La Houille Blanche 2019, 3-4, 140–148
© SHF, Published by EDP Sciences, 2019
https://doi.org/10.1051/lhb/2019057

Disponible en ligne :
www.shf-lhb.org

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Analyse hydrologique de la crue-éclair catastrophique du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (VAR, France)☆

Olivier Payrastre[1,*], Eric Gaume[1], Pierre Javelle[2], Bruno Janet[3], Patrick Fourmigué[4], Philippe Lefort[a], André Martin[5,b], Brice Boudevillain[6], Pascal Brunet[7], Guy Delrieu[6], Lorenzo Marchi[8], Yoann Aubert[9], Elisabeth Dautrey[10,c], Laurence Durand[10,d], Michel Lang[11], Laurent Boissier[12,13], Johnny Douvinet[14], Claude Martin[15,e] et et l'équipe « enquêtes post-événements » d'HyMeX

[1] FSTTAR, GERS, EE, 44344 Bouguenais, France
[2] Irstea, UR RECOVER, Aix-en-Provence, France
[3] SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations), Toulouse, France
[4] Cerema Direction Méditerranée, 13593 Aix-en-Provence, France
[5] Météo-France, Aix-en-Provence, France
[6] Université Grenoble Alpes, CNRS, IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement), Grenoble, France
[7] Hydrosciences Montpellier, UMR 5569, Montpellier, France
[8] CNR-IRPI (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica), Padoue, Italie
[9] BRL Ingénierie, Nîmes, France
[10] DREAL PACA (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), Aix-en-Provence, France
[11] Irstea, UR RiverLy, Lyon, France
[12] Generali, Paris, France
[13] GRED, UMR 220, Montpellier, France
[14] Espace, UMR 7300, CNRS, Avignon Université, Avignon, France
[15] CNRS, Nice, France

Reçu le 21 février 2013 / Accepté le 2 octobre 2019

Résumé – Suite à la crue exceptionnelle qui s'est produite le 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (Var), plusieurs équipes de chercheurs et d'ingénieurs sont intervenues sur le terrain afin de documenter et de caractériser cet événement, en proposant notamment des estimations des débits de pointe sur le cours principal de l'Argens ainsi que sur l'ensemble des affluents touchés. Des informations sur la chronologie des crues ont également été obtenues auprès de témoins oculaires. Un travail de coordination et d'échanges entre ces équipes a été organisé par le SCHAPI et la DREAL PACA, et a permis de confronter et de mettre en cohérence les résultats obtenus, et d'engager une discussion sur les périodes de retour de la crue. Cette comparaison a révélé que malgré les différentes sources possibles d'erreurs d'estimation, les valeurs de débits proposées par les différentes équipes restaient globalement assez proches. Cette première étape a permis de cartographier les débits sur la base d'une quarantaine d'estimations au total. La répartition spatiale obtenue apparaît, de premier abord, cohérente avec l'estimation des cumuls pluviométriques fournie par les

☆ Congrès SHF : « Événements extrêmes fluviaux et maritimes », Paris, 1–2 février 2012 – Payrastre *et al.* – crues du 15 juin 2010 dans le Var.

*Correspondance : olivier.payrastre@ifsttar.fr
[a] Retraité, anciennement consultant expert en hydraulique fluviale.
[b] Retraité, anciennement Météo-France, Aix-en-Provence, France.
[c] Retraitée, anciennement DREAL PACA (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), Aix-en-Provence, France.
[d] En disponibilité, anciennement DREAL PACA, Aix-en-Provence, France.
[e] Honoraire, CNRS, Nice, France.

lames d'eau radar. L'analyse hydrologique de l'événement a été complétée en comparant les débits estimés à des hydrogrammes simulés à l'aide d'un modèle pluie-débit simple. Ces résultats mettent en évidence une grande disparité des comportements hydrologiques des affluents de l'Argens. La Nartuby se distingue notablement avec une réponse hydrologique très progressive et atténuée ce qui peut être attribué à l'effet du karst très présent sur ce bassin. Enfin, le travail sur les périodes de retour a permis d'identifier les secteurs pour lesquels la crue a dépassé un niveau centennal.

Mots clés : crue-éclair / 2010 / Argens / Nartuby / pluie / débit / période de retour

Abstract – Hydrological analysis of the catastrophic flash flood of 15th June 2010 in the area of Draguignan (Var, France). The 15th of June 2010 an exceptional flash flood occurred in the Var region in southeastern France. This flood caused 25 casualties and catastrophic damages in the area of Draguignan. After this event several researchers and engineers teams conducted field surveys in order to gather information on the dynamics of the flood: peak discharge estimates for the main Argens River and all the tributaries hit by the event, and information on the chronology of the flood based on interviews of eyewitnesses. The SCHAPI and the DREAL PACA organised exchanges between the different teams involved in order to ensure a global coherence of discharge estimates, and to examine the question of the possible return period of the flood. This work of comparison revealed that despite the several sources of uncertainty, the discharge estimates proposed by the different teams were relatively close to each other. This work finally led to a complete cartography of peak discharges including almost 40 local estimates. The spatial repartition of peak discharges appears coherent with rainfall accumulations estimated based on radar data. A more detailed hydrological analysis of the flood was then conducted based on the comparison of estimated peak discharges and hydrographs simulated using a simple distributed rainfall-runoff model. This analysis revealed a great disparity of the hydrological answer of the tributaries of the Argens River. The strongest reactions were observed on the Florieye and the Real Rivers for which rainfall accumulations exceeded 350 mm in 24 h. The Aille River also had a strong reaction despite of much more limited rainfall accumulations on this watershed (up to 250 mm). On the other hand, the Nartuby River showed a very attenuated answer despite of very elevated rainfall accumulations (exceeding 300 mm): this could be attributed to the presence of large karst formations in this last watershed. Lastly, the discussion on the return periods of the flood enabled to identify the river reaches where a 100-year return period had probably been exceeded.

