



HAL
open science

Estimation des débits de pointe atteints par les petits cours d'eau des Alpes Maritimes lors de la tempête Alex, le 2 octobre 2020. Action 8.2

Olivier Payrastre, Pierre Nicolle

► To cite this version:

Olivier Payrastre, Pierre Nicolle. Estimation des débits de pointe atteints par les petits cours d'eau des Alpes Maritimes lors de la tempête Alex, le 2 octobre 2020. Action 8.2. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2021, 18p. <hal-03327094>

HAL Id: hal-03327094

<https://hal.science/hal-03327094v1>

Submitted on 26 Aug 2021

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.



HAL Authorization

Convention DGPR-Université Gustave Eiffel 2020

n°2201239477 du 8 Juin 2020

Action 8.2 :

Estimation des débits de pointe atteints par les petits cours d'eau des Alpes Maritimes lors de la tempête Alex, le 2 octobre 2020

Date : 28 juin 2021

Auteur(s) : Olivier Payrastre (Univ. Eiffel), Pierre Nicolle (Univ. Eiffel)

Travail réalisé avec la contribution de (relevés de terrain) :

Paul Astagneau (Inrae), Amaury Baise (EDF-DTG), Arnaud Belleville (EDF-DTG), Laurent Bonnifait (Cerema), François Bourgin (Inrae), Pascal Breil (Inrae), Pierre Brigode (Université Côte d'Azur), Pascal Brunet (HSM), Lise Devreux (Université Côte d'Azur / Espace), Eric Gaume (Univ.Eiffel), Damien Sevrez (EDF-DTG), Rabab Yassine (Université Côte d'Azur), et Opsia Méditerranée.

Nomenclature d'activité : RP3-J20043

Référence sur Numéro de contrat* :

Confidentialité : public

Université Gustave Eiffel

Site de Nantes

Département Géotechnique Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre

Pt de Distribution 83

Allée des Ponts et Chaussée, CS4, 44344 Bouguenais cedex

Téléphone : 02.40.84.57.04

Adresse électronique : olivier.payrastre@univ-eiffel.fr

Version

Date	Version	Modification	responsable
28/06/2021	1	Version initiale	O.Payrastre
29/06/2021	2	Modifications et relecture	O. Payrastre et P. Nicolle
30/06/2021	3	Relecture et ajustements	P. Brigode, P. Breil, F. Pons
30/06/2021	4	Relecture et validation	P.E.Peyneau
07/07/2021	5	Actualisation (ajout des données EDF-DTG)	O. Payrastre

Destinataires :

DGPR/SRNI/SDCAP/BRNT

DGPR/SRNI/SCHAPI

Université Gustave Eiffel

Mr Rodolphe Van Vlaenderen et Mme Margaret Herbaux

Mr Janet Bruno

Mme Jeanne-Sylvine Guédon

SOMMAIRE

1	Introduction	3
2	Principe de l'enquête post crue	4
2.1	Données de terrain recueillies	4
2.2	Vérification de la stabilité des sections	6
2.3	Estimation des vitesses d'écoulement.....	6
2.4	Incertitudes sur les débits	8
3	Débits de pointe obtenus	9
3.1	Secteur Tinée	9
3.2	Secteur Vésubie	10
3.3	Secteur Var Estéron	11
3.4	Secteur Roya.....	13
4	Analyse des débits spécifiques et comparaison aux précédentes campagnes HyMeX.....	13
5	Conclusion	14
6	Bibliographie	15
	Annexe 1. Localisation des points d'estimation des débits	16
	Annexe 2. Tableau des débits de pointe estimés	17

FICHE DE SATISFACTION

RESUME

Ce rapport présente un travail d'estimations des débits de pointe des crues qui ont touché les vallées de la Roya, de la Tinée, de la Vésubie, et de l'aval du Var le 2 octobre 2020 lors du passage de la tempête Alex. Les différentes estimations présentées sont issues d'une enquête de terrain post-crue collective conduite dans le cadre du programme de recherche HyMeX et de la convention DGPR-Université Eiffel 2020. Les laboratoires ayant contribué à cette enquête sont HSM, Inrae, l'université Côte d'Azur / Géoazur et Espace, et l'université Gustave Eiffel/dpt GERS. L'enquête a permis d'obtenir 30 estimations de débits de pointe, couvrant à la fois les cours d'eau principaux et les différents affluents non jaugés touchés par ces crues. [Le jeu de données complet](#) est joint à ce rapport en format numérique.

MOTS CLEFS

Crues, inondations, débit, octobre 2020, Alex, Alpes-Maritimes, Roya, Tinée, Vésubie.

1 Introduction

Le 2 octobre 2020, le département des Alpes-Maritimes a été touché par un épisode pluvieux méditerranéen particulièrement intense, au cours duquel une vigilance rouge pluie-inondations a été déclenchée. Les cumuls de pluie observés sur 24h atteignent jusqu'à 663 mm (pluviomètres EDF Les Mesches), et font partie des 8 plus fortes valeurs connues sur une durée d'1 jour en France métropolitaine depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. La Figure 1, qui montre la répartition des cumuls de pluie sur l'épisode, illustre la localisation de ces forts cumuls, qui ont principalement touché les bassins de la Roya, de la Tinée et de la Vésubie.

Les crues observées sur ces trois bassins ont été particulièrement intenses. Des montées de crues très rapides ont été observées dès le début d'après-midi du 2 octobre, et se sont prolongées toute l'après-midi, occasionnant des phénomènes majeurs de transport sédimentaire et d'érosion des berges sur les cours d'eau concernés. Ces phénomènes sont à l'origine des dégâts très importants observés suite à ces crues, avec la destruction de plusieurs dizaines de maisons, et la destruction d'une grande partie des infrastructures routières empruntant les fonds de vallée.

Quelques stations hydrométriques ont pu fournir des enregistrements, notamment sur l'aval de la Tinée et de la Vésubie, mais néanmoins ces informations restent incertaines en raison des possibles évolutions morphologiques au niveau des sites de mesure, et de la forte extrapolation des courbes de tarage nécessaire pour estimer le débit des crues du 2 octobre. Les parties amont des bassins touchés, ainsi que les affluents, ne sont pas ou très peu instrumentés.

