



Pôle Alpin Risques Naturels



Symposium : les ouvrages de protections contre les risques naturels : évolutions et perspectives

8 Juillet 2022



INRAE

Retour d'expérience sur les crues torrentielles des Alpes-Maritimes de octobre 2020 associées à la tempête Alex : processus géomorphologiques et dommages associés



Guillaume PITON (INRAE ETNA)
Appuyé de nombreux collègues INRAE ETNA, ONF-RTM



Localisation

➤ Bassins versants principalement touchés:

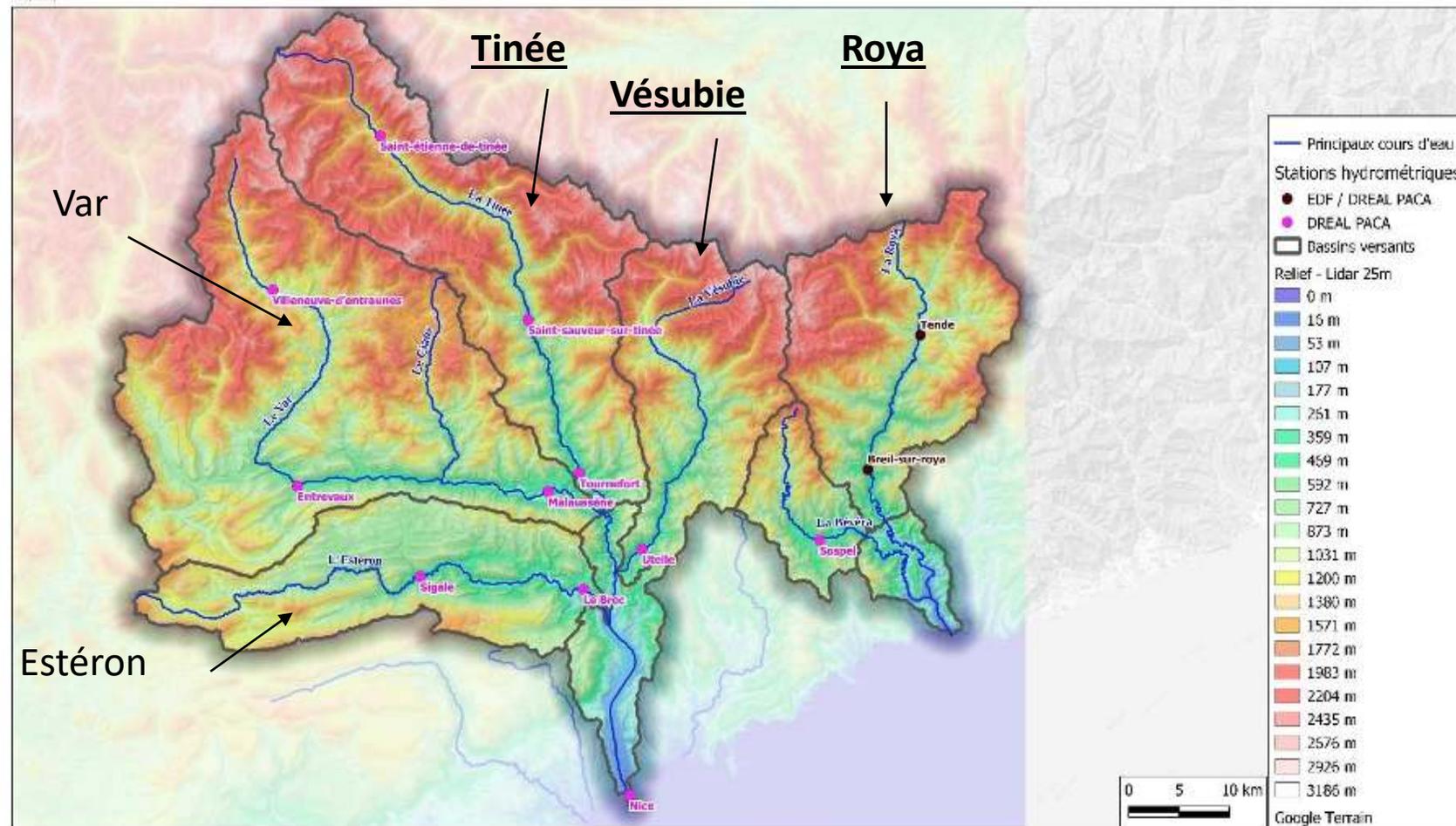
- Vésubie (45km – 392 km² – 5%)
- Roya (40km – 477 km² – 2,6%)
- Affluents rive gauche de la Tinée

➤ Dommages aussi observés sur:

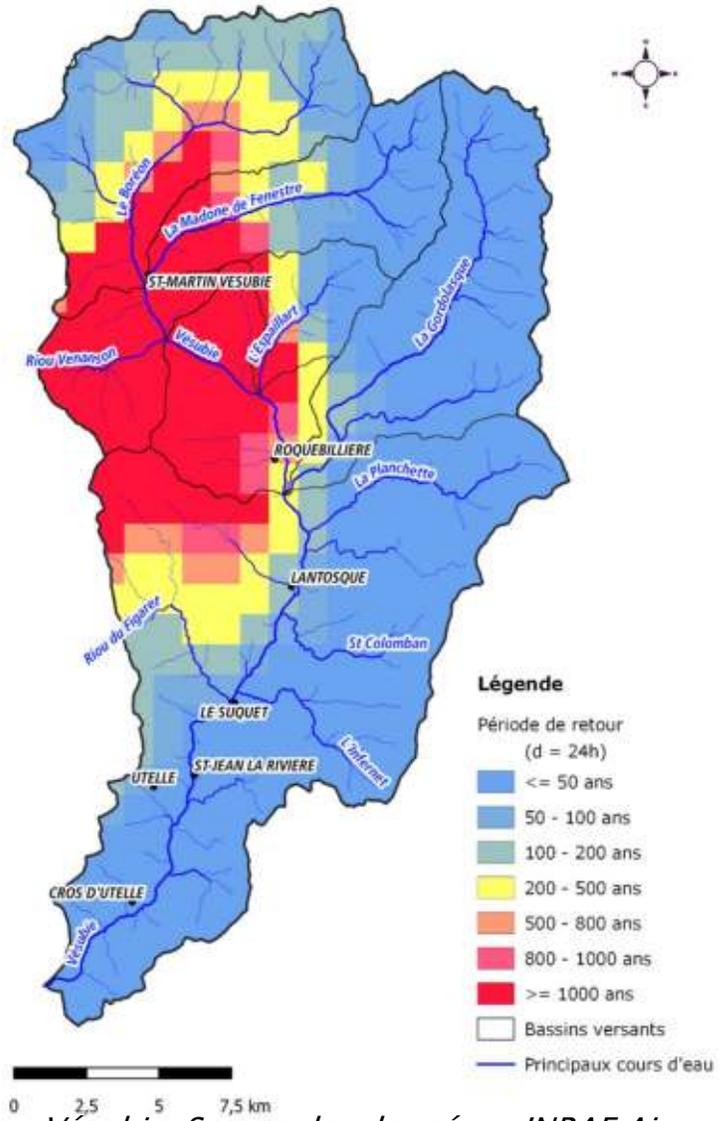
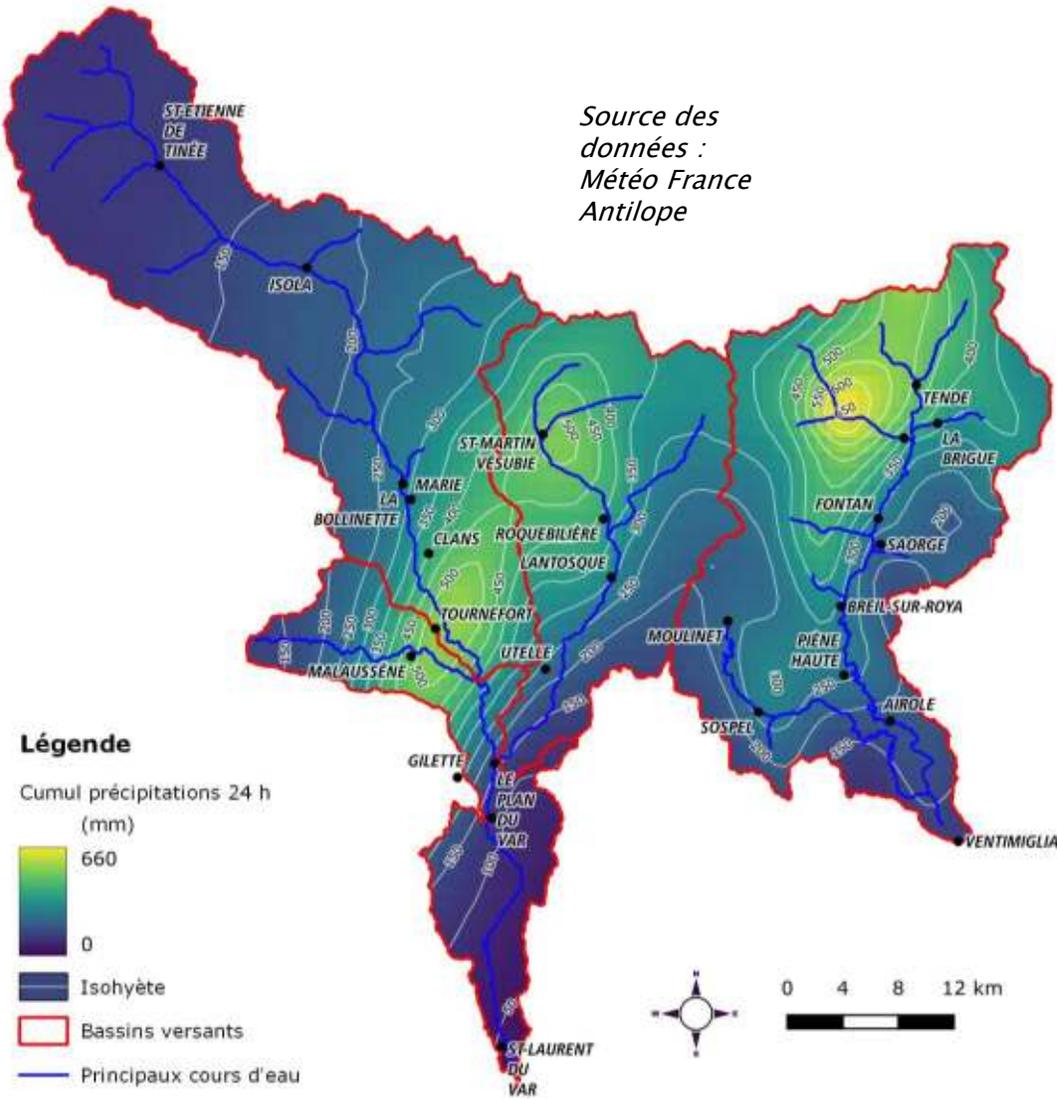
- Tinée,
- Var
- Affluents du Var



