



HAL
open science

Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l'estimation des débits de pointe des crues

Olivier Payrastre, Pierre Nicolle, Laurent Bonnifait, Pierre Brigode, Paul C. Astagneau, Amaury Baise, Arnaud Belleville, Nedjima Bouamara, François Bourgin, Pascal Breil, et al.

► To cite this version:

Olivier Payrastre, Pierre Nicolle, Laurent Bonnifait, Pierre Brigode, Paul C. Astagneau, et al.. Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l'estimation des débits de pointe des crues. LHB Hydroscience Journal, 2022, 108 (1), pp.2082891. 10.1080/27678490.2022.2082891 . hal-03710678

HAL Id: hal-03710678

<https://hal.inrae.fr/hal-03710678v1>

Submitted on 30 Jun 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 4.0 International License



Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l'estimation des débits de pointe des crues

Olivier Payrastre, Pierre Nicolle, Laurent Bonnifait, Pierre Brigode, Paul Astagneau, Amaury Baise, Arnaud Belleville, Nedjima Bouamara, François Bourgin, Pascal Breil, Pascal Brunet, Arnaud Cerbelaud, Fanny Courapied, Lise Devreux, Raphaëlle Dreyfus, Eric Gaume, Stan Nomis, Julie Poggio, Frédéric Pons, Yassine Rabab & Damien Sevrez

To cite this article: Olivier Payrastre, Pierre Nicolle, Laurent Bonnifait, Pierre Brigode, Paul Astagneau, Amaury Baise, Arnaud Belleville, Nedjima Bouamara, François Bourgin, Pascal Breil, Pascal Brunet, Arnaud Cerbelaud, Fanny Courapied, Lise Devreux, Raphaëlle Dreyfus, Eric Gaume, Stan Nomis, Julie Poggio, Frédéric Pons, Yassine Rabab & Damien Sevrez (2022): Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l'estimation des débits de pointe des crues, LHB, DOI: [10.1080/27678490.2022.2082891](https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891>



© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 30 Jun 2022.



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



View related articles [↗](#)

REPORT

Tempête Alex du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes : une contribution de la communauté scientifique à l'estimation des débits de pointe des crues

Olivier Payrastra^a, Pierre Nicolle^a, Laurent Bonnifait^b, Pierre Brigode^c, Paul Astagneau^d, Amaury Baise^e, Arnaud Belleville^e, Nedjima Bouamara^f, François Bourgin^d, Pascal Breil^f, Pascal Brunet^g, Arnaud Cerbelaud^{h,i}, Fanny Courapied^f, Lise Devreux^j, Raphaëlle Dreyfus^k, Eric Gaume^a, Stan Nomis^k, Julie Poggio^k, Frédéric Pons^b, Yassine Rabab^c and Damien Sevrez^e

^aUniv Gustave Eiffel, GERS-LEE, F-44344 Bouguenais, France ; ^bCerema Méditerranée, 13290 Aix-en-Provence, France ; ^cUniversité Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, Géoazur, CNRS, IRD, 06905 Sophia Antipolis, France ; ^dUniversité Paris-Saclay, INRAE, UR HYCAR, 92160 Antony, France ; ^eEDF-DTG, 38590 Saint-Martin Le Vinoux, France ; ^fInrae, UR RiverLy, Lyon-Villeurbanne Center, 69625 Villeurbanne Cedex, France ; ^gHSM, 34090 Montpellier, France ; ^hONERA, Optique et techniques associées (DOTA), 31000 Toulouse, France ; ⁱCentre National d'Etudes Spatiales (CNES), Labo OT, 31400 Toulouse, France ; ^jUMR ESPACE, Université Côte d'Azur, 06204 Nice, France ; ^kSMIAGE, 06204 Nice, France

RÉSUMÉ

La tempête Alex, qui a touché le 2 octobre 2020 les vallées de la Roya, la Tinée, et la Vésubie dans les Alpes-Maritimes, constitue un événement de référence qu'il est important de documenter au mieux pour en conserver la mémoire et permettre son étude ultérieure. Les différents services et opérateurs de l'État se sont largement mobilisés pour acquérir et regrouper des jeux de données décrivant cet événement. Cet article présente une contribution de la communauté scientifique à la reconstitution des débits de pointe des crues, conduite dans le cadre du programme de recherche HyMeX. Des relevés de sections d'écoulement ont permis d'obtenir 32 estimations de débits de pointe, contribuant à la connaissance des crues observées sur les cours d'eau principaux et leurs petits affluents.

MOTS-CLÉS

crue ; débit de pointe ; tempête Alex ; enquête post-événement ; HyMeX

KEYWORDS

flood; peak discharge; Alex storm; post-event survey; HyMeX

The 2 October 2020 Alex storm in south-eastern France: a contribution of the scientific community to the flood peak discharges estimation

ABSTRACT

The Alex storm caused particularly catastrophic floods in the Roya, Tinée and Vésubie valleys (south-eastern France) on 2 October 2020. This event will certainly serve as a reference for flood risk management in the future and it is important to document it as far as possible, in order to preserve its memory and enable further studies. Different national services and operators have been involved to gather and consolidate datasets describing this event. This article presents a contribution from the scientific community to the reconstruction of the event's peak discharges, conducted within the HyMeX research programme. Field cross section surveys made it possible to obtain 32 peak discharge estimates, contributing to a detailed description of the flood genesis on the main rivers and their small tributaries.

1. Introduction

La tempête Alex qui a touché le 2 octobre 2020 les vallées de la Roya, la Tinée, et la Vésubie dans les Alpes-Maritimes, reste dans tous les esprits. Cet événement s'avère remarquable à plusieurs titres, comme par exemple les cumuls de pluie enregistrés, qui ont atteint localement jusqu'à 663 mm en 24 h (pluviomètre EDF des Mesches), ainsi que l'importance des crues et des mouvements sédimentaires associés qui ont occasionné de très importantes destructions dans les vallées touchées.

Cet événement va constituer une référence importante pour l'étude des risques naturels d'origine hydrométéorologique et hydromorphologique, ainsi que leur

évolution dans un contexte de changement climatique. Les différents services et opérateurs de l'État se sont largement mobilisés, sous la coordination de la DDTM des Alpes-Maritimes, pour documenter au mieux cet événement : une acquisition de photos aériennes et de relevés Lidar a par exemple été effectuée par l'IGN juste après l'événement, et une réanalyse des précipitations (lame d'eau Antilope) a été produite par Météo France à partir de l'ensemble des relevés pluviométriques disponibles ; les services RTM ont conduit une étude détaillée sur les mouvements sédimentaires ; le Cerema de son côté a réalisé une étude de synthèse sur l'hydrologie de l'événement (Cerema, 2021b, 2021c).

