

**TEMPETE ALEX – RETOUR D’EXPERIENCE DES CRUES
TORRENTIELLES DU 2 OCTOBRE 2020 DANS LES
ALPES-MARITIMES**

**ALEX storm event – Lessons learned from the debris-floods that occurred on
October, 2nd 2020 in the French Maritime Alps region**

MARTINS Céline^{1*}, KUSS Damien¹, GUITET Cécile¹, CARLADOUS Simon¹,
ROBERT Yannick¹, ANDREIS Nathalie¹, PITON Guillaume², LIEBAULT Frédéric²,
FLIPO Myriam³, CHAPUIS Margot⁴, PASSY Paul⁵, MELUN Gabriel⁶,
QUEFFELEAN Yann¹

** auteur correspondant*

¹ONF-RTM, Direction des risques naturels, services RTM Alpes-Maritimes et Isère, France

²Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

³Sorbonne Université, UR Médiations, Paris, France

⁴Université Côte d’Azur, CNRS, ESPACE, Nice, France

⁵Université Paris-Cité, UMR 8586 PRODIG, Paris, France

⁶OFB, Direction de la recherche et de l’appui scientifique, Vincennes, France

Résumé : La tempête Alex, qui a touché la France entre le 1^{er} et 2 octobre 2020, a provoqué un épisode méditerranéen exceptionnel sur les Alpes-Maritimes. L’épisode a généré des crues torrentielles d’une magnitude sans précédent depuis plusieurs siècles sur les vallées de la Roya et de la Vésubie avec des évolutions morphologiques majeures des cours d’eau et un bilan humain et matériel lourd. A la demande de la Direction des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes, un retour d’expérience technique a été réalisé afin de comprendre et caractériser les phénomènes associés à cet évènement. Ce retour d’expérience a également été mis à profit, au fur et à mesure des besoins, pour accompagner les services de l’Etat et les collectivités gemapiennes en matière de réduction des risques et de reconstruction des vallées. L’ampleur de l’évènement a nécessité d’adapter rapidement les outils et les méthodologies. L’acquisition d’un LiDAR, l’organisation d’une vaste campagne de terrain, l’élaboration de formulaires spécifiques pour les relevés de terrain *via* une application mobile accessible à tous, ainsi que la collaboration de l’ensemble des acteurs du territoire ont permis de construire une base de données riche pour relever les différents défis posés par un tel évènement.

Mots clefs : Tempête ALEX ; Retour d’expérience ; Crue torrentielle ; Évolutions morphologiques ; Transport sédimentaire

Abstract: On October 2nd 2020, storm Alex hit France and caused unprecedented magnitude torrential floods in the Roya and Vésubie valleys, with major morphological changes and heavy human and material damages. A technical feedback was carried out at the request of the Alpes-Maritimes State authority, in order to understand and characterize the phenomena associated with this unusual event. This technical feedback was also used as needed to support the State services and the local authorities in terms of risk reduction and valley rehabilitation. The scale of the event made it necessary to quickly adapt tools and methodologies. To meet the various challenges posed by this kind of event, all the stakeholders of the territory worked together to build a rich database with the addition of a LiDAR, a vast field campaign and the development of specific field survey forms through a mobile app accessible to all.

Keywords: Alex storm event; Feedback; Debris-flood

1 INTRODUCTION

Le passage de la tempête Alex sur le littoral atlantique a provoqué le 2 octobre 2020 un épisode méditerranéen exceptionnel sur les Alpes-Maritimes qui s’est traduit par de très forts cumuls pluviométriques (>500 mm en 24h sur plusieurs stations), avec des records absolus observés en Tinée, en Vésubie et en Roya (Météo France, 2020, Carrega and Michelot, 2021). Les cumuls pluviométriques enregistrés sur 12h, sur les bassins versants de la Roya et de la Vésubie ainsi que sur la basse Tinée, sont associés à des périodes de retour comprises entre 500 et 1000 ans (ONF-RTM et al., 2022a, 2022b).

Cet épisode a généré, sur ces torrents et rivières torrentielles à fortes pentes, des crues d’une intensité majeure, caractérisées par des niveaux d’érosion et des volumes de matériaux charriés exceptionnels (Figure 1). Des centaines de bâtiments, des dizaines de kilomètres de voirie et de nombreux ponts ont été emportés ou très fortement endommagés par la crue (Rey et al., 2022). Des dizaines d’hectares de ripisylve ont été arrachés. Les lits des cours d’eau ont été métamorphosés passant de cours d’eau relativement étroits et généralement pavés à des faciès de lit en tresse continus sur la Vésubie et discontinus sur la Roya (Figure 2).

Au lendemain de la crue, il est apparu nécessaire de caractériser les phénomènes hydrologiques et morphologiques survenus pour répondre au besoin de compréhension de l’événement, et en tirer les enseignements au bénéfice de la prévention des risques et de la reconstruction. Le retour d’expérience technique diligenté par la Direction des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes a été organisé en deux volets : un volet hydrologique piloté par le CEREMA, qui a donné lieu à un travail de consensus pour établir les débits de la crue (CEREMA, 2021), et un volet torrentiel piloté par l’ONF-RTM (Service de Restauration des Terrains de Montagne de l’Office National des Forêts) appuyé par INRAE et plusieurs chercheurs d’autres institutions en complément (ONF-RTM et al., 2022a, 2022b).