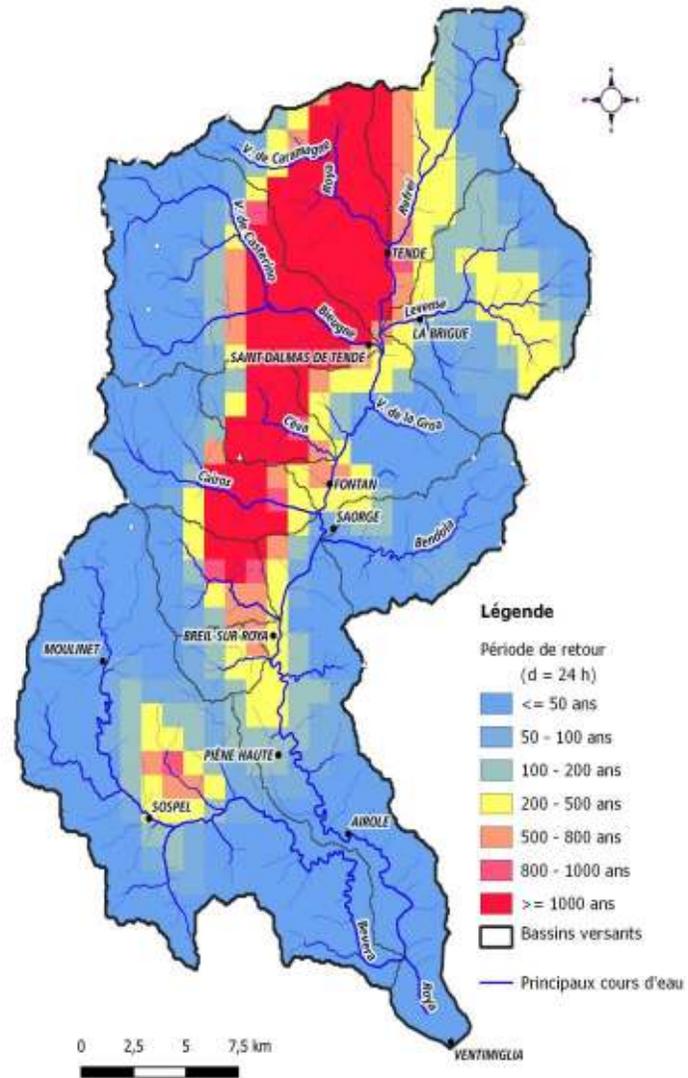
Source: Wikipédia



- Des cumuls pluviométriques exceptionnels en Vésubie et Roya avec des périodes de retour $> 1\ 000$ ans pour $d \geq 3h$



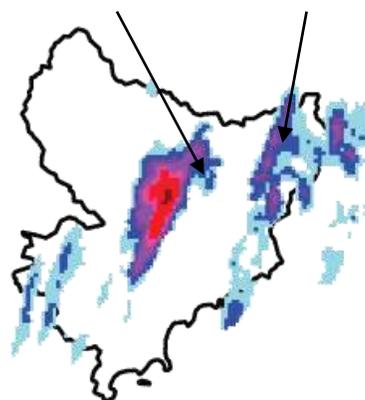
Vésubie. Source des données : INRAE Aix



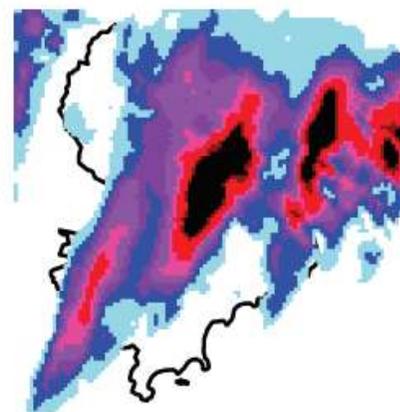
Roya. Source des données : INRAE Aix

Vésubie

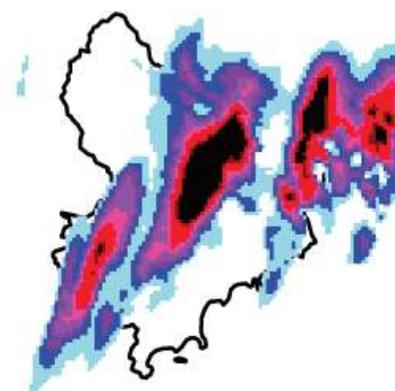
Roya



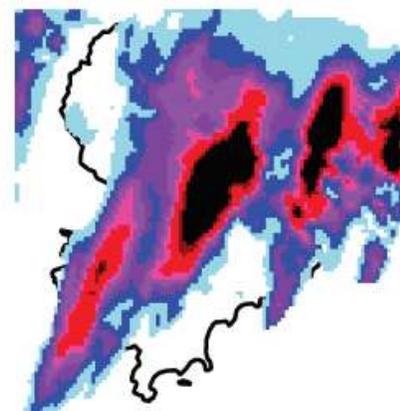
P 01h



P 24h



P 06h



P multi-durées

Periode de retour

■ > 1000 ans	■ > 20 ans
■ > 500 ans	■ > 10 ans
■ > 100 ans	■ > 5 ans
■ > 50 ans	■ > 2 ans

Analyse by INRAE RECOVER
(comparaison pluies mesurées VS
pluies SHYREG)

➤ Des cumuls pluviométriques exceptionnels en Vésubie et Roya avec des périodes de retour > 1 000 ans pour $d \geq 3h$

Mais aussi pour des durées assez longues: 12h et 24h → les terrains ont été saturés et volumes ruisselés ont été extraordinaires

Mouvements de terrain

➤ Glissement d'Ullion



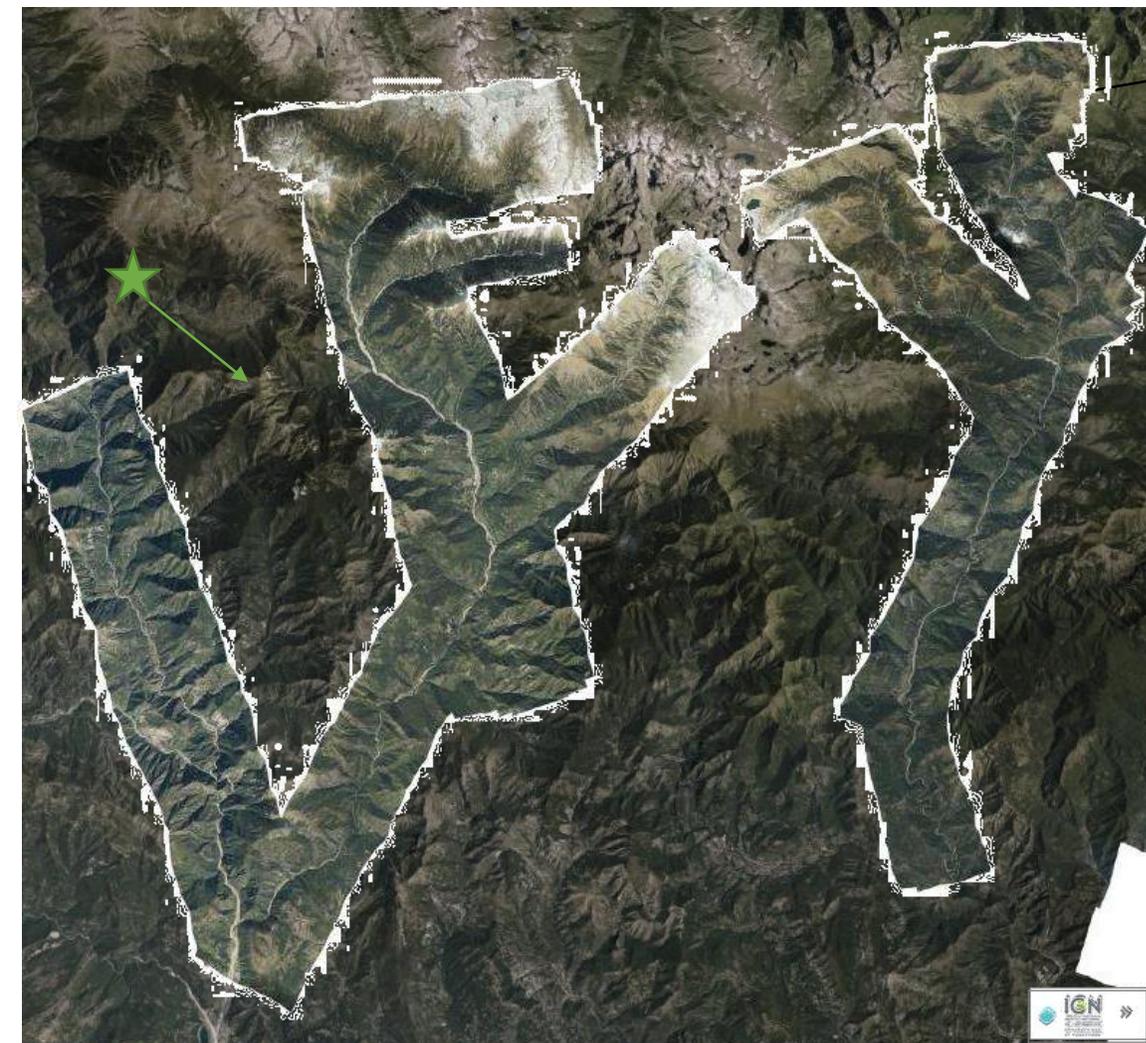
Florent Adamo / Cerema Méditerranée

➤ Tunnel de Tende vers l'Italie



➤ 200+ glissements de terrains relevés par le RTM sur la carte géomorphologie du RetEx

