelle du tracé des débits QTVAR sur la période 2002-2015 a permis de détecter des incohérences flagrantes au niveau des données qui ont été corrigées. Certaines valeurs sont passées en lacune. La figure 4 illustre quelques exemples rencontrés :

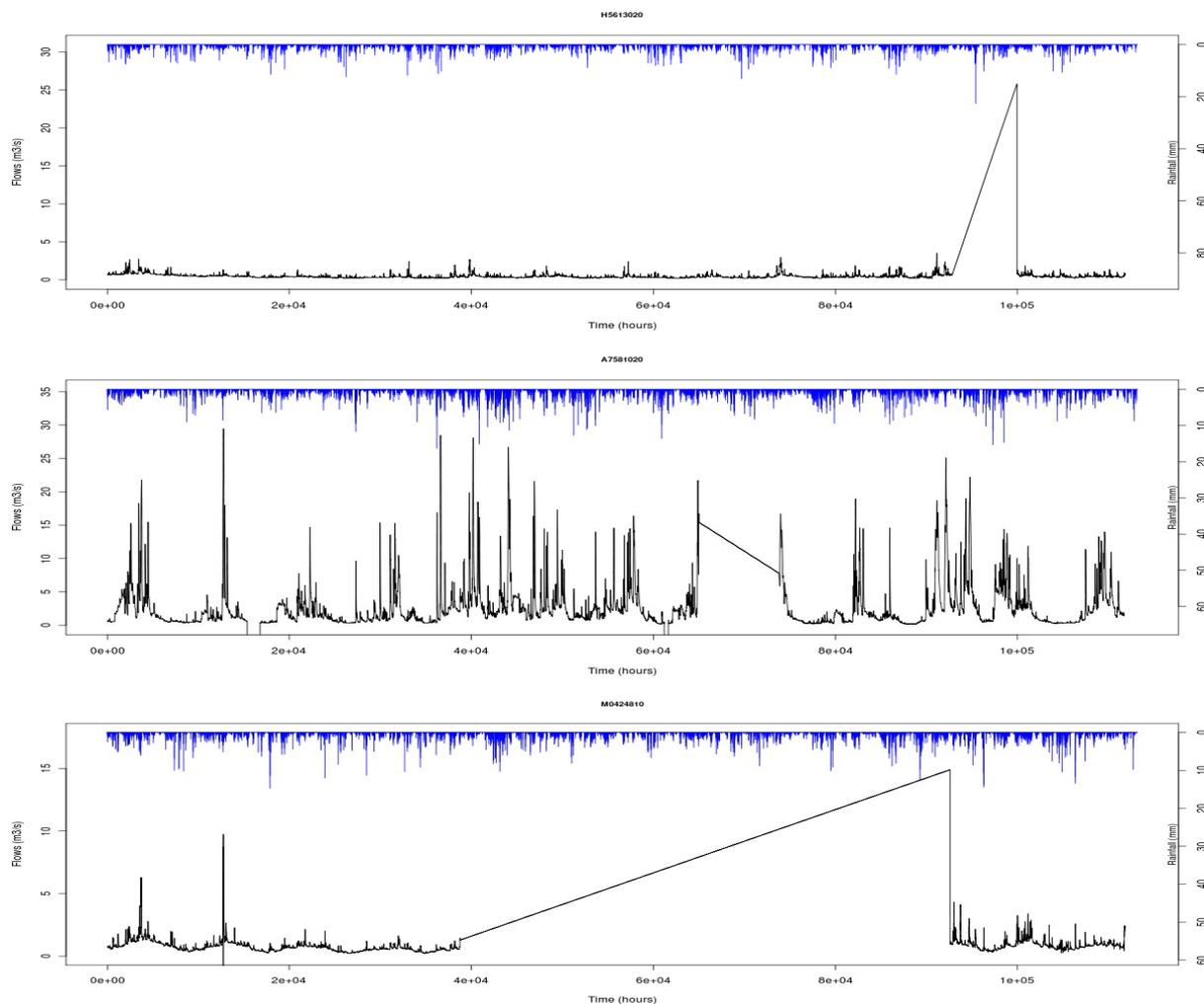


Figure 4 : Exemples d'hydrogrammes « suspects »

Les portions de droite observées sur ces graphiques ne paraissent pas cohérentes. De telles valeurs présentes dans les données conduisent à définir des événements très longs et/ou avec un débit de pointe visiblement surestimé. Ces portions de droite ont donc été définies en lacunes.

2 Analyse préliminaire sur les débits « observés »

Pour cette analyse, nous travaillons à partir de débits instantanés « observés » (données QTVAR de la banque HYDRO). De cette donnée, nous générons des chroniques de débits moyens pour différents pas de temps. Pour l'analyse, ces séries de débits moyens sont assimilées à des débits simulés par un modèle « parfait » au même pas de temps. Les conditions d'émissions des avertissements générés par ces séries de débits moyens sont comparées aux dépassements de seuils de la série de débits instantanés constituant notre référence et l'objectif à atteindre.

Ainsi, nous pouvons analyser l'impact du changement du pas de temps indépendamment des erreurs de la modélisation.

2.1 Méthode

La base nationale de bassins versants (BNBV), qui servira à l'application du produit « Crues Soudaines », contient une part significative de « petits » bassins versants. Par exemple, sur l'ensemble des bassins versants de la Métropole, 41 % ont une superficie comprise entre 5 km² et 10 km². Or, ce sont certainement ces « petits » bassins versants qui présentent les temps de réaction les plus courts et pour lesquels l'apport de la modélisation au pas de temps infra-horaire apportera potentiellement un gain au niveau de l'anticipation des avertissements.

L'objectif de cette analyse est donc de comparer, pour un échantillon de « petits » bassins versants, les instants auxquels le dépassement de seuil est détecté pour différents hydrogrammes de débit moyen en 1 heure, 15 minutes et 5 minutes par rapport au dépassement réellement « observé ». Nous générons également des hydrogrammes constitués de débits moyens horaires glissant tous les ¼ d'heure et des hydrogrammes constitués de débits moyens 15 minutes glissant toutes les 5 minutes ; ceci correspondrait à des débits calculés (modèle « parfait »), respectivement par 4 chaînes parallèles de modélisation au pas de temps horaire décalées de 15 minutes et 3 chaînes parallèles de modélisation au pas de temps 15 minutes décalées de 5 minutes.