Keywords: flash-flood / 2010 / Argens / Nartuby / pluie / discharge / return period

1 Introduction

Le 15 juin 2010, des précipitations très abondantes ont provoqué des crues-éclair et des inondations catastrophiques autour de Draguignan dans le Var. Ces inondations ont causé la mort de 25 personnes et engendré des dégâts matériels considérables, dont le montant est évalué à environ un milliard d'euros. Les principaux dommages ont été observés le long de la rivière Nartuby dans les communes de Draguignan, de Trans-en-Provence et du Muy. Néanmoins, comme l'illustre la figure 2, la Nartuby est loin d'être le seul cours d'eau à avoir réagi : c'est toute la partie aval du bassin de l'Argens qui a été touchée par des cumuls de pluie dépassant localement les 400 mm en 24 h. Sur un bon nombre des cours d'eau concernés, on estime aujourd'hui que les crues ont dépassé une période de retour centennale.

Cet événement exceptionnel a donné lieu à de nombreuses études. Celles-ci ont permis d'analyser la crue sous différents points de vue, tels que l'étude de la zone inondée en lien avec les outils réglementaires (Pons *et al.*, 2014 ; Esposito, 2015), l'analyse de la vulnérabilité et des causes expliquant le nombre élevé de victimes (Vinet *et al.*, 2012 ; Belin et Moulin, 2013 ; Ruin *et al.*, 2014), la mise en œuvre de méthodes de prévision permettant de mieux anticiper ce type d'événement (Javelle *et al.*, 2014 ; Caseri *et al.*, 2016 ; Le Bihan *et al.*, 2017), ou encore les questions liées à la résilience et à la reconstruction (Moatty *et al.*, 2018).

Ces études ont pu voir le jour grâce notamment à un important travail de collecte de données de terrain, conduit conjointement par les services de l'état, les collectivités territoriales, et plusieurs équipes de recherche, dans les mois qui ont suivi l'événement. En effet, les quelques stations hydrométriques présentes sur les cours d'eau concernés ont en grande partie été détruites ou endommagées lors de la crue, limitant très fortement les informations directement disponibles sur les niveaux d'eau et les débits atteints. Seuls les enregistrements limnimétriques des stations de Vidauban sur l'Aille et de Roquebrune sur Argens se sont avérés exploitables. Devant ce constat plusieurs équipes de chercheurs et d'ingénieurs se sont mobilisées de façon à recueillir sur le terrain des données permettant de reconstituer le déroulement de la crue : niveaux et débits atteints, dynamique de montée et de décrue, etc. Une enquête commune a notamment été conduite courant octobre 2010 par plusieurs équipes de recherche dans le cadre du programme HyMeX (www.hymex.org, task team « post-event surveys »). Cette enquête est venue compléter les initiatives locales ayant également permis le recueil d'informations similaires (DREAL / DDT, Conseil Départemental 83, Cerema DTer Mediterranée, Irstea et SPC Med-Est). Plusieurs réunions de

coordination entre les acteurs ayant recueilli des données sur la crue ont ensuite été organisées par le SCHAPI de façon à harmoniser et à mettre en cohérence les informations disponibles, dont notamment les estimations des débits. Une discussion sur les périodes de retour de la crue a également été engagée à l'initiative de la DREAL PACA.

Cet article présente non seulement le détail des investigations menées lors de l'enquête HyMeX, mais aussi les résultats du travail de coordination et d'échanges conduit sous pilotage du SCHAPI. Un travail d'analyse hydrologique réalisé à partir de simulations pluie-débit est également présenté. Il permet une analyse plus détaillée des données disponibles et fait ressortir les grandes lignes du comportement hydrologique des différents cours d'eau concernés par la crue : rapidité de la réponse, intensité et rendement d'écoulement atteint. Enfin, les éléments obtenus concernant les périodes de retour de la crue sont également présentés.

2 Reconstitution des débits de la crue

2.1 Contenu de l'enquête HyMeX

Le programme HyMeX (2010–2020) a pour objectif d'améliorer la connaissance, la quantification et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée, avec une attention particulière portée aux événements météorologiques extrêmes (Drobinski *et al.*, 2014). Ce programme a permis la réalisation de nombreuses campagnes d'observation renforcées, dont la réalisation d'enquêtes post-crue pour mieux documenter les crues éclair se produisant sur les petits cours d'eau non jaugés. En France, ces enquêtes post-crue ont reçu le soutien financier du CNRS (Institut National des Sciences de l'Univers, INSU) et du Ministère de l'Écologie (Direction Générale de la Prévention des Risques, DGPR). L'objectif de ces enquêtes était de reconstituer de façon systématique les débits de pointe des crues majeures, ainsi que leur dynamique temporelle, en organisant les relevés de terrain nécessaires dans les semaines suivant chaque événement. La campagne réalisée suite aux crues de juin 2010 a été la première organisée dans le cadre de ce programme. Elle a eu lieu en octobre 2010 et a mobilisé une quinzaine de chercheurs issus de différents laboratoires (Ifsttar, IGE, Hydrosciences Montpellier, CNR-IRPI, UMR Espace, UMR Pacte), ce qui a permis de mutualiser les compétences et d'avoir un regard pluridisciplinaire sur cet événement.

La méthodologie d'enquête post-événement utilisée a été définie progressivement dans la décennie qui a précédé le programme HyMeX, notamment dans le cadre de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHMCV, www.ohmcv.fr ; Delrieu, 2003). Deux premières enquêtes, menées à la suite des crues de 1999 dans l'Aude et 2002 dans le Gard, ont notamment confirmé la possibilité de documenter de façon détaillée des événements hydrologiques majeurs. La méthodologie a ensuite été affinée dans le cadre de deux projets de recherche Européens (Floodsite et Hydrate). Elle a déjà fait l'objet de plusieurs publications (Gaume et Bouvier, 2004 ; Gaume *et al.*, 2004, 2009 ; Delrieu *et al.*, 2005 ; Gaume, 2006 ; Borga *et al.*, 2008 ; Gaume et Borga, 2008), et a récemment été détaillée dans la charte qualité de l'hydrométrie (MEEM/DGPR, 2017). Nous en rappelons néanmoins les grandes lignes ci-après.

L'enquête est généralement réalisée plusieurs semaines après la crue, une fois les premières opérations de nettoyage terminées et le choc psychologique un peu atténué, mais suffisamment tôt pour que les laisses de crue restent encore nettement visibles, au moins en dehors des zones urbaines (zones généralement privilégiées pour les relevés car plus simples du point de vue hydraulique). L'enquête comporte deux volets :

- d'une part un recueil de témoignages, permettant de disposer d'éléments chronologiques sur le déroulement de la crue : horaire des plus hautes eaux, dynamique de montée de crue et de décrue ;
- d'autre part, une série de relevés topographiques des sections d'écoulement (effectués à l'aide d'un tachéomètre et/ou d'un GPS différentiel), dont l'objectif est d'être en mesure d'estimer les débits de pointe.

