



HAL
open science

Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019

Pierre Brigode, Sarah Vigoureux, Olivier Delestre, Pierre Nicolle, Olivier Payrastre, Dreyfus Raphaëlle, Stan Nomis, Leslie Salvan

► To cite this version:

Pierre Brigode, Sarah Vigoureux, Olivier Delestre, Pierre Nicolle, Olivier Payrastre, et al.. Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2021, 107 (1), pp.1-14. 10.1080/27678490.2021.1976600 . hal-03370022

HAL Id: hal-03370022

<https://hal.science/hal-03370022v1>

Submitted on 8 Apr 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019

Pierre Brigode, Sarah Vigoureux, Olivier Delestre, Pierre Nicolle, Olivier Payrastre, Raphaëlle Dreyfus, Stan Nomis, Leslie Salvan & l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX

To cite this article: Pierre Brigode, Sarah Vigoureux, Olivier Delestre, Pierre Nicolle, Olivier Payrastre, Raphaëlle Dreyfus, Stan Nomis, Leslie Salvan & l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX (2021) Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019, LHB, 107:1, 1-14, DOI: [10.1080/27678490.2021.1976600](https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1976600)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1976600>



© 2021 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group



Published online: 07 Oct 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 145



View related articles [↗](#)

Inondations sur la Côte d'Azur : bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019

Pierre Brigode^a, Sarah Vigoureux^a, Olivier Delestre^b, Pierre Nicolle^c, Olivier Payrastré^c, Raphaëlle Dreyfus^d, Stan Nomis^d, Leslie Salvan^d and ^e l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX

^aObservatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD, Université Côte d'Azur, Géoazur, France ; ^bCNRS, LJAD, Université Côte d'Azur, Nice, France ; ^cGERS-LEE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Bouguenais, France ; ^dSMIAGE, Nice, France ; ^eVoir section remerciements pour la liste complète

RESUME

L'objectif de cet article est de présenter un bilan hydro-météorologique des trois dernières crues majeures observées sur les petits bassins côtiers de la Côte d'Azur (3 octobre 2015, 23 novembre 2019 et 1er décembre 2019). L'analyse conjointe de données issues de pluviomètres et de différents produits de lames d'eau (PANTHERE, ANTILOPE et RAINPOL) montre que les deux épisodes du 3 octobre 2015 et du 1er décembre 2019 sont caractérisés par des intensités très importantes, avec des cumuls localement supérieurs à 100 mm en moins de 3 heures, alors que l'épisode de novembre 2019 a été moins intense et plus uniformément réparti sur l'ensemble du territoire. Les débits de pointe estimés sont du même ordre de grandeur pour les épisodes de 2015 et de décembre 2019, soit entre 10 et 20 m³/s/km² pour les têtes de bassins versants, et autour de 5 m³/s/km² pour l'aval. Ces crues s'avèrent comparables aux autres crues majeures observées ces dernières années à l'échelle européenne, sans pour autant être celles ayant produit les débits spécifiques les plus importants. Ce bilan hydro-météorologique montre la valeur ajoutée d'organisation de retours d'expérience post-crue afin d'estimer les précipitations et débits susceptibles d'être observés dans ces régions sujettes aux crues éclair.

French Riviera floods: hydrometeorological comparison of 2015 and 2019 extremes events

ABSTRACT

The main goal of this paper is to present a hydro-meteorological assessment of the last three major floods observed on the small coastal watersheds of the French Riviera (October 3, 23 November 2015, 2019 and 1 December 2019). The joint analysis of precipitation data from rain gauges and of several quantitative precipitation estimates products (PANTHERE, ANTILOPE and RAINPOL) shows that the two episodes of 3 October 2015 and 1 December 2019 are characterised by very high rainfall intensities, with local accumulations of more than 100 [mm] in less than 3 hours, while the November 2019 episode was less intense and more uniform over the studied catchments. Estimated peak flows are of the same order of magnitude for the 2015 and December 2019 episodes, i.e. between 10 and 20 m³/s/km² for the headwater catchments (drained surfaces less than 10 km²), and around 5 m³/s/km² for the downstream catchments (drained surfaces between 10 and 60 km²). These floods are comparable to the major floods observed in recent years on a European scale, without being those that have produced the highest specific flows. This hydro-meteorological assessment shows the necessity and the interest of the instrumentation of the French Riviera coastal catchments and the added value of organising post-flood feedback in order to estimate the precipitation and flows likely to be observed in these regions prone to flash floods. Such studies are also useful to take a step back on the data and tools used for hydro-meteorological forecasting purposes on these catchments.

MOTS CLES

Crue-éclair ; événements hydrométéorologiques extrêmes ; crues ; REX ; HyMeX ; Côte d'Azur

KEYWORDS

Flash-flood; extreme hydro-meteorological events; floods; HyMeX; French Riviera

1. Introduction

Le 3 octobre 2015, un épisode pluvieux particulièrement intense a touché la Côte d'Azur, et a engendré des crues-éclair dévastatrices sur plusieurs fleuves côtiers du département des Alpes-Maritimes, impactant principalement les communes de Cannes, Mandelieu-la-Napoule, Antibes et Biot. Le bilan de cet épisode est lourd, avec 20 victimes et plus de 600

millions d'euros de dégâts assurés. La Brague est l'un des fleuves côtiers qui a le plus réagi aux intenses précipitations, détruisant notamment la seule station hydrométrique présente sur le cours d'eau. Fin 2019, deux nouveaux épisodes intenses ont touché la même région du Sud-Est de la France, le 23 novembre puis le 1^{er} décembre, engendrant un nouveau lourd bilan humain (9 décès) et des dégâts matériels considérables

(390 millions d'euros de dégâts assurés). Ces trois épisodes ont impacté la même zone côtière de la Côte d'Azur, située entre l'Est du département du Var (Fréjus) et l'Ouest des Alpes-Maritimes (Antibes). Les bassins versants qui ont été impactés sont caractérisés par leur faible surface ($< 100 \text{ km}^2$) et leur relief assez marqué. De plus, ils ont été touchés par des cumuls de précipitations très importants, avec de fortes variabilités spatiale et temporelle des intensités, impliquant des temps de réaction très courts des cours d'eau, ainsi qu'un contexte de ruissellement en milieu urbain complexe à caractériser. Ces bassins sont peu instrumentés du fait, notamment, du nombre important de rivières à équiper et des difficultés de mise en œuvre des techniques d'hydrométrie dans un contexte de crues éclair. A la suite de l'épisode d'octobre 2015, une campagne d'instrumentation en pluviomètres et en limnimètres est en cours sur ce territoire (campagne orchestrée par le SMIAGE, dans le cadre du projet de recherche Interreg ALCOTRA « Risq'Eau »), afin d'offrir les données nécessaires au suivi en temps réel des épisodes de crues-éclair. Toutefois, des références en termes de cumuls de pluies et de débits potentiellement générés par ce type d'épisode restent à établir, ceci afin de définir des seuils d'alerte sur ce territoire.

Dans un contexte plus large, la réalisation de retours d'expériences (REX) hydro-météorologiques à la suite de crues-éclair importantes s'est généralisée depuis quelques années, tout particulièrement depuis 2010 sous l'impulsion du programme de recherche HyMeX (Ducrocq et al., 2019). Ces études, couplant analyse météorologique, hydrologique et hydraulique, permettent, en combinant mesures sur le terrain et modélisation, d'évaluer les débits de pointe ayant transité sur des tronçons jaugés et non-jaugés. Différentes crues marquantes des dernières années ont ainsi été analysées : crues de l'Aude de novembre 1999 par Gaume et al. (2004), crues du Gard et du Vidourle de septembre 2002 par Gaume et Bouvier (2004) et Delrieu et al. (2005), crue de juin 2010 dans la région de Draguignan par Payrastre et al. (2019), crue d'octobre 2014 à Montpellier par Brunet et al. (2018), crue de septembre 2015 dans l'Hérault par Brunet et Bouvier (2017), crue de l'Aude en octobre 2018 par Lebouc et al. (2019) et Hocini et al. (2021), etc. La compilation de l'ensemble des données produites lors de ces REX a permis, durant la dernière décennie, de constituer des bases de données des débits de pointe observés/estimés sur de petits bassins versants méditerranéens (Amponsah et al., 2018 ; Gaume et al., 2009 ; Marchi et al., 2010) et de les relier aux caractéristiques des bassins et à celles des épisodes météorologiques générateurs (e.g. intensité et durée de la pluie). Ces travaux sont de grande

importance afin d'estimer, sur de petits bassins versants non-jaugés, les débits potentiellement observables lors de crues-éclair intenses, et de mieux caractériser le comportement hydrologique de ces bassins. De plus, les débits de pointe estimés peuvent être utilisés dans le cadre de travaux de modélisation hydraulique d'emprise d'inondation, à la fois comme entrée de modèle et comme données de validation (e.g. DDTM 06, 2018 ; Kirstetter et al., 2020 ; Hocini et al., 2021).