La communauté scientifique a également apporté une contribution à cet effort de recueil de données sur l'événement. Plusieurs équipes se sont mobilisées dans le cadre du programme de recherche HyMeX (Ducrocq et al., 2019 ; www.hymex.org) pour réaliser les relevés de terrain nécessaires à une meilleure connaissance des débits atteints sur les différents cours d'eau touchés par l'événement. Un peu plus de trente estimations de débits de pointe ont finalement été obtenues. Malgré des incertitudes parfois importantes, liées notamment à l'importance des mouvements hydro-sédimentaires et à la difficulté à trouver des sections d'estimation stables, ce jeu de données contribue à une meilleure compréhension de la genèse de l'événement.

Cet article présente succinctement le travail d'exploitation des relevés de terrain ayant permis d'aboutir aux estimations de débits de pointe, en mettant l'accent sur la phase importante de critique et de mise en cohérence de ces données. Il présente dans un deuxième temps les premiers enseignements tirés de ce jeu de données.

2. Démarche de reconstitution des débits de pointe

La méthode d'enquête post-cruée appliquée est issue de l'expérience acquise au sein de l'observatoire Hydro-Météorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais (OHM-CV, <http://www.ohmcv.fr>), qui conduit ce type d'enquêtes de façon récurrente depuis une vingtaine d'années (les crues de l'Aude en 1999 et du Gard en 2002 ont été les premières couvertes). Cette méthode a été consolidée dans le cadre de deux projets de recherche européens (Floodsite et Hydrate), et a été détaillée dans plusieurs publications (Delrieu et al., 2005 ; Gaume, 2006 ; Gaume et al., 2009 ; Gaume

& Borga, 2008 ; Gaume et al., 2004 ; Lumbroso & Gaume, 2012 ; Payrastre et al., 2019). Son principe est également décrit dans la charte qualité de l'hydro-métrie (Direction Générale de la Prévention des Risques, 2017). Nous en rappelons les grandes lignes ci-après, en mettant l'accent sur les adaptations apportées dans le cas de la campagne post-Alex.

2.1. Données de terrain recueillies

La phase de recueil de données de terrain consiste d'une part à rechercher des sites se prêtant à une estimation du débit de pointe à partir d'hypothèses hydrauliques simples, et à effectuer les relevés topographiques nécessaires à l'estimation. Les sections de cours d'eau faisant l'objet d'un relevé sont choisies de façon à couvrir dans son ensemble le réseau hydrographique touché par la crue, en incluant les cours d'eau principaux mais également les différents affluents non jaugés. Pour faciliter l'estimation ultérieure des débits de pointe, des sections répondant à des 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 pente 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, pour évaluer la forme de la ligne d'eau. Lorsque plusieurs sections se prêtent à un relevé sur un même cours d'eau, elles sont généralement toutes retenues, la redondance des levés permettant par la suite de valider les estimations de débits par recoupement.

Les informations topographiques recueillies pour chaque section sont les suivantes (Figure 1) : un ou plusieurs profils en travers, un profil en long du fond du lit, ainsi que les niveaux donnés par les laisses de crue sur le profil en long, permettant de reconstituer la

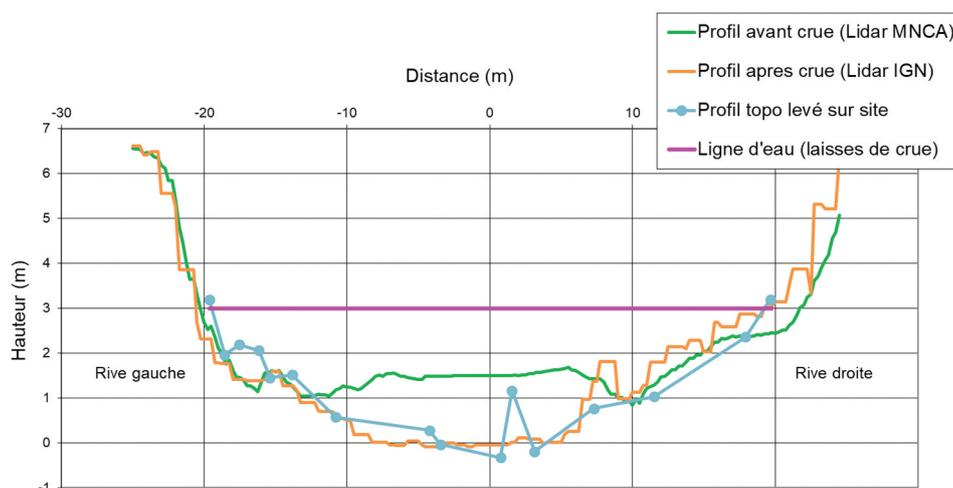


Figure 1. Exemple de comparaison des profils en travers relevés sur site, et issus des relevés Lidar avant/après crue, permettant de confirmer un creusement de la section, sur la Gordolasque à Belvédère.

section d'écoulement et la pente de la ligne d'eau. En parallèle aux relevés topographiques, des témoins de la crue sont interrogés dans la mesure du possible, de façon à confirmer les levés effectués (niveaux des plus hautes eaux notamment), à rechercher des vidéos ou photos du site en crue permettant de confirmer les vitesses d'écoulement, et de disposer d'éléments chronologiques sur le déroulement de la crue : horaire des plus hautes eaux, dynamique de montée de crue et de décrue.

2.2. Vérification de la stabilité des sections

Dans le cas de la campagne post-Alex, compte tenu des évolutions morphologiques majeures observées, un critère complémentaire important dans le choix des sections relevées a été la stabilité supposée de la section en cours de crue. Sur certains des affluents néanmoins, l'importance des mouvements sédimentaires fait qu'il n'a pas été possible de trouver des sections stables en cours de crue. L'importance de l'évolution des sections en cours de crue a par conséquent été systématiquement évaluée, en se basant sur les relevés Lidar disponibles avant crue (Métropole Nice Côte d'Azur) et après crue (IGN, cf. Figure 1). Les seules exceptions sont les sections situées sur la Roya (hors emprise du relevé Métropole Nice Côte d'Azur), ainsi que quelques sections situées hors de l'emprise du relevé Lidar post crue de l'IGN.

