



Rapport

Février 2022



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFET DES ALPES-MARITIMES

DIRECTION
DÉPARTEMENTALE
DES TERRITOIRES
ET DE LA MER

Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya Volet torrentiel



Agence RTM des Alpes du Sud
Service RTM des Alpes-Maritimes

62 route de Grenoble,
BP 3260 06205 Nice Cedex 3



Direction Forêts et Risques Naturels
Département Risques Naturels – Pôle RTM

9 quai Créqui
38026 Grenoble Cedex 1



INRAE Grenoble – UR ETNA – Erosion
Torrentiel, Neige et Avalanches

2 Rue de la Papeterie
38402 Saint-Martin-d'Hères

Crédit photo (page de garde) :

© La Roya dans la traversée de Tende / F. Adamo, CEREMA

© La Roya à Viévol / F. Adamo, CEREMA

© Le torrent de Morte en Haute-Roya / V. Koulinski, ETRM

© La Roya dans la traversée de Breil-sur-Roya / F. Adamo, CEREMA

AVANT-PROPOS

Ce retour d'expérience technique a été réalisé à la demande de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes ainsi que du Ministère de la Transition Ecologique, Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels et Hydrauliques, qui en a confié le pilotage et la rédaction à l'ONF-RTM en collaboration avec l'INRAE dans le cadre de la mission d'intérêt général « Prévention des risques naturels en montagne » réalisée par l'ONF au bénéfice du MTE.

COORDINATION – PILOTAGE DU RETEX :

- Y. QUEFFELEAN, Responsable Technique National RTM, Direction Forêts Risques Naturels de l'ONF
- C. GUITET, Cheffe du service ONF-RTM des Alpes-Maritimes

REDACTION – CONTRIBUTIONS :

N°	Objet	Rédacteur(s)	Principaux contributeur(s)
1- Introduction			
-	-	C. GUITET (ONF-RTM)	D. KUSS (ONF-RTM) G. PITON (INRAE)
2- Données de référence			
-	-	D. KUSS (ONF-RTM)	C. MARTINS (ONF-RTM)
3- Présentation du bassin versant de la Roya			
§3.	Tout sauf §3.2	D. KUSS (ONF-RTM)	C. MARTINS (ONF-RTM) C. GUITET (ONF-RTM)
§3.2	Contexte géologique	Y. ROBERT (ONF-RTM)	N. ANDREIS (ONF-RTM)
4- Principaux constats réalisés post-crue			
§4.1	Relevés de terrain	C. MARTINS (ONF-RTM)	-
§4.2	Pluviométrie observée et débits	D. KUSS (ONF-RTM)	C. MARTINS (ONF-RTM)
§4.3			
§4.4	Déroulé de crue	C. MARTINS (ONF-RTM)	J.M. MASSON (ONF-RTM) D. KUSS (ONF-RTM)
§4.5	Intensité des phénomènes torrentiels	C. MARTINS (ONF-RTM)	D. KUSS (ONF-RTM)
§4.6	Dommages aux bâtis et infrastructures	S. CARLADOUS (ONF-RTM)	G. PITON (INRAE) C. GUITET (ONF-RTM)
5- Analyse des évolutions géomorphologiques			
§5.1	Sources sédimentaires	Y. ROBERT (ONF-RTM) N. ANDREIS (ONF-RTM)	-
§5.2	Évolution des bandes actives	G. MELUN (OFB) M. CHAPUIS (CNRS---UCA) P. PASSY (CNRS - Univ. Paris) F. LIEBAULT (INRAE)	D. KUSS (ONF-RTM)
§5.3	Analyse des profils en long	D. KUSS (ONF-RTM)	C. MARTINS (ONF-RTM)
§5.4			C. GUITET (ONF-RTM) T. TOURNIER (ONF-RTM)
6- Bois flottants et embâcles : analyse des zones sources et des transferts			
-	-	M. FLIPO (Univ. Sorbonne) G. PITON (INRAE)	R. RODIER (INRAE)
7- Évolutions prévisibles des cours d’eau et principes d’aménagement			
§ 7.1	Évolutions prévisibles à court et moyen termes	F. LIEBAULT (INRAE)	G. PITON (INRAE) D. KUSS (ONF-RTM)

§ 7.2	Principes d'aménagement adaptés au contexte torrentiel	Y. QUEFFELEAN (ONF-RTM)	C. GUITET (ONF-RTM) D. KUSS (ONF-RTM) G. PITON (INRAE)
§ 7.3	Comparaison aux cartes existantes sur la connaissance du risque inondation	S. CARLADOUS (ONF-RTM)	C. GUITET (ONF-RTM) D. KUSS (ONF-RTM)

CAO-DAO – RECHERCHE DE CLICHES HISTORIQUES

- J.L. DEMIRDJIAN, Spécialiste CAO-DAO, service RTM Alpes-Maritimes (CAO-DAO + SIG)
- VERROUST, Référent technique national RTM SIG, service RTM des Hautes-Alpes (digitalisation des fils d'eau post-crue et des axes de profils en long)
- J.R. GENIN, Technicien territorial RTM, service RTM Alpes-Maritimes (Atlas cartographiques)
- N. ANDREIS, Géologue, service RTM Alpes-Maritimes (Atlas cartographiques)
- J.M. MASSON, Technicien territorial RTM, service RTM des Alpes-Maritimes (appui SIG, recherche de clichés historiques)
- T. TOURNIER, Ingénieur territorial RTM, service RTM des Alpes-Maritimes (recherche de clichés historiques)

CAMPAGNES DE RELEVES POST-CRUE

- **ONF-RTM** : C. GUITET, C. MARTINS, J.M. MASSON, P. PONZO, T. TOURNIER, T. EME, N. ANDREIS, J.R. GENIN, J.L. DEMIRDJIAN, D. KUSS, M. FOUQUET, G. ASTIER, F. VERROUST, P. BOUVET, Y. QUEFFELEAN, S. CARLADOUS, Y. ROBERT, V. GONOD
- **INRAE** : G. PITON
- **SMIAGE Maralpin** : L. SAVAN, R. DREYFUS, J. POGGIO, M. LAMBOURG, S. NOMIS
- **CARF** : I. MONVILLE
- **UCA** : M. CHAPUIS
- **ETRM** : V. KOULINSKI

REMERCIEMENTS

Nous remercions les partenaires suivants pour leur contribution au RETEX *via* la fourniture de données :

- **IGN** : réalisation d'un levé LiDAR post-crue et fourniture des MNT et orthophotographies dans un délai remarquablement court
- **CEREMA**
 - F. ADAMO : photographies par hélicoptère post-crue massivement utilisées dans ce document
 - F. PONS : données hydrologiques issues du volet Hydrologie du RETEX piloté par le CEREMA
- **ETRM** (V. KOULINSKI) : réalisation de clichés par drone post-crue
- **INRAE Aix en Provence** (C. FOUCHIER) : fourniture de données de temps de retour sur les pluies observées pendant l'évènement
- **EDF** (L. VU HONG, E. PAQUET) : fourniture de données pluviométriques corrigées, fourniture d'hydrogrammes de crue, échanges sur la dynamique de crue à Breil-sur-Roya

REMARQUE PREALABLE SUR LES APPROCHES ET METHODOLOGIES UTILISEES

Ce rapport compile des contributions portant sur des sujets variés. Certaines parties de l'analyse reposent sur des approches connues et établies dans le cadre des études des bassins versants torrentiels. Le caractère exceptionnel de l'évènement et le nombre extraordinaire des désordres a, pour certaines questions, justifié ou stimulé le développement de nouvelles approches. Par un souci de concision et de rigueur, les principes des méthodologies et approches ne sont présentés dans le détail que si elles ont fait l'objet de développements spécifiques à l'occasion de ce retour d'expérience. C'est le cas notamment des analyses des dommages et des embâcles.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	8
1.1	CONTEXTE.....	8
1.1	SITUATION	10
2	DONNÉES DE RÉFÉRENCE UTILISÉES	11
3	PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA	13
3.1	PRESENTATION GENERALE	13
3.2	CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE	16
3.3	HISTORIQUE DES CRUES	21
3.4	VALEURS DE DEBIT DE CRUE DE REFERENCE CENTENNAL, ESTIMEES AVANT LA CRUE ALEX.....	27
3.4.1	RESULTATS ISSUS D'ETUDES ANTERIEURES.....	27
3.4.2	ESTIMATIONS SHYREG DEBIT	28
3.5	DOCUMENTS D’AFFICHAGE DU RISQUE INONDATION EXISTANTS DANS LES COMMUNES DE LA VALLEE DE LA ROYA.....	28
3.5.1	PLAN DE PREVENTION DES RISQUES (INONDATION OU MULTI-ALEAS).....	28
3.5.2	AUTRES CARTOGRAPHIES.....	29
3.5.2.1	CONTRAT DE PLAN ÉTAT REGION (BRGM, 2005)	29
3.5.2.2	ATLAS DES ZONES INONDABLES	29
3.5.2.3	ENVELOPPES APPROCHEES D’INONDATION POTENTIELLES COURS D’EAU (EAIP _{CE}).....	29
4	PRINCIPAUX CONSTATS RÉALISÉS POST-CRUE	31
4.1	RELEVES DE TERRAIN	31
4.2	PLUVIOMETRIE OBSERVEE (RETEX HYDROLOGIQUE)	32
4.3	DEBIT DE POINTE LIQUIDE ET HYDROGRAMMES ESTIMES (RETEX HYDROLOGIQUE).....	37
4.4	DEROULE DE LA CRUE D’APRES LES TEMOIGNAGES	39
4.5	INTENSITE DES PHENOMENES TORRENTIELS	51
4.5.1	RAPPEL SUR LA NOTION D’INTENSITE DE CRUE.....	51
4.5.2	DEFINITION ET CRITERES DE QUALIFICATION DES CLASSES D’INTENSITE	51
4.5.3	PRINCIPAUX RESULTATS	56
4.6	DOMMAGES AUX BATIS ET AUX INFRASTRUCTURES	56
4.6.1	PREAMBULE CONCERNANT L’ACQUISITION DES DONNEES - LIMITES.....	57
4.6.1.1	LES DIFFERENTS MODES D’ENDOMMAGEMENT	57
4.6.1.2	CLASSIFICATION DU TAUX D’ENDOMMAGEMENT STRUCTURAL	58
4.6.1.3	INTENSITE DE LA CRUE – INTENSITE D’AFFOUILLEMENT ET D’ENGRAVEMENT DES BATIMENTS	58
4.6.1.4	LIMITES DES DONNEES COLLECTEES	63
4.6.2	DOMMAGES STRUCTURAUX AUX BATIMENTS.....	63
4.6.2.1	NOMBRE DE BATIMENTS IMPACTES ET NIVEAUX D’ENDOMMAGEMENT.....	63
4.6.2.2	ANALYSE DES MODALITES D’ENDOMMAGEMENT STRUCTURAL	67
4.6.3	DOMMAGES AUX INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT	73
4.6.3.1	VISION GLOBALE DES DOMMAGES (INFORMATIONS PROVISOIRES, A CONSOLIDER)	74
4.6.3.2	ANALYSE DES MODES ET NIVEAUX D’ENDOMMAGEMENT DES LINEAIRES DE ROUTES	77
4.6.3.3	ANALYSE DES MODES ET NIVEAUX D’ENDOMMAGEMENT DES PONTS.....	79
4.6.4	DOMMAGES HUMAINS (MORTALITE)	81
4.6.4.1	REPARTITION SUR LE TERRITOIRE IMPACTE	81
4.6.4.2	CONDITIONS DE MORTALITE.....	81
5	ANALYSE DES ÉVOLUTIONS GÉOMORPHOLOGIQUES	83
5.1	SOURCES SEDIMENTAIRES DANS LES HAUTS BASSINS VERSANTS.....	83
5.1.1	SYNTHESE DES OBSERVATIONS.....	83
5.1.2	LA HAUTE ROYA ENTRE LE COL DE TENDE ET VIEVOLA.....	85
5.1.2.1	TUNNEL DE TENDE.....	86
5.1.2.2	MADONE DE VIEVOLA	91
5.1.3	VALLON DE CONSCIENTE	93
5.1.4	VALLON DE CASTERINO.....	94

5.1.5	VALLON DE LA MINIERE	98
5.1.5.1	SECTEUR EN AMONT DU LAC DE LA MINIERE	98
5.1.5.2	SECTEUR LAC DE LA MINIERE – LAC DES MESCHES.....	99
5.1.6	VALLON DE LA BIEUGNE	102
5.2	ÉVOLUTION DE BANDE ACTIVE – COMPARAISON DIACHRONIQUE	106
5.2.1	AVANT-PROPOS.....	106
5.2.2	MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	106
5.2.2.1	LINÉAIRE D'ÉTUDE	106
5.2.2.2	IMAGERIE	106
5.2.2.3	EXTRACTION DES BANDES ACTIVES ET DU FOND DE VALLÉE MODERNE.....	107
5.2.2.4	SEGMENTATION SPATIALE	109
5.2.3	RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES BANDES ACTIVES.....	110
5.2.3.1	ÉVOLUTION DES SURFACES ACTIVES À L'ÉCHELLE DE LA VALLÉE	110
5.2.3.2	ANALYSE DES GRADIENTS AMONT-AVAL	115
5.2.3.3	ATLAS CARTOGRAPHIQUE.....	117
5.3	ANALYSE GENERALE DES PROFILS EN LONG	118
5.3.1	METHODOLOGIE.....	118
5.3.2	METHODOLOGIE D'ANALYSE DES PROFILS EN LONG	118
5.3.3	METHODOLOGIE DE REALISATION DES PROFILS EN LONG	120
5.3.4	ANALYSE DU PROFIL EN LONG GENERAL DE LA ROYA.....	121
5.3.5	ANALYSE DU PROFIL EN LONG GENERAL DE LA BIEUGNE	125
5.4	ANALYSE SECTORISEE DES PROFILS EN LONG	129
5.4.1	METHODOLOGIE.....	129
5.4.1.1	DONNEES PRISE EN COMPTE	129
5.4.1.2	DISCUSSION CONCERNANT LA PRECISION ALTIMETRIQUE DU LEVE IGN BD TOPO	129
5.4.2	ROYA – SECTEUR DE TENDE – ANALYSE D'ENSEMBLE	130
5.4.3	TORRENT DE MORTE	140
5.4.4	ROYA – TRAVERSEE URBAINE DE TENDE	148
5.4.5	ROYA – SECTEUR DE ST-DALMAS DE TENDE.....	154
5.4.6	BIEUGNE – ST-DALMAS AU BARRAGE DES MESCHES.....	164
5.4.7	ROYA – SECTEUR DE FONTAN.....	172
5.4.8	CAÏROS – PARTIE INFERIEURE	185
5.4.9	ROYA – SECTEUR DE BREIL-SUR-ROYA – SAORGE.....	186
5.4.10	ROYA - TRAVERSEE URBAINE DE BREIL-SUR-ROYA	196
5.4.11	ROYA – SECTEUR AVAL DE BREIL SUR ROYA	200
6	BOIS FLOTTANTS ET EMBÂCLES : ANALYSE DES ZONES SOURCES ET DES TRANSFERTS.....	210
6.1	DONNEES UTILISEES	210
6.2	SEGMENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE EN TRONÇONS	211
6.3	ANALYSE DE LA PRODUCTION DE FLOTTANTS.....	211
6.3.1	SURFACES DE BOISEMENT CONTRIBUTRICES.....	211
6.3.2	PEUPELEMENT FORESTIER DES ZONES CONTRIBUTRICES	212
6.3.2.1	ANALYSES DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL (IFN).....	213
6.3.2.2	ANALYSE DES DONNÉES LIDAR	213
6.3.2.3	COMPARAISON DES APPROCHES ET COMBINAISON	214
6.3.3	ANALYSE DES DÉPÔTS DE FLOTTANTS	216
6.3.3.1	LOCALISATION DES FLOTTANTS	216
6.3.3.2	LONGUEUR DES FLOTTANTS	218
6.3.3.3	TAUX DE RÉDUCTION DE LA LONGUEUR DES ARBRES : THÉORIE ET OBSERVATIONS	219
6.3.3.4	DIAMÈTRE DES FLOTTANTS	220
6.3.4	BILAN DES FLUX DE BOIS FLOTTANT	222
7	ÉVOLUTIONS PRÉVISIBLES DES COURS D'EAU, PRINCIPES D'AMÉNAGEMENT ET CONNAISSANCE DU RISQUE.....	226
7.1	DETERMINATION DES EVOLUTIONS PREVISIBLES DES COURS D'EAU TORRENTIELS A COURT OU MOYEN TERMES.....	226
7.2	PRINCIPES D'AMENAGEMENT ADAPTES AU CONTEXTE TORRENTIEL	229
7.2.1	PREAMBULE	229