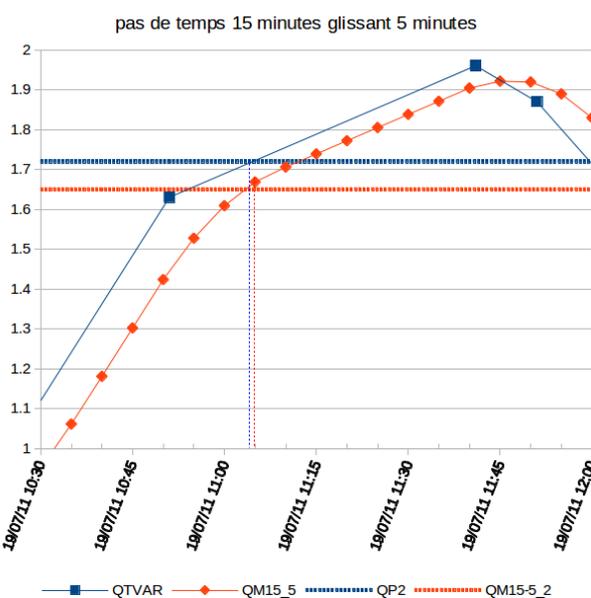
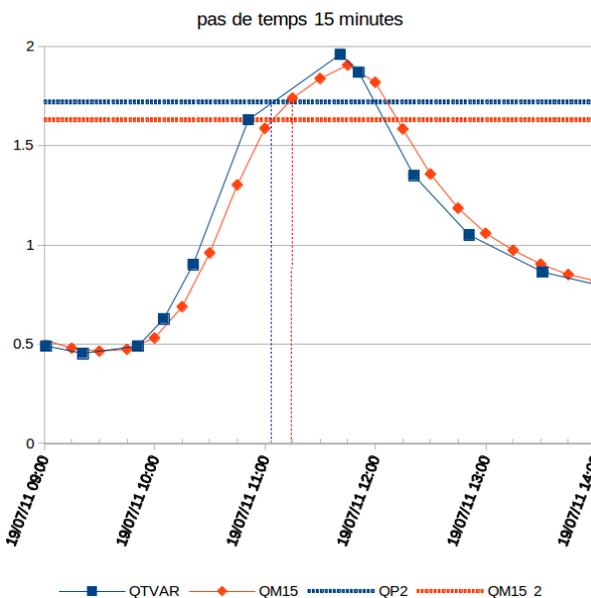
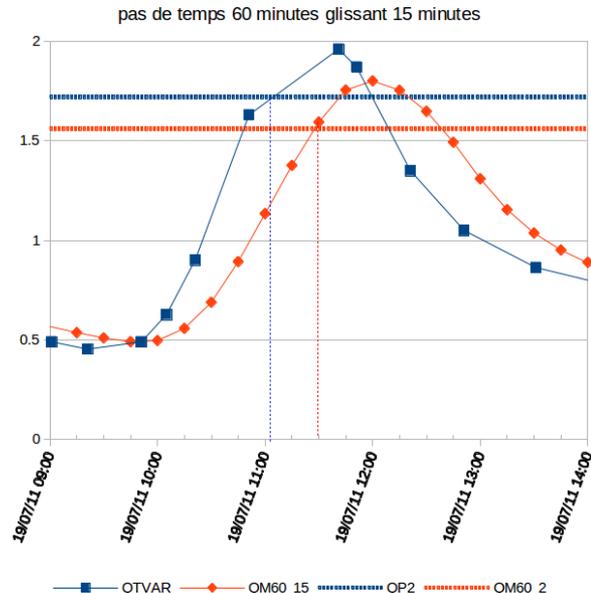
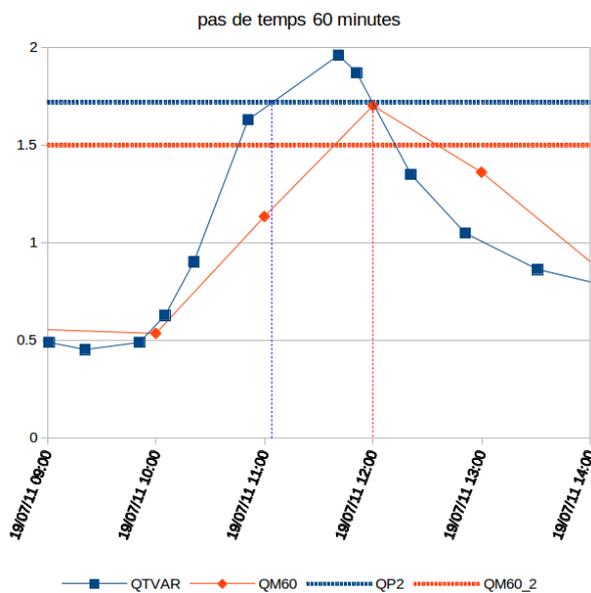
Pour chaque chronique de débits instantanés, les instants des dépassements de seuil sont identifiés. De même, pour les différentes chroniques de débit moyen les instants correspondant au déclenchement de l'avertissement sont identifiés : il s'agit là du premier instant pour lequel le débit moyen sur le pas de temps dépasse un seuil fixé.

Le seuil utilisé pour les déclenchement d'avertissements à partir des débits moyens doit être en cohérence avec le pas de temps utilisé. Aussi, pour les pas de temps horaire, horaire glissant, 15 minutes, 15 minutes glissant et 5 minutes, le quantile de période de retour 2 ans a été calculé par ajustement statistique (GEV à 3 paramètres) à partir des maximums annuels de ces mêmes pas de temps.

La figure 5 représente la même crue représentée sur chaque graphique d'une part par les données d'observations à pas de temps variable (courbe bleue) et d'autre part par le débit moyen horaire, horaire glissant, 15 minutes, 15 minutes glissant et 5 minutes (courbe rouge) obtenu à partir de la donnée d'observation. Les deux lignes horizontales bleu et rouge représentent respectivement le quantile de période de retour 2 ans des débits de pointe et des débits moyens.

Le dépassement du seuil de débit de pointe d'occurrence 2 ans est « observé » (courbe bleue relative aux débits instantanés QTVAR) peu après 11:00. Selon le pas de temps choisi, l'avertissement est déclenché :

- à 12:00, pour le pas de temps horaire, soit un retard de moins d'une heure ;
- à 11:30, pour le pas de temps horaire glissant, soit un retard de moins d'une demi-heure ;
- à 11:15, pour le pas de temps 15 minutes, soit un retard de moins d'un quart d'heure ;
- à 11:05, pour le pas de temps 5 minutes et le pas de temps 15 minutes glissant, soit quasi-simultanément avec le dépassement « observé ».



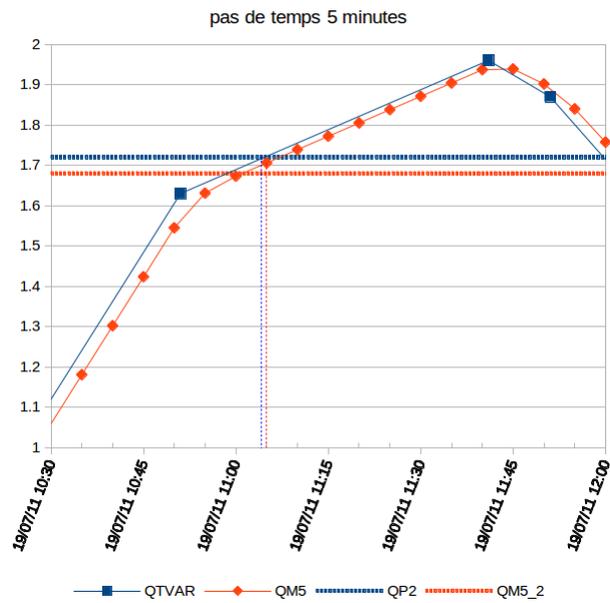


Figure 5: Exemple d'une crue dont le quantile de période de retour 2 ans est dépassé par l'hydrogramme « observé » (débit instantané, courbe bleue) et par l'hydrogramme de débit moyen horaire, horaire glissant 15 minutes, 15 minutes, 15 minutes glissant 5 minutes et 5 minutes (courbes rouges)

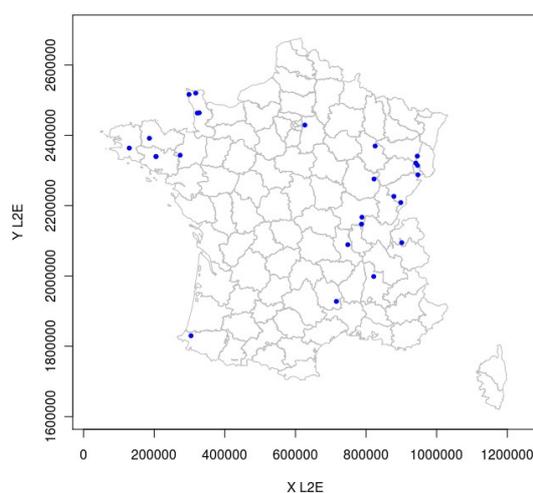
Cette analyse est généralisée sur un échantillon de « petits » bassins versants et sur plusieurs crues.