La mobilisation de ce second groupe a permis de rassembler une quantité considérable de données et d’observations rapidement après l’événement. Les différents contributeurs se sont ensuite organisés pour livrer, 18 mois après l’événement, une analyse détaillée du déroulé des événements, des processus et effets des crues et des dommages associés. Cette contribution vise donc à la fois à illustrer le caractère exceptionnel de la tempête Alex sur le plan des changements morphologiques et à partager la façon dont a été opéré le retour d’expérience, tant sur le plan de la documentation de l’événement (opération qui vise à tirer des leçons à moyen et long termes), que sur celui de l’appui aux acteurs sur les mois et années qui ont suivi l’événement (court terme). Il couvre une analyse très large et est ainsi complémentaire des travaux d’analyses post-crues menés par des chercheurs s’étant focalisé sur certains thèmes plus précis (Carrega and Michelot, 2021 sur l’hydro-météo; Chmiel et al., 2022 sur la mesure sismique du transport solide; Rey et al., 2022 sur les dommages aux infrastructures).



Figure 1 : Photos de terrain post événement : (gauche) Dépôt sur le cône de déjection du torrent de la Morte avec bâtis engravés près de Viévol en Haute-Roya (Source : V. Koulinski, ETRM) ; (droite) Erosion de berge menaçant un bâti à St-Martin-Vésubie (Source : F. Adamo, CEREMA)