Ces informations sont collectées par des équipes de 4 à 5 personnes, les témoignages étant recueillis en parallèle et à proximité des relevés topographiques. Le choix des sections d'écoulement relevées est effectué de façon à couvrir de façon aussi exhaustive que possible le réseau hydrographique touché par la crue, en incluant les cours d'eau principaux et les différents affluents. Pour faciliter l'estimation des débits de pointe, des sections répondant à certains critères hydrauliques simples sont recherchées en priorité : présence d'un écoulement rectiligne et concentré sur une largeur faible, absence d'influence aval identifiée, section et pentes du lit homogènes, etc. Ces critères permettent généralement d'effectuer une hypothèse de régime uniforme et d'éviter le recours à des modèles hydrauliques, plus lourds à mettre en œuvre. Les informations recueillies lors d'un relevé sont les suivantes : un ou plusieurs profils en travers (pour disposer de sections d'écoulement complètes), un profil en long du fond du lit (sur une distance suffisante pour en estimer correctement la pente), et plusieurs niveaux donnés par les laisses de crue (pris au droit des profils en travers mais aussi en suivant le profil en long). Lorsque plusieurs sections se prêtent à un levé sur un même cours d'eau, elles sont généralement toutes retenues, la redondance des levés permettant par la suite de fiabiliser les estimations de débits par recoupement.

Outre des informations sur la chronologie de la crue, les témoignages permettent parfois de recueillir des indications sur les hauteurs d'eau atteintes et sur les vitesses d'écoulement : les films et/ou les photographies permettent notamment d'estimer l'élévation de la ligne d'eau au niveau des obstacles, et d'en déduire une vitesse de surface. Les témoignages sont aussi l'occasion de savoir ce que les riverains ont vécu et de voir quelles sont les réactions qu'ils ont eu face à cet événement qui est venu bouleverser leur quotidien (Ruin *et al.*, 2014).

L'exploitation des informations regroupées permet dans un premier temps de confirmer la hauteur d'eau atteinte en vérifiant la cohérence des laisses, et de valider ou d'invalider l'hypothèse d'un régime uniforme (pente de la ligne d'eau parallèle à la pente du lit). La figure 1 présente un exemple de section d'écoulement et de profil en long, illustrant la redondance et la cohérence globale des laisses de crue. Les laisses de crue présentes dans des zones d'écoulement peu rapide sont privilégiées car moins sujettes à une surélévation liée au choc de l'écoulement contre les obstacles.

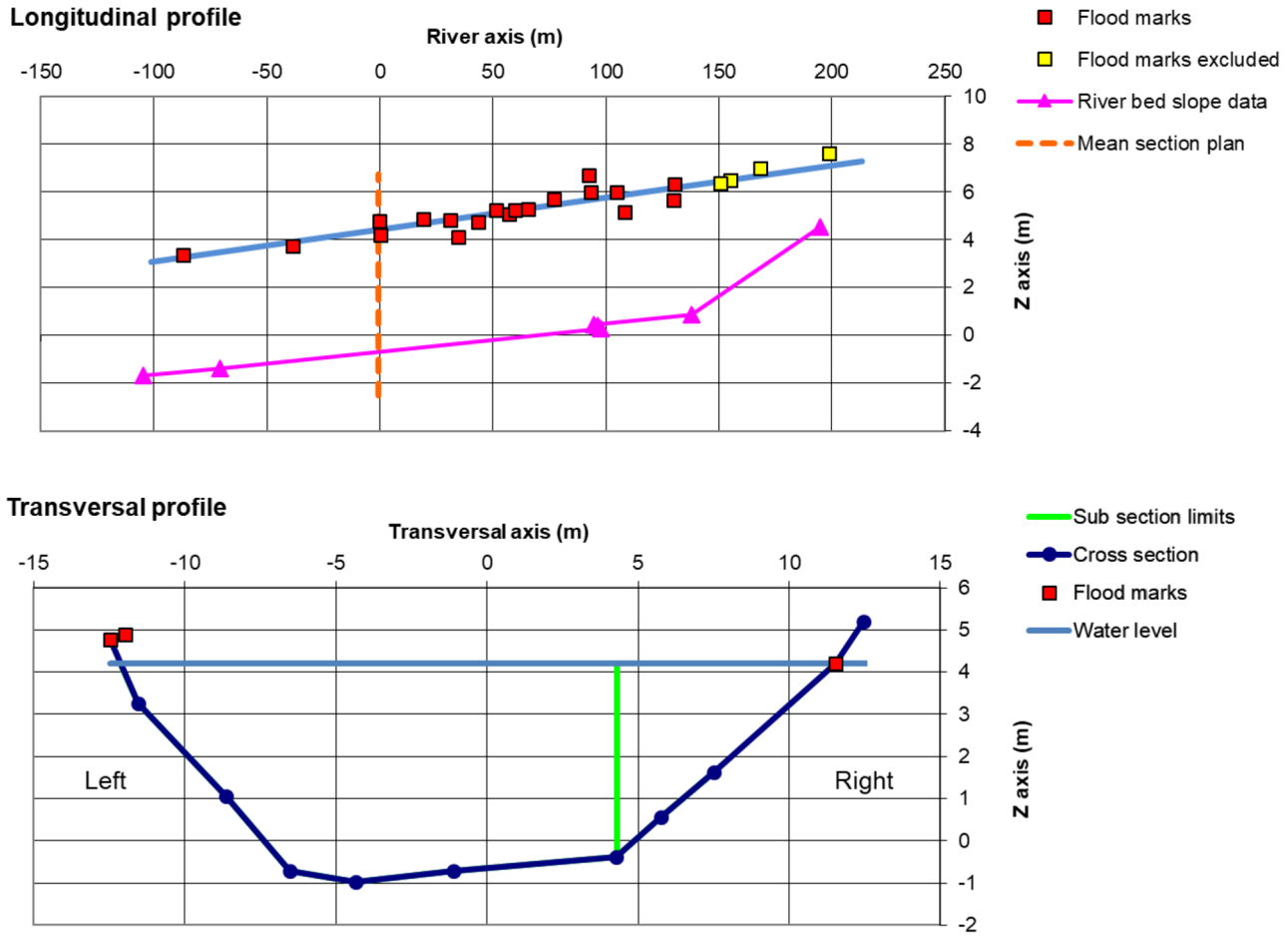


Fig. 1. Exemple d'un profil en long et d'un profil en travers levés sur la rivière Florieye à Lorgues (RD562), incluant la position des laisses de crue levées et la pente estimée de la ligne d'eau. Le trait vert vertical sur le profil en travers correspond à une séparation de la section en raison d'une rugosité et de vitesses d'écoulements très différentes.