Réponse morphologique: Métamorphose fluviale

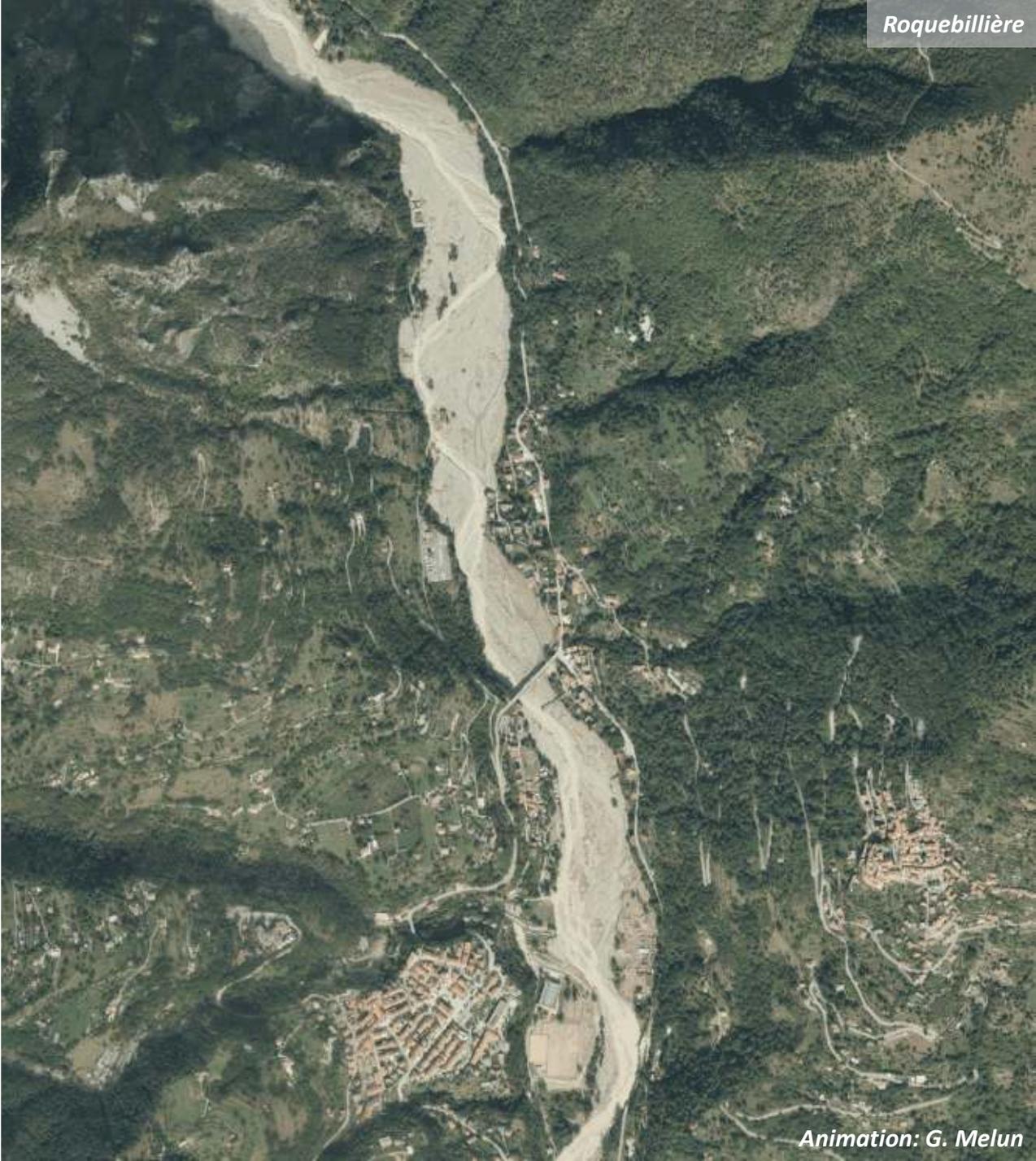


- **Tinée: élargissement marqué en aval des confluences avec les affluents rive droite (vallons d'Ullion et du Monar)**
- **Vésubie: métamorphose fluviale générale, transition en 24h d'un faciès de lit pavé unique à une faciès de tresse 4 fois plus large sur plus de 30 km.**
- **Roya : métamorphose fluviale plus contrainte par le relief et insuffisant à enterrer des gros blocs erratiques pavant le lit**

Saint-Martin-Vésubie



Roquebillière



Animation: G. Melun

- **Retex technique commandé par l'Etat/DDTM 06**
- **2 rapports, pour analyser les évolutions morphologiques, anticiper l'évolution prévisible des lits et proposer des principes d'aménagement, sur les 2 vallées principalement impactées : Vésubie et Roya**
- **Objectifs**
 - Caractériser et comprendre les phénomènes,
 - Améliorer les connaissances
 - Anticiper les évolutions prévisibles des cours d'eau
 - Proposer des principes d'aménagement adaptés
 - Proposer des éléments clés pour les scénarii de référence PPR

P1-2-3 - Présentation BV

- Hydrographie
- Géologie
- Historique de crue
- Débits de crue caractéristiques
- Documents d'affichage du risque existants

P4 - Constats post-crue

- Pluviométrie observée
- Estimations de débit
- Déroulé de crue d'après témoignage
- Embâcles
- Intensité des phénomènes torrentiels
- Dommages aux bâtis et aux infrastructures

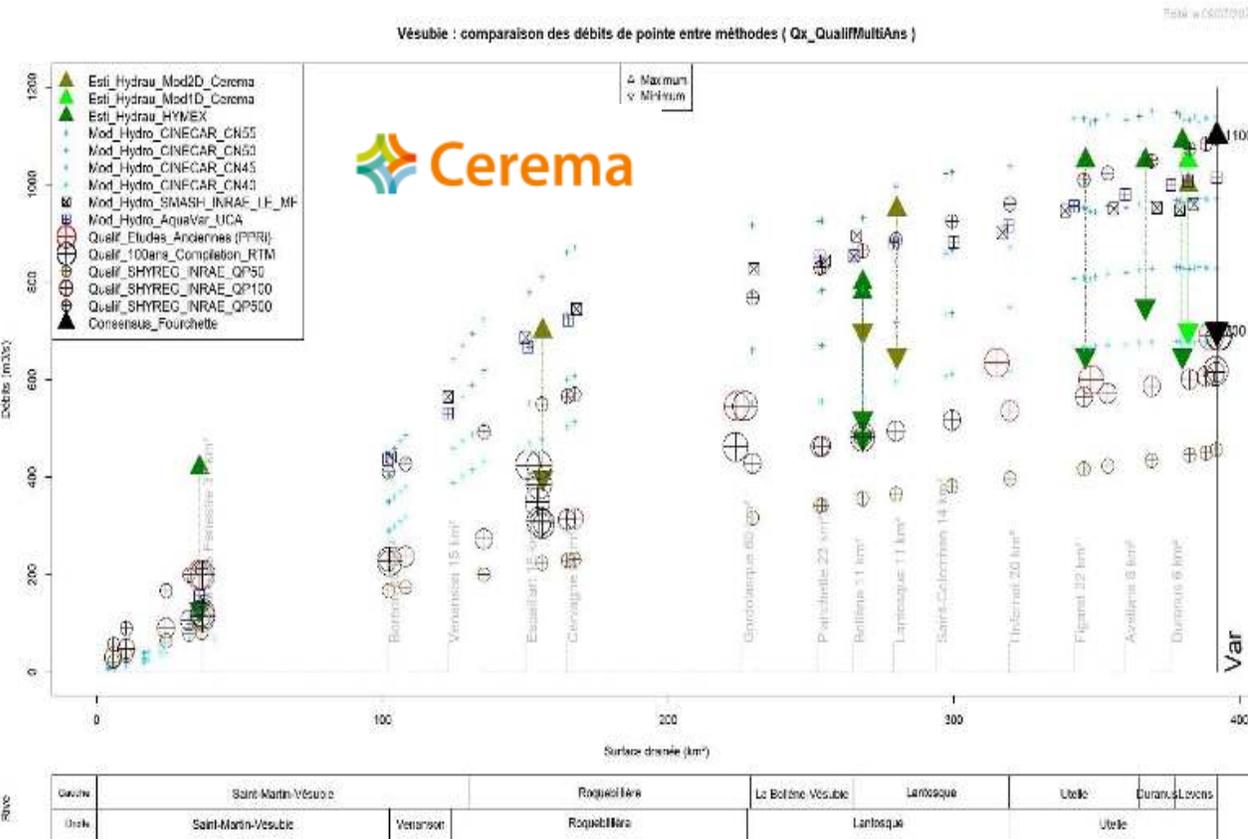
P5 - Évolutions géomorphologiques

- Sources sédimentaires
- Bilan de volume
- Embâcles/Flottants
- Analyse de profil en long
- Analyse diachronique

P6 - Évolutions prévisibles

- Evolutions prévisibles
 - Analyse à large échelle
 - Apports de la modélisation
- Principes d'aménagement

Les débits estimés sont très incertains en raison de la mobilité des lits (en plan et altitude) pendant la crue



- **2 méthodes d'estimation : modèles hydrologiques et méthode hydraulique**
 - Modèles hydrologiques pour la plupart non calés avant crue
 - Méthode hydraulique difficilement applicable sur lits mobiles
- **Vésubie : 700 à 1 100 m³/s à l'exutoire soit T ≈ 100 à 500 ans**
- **Roya : 1 000 à 1 800 m³/s à Breil/Roya soit T ≈ 100 à plus de 500 ans**
- **Incertitudes sur périodes de retour en partie liées à méconnaissance des débits de référence**

Vésubie - Comparaison des estimations de débit de pointe de crue aux estimations de débit de référence pour des périodes de retour de 50, 100 et 500 ans (Source : CEREMA, RETEX technique - Volet Hydrologie)

L'objectif est de garder la trace de cet évènement de magnitude exceptionnelle



Des phénomènes d'intensité torrentiels forts diversement pris en compte dans les cartes d'aléas préexistantes

Critères d'intensité tiré de Givry & Peteuil 2011. *Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel*



➤ St-Martin Vesubie :

- 38 % de l'emprise impactée n'est pas dans le zonage PPR
- 24 % de l'emprise impactée n'est pas dans l'AZI