Plusieurs retours d'expérience ont été menés à la suite de la crue d'octobre 2015 (Carrega 2017 ; Préfecture des Alpes-Maritimes, 2016 ; Viollet, 2017). Dans le cadre du programme HyMeX, une reconstitution des débits de pointe a également été menée sur 36 sections de rivière appartenant aux bassins du Riou de l'Argentière, des Frayères et de la Brague (Lebouc et Payrastre, 2017). Début 2020, une campagne de terrain a également été menée suite aux épisodes de fin 2019, et des débits de pointe ont été estimés sur 16 sections (Lebouc et Payrastre, 2020), certaines ayant d'ores et déjà été étudiées lors de la campagne post-2015 (notamment sur le bassin du Riou de l'Argentière), d'autres nouvelles (notamment dans le département du Var, dans les bassins de la Grande Garonne, du Reyran, et de l'Agay, fortement impactés par les épisodes de fin 2019, et moins par l'épisode de 2015). Pourtant, aucune analyse comparative n'a encore été menée sur l'ensemble de ces bassins versants et pour ces trois épisodes marquants. De plus, les débits de pointe estimés après les deux épisodes de 2019 doivent être attribués, pour chaque section, à l'un des deux épisodes : les laisses de crues relevées sont-elles liées à l'épisode du 23 novembre ou bien à celui du 1^{er} décembre ?

L'objectif de cet article est de constituer un bilan hydro-météorologique de ces trois épisodes majeurs observés sur les bassins versants côtiers de la Côte d'Azur, afin de comparer les ordres de grandeurs des cumuls pluviométriques observés et des débits engendrés sur ces bassins versants. Une première partie de cette étude vise à discuter des cumuls pluviométriques observés dans la région en comparant différents produits de lames d'eau (PANTHERE, ANTILOPE, RAINPOL) avec les cumuls de pluviomètres. Une deuxième partie visera à comparer les débits observés et estimés sur le terrain avec des résultats de modélisation pluie-débit (avec un modèle semi-distribué événementiel), de façon à illustrer les différences des réponses hydrologiques des bassins versants aux cours des trois épisodes. Ces comparaisons permettront également de prendre du recul sur les données disponibles en crise, et également sur les outils potentiels d'aide à la décision et de prévision hydrométéorologique sur ces bassins versants.

2. Données utilisées

2.1. Données géomatiques

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) « RGE ALTI » de l'IGN (2018) a été utilisé à la résolution 5 [m] pour cette étude, pour la définition de directions d'écoulement, du réseau hydrographique (ici constitué par les mailles drainant plus de 10^4 mailles, soit 0.25 km^2), des contours et des surfaces des bassins versants, ainsi que des distances d'écoulement sur les versants et en rivières.

2.2. Données météorologiques

Plusieurs sources de données pluviométriques ont été considérées dans cette étude. Trois produits de lames d'eau ont été extraits sur la zone d'étude, les deux premiers étant disponibles en temps réel (RAINPOL et PANTHERE) et le troisième étant une réanalyse, disponible un jour après un épisode donné (ANTILOPE). Les lames d'eau RAINPOL et PANTHERE (Tabary et al., 2013) sont des lames d'eau estimées uniquement à partir du traitement de « données radar », et sont disponibles en temps réel, sur une grille de 1 km^2 et au pas de temps 5 minutes. La troisième lame d'eau considérée est la réanalyse ANTILOPE (Laurantin, 2008), estimée à « $j + 1$ » à partir de la combinaison de « données radar » et de cumuls des pluviomètres disponible. Les données ANTILOPE sont disponibles sur une grille de 1 km^2 (maillage illustré sur la Figure 1) et au pas de temps 15 minutes.

Des cumuls issus de 20 pluviomètres (10 de Météo-France, 6 du SMIAGE, 2 de la CAVEM et 2 pluviomètres « amateurs ») ont également été utilisés pour comparaison. La position de ces différents pluviomètres est illustrée sur la Figure 1 et leurs caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau 1.

2.3. Données hydrologiques

2.3.1. Séries temporelles de hauteurs d'eau en rivière et de débits

Les séries temporelles de hauteurs et de débits issues de quatre limnimètres de la DREAL PACA et d'un limnimètre du SMIAGE ont été extraites pour cette étude. Les caractéristiques de ces limnimètres sont résumées dans le Tableau 2, et leur position est présentée sur la Figure 1. Dans la suite de cet article, ces données sont nommées « données observées ».

2.3.2. Estimation de débits de pointe

Les estimations de débits de pointe réalisées lors de deux campagnes de terrain post-2015 et post-2019 dans le cadre du projet HyMeX ont également été utilisées dans cette étude, pour comparaison avec les débits simulés. La méthodologie appliquée lors de ces « campagnes post-crue » est détaillée par différents articles (e.g. Gaume et Borga, 2008) et fait l'objet du chapitre n°7 de la Charte qualité de l'hydrométrie (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2017). La position des sections étudiées lors des campagnes post-crue HyMeX (post-2015 et post-2019) est présentée sur la Figure 1

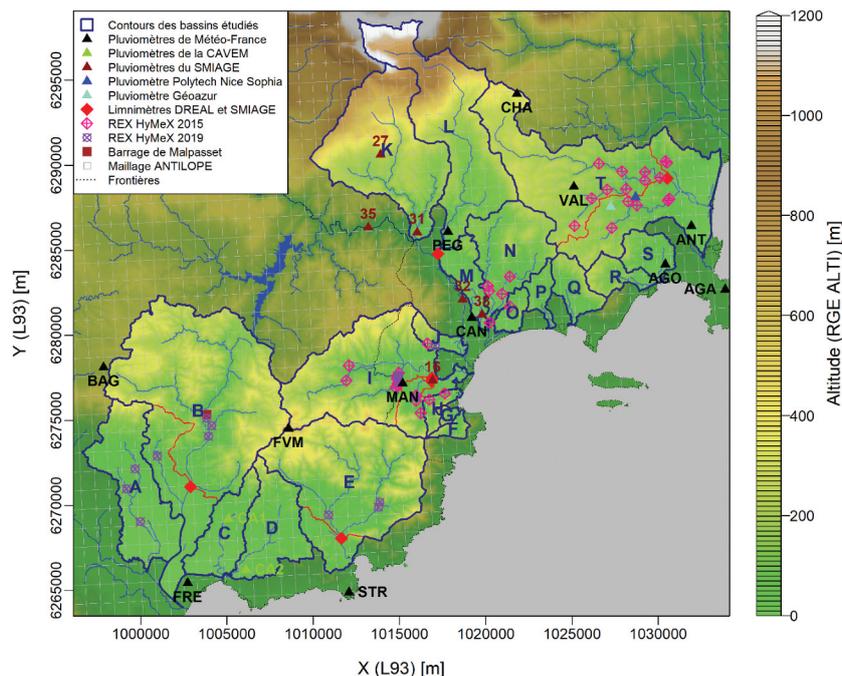


Figure 1. Contours des bassins versants étudiés, position des pluviomètres et limnimètres étudiés et position des sections sur lesquelles des débits de pointe ont été estimés lors des campagnes post-crue HyMeX. Le réseau hydrographique est ici représenté comme constitué des mailles drainant plus de 2.5 km^2 .

3. Modélisation pluie-debit semi-distribuée

Le modèle évènementiel semi-distribué KLEM (*Kinematic Local Excess Model*, Borga et al., 2007) a été utilisé dans cette étude. La fonction de production de KLEM est celle du SCS-CN, développée en 1954 par le *USDA Soil Conservation Service (SCS)*, et décrit dans les versions successives du *SCS National Engineering Handbook*. Le transfert est assuré par hydrogrammes unitaires constitués par l'analyse géomorphologique de chaque sous-bassin versant. Les sections suivantes visent à décrire ce modèle et ses conditions d'application.

3.1. Fonction de production (SCS-CN)

La fonction de production SCS-CN permet d'estimer, à partir de la pluie brute et pour chaque bassin versant étudié, la pluie nette à chaque pas de temps. Ce calcul dépend d'un seul paramètre, nommé CN (pour *Curve Number*, sans unité), qui reflète la capacité d'infiltration du bassin versant étudié (fonction du type de sol, de l'occupation des sols, des pluies antécédentes, etc.). CN varie entre 30 et 100 [-]: un bassin versant caractérisé par un CN de 100 est un bassin versant n'ayant aucune capacité d'infiltration (pluie nette = pluie brute), alors qu'un bassin versant caractérisé par un CN de 30 est un bassin avec une très grande capacité d'infiltration (pluie nette \ll pluie brute). Si les valeurs de CN peuvent être estimées à partir d'analyses géomatiques et hydrogéologiques de chaque sous-bassin versant, différentes valeurs de CN ont volontairement été considérées dans cette étude de façon à appréhender la variabilité spatiale et inter-événementielle du comportement hydrologique des bassins versants : CN variera, pour chaque bassin versant, entre 40 et 100 par pas de 5.