Lorsqu'une évolution significative de la section en cours de crue était confirmée par les relevés Lidar, cette évolution a été prise en compte dans le calcul de l'incertitude sur le débit estimé (cf. paragraphe 2.4). Ceci a généralement conduit à réduire la section d'écoulement disponible pour fixer la valeur minimale de l'intervalle d'estimation (et parfois la valeur médiane). Les évolutions morphologiques nécessitant cette correction correspondent selon les cas à un creusement de la section en cours de crue, ou bien à une érosion des berges, ou encore à la présence supposée de charriage réduisant la section disponible pour l'écoulement au moment du pic de crue.

La réduction réelle de la section d'écoulement en crue étant extrêmement difficile à évaluer, les estimations de débits concernées sont généralement assorties d'un intervalle d'incertitude bien plus large que dans les sections stables (cf. paragraphe 2.4).

2.3. Estimation des vitesses d'écoulement

Lors des précédentes campagnes HyMeX, les estimations de débits de pointe ont souvent été obtenues par application directe de la formule de Manning-Strickler (cas d'un régime uniforme confirmé), en distinguant lorsque nécessaire les sections en lit mineur et lit majeur.

Dans le cas de la tempête Alex, les sections relevées ont dans l'ensemble des largeurs limitées et ne sont que rarement des sections mixtes lit mineur/lit majeur. En revanche, les cours d'eau touchés sont généralement des torrents à forte pente (pentes se situant dans une gamme de 3 à 8%), pour lesquels la formule de Manning Strickler peut s'avérer peu adaptée et conduire à une surestimation des vitesses. Ce risque a été bien illustré par Rickenmann and Recking (2011), qui ont également montré que la formule proposée par Ferguson (2007) permet de mieux tenir compte de l'effet de réduction des vitesses dans des sections où la hauteur d'eau s'avère faible par rapport au diamètre des blocs présents dans le lit. La formule de Ferguson a donc souvent été appliquée ici de façon à estimer l'ordre de grandeur des vitesses :

$$V = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot \alpha}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 \cdot \alpha^3}} \cdot \sqrt{g \cdot h \cdot I}, \text{ avec } \alpha = \frac{h}{D_{84}} \quad (1)$$

où V est la vitesse moyenne en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, g est la constante d'accélération de la pesanteur en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, h est la hauteur d'eau en m (assimilée ici au rayon hydraulique), I est la pente d'énergie (estimée d'après les relevés de terrain), et D_{84} est le quantile 84% de la courbe granulométrique des matériaux du lit. Les valeurs des constantes $a_1 = 6.5$ et $a_2 = 2.5$ sont celles appliquées par Rickenmann and Recking (2011). Le D_{84} a été estimé visuellement à partir des plus gros blocs présents dans chaque section : les valeurs retenues varient de à 0.4 à 1.2 m, mais se situent majoritairement entre 0.8 m et 1 m.

Dans la plupart des cas, la formule de Manning Strickler permet d'obtenir des valeurs de vitesses équivalentes à condition de retenir des coefficients de Strickler faibles, se situant entre $K = 10$ et $K = 13$ en lit mineur selon les sections.

L'ordre de grandeur de la vitesse obtenue avec la formule de Ferguson a pu être confirmé dans le cas particulier du Riou de Lantosque (affluent de la Vésubie, Figure 2), par comparaison des vitesses estimées dans deux sections proches. La section 1 se situe en amont d'un ouvrage souterrain, les berges y sont constituées d'enrochements, et le fond du lit présente des blocs rocheux similaires à ceux présents dans une section naturelle (Figure 2.b). Dans cette section, la formule de Ferguson a été appliquée. La section 2 se situe dans un ouvrage (cadre béton, Figure 2.c) présentant une courbure. Dans cette section la vitesse a pu être estimée directement à partir de la différence de niveau des laisses au niveau du virage, en appliquant la formulation suivante (U.S. Army Corps of Engineers, 1994) :

$$\Delta h = C \frac{L \cdot V}{g \cdot r_c} \quad (2)$$



Figure 2. Exemple de section permettant un recoupement des méthodes d'estimation des vitesses, à Lantosque : a) localisation des deux sections relevées, b) vue de la *section 1* (chenal en amont de l'ouvrage), c) vue de la *section 2* avec courbure dans l'ouvrage souterrain.

Table 1. Comparaison des estimations obtenues pour deux sections très proches relevées sur le Riou de Lantosque. Les valeurs entre crochets correspondent aux variations possibles en tenant compte de l'incertitude sur le D84 (*section 1*), et sur les niveaux des laisses (*section 2*).

	Section d'écoulement (m ²)	Pente (m/m)	Vitesse moyenne (m.s ⁻¹)	Débit de pointe (m ³ .s ⁻¹)
Section 1 (amont ouvrage)	18	0.055	3.3 [2.7–4.0]	60 [50–70]
Section 2 (ouvrage)	7.3	0.075	9.5 [8.3–10.7]	70 [60–80]

où Δh est la surélévation liée au virage en m, L est la largeur du chenal rectangulaire en m, r_c son rayon de courbure en m, et C est une constante égale à 1 (écoulement rapide en section rectangulaire).

Les résultats obtenus, présentés dans le [Tableau 1](#), montrent que les ordres de grandeur de débit obtenus s'avèrent très cohérents entre ces deux sections, malgré des vitesses d'écoulement estimées très différentes.

2.4. Estimation de l'incertitude sur les débits

Les estimations de débits de pointe obtenues restent par nature très incertaines et ont donc systématiquement été associées à des intervalles indiquant la gamme des débits envisageables dans chaque section. Ces intervalles ont été établis en tenant compte de la gamme de variation possible des variables et paramètres jugés incertains dans chaque cas, et pouvant inclure : la valeur de Strickler du lit ou le diamètre D84 des matériaux du lit dans le cas de la formule de Ferguson, la pente de la ligne d'eau et/ou le niveau

d'eau atteint dans la section en cas de mauvaise cohérence des laisses de crue, et la valeur de la section d'écoulement dans le cas de sections évolutives avec possible creusement/élargissement du lit. Les valeurs min/max de chaque variable ou paramètre ont généralement été retenues pour le calcul de l'intervalle des débits possibles, à l'exception des deux estimations proposées par Sevrez (2020) à l'aval de la Roya. Ces deux estimations ont été obtenues partir de la formule de Manning-Strickler, et sont assorties d'un intervalle de confiance à 90% déterminé par combinaison Monte-Carlo des distributions supposées des valeurs des paramètres / variables utilisés en entrée.