➤ Roquebillière :

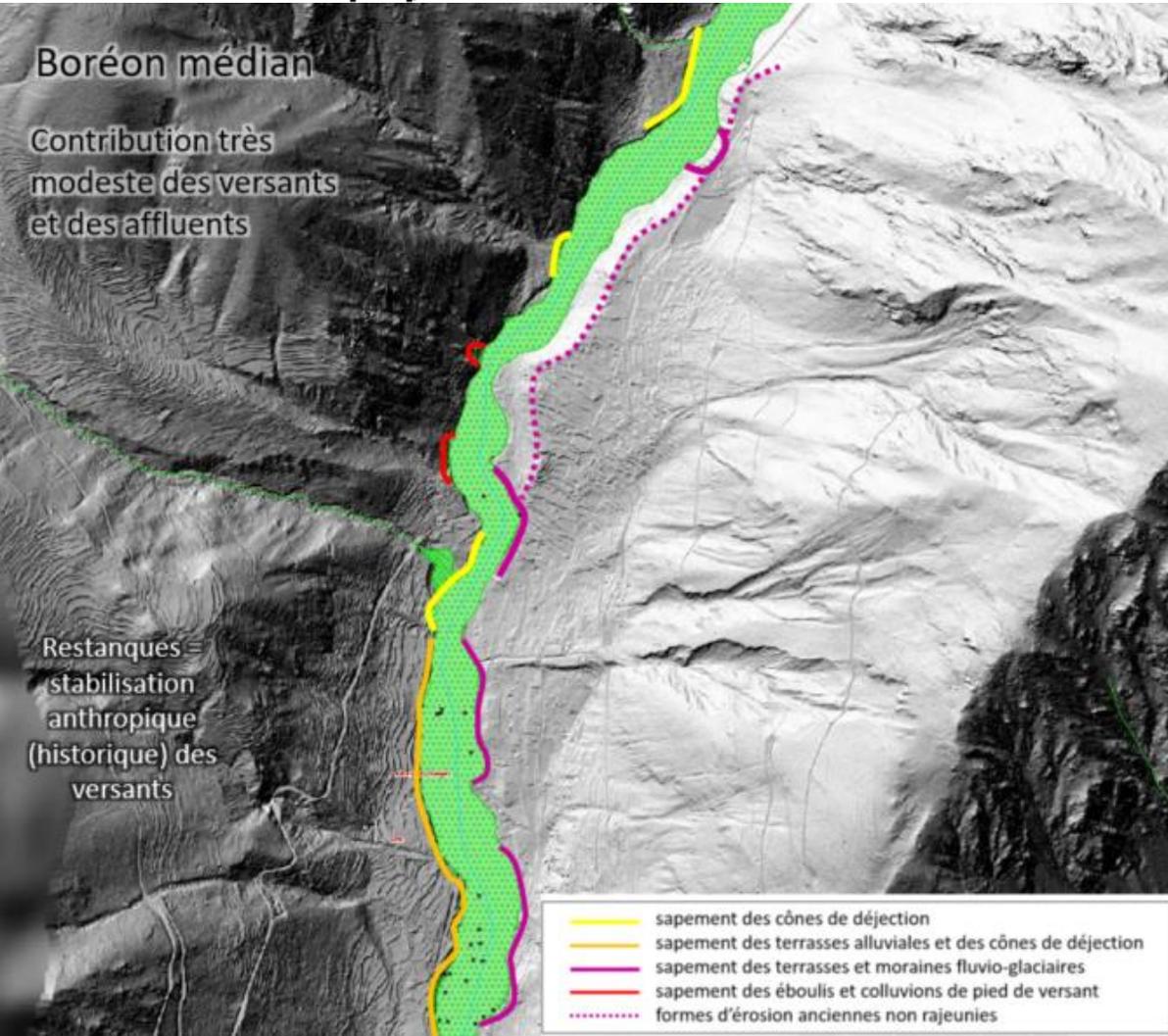
- 5 % de l'emprise impactée n'est pas dans l'AZI

➤ Différences en lien avec contexte géomorphologique

- Roquebillière : fond de vallée large. Baisse de pente
➔ tendance naturelle divagations-dépôt lors des crue
- St-Martin Vésubie : fond de vallée + étroit. Terrasses déconnectées perchées à plus de 20 m. surfaces non couvertes = majoritairement élargissement brutal lit et recul terrasses

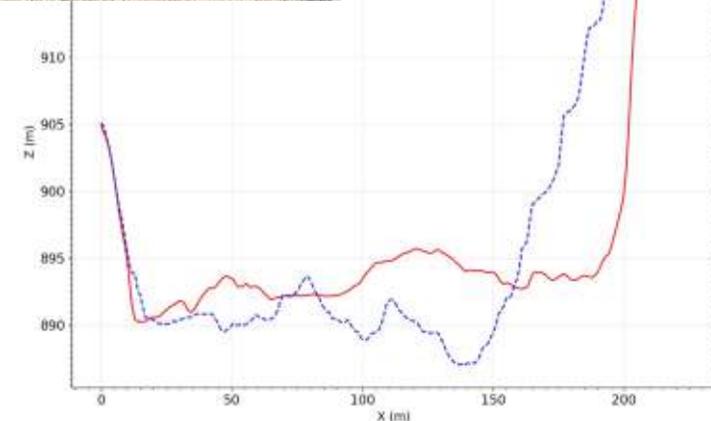
L'essentiel de la charge solide mobilisée provient des berges et des pieds de versants des lits majeurs

Les mouvements de versants ont à priori apporté des contributions marginales en comparaison (analyse en cours sur les affluents dans le cadre du projet RITA)



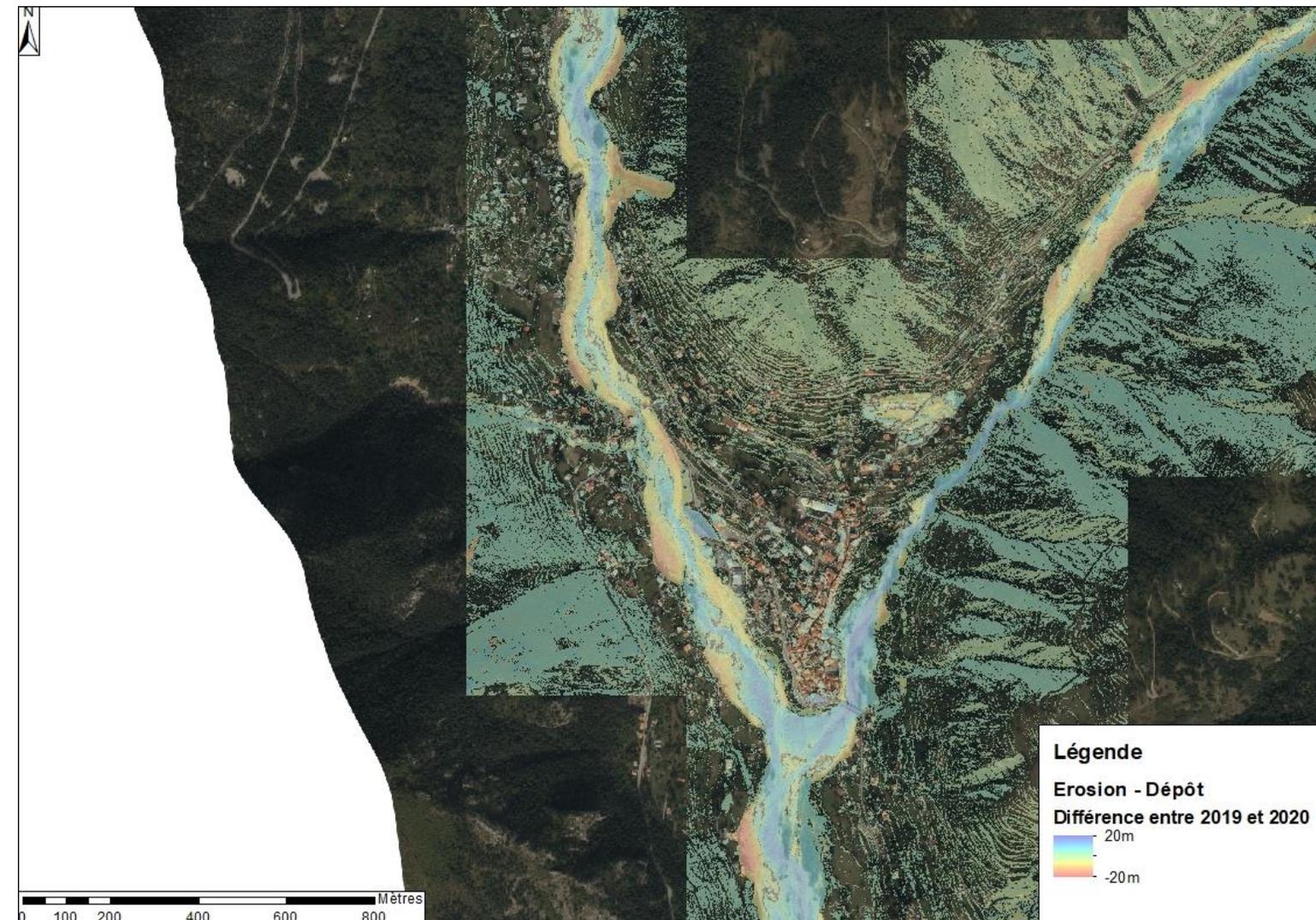
=887.0 m - $Z_{min2020}$ =890.3 m

Fluvial / alluvial / terraces méditerranéennes



Une mobilisation de matériaux exceptionnelle : 4,4 Mm³ de matériaux érodés, 3,9 Mm³

→ Elevation moyenne du profil en long de 3 m



Légende

Erosion - Dépôt
Différence entre 2019 et 2020
20m
-20m

Boréon du barrage à la Vésubie (8,4 km)	
Erosion : 1 358 000 m ³	-161 m ³ /ml
Dépôt : 837 000 m ³	100 m ³ /ml
Bilan : -521 000 m³	-62 m³/ml

Madone (8,3 km)	
Erosion : 990 000 m ³	-119 m ³ /ml
Dépôt : 595 000 m ³	72 m ³ /ml
Bilan : -395 000 m³	-47 m³/ml