3.2. Fonction de transfert (hydrogrammes unitaires)

Le modèle KLEM est constitué d'une fonction de transfert basé sur un hydrogramme unitaire construit à la suite d'une analyse géomatique des bassins versants étudiés. Cette analyse vise à estimer, en premier lieu, les distances entre chaque maille du territoire étudié et les exutoires d'intérêt. Une distinction est faite entre la distance parcourue sur les versants et celle parcourue en rivière (i.e. au sein du réseau hydrographique) : la vitesse d'écoulement sur les versants est supposée plus lente que celle en rivière. Après une analyse de sensibilité du modèle KLEM (non illustrée ici), ces vitesses ont été fixées à 0.5 m/s pour les écoulements sur les versants, et à 2 m/s pour les écoulements en rivière. Ces distances ont été estimées à partir d'une analyse du MNT réalisée via

les fonctions de la version 5 du logiciel TauDEM (<https://hydrology.usu.edu/taudem/>). Elles ont ensuite été utilisées pour calculer, pour chaque maille x appartenant à un bassin versant étudié, le temps de transfert τ (en s) entre cette maille x et l'exutoire considéré :

$$\tau(x) = \frac{L_h(x)}{v_h} + \frac{L_c(x)}{v_c}, \text{ avec :} \quad (1)$$

- $L_h(x)$: distance entre la maille « x » et l'exutoire considéré parcourue sur les versants [m] ;
- v_h : vitesse de déplacement sur les versants [m/s].
- $L_c(x)$: distance entre la maille « x » et l'exutoire considéré parcourue en rivière [m] ;
- v_c : vitesse de déplacement en rivière [m/s].

L'estimation de ces temps de parcours sur chaque maille du territoire étudié est ensuite utilisée pour calculer le débit simulé, au pas de temps t , à chaque exutoire étudié (noté Q et exprimé en m^3/s) par l'expression suivante (aucun débit de base initial n'est considéré dans cette étude) :

$$Q(t) = \int_A q[t - \tau(x), x] dx, \text{ avec :} \quad (2)$$

- A : surface drainée en amont de la maille « x » [km^2] ;
- q : pluie nette estimée au pas de temps « t » et à la maille « x » [m/s].

4. Analyse des pluies : quelle quantité d'eau a précipité ?

4.1. Evolution temporelle des cumuls de pluies

La Figure 2 présente l'évolution des cumuls de pluies, observés sur quatre pluviomètres différents (de Météo-France), et estimés par les trois lames d'eau (RAINPOL, PANTHERE, et ANTILOPE) sur les mailles correspondantes. Les données de ces pluviomètres étant utilisées pour la constitution de la réanalyse ANTILOPE, les cumuls des pluviomètres et des mailles ANTILOPE correspondantes sont confondus, par construction. Pour les trois épisodes, la dynamique temporelle des cumuls est bien représentée par les différentes lames d'eau. Cette dynamique se révèle être très différente selon les épisodes : octobre 2015 a été particulièrement intense sur des pas de temps courts (e.g. 160 mm en moins de 2 heures sur le pluviomètre de Cannes). L'épisode de décembre 2019 a également été caractérisé par de fortes intensités (e.g. 100 mm en 3 heures à Cannes). Enfin, l'épisode de novembre 2019 s'est révélé plus long et moins intense sur l'ensemble des pluviomètres présentés sur cette figure.

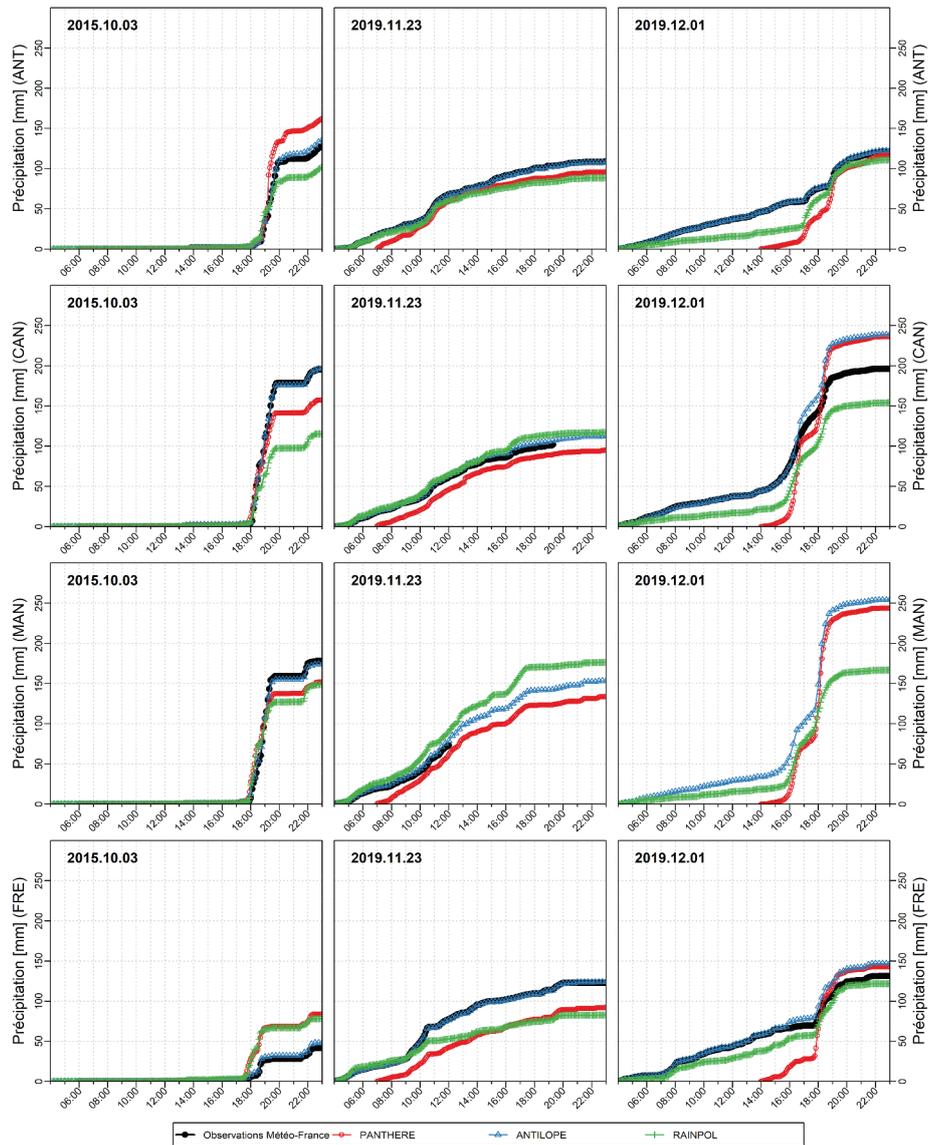


Figure 2. Cumuls pluviométriques observés sur quatre pluviomètres (de haut en bas : Antibes, Cannes, Mandelieu-La-Napoule et Fréjus) et sur les mailles correspondantes pour chacune des trois bases de données considérées (UTC). Le pluviomètre de Mandelieu-La-Napoule est tombé en panne lors de l'épisode de novembre 2019, et n'était pas opérationnel lors de celui de décembre 2019.

4.2. Variabilité spatiale des cumuls de pluies

La Figure 3 présente la variabilité spatiale des cumuls pluviométriques pour les trois épisodes étudiés, et pour les trois lames d'eau (RAINPOL, PANTHERE, et ANTILOPE). Ces cumuls ont été estimés sur la même période horaire pour les trois épisodes, à savoir de 4 h à 23 h (cf. Figure 2). La répartition spatiale des cumuls estimés lors de l'épisode du 3 octobre 2015 est similaire pour les trois lames d'eau, avec les cumuls les plus importants (~200 mm) observés à l'aval du Riou de l'Argentière, des Frayères et de la Brague. Les cumuls estimés par RAINPOL sont inférieurs à ceux estimés par PANTHERE et ANTILOPE pour cet épisode. L'épisode de novembre 2019 présente une répartition spatiale des précipitations différente selon les données considérées : ANTILOPE montre

des cumuls plus importants (~150 à 200 mm) sur la quasi-totalité du secteur, touchant principalement l'amont du Reyran, l'Agay, l'amont du Riou de l'Argentière, de la Mourachonne et de la Brague. Les cumuls estimés par PANTHERE et RAINPOL sont inférieurs et plus concentrés sur le Reyran, l'Agay et le Riou de l'Argentière. Enfin, l'épisode de décembre 2019 est celui présentant les cumuls pluviométriques estimés les plus importants, localisés pour les trois bases de données à l'aval du Riou de l'Argentière (plus de 300 mm pour PANTHERE). Cette région est la seule touchée par des cumuls importants selon RAINPOL, alors que PANTHERE et ANTILOPE présentent également des cumuls très importants à l'aval des Frayères, sur l'Agay, le Reyran et la Grande Garonne, avec des cumuls supérieurs à 220 mm sur ces bassins.