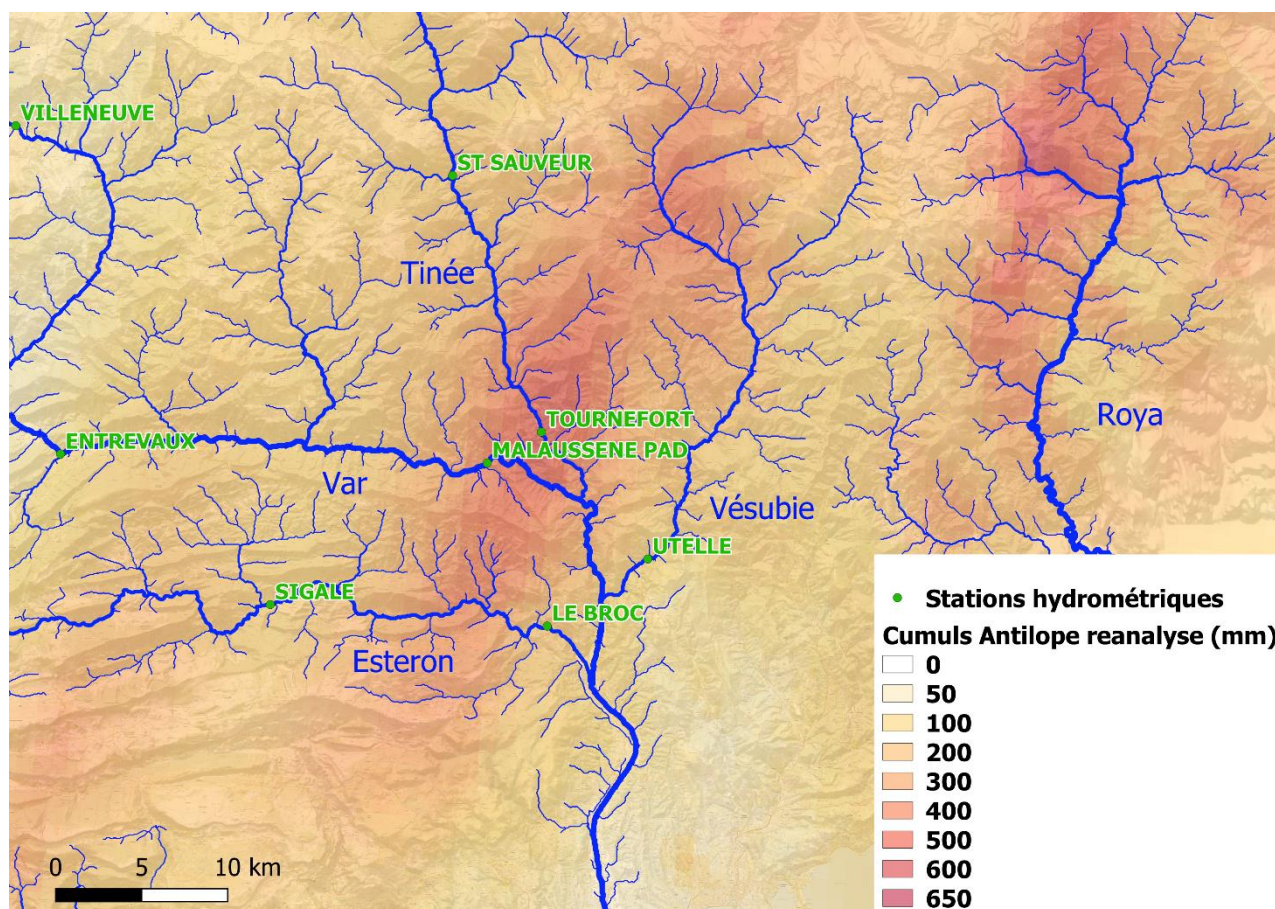


Figure 1. Pluviométrie enregistrée sur 24h dans les bassins du Var et de la Roya lors de la tempête Alex (source réanalyse Antilope – Météo France)

Le travail d'enquête post crue présenté dans ce rapport vise à fournir une vue aussi détaillée que possible de la genèse de la crue et de la contribution des différents affluents non jaugés. Ce travail s'inscrit dans la continuité des enquêtes hydrologiques post-crue conduites depuis 2010 dans le cadre du programme HyMeX. Il constitue également une contribution à l'étude de synthèse sur l'hydrologie de l'événement conduite par le Cerema à la demande de la DDTM06, visant à notamment obtenir un consensus sur les valeurs de débits. Ce travail répond donc à un double besoin :

- l'alimentation du programme de recherche HyMeX (www.hymex.org) sur les phénomènes extrêmes du cycle de l'eau en Méditerranée.
- la nécessité pour les services de l'Etat et les collectivités territoriales de disposer d'estimations de débits expertisées, dans le cadre du retour d'expérience général sur l'événement (synthèse hydrologique pilotée par le Cerema).

Ce travail s'est basé sur plusieurs enquêtes de terrain, conduites conjointement par plusieurs des laboratoires de recherche contributeurs au programme HyMeX : Cerema, HSM, Université Côte d'Azur/ Géoazur et Espace, INRAE, et Université Gustave Eiffel. Les relevés de terrain ont été réalisés de novembre 2020 à janvier 2021 et ont permis de recueillir l'ensemble des informations nécessaires à une estimation a posteriori des débits de pointe (sections d'écoulement, pentes de lignes d'eau, ...).

L'enquête a finalement abouti à 32 estimations de débits de pointe fournissant une vision détaillée des réactions hydrologiques observées lors de l'événement. Le jeu de données obtenu a été diffusé fin mai à l'ensemble des organismes ayant contribué aux relevés. Il a contribué aux échanges de consensus sur les débits de la tempête Alex, pilotés par le Cerema. [Le jeu de données complet](#), incluant l'ensemble des informations (levés de terrain effectués, interprétation) ayant permis d'aboutir à chacune des estimations, est joint à ce rapport en format numérique. Il sera également intégré à la base HyMeX/Mistrals. Le présent rapport présente en détail le jeu de données obtenu, et le compare aux données collectées lors des précédentes campagnes similaires conduites dans le programme HyMeX.

2 Principe de l'enquête post crue

La méthode d'enquête appliquée est issue de l'expérience acquise au sein de l'observatoire Hydro-Météorologique Méditerranéen Cévennes Vivarais, qui conduit ce type d'enquêtes de façon récurrente depuis une vingtaine d'années (crues de l'Aude en 1999 ; du Gard en 2002 et 2008). Cette méthode a été consolidée dans le cadre de deux projets de recherche européens (Floodsite et Hydrate). Elle a déjà fait l'objet de nombreuses publications [Gaume et al., 2004, 2009; Delrieu et al., 2005; Gaume, 2006; Gaume et Borga, 2008; Lumbroso et Gaume, 2012]. Elle a également été plus récemment décrite sous forme d'un chapitre dans la charte qualité de l'hydrométrie [Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2017]. Nous en rappelons simplement les grandes lignes ci-après.

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 pentes du lit homogènes, etc. Ces critères permettent généralement d'effectuer une hypothèse de régime uniforme et d'éviter le recours à des modèles hydrauliques, plus lourds à mettre en œuvre, pour évaluer la forme de la ligne d'eau. Lorsque plusieurs sections se prêtent à un levé sur un même cours d'eau, elles sont généralement toutes retenues, la redondance des levés permettant par la suite de valider les estimations de débits par recoupement.

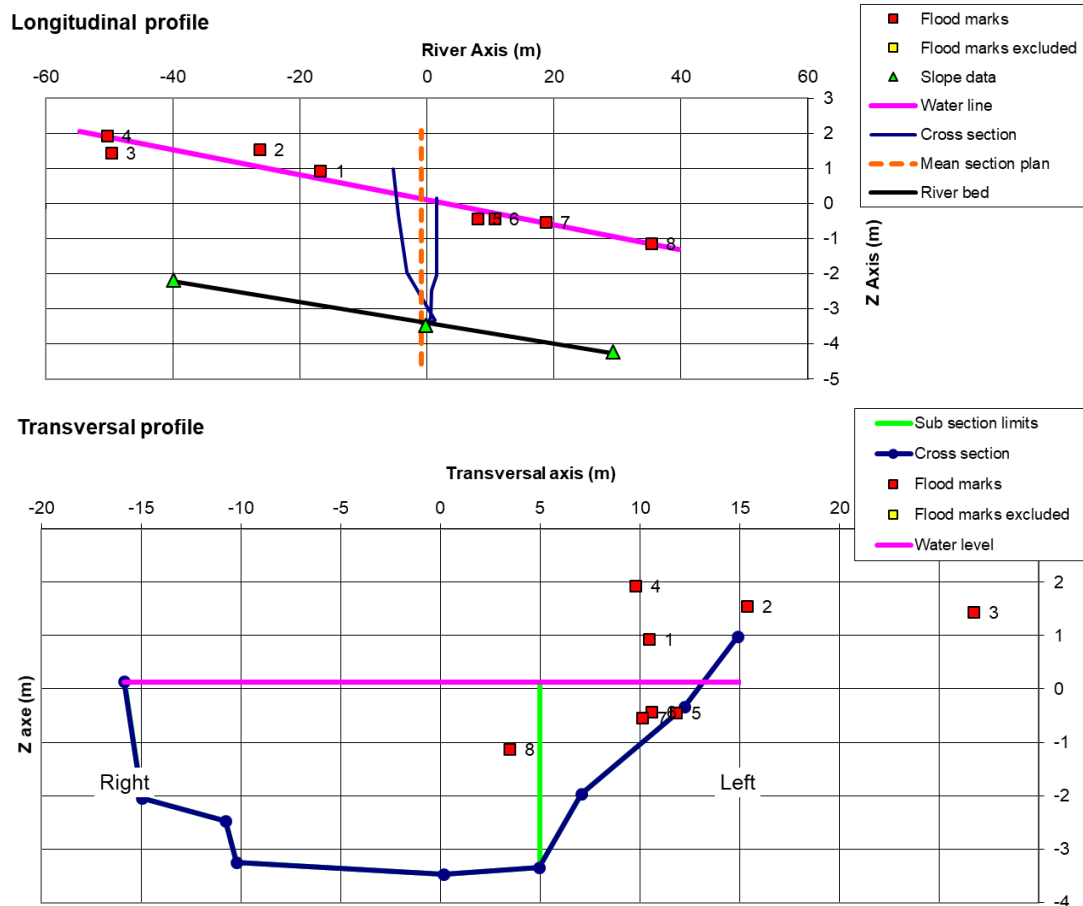


Figure 2. Exemple de profil en long et profil en travers, avec indication des laisses de crue, relevés sur la Tinée à Marie. La proximité entre la pente de la ligne d'eau et celle du fond du lit permet de valider l'hypothèse d'un régime uniforme.