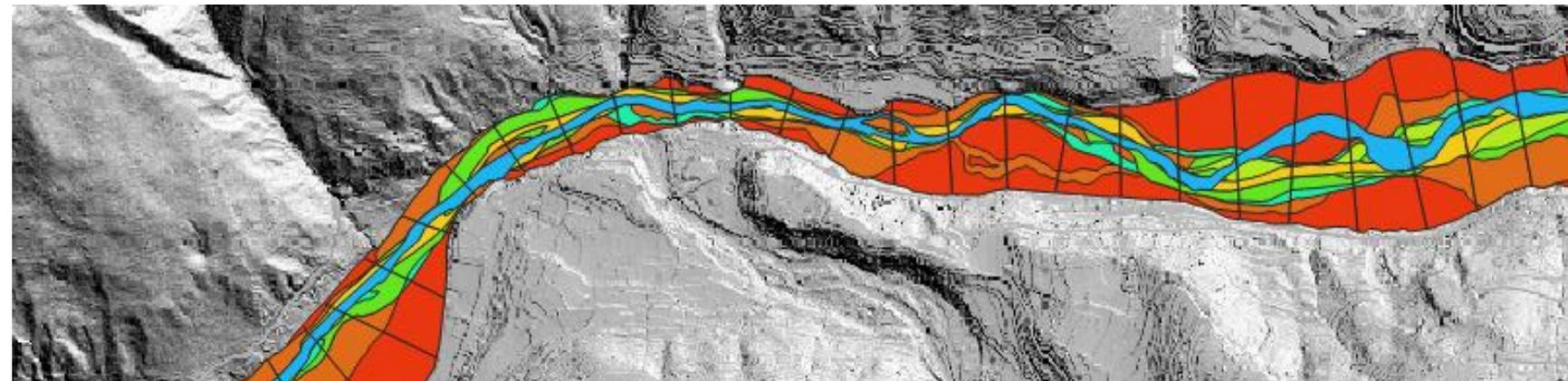
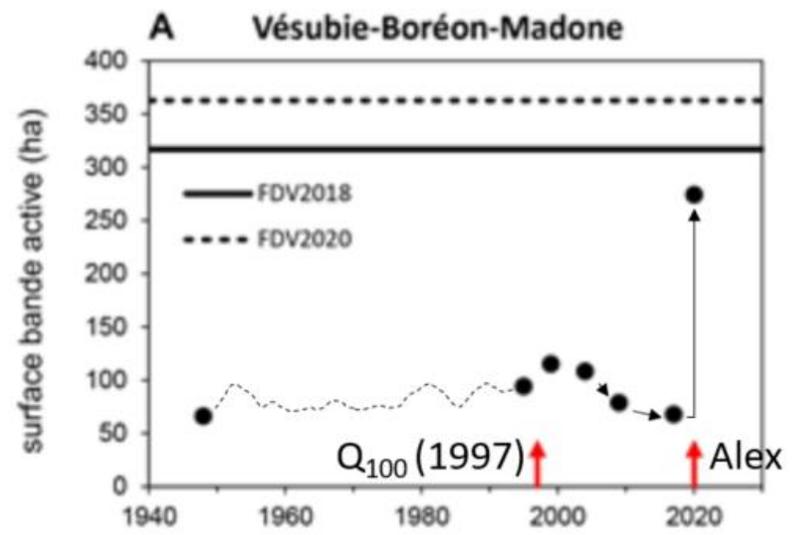
Vésubie jusqu'au Suquet (18,7 km)	
Erosion : 1 966 000 m ³	-105 m ³ /ml
Dépôt : 2 286 000 m ³	122 m ³ /ml
Cumul Bilan : 319 000 m³	+17m³/ml

Global y/c Boréon amont	
Erosion : 4 409 000 m ³	/!\ Il faut encore ajouter les affluents (en cours sur projet RITA)
Dépôt : 3 900 000 m ³	
Bilan : -510 000 m³	

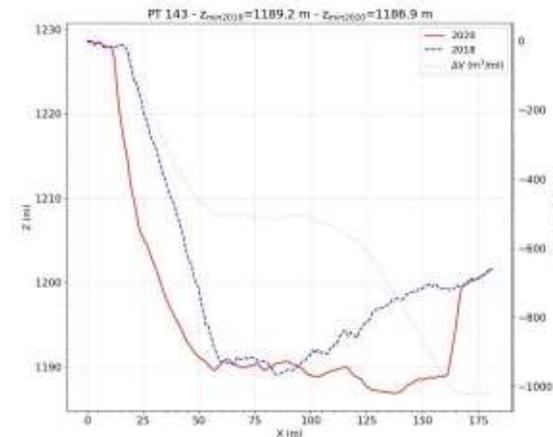
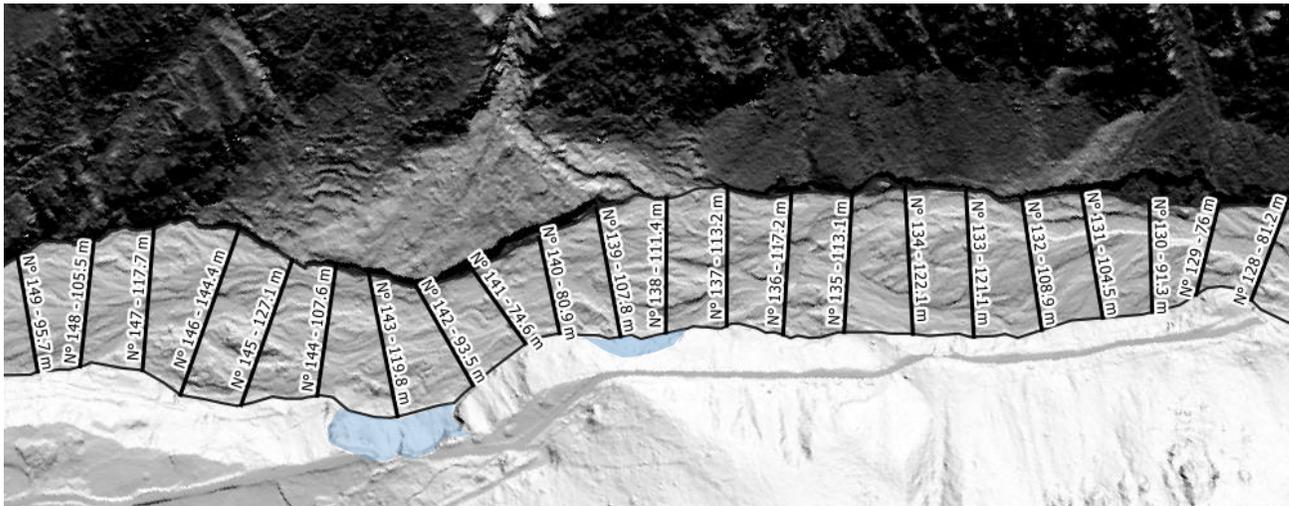
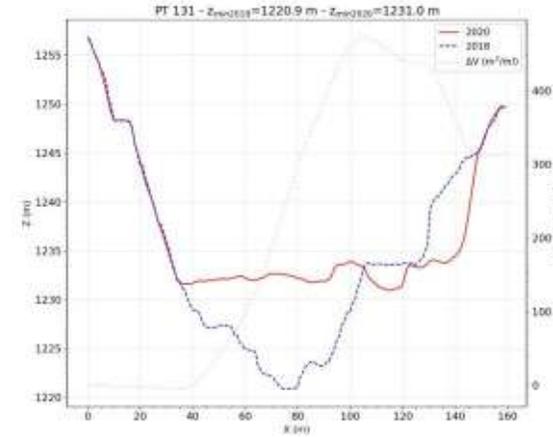
P5 – Évolutions géomorphologiques Taux d'élargissement du lit

Les bandes actives ont explosé brutalement d'un facteur 2 en Roya et 4 en Vésubie. Ex du Boréon

- Analyse diachronique des bandes actives de la Vésubie depuis 1948 sur 35 km
- Cartographie du fond de vallée moderne
- Tempête Alex
 - Emergence d'un tressage sur 35 km "Métamorphose fluviale"
 - Surface de bande active x4 sur Vésubie
 - Effet 10 fois plus intense que la crue centennale de 1997



Les contractions du lit ont joué un rôle majeur dans la rehausse des niveaux et l'explosion des bandes actives



➤ **Zone sources: Croisement BD forêts et bandes actives**

- Vésubie: 193 ha
- Roya: 87 ha

➤ **Analyse des densités de peuplement (90 -170 - 340 m³/ha)**

➤ **Digitalisation des troncs déposés**

- Vésubie: 23 581 pièces – 118 km de troncs – L_{95%} = 12 m
- Roya: 16 868 pièces – 33 km de troncs – L_{95%} = 5 m