7.2.2	PRINCIPES GENERAUX DE LA DEMARCHE D'ETUDES A ENGAGER.....	230
7.2.2.1	NECESSITE D'UNE APPROCHE GLOBALE D'AMENAGEMENT.....	230
7.2.2.2	ETUDES HYDRAULIQUES APPROFONDIES A ENGAGER IMPERATIVEMENT	231
7.2.3	GRANDS PRINCIPES DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES POST-CRUE POUR UN REAMENAGEMENT PLUS RESILIENT	231
7.2.3.1	PRINCIPE D'AMENAGEMENT N°1 – CONSERVER OU AMENAGER UNE SECTION D'ECOULEMENT SUFFISANTE	232
7.2.3.2	PRINCIPE D'AMENAGEMENT N°2 – PRESERVER OU AMENAGER DES ZONES DE REGULATION DE TRANSPORT SOLIDE	239
7.2.3.3	PRINCIPE D'AMENAGEMENT N°3 – AUGMENTER LA PORTEE DES OUVRAGES DE FRANCHISSEMENT.....	241
7.2.3.4	PRINCIPE D'AMENAGEMENT N°4 – PROTEGER LES ENJEUX A PROXIMITE DES COURS D'EAU	242
7.2.3.5	PRINCIPE D'AMENAGEMENT N°5 – TRAITER PREVENTIVEMENT LES FLOTTANTS QUI MENACERAIENT ENCORE D'ETRE ARRACHES	243
7.2.4	RECOMMANDATIONS POUR LE REAMENAGEMENT DES TRAVERSEES URBAINES.....	244
7.2.4.1	REAMENAGEMENT DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE DE TENDE.....	245
7.2.4.2	REAMENAGEMENT DE LA ROYA ET DE LA BIEUGNE DANS LA TRAVERSEE DE SAINT DALMAS DE TENDE.....	249
7.2.4.3	REAMENAGEMENT DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE DE FONTAN	250
7.2.4.4	REAMENAGEMENT DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE DE BREIL-SUR-ROYA.....	251
7.2.5	RECOMMANDATIONS COMPLEMENTAIRES POUR LA CONCEPTION ET LE DIMENSIONNEMENT DES PROTECTIONS DE BERGES	251
7.2.5.1	CALAGE DES NIVEAUX DES OUVRAGES DE PROTECTION	251
7.2.5.2	PROTECTION PARAFOUILLE	253
7.2.5.3	TYPES DE PROTECTIONS	254
7.3	CONNAISSANCE DU RISQUE INONDATION – COMPARAISON DE L'EMPRISE DE LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020 AVEC LES CARTOGRAPHIES EXISTANTES	256
7.3.1	COUVERTURE DU TERRITOIRE IMPACTE PAR LES CARTES EXISTANTES	256
7.3.2	EMPRISE DE LA ZONE IMPACTEE PAR RAPPORT AU PPR INONDATION SUR LE TORRENT DU CAÏROS.....	256
7.3.3	EMPRISE DE LA ZONE IMPACTEE PAR RAPPORT A L'AZI A BREIL-SUR-ROYA, FONTAN ET TENDE.....	257
7.3.4	EMPRISE DE LA ZONE IMPACTEE PAR RAPPORT A L'EAIP SUR L'ENSEMBLE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	261
7.3.5	QUELS ENSEIGNEMENTS ?	263

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le 2 octobre 2020, les Alpes-Maritimes ont subi, lors du passage de la tempête Alex, un épisode méditerranéen exceptionnel qui s'est traduit par de très forts cumuls pluviométriques, avec des records absolus de pluviométrie observés en Tinée, en Vésubie et en Roya. 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.

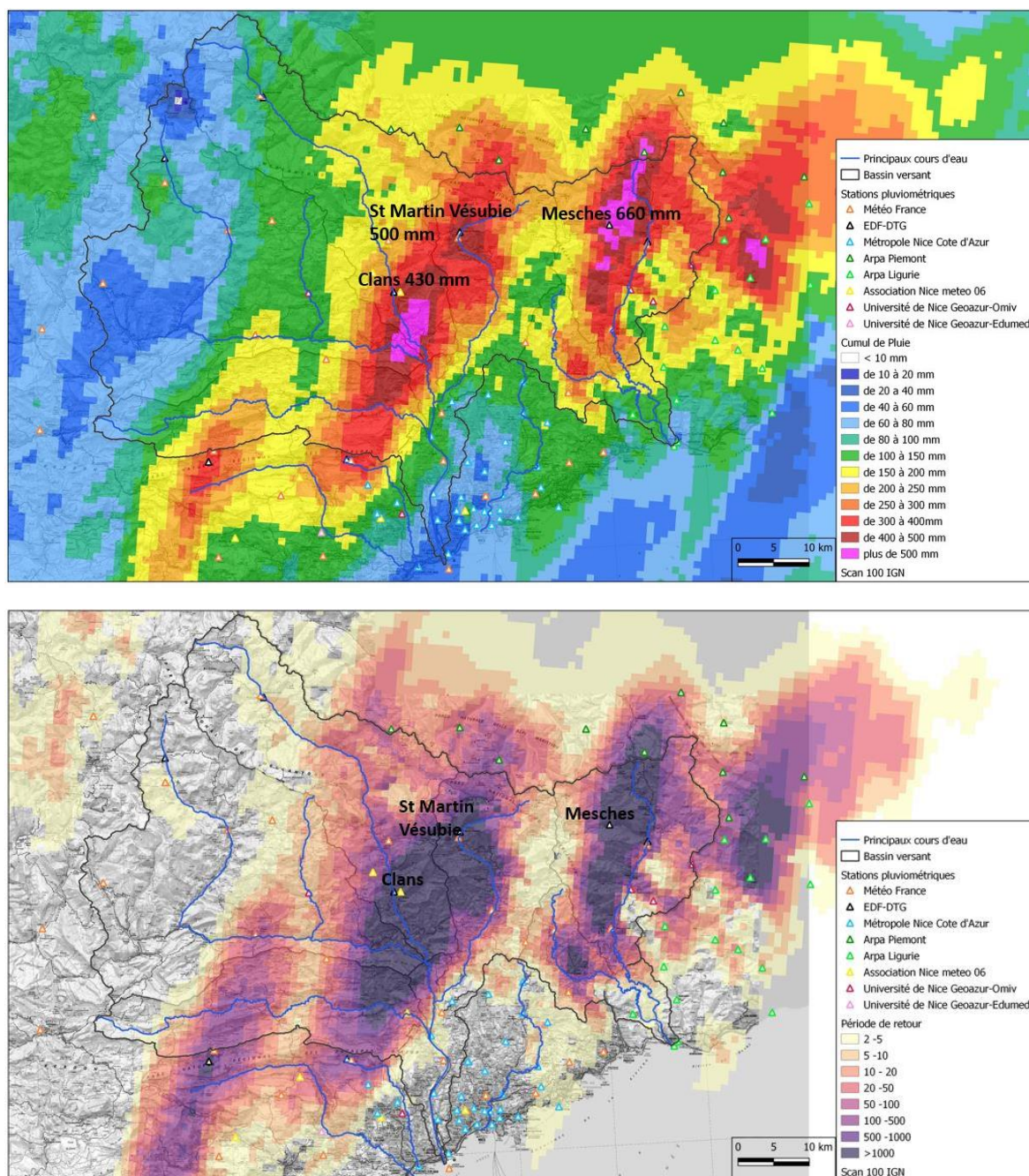


Figure 1 : Cumul maximal de pluie sur 24h au cours de l'événement « Tempête Alex » dans les Alpes-Maritimes et qualification fréquentielle de la lame d'eau sur 12h (Source : CEREMA, RETEX technique – Volet Hydrologie)

Si la période de retour de la crue du 2 octobre 2020 est difficile à approcher du point de vue des débits de pointe, du fait des évolutions morphologiques généralisées qui, sur les hautes vallées, n'ont pas permis de calcul hydraulique suffisamment fiable des débits, on peut tenter d'estimer cette période de retour par une approche géomorphologique et historique. Les éléments de cette réflexion font l'objet d'une note technique jointe en Annexe 1.

Cette approche simple se base sur l'idée suivante : *la probabilité empirique annuelle qu'une vallée donnée soit dévastée par une crue torrentielle est difficile à quantifier à l'échelle de la vallée, le phénomène étant trop rare. Il est par contre possible de l'estimer régionalement en comptant le nombre N d'épisodes de ce type sur une période donnée (par exemple sur 1920-2020, durée D = 100 ans) et sur un territoire donné élargi (par exemple Alpes et Pyrénées, nombre de vallées = M). La probabilité empirique est alors estimée par $P=N/(D \times M)$ et la période de retour $T=1/P=(D \times M)/N$.*

Ainsi, faisant le rapport, sur le siècle écoulé, du nombre d'épisodes comparables à cet événement (1), sur le nombre de vallées montagnardes de même échelle que la Vésubie et la Roya, susceptibles d'être impactées par des phénomènes torrentiels de cette intensité (2), on obtient une estimation de sa probabilité d'occurrence qui correspond à une période de retour comprise entre 600 ans et 1000 ans.

- (1) Épisode ayant entraîné des changements morphologiques majeurs et d'importants dégâts au bâti et aux infrastructures, sur un linéaire étendu (supérieur à plusieurs dizaines de km) : 8 à 9 épisodes ;
- (2) Cours d'eau supérieur à 25 km de linéaire, de pente supérieure à 0,5% ou 1%, en contexte de forçage hydrologique de type méditerranéen ou retour d'est : 49 à 94 vallées.

Compte tenu de l'ampleur du phénomène et de ses conséquences, et notamment de l'intensité des phénomènes hydrologiques et morphologiques observés, la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes a diligenté un retour d'expérience technique approfondi, en complément du retour d'expérience prévu par le plan ORSEC départemental. L'objet de ce retour d'expérience est de capitaliser les enseignements tirés de l'événement, afin de les mettre à profit pour améliorer les dispositifs de prévention des risques, de gestion de crise et de reconstruction.

Le retour d'expérience technique (RETEX) comprend un volet hydrologique, coordonné par le CEREMA, et un volet hydro-sédimentaire et morphologique « crue torrentielle », coordonné par l'ONF-RTM, en lien avec l'INRAE. Le volet « crue torrentielle » a été dimensionné au lendemain de l'événement pour répondre au besoin de caractérisation et de compréhension des phénomènes, et d'anticipation, dans la mesure du possible, de l'évolution prévisible des cours d'eau. Il répond également aux défis immédiats posés par la gestion de la crise, avec un porter à connaissance rapide des risques, la mise en place de mesures de sauvegarde et le partage de principes d'aménagement adaptés au contexte torrentiel.

Les enjeux de ce retour d'expérience, qui a aussi pour objet de proposer des éléments clés pour définir les *scenarii* de référence dans les futurs PPRI, exigeaient un rendu au plus tard dans l'année 2021. Le choix a donc été fait de cibler le volet complet « crue torrentielle » sur les seules vallées de la Roya et de la Vésubie, qui ont subi des changements morphologiques majeurs, sous la forme de deux rapports distincts pour tenir compte des spécificités de chaque territoire. Sur la vallée de la Tinée ainsi que la moyenne vallée du Var, également impactées par l'épisode, des analyses ont été réalisées en fonction des besoins de la gestion post-crise, mais de manière plus ponctuelle : elles ne sont pas intégrées au présent retour d'expérience.

Le retour d'expérience technique ouvre des champs d'analyse et d'exploration qui relèvent d'un temps plus long et intéressent d'ores et déjà le monde de la recherche scientifique. Nous avons donc veillé à coordonner nos réflexions avec les chercheurs intervenant dans les domaines concernés.

Le présent rapport établit le retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 pour la vallée de la Roya.

1.1 SITUATION

Le bassin versant de la Roya est un bassin transfrontalier situé à l'extrémité Sud-Est du territoire national dans le département des Alpes-Maritimes (06). Le bassin de la Vésubie, également très impacté par la crue Alex, borde le bassin de la Roya à l'Ouest.

Les principales communes du bassin versant sont, d'amont en aval, Tende, La Brigue, Fontan, Saorge, Breil-sur-Roya et Sospel. Le bourg de Breil-sur-Roya est situé à 60 km au Nord-Est de Nice.

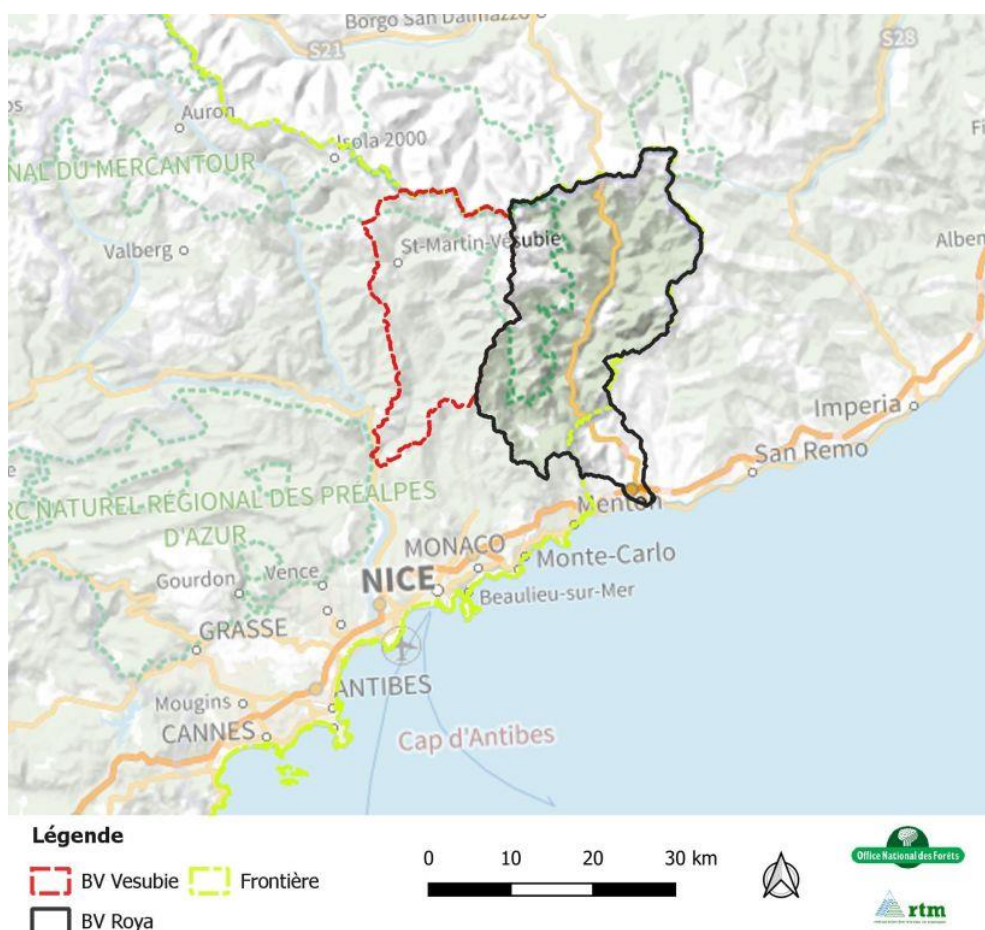


Figure 2 : Carte de situation du bassin versant de la Roya

2 DONNÉES DE RÉFÉRENCE UTILISÉES

Topographie

EDF, 2002	EDF, 2002. Retenue de Breil. Relevé bathymétrique de Juillet 2002. Format numérique pdf.
EDF, 2015a	EDF, 2015. Retenue de Breil. Bathymétrie d'avril 2015. Format numérique pdf.
EDF, 2015b	EDF-HYDROSTADIUM, 07/2015. Aménagement de Breil-sur-Roya. Exécution des travaux. Levé topographique après travaux. Plan en format pdf.
IGN, 2020	IGN, 10/2020. Levé Lidar couvrant la vallée de la Vésubie et de la Roya.