2.2 Bassins versants retenus pour l'analyse

Nous avons retenu 26 stations hydrométriques de superficie inférieure à 20 km² issues de la sélection des bassins versants utilisés pour le calage et la régionalisation de la méthode AIGA en 2014 (tableau 1 et figure 6).

Tableau 1 : liste des 26 stations retenues de superficie inférieure à 20 km²

Code	Nom	Superficie
A1202050	La Doller a Sewen [Lerchenmatt]	8.5 km ²
A1402020	La Thur a Wildenstein	7.6 km ²
H5053210	La Manoise a Humberville	15.0 km ²
H5833010	Le ru de la Gondoire a Gouvernes [Deuil]	19.6 km ²
I6502010	La Taute a Saint-Sauveur-Lendelin	17.5 km ²
I6943010	Le Trottebec a la Glacerie [Le Val Joli]	14.8 km ²
I6964010	Le Petit Douet a Heauville	11.5 km ²
I6983010	L_Ay a Ancteville	9.3 km ²
J4214510	Le Langelin a Briec [Pont D72]	7.0 km ²
J5202110	Le Blavet a Kerien [Kerlouet]	20.6 km ²
J5205210	Le Lestolet a Kerien	14.2 km ²
J5618310	Le Fremeur a Guenin	15.1 km ²
J5618320	Le Fremeur a Plumeliau	5.9 km ²
J7364220	La Cheze a Plelan-le-Grand [L_Enlevrier]	9.3 km ²
K0724510	Le Chanasson a Civens [La Riviere]	12.7 km ²
O3006710	La Goudech a Saint-Maurice-de-Ventalon [La Cepede]	10.0 km ²
Q8345910	Le Mendialçu à Hasparren	17.9 km ²
U1115210	Le Pannecul a Noiron-sur-Beze [Rente de l_Ile]	11.5 km ²
U2035050	Le Dugeon a Vaux-et-Chantegreue	13.0 km ²
U2305210	Le St-Nicolas a Rougemont-le-Chateau	9.0 km ²
U2330600	La Feschotte a Badevel	9.7 km ²
U2616410	Le Verneau à Nans-sous-Sainte-Anne	11.0 km ²
U3485310	Le Ru de Bissy a Bissy-la-Maconnaise	5.5 km ²
U4305410	La Denante a Davaye	11.1 km ²
V1235420	La Bornette a Lathuile	11.6 km ²
V4015030	La Barberolle a Barbieres [Pont des Ducs]	9.6 km ²

*Figure 6: Localisation des 26 stations de moins de 20 km²*

Nous avons sélectionné sur la période 2007-2014 les événements pour lesquels la pluie journalière de bassin dépasse 10 mm.

2.3 Résultats

2.3.1 Gain en anticipation

Pour chaque bassin versant et chacune des crues, le décalage temporel entre le dépassement de seuil « observé » et le déclenchement de l'avertissement est calculé comme explicité au 2.1. Pour chaque bassin versant et chaque pas de temps, la valeur médiane de ce décalage temporel est représenté sur le graphique de la figure 7.

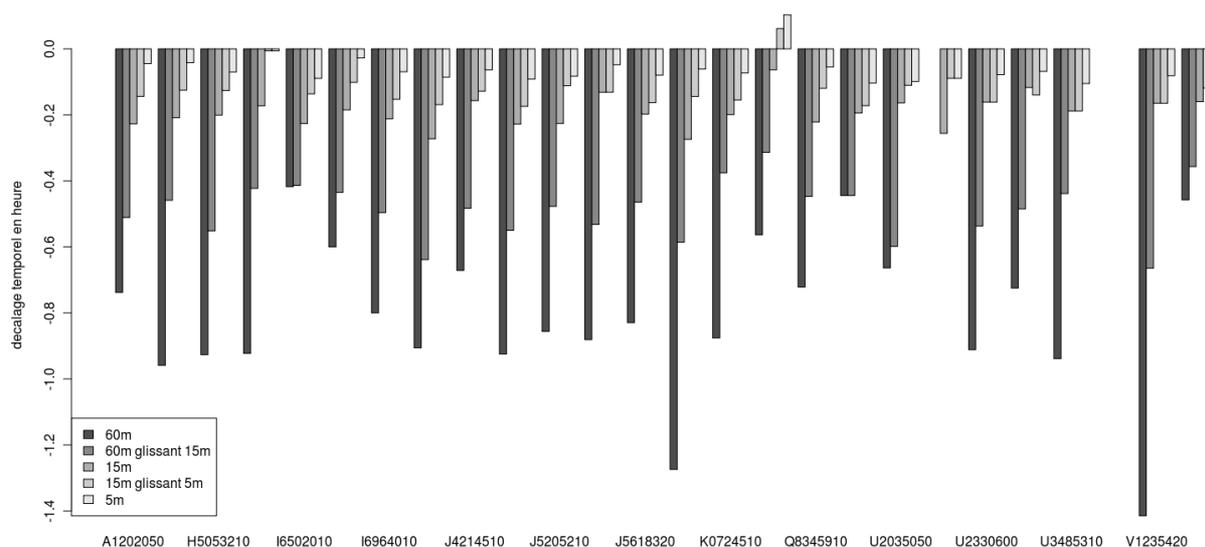


Figure 7 : décalage temporel en heure entre le dépassement de seuil « observé » et le déclenchement de l'avertissement en fonction des pas de temps 60 minutes, 60 minutes glissant, 15 minutes, 15 minutes glissant et 5 minutes

Quelques soient les bassins versants, le passage au pas de temps 15 minutes réduit significativement le retard avec le dépassement « observé ». Avec un pas de temps à 5 minutes, le retard devient très faible. L'utilisation de chaînes de calcul en parallèle (horaire glissant 15 minutes et 15 minutes glissant 5 minutes) permet également d'apporter un gain significatif par rapport à la chaîne simple. Le tableau 2 présente la moyenne de ces décalages temporels selon le pas de temps utilisé. Ce décalage est logiquement proche et légèrement inférieur au pas de temps utilisé. On entrevoit ici l'intérêt de passer la modélisation hydrologique à un pas de temps infra-horaire. L'utilisation du pas de temps 15 minutes avec 3 chaînes de calcul décalées de 5 minutes pourrait présenter un intérêt notable.