Les informations topographiques recueillies pour chaque section sont les suivantes (cf. Figure 2) : 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 section d'écoulement et la pente de la ligne d'eau.

L'exploitation des relevés permet dans un premier temps de confirmer la hauteur d'eau atteinte dans chaque section en vérifiant la cohérence des laisses de crue, et de valider l'hypothèse d'un régime uniforme (pente de la ligne d'eau vs pente du lit). La Figure 2 donne un exemple d'un levé présentant une bonne cohérence globale des laisses de crue, et une ligne d'eau parallèle au fond du lit. En cas d'incohérence entre les niveaux des laisses relevées, celles jugées les moins fiables peuvent éventuellement être exclues du calcul.

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. Néanmoins, sur certains des affluents, 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 toutefois pu être évaluée dans la plupart des cas, en se basant sur les relevés Lidar disponibles avant crue (Métropole Nice Côte d'Azur) et après crue (IGN, cf. Figure 3). Les seules exceptions sont les sections situées sur la Roya (hors emprise du MNT 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, cette évolution a généralement été prise en compte en réduisant la section d'écoulement disponible pour le calcul de la valeur minimale du débit (et parfois également pour la valeur médiane). Cette réduction nécessaire de la section d'écoulement pour l'estimation du débit est généralement liée 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 en cours de crue, réduisant la section disponible pour l'écoulement au moment du pic de crue.

La réduction réelle de la section d'écoulement en crue étant très difficile à évaluer, les estimations de débits concernées sont généralement assorties d'un intervalle d'incertitude très large. Les sections évolutives ont également été identifiées dans la colonne « commentaire » en annexe 2, de façon à alerter sur les incertitudes fortes associées à ces estimations.

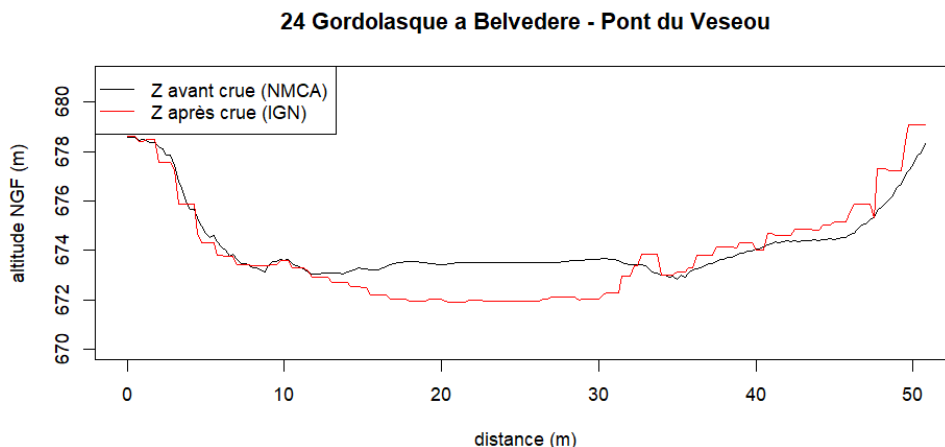


Figure 3. Exemple de comparaison des profils en travers avant/après crue, permettant de confirmer un creusement de la section, sur la Gordolasque à Belvédère.

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.

Toutefois, dans le cas de la tempête Alex, les cours d'eau affluents 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 [Rickenmann and Recking, 2011]. La formule de Ferguson, permettant de tenir compte de l'effet de réduction des

vitesse dans des sections où la hauteur d'eau s'avère faible par rapport au diamètre des blocs présents dans le lit, a donc également été appliquée de façon à fixer l'ordre de grandeur des vitesses retenues. 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 10 et 13 en lit mineur selon les sections. L'ordre de grandeur de vitesses obtenues avec la formule de Ferguson a également pu être confirmé dans le cas du Riou de Lantosque (voir ci-après).

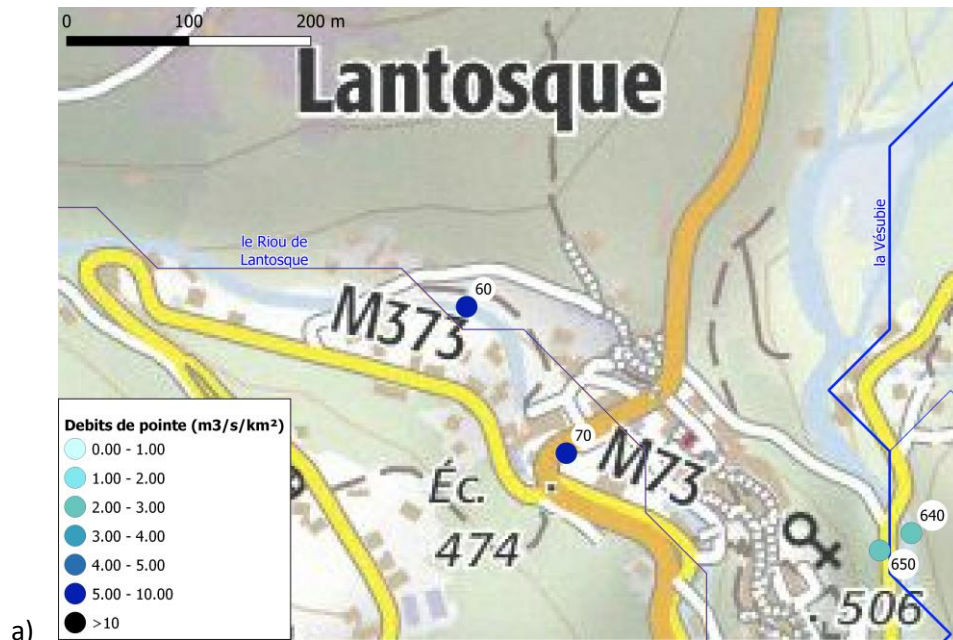


Figure 4. Exemple de section permettant un recoupement des méthodes d'estimation des vitesses, à Lantosque : a) localisation des deux sections relevées, b) vue de la première section (chenal en amont de l'ouvrage), c) vue de la section avec courbure dans l'ouvrage souterrain.

Lorsqu'elles étaient disponibles, des informations complémentaires aidant à confirmer les vitesses d'écoulement ont parfois pu être exploitées : végétation couchée, élévation de la ligne d'eau au droit des obstacles situés dans l'écoulement (laises de crue ou photos), vidéos prises pendant la crue... La Figure 4 donne l'exemple de deux sections proches sur le Riou de Lantosque, qui ont permis de confronter différentes méthodes d'estimation de vitesse. La première section se situe en amont d'un ouvrage souterrain, dans un chenal dont les berges sont constituées d'enrochements, et avec quelques blocs dans le fond du lit (Figure 4.a). Dans cette section, les formules de Ferguson et Manning Strickler ont été appliquées. La deuxième section se situe dans un ouvrage (cadre béton, Figure 4.b) présentant une courbure. Dans cette deuxième section la vitesse a pu être estimée directement à partir de la différence de niveau des laisses entre les deux rives au niveau du virage. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Section 1 (amont ouvrage) :

section d'écoulement : 18 m² , vitesse moyenne : 3.3 m.s⁻¹ [2.7-4.0] , débit : 60 m³.s⁻¹ [50-70]

- Section 2 (ouvrage) :

section d'écoulement : 7.3 m² , vitesse moyenne : 9.5 m.s⁻¹ [8.3-10.7] , débit : 70 m³.s⁻¹ [60-80]

2.4 Incertitudes sur les débits

Les estimations de débits de pointe obtenues restent par nature incertaines et ont donc systématiquement été associées à un intervalle indiquant la gamme des débits envisageables dans chaque section : cet intervalle est établi par une analyse de sensibilité aux différents facteurs d'incertitude (valeur de Strickler du lit, ou diamètre D84 des matériaux du lit dans le cas de la formule de Ferguson, éventuellement pente de la ligne d'eau et/ou niveau d'eau atteint dans la section, possible creusement/élargissement du lit dans le cas de sections évolutives).