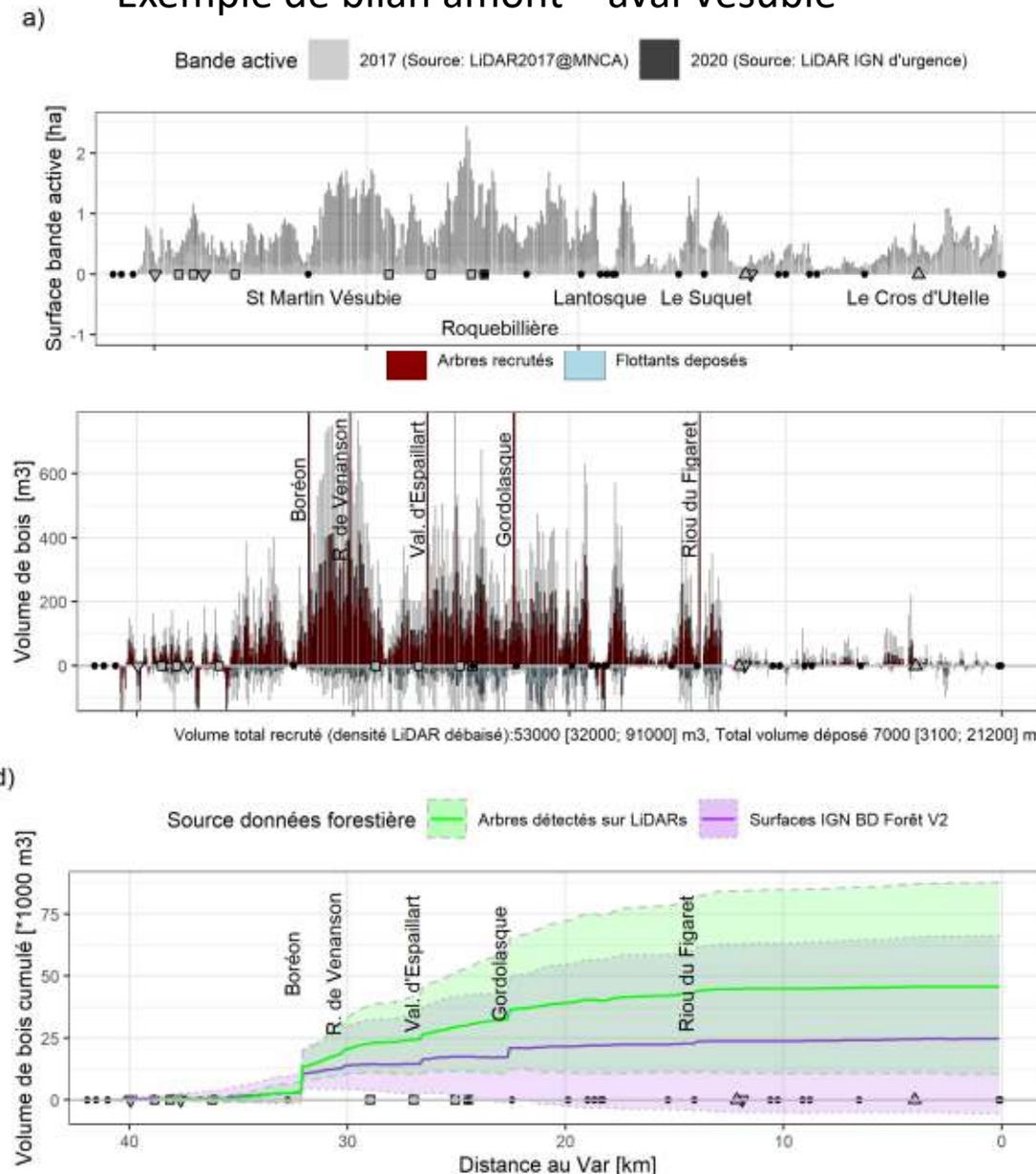


➤ **Bilan:**

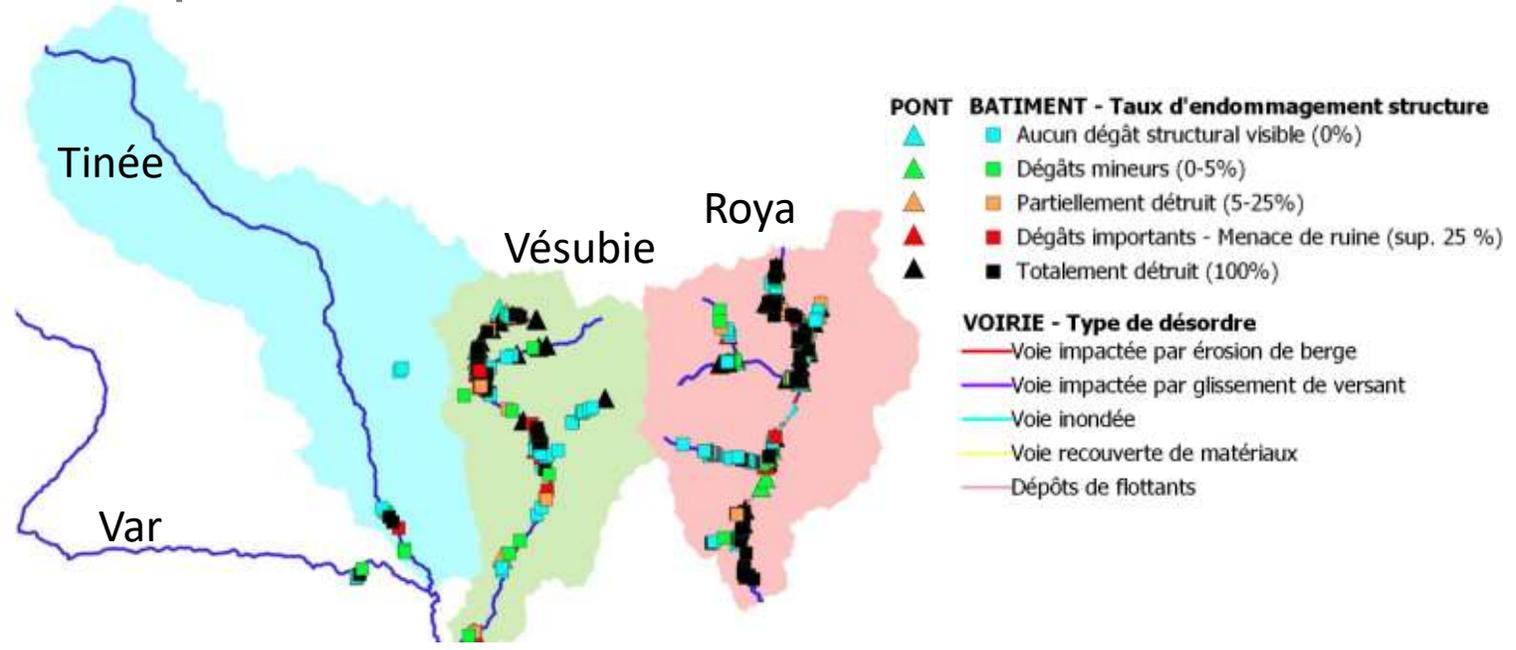
- Apports: Vésubie 52 000 m³ / Roya : 18 000 m³
- Dépôts: Vésubie: 7000 m³ / Roya : 900 m³

Export total tempête Alex: ≈ 62 000 m³ de bois flottants
(gamme d'incertitude: *2 - /2)

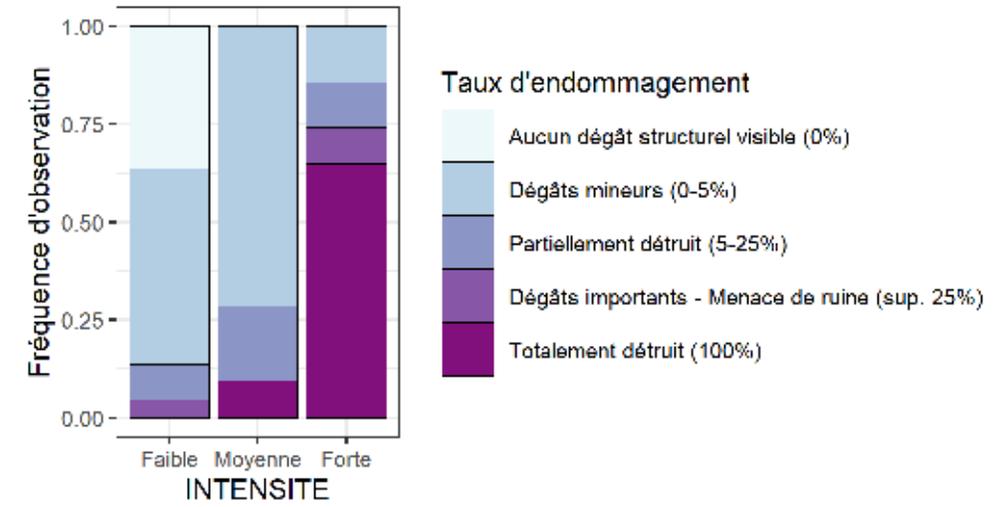
Exemple de bilan amont – aval Vésubie



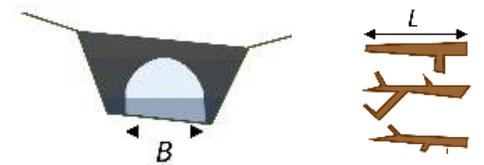
P4 – Relevés post-crués des dommages aux enjeux bâti, pont, voirie



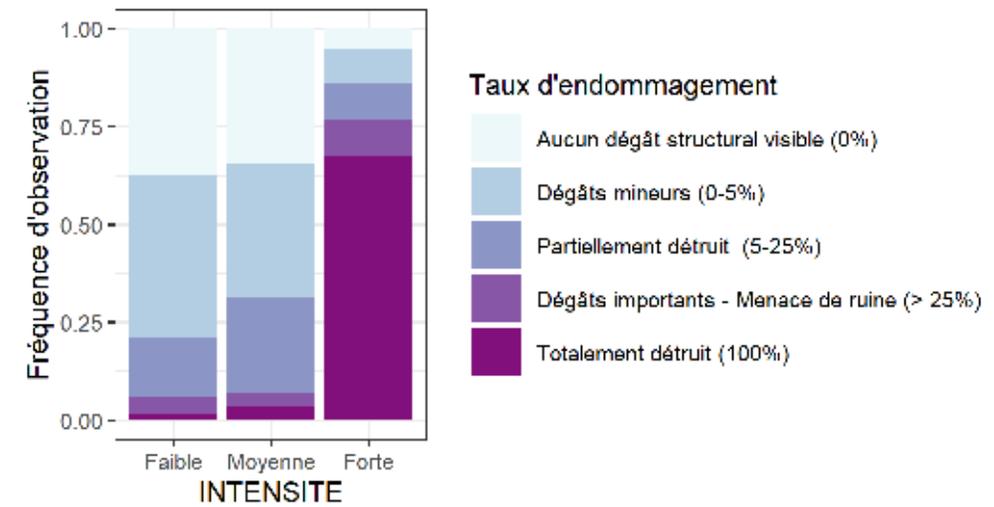
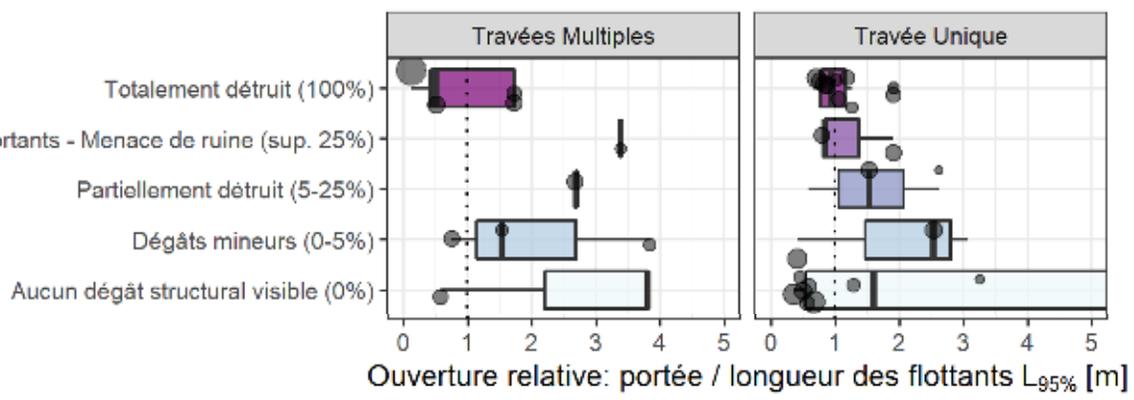
Dommages aux bâtis = f(Intensité) : n=289