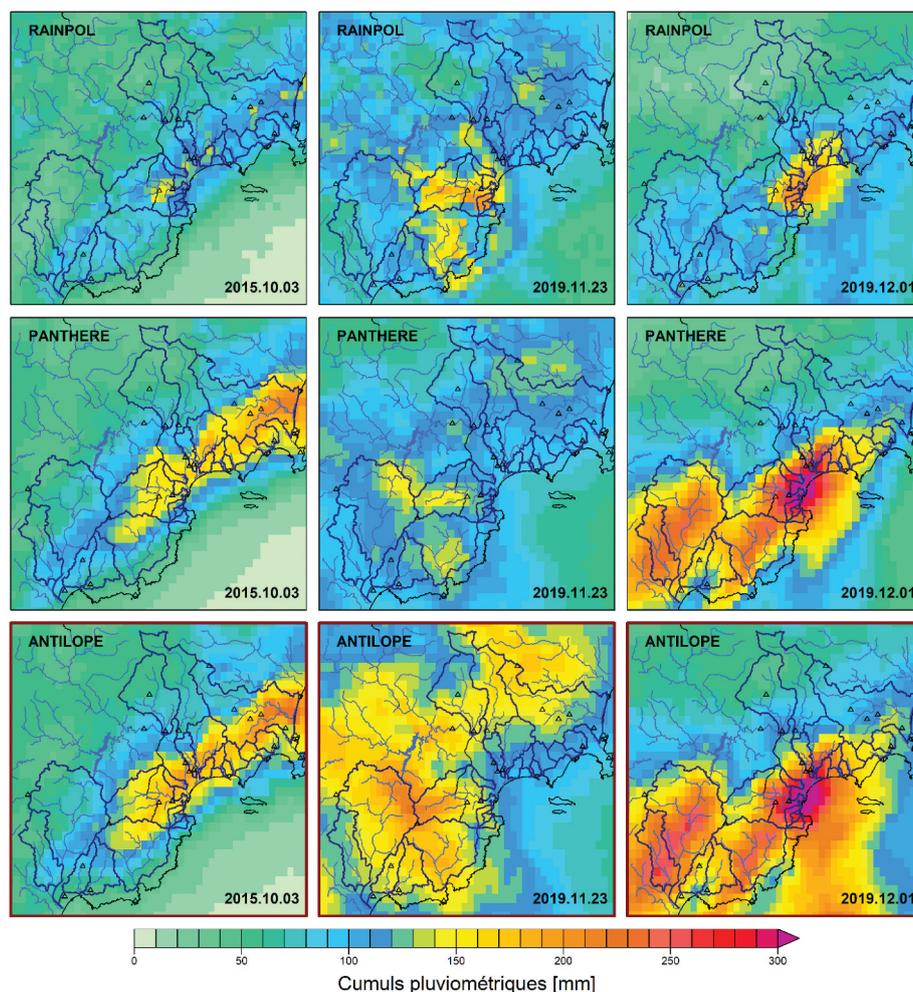


Figure 3. Comparaison des cumuls de pluies RAINPOL (en haut), PANTHERE (au milieu) et ANTILOPE (en bas) pour les trois épisodes étudiés : 03/10/2015, 23/11/2019, 01/12/2019, de 4 h à 23 h.

4.3. Comparaison des cumuls des pluviomètres avec ceux des lames d'eau

La Figure 4 permet de comparer les cumuls de chaque pluviomètre considéré dans cette étude avec ceux des mailles RAINPOL, PANTHERE et ANTILOPE correspondantes. Pour l'épisode d'octobre 2015, seuls les pluviomètres de Météo-France sont disponibles. Une variabilité spatiale importante des cumuls est constatée pour cet épisode, avec des cumuls compris entre 40 mm et plus de 200 mm. Les cumuls des pluviomètres de Cannes (CAN) et de Mandelieu (MAN) sont plus importants que ceux des mailles correspondantes, à la fois pour PANTHERE et RAINPOL. L'ensemble des autres pluviomètres montrent des cumuls légèrement inférieurs aux cumuls des mailles correspondantes pour PANTHERE. L'utilisation des cumuls des pluviomètres de Météo-France pour la constitution de la réanalyse ANTILOPE est bien visible : les cumuls sont égaux. La variabilité spatiale des cumuls observés lors de l'épisode de novembre 2019 est moins importante que lors de l'épisode d'octobre 2015, avec des cumuls compris entre 50 mm et 180 mm. Les cumuls des mailles PANTHERE semblent être légèrement inférieurs à ceux des

pluviomètres correspondants. On retrouve cette même sous-estimation pour RAINPOL, de manière légèrement plus importante, à l'exception du cumul du pluviomètre n°16 (situé à Mandelieu), qui, pour les trois lames d'eau, est largement inférieur aux cumuls des mailles correspondantes. Pour cet épisode, les cumuls ANTILOPE apparaissent cohérents avec la majorité des pluviomètres considérés (à l'exception du pluviomètre n°16). La variabilité spatiale des cumuls estimés lors de l'épisode de décembre 2019 est très importante, avec des valeurs comprises entre 30 mm et plus de 300 mm. Pour cet épisode, RAINPOL sous-estime les cumuls de la majorité des pluviomètres, alors que PANTHERE tend à surestimer les cumuls. Cette surestimation est moins importante pour ANTILOPE, avec tout de même des écarts importants pour deux pluviomètres (n°16 et n°38).

4.4. Principaux enseignements sur les précipitations observées

On peut retenir de cette première analyse des pluies que les événements d'octobre 2015 et de décembre 2019 sont caractérisés par des intensités pluvieuses

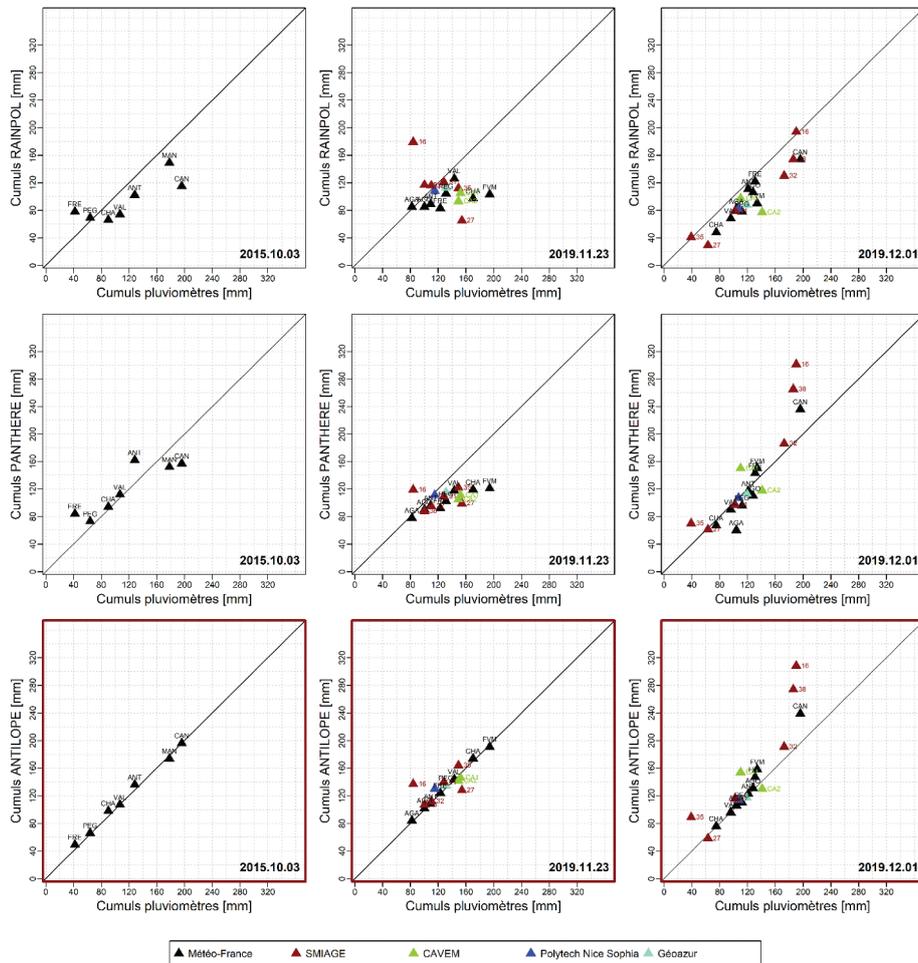


Figure 4. Comparaison des cumuls de pluies RAINPOL, PANTHERE et ANTILOPE avec ceux des pluviomètres, pour les trois épisodes étudiés : 03/10/2015, 23/11/2019, 01/12/2019, de 4 h à 23 h.

très fortes, observées sur de courtes durées : la majorité des cumuls de précipitations ont été observés en seulement 3 à 4 heures au maximum (2 heures pour octobre 2015). Ces fortes intensités sont associées à une forte variabilité spatiale des pluies, les plus forts cumuls étant observés dans chaque cas sur l'aval des bassins côtiers étudiés. L'épisode d'octobre 2015 a principalement touché les bassins versants les plus à l'est du secteur étudié, alors que les bassins versants les plus à l'ouest ont été principalement impactés par l'épisode de décembre 2019.

L'épisode de novembre 2019 se démarque assez nettement des deux autres par le caractère beaucoup plus progressif des pluies, avec des intensités moindres mais observées sur une durée plus importante. De plus, les pluies observées lors de cet épisode ont été plus homogènes spatialement, et donc moins concentrées sur l'aval des bassins étudiés.

Cette analyse confirme également l'intérêt des lames d'eau radar pour appréhender de façon fine la répartition spatiale des précipitations, même si la qualité de ces lames d'eau peut s'avérer variable spatialement et d'un événement à l'autre.