Tableau 2 : Décalage temporel moyen de l'avertissement par rapport au dépassement « observé » selon le pas de temps utilisé

Pas de temps	60 min	60 min glissant	15 min	15 min glissant	5 min
Décalage temporel moyen de l'avertissement par rapport au dépassement « observé »	49 min	29 min	12 min	8 min	4 min

2.3.2 Détection des dépassements de seuil

L'objectif est de vérifier la pertinence des déclenchements d'avertissements par les hydrogrammes de débits moyens par rapport aux dépassements de seuil par les débits instantanés. On peut supposer, a priori, que l'utilisation d'un quantile de débit de pointe pour générer des avertissements à partir d'hydrogrammes de débit moyen n'est pas adapté et conduirait à une sous-estimation du nombre d'avertissements. C'est ce que nous constatons dans le tableau 3 qui comptabilise les bonnes alertes (BA), les alertes manquées (AM) et les fausses alertes (FA) en fonction de la configuration choisie. Les configurations QM60/Qp, QM60-15/Qp, QM15/Qp, QM15-5/Qp et QM5/Qp correspondent au cas où l'avertissement est généré si le débit moyen dépasse le quantile de débit de pointe. Dans ce cas de figure, l'utilisation du pas de temps 60 minutes conduit à un nombre significatif d'alertes manquées (environ 10%) et un peu moins marqué avec le pas de temps 60 minutes glissant. Pour le pas de temps 15 minutes et 5 minutes, l'utilisation d'un quantile de débit de pointe est moins compromettant pour les résultats.

L'utilisation du quantile de débit moyen pour le pas de temps horaire (QM60/QM) permet de réduire significativement le nombre d'« alertes manquées » (4).

L'utilisation des hydrogrammes obtenus avec 4 chroniques de débit 60 minutes décalées de 15 minutes et ceux obtenus avec 3 chroniques de débit 15 minutes décalées de 5 minutes modifient peu les performances globales par rapport la détection des dépassements de seuil.

Tableau 3 : Nombre total d'avertissements selon le pas de temps et le quantile utilisé (Qp : débit de pointe instantané ; QM: débit moyen sur le pas de temps considéré)

	60 minutes				15 minutes				5 minutes	
	QM60/Qp	QM60/QM	QM60-15/Qp	QM60-15/QM	QM15/Qp	QM15/QM	QM15-5/Qp	QM15-5/QM	QM5/Qp	QM5/QM
BA	138	148	143	149	150	151	151	152	152	152
AM	14	4	9	3	2	1	1	0	0	0
FA	0	2	0	4	0	1	0	0	0	0

Le graphique de la figure 8 comptabilise le nombre d'avertissements pour chaque bassin versant en fonction de la configuration retenue.

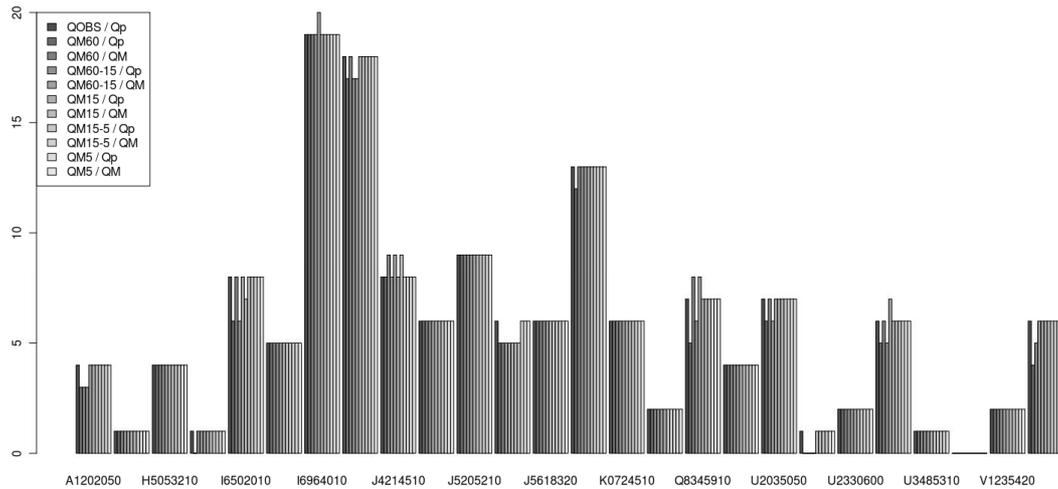


Figure 8 : Nombre d'avertissements par bassin versant selon le pas de temps et le quantile utilisé

A titre d'exemple, nous avons représenté (figure 9) deux crues pour lesquelles l'utilisation du pas de temps horaire conduit à manquer un dépassement de seuil sur les débits instantanés. Chaque rangée de graphique correspond à la même crue. La courbe noire est la donnée d'« observation » (donnée instantané QTVAR de la banque HYDRO), la courbe bleue est le débit moyen sur 60 minutes, 15 minutes et 5 minutes. Les lignes horizontales noires et bleues figurent respectivement le quantile d'occurrence biennal de pointe et le quantile d'occurrence biennale sur le pas de temps correspondant.

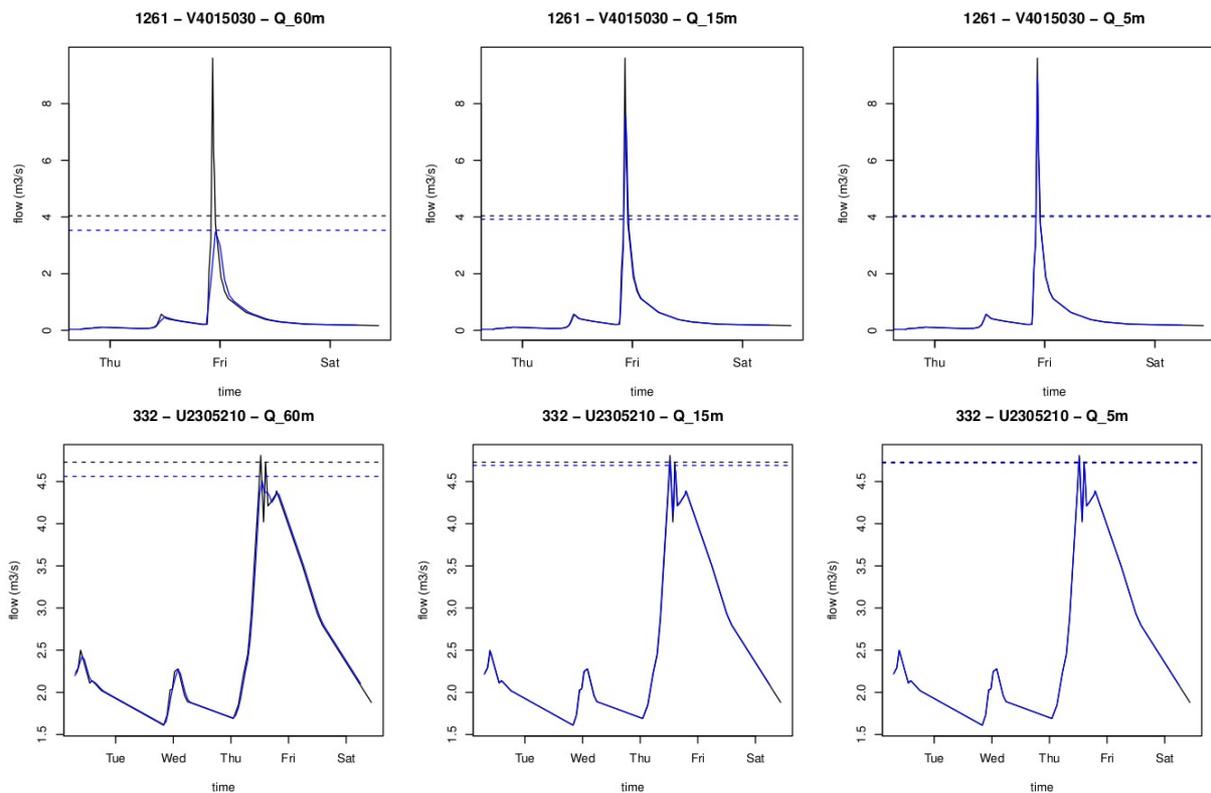


Figure 9 : Exemple de 2 crues pour lesquelles la prise en compte du débit moyen horaire conduit à manquer l'avertissement

2.4 Conclusion

Notre analyse porte sur un échantillon de « petits » bassins versants. Ceux-ci sont fortement représentés dans la BNBV et il est supposé que l'incidence du passage au pas de temps infra-horaire sera significative pour cette catégorie de bassins versants. On peut néanmoins regretter de disposer de si peu de bassins versants jaugés de « petite » taille pour mener notre analyse. Pour la suite de l'étude, nous introduisons un indicateur de la réactivité du bassin versant.