3. Première analyse du jeu de données obtenu

L'enquête a permis d'aboutir à 32 valeurs de débits de pointe, majoritairement situées sur la Vésubie, la Tinée et leurs affluents (cf. [Figure 3](#)). Quelques estimations ont également été obtenues sur l'Estéron, le

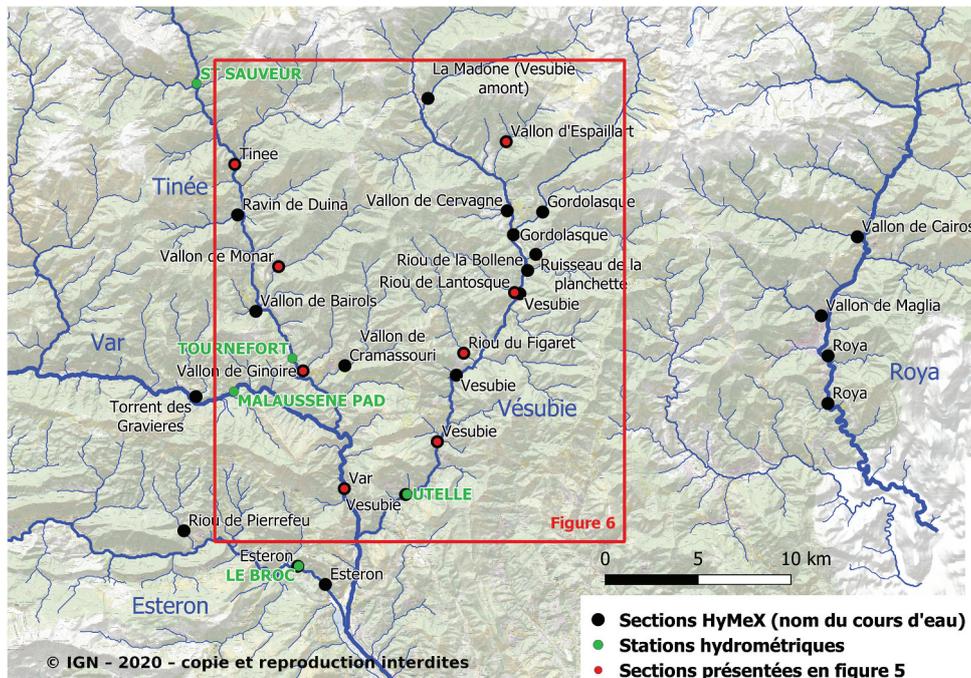


Figure 3. Localisation des sections relevées sur le terrain et ayant abouti à des estimations de débits de pointe.

Var, et la Roya (Sevrez, 2020) et ses affluents. La suite de ce paragraphe détaille les premiers enseignements qui peuvent être tirés de ces estimations. Un rapport présentant le jeu de données de façon plus détaillée a été également produit (Payrastré & Nicolle, 2021), et comporte un tableau récapitulatif de l'ensemble des débits de pointe estimés.

3.1. Cohérence d'ensemble des débits de pointe et de la pluviométrie

En fin d'enquête, des simulations pluie-débit ont été réalisées de façon à vérifier la cohérence générale des débits de pointe estimés avec la pluviométrie de l'événement, et à examiner la cohérence amont-aval des différentes estimations disponibles.

Ces simulations ont été obtenues à partir du modèle hydrologique Cinécar (Naulin et al., 2013) et des lames d'eau Antilope réanalysées par Météo-France en tenant compte de l'ensemble des observations pluviométriques au sol regroupées après l'événement (Cerema, 2021b). Le modèle Cinécar repose sur le modèle de production du Soil Conservation Service (SCS), avec un paramètre de production unique à ajuster : le Curve Number ou CN. Plusieurs scénarios hydrologiques ont été testés. Tout d'abord des valeurs de CN spatialement homogènes et variant dans une gamme de 35 à 100 ont été appliquées. Un CN de 35 représente des sols ayant de fortes capacités de stockage de la pluie, avec une capacité de rétention maximale de 472 mm ; un CN de 100 correspond de son côté à un écoulement intégral de la lame d'eau précipitée, sans absorption par les sols, et représente donc la borne supérieure des débits possibles

d'après la pluviométrie estimée. Dans un deuxième temps, un jeu de CN unique et distribué spatialement a été ajusté en essayant de respecter au mieux les intervalles de débits de pointe estimés au niveau des sections HyMeX. Les valeurs de CN retenues, comprises entre 35 et 60 selon les secteurs, sont présentées sur la Figure 4.

La Figure 5 compare les hydrogrammes obtenus avec le modèle Cinécar et les intervalles de débits de pointe estimés au niveau de certaines des sections HyMeX. Les cas présentés sont jugés représentatifs des résultats obtenus sur le bassin versant de la Vésubie (Vallon d'Espailart, Riou de Lantosque, Riou du Figaret, et Vésubie à l'amont d'Utelle) et de la Tinée (Tinée amont, vallon de Ginoire et vallon de Monar), ainsi que sur le Var à l'aval de la Tinée.

Ces comparaisons montrent en premier lieu que certains des débits de pointe estimés paraissent parfois élevés, puisque supérieurs aux débits de pointe simulés par le modèle pour le scénario CN100. Ces cas correspondent tous à des sections évolutives en crue. Dans le cas des Vallon du Monar et de Ginoire (affluents de la Tinée), l'incohérence concerne uniquement la borne supérieure de l'estimation du débit. Ceci semble assez logique puisque cette hypothèse haute ne tient pas compte de l'évolution probable de la section en cours de crue. En revanche, une incohérence plus importante est observée sur le vallon d'Espailart (amont Vésubie), avec un intervalle de débit de pointe estimé très largement supérieur au débit simulé pour le scénario CN100. Fort heureusement, ce cas du Vallon d'Espailart correspond à la seule incohérence majeure relevée entre les estimations de terrain et les simulations pluie-débit. Cette incohérence peut être attribuée