5. Analyse de la réponse hydrologique des bassins versants étudiés : quelle quantité d'eau a ruisselé ?

5.1. Réponse des bassins versants jaugés

La Figure 5 présente la réaction des cinq bassins versants jaugés aux trois épisodes pluvieux considérés. Les simulations de débits obtenues via le modèle KLEM pour différentes valeurs de CN (de 40 à 100 [-]) et les précipitations de bassin versant calculées avec ANTILOPE sont également présentées dans cette figure.

5.1.1. Comparaison des simulations KLEM avec les observations disponibles

Le modèle KLEM semble reproduire fidèlement la dynamique des différents épisodes, sur les cinq bassins étudiés. La considération de différentes valeurs de CN permet d'encadrer les différentes réponses observées des bassins versants. Pour l'épisode d'octobre 2015 et pour les 3 bassins disposant de données hydrométriques (aucun limnimètre n'existait alors sur le Riou de l'Argentière et la station de la Brague a été « noyée » lors de cette crue), les simulations obtenues avec les

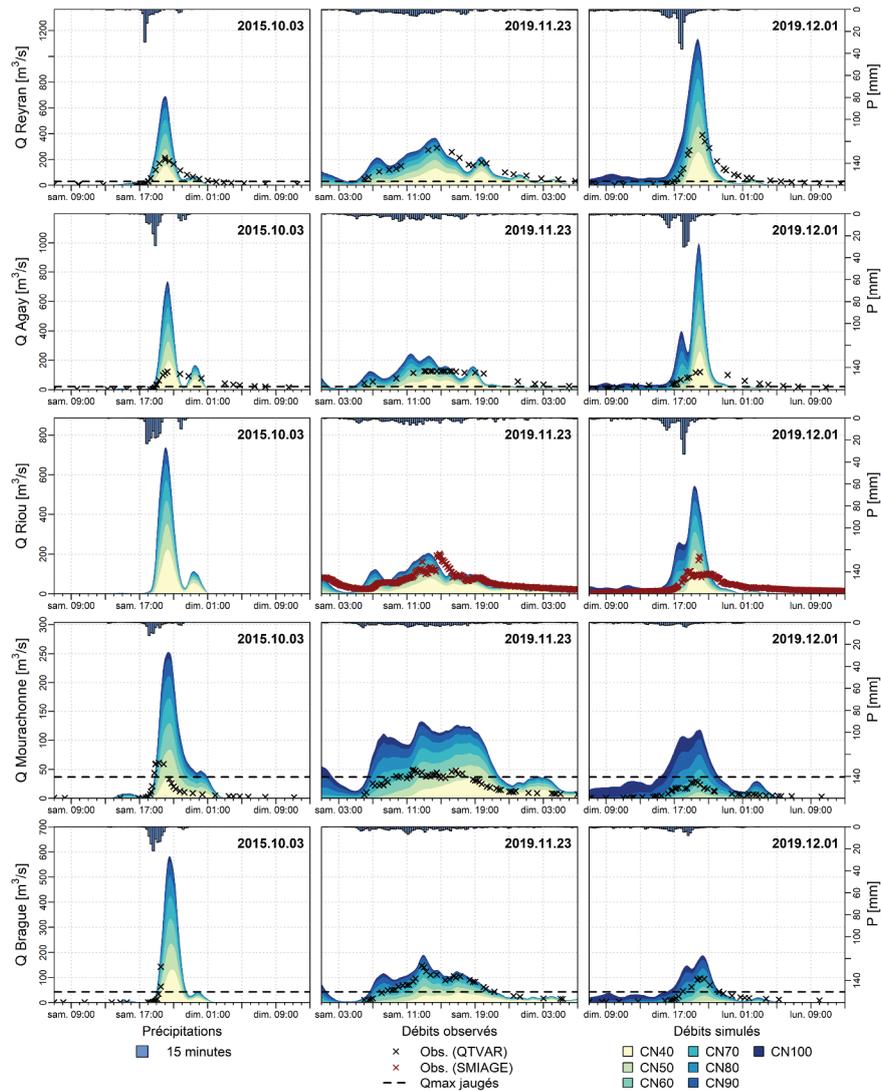


Figure 5. Comparaison des hydrogrammes observés et simulés pour cinq bassins versants jaugés (de haut en bas : le Reyran à Fréjus, l'Agay à Agay, le Riou de l'Argentière à Mandelieu-la-Napoule, la Mourachonne à Pégomas et la Brague à Biot) pour les trois épisodes étudiés. Les pluies de bassins versants représentées sur ce graphique sont les pluies ANTILOPE. Les barres horizontales indiquent, pour chaque station, le plus fort débit jaugé.

valeurs de CN les plus faibles (~ 40 à 50 [-]) semblent être les plus proches des débits observés. Des valeurs de CN plus importantes (~ 70 pour le Reyran et la Brague, ~ 50 pour l'Agay et la Mourachonne) sont nécessaires pour approcher les débits observés lors de l'épisode de novembre 2019. Enfin, ce sont les simulations réalisées avec un CN proche de 50 qui sont les plus proches des observations pour l'épisode de décembre 2019, sauf pour la Brague, où un CN plus important est nécessaire (~ 70). Cette analyse semble confirmer que les bassins versants ont joué un rôle atténuateur significatif du signal de pluie, les valeurs de CN « optimales » illustrant des capacités de rétention d'eau importantes du sous-sol des bassins. Ce rôle atténuateur semble avoir été sensiblement moins marqué pour l'épisode de novembre 2019.

Si les résultats d'un seul modèle hydrologique (KLEM) sont montrés dans cet article, une comparaison des résultats de KLEM avec ceux obtenus par le

modèle CINECAR a été menée, et a permis de vérifier la cohérence de l'ensemble des simulations pluie-débit réalisées. La validation de ces simulations pluie-débit se poursuit actuellement, avec l'utilisation des débits simulés en entrée de modèle hydraulique, afin de comparer les hauteurs d'eau simulée avec les données de Plus Hautes Eaux disponibles (e.g. Kirstetter et al., 2020).

5.1.2. Comparaison des débits

Les épisodes d'octobre 2015 et de décembre 2019 sont comparables, car très intenses (cumuls pluviométriques et réaction des bassins en quelques heures). La dynamique temporelle de l'épisode de novembre 2019 est différente, car plus lente, avec une réaction moins intense des cinq bassins jaugés étudiés.

L'épisode d'octobre 2015 a généré les débits les plus importants pour les trois bassins versants les plus à l'est (le Riou de l'Argentière, la Mourachonne et la

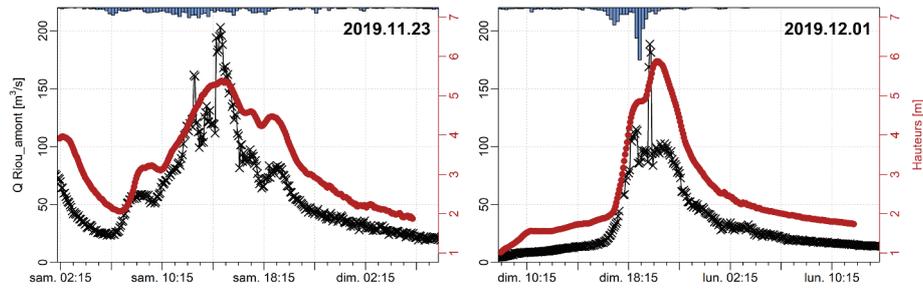


Figure 6. Limnigrammes et hydrogrammes du Riou de l'Argentière à Mandelieu-la-Napoule pour l'épisode de novembre (à gauche) et décembre 2019 (à droite).

Brague), alors que c'est l'épisode de décembre 2019 qui a généré les débits les plus importants pour les deux bassins versants du département du Var (le Reyran et l'Agay), avec des débits ayant pu dépasser $400 \text{ m}^3/\text{s}$ pour ces deux bassins.

Pour ce qui concerne le Riou de l'Argentière à Mandelieu-la-Napoule (troisième ligne en partant du haut de la Figure 5), si les hydrogrammes disponibles semblent indiquer que les débits les plus forts ont été observés en novembre 2019, une analyse couplée des limnigrammes et hydrogrammes de cette station montrent des potentielles incohérences dans les débits de pointe estimés (cf. Figure 6). Des dynamiques d'augmentation brutale des débits sont en effet constatées, alors que ces augmentations ne sont pas présentes dans les hauteurs. Elles pourraient être dues aux estimations des vitesses de surface (utilisées pour l'estimation des

débits, en lieu et place d'une courbe de tarage). Ces observations plaident bien pour l'attribution des plus forts débits observés à l'épisode de décembre 2019 sur le Riou de l'Argentière. De leur côté, les simulations indiquent que les débits ont dû être au moins équivalents, voire légèrement supérieurs, en 2015 sur ce bassin (station inexistante lors de cet épisode).

5.2. Réponse des bassins non jaugés (débits issus des campagnes HyMeX)

La Figure 7 présente une comparaison entre les débits de pointe simulés par KLEM au niveau des sections étudiées dans le cadre des campagnes HyMeX avec les débits de pointe estimés sur le terrain suite à ces campagnes post-2015 (36 sections levées) et post-2019 (16 sections levées).