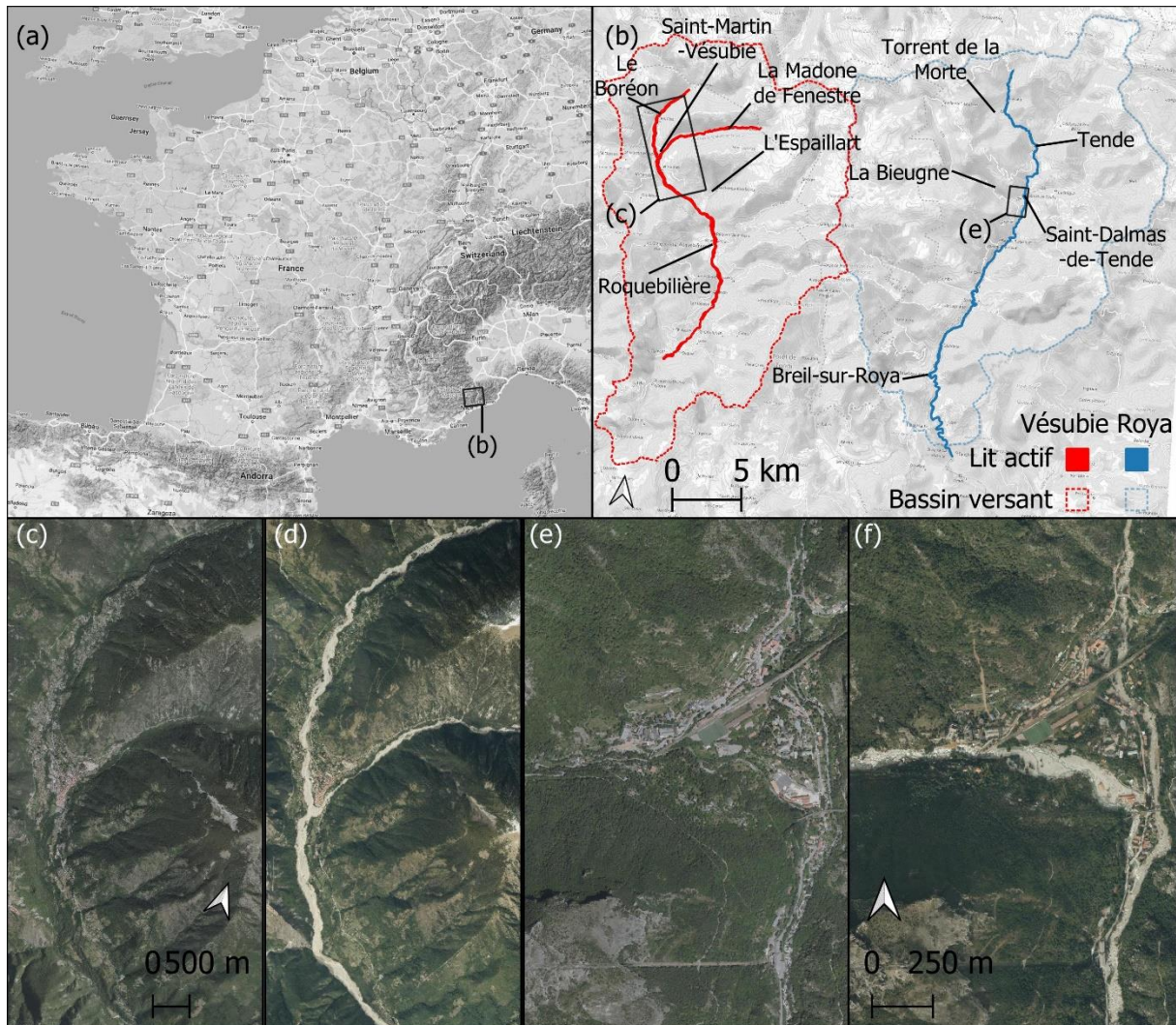


Figure 2 : (a) Localisation de la zone d'étude, (b) Bassins versants principalement investigués, (c) Vue aérienne de Martin-Vésubie avant et (d) après la crue, (e) vue aérienne de Tende avant et (f) après la crue (Source : IGN BD Ortho et IGN levé d'urgence post-Alex)

2 OBJECTIFS ET ORGANISATION DU RETOUR D'EXPERIENCE

Le volet torrentiel du retour d'expérience technique a été dimensionné pour répondre au besoin de caractérisation et de compréhension des phénomènes, mais aussi d'anticipation, dans la mesure du possible, de l'évolution prévisible des cours d'eau. Il devait également répondre aux défis immédiats posés par la gestion post-crise : exigences de mise en sécurité, nécessité de maîtriser l'urbanisation et réduire la vulnérabilité, volonté de promouvoir une reconstruction résiliente.

2.1 Collaboration autour de l'acquisition des données

Pour caractériser sans tarder les phénomènes avec un maximum d'exhaustivité, la compilation et le partage des données a été l'un des premiers défis à relever au lendemain du 2 octobre 2020. L'ampleur géographique et l'intensité de l'évènement ont en effet nécessité d'adapter les modes de relevés habituels et leur organisation pour couvrir, dans les meilleurs délais, l'ensemble du territoire impacté avec les moyens humains disponibles.

La mobilisation immédiate des acteurs de la gestion du risque a permis à l'IGN d'engager l'acquisition d'une orthophotographie et d'un LiDAR sur les trois vallées impactées, et ce dès le 5 octobre 2020. L'acquisition de ces données a été déterminante à double titre :

- Pour optimiser l'organisation des missions terrain, réalisées entre le 13 octobre et le 20 novembre 2020 par les équipes ONF-RTM, avec l'appui des collectivités gemapiennes et de la communauté scientifique. Les photographies réalisées par le CEREMA lors de survols en hélicoptère entre les 3 et 9 octobre 2020 ont également contribué à guider l'organisation des missions et à consolider les constats ;
- Pour cibler les relevés de terrain en priorisant les laisses de crue et les dommages aux enjeux, les éléments quantitatifs relatifs aux érosions et aux dépôts (par exemple les linéaires, hauteurs, largeurs et pentes) pouvant être obtenus par comparaison des modèles numériques de terrain (MNT) *ante* et *post* crue. L'utilisation d'une application mobile de collecte de données avec des formulaires de saisie spécifiquement élaborés a permis d'optimiser les relevés et leur exploitation par la suite.

2.2 Maîtrise de l'urbanisation et réduction de la vulnérabilité

Les constats de terrain ont porté sur les paramètres qui définissent l'intensité des phénomènes torrentiels (hauteurs d'érosion, épaisseurs des dépôts, taille des flottants et des matériaux transportés selon la grille définie par Givry et Peteuil (2011), ainsi que sur les modes et les degrés d'endommagement des bâtis et des infrastructures selon une grille inspirée de Kean et al. (2019). Ils ont été compilés dans le retour d'expérience sous forme d'atlas cartographiques (carte d'intensité de la crue et carte d'exposition des bâtis au risque torrentiel), et valorisés à travers un *porter à connaissance* des risques. Ce document, publié le 3 mai 2021 soit 7 mois après les événements, fournit une cartographie précise des zones principales ayant été touchées sur les bassins versants de la Vesubie (393 km²) et de la Roya (394 km²). Il a été complété par un programme ambitieux d'acquisition préventive visant à réduire la vulnérabilité des enjeux bâtis, porté par la mission interministérielle pour la reconstruction des vallées.

2.3 Pour un réaménagement résilient face à l'aléa torrentiel

Les analyses des évolutions morphologiques des cours d'eau, détaillées à la section suivante, ont été valorisées au fur et à mesure des besoins et des priorités exprimées par les services de l'Etat en charge de piloter la reconstruction, sous la forme de contributions dans le cadre « d'ateliers Gemapi » organisés dans les communes par la mission interministérielle pour la reconstruction des vallées entre janvier et août 2021. Les principes fondamentaux visant à réduire la vulnérabilité des réaménagements et des enjeux dans la perspective de futurs épisodes météorologiques marqués, ont été énoncés et expliqués par le service ONF-RTM aux acteurs participant à ces ateliers (élus locaux, entités gemapiennes, services de l'Etat, gestionnaires d'infrastructures), puis déclinés en schémas de réaménagement pour les principales traversées urbaines, jusqu'au stade d'esquisses pour quelques situations délicates.