L'analyse réalisée à partir des « observations » montre que le passage du modèle hydrologique à un pas de temps infra-horaire peut apporter un gain significatif pour l'anticipation des avertissements. Le choix du pas de temps (15 minutes ou 5 minutes) doit faire l'objet d'un compromis entre l'efficacité du système et les contraintes matérielles de mise en œuvre de la modélisation. Néanmoins, d'après cette première approche, l'utilisation de 3 chaînes décalées de 5 minutes d'un modèle hydrologique au pas de temps 15 minutes pourrait constituer une configuration optimale. Pour la suite de l'étude, pour des raisons de temps de calcul, ce scénario ne sera pas étudié.

Lorsqu'on s'intéresse à la pertinence des avertissements en fonction du pas de temps choisi, on note qu'il est indispensable pour le pas de temps horaire d'utiliser des seuils correspondants à des quantiles de débits moyens. Par contre, pour les pas de temps 15 minutes et 5 minutes, l'utilisation des quantiles de débit de pointe n'est pas préjudiciable.

3 Application aux débits modélisés

Trois configurations sont étudiées :

1. GRSD au pas de temps horaire (60M, paramètres du modèle calé en 2014) ;
2. GRSD au pas de temps horaire glissant toutes les 15 minutes (60M*4, paramètres du modèle calé 2014) ;
3. GRSD au pas de temps 15 minutes (15M, paramètres équivalents au modèle calé en 2014 (c.f. §2.2)). Modélisation hydrologique

3.1 Rappel de la modélisation mise en œuvre dans AIGA

Nous rappelons ici la modélisation hydrologique utilisée dans la méthode AIGA pour son application dans le service « Crues Soudaines ».

Comme le montre le schéma de la Figure 10, la modélisation hydrologique s'appuie sur le couplage de trois modèles (Organde, 2013) :

- le modèle événementiel horaire semi-distribué, noté GR-SD, utilise une production distribuée, calculée avec un réservoir de production en chaque pixel i , de capacité A_i , et un transfert global de bassin, estimé avec un unique réservoir de transfert, de capacité B .
- le modèle continu global journalier GR4J à quatre paramètres (Edijatno et al. 1999, Perrin 2002, et Perrin et al. 2003), qui fournit le débit journalier pour l'initialisation du niveau du réservoir de transfert du modèle horaire au début de l'événement ; le taux de remplissage initial du réservoir de transfert de GR-SD (R_0/B) est ajusté quotidiennement si la pluie journalière de bassin de la veille est inférieure à 10 mm afin de restituer le débit issu du modèle journalier global GR4J.
- le modèle continu distribué journalier GR3J (Edijatno et Michel 1989) qui fournit le taux de remplissage du réservoir $S_i A_i(J)$ au pixel i ; le taux de remplissage initial du réservoir de production du modèle GR-SD (S_{i0}/A_i) est ajusté quotidiennement si la pluie journalière de la veille au pixel est inférieure à 10 mm avec la relation suivante :
$$S_{i0}/A_i = a_i \cdot S_i A_i(J)$$

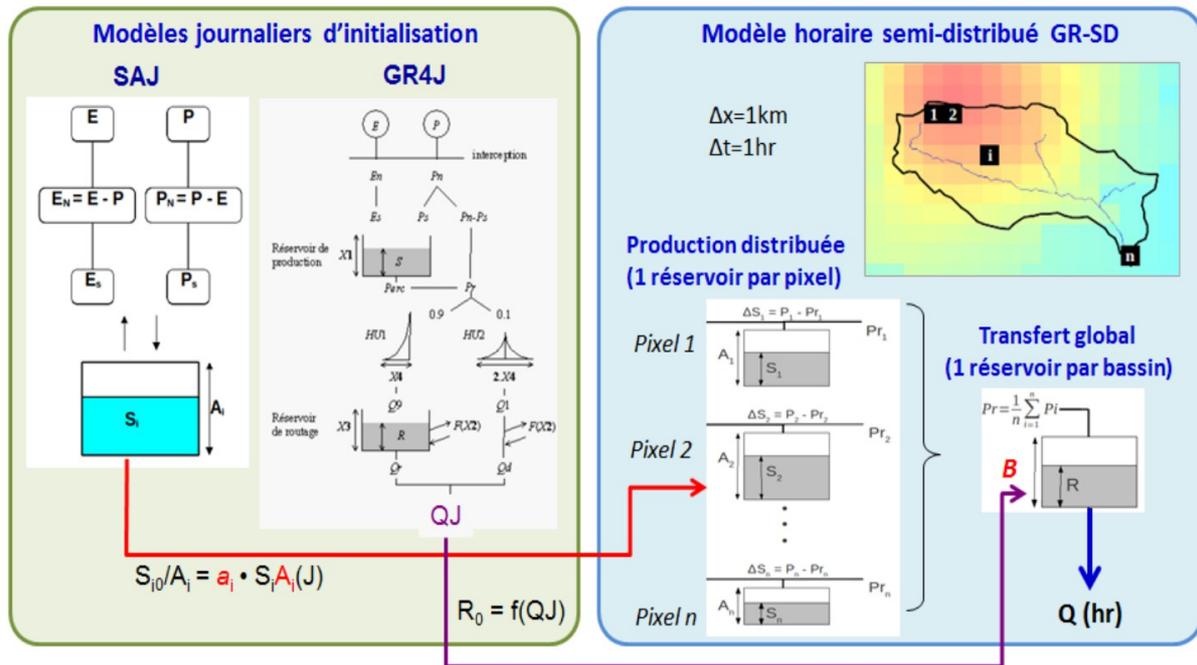


Figure 10 : Schéma de principe de la modélisation hydrologique de la méthode AIGA

Le volume du réservoir de production A a été fixé à 200 mm. Les paramètres a et B ont été calés et régionalisés sur la période 2002-2006 (Organde, 2013) et optimisés régionalement sur la période 2009-2012 (Organde, 2014).

3.2 Passage des paramètres 1h aux paramètres 15 min

Ces travaux constituent une première analyse de l'impact d'une modélisation hydrologique au pas de temps infra-horaire dans l'application de la méthode AIGA. Dans ce contexte, nous n'avons pas retenu la possibilité de caler les paramètres du modèle infra-horaire, trop consommateurs de temps de calcul (pré-traitement des données hydrométriques, calage du modèle hydrologique...). Notre choix s'est porté sur la détermination d'un paramétrage équivalent du modèle « 15 min » par rapport au modèle horaire sur des bases théoriques.

Pour se placer dans les conditions d'une modélisation optimale, nous retenons les paramètres calés localement sur la période 2002-2006 à partir des données COMEPHORE (Organde, 2013, 2014).