L'estimation du débit est réalisée soit par application de la formule de Manning Strickler (cas d'un régime uniforme confirmé), soit, dès que cela est possible, en exploitant les informations disponibles sur les vitesses d'écoulement. Les estimations réalisées restent toujours incertaines et sont donc systématiquement associées à un intervalle indiquant les valeurs minimales et maximales possibles du débit. Cet intervalle est établi par une analyse de sensibilité aux différents facteurs d'incertitude (valeur de rugosité du lit, éventuellement pente de ligne d'eau et/ou niveau d'eau atteint dans la section, ou encore gamme de vitesses d'écoulement possibles au vu des informations disponibles). En fin d'enquête, la cohérence d'ensemble des informations obtenues est vérifiée, et conduit si nécessaire à d'éventuels compléments : recherche de témoignages supplémentaires, nouveaux levés, etc.

2.2 Résultats obtenus

L'enquête post-événement conduite en octobre 2010 dans le Var a finalement permis de disposer d'un ensemble de 36 estimations de débit de pointe. Le détail des levés et les calculs ayant abouti à ces estimations de débit ont été regroupés dans la base de données HyMeX de façon à faciliter leur diffusion, et les valeurs de débits estimées ont été récemment intégrées au jeu de données EuroMedeFF sur les crues éclair en Mediterranée (Amponsah *et al.*, 2018). La figure 2 met en relation ces estimations de débits de pointe et les cumuls pluviométriques de l'événement donnés par la lame d'eau ANTILOPE J+1 de Météo France (fusion de la lame d'eau radar temps réel PANTHERE et des enregistrements pluviométriques de Météo France disponibles le lendemain (Champeaux *et al.*, 2009)). On notera ici que les autres enregistrements pluviométriques disponibles sont dans l'ensemble cohérents avec cette lame d'eau : le cumul pluviométrique maximal enregistré est par exemple celui d'un pluviomètre du CIRAME à Lorgues qui donne un cumul de 456 mm, alors que la lame d'eau ANTILOPE indique un maximum de 416 mm dans ce même secteur.

La figure 2 laisse apparaître des hétérogénéités très nettes de la réponse des cours d'eau, qui ne peuvent pas s'expliquer par la seule variabilité du forçage pluviométrique. Si les fortes réactions observées sur la Florieye et le Réal peuvent paraître logiques au regard des cumuls de pluie enregistrés sur ces bassins, il est intéressant d'observer que la Nartuby, pourtant soumise à une pluviométrie équivalente, a eu une réaction nettement moins marquée (hormis pour quelques petits

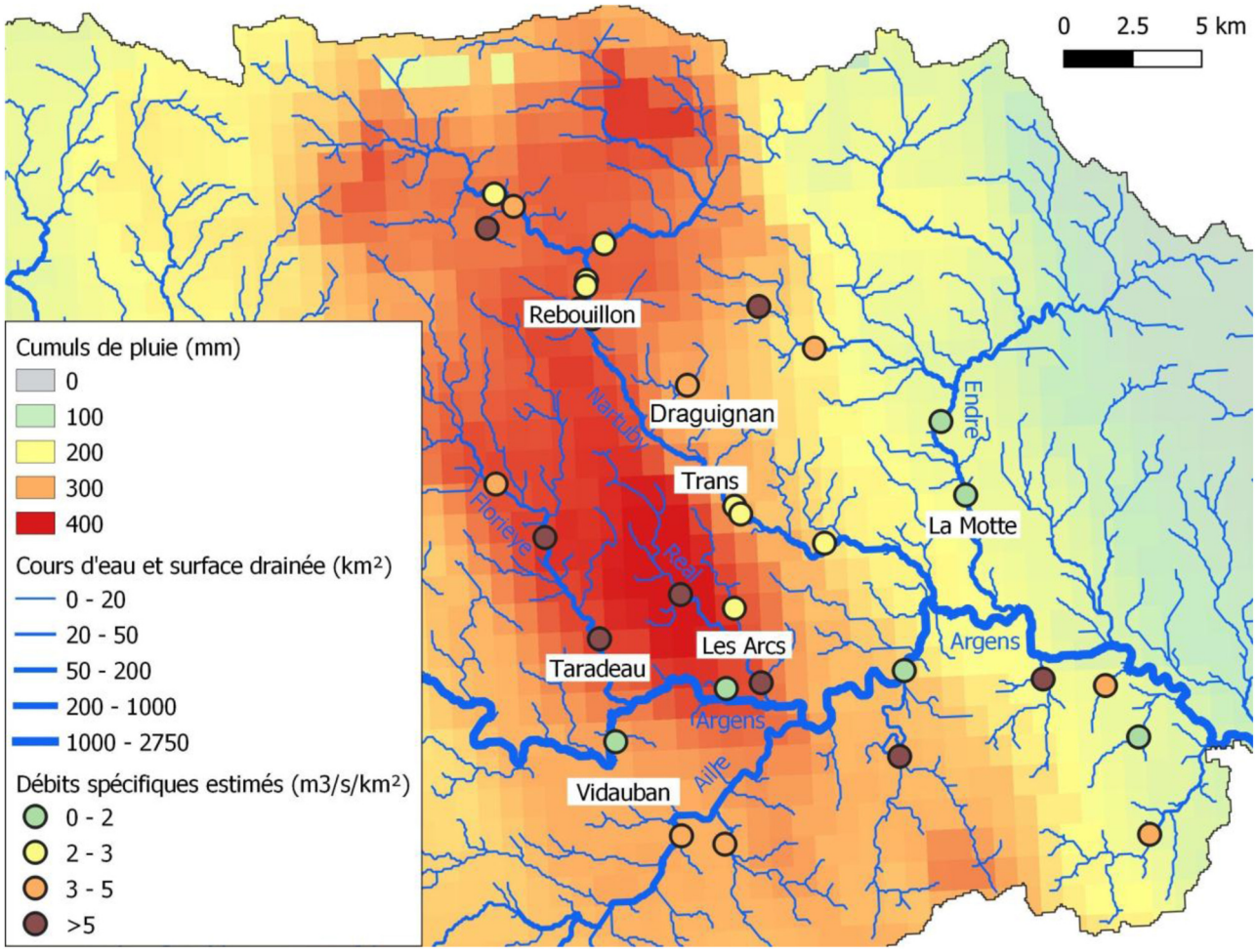


Fig. 2. Carte synthétique présentant la pluviométrie cumulée sur l'événement, du 15 juin à 0H00 TU au 16 juin à 12 h 00 TU (source lame d'eau ANTILOPE J+1 Météo France), ainsi que les estimations de débits de pointe issues de l'enquête HyMeX, et exprimées en débit spécifique ($m^3.s^{-1}.km^2$).