En fin d'enquête, une vérification de la cohérence d'ensemble des informations obtenues a également été réalisée (recoupement avec les autres estimations disponibles, notamment les données des stations hydrométriques, et avec la pluviométrie via quelques simulations pluie-débit). Il ressort de cette étape que certaines des estimations obtenues dans des sections évolutives, notamment sur l'amont de la Vésubie (Vallon d'Espailart) restent parfois peu compatibles avec la pluviométrie enregistrée (qui comporte elle-même des incertitudes).

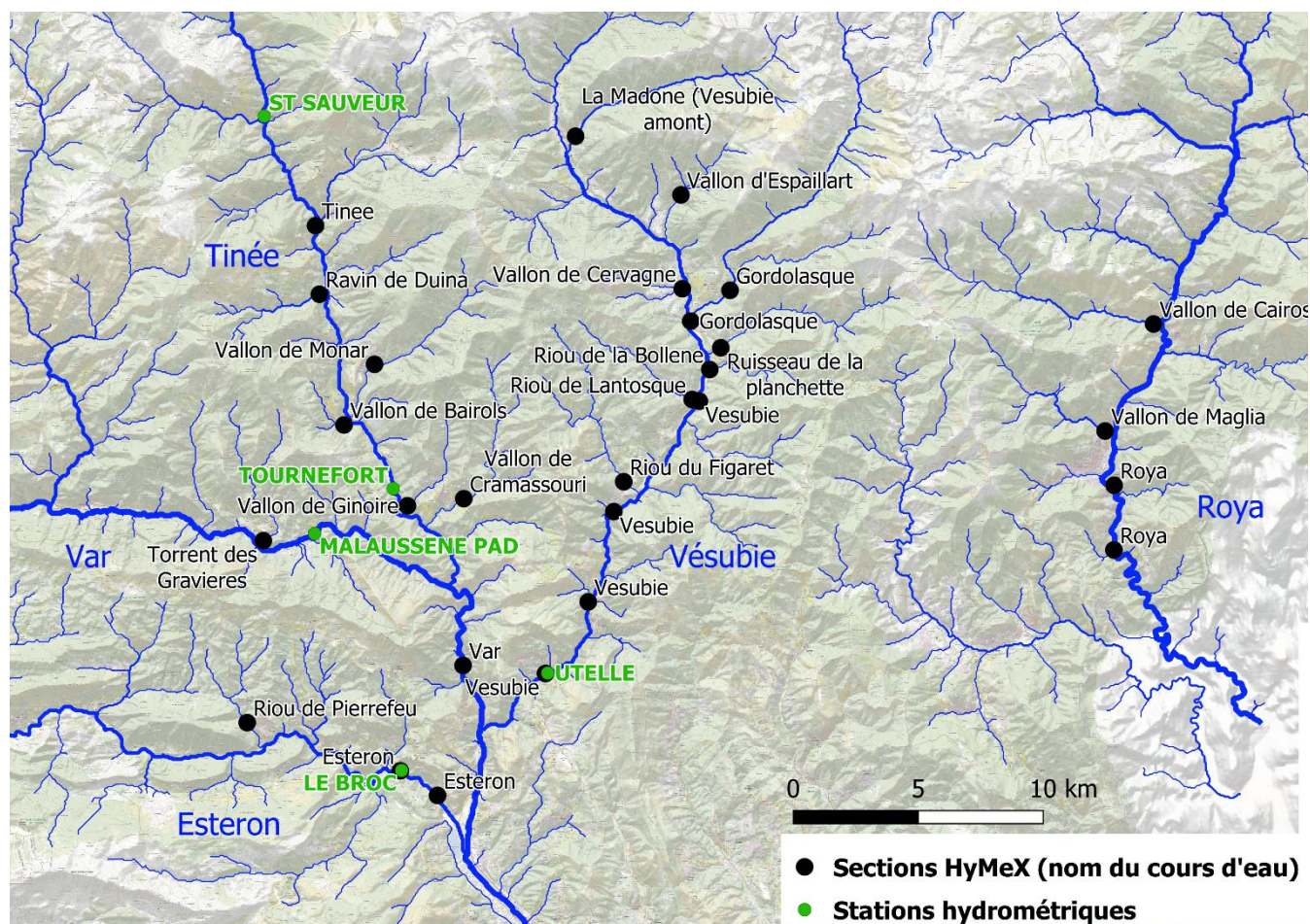


Figure 5. Localisation des sections relevées sur le terrain et ayant abouti à des estimations de débits de pointe

3 Débits de pointe obtenus

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 5 et [annexe 1](#)). Quelques estimations ont également été obtenues sur l'Estéron, le Var, et les affluents de la Roya. La suite de ce paragraphe commente rapidement le détail des valeurs obtenues ainsi que leur cohérence d'ensemble, secteur par secteur. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des estimations réalisées est fourni en [annexe 2](#), et [le jeu de données complet](#) (levés de terrain effectués, photos, interprétation) est joint à ce rapport en format numérique.

3.1 Secteur Tinée

Dans ce secteur, les débits de pointe estimés se concentrent sur l'aval du bassin versant de la Tinée, qui correspond au secteur touché par les plus forts cumuls de pluie (cf. Figure 6). Deux affluents ayant apporté une contribution importante à la crue n'ont toutefois pas pu faire l'objet de relevés en raison de l'importance des mouvements sédimentaires et des difficultés d'accès (Vallon d'Ullion et Vallon de Bramafam).

Plusieurs enseignements peuvent être tirés des estimations disponibles dans ce secteur. Tout d'abord, la contribution de l'amont du bassin versant de la Tinée au pic de crue principal s'avère probablement modeste. Le débit de $325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimé sur la Tinée à l'aval immédiat du Vallon de Bramafam, semble en effet très cohérent avec le pic observé à la station de St Sauveur ($197 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), mais cette contribution de l'amont du bassin s'avère nettement retardée par rapport au pic principal observé sur l'aval du bassin. Au moment de ce pic de crue principal, la station de St Sauveur confirme un débit très faible en provenance de l'amont du bassin (environ $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à 14h), et seul le Vallon de Bramafam semble avoir eu une contribution significative à ce premier pic de crue. Cette contribution reste toutefois probablement inférieure aux $325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimés à l'aval de la confluence avec la Tinée, valeur qui semble correspondre au pic retardé en provenance de l'amont.

