



HAL
open science

Tempête Alex – retour d’expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes

Céline Martins, Guillaume Piton, Damien Kuss, Cécile Guitet, Simon
Carladous, Yannick Robert, Nathalie Andréis, Frédéric Liébault, Margot
Chapuis, Paul Passy, et al.

► **To cite this version:**

Céline Martins, Guillaume Piton, Damien Kuss, Cécile Guitet, Simon Carladous, et al.. Tempête Alex – retour d’expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes. LHB Hydroscience Journal, inPress, 10.1080/27678490.2024.2381471 . hal-04690787

HAL Id: hal-04690787

<https://hal.science/hal-04690787v1>

Submitted on 6 Sep 2024

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.



Tempête Alex – retour d’expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes

Céline Martins, Guillaume Piton, Damien Kuss, Cécile Guitet, Simon Carladou, Yannick Robert, Nathalie Andréis, Frédéric Liébault, Margot Chapuis, Paul Passy, Gabriel Melun, Clément Misset & Yann Quefféléan

To cite this article: Céline Martins, Guillaume Piton, Damien Kuss, Cécile Guitet, Simon Carladou, Yannick Robert, Nathalie Andréis, Frédéric Liébault, Margot Chapuis, Paul Passy, Gabriel Melun, Clément Misset & Yann Quefféléan (04 Sep 2024): Tempête Alex – retour d’expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes, LHB, DOI: [10.1080/27678490.2024.2381471](https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2381471)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2381471>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 04 Sep 2024.



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



View related articles [↗](#)

Tempête Alex – retour d'expérience des crues torrentielles du 2 octobre 2020 dans les Alpes-Maritimes

Céline Martins^a, Guillaume Piton^b, Damien Kuss^c, Cécile Guitet^a, Simon Carladou^c, Yannick Robert^d, Nathalie Andréis^a, Frédéric Liébault^b, Margot Chapuis^e, Paul Passy^f, Gabriel Melun^g, Clément Misset^c et Yann Quefféléan^c

^aONF-RTM Alpes-Maritimes, Nice, France ; ^bUniversity Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France ; ^cDépartement Risques Naturels, ONF-RTM, Grenoble, France ; ^dONF-RTM Isère, Grenoble, France ; ^eCNRS, ESPACE, Université Côte d'Azur, Nice, France ; ^fPRODIG, Université Paris-Cité, UMR, Paris, France ; ^gOFB, Direction de la recherche et de l'appui scientifique, Vincennes, France

RÉSUMÉ

La tempête Alex a touché la France le 1–2 octobre 2020 et provoqué le 23 octobre 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 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 événement. 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'une topographie haute résolution, 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 événement.

MOTS-CLÉS

Tempête ALEX ; retour d'expérience ; crue torrentielle ; évolutions morphologiques ; transport sédimentaire

KEYWORDS

Storm Alex; technical feedback; debris flood; geomorphology; sediment transport

Strom Alex – Lessons learned from the debris-floods that occurred on 2 October 2020 in the French South-East Alps

ABSTRACT

Storm Alex, which hit France between 1 and 2 October 2020, caused an exceptional Mediterranean episode in the southeast of France on October 2 and 3, with unprecedented magnitude debris floods in the Roya and Vésubie valleys, major morphological changes and heavy human and material damages. A technical feedback was carried out at the request of the Alpes-Maritimes State authority, to understand and characterise the phenomena associated with this unusual event. This technical feedback was also used 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 phone application accessible to all.

1. Introduction

Le passage de la tempête Alex sur le littoral atlantique a provoqué les 2 et 3 octobre 2020 un épisode méditerranéen exceptionnel sur les Alpes-Maritimes qui s'est traduit par de très forts cumuls pluviométriques (>500 mm en 24 h sur plusieurs stations – Carrega & Michelot, 2021), avec des records absolus observés en Tinée, en Vésubie et en Roya (Météo France, 2020). Les cumuls pluviométriques enregistrés sur 12 h, 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, ONF-DRN & INRAE-ETNA, 2022b, 2022a).

Cet épisode a généré, sur ces torrents et rivières torrentielles, des crues d'une intensité majeure (Cerema, 2021 ; Payrastré et al., 2022), 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

CONTACT Misset Clément  clement.misset@onf.fr

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.



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 HauteRoya (source : V. Kouliniski, ETRM) ; (droite) Erosion de berge menaçant un bâti à St-Martin-Vésubie (source : F. Adamo, Cerema).

dizaines d’hectares de ripisylve ont été arrachés (Piton et al., 2024). Les lits des cours d’eau ont été métamorphosés (Liébault et al., 2024), 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” portant sur les effets du transport solide et 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.

La mobilisation de ce second groupe, objet du présent article, 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.

A la suite de la tempête Alex, d’autres spécialistes ont porté des réflexions complémentaires. En premier lieu, une analyse météorologique et préliminaire des conséquences a été rapidement produite (Carrega & Michelot, 2021). Une campagne de terrain a permis de reconstituer les valeurs des pics de crues de certains affluents et sections relativement stables des cours d’eau principaux (Payrastra et al., 2022). D’autres équipes ont mené des analyses des liens entre signaux

sismiques et intensité du transport solide (Chmiel et al., 2022) ; des analyses des dommages aux bâtis et aux infrastructures (Fouache et al., 2023 ; Rey et al., 2022), ou encore des dynamiques de reconstruction et de résilience des vallées (Germain & Pelletier, 2023 ; Le Visage, 2023).

Le présent article vise 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 sur le volet torrentiel, 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 et moyen termes).