Dommages aux ponts = f(B/L_{95%}) : n=140



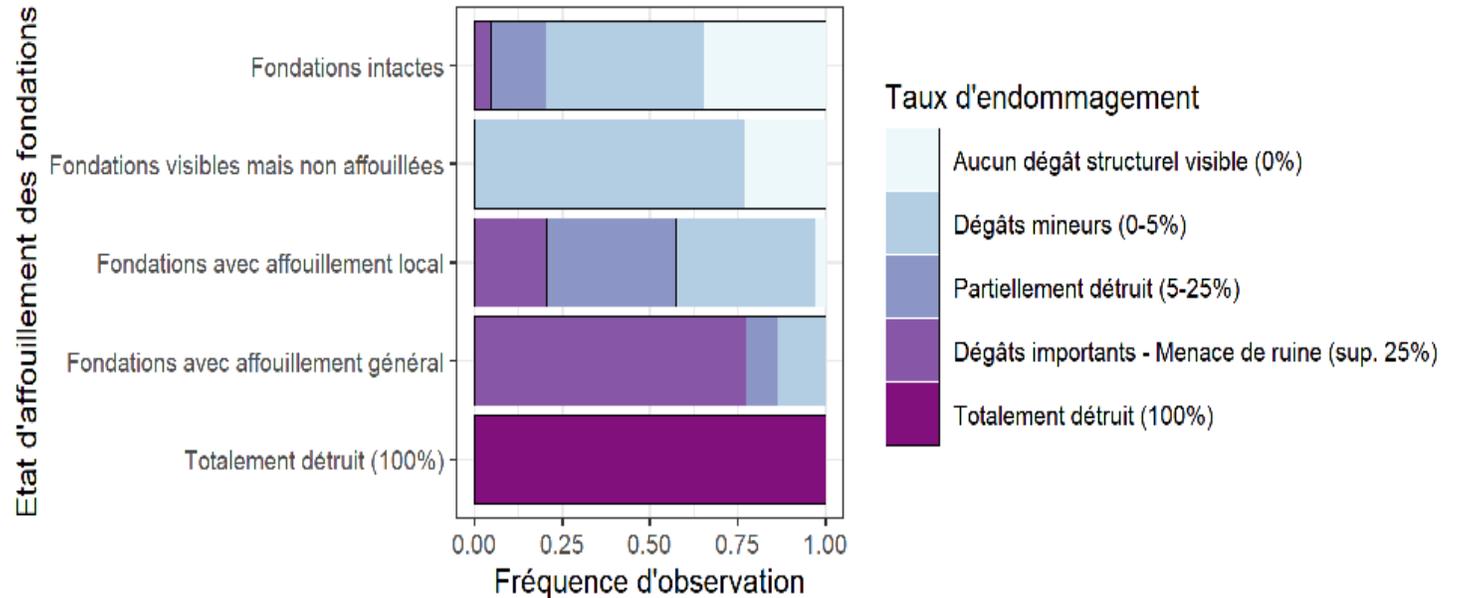
Dommages aux routes = f(Intensité) : n=404, L = 25,8 km



Analyse en cours. 175 bâtiments détruits par la crue Alex + env. 200 bâtiments avec dommages divers



- **Analyse en cours à partir des relevés des désordres sur les bâtis, ponts et routes**
- **Répartition géographique destruction bâtis :**
 - Vésubie : 55 %
 - Roya : 42 %
 - Tinée : 3 %
- **Destructions et dommages souvent liés à l'affouillement des fondations**



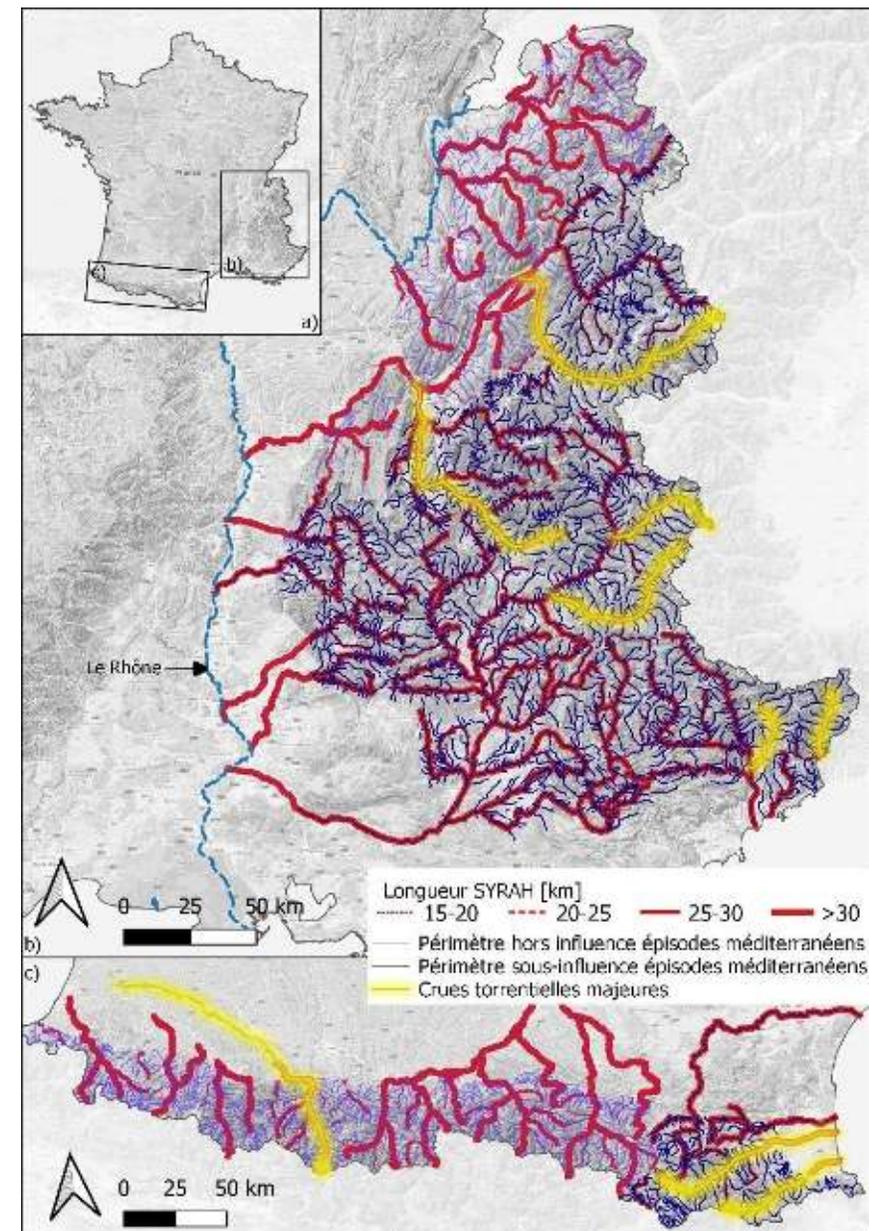
Estimation de la période de retour des crues torrentielles associées à la tempête Alex

➤ Demande récurrente des plusieurs acteurs

➤ Plusieurs approches déployées

- Sur les pluies (INRAE RECOVER) → $T > 1000$ ans sur de nombreux secteurs
- Sur les débits de pointe (RetEx volet hydrologie) → $T \approx 100 - 1000$ ans suivant les secteurs, approche peu adaptée au contexte torrentiel
- Développement d'une approche historico-géomorphologique simple
 - $Proba = 1 / T = N / (M \times D)$
 - $N = 8$ à 9 crues torrentielles majeures concernant des vallées entières
 - $M = 49$ à 94 vallées (> 25 km, pente $> 0.2\%$)
 - $N = 8$ à 9 crues torrentielles majeures concernant des vallées entières
→ $T = 600$ à 1000 ans

NOM	DATE	PRÉCIPITATIONS [MM]	VICTIMES
1: DRAC	Septembre et Octobre 1928	335 mm en 5 jours (25-29 sept.) à La Chapelle-en-Valgaudemar (05)	
2: TECH	Octobre 1940	1000 mm (le 17 oct.), 1930 mm en 5 jours à Saint Laurent-De-Cerdans (66)	57
3: TET	Octobre 1940	300 à 400 mm en 1 j, 600-700 mm à proximité de la crête de Canigou	
4: GUIL	Juin 1957	202 mm sur 1 jour (le 13 juin) - 319 mm sur 7 jours à Abriès (05) + forte fonte nivale	2
5 : UBAYE	Juin 1957	154 mm sur 1 jour (le 13 juin) - 183 mm sur 3 jours à Fouillouse (probablement > 250 mm sur la haute vallée) + forte fonte nivale	
6: ARC	Juin 1957	204 mm (le 13 juin) - 434 mm en 5 jours à Avérole à Bessans (73)	
7: BASTAN + GAVE DE PAU	Juin 2013	De l'ordre de 110 à 180 mm en moins de 48 heures sur le relief central des Pyrénées + forte fonte nivale	2
8: ROYA	Octobre 2020	663 mm en 24 h aux Mesches (poste EDF) dont 337 mm en 6 h	6
9: VÉSUBIE	Octobre 2020	500 mm en 24 h à Saint-Martin-de-Vésubie (poste EDF)	12