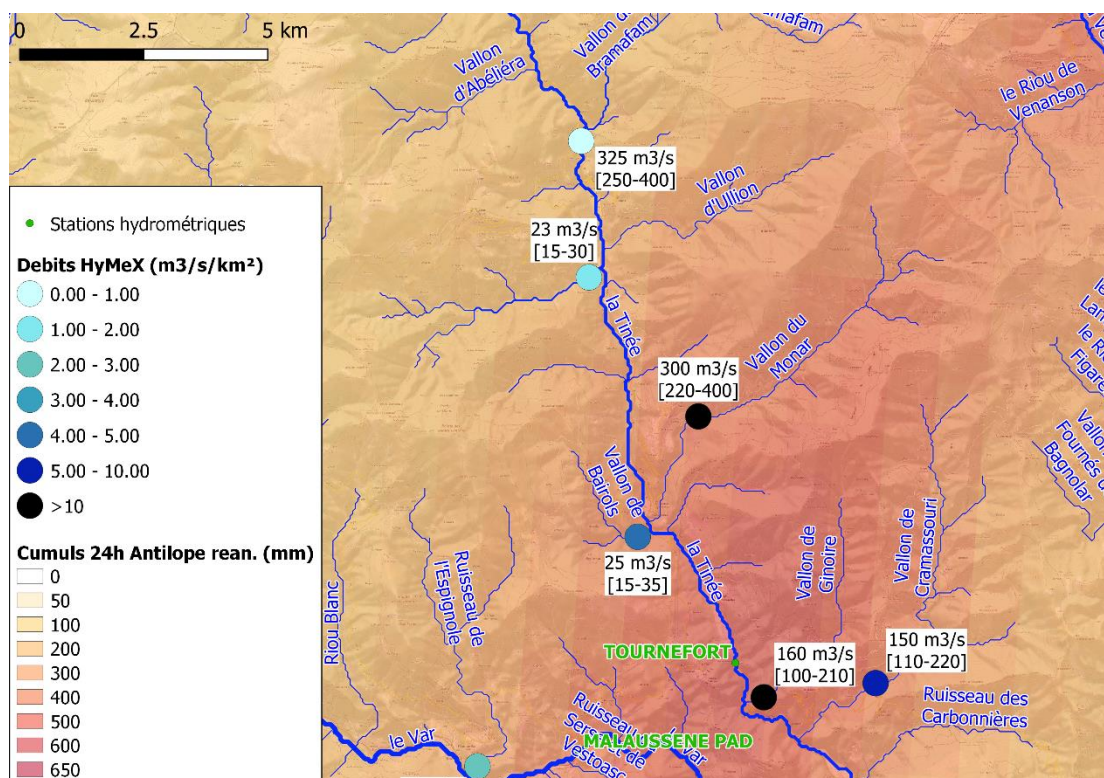


Figure 6. Débits de pointe estimés dans le secteur de la Tinée

A l'aval de ce premier point d'estimation, les affluents rive gauche ont connu de très fortes réactions hydrologiques ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ estimés par exemple sur le Vallon du Monar, et transport sédimentaire très important sur l'ensemble des affluents). Ces réactions semblent suffisantes pour expliquer à elles seules la valeur du débit de pointe fournie par la station de Tournefort ($930 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, valeur qui semble confirmée par les analyses post-crue). Les affluents rive droite ont pour leur part des contributions nettement plus modestes, ce qui semble cohérent avec les cumuls pluviométriques nettement plus faibles observés sur ces affluents.

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 Cramassouri), car étant également situés sous la zone des plus forts cumuls de pluie. Le débit de la Tinée à la confluence avec le Var s'avère donc probablement très nettement supérieur à celui estimé à Tournefort.

3.2 Secteur Vésubie

Sur la Vésubie amont (cf. *Figure 7*), en raison des difficultés d'accès et des importants mouvements sédimentaires, certains des affluents ayant fortement contribué à la crue de la Vésubie n'ont pas pu être couverts par l'enquête (Boréon et Riou de Venanson). Néanmoins des sections ont pu être levées sur la plupart des autres affluents : Madone (Vésubie amont) ; Vallon d'Espailart, Gordolasque, Ruisseau de la Planchette, Riou de Bollène, Vallon de Cervagne, Riou de Lantosque. Une estimation a également pu être obtenue sur le cours principal de la Vésubie à Lantosque, à l'amont immédiat de la confluence avec le Riou de Lantosque

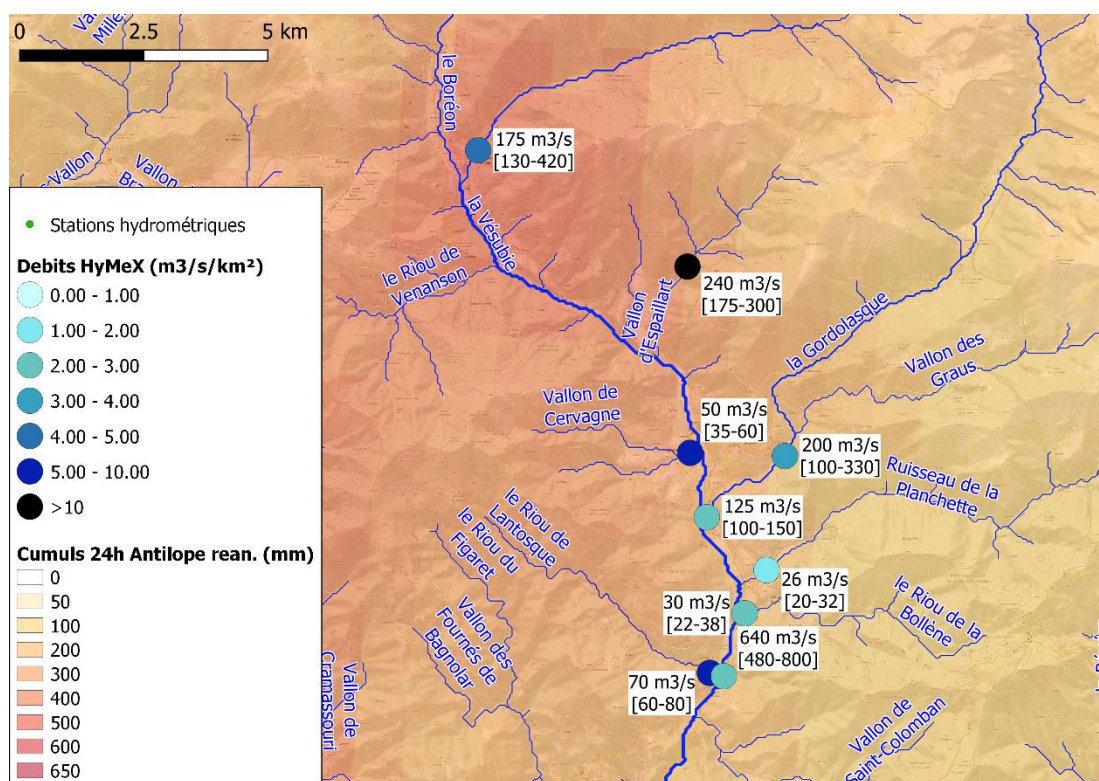


Figure 7. Débits de pointe estimés dans le secteur de la Vésubie amont

La *Figure 7* indique une contribution importante des affluents amont (Madone et Vallon d'Espailart) à la crue de la Vésubie, ainsi que de l'ensemble des affluents rive droite. Les affluents rive gauche à l'aval de la Gordolasque ont eu des réactions bien plus modérées, ce qui s'avère très cohérent avec la pluviométrie. Les sections relevées sur la Madone et la Gordolasque amont sont assez fortement évolutives en cours de crue, ce qui génère une incertitude forte. L'estimation obtenue sur la Gordolasque

amont semble notamment élevée au regard du débit estimé plus à l'aval. Néanmoins, la borne inférieure du débit estimé fournit un scénario qui reste compatible avec l'estimation aval. Un risque important de surestimation est également présent sur le Vallon d'Espailart : sur cet affluent, même la borne inférieure du débit estimé ne semble pas compatible avec la pluviométrie observée. Ceci est d'autant plus surprenant que cette section n'a pas évolué significativement entre la situation avant et après crue. Néanmoins, la présence de charriage dans cette section est probable et a pu conduire à une forte surestimation du débit. L'incohérence apparente avec la pluviométrie peut également trouver son origine dans une sous-estimation de la pluie et/ou d'une différence entre bassin géologique et topographique sur ce vallon.

Pour ce qui concerne la Vésubie aval (cf. *Figure 8*), les estimations obtenues forment un ensemble nettement plus cohérent. Les affluents rive droite (Riou de Lantosque, Riou du Figaret) sont touchés par les forts cumuls de pluie et fournissent toujours une contribution significative à la crue, jusqu'à l'entrée des gorges de la Vésubie, dans lesquelles le débit ne semble plus avoir augmenté significativement. Les affluents rive gauche n'ont pas fait l'objet de relevés de sections, mais plusieurs d'entre eux ont été reconnus (Vallon de Saint Colomban, Vallon de l'Imberguet) ce qui a permis de confirmer les réactions très limitées des affluents rive gauche dans ce secteur.