Etude antérieures : Hydrologie (HY) Hydraulique (HYA), Transport solide (TS), Géomorphologie (GEO)

SIEE, 2003	SIEE, 2003. Etude hydraulique et transport solide sur la Roya. Retenue de Breil. Renouvellement de concession. 63 pages. Maitre d'ouvrage : EDF	HYA
BRGM, 2005	BRGM, 2005. Bassin versant de la Roya. Etude de l'aléa inondation à l'échelle 1/25 000ème et compléments à la cartographie de l'aléa mouvements de terrain à 1/50 000ème. Ref BRGM/RP-54080-FR-Novembre 2005	HYA
BRGM, 2006	BRGM, 2006. Bassin versant de la Roya. Etude de l'aléa inondation à l'échelle 1/25 000ème. Synthèse du rapport BRGM/RP-54080-FR-Septembre 2005. Projet INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA EUROBASSIN. 20 pages.	HYA
ETRM-SOGREAH, 2006	ETRM-SOGREAH, 2006. Etude de l'amélioration du transport solide dans la retenue de Breil. Février 2006. 64 pages. Maitre d'ouvrage : EDF.	HYA
EDF, 2006a	EDF, 2006. Synthèse étude hydraulique et transport solide dans la retenue de Breil (étude sur modèle réduit). Etude piloté par EDF-CIH. Réalisée par ETRM-SOGREAH. Projet INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA EUROBASSIN. 14 pages.	HYA
EDF, 2006b	EDF, 2006. Synthèse des études d'hydrologie générale de la Roya réalisées à St-Dalmas, Breil et Vintimille. Projet INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA EUROBAS-SIN. 10 pages.	HY
EDF, 2006c	EDF, 2006. Crues extrêmes dans le bassin de la Roya. Ref : D4163/RAP/2006-00398-A. Projet INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA EUROBASSIN. 12 pages.	HY
Univ. Gênes, 2019	Université de Gênes. Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale. 08/2019. Evaluation du débit pour une période de retour fixée. Modélisation hydrologique. 35 pages. Projet INTERREG ALCOTRA 2014-2020 CONCERT-EAUX	HY
Geopeka-Egis, 2021	GEOPEKA-EGIS, 01/2021. Etude des cours d'eau des Alpes Maritimes visant la Restauration du fonctionnement hydromorphologique et la prévention des risques d'inondation. Phase 1 : Etat des lieux du fonctionnement du bassin versant de la Roya. 73 pages. Maitre d'ouvrage : SMIAGE. Etude stoppée suite à la tempête Alex.	HY GEO

Historique de crues

[1]	Rapport GEOPEKA-EGIS, 2021 (cf. Etudes antérieures)
[2]	Base de données RTM – d'après recherche documentaire ACTHYS
[3]	Banque hydro http://www.hydro.eaufrance.fr/
[4]	Mougin P., 1931, La Restauration des Alpes, Paris : Impr. Nationale.

- [5] ASPB, 2015, Eléments historiques pour la connaissance des berges alluvionnaires du village de Breil-sur-Roya depuis 1890
- [6] Extrait quotidien L'Eclaireur du 23/11/1926. Archives Départementales des Alpes Maritimes.
- [7] Rapport BRGM, 2005 (cf. Etudes antérieures)
- [8] Archives RTM. Extrait d'ouvrage (référence non renseignée) photocopié avec photos et description de la crue de 1926
- [9] Service RTM 06, Note sur les phénomènes torrentiels survenus dans les Alpes Maritimes de 13/09/1993

Documents divers

- BRGM,SCP, 2006 BRGM, SCP, 2006. Faisabilité de la mise en place d'un système d'annonce des crues sur la Roya. Etude hydraulique. Analyse des temps de propagation des crues. Projet INTERREG III A 2000-2006 ALCOTRA EUROBASSIN. 14 pages.
- EDF, 2015b EDF, 2015. Chantier 2012/2014. Réhabilitation de l'aménagement de Breil-sur-Roya. 56 pages.

3 PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA

3.1 PRESENTATION GENERALE

La Roya est une rivière torrentielle qui prend sa source au pied du col de Tende et se jette dans la mer Méditerranée sur la commune de Vintimille en Italie.

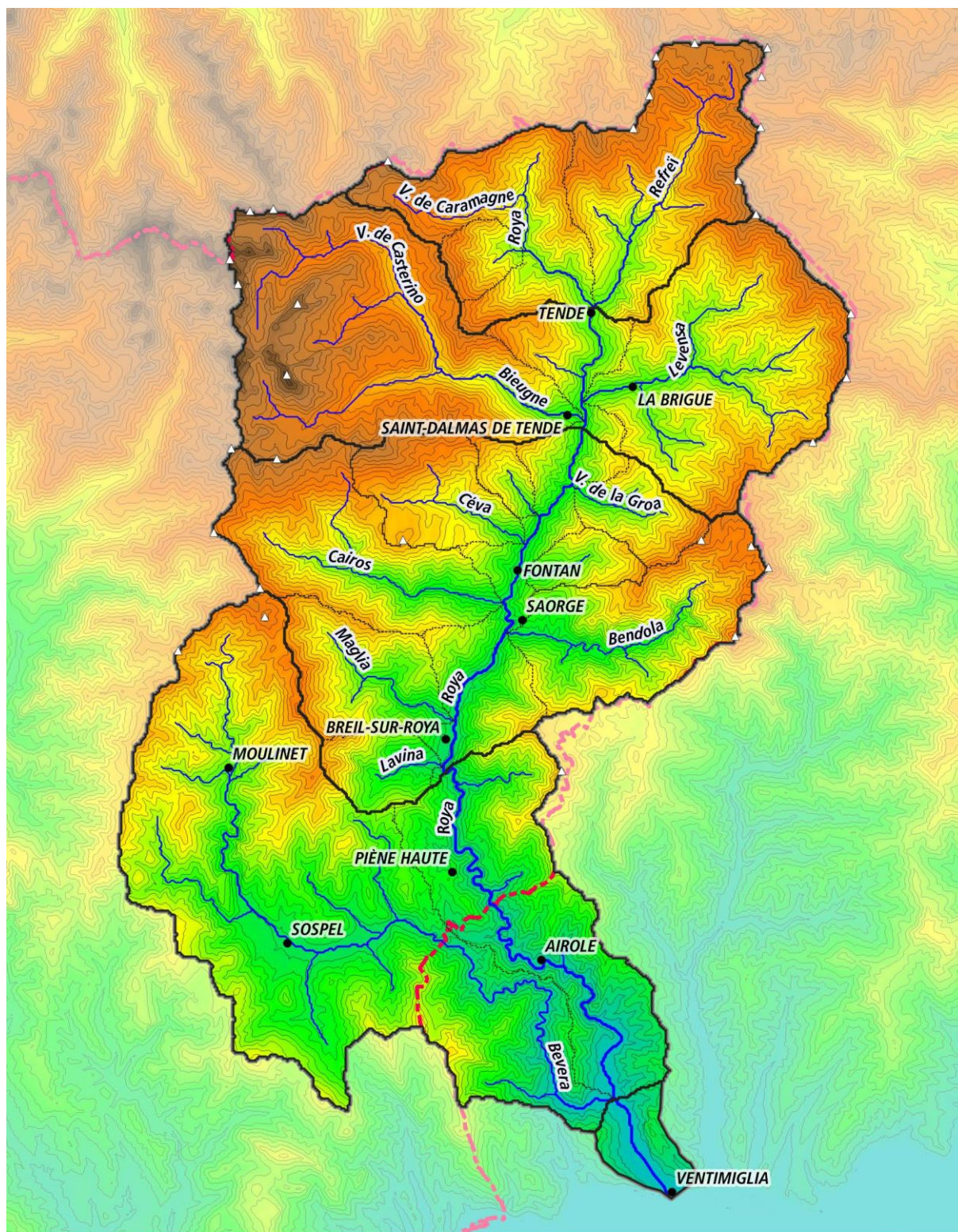
Son bassin versant, d'une superficie totale de 671 km², est transfrontalier, avec 89 % de la surface drainée en France et 11% en Italie. Il présente une orientation générale Nord-Sud. Il est bordé à l'Ouest par le bassin versant de la Vésubie et à l'Est par le bassin de la Nervia.

Le relief est escarpé avec une pente moyenne élevée de 56 %. Il s'agit d'un trait caractéristique de la Roya avec une vallée principale en « V » étroite, de très nombreux passages en gorges, et quelques zones plus larges correspondant aux implantations des principaux bourgs de la vallée : Breil-sur-Roya, Fontan, Saint-Dalmas de Tende et Tende.

Le point culminant du bassin de la Roya, à 2935 m d'altitude, est le mont du Grand Capelet. Il est situé au Nord-Ouest dans le sous-bassin versant de la Bieugne. Ce dernier comprend d'autres grands sommets (Mont Bego 2 872 m, Cime Est de l'Agnel 2 852 m, Cime Viglino 2 910 m...) ainsi que de très nombreux lacs, dont huit situés entre 2 100 et 2 430 m d'altitude qui sont exploités par EDF et alimentent les centrales hydroélectriques de la vallée de la Roya. L'altitude moyenne du bassin de la Bieugne est de 2 014 m. Elle est nettement supérieure aux altitudes moyennes des autres principaux sous-bassins de la Roya. L'ensemble de ces caractéristiques peuvent expliquer une tendance à des cumuls pluviométriques nettement plus intenses dans ce sous bassin, aussi bien à l'échelle annuelle que lors d'événements pluviométriques remarquables comme la tempête Alex. On trouvera en [Annexe 2](#) une compilation des principales caractéristiques morphométriques des sous-bassins versants de la Roya.

Le long de son parcours, la Roya reçoit les eaux de nombreux affluents (cf. Figure 3 et Figure 4). D'amont en aval, les principaux contributeurs sont :

- Le Refreï, affluent rive gauche de la Roya, confluent en amont du bourg de Tende et dont le bassin versant présente une superficie de 47 km². A noter que ce bassin présente une superficie supérieure à celle du sous-bassin de la Roya en amont du confluent (40 km²). Cependant, en raison de l'existence de terrains karstiques dont les émergences se trouvent en Italie, 10km² au moins ne contribuent pas à l'alimentation du cours d'eau.
- La Levensa, affluent rive gauche de la Roya, dont le bassin versant présente une superficie de 68 km² et qui conflue avec la Roya en amont de St-Dalmas de Tende.
- La Bieugne, affluent rive droite de la Roya à St-Dalmas de Tende d'une superficie de bassin versant de 70 km². Elle conflue avec la Roya 1,0 km en aval de la Levensa. La superficie du bassin versant de la Roya augmente ainsi considérablement dans la traversée de St-Dalmas, passant de 99 à 253 km² entre l'amont de la confluence avec la Levensa et l'aval de la confluence avec la Bieugne.
- Le Cairos (42 km²) et la Bendola (38 km²), respectivement affluents rive droite et rive gauche, qui confluent avec la Roya à 1,7 km d'intervalle en amont et en aval du village de Saorge.
- La Bévéra, affluent rive droite de la Roya. Il s'agit du principal sous bassin versant de la Roya avec une superficie de 160 km². Elle rejette ses eaux dans la Roya en Italie entre Breil-sur-Roya et Vintimille.



Légende

- Bassins versants
- Frontière
- Réseau hydrographique
- △ Sommets



Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Roya

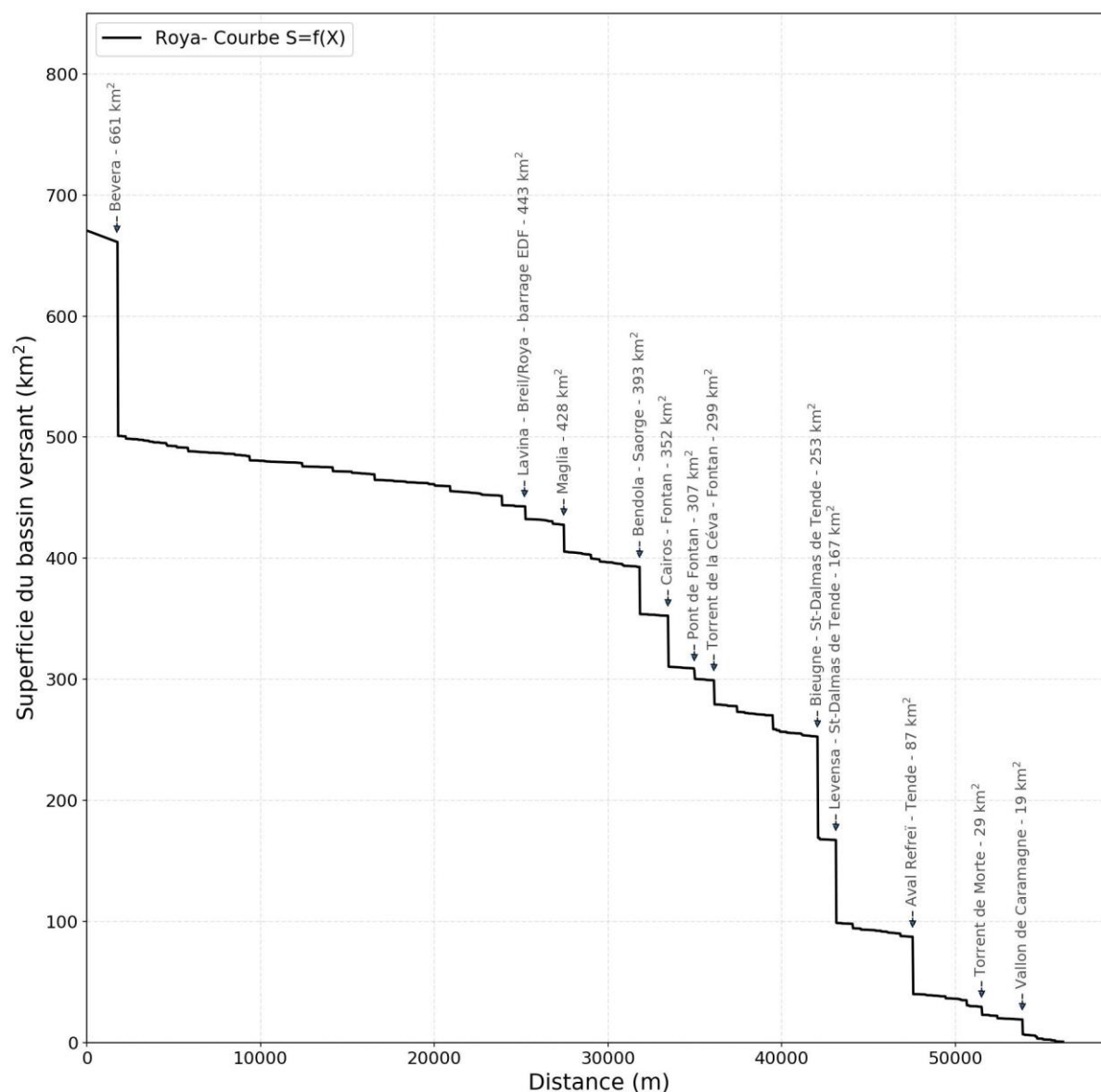


Figure 4 : Evolution de la superficie du bassin versant de la Roya en fonction de la distance depuis l'aval de la confluence avec la Bévéra. Les annotations positionnent les principaux affluents de la Roya. Les superficies mentionnées dans les annotations correspondent aux superficies du bassin de la Roya en aval de chaque confluence.

Cours d'eau	Superficie (km ²)	Z _{min} (m)	Z _{max} (m)	Z _{moy} (m)	Pente (%)
Roya amont Refreï	40,0	800	2755	1593	59,1
Refreï	47.1	800	2650	1689	55,4
Levensa	68.5	676	2483	1356	57,6
Bieugne	70.0	646	2935	2014	54,2
Ceva	19.8	436	2455	1548	49,5
Cairos	42.1	388.	2685	1440	60,7
Bendola	38.9	350	2135	1196	69,3
Maglia	22.3	300	1981	1193	63,6
Lavina	10.3	280	1839	906	61,1
Bévéra	159.6	20	2078	886	56,6

Tableau 1 : Superficies, altitudes caractéristiques et pente moyenne des principaux sous bassins de la Roya

3.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Le bassin versant de la Roya est constitué pour partie de terrains métamorphiques, au nord-ouest du bassin versant, essentiellement au niveau du vallon de la Valmasque, tout le reste du bassin versant reposant sur des terrains sédimentaires d'âges variés (du permien au crétacé).