affluents). À l'inverse, dans le massif des Maures (rive droite de l'Argens), des cours d'eau comme l'Aille et son affluent le Langastoua, le Couloubrier et la Maurette enregistrent des réactions très significatives alors que la pluviométrie s'avère sensiblement moins élevée dans ce secteur.

2.3 Harmonisation des estimations de débit

Un travail de coordination piloté par le SCHAPI a permis de confronter les estimations de débits issues de l'enquête HyMeX à celles résultant d'autres investigations menées dans le cadre du retour d'expérience sur cette crue (Conseil Départemental 83, Irstea, Cerema DTer Méditerranée). Ce travail de mise en cohérence ne s'est pas limité à un débat d'experts à partir de données communes, mais a également permis de comparer les informations issues de levés différents, réalisés sur une même section ou dans des sections très proches. La confrontation de ces estimations a constitué un élément de validation supplémentaire, pouvant par exemple permettre de détecter les incohérences de certains levés.

Le tableau 1 met en parallèle les estimations initiales issues de l'enquête HyMeX et les fourchettes de débit finalement retenues à l'issue du travail d'harmonisation. Les différences restent globalement assez limitées : certaines plages de débit ont été élargies de façon à rester cohérentes avec les autres estimations existantes (la Nartuby à Trans par exemple) ; certaines autres ont pu être resserrées, les informations complémentaires disponibles permettant une estimation plus fiable (cas notamment d'estimations réalisées au niveau d'ouvrages, comme sur l'Argens aux Arcs par exemple).

On notera que ce travail de coordination s'est limité aux cours d'eau principaux, l'enquête HyMeX étant la seule à avoir amené des informations relatives aux plus petits affluents (36 estimations réalisées dont seules 11 apparaissent dans le Tab. 1).

3 Analyse hydrologique par simulations pluie-débit

Les fortes différences de réaction des cours d'eau concernés par l'événement de juin 2010 appellent une analyse hydrologique permettant de mieux quantifier ces différences, avant de les mettre en relation avec les variables environnementales (nature du sol et du substrat géologique en

Tableau 1. Comparaison des estimations de débit réalisées lors de la campagne HyMeX et des gammes de débit finalement retenues après harmonisation de l'ensemble des estimations disponibles (pilotage SCHAPI).

Rivière	Localisation	Surface (km^2)	Débits estimés HyMeX ($m^3.s^{-1}$)		Débits harmonisés ($m^3.s^{-1}$)	
			Q_{min}	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}
Aille	Vidauban station HYDRO	228,3	600	950	600	950
Argens	Vidauban RD 48 (amont Florieye)	1550	400	560		
Argens	Vidauban pont SNCF	> 1637			< 950	< 1200
Argens	LesArcs station HYDRO	1654	850	1500	800	1200
Argens	LeMuy avant Nartuby	2058	1700	2500	1700	2500
Argens	Roquebrune station HYDRO	2491			2200	2900
Argens	Fréjus – Saint Aygulf	2661			1820	2500
Florieye	Lorgues (pont RD562)	64,6	300	450	300	450
Florieye	Taradeau (sortie gorges)	85,8	380	570	380	600
Florieye	Taradeau (pont)	86,7			380	600
Nartuby	Rebouillon	149,5	300	400	300	460
Nartuby	Draguignan – La Clappe	164			350	510
Nartuby	Draguignan – Pont d'Aups	169			350	460
Nartuby	Trans station HYDRO	195,8	400	500	360	520
Nartuby	Capellan	209	300	550	> 300	> 550
Nartuby	Le Muy (pont CD25)(RN7)	229			>> 340	>> 420
Real	Les Arcs / amont village RD57	20	65	140	65	140
Real	Les Arcs / Pont SNCF	30,8			125	160
Real	Les Arcs / A8	32,5	150	190		

particulier) susceptibles de les expliquer. Nous proposons dans ce paragraphe une analyse basée sur des simulations pluie-débit, qui permet notamment d'estimer de façon plus précise le niveau de réactivité et le rendement d'écoulement atteint sur les différents bassins.

3.1 Principe des simulations effectuées

Le modèle pluie-débit mis en œuvre est le modèle Cinecar de l'Ifsttar, déjà utilisé à plusieurs reprises pour ce type d'applications (Gaume et Bouvier, 2004 ; Gaume *et al.*, 2004). Ce modèle est distribué et il permet donc une représentation fine de la contribution des sous-bassins à la crue. Sa structure reste néanmoins simple : la topologie du modèle repose sur un découpage du réseau hydrographique en biefs, chaque bief étant alimenté par deux versants. Cette topologie est directement déduite d'un modèle numérique de terrain dont on extrait le réseau hydrographique pour une surface drainée minimale de 1 km^2. Le transfert au sein de chaque bief est représenté dans le modèle par les équations de l'onde cinématique. La production repose pour sa part sur le modèle du SCS avec un calcul différencié sur chaque versant, mais une valeur du paramètre CN (Curve Number) spatialement homogène et donc identique sur chaque versant. Plusieurs simulations sont conduites avec des valeurs de CN différentes, ce qui permet, en comparant les ordres de grandeur des débits simulés et estimés sur site, d'effectuer une analyse du niveau de réactivité global des différents bassins étudiés. Les valeurs de CN retenues sont les suivantes : tout d'abord CN = 100 qui représente un bassin totalement imperméabilisé (rendement d'écoulement de 1) ; puis des valeurs de CN de 70, 60, 50, 40 et 35 qui correspondent à des capacités d'absorption totales du bassin s'élevant respectivement à 109, 169, 254, 381 et 472 mm. Le modèle ainsi construit a été forcé à partir des lames d'eau ANTILOPE J+1.