2. Objectifs et organisation du retour d’expérience

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 suite aux perturbations associés à l’événement. 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. Vaste chantier qui a justifié dès la fin de l’année 2020, la création d’une mission interministérielle pour la reconstruction des vallées, pilotée par le Préfet délégué à la reconstruction Xavier Pelletier. Cette mission avait pour objet l’animation et la coordination des actions des services de l’Etat, en lien avec les partenaires et acteurs du territoire, pour le relogement, le soutien aux entreprises, l’indemnisation des communes, la prévention des risques, la reconstruction et la revitalisation des territoires.

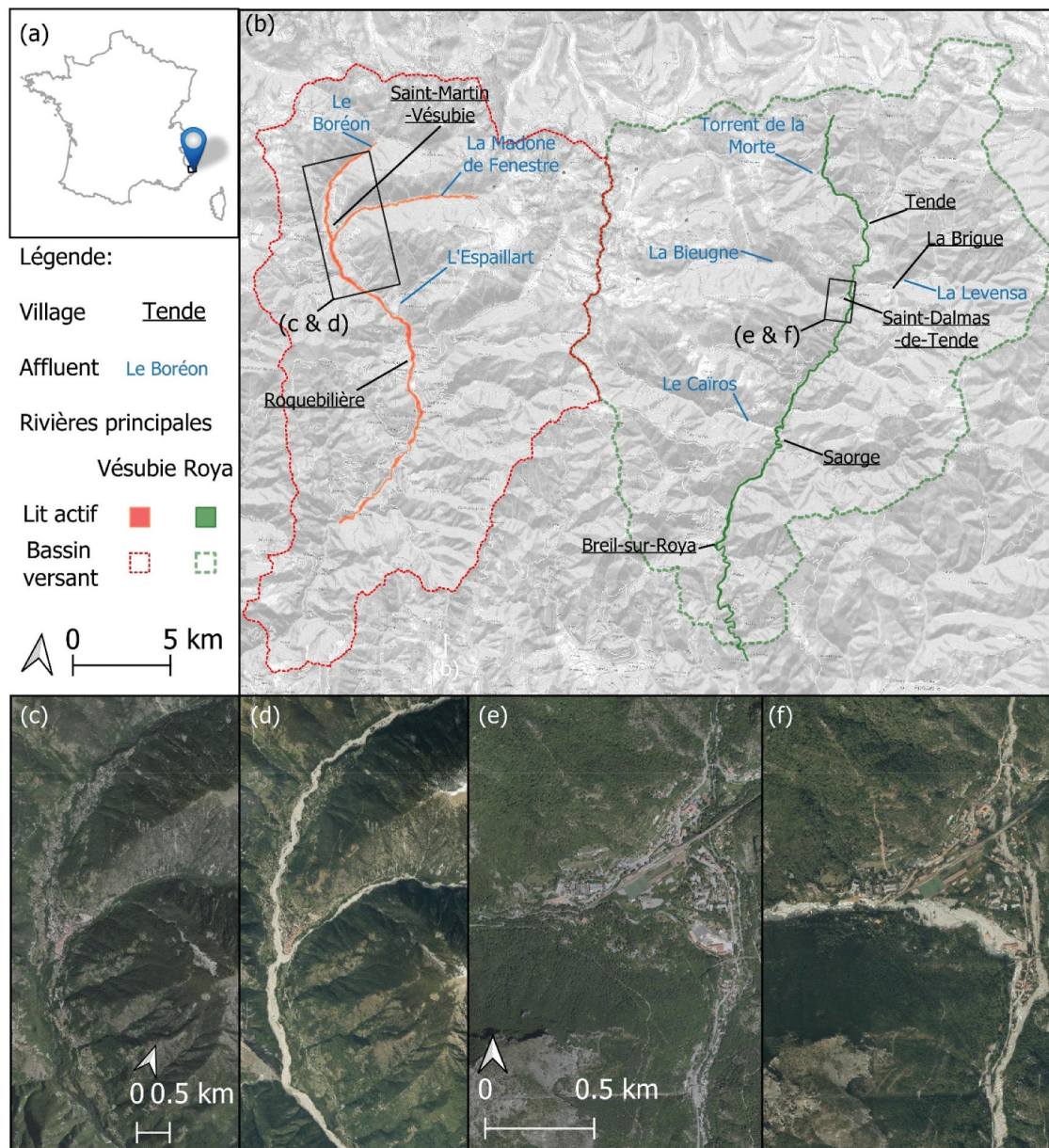


Figure 2. (a) Localisation de la zone d'étude, (b) Bassins versants principalement investigués, localités et cours d'eau cités dans l'article, (c) Vue aérienne de Martin-Vésubie avant et (d) après la crue, (e) vue aérienne de Tende avant et (f) après la crue (source : IGN BD Ortho et IGN levé d'urgence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

2.1. 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 (résolution : 10 cm) et d'un LiDAR (levé topographique haute densité, ~ 10 points/m²) 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.

Des formulaires ont été par ailleurs créés sur l'application mobile gratuite de collecte de données Epicollect5 (<https://five.epicollect.net>). Ces formulaires ont permis de mener à bien des levés géoréférencés associés à des photos. Ils ont permis d'optimiser les relevés en standardisant les variables relevées et les valeurs des champs quand cela était possible (voir détails plus loin). Les levés ont ainsi principalement porté sur les paramètres qui définissaient l'intensité des phénomènes torrentiels (hauteurs d'érosion ou d'écoulement, épaisseurs des dépôts, taille des flottants et des matériaux transportés) selon la grille définie par Givry and 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).

2.2. Maîtrise de l'urbanisation et réduction de la vulnérabilité

Les constats de terrain 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 (Rey et al., 2022). 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 Vésubie (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. Plus de 420 biens détruits ou menacés (parce que par exemple en bordure des talus érodés, ou situés dans l'axe de nouveaux chenaux d'écoulement) ont ainsi été acquis grâce au « Fonds Barnier » (FPRNM : fonds de prévention des risques naturels majeurs) qui est intervenu à hauteur de 120 millions d'euros, soit un montant jamais atteints pour une catastrophe en métropole (Masson & Pradal, 2023).