Ces principes consistent notamment à conserver des sections d'écoulement suffisantes et des zones de régulation du transport solide, nécessaires pour anticiper les évolutions de fonds de lit en crue et la mobilisation probable des matériaux disponibles suite à la déstabilisation des lits et des berges. Ils consistent également à augmenter la portée des ouvrages de franchissement, dont l'incidence sur le déroulé de la crue et les niveaux de dégâts a été observée lors de l'événement. Enfin, la protection systématique des enjeux maintenus à proximité des cours d'eau a été recommandée, assortie de préconisations pour le dimensionnement des ouvrages en contexte torrentiel. Les supports de présentation préparés par l'ONF-RTM pour partager ces principes ont été joints en annexe au rapport de retour d'expérience (ONF-RTM et al., 2022a, 2022b).

3 PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS APPORTES PAR LE RETOUR D'EXPERIENCE TECHNIQUE

Les analyses réalisées dans le cadre du retour d'expérience technique dans les vallées de la Roya et de la Vésubie ont permis d'illustrer le caractère absolument exceptionnel de la crue Alex du 2 octobre 2020.

3.1 Des évolutions morphologiques majeures

Les données topographiques (LiDAR IGN post-Alex, LiDAR 2018 levé sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur couvrant notamment le bassin versant de la Vésubie, cf. Figure 3a), ainsi que la BD Topo 2019 de l'IGN, ont permis d'extraire les profils en long de la Vésubie (Figure 4a-c) et de la Roya.

L'analyse des profils en long *ante* et *post* crue Alex a mis en évidence un engravement généralisé des lits des deux cours d'eau et de leurs principaux affluents. On observe ainsi un exhaussement de la Roya de 3 m en moyenne dans les traversées urbaines de Tende et Breil-sur-Roya. Les niveaux d'exhaussement sont également particulièrement marqués sur le cône de déjection du torrent de la Morte en amont de Tende avec des valeurs pouvant localement dépasser 9 m, ainsi que sur le cône de déjection de la Bieugne à Saint-Dalmas-de-Tende avec un engravement du lit de l'ordre de 3 m en moyenne. Côté Vésubie, les évolutions altimétriques sont tout aussi spectaculaires avec un engravement atteignant par endroit 10 à 12 m sur le Boréon et la Madone de Fenestre.

La remontée du niveau du fond des lits de la Roya et de la Vésubie s'est accompagnée d'un élargissement considérable de la bande active des cours d'eau conduisant à une véritable métamorphose fluviale (voir par exemple la Figure 2c-f et la Figure 4d). L'analyse diachronique réalisée à partir de photographies aériennes montre un taux d'élargissement moyen à l'échelle des vallées de 4 pour la Vésubie et de 2 pour la Roya (Melun et al., 2022). Les bandes actives post-Alex occupent globalement la totalité de l'emprise du fond de vallée, voire dépassent cette limite sur certains secteurs où les versants ont été attaqués en profondeur et où l'emprise du fond de vallée a été significativement élargie.

Cette reconquête des bandes actives sur une grande partie du fond de vallée traduit des phénomènes de divagation et d'érosion d'une magnitude extraordinaire ayant permis de remobiliser des terrasses fluvio-glaciaires et des cônes de déjection, et de déstabiliser des pieds de versants. L'exploitation des levés LiDAR avant et après crue sur le bassin versant de la Vésubie a montré des modifications majeures des sections en travers (Figure 3) avec des taux d'érosion sur des tronçons de 50 m de long s'élevant en moyenne de -100 à -165 m³/ml sur la Vésubie, le Boréon et la Madone de Fenestre, et des valeurs extrêmes exceptionnelles dépassant -650 m³/ml sur les trois cours d'eau avec un maximum de -1 177 m³/ml atteint sur la Vésubie.

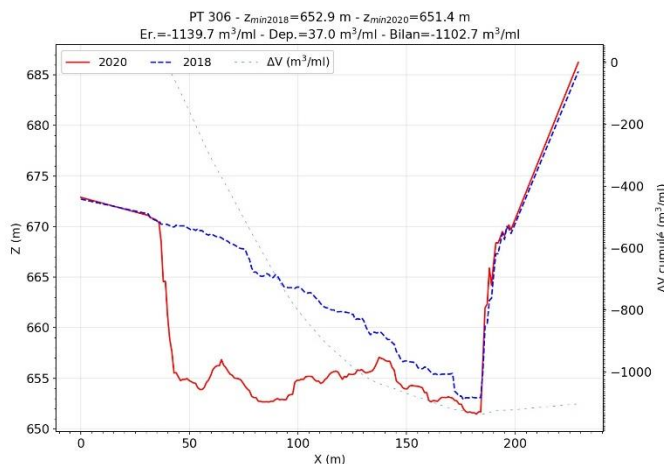


Figure 3 : (gauche) Évolutions des sections en travers avant (pointillés bleus) et après (trait continu rouge) crue au droit du cône de déjection de l'Esparillart ; (droite) Photographie post-crue correspondante (Source : F. Adamo CEREMA)