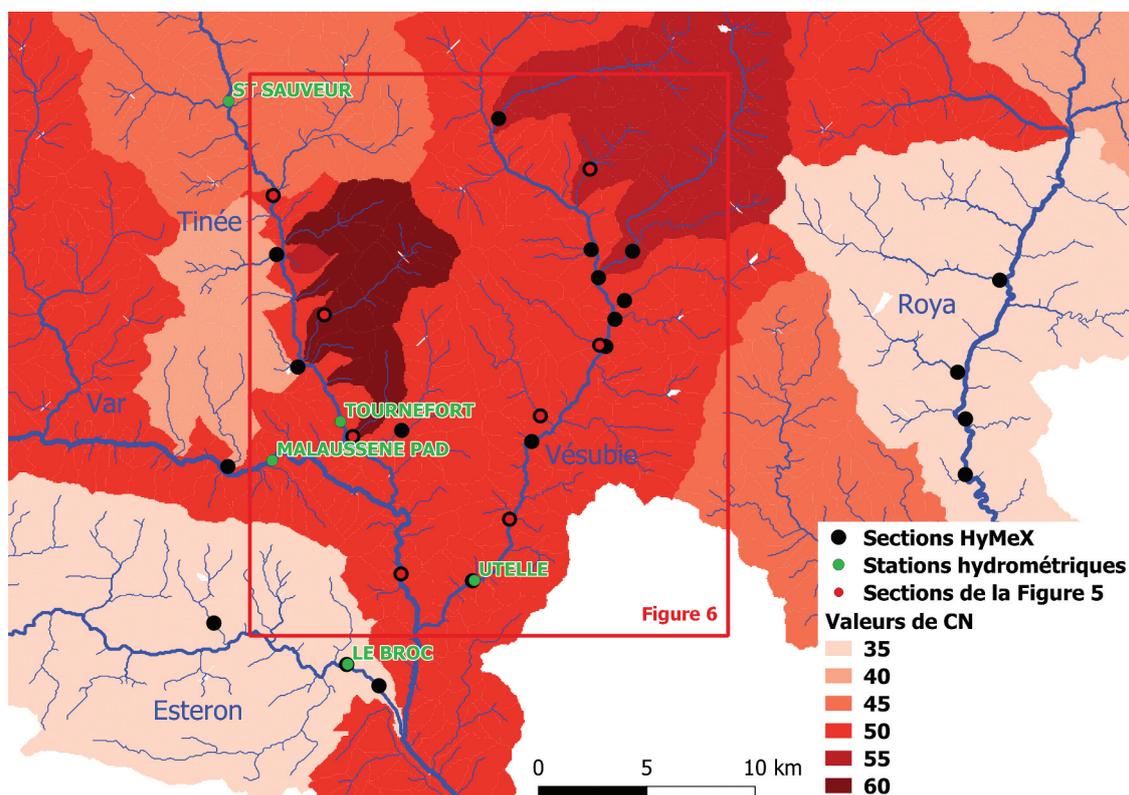


Figure 4. Valeurs de CN retenues pour reproduire les débits de pointe des sections HyMeX.

à des erreurs dans les relevés de terrain ou dans les hypothèses retenues lors de l'estimation du débit, mais également à une possible sous-estimation de la pluie dans ce secteur.

Par ailleurs, on peut remarquer que le scénario hydrologique obtenu avec le jeu de CN distribué et ajusté sur l'événement, s'avère compatible avec la quasi-totalité des intervalles de débits de pointe estimés localement. Ceci se vérifie pour l'ensemble des sections d'estimation, à la seule exception du Vallon d'Espaillart évoqué précédemment. Ces résultats confirment qu'il est possible de définir un scénario hydrologique cohérent, reliant la plupart des intervalles de débits de pointe et la pluviométrie estimée. Ils confirment également la bonne cohérence amont-aval des 32 estimations de débits de pointe obtenues, à l'exception notable du Vallon d'Espaillart pour lequel l'intervalle de débit estimé paraît élevé au regard des autres estimations disponibles plus à l'aval sur la Vésubie.

3.2. Contribution des différents sous bassins à la crue

La Figure 6 présente une vue plus détaillée des débits de pointe obtenus sur les différents affluents et les cours principaux de la Tinée aval et de la Vésubie. Les valeurs estimées au niveau des stations hydrométriques sont également reportées sur cette figure.

Dans le cas de la Tinée, les données recueillies illustrent la contribution majeure des petits affluents rive gauche à la crue de la Tinée, contributions qui s'avèrent très cohérentes avec la forte pluviométrie estimée dans ce secteur. Le Vallon du Monar ($300 [220-400] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimés), le Vallon d'Ullion et le Vallon de Bramafam, tous trois touchés par les plus forts cumuls de pluie, semblent avoir très largement contribué au débit de pointe enregistré dès le début de la crue par la station de Tournefort (600 à $900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ d'après le Cerema, 2021a), alors que la partie amont de la Tinée n'a réagi que dans un second temps d'après les enregistrements de la station amont de St Sauveur ($197 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). A l'aval de la station de Tournefort, d'autres affluents rive gauche ont également apporté des contributions très fortes à la crue (Vallons de Ginoire et de Cramasouri, avec respectivement $160 [100-210] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $150 [110-220] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimés). Ceci laisse penser que le débit de la Tinée a pu s'avérer assez nettement supérieur à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la confluence avec le Var, hypothèse qui s'avère très cohérente avec l'estimation obtenue sur le Var à l'aval de la confluence avec la Tinée ($1630 [1230-2050] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Dans le cas de la Vésubie, les estimations disponibles montrent une contribution importante de l'ensemble des affluents amont pour lesquels des estimations sont disponibles (Madone de Fenestre, Vallons d'Espaillart et de Cervagne, Gordolasque). A l'aval de la confluence avec la Gordolasque, les affluents rive gauche