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 les zones aux plus fortes densités d'enjeux.

Ces principes consistent notamment à conserver des sections d'écoulement suffisantes pour permettre le passage des débits de pointe mais aussi des embâcles et des flux sédimentaires, et à maintenir partout où cela était possible des zones de régulation du transport solide, c'est-à-dire des zones larges où les cours d'eau peuvent divaguer et où les flux solides sont régulés via des processus d'érosions et de dépôt. Ils consistent également à augmenter la portée des ouvrages de franchissement, dont l'incidence sur le déroulé de la crue et les niveaux de dommages 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, ONF-DRN & INRAE-ETNA, 2022b, 2022a).

3. Principaux enseignements apportés par le retour d'expérience 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 3(a)), ainsi que la BD Topo 2019 de l'IGN, ont permis d'extraire les profils en long de la Vésubie (Figure 4(a-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 (Figure 1(a)), ainsi que sur le cône de déjection de la Bieugne à Saint-Dalmas-de-Tende (Figure 2(f)) avec un engravement

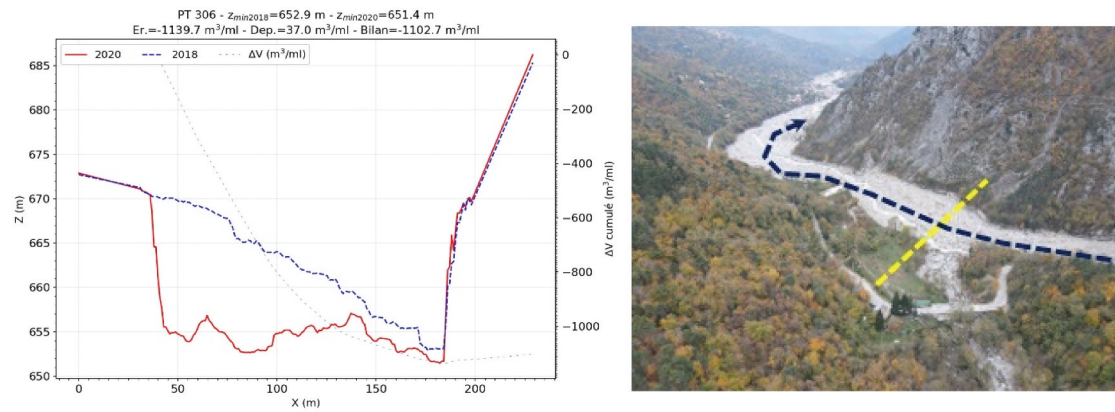


Figure 3. (gauche) Évolutions d'une section en travers avant (pointillés bleus) et après (trait continu rouge) crue au droit du cône de déjection de l'Espaillart affluent de la Vésubie ; (droite) Photographie post-crue correspondante (source : F. Adamo, Cerema).

du lit de l'ordre de 3 m en moyenne. Côté Vésubie, les évolutions altimétriques sont tout aussi spectaculaires avec un engrèvement moyen de 2.4 m, atteignant par endroit 10 à 12 m sur le Boréon et la Madone de Fenestre (Figure 2(d), Liébault et al., 2024).

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 (Figure 2(c-f) et Figure 4(d) par exemple). L'analyse diachronique réalisée à partir de photographies aériennes montre un taux d'élargissement moyen du chenal actif, à l'échelle des vallées de 4 pour la Vésubie et de 2 pour la Roya (Liébault et al., 2024). 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 (Figure 1(b) par exemple).

Cette reconquête des bandes actives sur une grande partie du fond de vallée traduit des phénomènes de divagation et d'érosion d'une intensité 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 par exemple). Les taux d'érosion sur des tronçons de 50 m de long s'élevant en moyenne de 100 à 165 m³/m de chenal sur la Vésubie, le Boréon et la Madone de Fenestre, et des valeurs extrêmes exceptionnelles dépassant 650 m³/m de chenal sur les trois cours d'eau avec un maximum de 1 177 m³/m de chenal atteint sur la Vésubie.

3.2. Un transport solide exceptionnel

Une évaluation des volumes de sédiment transporté dans le bassin versant de la Vésubie a été réalisée grâce à la comparaison des MNT issus des levés LiDAR 2018 et 2020 complété par le levé national de l'IGN de 2021

pour quelques têtes de bassin non couvertes en 2020. Une phase préliminaire de réalignement des nuages de points a été mise en œuvre pour minimiser les erreurs des bilans sédimentaires (Lallias-Tacon et al., 2014 ; Tacon et al., 2023b). Ces derniers montrent que les érosions sont systématiquement supérieures aux dépôts dans les affluents, apportant ainsi un volume estimé à 1.6 Mm³ au fond de vallée (Tableau 1). Un volume de l'ordre 0.9 Mm³ a par ailleurs été déposé dans les affluents, parfois à proximité directe de la Vésubie (voir par exemple la Figure 5), et sera remobilisé à court ou moyen terme selon l'hydrologie et la dynamique sédimentaire. Au niveau des fonds de vallées les érosions dominent aussi généralement les dépôts, à l'exception de la Vésubie en aval de la confluence entre le Boréon et la Madone de Fenestre où les dépôts sont supérieurs aux érosions d'environ 300000 m³. On estime tout de même que les fonds de vallées des branches principales (Boréon, Madone de Fenestre et Vésubie) ont subi des érosions cumulées de l'ordre de 4.4 Mm³ et des dépôts cumulés de l'ordre de 3.9 Mm³ (Tableau 1). Les élévations quasi-généralisées des niveaux moyens des fonds de vallées (Figure 4) sont ainsi dues à la fois à des apports des affluents, mais aussi et surtout à des volumes prélevés sur de très intenses érosions de berges (Figure 1), qui ont été redistribués vers le fond du lit (Figure 5). Un volume cumulé de l'ordre de 4.8 Mm³ de dépôt constituant un stock de matériaux mobilisables par les processus fluviaux pour le futur. L'export net vers le Var et la mer de l'ensemble des volumes produits au niveau des affluents et des fonds de vallées atteint le chiffre impressionnant de 2.2 Mm³. Une partie notable de ce volume est constituée de sédiments fins, très mobiles car transportés en suspension, la partie plus grossière, moins mobile, est transportée par charriage. Il conviendra de quantifier dans de futures études les contributions respectives de ces différents processus au bilan sédimentaire du Var et de son delta.