Pour une application du modèle GRSD au pas de temps infra-horaire, certaines adaptations des paramètres calés ou pré-déterminés sont nécessaires. Concernant la production, le volume du réservoir de production (A) ne dépend pas du pas de temps choisi, il reste donc fixé à 200 mm. La valeur du a_i dans la relation $S_{i0}/A_i = a_i \cdot S_i/A_i(J)$ reste inchangée.

Concernant le transfert, le débit sortant du réservoir B en un pas de temps étant proportionnel à sa capacité B , cette capacité doit être modifiée pour le pas de temps infra-horaire en respectant la formulation du débit sortant de B (Fine, 2009) :

$$Q(t) = \beta \cdot R(t)^5$$

avec, $Q(t)$: débit sortant à l'instant t

$R(t)$: niveau du réservoir B à l'instant t

$$\text{et } \beta = 1/(4.B^4.\Delta t)$$

avec, B : volume du réservoir de transfert (mm)
 Δt : pas de temps de la modélisation

On souhaite $Q(t)$ indépendant du pas de temps de la modélisation, ce qui implique que la valeur de β est constante quel que soit le pas de temps choisi. On aboutit donc à la relation suivante :

$$B_{\Delta t_1}^4.\Delta t_1 = B_{\Delta t_2}^4.\Delta t_2$$

On obtient alors une correspondance entre la valeur de B du modèle horaire et celle du modèle au pas de temps 15 minutes :

$$B_{15M} = B_{60M}.(60/15)^{1/4}$$

Afin de vérifier que cette paramétrisation théorique du modèle « 15 min » permet de restituer les débits observés de la même manière que le modèle horaire, nous comparons les critères de Nash obtenus aux 719 bassins versants pour le modèle horaire et le modèle 15 minutes (figure 11). En dehors de quelques stations pour lesquelles les performances sont assez différentes, la restitution des débits observés semble cohérente d'un modèle à l'autre.

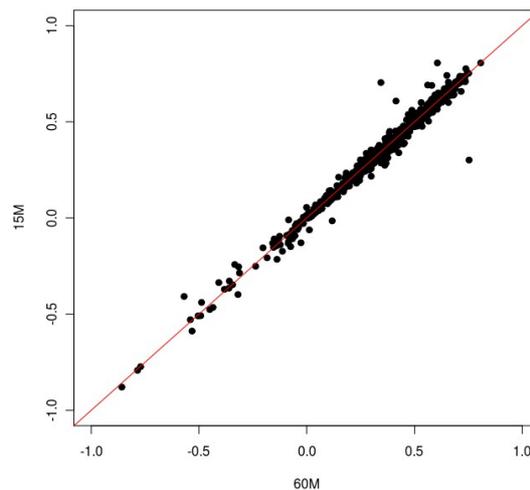


Figure 11 : Comparaison entre le critère de Nash (calculé par rapport aux observations aux 719 stations) issu de l'optimisation du modèle horaire et le critère de Nash sur les débits du modèle « 15 min »

3.3 Méthode d'évaluation

En se plaçant dans un objectif opérationnel, nous nous fixons comme critères d'évaluation les critères de contingence que nous rappelons ici :

Pour un événement donné, soit le seuil est dépassé, soit il ne l'est pas. Cela conduit à 4 situations distinctes résumées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Tableau de contingence pour un seuil d'alerte

		CALCUL	
		alerte ?	
OBS	NON	A	FA
	OUI	M	C

- **A** : nombre d'absences justifiées d'alertes,
- **FA** : nombre de fausses alertes,
- **M** : nombre d'alertes « observées » mais manquées par le calcul,
- **C** : nombre d'alerte « observées » et correctement détectées par le calcul.

À partir des résultats du tableau de contingence pour une liste d'événements d'un bassin versant ou d'un regroupement de bassins versants, nous retenons les statistiques suivantes :

- le **POD**, *probability of detection*, fournit le taux d'alertes correctes (C) parmi les alertes observées (C+M). La valeur de ce critère varie entre 0 (aucune alerte correctement détectée) et 1 (toutes les alertes observées sont détectées).

$$POD = \frac{C}{C + M}$$

- le **SR**, *success ratio*, fournit le taux d'alertes correctement détectées (C) parmi les alertes émises par le modèle (C+FA). La valeur optimale du SR est de 1 (toutes les alertes émises par le modèle sont pertinentes). Un SR de 0 signifie que toutes les alertes émises par le modèle sont erronées (fausses alertes).

$$SR = \frac{C}{C + FA}$$

- le **FB**, *frequency bias*, est le rapport des 2 précédents critères, c'est à dire le rapport entre le nombre d'alertes émises par le modèle (C+FA) et le nombre d'alertes observées (C+M). Il traduit la tendance du modèle à produire trop de fausses alertes (FB>1) ou trop d'alertes manquées (FB<1).

$$FB = \frac{POD}{SR} = \frac{C + FA}{C + M} = \frac{\text{nombre d'alertes calculées}}{\text{nombre d'alertes observées}}$$

- le **CSI**, *critical success index*, synthétise les critères POD et SR. Sa valeur est égale à 1 si les deux précédents critères sont égaux à 1, (i.e. absence de fausses alertes et d'alertes manquées) et nulle si aucune alerte est correctement détectée.

$$CSI = \frac{C}{C + M + FA} = \frac{1}{POD^{-1} + SR^{-1} - 1}$$

Comme l'anticipation est un objectif recherché, une alerte est considérée comme correctement détectée (C) si le débit simulé dépasse le seuil « simulé » avant que le débit « observé » ne dépasse le seuil « observé ». Ces critères, prenant en compte l'anticipation, sont nommés *POD_ant*, *SR_ant*...

De façon similaire à ce qui a été présenté dans la partie 2, les seuils suivants sont considérés : le seuil d'avertissement par rapport aux observations, nommé *seuilOBS*, est le N^{ème} plus fort débit de pointe de la chronique de débits instantanés (QTVAR) ; de la même manière, *seuilCAL* est le N^{ème} plus fort débit de pointe de la chronique simulée pour chaque configuration.

Par ailleurs, l'**anticipation** de l'avertissement telle que définie au 2.3.1 constitue un critère d'évaluation de nos modèles.

Les performances de chaque configurations seront évaluées :

- géographiquement : selon les hydro-éco-régions regroupées en 8 zones par Maire et Javelle (2013) auxquelles nous ajoutons les Cévennes (figure 12).
- selon 10 classes équiprobables de superficie de bassin versant,
- selon 10 classes équiprobables de « durée d'événement ».

Pour cette dernière approche, nous définissons un indicateur que nous pouvons assimiler à une durée d'événement. À chaque station, on calcule, pour chaque période de dépassement de *seuilOBS*, la durée de ce dépassement. L'indicateur, que nous notons *Dmoy*, est la moyenne de ces durées.