L'ensemble Nord-Ouest, qui correspond au massif de l'Argentera-Mercantour, est situé dans la zone externe des Alpes. Il tire son origine des deux périodes de formation des chaînes varisque, chaîne Hercynienne (-420 à -300 Ma) et alpine (-200 Ma à aujourd'hui). La chaîne des Alpes constitue une chaîne de collision continentale résultant de l'affrontement de la plaque Eurasie au nord et de la plaque Afrique au sud qui a débuté au cours de l'ère cénozoïque, avec une phase d'édification des reliefs (orogénèse) depuis l'Oligocène' (-35 à -4Ma). Le massif Argentera-Mercantour correspond à un élément de la plaque européenne constitué de roches anciennes appartenant au cycle orogénique varisque.

Dans le bassin de la Roya, en Valmasque, ce sont essentiellement les migmatites qui composent cet ensemble nord-ouest. Ces roches se sont formées lors de la formation de la chaîne varisque, où s'est produit la collision entre deux continents (Gondwana et Iberia-Armorica). L'enfouissement de la croûte continentale a provoqué la fusion de celle-ci, et les magmas riches en silice ainsi créés se sont ensuite refroidis lentement et ont cristallisé pour former des migmatites (M_Z). Ces roches sont très résistantes à l'érosion et forment donc les plus hauts sommets du bassin versant. Cela explique aussi que les glaciers locaux du Quaternaire n'ont pu éroder efficacement ces roches : elles forment alors des verrous et des gorges (gorges de Valmasque, Les Mesches, défilé Vie-vola-Tende).

En périphérie du noyau de migmatites, on trouve une succession de roches sédimentaires, composées de calcaires, marnes, dolomies, cargneules et gypse (C, J, t), d'origine marine, et des roches sédimentaires d'origine continentale (dépôts de grès et pélites) mises en place en bordure de l'océan alpin. Les grès et arkoses (r3) sont situés entre ces deux ensembles. On trouve aussi, au nord-est et à l'est, des nappes de flysch (eF) datées du Tertiaire, qui correspondent à des marnes et calcaires, en place ou charriés depuis le nord (Italie).

Au cours du Pléistocène (anciennement quaternaire), soit depuis -4 à -3Ma, d'importantes variations climatiques ont provoqué de longs cycles de refroidissement de la Terre (100 000 ans) permettant la formation de puissants glaciers. Principaux agents d'érosion et de transport dans les vallées alpines, les débris et roches issus des parois rocheuses sont alors transportés, s'accumulant pour former ensuite des moraines, présentes dans les fonds de vallées. Les versants non englacés produisent beaucoup de matériaux gravitaires tels les éboulis. Moraines et éboulis ont été fortement remobilisés lors des crues du 2 octobre.

La courte période de réchauffement actuelle, l'Holocène (depuis 15 000 ans), est propice à la formation de dépôts alluviaux dans les vallées, et de cônes de déjections torrentiels sur les petits cours d'eau affluents. Les plus gros apports et évolutions morphologiques ont lieu lors de phénomènes pluvieux extrêmes, telles les crues du 02 octobre 2020.

Sur le bassin de la Roya, les formes géomorphologiques dominantes sont :

- Les vallées glaciaires à l'Ouest (Minière, Casterino, Caramagne et, dans une moindre mesure, Céva, Cairos), avec des surcreusements et élargissements locaux lorsque les formations géologiques le permettent (marnes, schistes, pélites), et au contraire des verrous et gorges dans les roches les plus résistantes (migmatites, calcaires) :
 - Les hauts sommets du Mercantour (Caramagne, Valmasque, Merveilles) ont engendré une accumulation de neige plus importante et continue lors des glaciations successives, en particulier au Würm, dont les empreintes laissées sur le terrain sont les plus fraîches aujourd'hui : grande moraine latérale du glacier de Caramagne, minée de dolines thermokarstiques, moraine terminale du glacier de la Bieugne qui vient obstruer la vallée de la Roya à St Dalmas, auge glaciaire du Cairos...
 - Les cônes de déjection et les remplissages alluviaux ont ré-occupé le terrain après le retrait des glaciers, sauf pour le vallon de Caramagne, totalement obstrué par des moraines et glaciers rocheux.
- Les karsts tabulaires du haut Refrei (Marguerais) et du Cairos/Céva (mega-dolines, poljés), les massifs karstiques des calcaires dolomitiques du Trias (Plan Tendasque, Morte, Nauque) ;
- Des vallées en gorges, avec cluses rocheuses et fonds de vallées peu larges, pour la Roya et ses affluents orientaux. L'empreinte glaciaire y est faible voire inexistante.

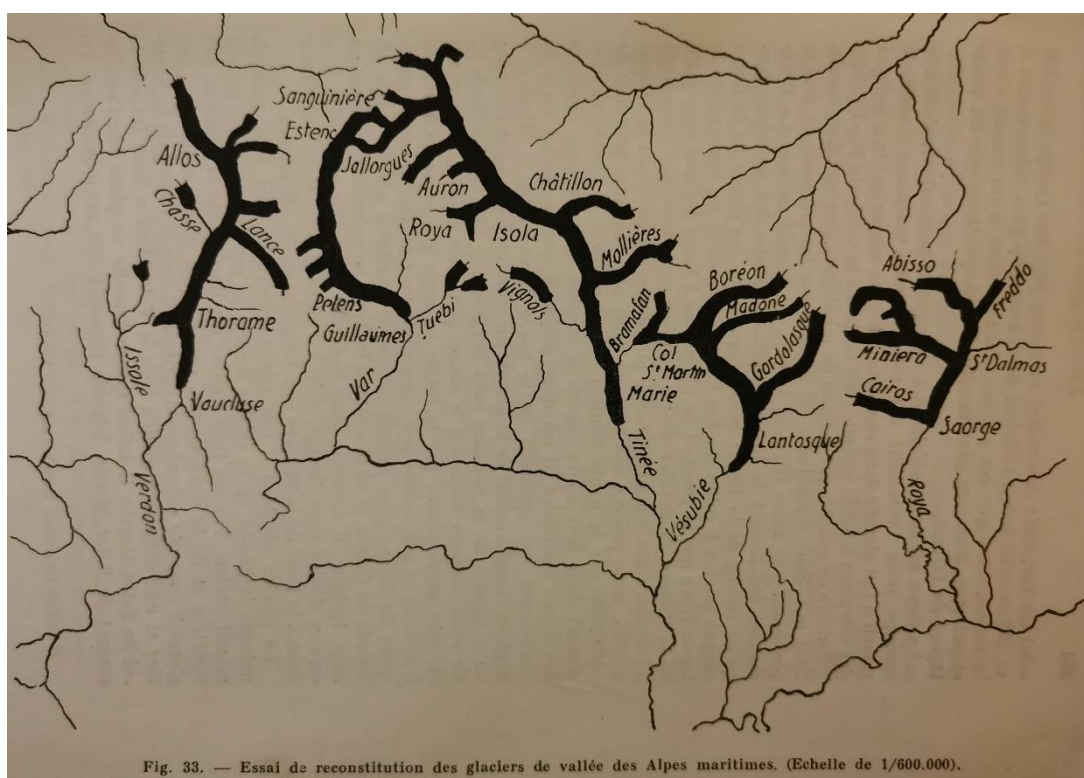


Fig. 33. — Essai de reconstitution des glaciers de vallée des Alpes maritimes. (Echelle de 1/600.000).

Figure 5 : Reproduction de la carte des glaciers du maximum glaciaire du Würm (Source : Blanchard, 1949)

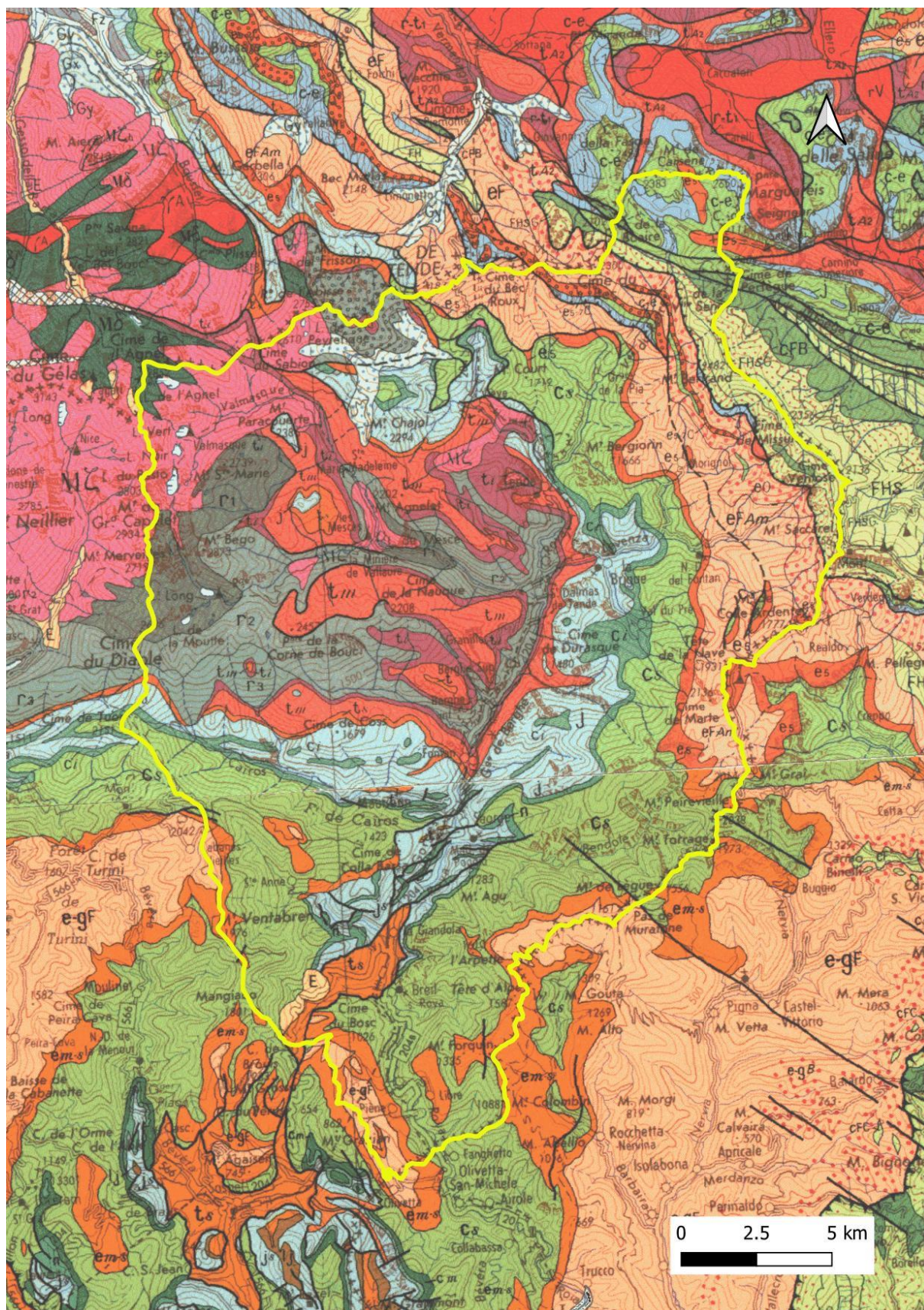


Figure 6 : Extrait de la carte géologique avec limite du bassin versant de la Roya (BRGM)

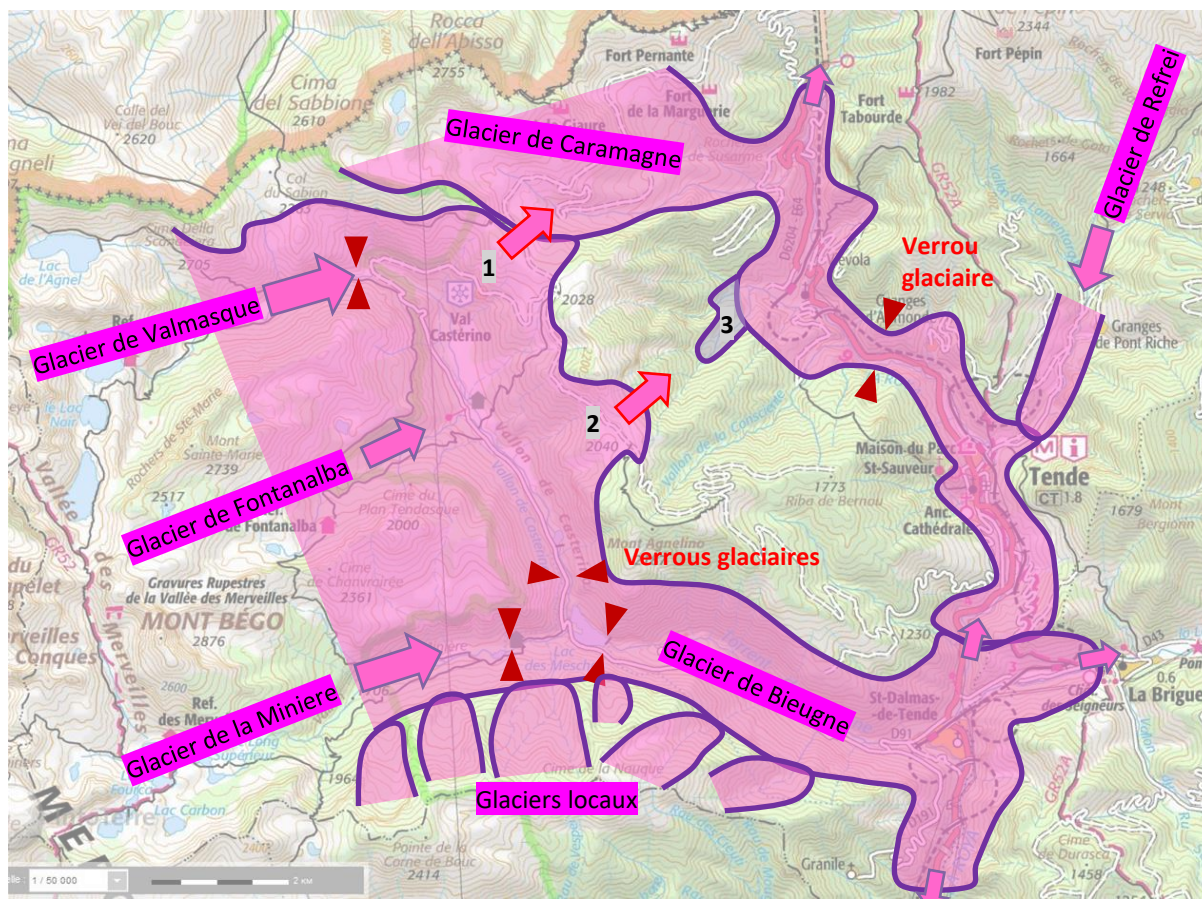


Figure 7 : Morphologie glaciaire schématique de la haute Roya.

(1) Transfluence du glacier de Valmasque vers le glacier de Caramagne.