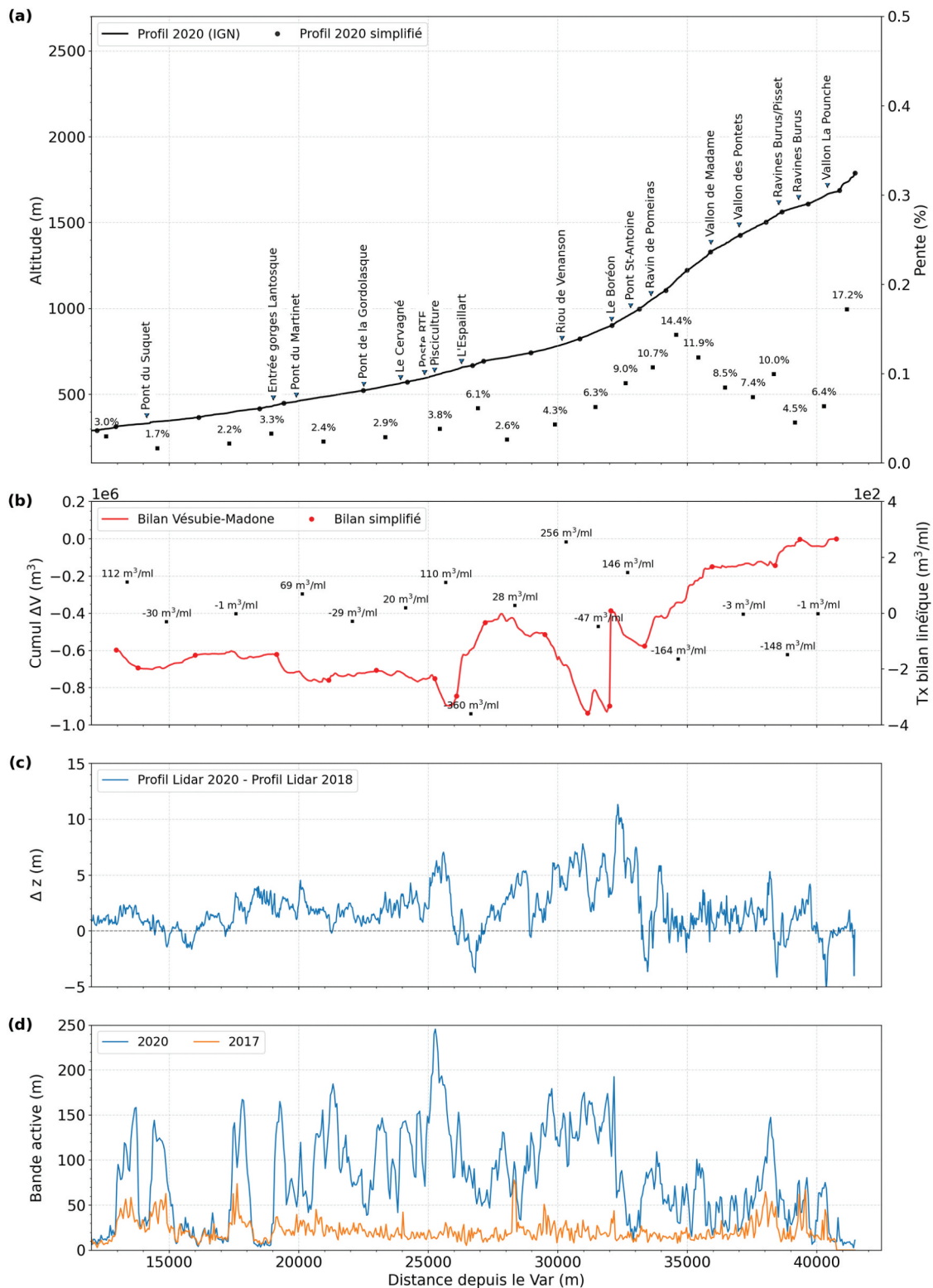


Figure 4. Exemples d'analyses longitudinales menées sur la Vésubie : (a) Profils en long ante et post crue avec pente longitudinale (source : LiDAR 2018, MNT LiDAR1m@SIGMNCA ; LiDAR 05/10/2020, IGN) ; (b) Bilan sédimentaire cumulé de fond de vallée résultant de la différence des MNT ante et post crue (ΔV , différentiel de volume ; Dep, dépôt ; Er, érosion) ; (c) Evolution altimétrique du niveau moyen 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.

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 sur les bois flottants et embâcles a été menée afin de quantifier la quantité de bois flottant ayant été

Tableau 1. Volumes érodés, déposés et bilan net sur les branches principales de la Vésubie (Source données : Tacon et al., 2023a).