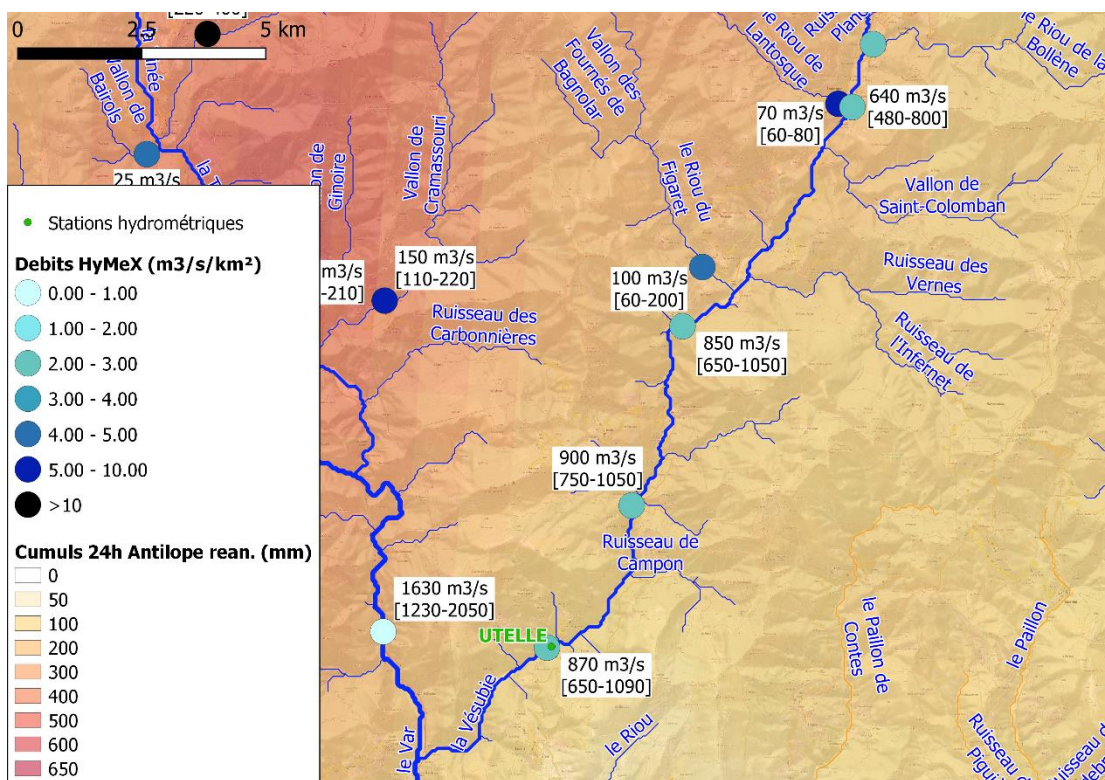


Figure 8. Débits de pointe estimés dans le secteur de la Vésubie aval

3.3 Secteur Var Estéron

Dans ce secteur (cf. *Figure 9*), une estimation de débit a pu être réalisée sur le cours principal du Var, entre les confluences avec la Tinée et la Vésubie, ce qui permet de compléter les mesures des stations. Deux estimations sont également disponibles dans le secteur de la station du Broc sur l'Estéron, et une dernière sur le Riou de Pierrefeu, petit affluent rive gauche touché par la zone de forts cumuls de pluie.

La valeur de débit de pointe estimée sur le Var ($1630 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) semble cohérente avec les apports amont estimés du Var ($224 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la station de Malaussène lors du premier pic) et de la Tinée (probablement assez nettement supérieur à $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la confluence). Les valeurs estimées sur l'Estéron semblent

pour leur part confirmer celle fournie par la station du Broc ($470 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Au premier abord, ces valeurs peuvent paraître faibles au regard de la pluviométrie observée sur ce bassin, mais elles illustrent le comportement très particulier du bassin de l'Estéron, en partie karstique et qui semble posséder une capacité d'atténuation très importante du forçage pluviométrique.