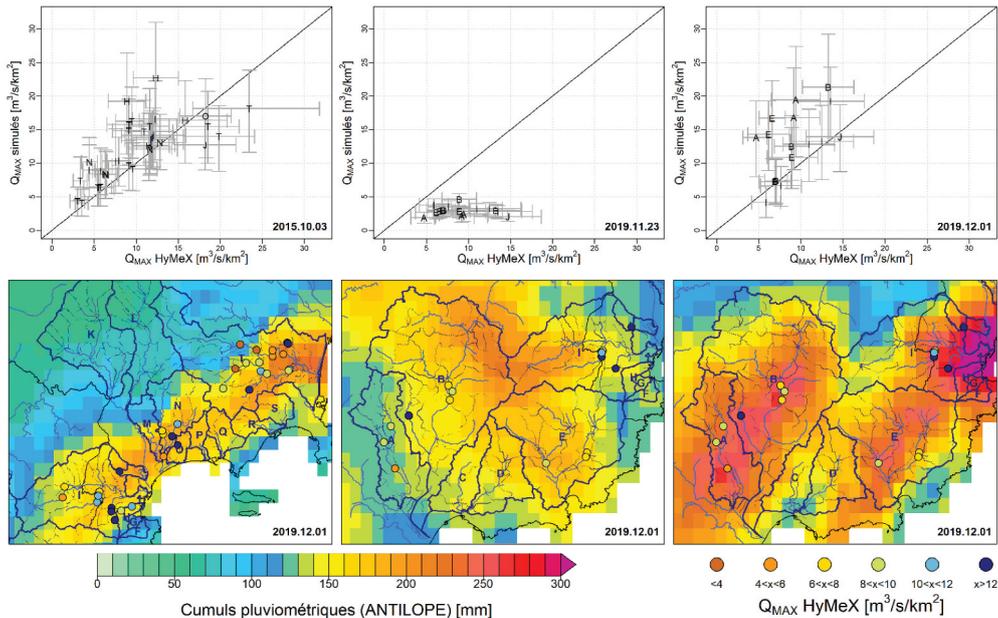


Figure 7. Comparaison entre les débits spécifiques estimés sur le terrain lors des campagnes post-crise HyMeX avec les débits simulés par KLEM (avec un CN égal à 50), pour les trois épisodes étudiés. Les lettres indiquent, pour chaque section, le bassin versant dans lequel elles se trouvent. Les barres d'erreurs horizontales représentent l'incertitude d'estimation des débits HyMeX, et celles verticales les débits simulés avec un CN de 40 et de 60. Les cartes (en bas) représentent les cumuls de pluies ANTILOPE des trois épisodes, et les débits spécifiques HyMeX.

Pour chaque section, les incertitudes d'estimation des débits de pointe sont prises en compte en représentant les débits simulés avec des valeurs de CN comprises entre 40 et 60 (barres verticales), et en représentant l'intervalle de confiance d'estimation des débits sur le terrain (barres horizontales). Pour s'assurer de la cohérence entre ces débits de pointe et les cumuls de précipitations, une cartographie des débits de pointe estimés sur le terrain et des cumuls de pluie ANTILOPE est également proposée (dernière ligne de la Figure 7).

5.2.1. Episode d'octobre 2015

L'analyse de l'épisode de 2015 (première colonne) montre tout d'abord que la considération d'un CN de 50 [40-60] est cohérente pour les 36 sections/exutoires étudiés. Ceci correspond bien à ce qui est observé aux stations pour ce même épisode (cf. Figure 5). Les différences notables entre le modèle et les estimations HyMeX s'observent sur les plus petits bassins versants (e.g. bassin versant de la Rague (H), de la Théoulière (J)), pour lesquels les incertitudes sont plus importantes (estimation des pluies de bassins versants, estimation de la surface drainée, etc.). Si Lebouc et Payrastra (2017) avaient trouvé une valeur de CN « optimale » égale à 70 sur les mêmes bassins versants, il est important de noter que leur travail de modélisation (réalisé avec le modèle CINECAR) avait alors été mené avec la lame d'eau PANTHERE, et non ANTILOPE, comme dans le présent travail. Sur les bassins versants étudiés, les cumuls estimés à partir de la lame d'eau ANTILOPE sont plus importants que ceux estimés avec la lame d'eau PANTHERE, ce qui tend de fait à diminuer la valeur de CN considérée comme optimale : il est nécessaire d'intercepter plus d'eau pour obtenir les mêmes débits.

L'analyse spatiale montre également une cohérence entre les débits de pointe modélisés/estimés et les cumuls de précipitations, les débits les plus forts étant retrouvés à l'exutoire des bassins versants avec les plus forts cumuls de précipitations.

5.2.2. Episodes de 2019

La comparaison des simulations et estimations post-2019 (deux dernières colonnes de la Figure 7) s'avère plus délicate. En effet, les débits de pointe HyMeX (estimés sur le terrain) n'ont pas pu, jusqu'ici, être attribués de façon certaine à l'épisode de novembre 2019 ou à celui de décembre 2019. Ces débits ont été comparés dans cette étude aux simulations obtenues pour les deux épisodes : les résultats obtenus montrent que les débits de pointe simulés en novembre 2019 sont largement inférieurs à ceux observés sur le terrain pour la grande majorité des 16 exutoires étudiés. Par ailleurs, les débits simulés avec un CN de 50 [40-60] pour l'épisode de décembre 2019 sont globalement plus cohérents avec ceux estimés sur le terrain, même s'ils semblent parfois surestimés. Cette surestimation ponctuelle des débits de pointe pourrait s'expliquer par une surestimation des cumuls de pluies ANTILOPE sur les bassins versants étudiés (cf. Section 4.3). Cette première analyse tend à considérer l'épisode de décembre 2019 comme celui ayant généré les débits les plus forts régionalement, ce qui est cohérent avec l'analyse des cumuls et intensités des pluies, ainsi que les données fournies par les stations hydrométriques.

5.2.3. Rendements d'écoulements estimés pour les épisodes d'octobre 2015 et décembre 2019

La partie droite de la Figure 8 illustre les rendements d'écoulement estimés pour chaque bassin versant pour les épisodes d'octobre 2015 et de décembre 2019, en comparant les débits de pointe

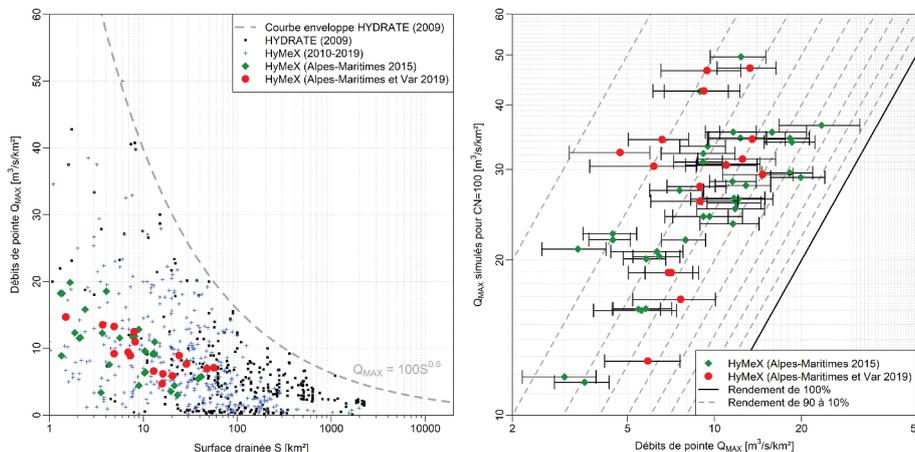


Figure 8. (à gauche) comparaison des débits de pointe estimés sur la Côte d'Azur lors des épisodes de 2015 et 2019 avec ceux estimés lors d'autres épisodes ; (à droite) rendements d'écoulement des bassins versants étudiés lors des épisodes de 2015 et de 2019.

Tableau 1. Liste et caractéristiques des pluviomètres considérés dans cette étude. Les trois dernières colonnes listent les cumulés (en mm) calculés sur chaque pluviomètre (de 4 h à 23 h UTC) lors des trois épisodes étudiés.