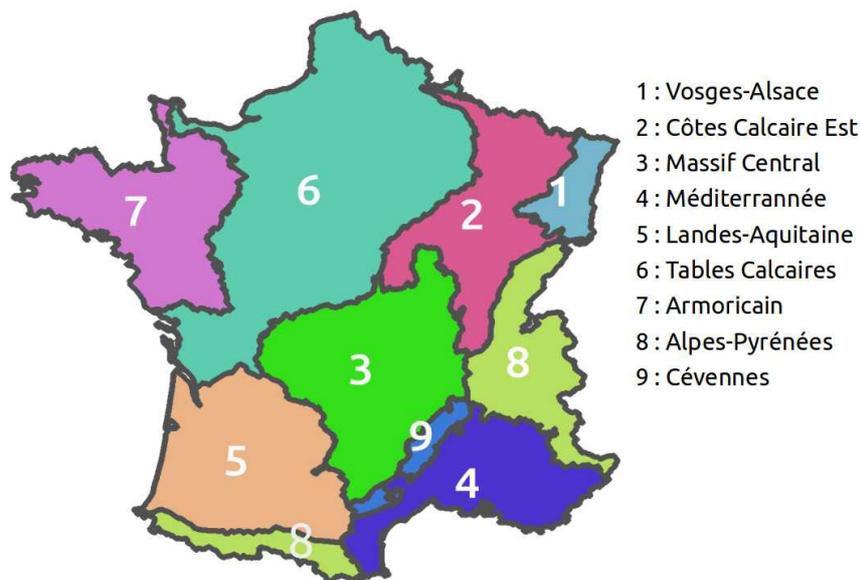


Figure 12 : Cartographie des 9 hydro-éco-régions (HER)

3.4 Résultats

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux scores *CSI_ant* (avec prise en compte de l'anticipation) pour évaluer, si sur notre échantillon complet de bassins versants, l'apport du pas de temps infra-horaire permet une meilleure détection des avertissements, notamment grâce à une plus grande anticipation. Les scores sont calculés sur des sous-échantillons de bassins versants selon leur localisation (HER), leur superficie ou leur réactivité (*Dmoy*). Les performances sont très peu différentes selon les modèles choisis (15M, 60M ou 4*60M) (voir

figure 13). Néanmoins, l'écart est légèrement plus marqué pour la première classe de superficie et de manière plus importante pour la première classe de Dmoy.

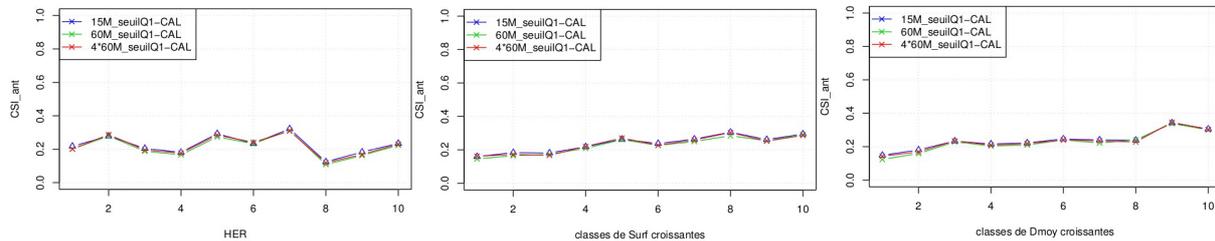


Figure 13: Critères CSI_ant dans les 3 configurations étudiées selon la zone géographique (à gauche), la superficie du bassin versant (au milieu) et Dmoy (à droite)

Compte tenu de cette observation, analysons les scores obtenus sur les 40 bassins versants de plus petite superficie et les 40 bassins versants de plus petit Dmoy, soit environ 5 % de l'échantillon total.

La superficie maximale des 40 plus petits bassins versants est de 25 km². Cet échantillon est localisé sur la carte de la figure 14 et concerne l'ensemble des 9 HER sauf la zone méditerranéenne. On note un léger gain sur l'ensemble des scores de contingence pour le modèle 15 minutes et horaire glissant.

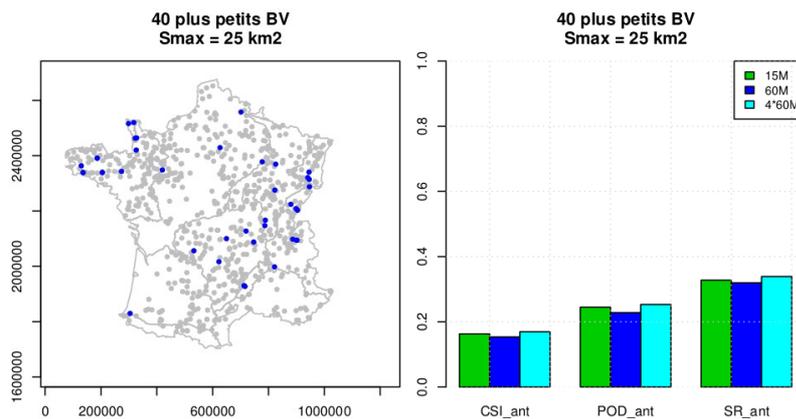


Figure 14: Scores de contingences aux 40 plus petits bassins versants de l'échantillon

En ce qui concerne la sélection des bassins versants ayant les plus faibles valeurs de l'indicateur Dmoy, ils sont plutôt présents sur la moitié Sud-Est de la France (figure 15) et fortement représentés en secteur alpin. Ces bassins versants, que l'on pourrait qualifier comme les plus « réactifs », ne sont pas nécessairement les plus petits. En effet, la moitié présente une superficie de moins de 50 km² mais 10 % d'entre eux ont une superficie de plus de 200 km². Sur cet échantillon, on observe un gain assez net dans les scores de contingence avec la chaîne horaire glissante et plus encore avec le modèle 15 minutes par rapport au modèle horaire.

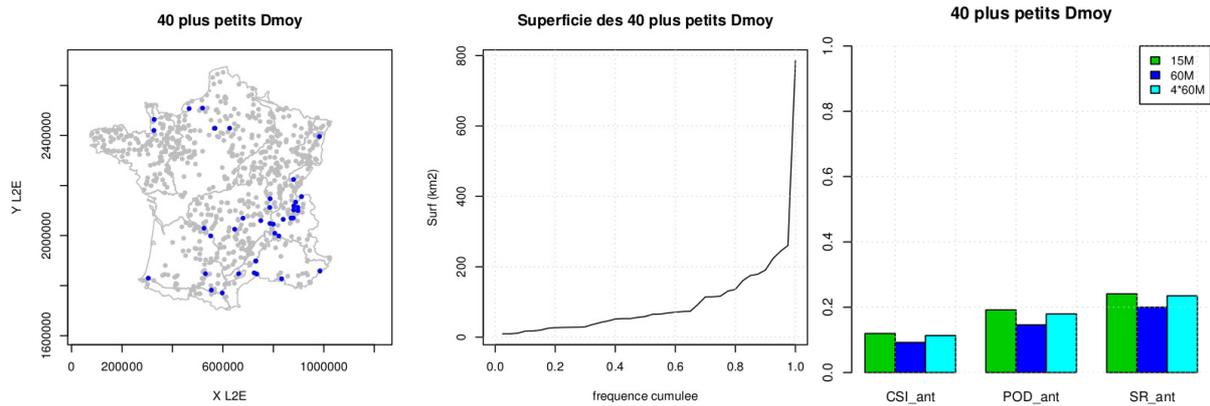


Figure 15: Scores de contingences aux 40 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy

Cette observation nous pousse à nous intéresser au gain en anticipation obtenu sur cet échantillon. Pour chaque avertissement correctement détecté, il est calculé l'anticipation de la détection : une anticipation positive signifie que le modèle a détecté le dépassement en avance par rapport à l'observation, une anticipation négative signifie que le modèle a détecté le dépassement après l'observation. Pour chaque bassin versant, on calcule la médiane des valeurs obtenues pour différents événements. Le graphique de la figure 16 est obtenu en prenant la médiane pour chaque bassin versant. Sur ces 40 bassins versants, un dépassement sur 2 (médiane) est détecté avec environ 30 minutes de retard. Le modèle 15 minutes permettrait de réduire ce retard à 1/4 d'heure. Sur un échantillon réduit aux 10 bassins versants de plus faible *Dmoy* (figure 17), le retard passerait de moins d'une heure avec le modèle horaire à moins d'1/2 heure pour le modèle horaire glissant et à moins d'1/4 d'heure pour le modèle 15 minutes.