(2) Transfluence vers le vallon de la Morte, avec dépôts fluvio-glaciaires (3) importants au contact du glacier de la Roya formant barrage

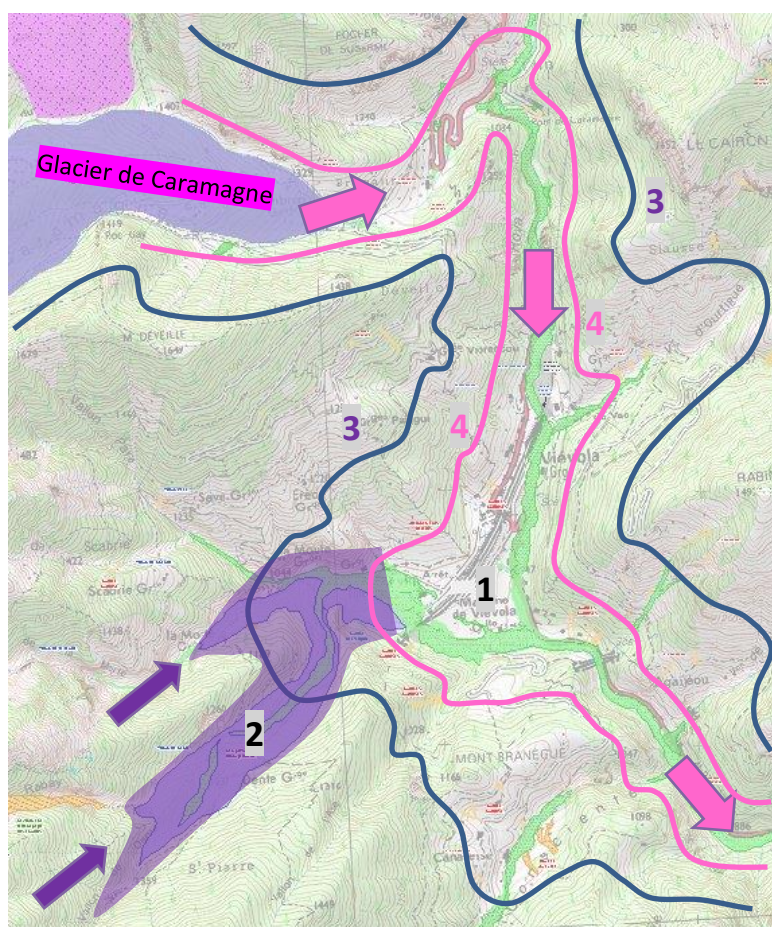


Figure 8 :

L'ombilic glaciaire de Vievola (1) et le remplissage fluvio-glaciaire de la Morte par les apports des eaux de fonte du glacier de Valmasque (2)

Maximum glaciaire (3)

Fin-glaciaire (4)



Figure 9 : La vallée glaciaire en auge du Cairos (Source : Blanchard, 1949)

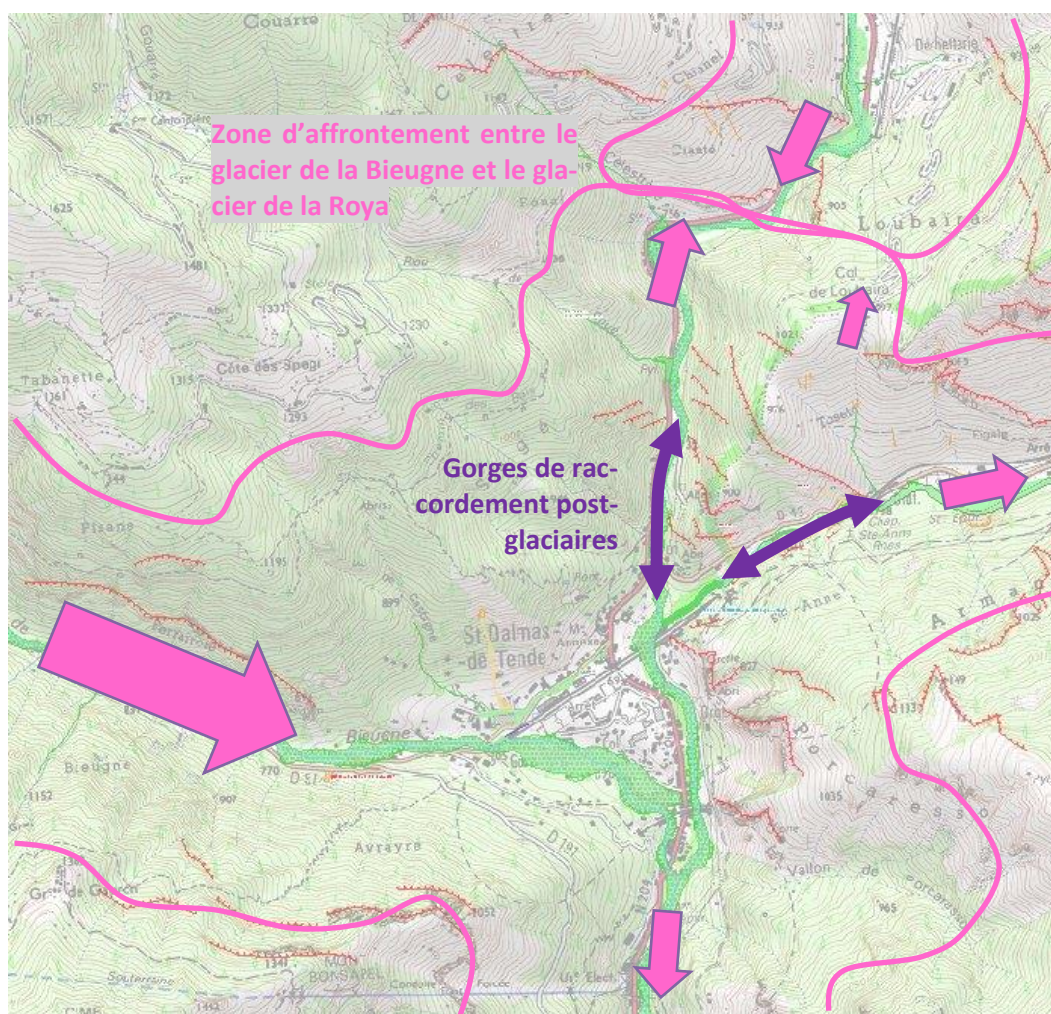


Figure 10 : L'Ombilic glaciaire de St-Dalmas de Tende

3.3 HISTORIQUE DES CRUES

On présente dans le tableau qui suit un recensement des principales crues historiques survenues dans le bassin versant de la Roya. La liste n'est pas exhaustive. Il n'a été conservé que les crues marquantes, de débit supérieur à 500 m³/s à Breil-sur-Roya et/ou avec des descriptions de crue indiquant des dégâts notables. Les sources mentionnées dans le tableau sont indiquées au chapitre 2 « Données de référence utilisées ».

L'analyse des descriptions d'évènements révèle tout d'abord que la crue survenue le 2 octobre 2020 suite à la tempête Alex est sans précédents depuis au moins deux siècles en termes d'impacts. En effet, toutes les crues antérieures de la Roya n'ont causé que des dégâts limités ou très localisés.

La principale crue de la Roya survenue antérieurement à la tempête Alex est celle du 21 novembre 1926. A Breil-sur-Roya, le niveau des écoulements avait atteint la sous poutre de l'ancien pont Charabot. Cet ouvrage avait à l'époque une structure métallique en arc suspendu sans piles intermédiaires (cf. Photo 1). La crue, dont le débit de pointe a été estimé à 900 m³/s, avait causé l'inondation en rive droite des jardins Isola (zone aujourd'hui urbanisée) ainsi que d'une usine, d'un moulin et d'une maison. Par ailleurs, la route nationale avait été coupée en amont de Fontan. Il n'a pas été retrouvé trace de descriptions de dégâts dans la partie amont du bassin versant.

Une autre crue très intense est survenue plus récemment le 13 septembre 1993. Mais elle n'avait réellement affecté que le sous bassin versant de la Bieugne. Le pont de Saint-Dalmas avait été détruit, et la route menant au barrage des Mesches coupée en plusieurs endroits. La crue faisait suite à des précipitations de 140 mm sur une durée de 2 heures seulement, la lame d'eau étant majoritairement concentrée dans le bassin de la Bieugne.

On observe par ailleurs que toutes les crues recensées de la Roya sont survenues entre le mois de septembre et le mois de décembre, avec 87% des évènements en octobre et novembre (cf. figure suivante). La crue Alex n'est donc pas atypique en termes de saisonnalité et vraisemblablement en termes de type d'évènement météorologique à l'origine des écoulements. La crue du 13 septembre 1993 est par contre vraisemblablement atypique, avec des précipitations courtes et intenses survenues dans le haut bassin de la Bieugne.

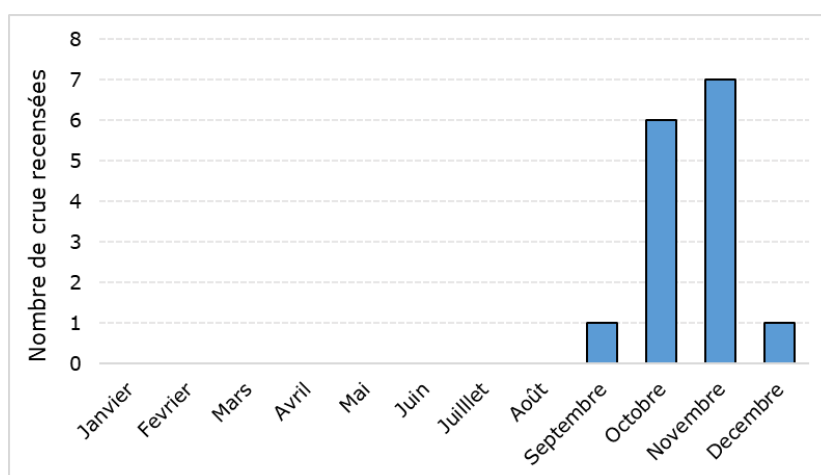


Figure 11 : Répartition mensuelle des crues recensées de la Roya (crue Alex intégrée à l'analyse)

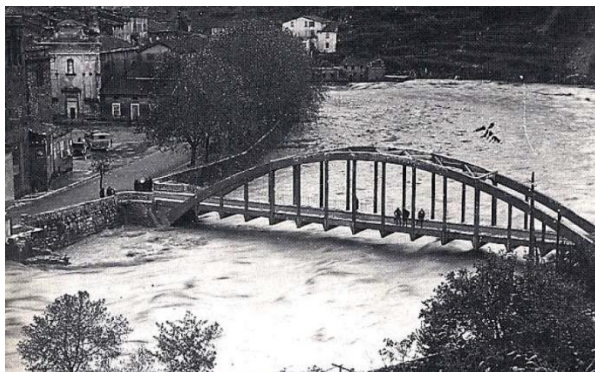
Source	Date	Description
[5]	12/10/1836	[5] : <u>Breil-sur-Roya</u> « une très forte crue détruisit une ou deux constructions sur l'arrière de la « plage Biancheri », et l'on constata que la digue de l'église n'assurait pas une protection suffisante dans ces circonstances extrêmes. La confrérie des Pénitents blancs demanda à la communauté d'entreprendre des travaux de soutènement le long de la chapelle Sainte Catherine, la crue ayant endommagé le sol à proximité de l'édifice. La construction d'un mur-digue protégeant les bâtiments des crues de la Roya, en ligne droite entre la Miséricorde et la Sainte-Catherine, fut projetée en 1848 (plan non reproduit ici, conservé aux archives départementales des Alpes-Maritimes), mais le mur sera finalement construit « en arc de cercle » à son emplacement actuel, « plus au large », en 1854 »
[2,5]	27/10/1882	[2] : Crue mesurée à 6,30 m au-dessus de l'étiage au pont inférieur de <u>Breil</u> chef-lieu » [5] : le document indique la date du 27/08 non 27/10. « Une forte crue de la Roya a endommagé les enrochements qui protégeaient la base de l'ancien mur rempart entre le pont supérieur et l'église. Ce mur servait de fondation à plusieurs bâtiments qui furent menacés. Un projet de travaux pour la protection du village fut lancé (source : Charles Botton, Histoire de Breil et des Breillois, Ref. ACB registre n°4, délibération n°259). »
[2]	08/11/1906	[2] : « Crue légèrement plus forte que celle de 1914. Cependant elle provoque moins de dégâts ».
[2]	30/10/1914	[2] : « Crue de la Roya mesurée de 5,30 m à la station de jaugeage, débit estimé à 500 m³/s ».
[1,2,4,5,6,8]	21/11/1926	[1] : « Crue centennale, $Q_p=900$ m³/s atteint à hauteur de la commune de <u>Breil</u> : la crue provoque un ralentissement des travaux du barrage. Le niveau de l'eau atteint le plancher des ponts inférieur et Charabot au sein de la commune. » [2] : « Crue de la Roya, débit de 900 m³/s mesuré à l'usine de <u>Breil</u> ». N.B. : L'intégralité de la crue a transité par le pont inférieur de Breil. En effet, d'après l'ASPB [5] les évacuateurs de crue à l'amont du pont supérieur et l'usine de Breil ont été réalisés vers 1930. Le dossier photographique établi par EDF (2015), fait quant à lui état de la construction du barrage de Breil par la société Hydroélectricité du Sud-Est à partir de 1927. La légende de la photo 3 extraite d'un ouvrage de référence inconnue indique que le chantier de construction du barrage de Breil aurait débuté avant la crue de 1926. [4] : « En novembre 1926 la route nationale n° 205 est coupée en amont de <u>Fontan</u> pendant 10 jours. A Breil, une usine, un moulin, une maison ont eu de l'eau jusqu'au premier étage. » [5] : « La Société hydro-électrique du Sud-Est sollicitait la concession de la chute de Breil depuis 1920. La grande crue de 1926 imposa une modification du cahier des charges (notamment la réalisation des évacuateurs de crue). » [6] : « La Roya qui roulait un volume d'eau qu'on ne lui avait jamais vu a affouillé ses berges et emporté la route sur une centaine de mètres entre Fontan et la frontière italienne, au kilomètre 72 200. (...). Le village de <u>Breil</u> se trouve privé d'eau et d'électricité ». [7] : « Auberge emportée à Breil, nombreuses évacuations de maisons au lieu-dit Cazela » [8] : <u>Breil-sur-Roya</u> : « En Novembre 1926, hommes, femmes et enfants, massés du tournant de l'église au pont Inférieur, regardaient effrayés l'énorme rivière qui avait inondé la « Graveraé, des jardins du Graviras et

Source	Date	Description
		d'Isola, les rez-de-chaussée des maisons Ghirardi et Boini (actuellement derrière la poste). Le niveau des flots écumants se rapprochait du plancher des ponts Inférieur et Charabot. »
[1]	10/11/1951	[1] : « Q_p : 500 m ³ /s »
[1]	08/10/1979	[1] : « Q_p : 535 m ³ /s ». Les inondations affectent principalement la Levensa dans la commune de <u>La Brigue</u> ».
[2,7,9]	13/09/1993	[2] : « Crue de la Roya avec un débit de 500 m³/s en milieu d'après-midi et 80 m³/s vers 20 h ». [7] : « Pont de <u>St-Dalmas</u> emporté, RN 204 coupée, voie ferrée interrompue (mais rail lien unique pendant 8 jours). Evacuation d'une partie de la population de St-Dalmas, Breil et Fontan. Casterino coupé du reste du monde pendant 1 mois. Hôtel Les Mèlèzes le plus touché » [9] : « Les dégâts sont énormes. On constatera ce jour-là des précipitations de l'ordre de 140 mm. Il faut remonter au lundi 19 octobre 1959 pour en retrouver d'aussi importantes, mais à cette époque les chutes de pluie s'étaient étalées sur toute une journée, tandis que cette fois cette quantité fut atteinte en guère plus de 2 heures. En 1959, le débit du val d'Inferno avait atteint un maximum de 20 m³/s et celui du val Casterino 34 m³/s, mais ce lundi 13/09/1993, il culminait vers 15h45 au volume incroyable de 159 m³/s ! (...) Une partie des populations de St-Dalmas, Tende, Breil et Fontan sont évacuées. (...) Dès 15h30 la route qui conduit au barrage des Mesches s'effondre en plusieurs endroits, de même que le pont de la route nationale 204 situé à l'entrée de <u>St-Dalmas de Tende</u>. (...) A 13h25, avant la pluie, le niveau du barrage était à la cote de 1362,35 m (soit 6 mètres au-dessus du niveau maximum) et le débit y entrant de l'ordre de 3,2 m³/s. (...). C'est à 15h13 que le barrage qui vient d'absorber à lui seul près de 600 000 à 800 000 m³ d'eau atteint la cote de 1368,70 m déclenchant l'ouverture progressive des vannes de l'évacuateur de crue. A 15h45, en présence de 2 surveillants, le barrage atteint la cote maximale pour cette journée mémorable de 1369 m et un débit de 159 m³/s. (...). C'est enfin vers 16h00 que s'ouvre le clapet de surface d'évacuation des bois qui surnagent sur le lac. Leur nombre impressionnant donne une idée de la puissance de cette vague qui a déferlé sur la vallée des Merveilles. Jusqu'à St-Dalmas, elle n'a fait qu'augmenter en puissance et en volume en raison des fortes pluies qui l'ont suivie. Puis fort heureusement, elle s'est calmée à l'approche de Fontan et Breil, évitant ainsi des dommages plus grands encore. »
[1]	01/11/1994	[1] : « Q_p : 567 m³/s. Destruction du pont de la Bieugne dans la commune de <u>Saint-Dalmas</u> ». [7] : indique 05/11/1994. « <u>Tende</u> : route de Casterino emportée sur 100 m à hauteur des fermes de Giordano. 2 maisons évacuées à la sortie de St-Dalmas. Enrochements de la Bieugne détruits à hauteur du nouveau pont de St-Dalmas. <u>Breil</u> : inondation du camping USBTP, quelques caravanes endommagées + dommages sur les routes d'accès à la Ciavendola et à l'Omelia. <u>La Brigue</u> : voie impraticable entre La Brigue et Morignole »
[1,2,7]	07/11/1997	[1] : « Q_p : 530 m³/s. » [2] : « Inondation et érosion sur plusieurs endroits le long de la Roya : ~ 685 m au niveau du camping de Tende ; ~ 242 m au niveau du pont de l'Arbousset (commune de Breil) ; ~ 290 m au niveau du village de Breil ; ~ 300 m au niveau du camping (Commune de Breil).