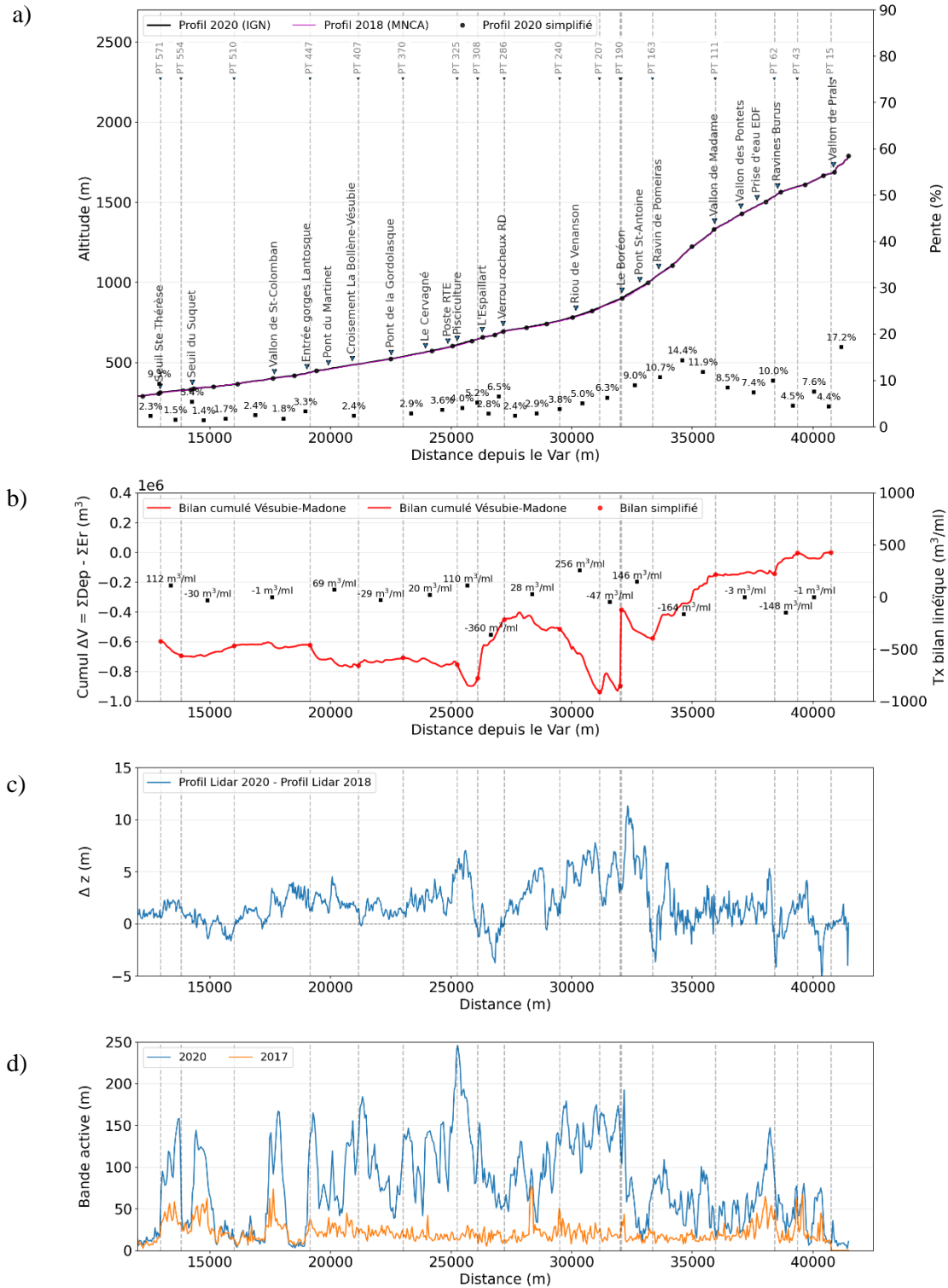


Figure 4 : Exemples d'analyses menées sur la Vésubie : (a) Profils en long ante et post crue avec pente longitudinale (Source : LiDAR 2018, MNCA ; LiDAR 05/10/2020, IGN) ; (b) Bilan sédimentaire par topographie différentielle cumulé le long du profil en long résultant de la différence des MNT ante et post crue ; (c) Evolution altimétrique du fond du lit résultant de la différence d'altitude entre les profils en long ante et post crue ; (d) Comparaison de la largeur des bandes actives ante (en orange) et post (en bleu) crue le long du profil en long

3.2 Un transport solide exceptionnel

La comparaison des deux MNT issus des levés LiDAR 2018 et 2020 disponibles sur la Vésubie a permis d'évaluer les volumes de matériaux transportés. L'analyse a été restreinte au fond de vallée actif (bande active + marges actives, apports en provenance des sous-bassins affluents exclus), et un réalignement des nuages de points LiDAR a été réalisé au préalable par Morph-eau Conseils, afin de réduire l'erreur systématique du différentiel LiDAR.