3.2 Résultats

Quelques exemples des simulations obtenues sont présentés sur la figure 3. Elles permettent de confirmer les tendances déjà évoquées à la section 2.2 : la Nartuby se distingue nettement des autres cours d'eau par une réaction très modérée. L'ordre de grandeur du débit de pointe est correctement simulé pour des valeurs de CN ne dépassant pas 35 à 40, ce qui illustre bien l'effet d'atténuation marqué exercé par ce bassin. Au plus fort de l'événement, le rendement d'écoulement (débit de pointe estimé / débit de pointe simulé pour un CN de 100) ne semble pas y avoir dépassé 25 %. À Rebouillon par exemple (*cf.* Fig. 3), le débit estimé se situe aux alentours de 350 à 400 $m^3.s^{-1}$, alors qu'il aurait pu dépasser les 1600 $m^3.s^{-1}$ avec un rendement d'écoulement de 1 (CN 100). Le même constat est effectué pour la Nartuby à Trans-en-Provence.

Les autres cours d'eau de la rive gauche de l'Argens ont eu pour leur part des réactions plus marquées : les débits de pointe y sont correctement simulés pour des CN de l'ordre de 50 à 60 (Florieye, Endre), ce qui traduit des capacités d'absorption très significatives de ces bassins, mais toutefois nettement moins importantes que sur la Nartuby. Les rendements d'écoulement observés lors de la pointe de débit approchent les 50 % dans le cas de l'Endre, et semblent encore un peu supérieurs dans le cas de la Florieye. Le cours d'eau Réal semble pour sa part avoir eu un comportement intermédiaire (CN de 40 à 50, et rendement d'écoulement approchant néanmoins les 50 %).

Enfin, en rive droite de l'Argens (massif des Maures), une réaction marquée des cours d'eau est également observée. Sur l'Aille notamment, les débits de pointe sont correctement

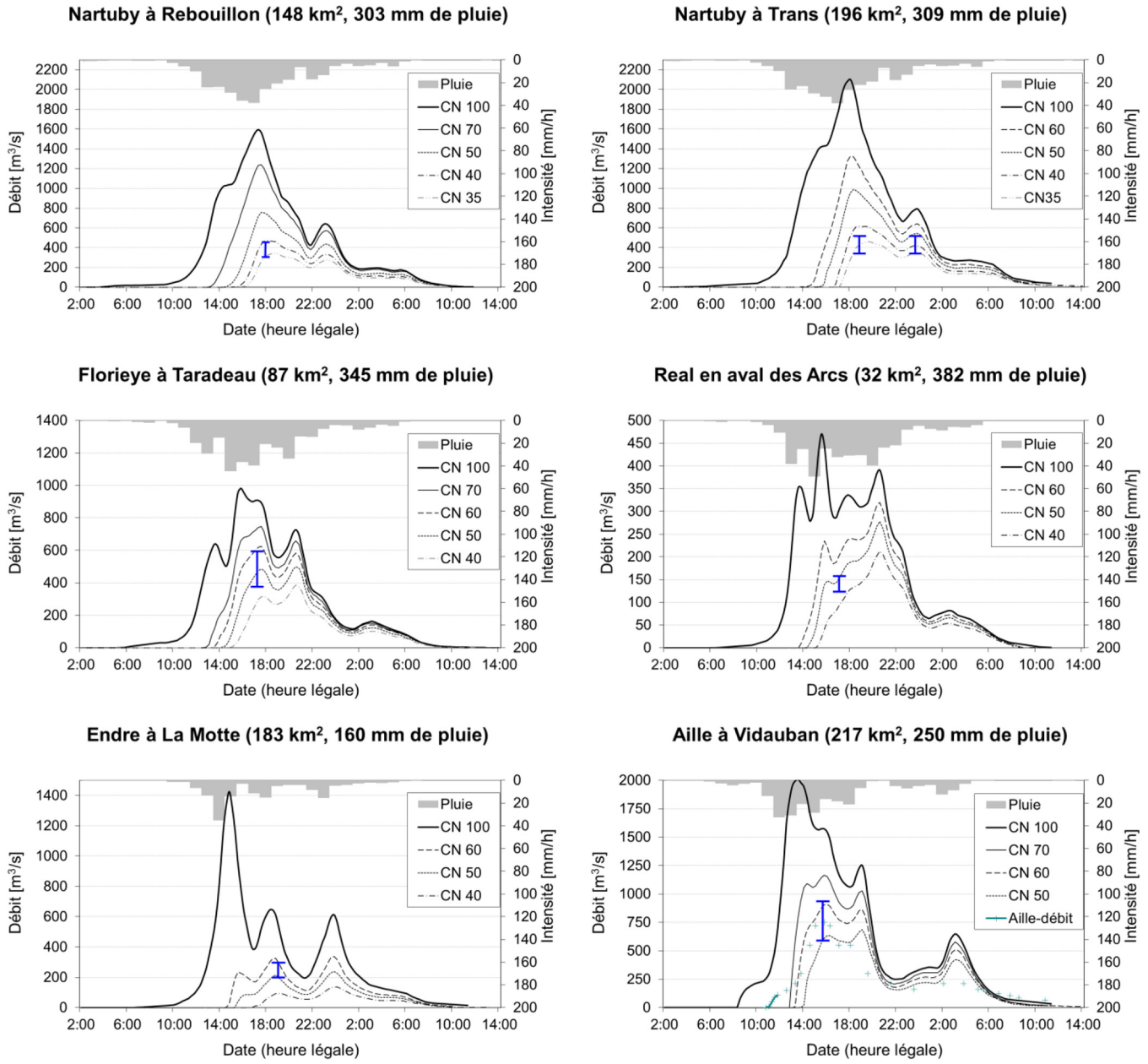


Fig. 3. Exemples de simulations pluie-débit obtenues avec le modèle Cinecar, pour différentes valeurs de CN. Les intervalles verticaux représentent les valeurs de débit de pointe estimées pour chaque site.

reproduits pour une valeur de CN de l'ordre de 50 à 60, et le rendement d'écoulement atteint semble à nouveau assez proche de 50 %. Ce rendement d'écoulement s'avère particulièrement élevé au regard de la pluviométrie plus limitée enregistrée sur ce bassin : cumuls d'environ 250 mm contre 350 à 400 mm en rive gauche de l'Argens.