Source	Date	Description
		Sur la commune de <u>Tende</u> : Le niveau d'eau s'est maintenu à quelques décimètres sous le niveau du terrain naturel. L'ancien mur en pierres sèches a protégé la berge bien qu'il ait été submergé par endroits. La pile centrale de l'ancien pont, RG de la Roya, est érigée sur un gros bloc rocheux. En cas de crue celui-ci se situe dans l'axe d'écoulement. Il occasionne donc des remous et l'inondation de la partie aval du camping. L'eau passe alors sous la 2ème arche, rive droite. Protection de berge insuffisante à rehausser. Sur la commune de <u>Breil sur Roya</u> : Au niveau du pont de l'Arbousset. Suite à la crue de novembre 94, une partie des matériaux avait été emportée par la Roya. La commune avait fait procéder à des travaux de protection insuffisants puisque l'érosion a repris. Mise en place de conteneurs pour la collecte, protections à refaire. Au niveau du village de Breil. Hauteur d'eau pompier (1 m) et serv. techn. (0,4 m). Route d'accès abîmée. Les enrochements libres (1994) n'ont pas empêché la régression de la berge. Engravement du lit expliquant les hauteurs d'eau supérieures à celles du 5 et 6/11/94. Enrochements bétonnés en RD à +0,5 m de la chaussée actuelle et réfection de l'enrobé. Au niveau du camping : protection des berges en enrochements bétonnés (RD face des chalets et caravanning- RG pour la route d'accès au droit du bâtiment USBTP) - hydrauliques indispensables (protection du bâtiment USBTP) » [7]: « <u>Breil</u> : destruction d'enrochements à l'Arbousset, dégâts matériels sur la camping USBTP, inondation du centre de secours et du garage des services techniques (incidents récurrents déjà produits en 1992 et 1995). <u>Tende</u> : érosion des berges et submersion du camping. Route communale entre lac Casterino et le hameau HS sur 100 m. »
[1]	01/11/2000	[1] : Q_p : 645 m ³ /s. La fonte des neiges, cumulée à de fortes pluies, provoque une crue et des mouvements de terrain à Breil sur Roya »
[1]	15/11/2002	[1] : Q_p : 440 à 459 m ³ /s Commentaire : valeur banque hydro de 542 m ³ /s
[2]	25/12/2013	[2] : « Effondrement du mur de soutènement de la station de lavage La Giandola de Breil. Mur de soutènement sapé à la base, affaissement de la plate-forme supportant la station de lavage. »
[3]	05/11/2014	[3] : Q_p : 661 m ³ /s.

Sources : cf. §2 données de référence. Liste non exhaustive. Il n'a été conservé que les crues marquantes, de débit supérieur à 500 m³/s à Breil-sur-Roya et/ou avec des descriptions de crue indiquant des dégâts notables

Tableau 2 : Historique de crue la Roya



▲ Photo 1 : Crue du 21/11/1926. L'eau est montée jusqu'aux sous poutres de l'ancien pont Charabot
Source : Archives RTM – Photocopie d'extrait d'ouvrage – réf. inconnue



▲ Photo 2 : Crue du 21/11/1926. En aval du pont Charabot. Source : Archives RTM – Photocopie d'extrait d'ouvrage – réf. inconnue



▲ Photo 3 : Crue du 21/11/1926. La Roya en crue a submergé le chantier du barrage de Breil.
Source : Archives RTM – Photocopie d'extrait d'ouvrage – réf. inconnue



▲ Photo 4 : Crue du 13/09/1993. Destruction de l'entrepôt de l'entreprise Balagayrie à St-Dalmas de Tende. Source : RTM



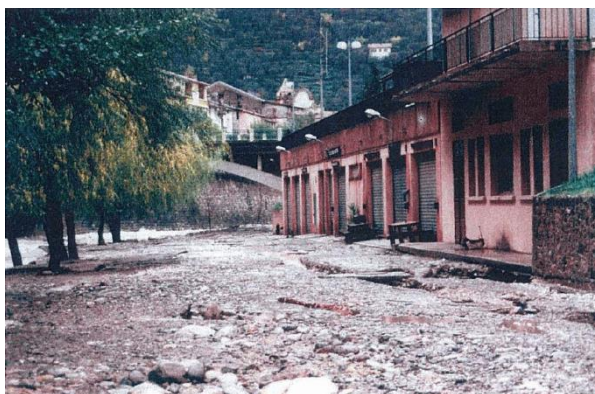
▲ Photo 5 : Crue du 13/09/1993. Destruction du pont de la Bieugne en amont de la confluence avec la Roya. Source : BRGM, 2005



▲ Photo 6 : Crue du 13/09/1993. Destruction du pont de la Bieugne en amont de la confluence avec la Roya. Cliché pris après reconstruction d'un pont métallique. Source : RTM



▲ Photo 7 : Crue du 13/09/1993. Saint-Dalmas de Tende, Bieugne. Source : RTM



▲ Photo 8 : Crue du 05/11/1994. Inondation des services techniques de la ville de Breil en rive droite en amont du pont Supérieur. Source : BRGM, 2005



▲ Photo 9 : Crue du 05/11/2014. Breil-sur-Roya. Vue en aval du pont Supérieur (quartier Isola). Source : RTM



▲ Photo 10 : Crue du 05/11/2014. Breil-sur-Roya. Inondation des services techniques. Source : RTM



▲ Photo 11 : Crue du 23/11/2016. Breil-sur-Roya en amont du pont Supérieur. Inondation des Services techniques. Source : RTM



▲ Photo 12 : Affouillement de fondation de bâtiment à Tende. Cliché 19/12/2016. Source : RTM

3.4 VALEURS DE DEBIT DE CRUE DE REFERENCE CENTENNAL, ESTIMEES AVANT LA CRUE ALEX

On effectue dans cette partie une revue des débits de référence centennaux estimés dans le bassin de la Roya et de la Bieugne. Une compilation des données sur les vallées de la Vésubie et de la Roya, ainsi qu'une discussion sur la cohérence des estimations entre elles a été effectuée par l'ONF-RTM dans le cadre du RETEX hydrologique piloté par le CEREMA (cf. [Annexe 3](#)). On retiendra, malgré le sérieux des études ayant été effectuées, une incertitude très forte des débits de référence centennaux sur les bassins versants de la Vésubie et de la Roya.

Pour le bassin de la Roya, les estimations de débit de crue centennal à Breil/Roya varient entre 900 et 1330 m³/s. La borne basse correspond à l'estimation du débit de pointe de la crue de 1926. Elle semble avoir fait consensus jusqu'en 2006, date où EDF a réévalué les débits de référence crue à 1331 m³/s avec la méthode du Gradex. La méthode Shyreg INRAE (v2019) donne quant à elle des valeurs proches de l'estimation historique (930 m³/s).

3.4.1 Résultats issus d'études antérieures

Le tableau suivant présente les estimations de débits de crue à Breil-sur-Roya et St-Dalmas de Tende à partir des résultats de trois études existantes. L'étude la plus ancienne citée par SIEE (2003) et ETRM (2006) a été réalisée par EDF-DTG en 2002. Le débit centennal à Breil-sur-Roya avait été estimé à 900 m³/s, soit la valeur du pic de la crue de 1926. Les deux autres études (EDF, 2006c ; Univ. Gênes 2019) revoient l'estimation du débit centennal à Breil-sur-Roya à la hausse avec des valeurs respectives de 1332 et 1287 m³/s, soit +48% par rapport à l'estimation antérieure. A noter que les estimations données par l'université de Gênes sont issues d'un modèle semi-distribué SCS avec des valeurs de paramètres vraisemblablement recalées sur des événements historiques et sur les estimations EDF (2006c). Cette étude n'apporte donc pas de réelle plus-value par rapport à l'étude EDF (2006c).

A Saint-Dalmas de Tende, seules deux estimations sont disponibles (EDF, 2006c ; Univ. Gênes 2019). L'exutoire du bassin versant considéré est situé en amont de la confluence avec la Bieugne. Elles sont comme à Breil-sur-Roya toutes deux concordantes avec des valeurs de l'ordre 530 m³/s.

Lieu	S (km ²)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ /S ^{0,8} (m ³ /s/km ^{1,6})	Référence	Commentaires
Breil-sur-Roya	445	315	900	6,8	SIEE (2003) et ETRM (2006)	Reprise de la valeur EDF-DTG (2002)
	443	530	1332	10,2	EDF (2006c)	Méthode du Gradex. Débit seuil de saturation = Q ₁₀ . Valeur reprise par EGIS-GEO-PEKA, 2021
	461	597	1287	9,5	Univ. Gênes, (2019)	Modélisation pluie débit semi distribuée SCS. Vraisemblable recalage des CN / événements historiques et estimations EDF 2006
St-Dalmas de Tende	168	234	525	8,7	EDF (2006c)	Méthode du Gradex. Débit seuil de saturation = Q ₁₀ . Valeur reprise par EGIS-GEO-PEKA, 2021
	167	241	536	8,9	Univ. Gênes, (2019)	Modélisation pluie débit semi distribuée SCS. Vraisemblable recalage des CN / événements historiques et estimations EDF 2006

*En bleu la valeur retenue par le GEMAPIEN dans l'étude EGIS-GEOPEKA (2021)
Tableau 3 : Valeurs de débit de crue retenues dans des études antérieures*

3.4.2 Estimations SHYREG débit

Le tableau suivant recense les valeurs d'estimations de débit centennal réalisées avec la méthode SHYREG dans les bassins de la Roya et de la Bieugne. On observe que les estimations de débits SHYREG sont inférieures à celles des études EDF (2006c) et de l'Université de Gênes (2019). Le débit centennal au droit du barrage de Breil est estimé à 923 m³/s, soit la valeur historique avant réévaluation des débits de référence de crue par EDF.

Référence	Cours d'eau	Exutoire	S BD Alti (km ²)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ /S ^{0,8} (m ³ /s/km ^{1,6})	Commentaire
SHYREG, 2019	Roya	Amont confluence Refreï	40,0	125	6,5	
SHYREG, 2019	Roya	Amont confluence Bieugne	167,9	440	7,3	
SHYREG, 2019	Roya	Barrage de Breil-sur-Roya	442,9	923	7,0	Point donné à l'aval du rejet eaux déversées S=443.2 km ²
SHYREG, 2019	Bieugne	Apex cône	81,5	279	8,3	

Tableau 4 : Valeurs de débit de crue centennal SHYREG disponibles dans le bassin de la Roya et de la Bieugne

3.5 DOCUMENTS D’AFFICHAGE DU RISQUE INONDATION EXISTANTS DANS LES COMMUNES DE LA VALLEE DE LA ROYA

Ce paragraphe présente les documents d’affichage du risque inondation existants dans les communes de la vallée de la Roya.

3.5.1 Plan de Prévention des Risques (Inondation ou multi-aléas)

Seules les communes de La Brigue et Saorge ont été couvertes avec un PPR inondation :

- La Brigue : PPR inondation (Levensa) approuvé le 04/05/2012 ;
- Saorge : PPR inondation (Caïros) approuvé le 25/02/2013.

Aucun PPR inondation ne concerne le cours de la Roya proprement dit. Le PPR de Saorge sera exploité dans la suite du rapport dans le cadre d’une comparaison avec l’emprise de la crue Alex visant à analyser la nature et les taux d’endommagement des bâtiments situés dans l’emprise inondation du PPR (cf. § 7.3.). La carte disponible est la carte du zonage du PPR qui définit des zones rouge, bleue et blanche dans lesquelles des règles d’urbanisme sont fixées pour tenir compte du niveau de risque (la zone rouge étant la plus contraignante et la zone blanche sans contrainte). Ce zonage est établi à partir d’une carte d’aléa qui, dans les faits, correspond à une carte d’intensité estimée pour un scénario de référence donné qui correspond au plus fort événement connu au moment de l’établissement du PPR ou à l’événement supposé centennal s’il est supérieur.

On notera par ailleurs que toutes les communes de la vallée sont dotées d’un PPR mouvement de terrain. Ceux-ci ne seront pas exploités dans la suite du rapport car les phénomènes traités (effondrements, glissements de terrain) ne concernent pas le phénomène qui s’est passé sur la Roya (et notamment les érosions de berge, etc.).

3.5.2 Autres cartographies

3.5.2.1 Contrat de Plan État Région (BRGM, 2005)

Une cartographie de l'aléa inondation dans le bassin de la Roya au 1/25 000^{ème} a été réalisée par le BRGM en 2005 dans le cadre du IV^{ème} Contrat de Plan Etat Région « Risques naturels et nuisances ». Les planches cartographiques au niveau des communes de Breil-sur-Roya, Fontan et Tende sont présentées en Annexe 4. Cette cartographie est informative et n'a aucune portée réglementaire. N'étant pas disponible en format numérique SIG, elle n'a pas été réexploitée dans la suite du document.

3.5.2.2 Atlas des Zones Inondables

L'Atlas des Zones Inondables (AZI) couvre les traversées urbaines de Breil-sur-Roya, Fontan, et Tende (linéaire de St-Dalmas à Tende).

Il s'agit d'un document informatif de connaissance des phénomènes d'inondations susceptibles de se produire par débordement de cours d'eau. Son élaboration a été une priorité des services de l'État au début des années 2000. Il ne couvre pas tout le territoire et a été élaboré selon des pratiques locales¹. D'après le guide DREAL PACA relatif à l'Atlas des Zones Inondables², les zones inondables sont délimitées par une méthode naturaliste, la méthode « HydroGéoMorphologique » (HGM), qui décrit le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structuration de la vallée façonnée par leurs crues successives. Alors que les PPRI se basent sur une crue de référence, **l'Atlas des Zones Inondables apporte la connaissance de l'emprise maximale de la zone potentiellement inondable sans pouvoir y attacher de fréquence**³.

La cartographie de l'AZI est comparée dans la suite du rapport avec deux cartographies émanant du présent RETEX (cf. § 7.3) : la cartographie d'intensité des phénomènes torrentiels de la crue du 2 octobre 2020 (cf. § 4.5) et la cartographie des dommages aux bâtis (cf. § 4.6).

3.5.2.3 Enveloppes Approchées d'Inondation Potentielles Cours d'Eau (EAIP_{CE})

La délimitation des Enveloppes Approchées d'Inondation Potentielles (EAIP) fait suite à la directive européenne n°2007/60/CE du 23 octobre 2007 (dite « directive inondations ») qui prévoit que les États membres réalisent une « évaluation préliminaire des risques d'inondation » (EPRI) permettant d'estimer les personnes et les biens exposés¹. La cartographie EAIP permet de définir au niveau national les **zones potentiellement soumises à une inondation en cas de crues exceptionnelles ou de submersions marines à l'occasion de tempêtes extrêmes**. Selon la circulaire du 5 juillet 2011 relative à la mise en œuvre de la politique de gestion des risques d'inondation, la cartographie EAIP « *ne correspond pas à une zone inondable mais seulement à l'appréciation du maximum d'espace qui peut être couvert par l'eau en cas de submersion. Elle se veut maximaliste, mais, compte tenu des limites des connaissances actuelles, ne permet pas de couvrir l'intégralité des zones potentiellement submersibles* ». D'autre part, comme le souligne le rapport CGEDD d'avril 2020⁴, la finalité de la cartographie explique deux de ses caractéristiques : (1) l'EAIP représente une enveloppe extrême et non une cartographie des zones inondables au sens réglementaire ; (2) les ouvrages de protection sont considérés comme transparents. La cartographie EAIP est élaborée par les DREAL de bassin par croisement de sources d'information d'échelles et précisions variables, de l'emprise des inondations connues à la morphologie des vallées.