Cours d'eau	Processus dans les affluents			Processus de fond de vallée			Bilan total (Mm ³)
	Érosion (Mm ³)	Dépôt (Mm ³)	Bilan (Mm ³)	Érosion (Mm ³)	Dépôt (Mm ³)	Bilan (Mm ³)	
Madone de Fenestre	-0.58	0.15	-0.46	-0.99	0.59	-0.40	-0.86
Boréon amont barrage	-0.24	0.11	-0.14	-0.09	0.18	0.09	-0.06
Boréon aval barrage	-0.41	0.90	-0.34	-1.36	0.84	-0.52	-0.86
Vésubie aval	-1.19	0.53	-0.70	-1.97	2.29	0.32	-0.38
Global	-2.43	0.88	-1.65	-4.41	3.90	-0.51	-2.16

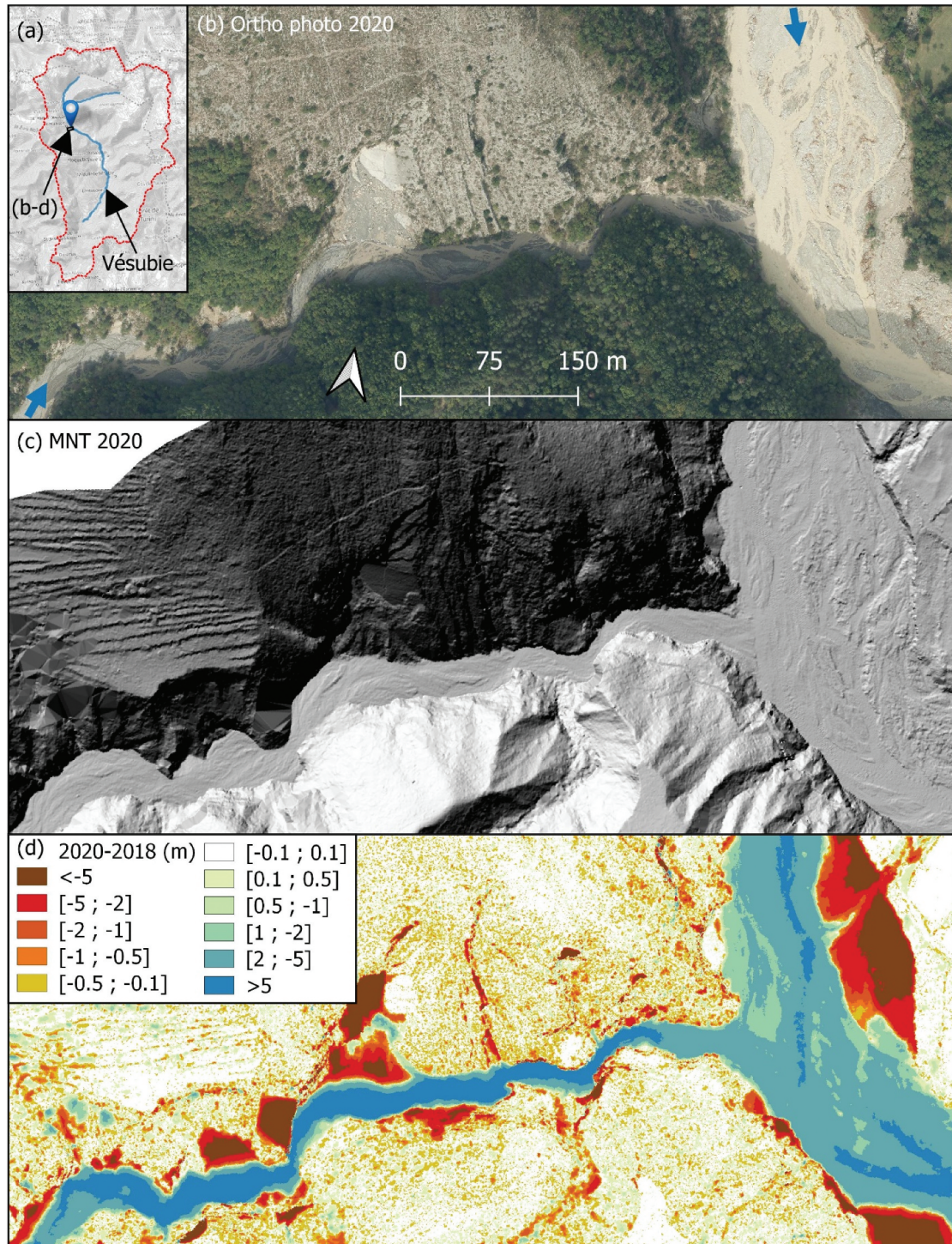


Figure 5. Confluence entre la Vésubie et le Venanson, exemple de remplissage des fonds de vallée et des érosions massives des berges et versants, a) localisation, b) ortho-photo post événement (levé d'urgence IGN 2020), c) MNT post événement (levé d'urgence IGN 2020), d) différentiel altimétrique entre MNT pré-événement et MNT post-événement réaligné.

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 \times densités de peuplement moyen exprimées en m^3/ha) et les volumes déposés (longueur de près de 40000 troncs déposés digitalisés manuellement \times section des troncs basée sur des hypothèses sur les diamètres). Cette approche aboutit à des estimations significatives du volume de bois flottants exporté à l'échelle des bassins versants :

- côté Vésubie : 24000 à 45000 m^3 exporté vers le Var puis la Mer Méditerranée (intervalle basé sur deux estimations différentes des densités de peuplement initiales, des gammes d'estimations encore plus larges ont été proposées en cumulant des hypothèses hautes et basses sur l'ensemble des paramètres) ;
- côté Roya : 14000 m^3 (gamme d'incertitude : 7000–29500 m^3) exporté vers l'Italie (ré-évaluation par Piton et al., 2024).

Plusieurs sources de données et étapes d'analyse contribuent à ces incertitudes (Piton et al., 2024). Il apparaît qu'elles pourraient être significativement réduites grâce aux éléments suivants (triés par ordre d'importance) : (i) en améliorant les connaissances sur les densités de peuplement forestier des ripisylves, (ii) en intégrant les largeurs des chenaux initiaux même dans les zones où il sont occultés par les houppiers des arbres sur les photos aériennes, et (iii) en intégrant les surfaces contributrices associés aux processus plus diffus et étendus tels que les petites ravines et les affluents seulement partiellement actifs.