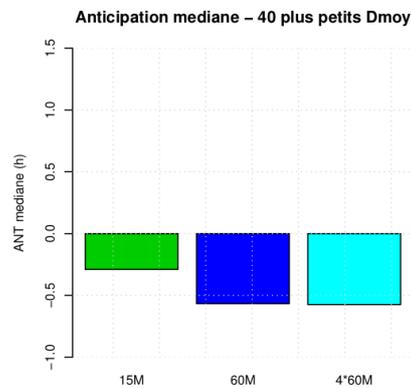


Figure 16: Anticipation en heure aux 40 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy

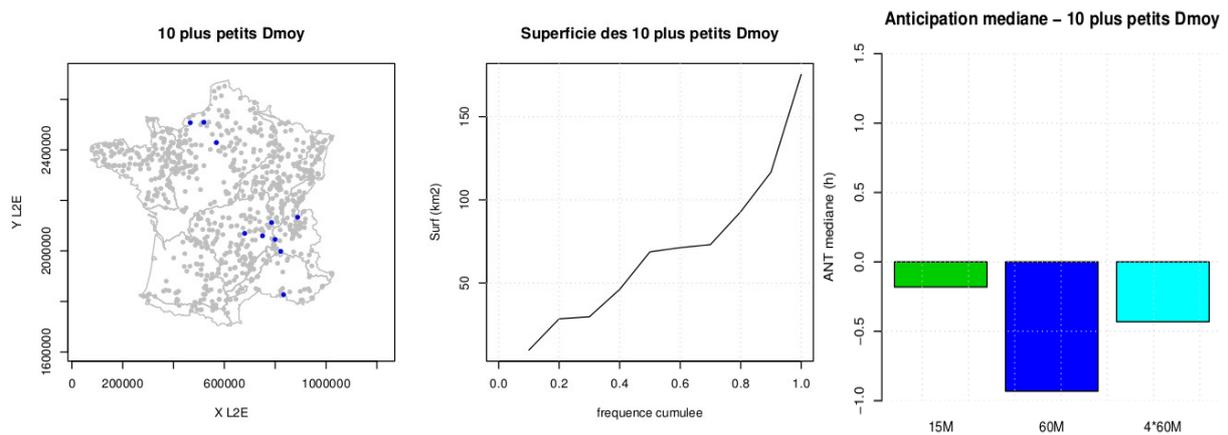


Figure 17: Anticipation en heure aux 10 bassins versants de l'échantillon de plus petite valeur de Dmoy

L'analyse de ces résultats semble indiquer qu'il y aurait clairement un gain à utiliser a minima 4 chaînes horaires glissantes et au mieux un modèle au pas de temps infra-horaire pour les bassins versants les plus rapides. Ce gain est observé autant sur le taux de détection (POD) que sur le taux de succès (SR), c'est à dire que le taux de fausses alertes est également réduit certainement parce-qu'on utilise des seuils calculés relativement à la chronique simulée.

Par ailleurs, la simulation au pas de temps 15 minutes permet un déclenchement des avertissements en avance de 15 à 30 minutes par rapport au modèle horaire sur les bassins versants les plus réactifs.

Ces conclusions confirment celles plus théoriques avancées au paragraphe 2 sur l'analyse à partir des débits « observés ».

La limite que nous voyons à l'analyse de ces résultats est la faible taille de l'échantillon sur lequel l'impact du passage au pas de temps infra-horaire est significatif. Il serait intéressant, d'une part d'abonder cet échantillon avec des bassins versants expérimentaux réactifs et de petite taille et d'autre part d'étendre l'analyse aux bassins versants de la base nationale de bassins versants (BNBV). Pour ce dernier point, il serait envisagé de comparer les performances des modèles horaire et infra-horaire sur un grand nombre de bassins versants selon des caractéristiques morphodynamiques (pente, coefficient de forme...) susceptibles d'influer leur temps de réponse.

Conclusion et perspectives

Le système d'anticipation des crues soudaines dont le SCHAPI prévoit la mise en application pour 2016 s'appuiera sur une modélisation hydrologique consistant en un couplage d'un modèle horaire semi-distribué GR-SD (production distribuée et transfert global) et d'un modèle journalier global GR4J. Parallèlement à la mise en opérationnel de ce système des améliorations de la modélisation hydrologique sont étudiées et notamment le passage au pas de temps infra-horaire.

A partir des modèles hydrologiques calés (Organde, 2013, 2014), une paramétrisation au pas de temps 15 minutes est déduite par une correspondance théorique des paramètres. Trois types de modélisation sont alors comparées (modèle horaire, modèle 15 minutes et modèle horaire glissant toutes les 15 minutes).

L'intérêt du passage au pas de temps infra-horaire (modèle horaire glissant et modèle 15 minutes) est mis en évidence pour un sous-échantillon (40 bassins versants sur un échantillon total de 719) des bassins versants les plus réactifs. A minima, l'utilisation de 4 chaînes horaires avec un décalage de 15 minutes permet tout comme le modèle infra-horaire d'améliorer les critères de contingence par rapport au modèle horaire. Mais c'est le modèle infra-horaire (15 min) qui permet d'assurer un meilleur gain en anticipation, de l'ordre de 15 à 30 minutes par rapport au modèle horaire, ce qui peut être intéressant pour des bassins versants très réactifs.

Cette analyse mériterait d'être confortée en ajoutant à notre échantillon de bassins versants jaugés, des bassins versants expérimentaux de petite taille et réactifs. Et pour aller plus loin, la comparaison des modèles horaire et infra-horaire pourrait être développée sur les bassins versants de la base nationale de bassins versants afin de disposer d'un échantillon important permettant de cibler les bassins versants les plus sensibles à cette amélioration.

Bibliographie

- EDIJATNO et C. MICHEL (1989). Un modèle pluie-débit à trois paramètres, La Houille Blanche 2: 113-121, 1989.
- EDIJATNO, NASCIMENTO, N.O., YANG, X., MAKHLOUF, Z. et MICHEL, C. (1999). GR3J : a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-278.
- FINE J.A. (2009), *SHYPRE, Désagrégation au pas de temps 5 minutes, Modèle pluie-débit*, rapport d'étude Hydris hydrologie, 13 p.
- MAIRE A. et JAVELLE P. (2013), *Extension nationale de la méthode AIGA : Comparaison à des avertissements basés sur des dépassements de seuil de pluie*, rapport d'étude Irstea, 44 p.
- ORGANDE D. (2013), *Extension nationale de la méthode AIGA, Évaluation de AIGA débit sur un échantillon de bassins versants du territoire national*, Rapport d'étude HYDRIS Hydrologie, 39 p.
- ORGANDE D. (2014), *Extension nationale de l'approche AIGA, Amélioration de la réactivité du modèle*, rapport d'étude Hydris hydrologie, 23 p.
- PERRIN, C., 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. La Houille Blanche, n°6/7 : 84-91.
- PERRIN, C., MICHEL, C. and ANDRÉASSIAN, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279 : 275-289.