Les EAIP sont d'utilisation informative, et ne sont pas utilisables dans les procédures administratives ou réglementaires. Elles sont moins précises que des cartographies faites à une échelle plus locale, mais proposent en

¹ Cf. georisques.gouv.fr : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/prevention-du-risque-2>

² Les Atlas des Zones Inondables en Provence Alpes Côte d'Azur : http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plaquet-teAZI_cle7c3ebf.pdf

³ Cf. Les Risques naturels en Provence Alpes Côte d'Azur, BRGM / DREAL PACA, 09/2009 pages 49 à 52 : http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/risques_naturels_cle13db38.pdf

⁴ Rapport CGEDD, Pour un meilleur accès du public aux cartes des zones inondables, avril 2020, <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/274996.pdf>

revanche une vision d'ensemble des zones inondables à l'échelle des grands bassins hydrographiques (Seine, Loire, Rhône, etc.). C'est une première évaluation qui permet d'identifier les secteurs où il est important d'agir et où la connaissance doit être approfondie.

Comme pour l'AZI, un croisement SIG est effectué dans la suite du rapport (cf. § 7.3) avec le relevé des dommages aux bâtis.

4 PRINCIPAUX CONSTATS RÉALISÉS POST-CRUE

4.1 RELEVES DE TERRAIN

Le relevé des événements survenant à l'occasion de phénomènes naturels marquants (avalanche, glissement de terrain, chute de blocs, crue torrentielle) est une des missions confiées aux services RTM par le ministère en charge de la prévention des risques. Il s'agit notamment de localiser et caractériser chaque événement, et de les compiler dans une base de données, afin de conserver l'historique de ces événements.

Dans le cas particulier des crues du 2 octobre 2020, qui ont été d'une ampleur et d'une intensité exceptionnelles, avec de multiples dommages aux bâtis et aux infrastructures, il a été nécessaire d'adapter les modes de relevés et leur organisation pour couvrir dans les meilleurs délais l'ensemble du territoire impacté, avec les moyens humains disponibles.

Les campagnes de terrain se sont déroulées entre le 13 octobre et le 20 novembre 2020 en collaboration avec les différents partenaires du territoire (CARF, SMIAGE, INRAE, Université Côte d'Azur) et ont été menées en priorisant deux types de relevés :

- **Le relevé des indices morphologiques de la crue.** L'acquisition d'une orthophotographie et d'un levé LiDAR par l'IGN dès le 5 octobre 2020 a permis d'alléger et d'optimiser ce type de relevé, en s'affranchissant notamment du relevé des érosions et des dépôts (mesure des linéaire, hauteur, largeur, pente...). Le travail de terrain s'est ainsi concentré sur l'identification et le relevé des laisses de crue ;
- **Le relevé des désordres sur les enjeux.** Ces relevés concernent les bâtis, les ponts, les ouvrages et la voirie. Ils ont été réalisés par saisie mobile à l'aide de l'application Epicollect. Des formulaires de saisie ont été spécifiquement élaborés pour chaque type d'enjeu avec néanmoins des champs communs tels que le mode d'endommagement et le taux d'endommagement. L'intégralité des formulaires de saisie avec les différents champs et typologies retenus sont disponibles en [Annexe 5](#).

On peut également mentionner la valeur ajoutée de l'utilisation du drone qui a permis de compléter les investigations de terrain sur les parties hautes des bassins versants, et du relevé photographique hélicoptère réalisé par le CEREMA au lendemain de la crue.

L'ensemble des relevés de terrain couplé à l'orthophotographie et au levé LiDAR post-crue de l'IGN ont permis de construire une base de données dont découlent les analyses qui sont présentées dans la suite du rapport.

4.2 PLUVIOMETRIE OBSERVEE (RETEX HYDROLOGIQUE)

L'analyse de pluviométrie effectuée dans le cadre du RETEX hydrologique montre des cumuls exceptionnels dans le bassin de la Roya. En prenant en considération les lames d'eau radar Météo France ANTILOPE⁵, la pluie de bassin atteint 312 mm (bassin versant de la Roya à la frontière avec l'Italie, cf. figure suivante). Les cumuls pluviométriques dépassent la période de retour centennale pour des durées d'analyse supérieures à 4 h. Ils sont d'environ 1 000 ans pour une durée de 12 h.

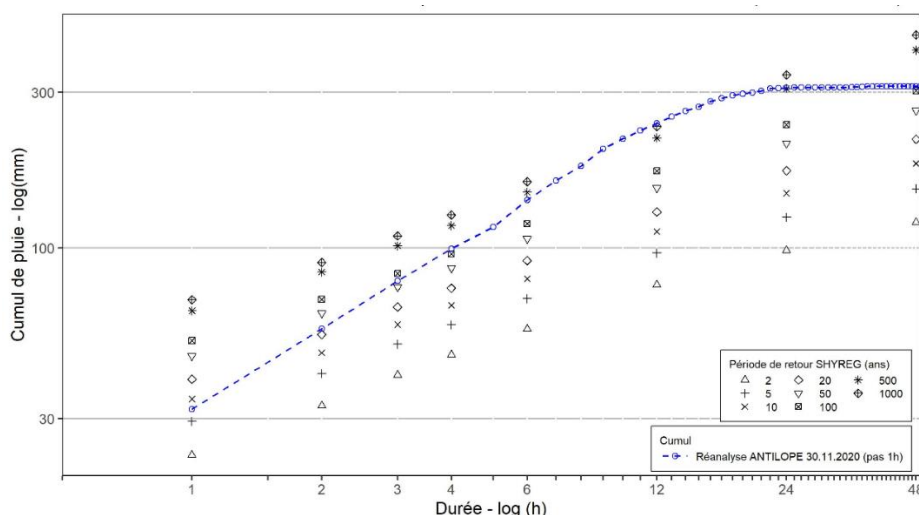


Figure 12 : Pluie de bassin sur différentes durées et périodes de retour SHYREG associées (avec abattement). Bassin versant considéré = BV de la Roya à la frontière avec l'Italie. Source : RETEX Hydrologique, CEREMA – Météo France – INRAE

D'après les cartes de cumuls pluviométriques Météo France ANTILOPE, les maxima de précipitations survenus au cours de la tempête Alex sont apparus dans le sous bassin versant de la Bieugne. Le cumul de précipitations mesuré au niveau du poste des Mesches atteint 665,1 mm. La période de retour dépasse 1 000 ans pour des durées d'analyse supérieures à 3 h.

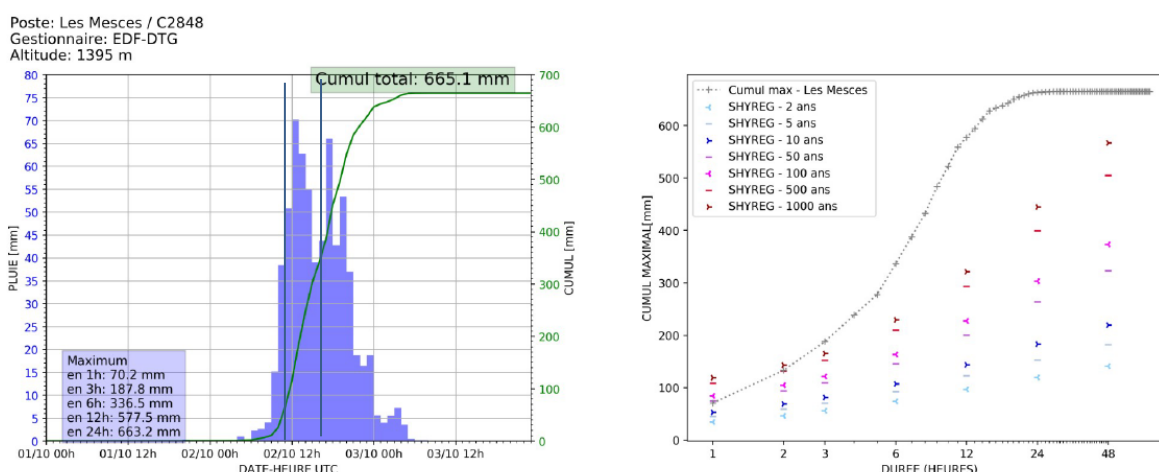


Figure 13 : Poste des Mesches EDF. Hyétochrome de pluie et analyse de la fréquence des cumuls pour différentes durées selon SHYREG pluie. Source : RETEX Hydrologique.

⁵ La lame d'eau ANTILOPE est une fusion de la lame d'eau radar avec les données pluviométriques sol. Dans le cadre du RETEX hydrologique, Météo France a élaboré et fourni le 30/11/2020 une réanalyse prenant en compte les données sol Météo France, mais aussi celles des différents partenaires EDF, MNCA, Université de Nice, Association Météo 06 ainsi que des données provenant de postes Italiens.

Les mesures de précipitations au sol effectuées dans les divers postes pluviométriques du bassin de la Roya et de la Bévéra montrent une disparité des cumuls très forte. Alors que le cumul sur 24 h atteint 663 mm au barrage des Mesches, il est de 343 mm au poste de Tende, 287 mm au poste de Breil/Roya et 69 mm à Vintimille.

Les cartes des cumuls pluviométriques sur 24 h établies d'après les données Météo France ANTILOPE permettent de visualiser les secteurs affectés par les cumuls pluviométriques les plus forts. Sur les bassins versants de la Roya, de la Vésubie et de la Tinée, la carte Figure 14 montre deux zones d'axe NE-SE présentant des cumuls supérieurs à 350 mm : la première s'étend de St-Martin Vésubie à Malaussène ; la seconde, intégralement située dans le bassin de la Roya sur la rive droite du cours d'eau, s'étend du col de Tende à Breil-sur-Roya. La carte de la Figure 15 présente le détail des cumuls pluviométriques sur 24h dans le bassin de la Roya. **Les sous bassins versants dans lesquels les précipitations ont été les plus fortes sont les bassins de la Bieugne et de la Roya en amont de Tende. On note également des précipitations notables dans les sous bassins de la Céva, du Cairons et de la Maglia. Comme le révèlent les analyses effectuées par INRAE (cf. Figure 16), les périodes de retour des cumuls de précipitations sur 24 h dépassent 1 000 ans sur une bande de 3 à 7 km de largeur située en rive droite de la Roya entre Breil-sur-Roya et le col de Tende.**

NOM POSTE	CODE	Gestionnaire	Alt (m)	Max 1h (mm)	Max 3h (mm)	Max 6h (mm)	Max 12h (mm)	Max 24h (mm)	Cumul 72h (mm)
Les Mesches	C2848	EDF-DTG	1395	70	188	337	578	663	663
TENDE_SAPC	6163007	Météo France	636	45	108	181	269	343	345
Saint-Dalmas de Tende	C2854	EDF-DTG	661	46	111	185	274	330	(*)
BENDOLA_B4	B4	Univ Nice - Géoazur	-	50	115	173	258	323	
BREIL SUR ROYA	6023004	Météo France	305	60	115	173	211	287	296
SAORGE	SA	Univ Nice - Géoazur	-	39	80	126	166	239	
MOULINET	6086001	Météo France	817	25	63	116	189	231	235
SOSPÈL	6136005	Météo France	843	36	90	119	160	212	224
BENDOLA_B1	B1	Univ Nice - Géoazur	-	35	76	105	146	200	
PEIRA CAVA	6077006	Météo France	1443	16	42	77	123	162	166
COLLA_ROSSA	CLROS	Italie ARPA Ligurie	460	26	44	51	67	116	121
VENTIMIGLIA	XXMIG	Italie ARPA Ligurie	21	17	33	42	48	69	83
MONTE_MAURE	MMAUR	Italie ARPA Ligurie	210	18	27	29	32	51	63
LIMONE_PANCANI	S4613	Italie ARPA Piémont	1875	61	163	303	515	582	583
PIAGGIA	360	Italie ARPA Piémont	1645	68	133	206	271	349	351
IVERDEGGIA	VERT	Italie ARPA Ligurie	1120	52	112	169	216	279	282
IUPEGA	308	Italie ARPA Piémont	1310	45	80	124	185	277	279
SELLA_DI_GOUTA	GOUTA	Italie ARPA Ligurie	1212	51	105	133	175	227	234
CHIUSA_PESIO	307	Italie ARPA Piémont	935	21	56	100	186	232	232
COLLE_BELENDIA	BELEN	Italie ARPA Ligurie	1357	37	63	96	125	198	210
REFUGE_MONDOVI	309	Italie ARPA Piémont	1760	28	51	83	125	195	195
ROCCHETTA_NERVINA	ROCNE	Italie ARPA Ligurie	215	32	54	76	95	157	169
PALANFRE	S2563	Italie ARPA Piémont	1625	14	32	60	107	139	139
BORGONUOVO	BONUO	Italie ARPA Ligurie	115	20	31	45	53	89	105

Tableau 5 : Maximums relevés aux postes pluviométriques présents sur les bassins versants de la Roya et de la Bévéra. Source : RETEX Hydrologique. (*) lacunes à St-Dalmas de Tende.

Comparées aux événements à l'origine des principales crues déjà connues de la Roya et de la Bieugne (21/11/1926 et 13/09/1993), les précipitations qui se sont localement abattues sur le bassin de la Roya pendant la tempête Alex sont bien plus intenses. En 1993, des précipitations de 140 mm concentrées sur une durée de 5 h avaient été enregistrées à Casterino (RTM, 1993). Sur une durée équivalente, c'est plus du double qui a été observé le 2 octobre 2020 au barrage des Mesches. En 1926, la crue fait suite à un mois d'octobre et de novembre particulièrement arrosés. Le 21 novembre 1926, 198 mm avaient été enregistrés à Venanson dans le bassin de la Vésubie⁶ contre 665 mm le 2 octobre 2020 au barrage des Mesches et 312 mm en moyenne sur l'ensemble du bassin de la Roya.