Les résultats montrent des volumes de matériaux mobilisés exceptionnels : 4,4 millions m³ de matériaux érodés et 3,9 millions m³ de matériaux déposés dans le fond de vallée de la Vésubie. Le bilan sédimentaire réalisé dans l'emprise du fond de vallée actif a également mis en évidence un bilan net négatif sur la Madone de Fenestre et le Boréon avec des flux sortant vers la Vésubie respectivement de l'ordre de 395 000 m³ et 521 000 m³. Bien que les volumes estimés soient déjà considérables, il s'agit d'estimations basses puisque reposant sur la non prise en compte des apports des affluents. Des travaux complémentaires sont en cours dans le cadre du projet Européen RITA pour évaluer ces contributions des affluents qui dépassent vraisemblablement 1,5 millions m³ à l'échelle de l'ensemble du bassin versant.

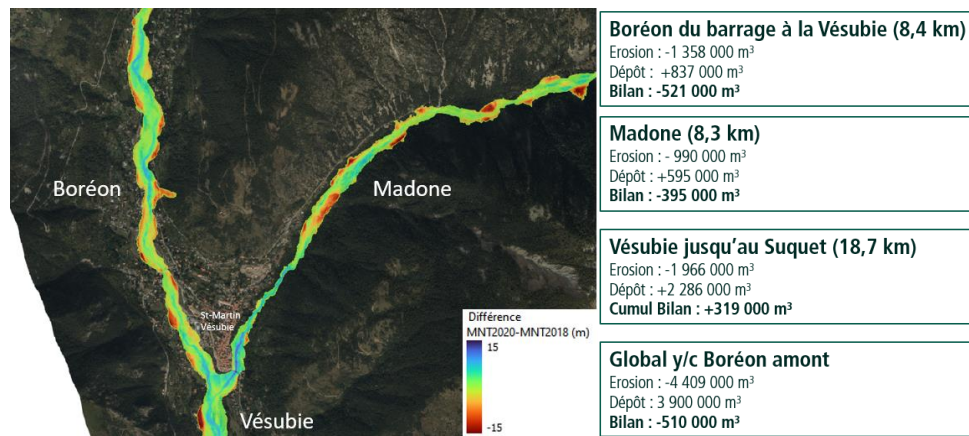


Figure 5 : Bilan sédimentaire réalisé dans l'emprise du fond de vallée actif sur le bassin versant de la Vésubie

3.3 Une forte contribution des flottants et embâcles

La crue Alex a sollicité et mobilisé de grandes quantités de bois flottants issus des ripisylves des cours d'eau actifs, en témoignent les nombreux ponts obstrués par des embâcles et les plages du littoral recouvertes de bois flottant au lendemain de la crue. Une analyse spécifique sur les bois flottants et embâcles a été menée afin de quantifier la quantité de bois flottant ayant été arrachée, transférée puis déposée au cours de la crue à l'échelle des bassins versants de la Vésubie et la Roya.

Une méthodologie spécifique a été développée pour quantifier les volumes arrachés (surfaces de boisement érodées x densités de peuplement moyen) et les volumes déposés (longueur de près de 40 000 troncs déposés digitalisés manuellement x hypothèses de diamètre de troncs). Cette approche aboutit à des estimations significatives du volume de bois flottants exporté à l'échelle des bassins versants :

- côté Vésubie : 24 000 à 45 000 m³ exporté vers le Var puis la Mer Méditerranée (estimation intermédiaire) ;
- côté Roya : 14 000 m³ (gamme d'incertitude : 7,000 - 29,500 m³) exporté vers l'Italie (ré-évaluation par Piton et al., 2023).

Ces analyses détaillées et exhaustives, uniques en leur genre à une échelle de bassins versants de près de 400 km², aboutissent à des exports moyens de 36 à 114 m³/km² de bassin versant. Pour la même surface, le guide de l'OFEV (2019, Eq. 1.3, p. 28) évalue une production intermédiaire à 2 m³/km² et une production rare à extrême à 20 - 35 m³/km². Ces valeurs sont donc, elles aussi, illustratives du caractère tout à fait exceptionnel de l'évènement.

3.4 Des dommages matériels considérables avec des modes d'endommagement spécifiques au contexte torrentiel

Le bilan matériel à la suite de la crue Alex est lourd, avec de nombreux dégâts aux infrastructures et aux bâtis. Le retour d'expérience technique a été l'occasion d'analyser les liens entre la nature des dommages, leur importance et le niveau d'intensité des phénomènes torrentiels. Dans le cadre de la vaste campagne de terrain menée en octobre et novembre 2020 en collaboration avec les différents partenaires du territoire, des relevés sur les désordres aux bâtis, aux infrastructures et aux ponts ont été réalisés et ont permis de construire une base de données indispensable pour mener à bien l'analyse.