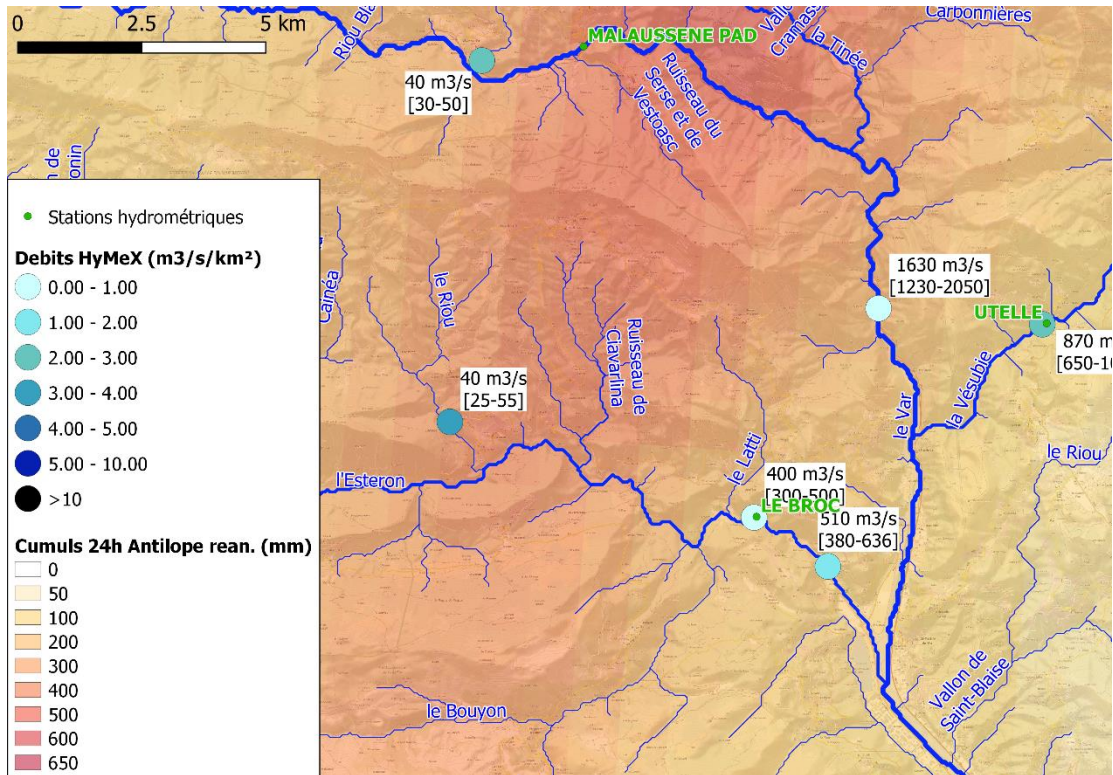


Figure 9. Débits de pointe estimés dans le secteur de l'Estéron – Var aval

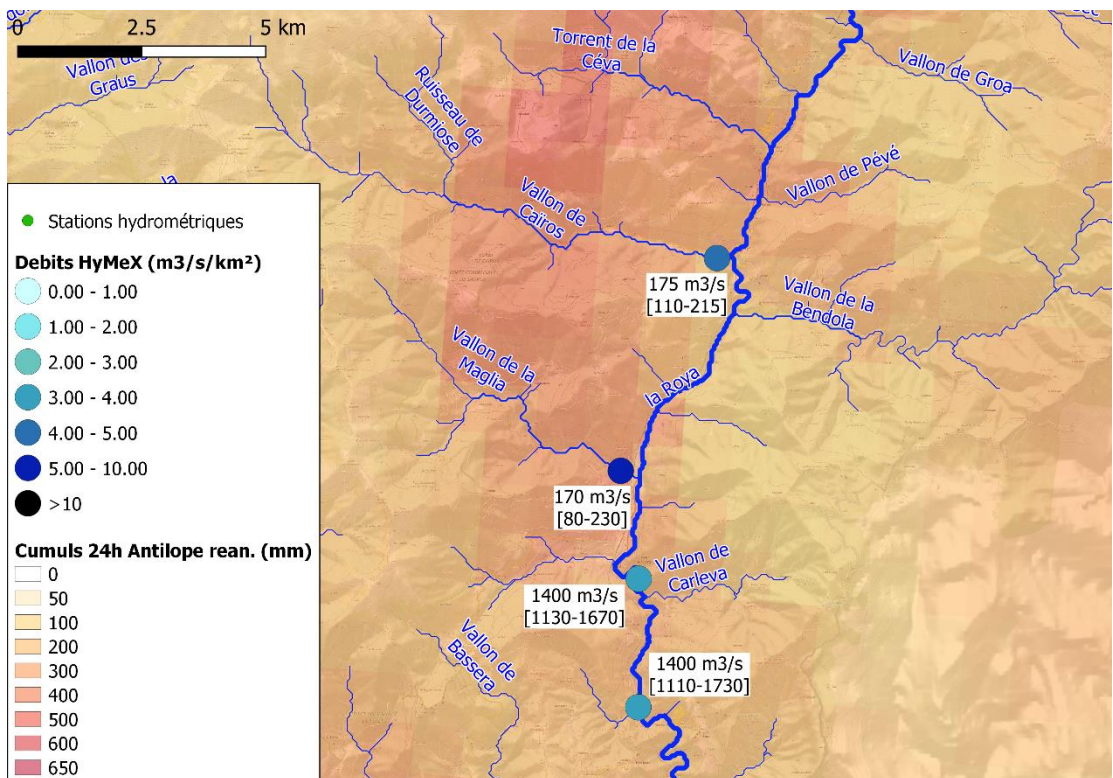


Figure 10. Débits de pointe estimés dans le secteur de la Roya

3.4 Secteur Roya

Dans ce dernier secteur, deux estimations ont pu être réalisées sur deux affluents rive droite (Vallons de Caïros et de la Maglia), situés à l'amont direct de Breil-sur-Roya (cf. *Figure 10*). Ces estimations correspondent à des sections évolutives, et l'absence de relevé Lidar avant crue rend difficile l'évaluation de l'ampleur de ces évolutions morphologiques. Il en résulte une incertitude importante sur les valeurs de débits estimés. Seules les bornes inférieures des intervalles de débits estimés prennent en compte la forme de la section supposée avant crue. D'après les simulations pluie-débit réalisées, ces limites inférieures des contributions des affluents semblent les plus cohérentes avec le débit estimé sur le cours principal de la Roya, qui s'élève à $1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à l'aval de Breil sur Roya (estimation EDF, Sevrez et al. 2020).

4 Analyse des débits spécifiques et comparaison aux précédentes campagnes HyMeX

La *Figure 11* présente une comparaison des 30 valeurs de débits de pointe estimés lors de l'enquête post-événement Alex, avec d'une part les records de débits connus sur le territoire métropolitain, 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 1^{er} décembre 2019 [Lebouc et Payrastre, 2017,2020 ; Brigode et al., 2021].

Deux enseignements principaux peuvent être tirés de cette figure. Tout d'abord, les débits de pointe lors de la tempête Alex sont restés assez éloignés des records connus sur le territoire métropolitain. Ceci s'explique principalement par le fait que les intensités pluviométriques horaires sont restées limitées à environ 70 mm/h maximum, ce qui a probablement limité les valeurs de débits atteintes sur les petites surfaces drainées. A titre de comparaison, une pluviométrie de 115 mm/h a été observée à Cannes le 2 octobre 2015. Comme cela a déjà été mentionné, la pluviométrie de la tempête Alex se distingue plutôt sur des durées longues, le maximum enregistré sur 24h faisant partie des 8 plus fortes valeurs connues sur cette durée à l'échelle de l'arc méditerranéen français.

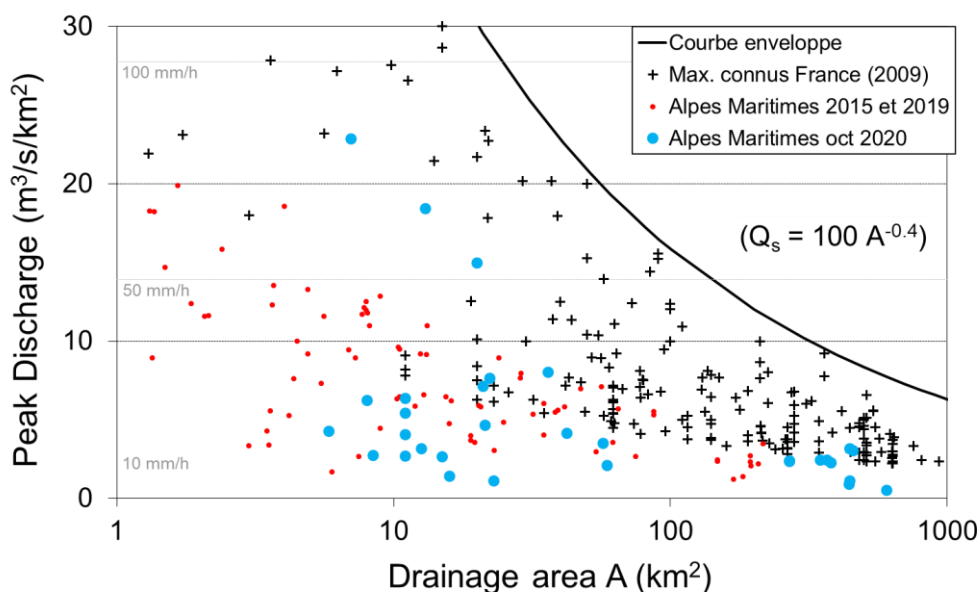


Figure 11. Comparaison des débits de pointe estimés aux records connus sur le territoire métropolitain français, et aux débits estimés lors des précédentes campagnes HyMeX dans les Alpes Maritimes (crues du 2 octobre 2015, du 23 novembre 2019 et du 1^{er} décembre 2019). Les bornes min et max des estimations ne sont pas représentées pour une meilleure lisibilité du graphique.

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 côtières des Alpes-Maritimes. Seules trois valeurs se distinguent pour la tempête Alex et paraissent significativement plus élevées. Ces valeurs correspondent aux affluents aval rive gauche de la Tinée (Vallon du Monar et Vallon de Ginoire), ainsi qu'au Vallon d'Espaillart sur la Vésubie amont (dont le débit a toutefois pu être surestimé, cf. paragraphe 3.2)

5 Conclusion

L'enquête hydrologique post-crue 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 et du Var.

Compte tenu des évolutions morphologiques très importantes observées lors de ces crues, une attention particulière a été portée sur la recherche de sections d'estimation stables en cours de crue, et sur l'analyse des évolutions morphologiques pour les sections non stables. Les méthodes d'estimation des vitesses d'écoulement ont également été adaptées au contexte torrentiel par l'application systématique de la formule de Ferguson. Dans le cas des sections évolutives en cours de crue, les estimations obtenues restent néanmoins assorties d'incertitudes très fortes.