Ces analyses détaillées et exhaustives, uniques en leur genre à une échelle de bassins versants de près de 400 km^2 , aboutissent à des exports moyens de 36–114 m^3/km^2 de bassin versant. Pour la même surface, le guide de l'OFEV (2019) évalue une production intermédiaire à 2 m^3/km^2 et une production rare à extrême à 20–35 m^3/km^2 . Ces valeurs de production moyenne de bois flottant 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 tempête Alex est lourd, avec de nombreux dommages aux bâtis et aux infrastructures. À l'échelle des deux vallées, nous avons inventorié plus de 400 bâtiments impactés (65% de résidences individuelles et collectives, 13% d'entreprises, mais aussi des bâtiments de camping, des bâtiments publics, etc.). Plus de 60% des bâtiments impactés sont situés dans la vallée de la Vésubie qui concentre la majorité des dommages aux bâtis.

Les inventaires réalisés dans les semaines qui ont suivi l'évènement ont l'intérêt d'avoir été menés avant tout travaux de réparation, à la fois sur les enjeux mais aussi sur leur voisinage direct, permettant d'identifier l'intensité des processus torrentiels (Figure 6). Rey et al. (2022) proposent un retour d'expérience complémentaire, mené cinq mois après l'évènement. Ils couvrent les réseaux électriques, d'eau potable et d'eau usée, ainsi qu'un inventaire des bâtis et routes endommagés ; mais n'ont pas cherché à croiser ces informations avec l'intensité des processus torrentiels. A contrario, notre analyse permet de donner un panorama préliminaire de l'ampleur des dommages, mais aussi des liens avec les processus.



Figure 6. Exemple d'état de bâtis levé pendant le terrain post évènement : (gauche) St Dalmas de Tende, dommage important par affouillement d'intensité forte, y compris localement au niveau des fondations (source : ONF-RTM) ; (droite) St Martin Vésubie, dommages importants par engrèvement d'intensité forte sans affouillement des fondations (source : ONF-RTM).

Tableau 2. Classes d'endommagement des bâtis utilisées dans l'inventaire, inspirées de Kean et al. (2019).

Classe	Taux de dommage indicatif	Types de dommages	Nombre (% du total)
Sans dommages	0%	Absence de dommages au bâti, phénomènes torrentiels limités aux espaces extérieurs	69 (16%)
Dommages mineurs	<5%	Défaillance d'éléments non porteurs, dont les fenêtres et portes	88 (21%)
Dommages partiels	5% – 25%	Dommages limités aux éléments des étages inférieurs, fissures dans les murs, pas de décalages permanents ou seulement des décalages mineurs	46 (11%)
Dommages importants	25% – 100%	Ruine localisée d'éléments structuraux, fissures importantes dans les murs, grands décalages permanents des étages inférieurs, érosion ou affouillement localisé, tassement limité des fondations	52 (12%)
Destruction complète	100%	Ruine complète ou significative de la partie structurale, déplacement du bâtiment hors de ses fondations	171 (40%)
		Total	426 (100%)

Tableau 3. Classes d'intensité des aléas utilisées dans l'inventaire et indicateurs associés, tirées de Givry and Peteuil (2011) et correspondance avec la nouvelle grille (MTECT, 2023).

Classe d'intensité Retex (Givry & Peteuil, 2011)	Faible	Modérée	Forte
Hauteur d'écoulement ou d'engravement, profondeur d'affouillement	<0,5 m	[0.5 m ; 1 m]	> 1 m.
Taille des plus gros sédiments transportés	<10 cm	[0.1 m ; 0.5 m]	>50 cm
Nouvelles classes d'intensité (MTECT, 2023)	Modérée	Forte	Très Forte

Les intensités des processus et aléas ont été catégorisées selon trois classes (faible, modérée, forte) définies par Givry and Peteuil (2011). Notons que le **Tableau 3** montre que ces classes sont décalées par rapport à la nouvelle définition introduite par le récent guide pour l'élaboration des Plans de Prévention contre les Risques Inondations des cours d'eau torrentiel, paru postérieurement aux levés (MTECT, 2023).

Les dommages ont été inventoriés selon cinq classes de taux d'endommagement (**Tableau 2**) tirées d'une analyse équivalente menée par Kean et al. (2019). Les bâtiments ayant des fondations profondes résistant mieux aux affouillements des terrains environnant que les bâtiments sur fondations superficielles (Givry & Peteuil, 2011), l'état d'affouillement des fondations a aussi été levé selon quatre classes : fondations intactes (éventuellement visibles) ; fondations affouillées localement, fondations avec affouillement général ; bâtiment détruit.

Ces données mériteraient une analyse plus profonde, notamment une confrontation des taux de dommage levés post-événement avec les expertises des assurances qui ont été menées par la suite et des réparations réellement effectuées. Nous ne donnons donc dans le présent article que quelques leçons clés tirées de l'analyse préliminaire. Le détail des formulaires, des analyses plus détaillées, ainsi que quelques éléments sur les dommages aux routes, aux ponts et

sur la létalité de l'évènement, peuvent être trouvés dans les rapports et les annexes de ONF-RTM, ONF-DRN & INRAE-ETNA (2022a, 2022b).

Les inventaires de terrain ont en réalité permis de lever 279 bâtiments, tandis que 149 bâtiment complètement détruit ont été ajoutés à l'inventaire grâce à des analyses SIG (base de donnée IGN BD Topo en particulier). Ces bâtis ayant complètement disparu, il n'a pas été possible de relever précisément le niveau d'intensité au droit de ces derniers ou encore le type de processus d'endommagement (affouillement ou engravement). Une intensité forte et un type de processus mixte (affouillement et engravement) a été assigné à ces bâtiments (**Tableau 4**). Au total, plus de la moitié des 426 bâtiments levés ou inventoriés par SIG ont subi des dommages importants ou sont totalement détruits (**Tableau 2**).