| Code | Nom | Producteur | X [m] | Y [m] | 2015.10.03 | 2019.11.23 | 2019.12.01 |
|------|------------------------|--------------|---------|---------|------------|------------|------------|
| AGA | Antibes (Garoupe) | Météo-France | 1033872 | 6282688 | - | 82 | 104 |
| AGO | Antibes (Golf) | Météo-France | 1030404 | 6284177 | - | 100 | 128 |
| ANT | Antibes | Météo-France | 1031905 | 6286425 | 128 | 109 | 121 |
| CA1 | Peyron | CAVEM | 1005091 | 6269218 | - | 152 | 110 |
| CA2 | St-Esprit | CAVEM | 1006114 | 6266205 | - | 149 | 141 |
| CAN | Cannes | Météo-France | 1019187 | 6281034 | 196 | - | 196 |
| CHA | Châteauneuf-Grasse | Météo-France | 1021799 | 6294197 | 90 | 170 | 75 |
| FRE | Fréjus | Météo-France | 1002731 | 6265432 | 42 | 123 | 131 |
| FVM | Fréjus (Mont Vinaigre) | Météo-France | 1008578 | 6274514 | - | 194 | 134 |
| GEO | Géoazur | Géoazur | 1027234 | 6287561 | - | 131 | 119 |
| MAN | Mandelieu-la-Napoule | Météo-France | 1015178 | 6277174 | 178 | - | - |
| PEG | Pégomas | Météo-France | 1017810 | 6286095 | 64 | 131 | 112 |
| POL | Polytech Nice Sophia | Polytech | 1028679 | 6288131 | - | 115 | 107 |
| 16 | Mandelieu | SMIAGE | 1016916 | 6277349 | - | 84 | 190 |
| 27 | Peymeinade | SMIAGE | 1013908 | 6290620 | - | 154 | 63 |
| 31 | Auribeau | SMIAGE | 1016019 | 6286049 | - | 128 | 102 |
| 32 | Mandelieu-la-Napoule | SMIAGE | 1018651 | 6282096 | - | 110 | 173 |
| 35 | Tanneron | SMIAGE | 1013186 | 6286342 | - | 149 | 39 |
| 38 | Cannes | SMIAGE | 1019787 | 6281217 | - | 100 | 186 |
| VAL | Valbonne (Sophia) | Météo-France | 1025106 | 6288745 | 107 | 143 | 96 |

Tableau 2. Caractéristiques des bassins versants étudiés. Les bassins jaugés (i.e. avec une station limnimétrique) sont renseignés, et la surface drainée « jaugée » (S_j) en amont de la station est indiquée dans la dernière colonne.

| Code | Nom | S (km ²) | X [m] | Y [m] | Station | Producteur | S_j (km ²) |
|------|----------------------|----------------------|---------|---------|----------|------------|--------------------------|
| A | Grande Garonne | 27.22 | 1000380 | 6266114 | | | |
| B | Reyran | 91.15 | 1002461 | 6263999 | Y5325010 | DREAL PACA | 73.22 |
| C | Pédégal | 13.18 | 1004820 | 6265941 | | | |
| D | Garonne | 18.35 | 1005235 | 6265934 | | | |
| E | Agay | 54.38 | 1012330 | 6266830 | Y5505410 | DREAL PACA | 47.95 |
| F | Vallon de l'Autel | 1.83 | 1018785 | 6275554 | | | |
| G | Vallon du Suveret | 1.01 | 1018420 | 6275760 | | | |
| H | Rague | 2.68 | 1018436 | 6276345 | | | |
| I | Riou de l'Argentière | 46.76 | 1019305 | 6277774 | 32 | SMIAGE | 39.50 |
| J | Théoulière | 3.42 | 1018930 | 6279200 | | | |
| K | Riou d'Auribeau | 42.59 | 1015885 | 6285560 | | | |
| L | Mourachonne | 43.72 | 1017145 | 6284646 | Y5535410 | DREAL PACA | 43.71 |
| M | Béal | 7.51 | 1020141 | 6280253 | | | |
| N | Frayères | 20.91 | 1020151 | 6280295 | | | |
| O | Roquebillière | 3.35 | 1021140 | 6280225 | | | |
| P | Riou | 3.67 | 1023550 | 6280397 | | | |
| Q | Foux | 6.88 | 1024775 | 6280562 | | | |
| R | Vallon d'Issourdadou | 5.73 | 1030296 | 6283174 | | | |
| S | Vallon de Madé | 6.68 | 1030305 | 6283196 | | | |
| T | Brague | 72.37 | 1033161 | 6287439 | Y5605205 | DREAL PACA | 41.84 |

estimés sur le terrain lors des campagnes post-crue HyMeX avec les débits de pointe simulés avec le modèle KLEM en considérant un CN égal à 100, i.e. en considérant l'hypothèse que la pluie nette est égale à la pluie brute. Cette figure illustre tout d'abord la variabilité importante des rendements d'écoulement qui varient de 15 à 70%, ce qui signifie que les bassins versants ont atteint des niveaux de saturation très variables. Ceci est probablement à relier à la forte variabilité spatiale des cumuls de pluie observés. Par ailleurs, les rendements

semblent avoir atteint des valeurs légèrement supérieures pour l'épisode de 2015, les rendements estimés ne dépassant pas les 50% pour l'épisode de 2019.

6. Comparaison aux crues extrêmes observées dans la période récente

La partie gauche de la Figure 8 permet de comparer les débits spécifiques estimés lors de ces trois épisodes à ceux estimés lors d'autres épisodes hydro-

météorologiques intenses (en France et à l'étranger), étudiés dans le cadre des projets HYDRATE (Gaume et al., 2009) et HyMeX (Ducrocq et al., 2019). Les débits spécifiques estimés sur la Côte d'Azur sont inférieurs à la courbe enveloppe HYDRATE et sont du même ordre de grandeur pour les épisodes de 2015 et 2019 : entre 10 et 20 m³/s/km² pour les têtes de bassins versants (surfaces drainées inférieures à 10 km²), et autour de 5 m³/s/km² pour l'aval (surfaces drainées entre 10 et 60 km²). Ces débits restent inférieurs à ceux observés sur d'autres bassins en France lors de la décennie HyMeX, soit entre 2010 et 2019, les valeurs les plus importantes ayant été observées dans le secteur des Cévennes sur cette période.

7. Conclusion

Cet article permet de dresser un premier bilan comparatif des trois épisodes d'octobre 2015, de novembre 2019 et de décembre 2019 sur plusieurs bassins versants côtiers de l'est varois et de l'ouest des Alpes-Maritimes. Dans un premier temps, l'analyse conjointe de données issues de pluviomètres et de lames d'eau constituées à partir de données radar a permis de mettre en évidence la forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations lors des trois événements. Les deux épisodes du 3 octobre 2015 et du 1^{er} décembre 2019 sont caractérisés par des intensités très importantes, avec des cumuls localement supérieurs à 100 mm en moins de 3 heures. Pour ces deux épisodes, les cumuls les plus importants ont été estimés sur la zone littorale, plus à l'ouest pour octobre 2015 (bassins versants du Riou de l'Argentière, des Frayères et de la Brague, principalement) et plus à l'est pour décembre 2019 (bassins versants de la Grande Garonne, du Reyran, de l'Agay et du Riou de l'Argentière, principalement). L'épisode de novembre 2019 a été moins intense sur des pas de temps courts, et plus uniformément réparti sur l'ensemble du territoire, même si des cumuls supérieurs à 180 mm ont été localement estimés. Malheureusement, certaines zones fortement arrosées (notamment dans le massif de l'Estérel) sont dépourvues de pluviomètres, ce qui ne permet pas de vérifier la cohérence de ces cumuls importants. La comparaison entre les cumuls de pluviomètres (même « amateurs ») et les données de lames d'eau est en effet cruciale dans un contexte où seules les lames d'eau rendent compte dans le détail de la variabilité spatiale importante des pluies. Pour les épisodes d'octobre 2015 et de novembre 2019, la comparaison a permis de montrer la cohérence des lames d'eau considérées (PANTHERE, ANTILOPE et RAINPOL) en termes de cumuls et de dynamique spatio-temporelle des pluies. Pour l'épisode de décembre 2019, une potentielle surestimation des cumuls estimés par PANTHERE et ANTILOPE a été identifiée dans des zones sans pluviomètres assimilés par ces

lames d'eau. Sur ce même épisode, RAINPOL, base de données n'assimilant pas de données issues de pluviomètres, semble sous-estimer les cumuls observés. L'explicitation des différences de cumuls entre ces trois bases de données (PANTHERE, ANTILOPE et RAINPOL) est une perspective importante de ce premier travail de bilan pluviométrique.

Sur le territoire étudié, la seule analyse des débits estimés via les stations hydrométriques disponibles ne suffit pas, car elle ne permet pas de couvrir l'ensemble du territoire, et est très incertaine. Ainsi, la comparaison des débits de pointe estimés aux stations et ceux (i) estimés sur le terrain et/ou (ii) issus de résultats de modélisation pluie-débit montre les limites de certaines stations hydrométriques (e.g. estimation de débits supérieurs à 60 m³/s sur la station de l'Agay, conversion hauteur-débit sur la station du Riou de l'Argentière). Ces limites sont connues et principalement liées à la difficulté de l'exercice hydrométrique dans cette région, couplée aux complications logistiques d'installation et de maintenance de telles stations. La mobilisation des données post-crue recueillies dans le cadre du projet HyMeX a permis ici de compléter et consolider l'analyse des réactions hydrologiques observées. Il apparaît finalement que l'épisode d'octobre 2015 a généré les débits les plus importants pour les trois bassins versants les plus à l'est (le Riou de l'Argentière, la Mourachonne et la Brague), alors que c'est l'épisode de décembre 2019 qui a généré les débits les plus importants pour les deux bassins versants du département du Var (le Reyran et l'Agay). En 2019, c'est bien l'épisode de décembre 2019 qui semble avoir généré les débits de pointe les plus importants sur l'ensemble des bassins versants étudiés. Les débits de pointe estimés sont du même ordre de grandeur pour les épisodes de 2015 et décembre 2019, soit entre 10 et 20 m³/s/km² pour les têtes de bassins versants (surfaces drainées inférieures à 10 km²), et autour de 5 m³/s/km² pour l'aval (surfaces drainées entre 10 et 60 km²). Il s'agit de valeurs comparables aux crues majeures observées ces dernières années à l'échelle européenne, sans être celles ayant produit les débits spécifiques les plus importants. Enfin, les rendements d'écoulements au moment du pic de crue semblent avoir atteint des valeurs sensiblement plus élevées lors de l'épisode d'octobre 2015.