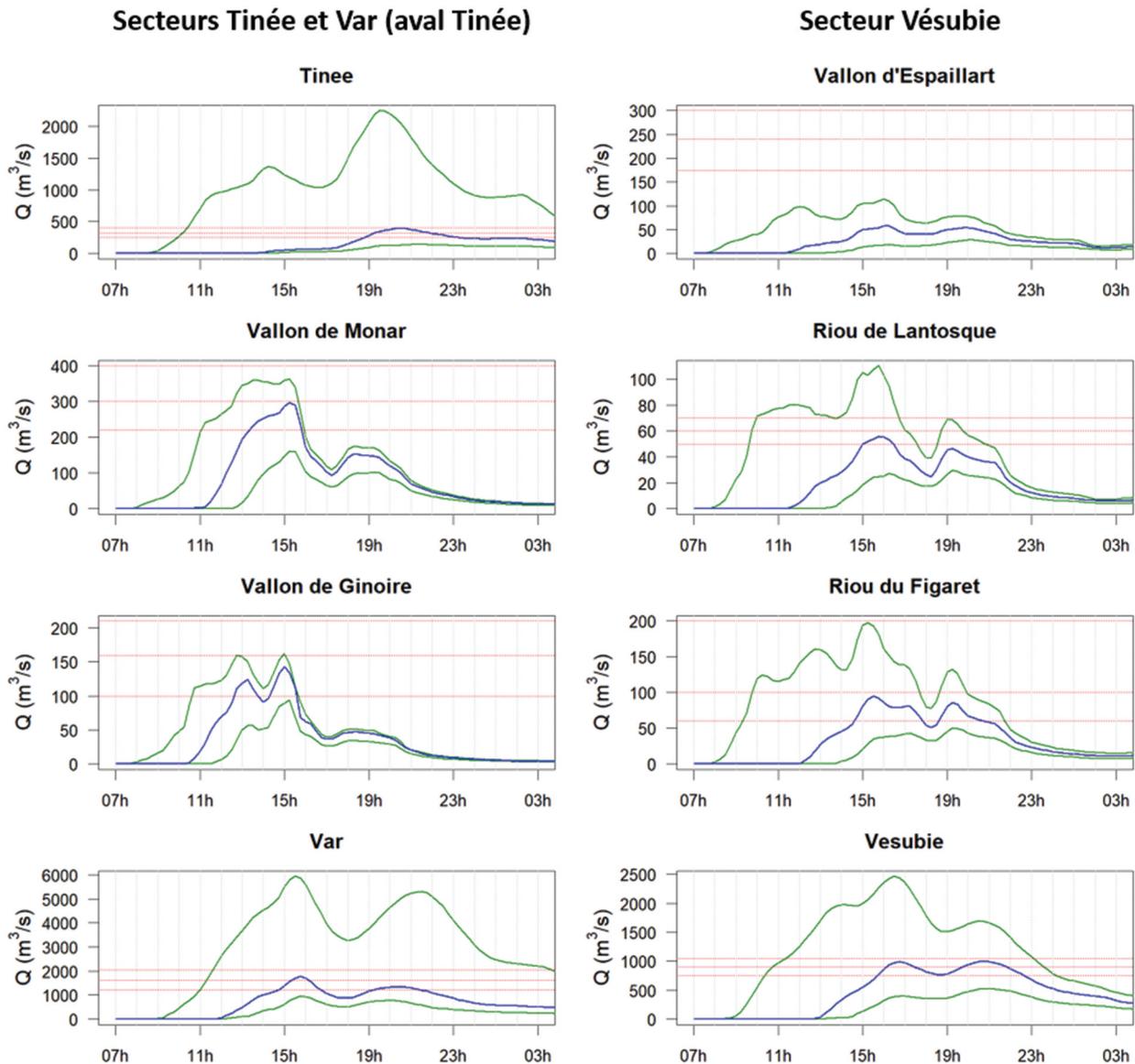


Figure 5. Hydrogrammes simulés par le modèle Cinecar du 2 octobre à 7 h au 3 octobre à 3 h (UTC), pour des CN spatialement homogènes de 35 et 100 (en vert), et pour le jeu de CN distribué spatialement et ajusté sur l'événement (bleu). Les intervalles de débits de pointe estimés d'après les relevés de terrain sont représentés en rouge (bornes inférieure, médiane et supérieure). La localisation des sections présentées est indiquée sur la Figure 3 et la Figure 4.

contribuent très peu à la crue, mais les affluents rive droite apportent encore des débits importants (Riou de Lantosque, Riou du Figaret). Les débits estimés sur la Vésubie atteignent $640[480-800] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à l'amont de la confluence avec le Riou de Lantosque, et se stabilisent autour de $850 \text{ à } 900[650-1100] \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour les trois estimations effectuées dans les gorges de la Vésubie à l'aval de la confluence avec le Riou du Figaret.

3.3. Comparaison des débits aux records historiques et aux précédentes campagnes HyMeX

La Figure 7 présente une comparaison des 32 valeurs de débits de pointe estimées vitesses estimées pour la tempête Alex, avec d'une part les records de débits

connus sur le territoire métropolitain français, et d'autre part les débits de pointe estimés sur les petits cours d'eau côtiers des Alpes-Maritimes suite aux crues du 2 octobre 2015, du 23 novembre 2019 et du 1er décembre 2019 (Brigode et al., 2021 ; Lebouc & Payrastré, 2017, 2020).

Deux enseignements principaux peuvent être tirés de cette figure. Tout d'abord, les débits de pointe estimés pour la tempête Alex sont restés assez éloignés des records connus sur l'arc méditerranéen français. Ceci s'explique principalement par le fait que les intensités pluviométriques horaires sont restées limitées à environ 70 mm/h au maximum, ce qui a probablement limité les valeurs de débits atteintes sur les petits bassins versants amont.