Les trois quarts des bâtiments relevés ont subi une intensité d'aléa forte démontrant le caractère intense et confiné des écoulements. La moitié de ces derniers sont les bâtis totalement ruinés qui ont été inventoriés par SIG. Ils ont probablement subi des intensités que l'on pourrait même considérer de "très forte aggravée" (hauteur d'écoulement ou d'aggradation ou profondeur d'affouillement >2 m) dans la nouvelle grille du MTECT (2023). On note aussi que seul 9% des bâtis ont été touchés par de simples processus d'inondation, illustrant la quasi absence de lit majeur inondable dans

Tableau 4. Nombre (et pourcentage du nombre total) de bâtiments selon les différents types de mode d'endommagement et niveau d'intensité de l'aléa définis au **Tableau 3**.

Intensité	Inondation	Affouillement	Engrèvement	Affouillement et engravement		Total
				Terrain	SIG	
Faible	6 (1%)	12 (3%)	19 (4%)	4 (1%)	–	41 (10%)
Moyenne	28 (7%)	12 (3%)	23 (5%)	2 (0%)	–	65 (15%)
Forte	4 (1%)	108 (25%)	46 (11%)	15 (4%)	149 (35%)	322 (75%)
Total	38 (9%)	132 (31%)	88 (21%)	21 (5%)	149 (35%)	428 (100%)

la zone touchée, à l'exception des enjeux situés à Breil-sur-Roya dans la zone de remous d'un barrage hydro-électrique. Les processus de transport solide ont donc touché 91% des bâtis affectés avec une prépondérance pour les intensités fortes et pour des processus d'endommagement par affouillement ou mixte (affouillement et engrèvement).

Les données sur les taux d'endommagement n'étant pas consolidées, nous ne proposons pas d'analyse détaillée croisant intensité et taux d'endommagement. Les leçons principales que nous tirons toutefois des analyses sont : (i) à intensité donnée, les taux d'endommagement sont les plus forts en cas d'affouillement (mixte ou non), restent forts en cas d'engrèvement et sont plus faibles en cas d'inondation ; (ii) Le taux d'endommagement augmente nettement quand les fondations deviennent localement puis généralement affouillées ; (iii) On relève une trentaine d'enjeux ayant subi des intensités fortes mais montrant néanmoins des taux d'endommagement nuls ou faibles. L'analyse détaillée de ces cas à priori surprenants montrent qu'il s'agit souvent soit (i) de bâtiments avec des fondations suffisamment profondes pour qu'elles n'aient pas été affouillées, ou (ii) qu'il s'agit d'un enjeu situé à proximité immédiate d'une zone d'intensité forte (en bord de talus d'érosion par exemple), mais non directement affecté par le processus (Figure 1(b) par exemple). Ces derniers bâtis peuvent être menacés par des réajustements plus tardifs tel que des effondrements de talus mais ils ne montraient pas ou peu de dommages directement après l'évènement.

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 (Gominet, 2021 ; Rey et al., 2022).

Dans les vallées de la Vésubie et de la Roya, sur les communes munies d'un PPRi (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 risques faibles à fort). Il convient toutefois de noter que dans la vallée de la Roya, seules les communes de Saorge et de la Brigue ont des PPRi, mais ces derniers ne couvrent pas le cours de la Roya, seulement ses affluents de la

Levensa et du Caïros. 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 ainsi des cartes des zones exposées plus proches de la tempête Alex que les approches des PPRi (voir les cartographies détaillées de Rey et al., 2022 comparant PPRi, AZI, dommages et cartographie du Porté à Connaissance post crue, ou encore les atlas cartographies fournis en annexe de ONF-RTM, ONF-DRN & INRAE-ETNA, 2022b, 2022a). Ceci est compréhensible, puisque la tempête Alex constitue un événement extrême pluri-centennal, non observé depuis plusieurs siècles, alors que les cartes des PPRi sont basées sur un aléa de référence déterminé à partir de l'évènement 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 ; MTECT, 2023). 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'évènements extrêmes.

4. Conclusions

Cet article illustre en premier lieu l'intérêt d'un retour d'expérience organisé en deux volets complémentaires : (i) hydrologique portant sur l'estimation des débits comme réalisé couramment (Payrastra et al., 2013, 2022) et (ii) torrentiel se focalisant sur les effets géomorphologiques et les implications sur les dommages et la cartographie des risques. 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, moins classique que le premier, 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 enjeux (bâtiments, routes et ponts), 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 technologies aéroportées (levés LiDAR, photographies aériennes) et des applications mobiles 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 attestant de l'intensité des aléas 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.

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).

Ce retour d'expérience a enfin permis de documenter de façon aussi précise que possible les effets de crues torrentielles extrêmes, de magnitude dépassant la période de retour centennale et donc le type d'évènement usuellement pris comme référence pour la cartographie des risques (PPRi) dans les bassins versant n'ayant pas subi de crue extrême de mémoire d'homme (MTECT, 2023). Il a démontré que lors de telles crues, c'est potentiellement l'ensemble des fonds de vallées qui peut être touché ainsi que des larges zones des cônes de déjection. La gestion de crise et les évacuations lors de tels évènements doivent ainsi intégrer cet état de fait, heureusement rare, mais de l'ordre du possible.

4.1. Remerciement

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Environnement, du projet Interreg-Alcofra RITA de l'Union Européenne (accord de subvention n.8504), et par l'Université Côte d'Azur à travers l'appel de financement "Crédits Scientifiques Incitatifs 2021 – volet Recherche". Les auteurs remercient les nombreux collègues ayant contribué à cette

étude, la Métropole Nice Côte d'Azur d'avoir fourni le LiDAR 2018 pour pouvoir mener l'analyse, les services de l'Etat pour leur confiance et les deux relecteurs de cet article pour leurs nombreuses questions et suggestions ayant permis d'améliorer notre travail de présentation.