Finalement, ce bilan hydro-météorologique permet de mettre en évidence la nécessité et l'intérêt de l'instrumentation des bassins versants côtiers de la Côte d'Azur et la valeur ajoutée d'organisation de retours d'expérience post-crue. La comparaison systématique de données observées, mesurées sur le terrain, et issues de modélisation permet en effet d'obtenir des ordres de grandeur des précipitations et débits susceptibles d'être observés dans ces régions sujettes aux crues éclaircies, et également de prendre du recul sur les données disponibles en crise et sur les outils potentiels d'aide à la décision et de prévision hydrométéorologique sur ces bassins versants.

8. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier (i) Emmanuel Moreau et Jacques Testud de NOVIMET pour la mise à disposition des données RAINPOL, (ii) Météo-France pour la mise à disposition des données PANTHERE et ANTILOPE, (iii) la CAVEM pour la mise à disposition de leurs données pluviométriques, (iv) la DREAL PACA pour la production et la mise à disposition des données hydrométriques, et (v) Raphaël Chochon pour son aide dans la récupération des cumuls de précipitation des stations de Géoazur et de Polytech Nice Sophia. Les enquêtes post-événement HyMeX ont été financées dans le cadre du programme MISTRALS/HyMeX du CNRS et de l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV, Service National d'Observation de l'INSU), et ont également bénéficié du soutien financier du Ministère de la Transition Écologique (DGPR/SCHAPI). Nous souhaitons remercier les membres de l'équipe « post event surveys » d'HyMeX qui ont participé à la collecte des données de terrain sur les crues d'octobre 2015 et novembre-décembre 2019 : Marco ADAMOVIC (HSM), Cyriel ADNES (UCA), Pierre Alain AYRAL (EMA), Philippe BELLEUDY (IGE), Antoine BLANC (IGE), Laurent BONNIFAIT (Cerema), Brice BOUDEVILLAIN (IGE), Pascal BRUNET (HSM), Théo CHAMARANDE (IGE), Margot CHA-PUIS (UCA), Maryse CHARPENTIER NOYER (Univ. Eiffel), Adrien COUTOUI (EMA), Jean Dominique CREUTIN (IGE), Daniel DELAGE (Météo-France – SPC Med.-Est), Guy DELRIEU (IGE), Lise DEVREUX (UCA), Johnny DOUVINET (Espace), Noémie FREALLE (EMA), Anne-Marie FROMENTAL (Cerema), Jean Loup GAYRARD (CNRM), Pascal GRANDMAISON (Météo-France – SPC Med.-Est), Nabil HOCINI (Univ. Eiffel), Anne JOHANNET (EMA), Laurent LÉBOUC (Univ. Eiffel), Léa POINSIGNON (Cerema), Isabelle RUIN (IGE), Saif SHABOU (IGE), Thibaut WASSNER (EMA) et Bruno WILHEM (IGE). Enfin, les auteurs souhaitent remercier les deux relecteurs anonymes pour leurs remarques qui ont contribué à améliorer le présent article.

Ce travail a été mené dans le cadre du projet européen Risq'Eau (Interreg ALCOTRA).

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

ORCID

Pierre Brigode  <http://orcid.org/0000-0001-8257-0741>

Références

- Amponsah, W., Ayral, P.-A., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Brunet, P., Delrieu, G., Didon-Lescot, J.-F., Gaume, E., Lebouc, L., Marchi, L., Marra, F., Morin, E., Nord, G., Payrastra, O., Zoccatelli, D., & Borga, M. (2018). Integrated high-resolution dataset of high-intensity European and Mediterranean flash floods. *Earth System Science Data*, 10(4), 1783–1794. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1783-2018>
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., & Sangati, M. (2007). Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 8(5), 1049–1067. American Meteorological Society. <https://doi.org/10.1175/JHM593.1>
- Brunet, P., & Bouvier, C. (2017). Retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault, France) : influence du karst sur les débits de pointe de crue. *La Houille Blanche*, 103(3), 39–46. <https://doi.org/10.1051/lhb/2017020>
- Brunet, P., Bouvier, C., & Neppel, L. (2018). Retour d'expérience sur les crues des 6 et 7 octobre 2014 à Montpellier-Grabels (Hérault, France) : caractéristiques hydro-météorologiques et contexte historique de l'épisode. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 12, 43–59. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5710>
- Carrega, P. (2017). Les inondations azuréennes du 3 octobre 2015 : un lourd bilan lié à un risque composite. *Pollution atmosphérique*, 228, 1–26. <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.5475>
- DDTM 06. (2018). *Etude hydraulique et dossiers nécessaires à l'élaboration ou la révision des PPRI de 10 communes des Alpes Maritimes. Lot 1 : Antibes – Biot – Vallauris. Phase 1 : étude de l'aléa inondation. Chapitre 3 : Modélisations hydrauliques.*
- Delrieu, G., Nicol, J., Yates, E., Kirstetter, P., Creutin, J., Anquetin, S., Obled, C., Saulnier, G., Ducrocq, V., Gaume, E., Payrastra, O., Andrieu, H., Ayral, P., Bouvier, C., Neppel, L., Livet, M., Lang, M., du-Châtelet, J. P., Walpersdorf, A., & Wobrock, W. (2005). The catastrophic flash-flood event of 8–9 September 2002 in the Gard Region, France: A first case study for the Cévennes–Vivarais mediterranean hydrometeorological observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6(1), 34–52. <https://doi.org/10.1175/JHM-400.1>
- Ducrocq, V., Boudevillain, B., Bouvier, C., Braud, I., Fourrie, N., Lebeaupin-Brossier, C., Javelle, P., Nuissier, O., Payrastra, O., Roux, H., Ruin, I., & Vincendon, B. (2019). Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. *La Houille Blanche*, 105(3–4), 5–12. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019048>
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., & Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- Gaume, E., & Borga, M. (2008). Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: Proposal of a methodology and illustrations. *Journal of Flood Risk Management*, 1(4), 175–189. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x>

- Gaume, E., & Bouvier, C. (2004). Analyse hydropluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002. *La Houille Blanche*, 90(6), 99–106. <https://doi.org/10.1051/lhb:200406014>
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., & Villeneuve, J.-P. (2004). Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, 286(1), 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.015>
- Hocini, N., Payrastre, O., Bourgin, F., Gaume, E., Davy, P., Lague, D., Poinson, L., & Pons, F. (2021). Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: A comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 2979–2995. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>
- IGN. (2018). *RGE ALTI version 2.0*. Descriptif de contenu.
- Kirstetter, G., Bourgin, F., Brigode, P., & Delestre, O. (2020). Real-time inundation mapping with a 2D hydraulic modelling tool based on adaptive grid refinement: The case of the October 2015 French Riviera Flood. In P. Gourbesville & G. Caignaert (Eds.), *Advances in hydroinformatics springer water* (pp. 335–346). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5436-0_25
- Laurantin, O. (2008) *ANTILOPE: Hourly rainfall analysis merging radar and rain gauge data*. Proceedings of the International Symposium on Weather Radar and Hydrology. Presented at the International Symposium on Weather Radar and Hydrology (pp. 2–8). Grenoble, France.
- Lebouc, L., & Payrastre, O. (2017). *Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes* (Convention DGPR-Ifsttar 2016 n°2201030666 du 14 octobre 2016 – Action 14). IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 18 p., hal-01589775.
- Lebouc, L., & Payrastre, O. (2020). *Reconstitution des débits de pointe des crues des 23-24 novembre et 1er décembre 2019 dans les départements du Var et les Alpes-Maritimes*. IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 18 p., hal-01589775.
- Lebouc, L., Payrastre, O., & Bourgin, F. (2019). *Reconstitution des débits de pointe des crues du 15 octobre 2018 dans le bassin de l'Aude* (Convention DGPR-Ifsttar 2018 n° 2201132931 du 22 Mai 2018 - Action 7 appui au SCHAPI). IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 14 p., hal-02110612.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology Flash Floods: Observations and Analysis of Hydrometeorological Controls*, 394(1–2), 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie : Guide de bonnes pratiques*.
- 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*, 105(3–4), 140–148. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019057>
- Préfecture des Alpes-Maritimes. (2016) Inondations des 3 et 4 octobre 2015 dans les Alpes Maritime. Retour d'expérience : rapport final, 65.
- Tabary, P., Augros, C., Champeaux, J.-L., Chèze, J.-L., Faure, D., Idziorek, D., Lorandel, R., Urban, B., & Vogt, V. (2013). Le réseau et les produits radars de Météo-France. *La Météorologie*, 8(83), 15–27. <https://doi.org/10.4267/2042/52050>
- Viollet, P.-L. (2017). Éléments de retour d'expérience des inondations du 3 octobre 2015 sur la Côte d'Azur. *La Houille Blanche*, 103(6), 87–88. <https://doi.org/10.1051/lhb/2017063>