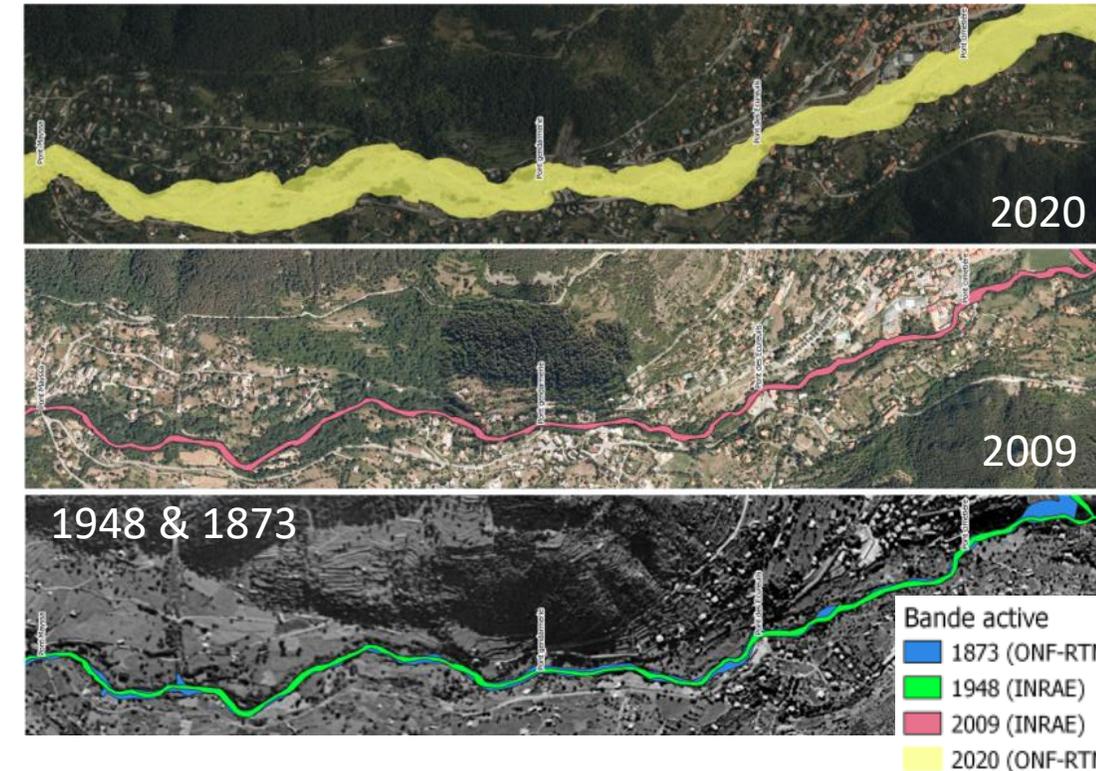
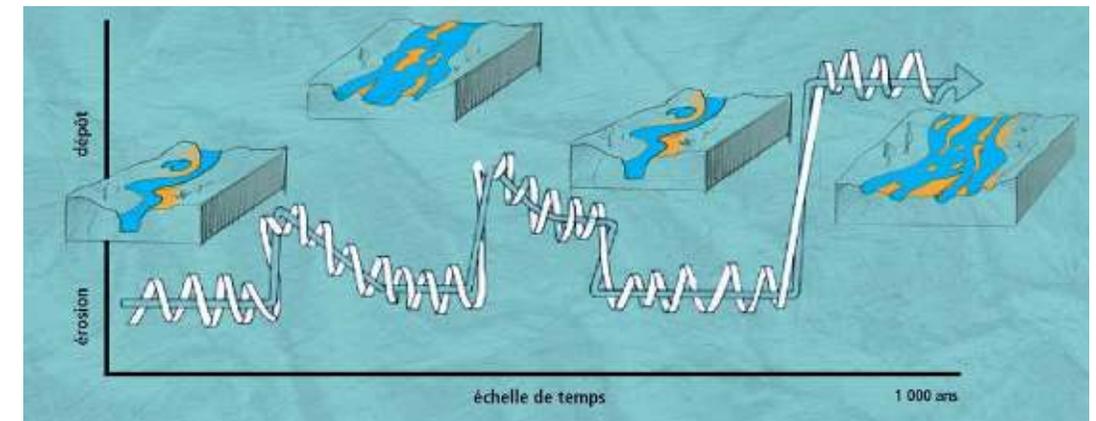
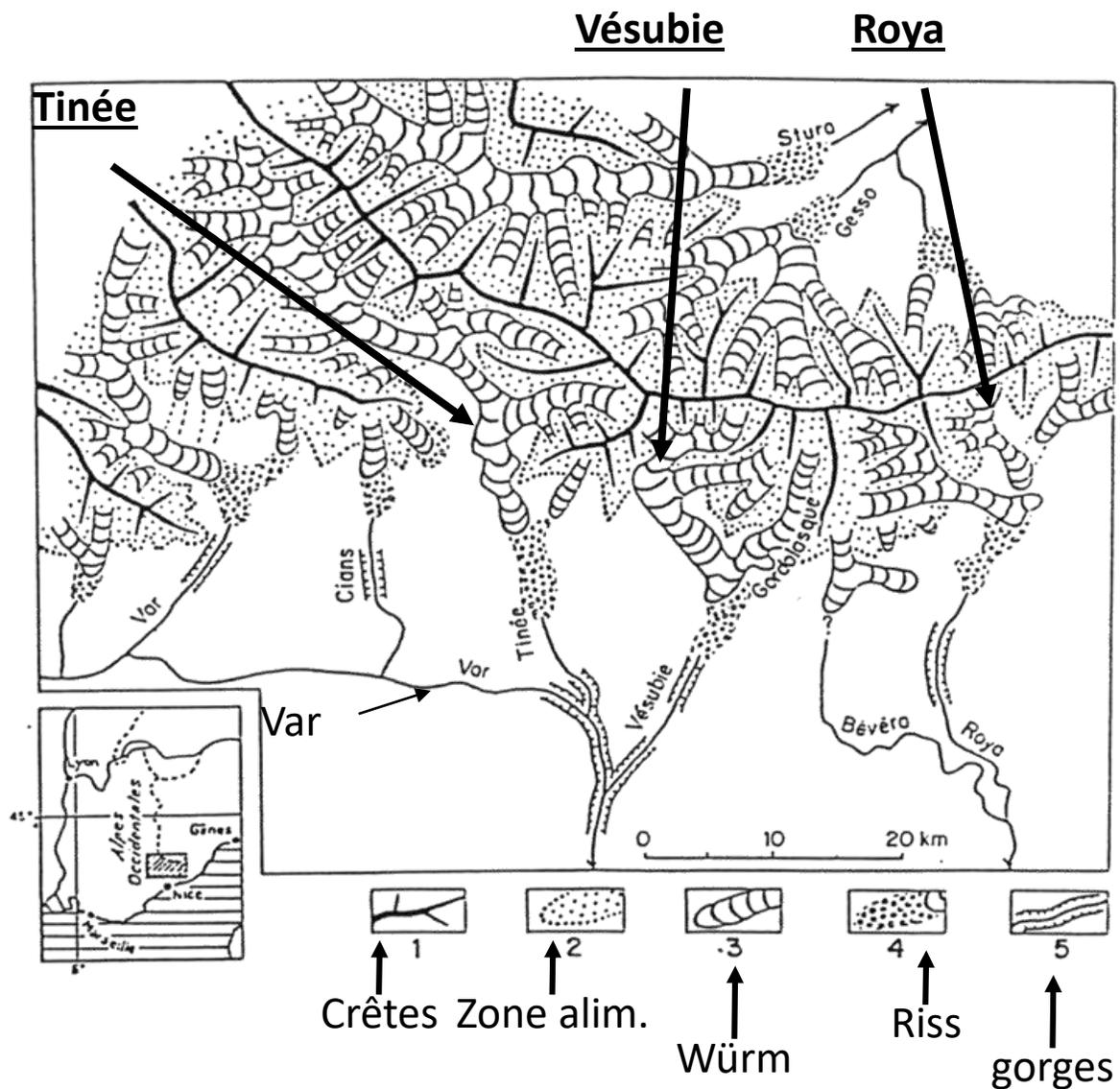


- ✓ Conserver ou aménager une section d'écoulement suffisante
- ✓ Préserver des zones de régulation de transport solide
- ✓ Augmenter la portée des ouvrages de franchissement à reconstruire et prévoir en amont et en aval des protections et des entonnements très progressifs
- ✓ Protections indispensables de tous les enjeux sensibles qu'il faut conserver ou à reconstruire (zones bâties, routes...) - Bien protéger contre l'affouillement
- ✓ Prendre en compte différents scénarios d'évolution prévisible : engravement potentiel supplémentaire en cas de nouvelles crues fortement chargées en matériaux, ré-incision des lits à moyen ou long terme
- ✓ Prendre en compte les flottants et leurs effets

- Importance d'une réflexion globale pour la cohérence des choix de réaménagement et de protection
- Nécessité d'engager des études hydrauliques approfondies, notamment pour apprécier les évolutions du fond du lit lors des prochains événements
- Prendre des revanches (marges de sécurité) suffisamment importantes pour prendre en compte des évolutions qui restent difficiles à quantifier précisément

Dynamique!

Malavoi & Bravard 2010



Julian, M. (1997) DOI:10.4000/books.psrbonne.31896

ONF-RTM06 & INRAE

Conclusion

- **Des précipitations extrêmes et de longue durée ont eu lieu lors de la tempête Alex**
- **Les crues générées ont eu des débits forts mais pas extrêmes (\pm de l'ordre de la centennal), elles ont par contre duré longtemps (\pm 24h)**
- **Les pluies ont déclenché de nombreux petits glissements de terrain ainsi que quelques grands, mais surtout un transport sédimentaire extraordinaire sédiments dans de nombreux cours d'eau**
- **Les principaux cours d'eau du bassin versant de la Vésubie et de la Roya ont subi une métamorphose fluviale, passant de ruisseaux de montagne étroits et fortement pavés à des rivières en tresses partout où l'espace était suffisant.**
- **Les dégâts sont exceptionnels (32 ponts détruits & 16 menaçant ruine, 200 bâtiments détruits, 175 endommagés, 25+ km de route endommagée)**
- **Il est compliqué de prédire la trajectoire géomorphologique future en raison (i) du changement climatique qui complexifie les comparaisons avec des cas similaires passés mais surtout (ii) de l'intervention de l'homme et des très nombreux travaux d'urgence**

Merci de votre attention, des questions?