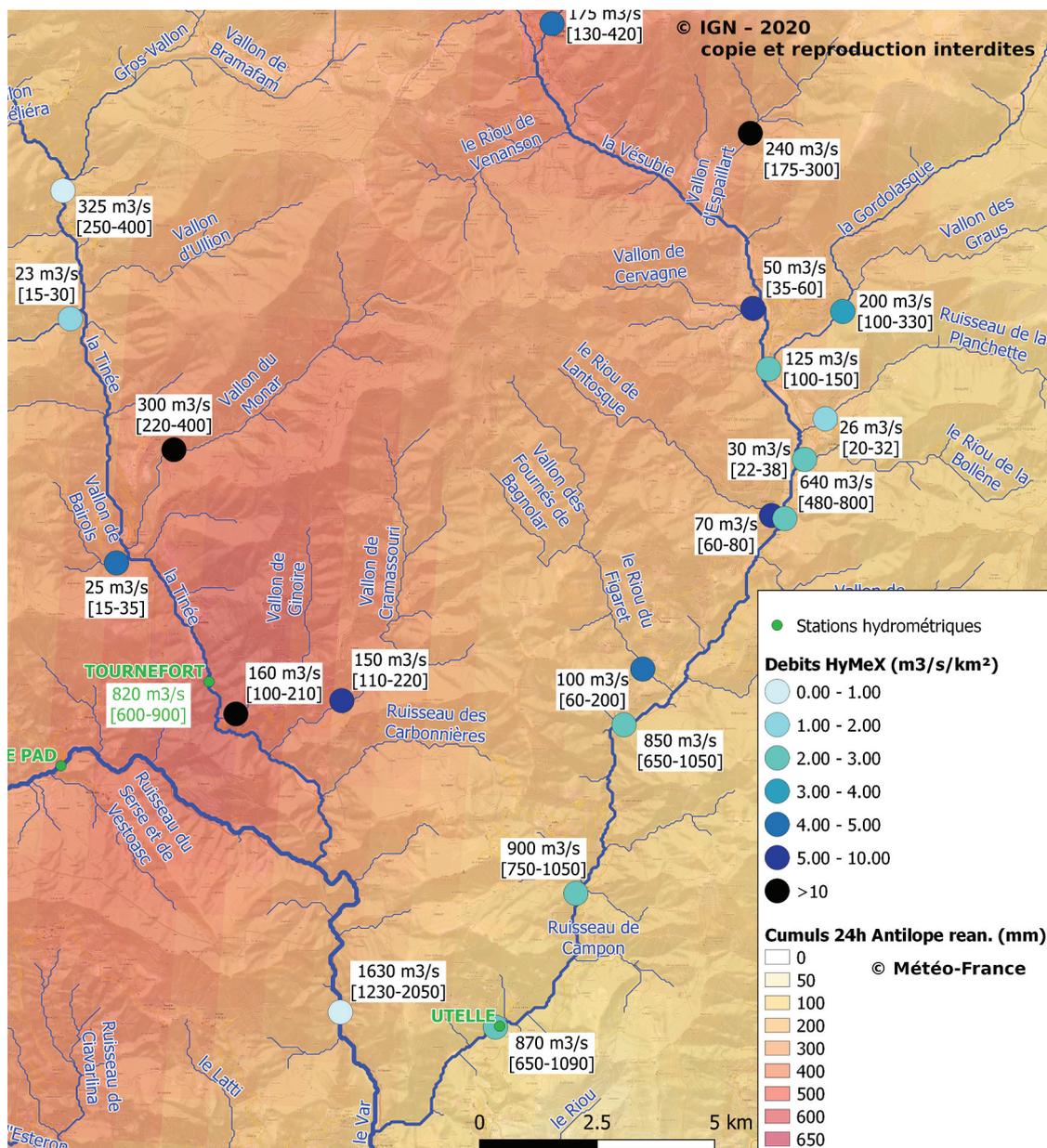


Figure 6. Débits de pointe estimés dans le secteur de la Tinée et de la Vésubie.

Le second enseignement est que les débits de pointe estimés pour la tempête Alex se situent dans les mêmes ordres de grandeur que ceux des crues d'octobre 2015 et décembre 2019 sur les cours d'eau côtiers des Alpes-Maritimes. Le record d'intensité pluviométrique horaire dans les Alpes Maritimes reste d'ailleurs celui du 3 octobre 2015, à Mandelieu, avec 115 mm/h. Seules trois valeurs de débits se distinguent pour la tempête Alex, et paraissent significativement plus élevées que celles observées en 2015 et 2019. Ces valeurs correspondent aux affluents aval rive gauche de la Tinée (Vallon du Monar et Vallon de Ginoire), ainsi qu'au Vallon d'Espailart sur la Vésubie amont (dont le débit a toutefois pu être sur-estimé, cf. paragraphe 2.4).

On peut finalement retenir que le caractère exceptionnel de l'événement Alex semble beaucoup plus lié aux cumuls de pluie enregistrés sur 24 h, ou encore à l'ampleur des mouvements sédimentaires, qu'aux seules valeurs des débits de pointe atteints. Enfin, il faut également rappeler qu'un événement historique particulièrement destructeur s'est déjà produit en novembre 1926 dans la Vallée de la Vésubie, avec un cumul de 750 mm de précipitations observé pendant le mois. Un glissement de terrain le 24 novembre à Roquebillière a causé la mort de 19 personnes (<https://bdhi.developpement-durable.gouv.fr/view/synthese/138>). Mais il est difficile de situer l'intensité de cet événement en débit par comparaison avec celui de 2020.

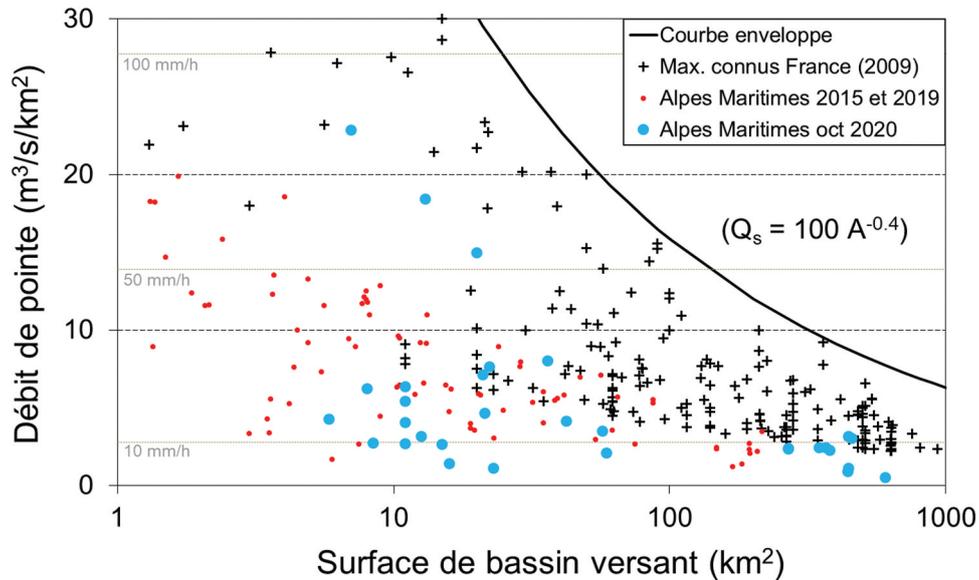


Figure 7. Comparaison des débits de pointe estimés aux records connus sur le territoire métropolitain français, et aux débits estimés lors des précédentes campagnes HyMeX dans les Alpes-Maritimes (crues du 2 octobre 2015, du 23 novembre 2019 et du 1^{er} décembre 2019). Les débits sont exprimés en débit spécifique (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), et les valeurs d'intensités pluviométriques nécessaires pour pouvoir atteindre ces débits sont indiquées en gris (en $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$). Les bornes minimales et maximales des débits estimés ne sont pas représentées pour une meilleure lisibilité du graphique. La courbe enveloppe et les débits maximums connus correspondent aux données regroupées par Gaume et al. (2009)

4. Conclusion

L'enquête hydrologique post-cruée conduite suite à la tempête Alex a permis de compléter les données existantes concernant les débits des crues dans les bassins de la Tinée, de la Vésubie, de l'Estéron, et de la Roya. 32 estimations de débits de pointe ont été obtenues, et fournissent une vision détaillée de la contribution des différents petits affluents amont à la crue. Quelques estimations ont également été obtenues sur les cours principaux de la Tinée, de la Vésubie, de l'Estéron, du Var et de la Roya.

Dans le cas des quelques sections qui s'avèrent évolutives en cours de crue, les estimations obtenues restent assorties d'incertitudes très fortes (pouvant parfois atteindre jusqu'à $\pm 50\%$). L'analyse du jeu de données montre néanmoins une bonne cohérence d'ensemble de ces estimations, y compris avec la pluviométrie estimée, à l'exception d'un affluent amont de la Vésubie (Vallon d'Espaillart), pour lequel l'estimation obtenue paraît élevée au regard de la pluviométrie et des débits estimés plus à l'aval sur la Vésubie.