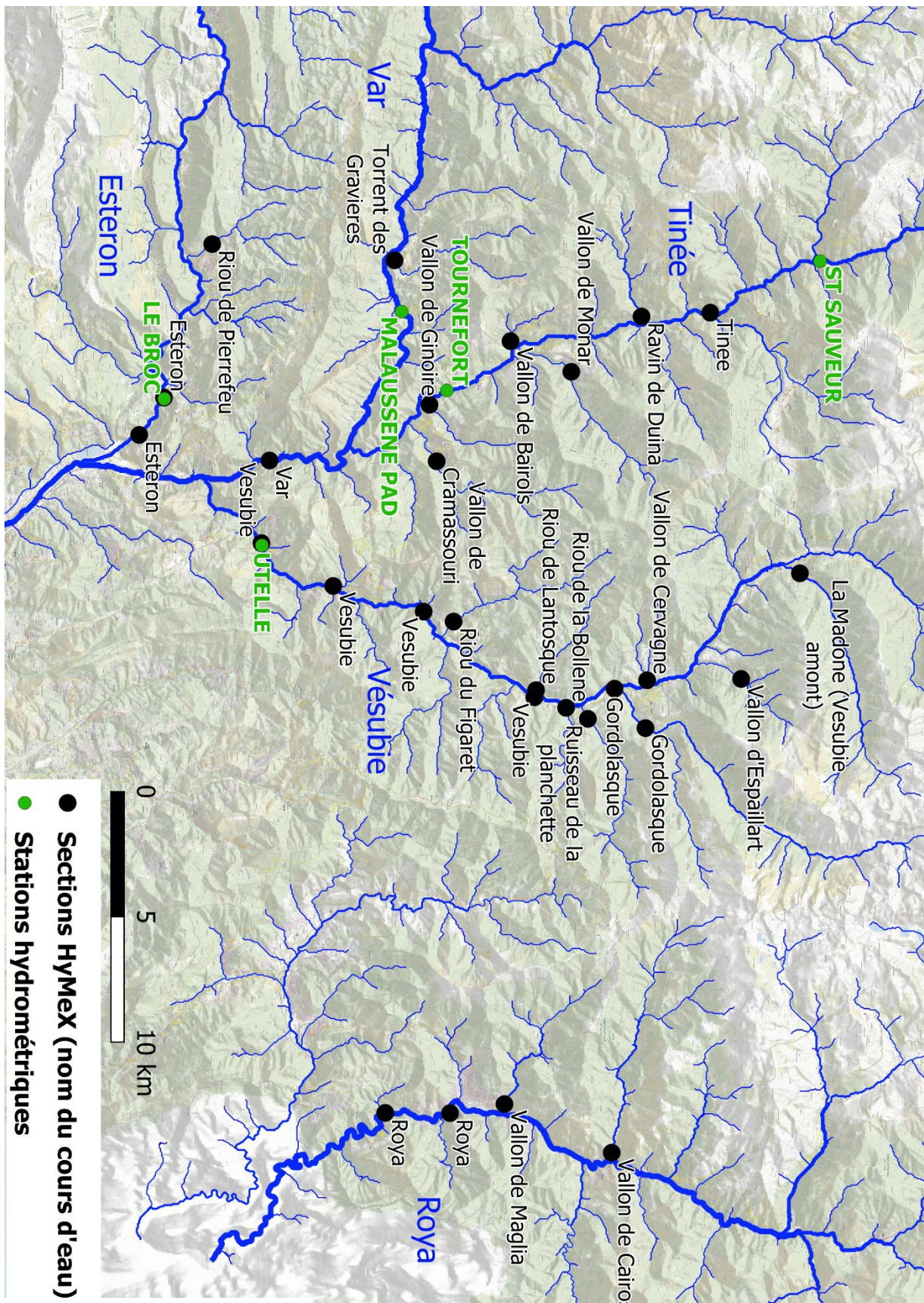
L'analyse de ces données montre une bonne cohérence d'ensemble, à l'exception des estimations réalisées sur certains affluents amont de la Vésubie (Gordolasque amont et surtout Vallon d'Espaillart), qui semblent élevées au regard de la pluviométrie et des débits estimés plus à l'aval sur la Vésubie.

Ces données seront prochainement intégrées à la base HyMeX/Mistrals. Elles constituent également une contribution à l'étude de synthèse sur l'hydrologie de l'événement conduite par le Cerema à la demande de la DDTM06, et visant à notamment obtenir un consensus sur les valeurs de débits.

6 Bibliographie

- Brigode P., Vigoureux S., Delestre O., Nicolle P., Payrastre O., Dreyfus R., Nomis S., Salvan L., et l'équipe « post-event surveys » d'HyMeX, 2021. INONDATIONS SUR LA COTE D'AZUR : BILAN HYDRO-METEOROLOGIQUE DES EPISODES DE 2015 ET 2019. LHB Hydrosociences Journal (soumis)
- Delrieu G, Ducrocq V, Gaume E, Nicol J, Payrastre O, Yates E, Kirstetter P-E, Andrieu H, Ayrat PA, Bouvier C, Creutin JD, Livet M, Anquetin A, Lang M, Neppel L, Obled C, Parent-du-Chatelet J, Saulnier GM, 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: 34–52.
- Gaume E, Livet M, Desbordes M, Villeneuve JP. 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology* 286: 135–154.
- Gaume E., 2006, Methodological note on post flash-flood investigations, deliverable report D23.2 from the FLOODsite project (<http://www.floodsite.net>), 54p.
- 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, pp.175-189.
- 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, *et al.*, 2009, A compilation of data on European flash floods, *Journal of Hydrology*, 367, 1-2, pp 70-78.
- 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. 13 p., hal-02933695v2
- Lumbroso D., Gaume, E., 2012. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges, *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.048
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Direction Générale de la Prévention des Risques, 2017. Charte qualité de l'hydrométrie, Guide de bonnes pratiques, 83 p., www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Schapi_Charte_hydro_P01-84_BasseDefinition_5Mo_.pdf
- Rickenmann, D., and Recking, A., 2011, Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set, *Water Resour. Res.*, 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793.
- Sevrez 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. Rapport EDF du 21 Décembre 2020, 12p.

Annexe 1. Localisation des points d'estimation des débits



Annexe 2. Tableau des débits de pointe estimés

Bassin Versant	Cours d'eau	Lieu	X (L93)	Y (L93)	Surface drainée (km ²)	Qp min (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp max (m ³ /s)	Commentaire
Roya	Roya	Breil sur Roya	1062639	6325477	443	1130	1400	1670	
Roya	Roya	Breil sur Roya	1062631	6322889	456	1110	1400	1730	
Roya	Vallon de Cairos	Saorge	1064218	6331935	42.1	110	175	215	Section évolutive, incertitude forte
Roya	Vallon de Maglia	Breil sur Roya	1062278	6327650	22.2	80	170	230	Section évolutive, incertitude très forte
Tinée	Ravin de Duina	Ilonse	1030824	6333127	15.9	15	23	30	
Tinée	Tinée	Marie - La Bollinette	1030669	6335874	603	250	325	400	
Tinée	Vallon de Bairols	Pont de Clans	1031807	6327894	5.82	15	25	35	
Tinée	Vallon de Cramassouri	La Tour sur Tinée	1036603	6324942	21	110	150	220	Section évolutive
Tinée	Vallon de Ginoire	La Tour	1034348	6324657	7	100	160	210	Section évolutive, incertitude très forte
Tinée	Vallon de Monar	Clans	1033030	6330321	20	220	300	400	Section évolutive, incertitude très forte
Estéron	Estéron	Le Broc - Gillette	1035552	6313060	444	380	510	636	
Estéron	Estéron	Le Broc - Gillette	1034062	6314049	440	300	400	500	
Estéron	Riou de Pierrefeu	Pierrefeu	1027930	6315976	12.6	25	40	55	
Var	Torrent des Gravières	Villars-sur-Var	1028576	6323263	14.9	30	40	50	
Var	Var	Revest les Roches- Utelle	1036573	6318265	1842	1230	1630	2050	
Vesubie	Gordolasque	Belvédère	1047263	6333284	57	100	200	330	Section évolutive, incertitude forte
Vesubie	Gordolasque	Roquebilière	1045688	6332051	59	100	125	150	
Vesubie	La Madone	St Martin Vésubie	1041078	6339453	36	130	175	40	Section évolutive, incertitude très forte
Vesubie	Riou de la Bollène	La Bollène Vésubie	1046451	6330114	11.0	22	30	38	
Vesubie	Riou de la Bollène	Bollène-Vésubie	1046378	6330132	11.0	35	45	55	
Vesubie	Riou de Lantosque	Lantosque	1045666	6329031	11	50	60	70	
Vesubie	Riou de Lantosque	Lantosque	1045747	6328911	11	60	70	80	
Vesubie	Riou du Figaret	Utelle	1043007	6325620	21.4	60	100	200	Section évolutive, incertitude forte
Vesubie	Ruisseau de la planchette	La Bollène-Vésubie	1046892	6330984	23	20	26	32	
Vesubie	Vallon d'Espaillart	Berthemont	1045297	6337105	13	175	240	300	Section évolutive, incertitude très forte
Vesubie	Vallon de Cervagne	Roquebilière	1045351	6333350	8	35	50	60	
Vesubie	Vallon de Cervagne	Roquebillaire	1045391	6333338	8.4	15	23	30	
Vesubie	Vésubie	Lantosque	1046030	6328845	268	480	640	800	
Vesubie	Vesubie	Lantosque	1046004	6328831	268	520	650	780	
Vesubie	Vesubie	Utelle	1042608	6324424	346	650	850	1050	

Bassin Versant	Cours d'eau	Lieu	X (L93)	Y (L93)	Surface drainée (km ²)	Qp min (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp max (m ³ /s)	Commentaire
Vesubie	Vesubie	Utelle	1041584	6320810	367	750	900	1050	
Vesubie	Vesubie	Utelle	1039874	6317943	380	650	870	1090	