Déclaration de divulgation

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

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*, 16, 1–70. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>
- Cerema. (2021). *RETEX technique ALEX - Inondations des 2 et 3 octobre 2020 – Consensus hydrologique* (N° 20-ME-0354 (V1) ; p. 59). DDTM06.
- Chmiel, M., Godano, M., Piantini, M., Brigode, P., Gimbert, F., Bakker, M., Courboux, F., Ampuero, J.-P., Rivet, D., Sladen, A., Ambrois, D., & Chapuis, M. (2022). Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1541–1558. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>
- Fouache, E., Marchiel, A., Rabaute, A., Desruelles, S., Gorini, C., Bianchi, N., Kerverdo, R., & Lafuerza, S. (2023). Conséquences de la crue extrême du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya (Alpes-Maritimes) sur les réseaux de transport et de communication : Leçons pour la reconstruction. *Flux*, N° 132(2), 98–114. <https://doi.org/10.3917/flux1.132.0098>
- Germain, T., & Pelletier, X. (2023). *Catastrophes climatiques et résilience territoriale – Les vallées des Alpes-Maritimes après la tempête Alex*. Éditions Fondation Jean-Jaurès. (10_2023 ; p. 74). <https://www.jean-jaures.org/publication/catastrophes-climatiques-et-resilience-territoriale-les-vallees-des-alpes-maritimes-apres-la-tempete-alex/>
- 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). <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/210183/construire-en-montagne-la-prise-en-compte-du-risque-torrentiel>
- Gominet, S. (2021). L'information préventive à l'épreuve des évènements extrêmes. *Risques Infos*, 33, 2–22. http://www.irma-grenoble.com/PDF/risques_infos/N43/43article06.pdf
- 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(4), 1140–1163. <https://doi.org/10.1130/GES02048.1>
- Lallias-Tacon, S., Liébault, F., & Piégay, H. (2014). Step by step error assessment in braided river sediment budget using airborne LiDAR data. *Geomorphology*, 214, 307–323. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.014>
- Le Visage, S. (2023). Au nom de l'urgence et de l'expertise technique, (dé)limiter le politique. Reconstruction des

- routes et berges dans la vallée de la Roya post-tempête Alex. *Annales de Géographie*, N° 754(6), 55–83. <https://doi.org/10.3917/ag.754.0055>
- Liébault, F., Melun, G., Piton, G., Chapuis, M., Passy, P., & Tacon, S. (2024). Channel change during catastrophic flood: Example of Storm Alex in the Vésubie and Roya valleys. *Geomorphology*, 446, 109008. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109008>
- Masson, A., & Pradal, P. (2023). *Mission « flash » sur le bilan des mesures de reconstruction et de réaménagement des vallées de la Roya, de la Tinée et de la Vésubie après la tempête Alex*. Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire, Assemblée Nationale, République Française.
- Météo France. (2020, octobre 3). *Tempête Alex : Des intempéries exceptionnelles*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/climat/tempete-alex-des-intemperies-exceptionnelles>
- MTECT. (2023). *Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels*. Ministère de la Transition Ecologie et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>
- OFEV. (2019). *Bois flottant dans les cours d'eau* (Connaissance de l'environnement num 1910 ; p. 100). Office fédéral de l'environnement. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12%20(002).pdf)
- ONF-RTM, ONF-DRN, & INRAE-ETNA. (2022a). *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya – Volet torrentiel* (N° V1 ; p. 275+922 annexes). Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06). <https://doi.org/10.57745/B69M2O>
- ONF-RTM, ONF-DRN, & INRAE-ETNA. (2022b). *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie – Volet torrentiel* (N° V1 ; p. 299 +1540 annexes). Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06). <https://doi.org/10.57745/UGJZWT>
- Payrastre, O., Gaume, E., & Andrieu, H. (2013). Information historique et étude statistique des crues extrêmes : Quelles caractéristiques souhaitables pour les inventaires de crues historiques ? *La Houille Blanche*, 3, 5–11. <https://doi.org/10.1051/lhb/2013019>
- Payrastre, O., Nicolle, P., Bonnifait, L., Brigode, P., Astagneau, P., Baise, A., Belleville, A., Bouamara, N., Bourgin, F., Breil, P., Brunet, P., Cerbelaud, A., Courapied, F., Devreux, L., Dreyfus, R., Gaume, E., Nomis, S., Poggio, J., Pons, F., & Sevez, D. (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*, 2082891. <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2082891>
- Piton, G., Cohen, M., Flipo, M., Nowak, M., Chapuis, M., Melun, G., Robert, Y., Andréis, N., & Liébault, F. (2024). Large in-stream wood yield during an extreme flood (Storm Alex, October 2020, Roya Valley, France): Estimating the supply, transport, and deposition using GIS. *Geomorphology*, 446, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108981>
- Rey, T., Chevret, 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*, 17, 193–223. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.14922>
- Tacon, S., Piton, G., & Liébault, F. (2023a). *Analyse du bilan sédimentaire et de la métamorphose fluviale de l'ensemble du bassin – Tâche 1 : Caractérisation de la contribution sédimentaire des têtes de bassin de la Vésubie*. [Rapport de recherche]. MorphEau Conseils ; IGE – Institut des Géosciences de l'Environnement. <https://hal.inrae.fr/hal-04218112>
- Tacon, S., Piton, G., & Liébault, F. (2023b). *Réaligner les données LiDAR multi-temporelles : Pourquoi?*. [Note de vulgarisation]. MorphEau Conseils ; IGE – Institut des Géosciences de l'Environnement. <https://hal.inrae.fr/hal-04206197>