La comparaison aux données d'autres événements montre par ailleurs que les débits atteints s'avèrent relativement éloignés des records connus sur l'arc méditerranéen français, et assez similaires aux débits atteints en 2015 et 2019 sur les cours d'eau côtiers des Alpes Maritimes. Les plus forts débits spécifiques semblent avoir été atteints sur les affluents aval de la Tinée.

Ces données ont été intégrées à la base HyMeX/Mistrals. Elles ont été reprises, et complétées par d'autres estimations obtenues par des modélisations

hydrauliques locales, dans l'étude de consensus hydrologique sur les débits de l'événement, conduite par le Cerema à la demande de la DDTM 06 (Cerema, 2021c).

Remerciements

Les enquêtes post-événement HyMeX sont financées dans le cadre du programme MISTRALS/HyMeX du CNRS, et reçoivent également un soutien financier du Ministère de la Transition Écologique (DGPR/SCHAPI). Nous souhaitons remercier les équipes et organismes qui ont contribué à la collecte des données de terrain : Cerema Méditerranée, CNES, EDF-DTG, Hydrosciences Montpellier (HSM), INRAE (UR HYCAR et RiverLy), ONERA, Opsia, Université Côte d'Azur (Géoazur et Espace), Université Gustave Eiffel (GERS-LEE), SMIAGE.

Déclaration de disponibilité des données

Le jeu de données détaillé incluant l'ensemble des relevés de sections et laisses de crue est disponible sur demande raisonnable auprès de l'auteur contacté de cet article, Olivier Payrastra, ainsi que dans la base de données HyMeX (<https://mistrals.sedoo.fr/?editDat&Id=1621>). Les estimations de débits de pointe obtenues sont détaillées dans Payrastra and Nicolle (2021), ainsi que dans Sevrez (2020).

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Funding

This work was supported by the Ministère de la Transition Ecologique – DGPR [Funding agreement n°2201239477].

ORCID

Olivier Payrastre  <http://orcid.org/0000-0002-8396-5873>
 Pierre Nicolle  <http://orcid.org/0000-0003-2962-4362>
 Pierre Brigode  <http://orcid.org/0000-0001-8257-0741>
 Paul Astagneau  <http://orcid.org/0000-0002-6688-5783>
 Arnaud Belleville  <http://orcid.org/0000-0002-0138-2392>
 François Bourgin  <http://orcid.org/0000-0002-2820-7260>
 Pascal Breil  <http://orcid.org/0000-0003-0691-608X>
 Pascal Brunet  <http://orcid.org/0000-0002-1655-6981>
 Arnaud Cerbelaud  <http://orcid.org/0000-0002-9321-255X>
 Eric Gaume  <http://orcid.org/0000-0002-7260-9793>
 Frédéric Pons  <http://orcid.org/0000-0002-2321-6512>
 Yassine Rabab  <http://orcid.org/0000-0002-1605-1174>

Références

- Brigode, P., Vigoureux, S., Delestre, O., Nicolle, P., Payrastre, O., Dreyfus, R., Nomis, S., & Salvan, L., & l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX. (2021). Inondations sur la Côte d'Azur : Bilan hydro-météorologique des épisodes de 2015 et 2019. *La Houille Blanche*, 107(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1976600>
- Cerema. (2021a). *Analyse de la crue du 2 octobre 2020 – la tinée à la station hydrométrique de Tournefort* [Pont de Tournefort]. Rapport d'étude, juin 2021.
- Cerema. (2021b). *RETEX technique ALEX – Inondations des 2 et 3 octobre 2020 – expertise hydrologique – rapport d'étape*. Rapport d'étude, juin 2021.
- Cerema. (2021c). *RETEX technique ALEX – Inondations des 2 et 3 octobre 2020 – consensus hydrologique*. Rapport d'étude, septembre 2021.
- Direction Générale de la Prévention des Risques. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie, guide de bonnes pratiques*. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 83p. www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Schapi_Charte_hydro_P01-84_BasseDefinition_5Mo_.pdf
- Delrieu, G., Ducrocq, V., Gaume, E., Nicol, J., Payrastre, O., Yates, E., Kirstetter, P. E., Andrieu, H., Ayrat, P. A., Bouvier, C., Creutin, J. D., Livet, M., Anquetin, A., Lang, M., Neppel, L., Obled, C., Parent-du-Chatelet, J., Saulnier, G. M., 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 Cevennes-vivarais Mediterranean hydro-meteorological 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., Lebeauin-Brossier, C., Javelle, P., Nuissier, O., Payrastre, 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>
- Ferguson, R. (2007). Flow resistance equations for gravel and boulder bed streams. *Water Resources Research*, 43(W05427), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006WR005422>
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., & Villeneuve, J. P. (2004). Flash flood on 12 and 12 November 1999 Hydrological analysis of the river Aude, France. *Journal of Hydrology*, 286(1–4), 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.015>
- Gaume, E. (2006). *Methodological note on post flash-flood investigations*. deliverable report D23.2 from the FLOODsite project. FLOODsite consortium, 54p. <http://www.floodsite.net>
- 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., 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. (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>
- Lebouc, L., & Payrastre, O. (2017). *Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes*. Rapport d'étude. IFSTTAR. 18p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/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*. Rapport d'étude. IFSTTAR. 13p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02933695v2>
- Lumbroso, D., & Gaume, E. (2012). Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology*, 414–415, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.048>
- Naulin, J. P., Payrastre, O., & Gaume, E. (2013). Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, 486, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.044>
- 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., & l'équipe « enquêtes post-événements » d'HyMeX. (2019). Hydrological analysis of the catastrophic flash flood of 15th June 2010 in the area of draguignan (Var, France). *La Houille Blanche*, 105(3–4), 140–148. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019057>
- Payrastre, O., & Nicolle, E. T. (2021). *Estimation des débits de pointe atteints par les petits cours d'eau des Alpes Maritimes lors de la tempête Alex, le 2 octobre 2020*. Rapport de la convention DGPR Convention DGPR-Université Gustave Eiffel. 2020 n°2201239477 du 8 juin 2020, 18p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03327094>
- Rickenmann, D., & Recking, A. (2011). Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, 47(7), W07538. <https://doi.org/10.1029/2010WR009793>
- Sevez, D. (2020). *Compte-rendu d'expertise des laisses de crue relatives à l'épisode du 2 octobre 2020 sur la Roya en aval de Breil*. EDF-DTG, Rapport du 21 décembre 2020, 12p.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1994). Hydraulic design of flood control channels. *Engineer Manual*, (1110–2–1601), 183p. www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1601.pdf