Les résultats de ces simulations confirment finalement la forte hétérogénéité de réaction des cours d'eau touchés par la crue du 15 juin 2010. Bien que les dégâts causés par la Nartuby aient été considérables, ce bassin a manifestement joué un rôle atténuateur important qui a permis de limiter fortement le débit de pointe de la crue. Cet effet est probablement à relier à la géologie de ce bassin, qui draine les hauts plateaux varois (Plans de Canjuers) constitués de calcaires et de dolomies du Lias et du Jurassique fortement karstifiés. Il est vraisemblable que le karst a joué un rôle important dans l'atténuation de la réponse de ce bassin. À l'opposé, le bassin de l'Aille, drainant la dépression permienne et le massif des Maures, apparaît comme un bassin beaucoup plus réactif mais dans lequel la vulnérabilité aux crues s'avère fort heureusement très limitée.

4 Estimation des périodes de retour de la crue

À la suite de l'harmonisation des estimations de débits (*cf.* Tab. 1), la DREAL PACA a organisé une réflexion complémentaire ayant pour objectif de proposer une estima-

tion commune et partagée des périodes de retour de la crue. Ce travail se heurte toutefois aux difficultés suivantes : 1) à l'exception de quatre stations hydrométriques, les localisations des estimations de débits correspondent à des points non-jaugés donc sans séries de mesures disponibles pour évaluer la distribution fréquentielle des débits de crue ; 2) même lorsque des chroniques de mesures sont disponibles, les débits de la crue de juin 2010 dépassent de loin le plus fort débit jamais enregistré, ce qui impose une extrapolation de la distribution des débits pouvant être estimée à partir des mesures ; 3) dans la communauté des hydrologues, différentes méthodes existent pour extrapoler la distribution des débits (Lang et Lavabre, 2007) sans qu'aucune d'elles ne remporte l'unanimité (une comparaison de leurs performances a néanmoins été proposée depuis dans le cadre du projet de recherche ANR Extraflo (Lang *et al.*, 2014)) ; 4) ces différentes méthodes aboutissent à des estimations parfois très différentes de la période de retour de la crue de juin 2010. Pour toutes ces raisons il n'a pas été possible d'estimer avec précision la période de retour des débits associés à l'événement. En revanche, ce travail a permis de préciser le caractère exceptionnel de la crue aux différents points d'estimation de débit disponibles, et de positionner dans chaque cas la crue par rapport à une valeur de référence centennale.

Pour aboutir à ce résultat, différentes méthodes d'estimation ont été appliquées et comparées : extrapolation en se basant sur la distribution des pluies : gradex esthétique (Michel, 1982) ; méthode SPEED (Cayla 1993) ; approche Bayesienne basée sur l'information historique disponible, incluant l'ajustement d'une loi à trois paramètres et le calcul des intervalles de crédibilité correspondant (Payrastre *et al.*, 2011 ; Halbert *et al.*, 2016) ; méthode SHYPRE-SHYREG (Arnaud et Lavabre, 2002). Il est à noter que parmi les différentes méthodes testées, seule la méthode régionalisée SHYREG permet d'obtenir une estimation de la période de retour en tout point. À partir des ordres de grandeur fournis par ces différentes méthodes, les tendances générales suivantes peuvent finalement être dégagées :

- sur l'Argens, la période de retour de la crue du 15 juin 2010 est inférieure à 100 ans sur l'amont du bassin, de l'ordre de 100 ans au niveau des Arcs, puis supérieure à 100 ans à l'aval ;
- sur la Nartuby, le Réal et l'Aille, la période de retour est supérieure à 100 ans, et également supérieure aux périodes de retour observées à l'aval de l'Argens ;
- enfin, la Florieye constitue l'affluent où la crue a été la plus exceptionnelle, la période de retour y est supérieure à celles de la Nartuby, du Réal et de l'Aille.

5 Conclusions

La campagne d'enquête post-crue menée dans le cadre du projet HyMeX a permis d'obtenir un jeu de 36 estimations de débits de pointe réparties sur l'ensemble du réseau hydrographique touché par la crue du 15 juin 2010, dont une bonne moitié concerne des petits cours d'eau dont la surface drainée n'excède pas 50 km^2. La confrontation de ces estimations avec celles issues des autres investigations menées après la crue, n'a pas mis en évidence de fortes disparités et a finalement permis d'aboutir, pour les principaux cours d'eau concernés, à des valeurs de débits harmonisées et intégrant l'ensemble des informations disponibles.

Ces estimations sur les débits de pointe mettent en évidence une nette disparité de la réaction des cours d'eau touchés par la crue. La réalisation de quelques simulations pluie-débit permet d'interpréter ces différences de façon plus détaillée. Le principal enseignement est l'effet atténuateur important exercé par le bassin de la Nartuby, probablement à relier avec la karstification importante de ce bassin. Un comportement plus réactif apparaît sur les autres cours d'eau situés en rive gauche de l'Argens, comme par exemple la Florieye. En rive droite de l'Argens, les cours d'eau du massif des Maures apparaissent également nettement plus réactifs, notamment au regard de la pluviométrie sensiblement plus faible enregistrée sur ces bassins.

L'estimation des périodes de retour atteintes indique que ces dernières sont proches ou supérieures à 100 ans sur toute la partie aval de l'Argens (aval des Arcs), qu'elles sont également supérieures à 100 ans sur l'Aille et la Nartuby, et enfin que la Florieye est l'affluent pour lequel la période de retour semble la plus importante (nettement supérieure à 100 ans).

On peut finalement remarquer que les conséquences locales de la crue, qui ont été très importantes dans la vallée de la Nartuby, ne suivent ni la hiérarchie du niveau de réactivité des bassins, ni celle du niveau d'aléa atteint. Ces conséquences sont en effet en grande partie liées à la vulnérabilité des territoires traversés par les différents cours d'eau.

Remerciements. Les enquêtes post-événement HyMeX sont financées dans le cadre du programme MISTRALS/HyMeX du CNRS, et bénéficient également du soutien financier du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (DGPR/SCHAPI).

Les données de lames d'eau Antilope J+1 ont été fournies par Météo France.