À l'échelle des deux vallées, on compte plus de 400 bâtiments impactés, dont 171 totalement détruits, 52 bâtis menaçant de ruine et 203 bâtis avec des dommages divers. On retrouve 60% des bâtis détruits dans la vallée de la Vésubie. Il en ressort également différents modes d'endommagement des bâtis : par inondation/submersion (par de l'eau liquide, faiblement chargée en sédiments), par engrèvement, ou par affouillement des fondations (Figure 6). Le principal mode d'endommagement structural des bâtiments reste lié à l'affouillement des fondations, avec un taux d'endommagement augmentant nettement quand les fondations deviennent localement puis généralement affouillées.

Les niveaux de dommage sur les ponts sont également considérables avec 30 ponts détruits et 15 ponts menaçant ruine sur l'ensemble des deux vallées. Le taux d'endommagement apparait lié au type de pont et à l'ouverture relative des ponts (ratio largeur des voutes ou travées et longueur caractéristique des troncs transportés, pris dans l'analyse comme le quantile 95% des longueurs des troncs digitalisés : 5,2 m sur la Roya et 11,8 m sur la Vésubie). De manière générale, les ouvrages ayant subi des endommagements plus sévères sont les ponts à travée (unique ou multiple – Figure 7), en particulier si leur ouverture relative est faible.



Figure 6 : Photos de terrain post événement : (gauche) St Dalmas de Tende, endommagement par affouillement des fondations (Source : ONF-RTM) ; (droite) St Martin Vésubie, endommagement par engrèvement (Source : ONF-RTM)

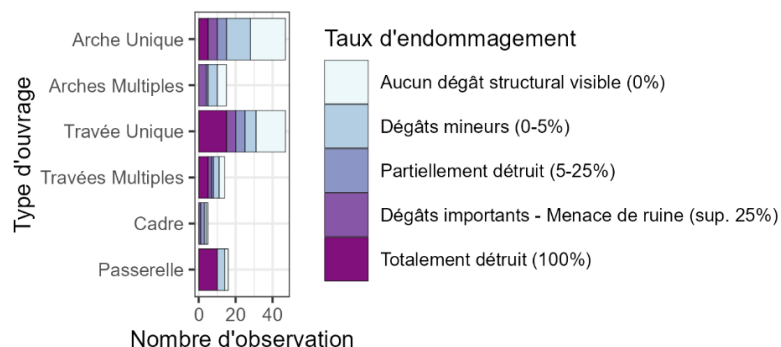


Figure 7 : (gauche) Tende, pont des 14 arches détruit (Source : F. Adamo, CEREMA) ; (droite) Nombre et fréquence des niveaux d'endommagement en fonction du type de pont

3.5 Une emprise de crue extrême qui dépasse toutes les cartographies d'inondation préexistantes

La comparaison de l'emprise de la crue du 2 octobre 2020 avec les documents existants d'affichage du risque et d'information sur les emprises potentielles des zones inondables révèle que la crue a été suffisamment exceptionnelle pour dépasser ces emprises identifiées non seulement dans les Plans de Prévention des Risques inondation (PPRI) mais également dans l'Atlas des Zones Inondables (AZI) et selon l'Enveloppe Approchée d'Inondations Potentielles (EAIP) qui est considérée comme une extension extrême.

Dans les vallées de la Vésubie et de la Roya, sur les communes munies d'un PPR inondation (approuvé ou non), respectivement 31 et 28% de la superficie impactée par les crues n'est pas située dans une zone bleue ou rouge du PPR (zones à aléas faibles à fort). Il convient toutefois de noter que dans la vallée de la Roya, seule une commune (Saorge) est couverte par un PPR inondation. Dans la vallée de la Vésubie, le nombre de bâtiments impactés et localisés dans une zone couverte par un PPR inondation est de 195. L'analyse révèle également que 47% se situent en zone blanche (zone non réglementée), soit quasiment autant que de bâtiments localisés en zone bleue ou rouge (53%).

Pour les zones couvertes par l'AZI dans les vallées de la Roya et de la Vésubie, respectivement 13 et 26% des bâtiments impactés lors de la crue se situent hors zone inondable. Le constat est identique pour l'EAIP : respectivement 26 et 27% des bâtiments impactés sont situés hors zone inondable.

Les approches "hydrogéomorphologiques" utilisées pour élaborer de l'AZI et l'EAIP fournissent des cartes des zones exposées plus proches de la tempête Alex que les approches des PPRI ce qui est compréhensible, puisque la tempête Alex constitue un événement extrême pluri-centennal, jamais observé depuis plusieurs siècles, alors que les cartes des PPRI sont basées sur un aléa de référence déterminé à partir de l'événement passé le plus important connu et documenté (avant la tempête Alex) ou d'un événement d'occurrence centennale, si ce dernier est plus important (Gominet, 2021). Le fait que l'EAIP, qui devrait cartographier un événement supposé maximal, ait été dépassée nécessite sans doute de revoir leur mode d'élaboration pour mieux intégrer les évolutions morphologiques exceptionnelles qui peuvent se produire en bordure de cours d'eau torrentiels lors d'événements extrêmes.

4 CONCLUSION

L'article illustre en premier lieu l'intérêt d'un retour d'expérience organisé en deux volets complémentaires : hydrologique et torrentiel. En effet, dans un contexte où les estimations de débit de pointe sont assorties d'incertitudes très fortes et où l'hydrologie ne permet pas à elle seule de documenter la magnitude de l'évènement, le volet torrentiel a révélé le caractère exceptionnel de la crue. Les analyses ont porté sur les bouleversements morphologiques, le transport de sédiments et de bois flottants, les impacts sur les bâtiments et les ouvrages traversants, ainsi que sur la comparaison avec les documents existants d'affichage du risque et d'information sur les emprises potentielles des zones inondables. Toutes permettent de conclure que les crues survenues le 2 octobre 2020 dans les vallées de la Vésubie et de la Roya sont sans précédent depuis plusieurs siècles.

D'un point de vue méthodologique, il convient de souligner l'apport des nouvelles technologies (levés LiDAR, photographies aériennes, application mobile de collecte de données) pour l'optimisation de l'organisation des missions terrain ainsi que pour l'étude du transport sédimentaire et de la morphodynamique. Une autre avancée notable a été l'organisation des relevés de terrain d'indices morphologiques de crue et de désordres sur les enjeux selon des grilles robustes inspirées d'études existantes, ce qui devrait permettre la valorisation des données produites dans des études postérieures.

Enfin, le retour d'expérience s'est avéré être un outil essentiel pour accompagner l'Etat et les collectivités lors de la phase de reconstruction, dans le but de maîtriser l'urbanisation et de réduire la vulnérabilité face à de futurs épisodes météorologiques marqués. Ce travail a tout d'abord permis de

produire des atlas cartographiques détaillés pour garder une trace des zones principales touchées dans les deux bassins. En outre, il a également défini des principes fondamentaux visant à réduire la vulnérabilité des réaménagements et des enjeux, afin de mieux préparer les zones à risque pour de possibles événements futurs. Il constitue enfin une base de données qui alimentera des recherches scientifiques portant sur des multiples champs (hydrologie, géomorphologie, hydraulique, risques).

5 RÉFÉRENCES

- Carrega, P., Michelot, N., 2021. Une catastrophe hors norme d’origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes. *Physio-Géo* 1–70. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>
- CEREMA, 2021. RETEX technique ALEX - Inondations des 2 et 3 octobre 2020 - Consensus hydrologique (No. 20- ME- 0354 (V1)). DDTM06, Nice (France).
- Chmiel, M., et. al., 2022. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22, 1541–1558. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>
- Givry, M., Peteuil, C., 2011. Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel. MEDDTL (Ministère de l’Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement).
- Gominet S. 2021. L’information préventive à l’épreuve des événements extrêmes. *Risques Infos* 33 : 2–22. [en ligne] Accessible à : http://www.irma-grenoble.com/PDF/risques_infos/N43/43article06.pdf (consulté le 2/10/2023)
- Kean, J.W., Staley, D.M., Lancaster, J.T., Rengers, F.K., Swanson, B.J., Coe, J.A., Hernandez, J.L., Sigman, A.J., Allstadt, K.E., Lindsay, D.N., 2019. Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California, USA: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment. *Geosphere* 15, 1140–1163. <https://doi.org/10.1130/GES02048.1>
- Melun, G., Liébault, F., Piton, G., Chapuis, M., Passy, P., Martins, C., Kuss, D., 2022. Crues exceptionnelles de la Vésubie et de la Roya (octobre 2020): caractérisation hydrogéomorphologique et perspectives de gestion - Major floods of the Vésubie and Roya Rivers (Alps, France) in October 2020: hydrogeomorphological characterisation and management perspectives, in: *Proc. of the 4th International Conference I.S.Rivers*. Lyon, France, p. 22.
- Météo France, 2020. Tempête Alex : des intempéries exceptionnelles [en ligne] Accessible à : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/climat/tempete-alex-des-intempéries-exceptionnelles> (consulté le 2/10/2023)
- OFEV, 2019. Bois flottant dans les cours d’eau (No. Connaissance de l’environnement num 1910). Office fédéral de l’environnement, Berne.
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2022a. Retour d’expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie - Volet torrentiel (No. V1). Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), Nice (France).
- ONF-RTM, ONF-DRN, INRAE-ETNA, 2022b. Retour d’expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya - Volet torrentiel (No. V1). Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), Nice (France).
- Piton, G., Cohen, M., Flipo, M., Nowak, M., Chapuis, M., Melun, G., Robert, Y., Andréis, N., Liébault, F., 2023. Large In-Stream Wood Yield during an extreme flood (Alex Storm, October 2020, Roya Valley, France): Estimating the Supply, Transport, and Deposition Using GIS. *Geomorphology* (sous presse).
- Rey, T., Chevrete, C., Candela, T., Robustelli, M., 2022. Leçons tirées de la crue torrentielle catastrophique du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie (Alpes-Maritimes, France). *Physio-Géo* 193–223. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.14922>