Références

Amponsah W, Ayral P-A, Boudevillain B, *et al*. 2018. Integrated high-resolution dataset of high-intensity European and Mediterranean flash floods. *Earth Syst Sci Data* 10: 1783–1794. DOI: 10.5194/essd-10-1783-2018.

Arnaud P, Lavabre J. 2002. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resour Res* 38(6). DOI: 10.1029/2001WR000474.

Belin P, Moulin C. 2013. Hazardous situations analysis: What did June 2010 flood in the Var department teach us? [Analyse des situations de danger dans le cadre du retour d'expérience des inondations des 15 et 16 juin 2010 dans le Var]. *La Houille Blanche* 10–15. DOI: 10.1051/lhb/2013002.

Borga M, Gaume E, Creutin D, Marchi L. 2008. Surveying flash flood: Gauging the ungauged extremes. *Hydrol Process* 22(18): 3883–3885. DOI: 10.1002/hyp.7111.

Caseri A, Javelle P, Ramos MH, Leblois E. 2016. Generating precipitation ensembles for flood alert and risk management. *J Flood Risk Manag* 9(4.2): 402–415. DOI: 10.1111/jfr3.12203.

Cayla O. 1993. Probabilistic calculation of design floods: SPEED. In : *Internat. Symposium on Engineering Hydrology, American Society of Civil Engineers, San Francisco, July.*

Champeaux JL, Dupuy P, Laurantin O, Soulan I, Tabary P, Soubeyroux JM. 2009. Rainfall measurements and quantitative

precipitation estimations at Meteo-France: Inventory and prospects. *La Houille Blanche* 5: 28–34. DOI: 10.1051/lhb/2009052.

Delrieu G. 2003. L'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais. *La Houille Blanche* 6: 83–88. DOI: 10.1051/lhb/2003116.

Delrieu G, Ducrocq V, Gaume E, *et al*. 2005. The catastrophic flash flood event of 8–9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Cevennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *J Hydrometeorol* 6: 34–52. DOI: 10.1175/JHM-400.1.

Drobinski P, Ducrocq V, Alpert P, *et al*. 2014. HYMEX: A 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bull Am Meteorol Soc* 95: 1063–1082. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00242.1.

Esposito C. 2015. Floods of June 2010 in the department of the Var Comparison between flooded areas and flood-risk areas [Crue de juin 2010 dans le var : comparaison de la zone inondée et des zones inondables connues]. *La Houille Blanche* 34–40. DOI: 10.1051/lhb/2015005.

Gaume E. 2006. Methodological note on post flash flood investigations, deliverable report D23. 2 from the FLOODsite project (http://www.floodsite.net/default.htm), 54 p.

Gaume E, Bouvier C. 2004. Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche* 2004(6): 99–106. DOI: 10.1051/lhb:200406014.

Gaume E, Borga M. 2008. Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: Proposal of a methodology and illustrations. *J Flood Risk Manag* 1: 175–189. DOI: 10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x.

Gaume E, Livet M, Desbordes M, Villeneuve JP. 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *J Hydrol* 286: 135–154. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.09.015.

Gaume E, Bain V, Bernardara P, *et al*. 2009. A compilation of data on European flash floods. *J Hydrol* 367(1-2): 70–78. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.

Halbert K, Nguyen CC, Payrastre O, Gaume E. 2016. Reducing uncertainty in flood frequency analyses: A comparison of local and regional approaches involving information on extreme historical floods. *J Hydrol* 541: 90–98. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.017.

Javelle P, Demargne J, Defrance D, Pansu J, Arnaud P. 2014. Evaluating flash flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: A case study with the AIGA warning system. *Hydrol Sci J* 59: 1390–1402. DOI: 10.1080/02626667.2014.923970.

Lang M, Lavabre J. 2007. Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondation. Éditions QUAE, 232 p.

Lang M, Arnaud P, Carreau J, *et al*. 2014. Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009–2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes. *La Houille Blanche* 2014(2): 5–13. DOI: 10.1051/lhb/2014010.

Le Bihan G, Payrastre O, Gaume E, Moncoulon D, Pons F. 2017. The challenge of forecasting impacts of flash floods: Test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrol Earth Syst Sci* 21: 5911–5928. DOI: 10.5194/hess-21-5911-2017.

MEEM/DGPR. 2017. Charte qualité de l'hydrométrie : guide de bonnes pratiques, 83 p.

Michel C. 1982. Extrapolation par la méthode du Gradex. Note du 03-05. Cemagref, Antony.

Moatty A, Vinet F, Defossez S, Cherel J-P, Grelot F. 2018. Integrating a “preventive ethic” in the post-disaster recovery process: Resilience, adaptations and “preventive reconstruction” [Intégrer une « éthique préventive » dans le processus de relèvement post-catastrophe résilience, adaptation et « reconstruction préventive »]. *La Houille Blanche* 2018: 11–19. DOI: 10.1051/lhb/2018046.

Payrastre O, Gaume E, Andrieu H. 2011. Usefulness of historical information for flood frequency analyses: Developments based on a case study. *Water Resour Res* 47: W08511. DOI: 10.1029/2010WR009812.

Pons F, Laroche C, Fourmigue P, Alquier M. 2014. Flood hazard maps for extreme event scenario: The study of Nartuby River [Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : cas de la Nartuby]. *La Houille Blanche* 34–41. DOI: 10.1051/lhb/2014014.

Ruin I, Lutoff C, Boudevillain B, *et al*. 2014. Social and hydrological responses to extreme precipitations: An interdisciplinary strategy for post-flood investigation. *Weather Clim Soc* 6: 135–153. DOI: 10.1175/WCAS-D-13-00009.1.

Vinet F, Lumbroso D, Defossez S, Boissier L. 2012. A comparative analysis of the loss of life during two recent floods in France: The sea surge caused by the storm Xynthia and the flash flood in Var. *Nat Hazards* 61: 1179–1201. DOI: 10.1007/s11069-011-9975-5.

Citation de l’article : Payrastre O, Gaume E, Javelle P, Janet B, Fourmigué P, Lefort P, Martin A, Boudevillain B, Brunet P, Delrieu G, Marchi L, Aubert Y, Dautrey E, Durand L, Lang M, Boissier L, Douvinet J, Martin C. 2019. Analyse hydrologique de la crue-éclair catastrophique du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (VAR, France). *La Houille Blanche* 3-4: 140–148.