⁶ Perriaux L. Les mouvements de terrain dans les Alpes niçoises, en novembre 1926. In: Annales de Géographie, t. 36, n°200, 1927. pp. 115-124;

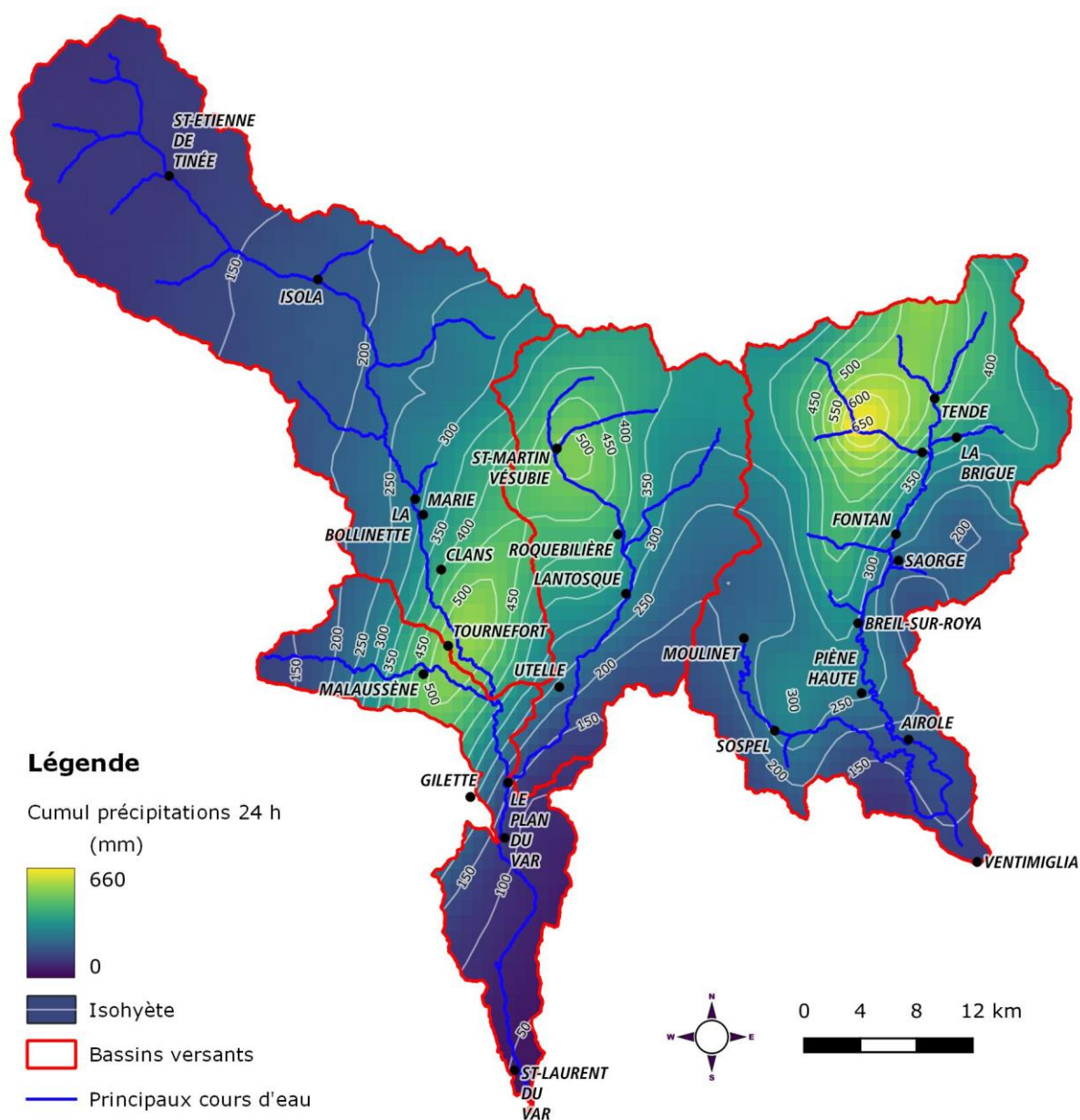


Figure 14 : Bassins de la Tinée, de la Vesubie, de la Roya et Var aval. Cumul 24 h de précipitations. Données METEO France ANTILOPE. 02/10/2020 06h00 au 03/10/2020 06h00 UTC. Source : données Météo France.

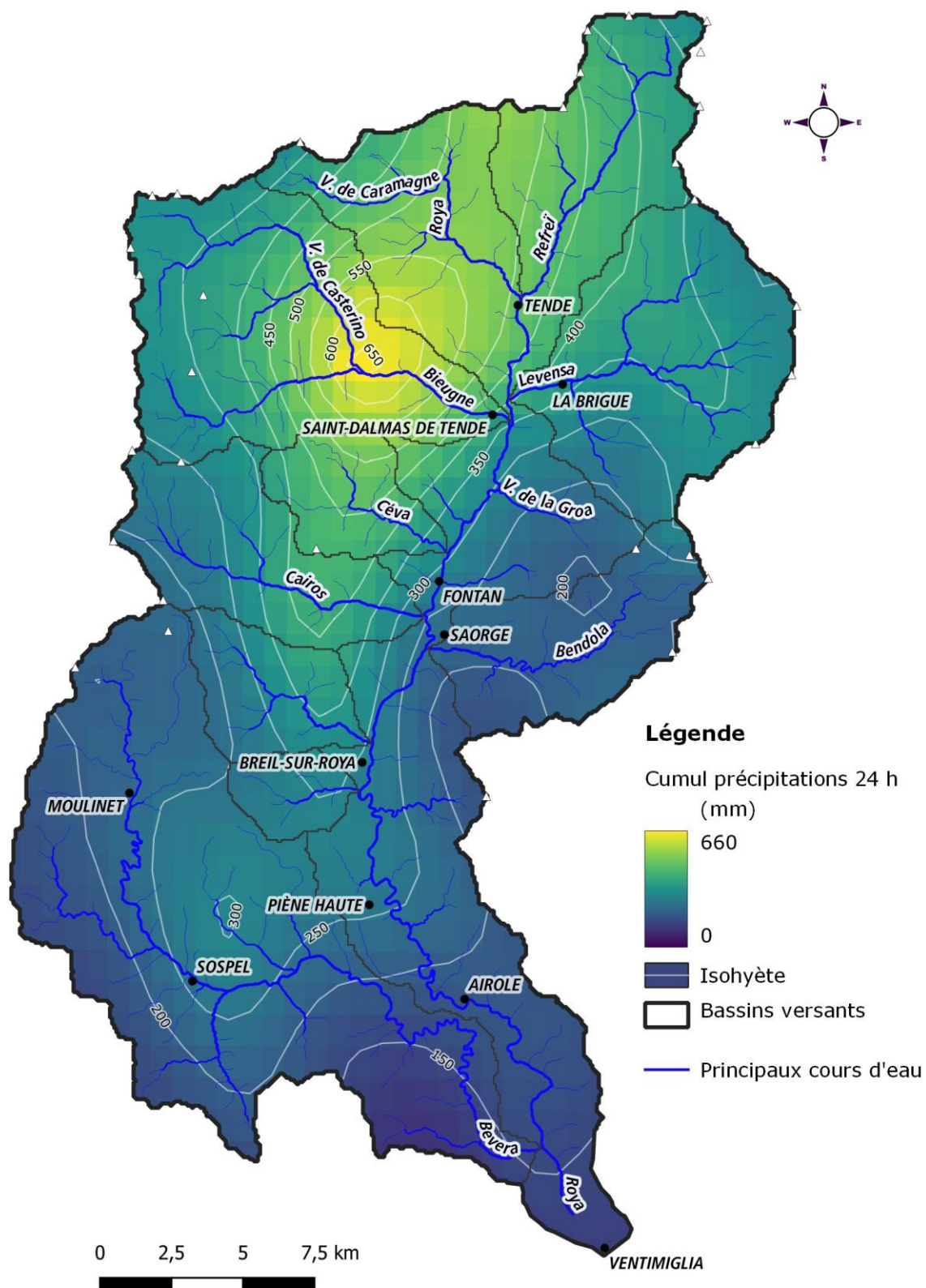


Figure 15 : Bassin versant de la Roya. Cumul 24 h de précipitations. Données METEO France ANTILOPE - EDF. 02/10/2020 07h00 au 03/10/2020 06h00 UTC. Fusion Antilope V1 (temps réel) + données sol complémentaires.

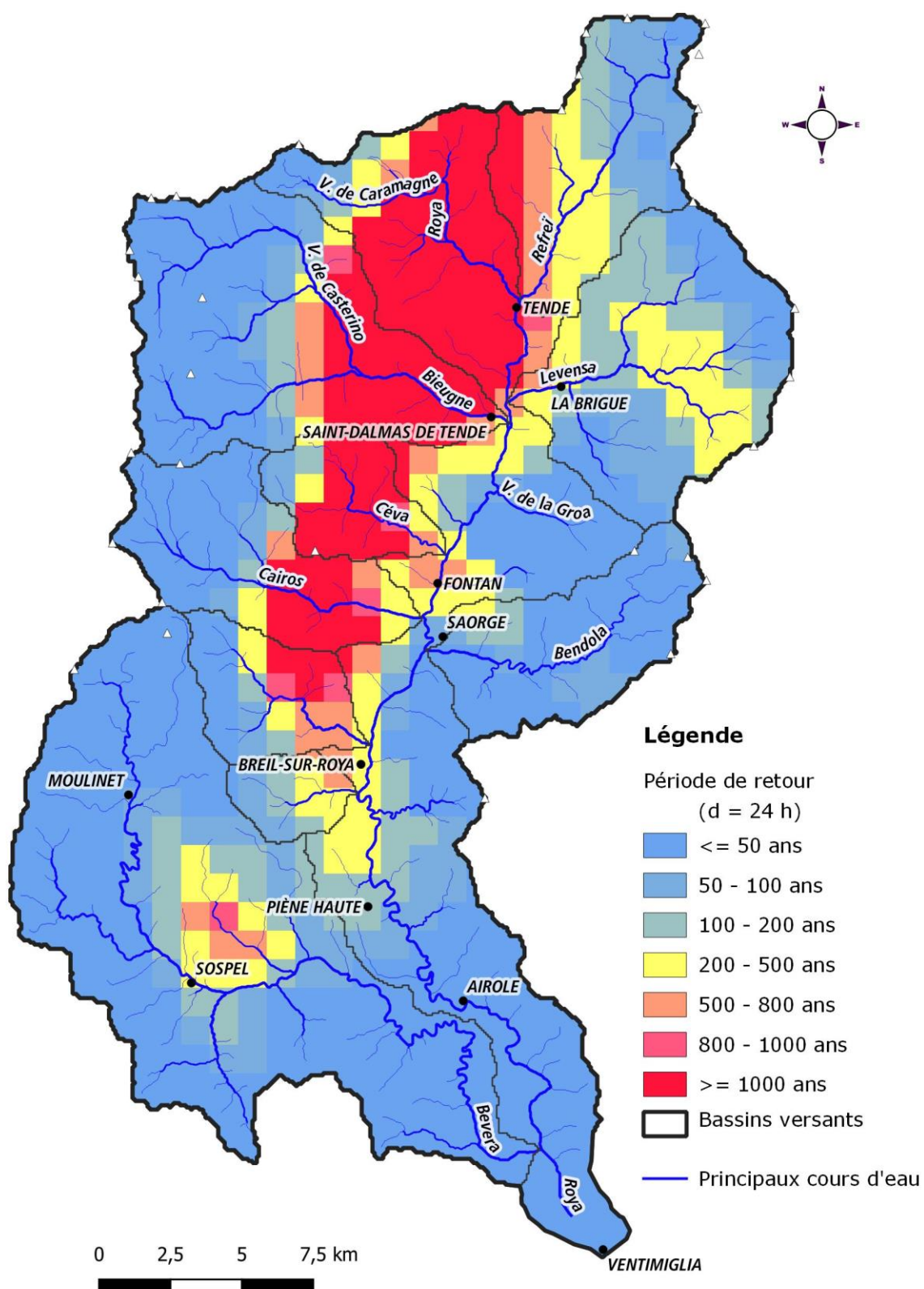


Figure 16 : Bassin versant de la Roya. Période de retour des précipitations de la tempête Alex sur le bassin versant de la Roya. Durée d'analyse 24 h. Données INRAE : méthode AIGA de comparaison aux quantiles de pluie SHYREG. Périodes de retour calculées à partir des lames d'eau de la réanalyse fournie dans le cadre du RETEX (Antilope + assimilation de pluviomètre partenaires par MF-DSO et CEREMA, au pas de temps 60 min)

4.3 DEBIT DE POINTE LIQUIDE ET HYDROGRAMMES ESTIMES (RETEX HYDROLOGIQUE)

Des estimations de débits de crue sur les principaux cours d'eau impactés par la tempête Alex ont été réalisées dans le cadre du RETEX Hydrologique piloté par le CEREMA et associant de nombreux partenaires (MNCA, SMIAGE, METEO France, INRAE, Université Côte d'Azur, Université Gustave Eiffel, INRAE et ONF-RTM). Les estimations résultent de plusieurs méthodes : (a) modèles hydrologiques distribués (Mod_Hydro sur le graphique ci-dessous) ; (b) estimation hydraulique suite à un levé hydraulique (Est_Hydrau sur le graphique ci-dessous). Elles ont été comparées aux estimations de débit de référence pour différentes périodes de retour (50, 100 et 500 ans). Les résultats sur le bassin de la Roya sont présentés ci-dessous.

On notera plusieurs points notables qui expliquent les intervalles élevés d'estimation de débit :

- Les estimations hydrauliques reposent sur l'hypothèse d'invariance de la section hydraulique. Or pour des crues torrentielles comme celle ayant affecté la Roya, le transport solide a profondément modifié les sections au cours de la crue. Au-delà de la question de la section prise en compte, les incertitudes sont également liées au choix complexe du paramètre de rugosité.
- Seul le modèle hydrologique MORDOR (EDF) a été calé sur le BV de la Roya sur une chronique de pluie et de débits antérieure à la crue Alex. Le modèle CINECAR utilise une fonction de production de type SCS avec un paramètre qualifiant le niveau d'infiltration (dénommé CN) qui n'a pas été calé antérieurement à l'évènement. Le RETEX fournit une gamme de débit modélisés pour des valeurs de CN jugés plausibles (30 à 45) avec des variations d'un facteur 2 sur les estimations de débit.

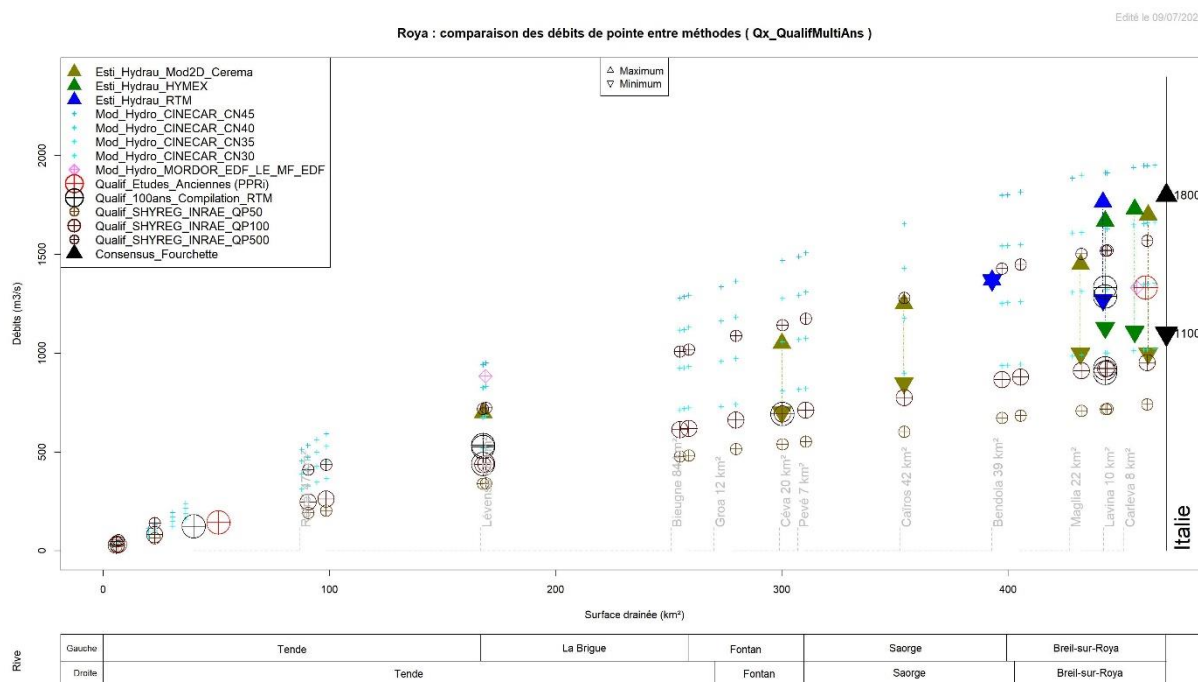


Figure 17 : Comparaison des estimations de débits de pointe de crue aux estimations de débit de référence pour T=50, 100 et 500 ans.
Source : RETEX hydrologique - CEREMA

On retiendra donc que les estimations de débit sont très incertaines. La fourchette d'estimation de débit de pointe à l'aval de Breil sur Roya est de 1 100 à 1 800 m³/s, ce qui correspond à un ordre de grandeur de période de retour compris entre 100 et plus de 500 ans. Les quantifications en période de retour sont rendues complexes autant par la difficulté à estimer de manière précise les débits de crue Alex, que par la divergence des estimations de débits de référence. Par exemple, à Breil sur Roya, les estimations de débit centennal fluctuent entre 900 m³/s et 1 330 m³/s ce qui peut par conséquent radicalement changer l'interprétation donnée en période de retour.

Parmi l'ensemble des estimations fournies par les contributeurs du RETEX hydrologique, il semble intéressant d'exploiter les résultats du modèle MORDOR EDF qui, rappelons-le, était calé antérieurement à la crue Alex (cf. figure suivante). Le pic de crue modélisé à Breil sur Roya a lieu entre 00h00 et 01h00 du matin, ce qui est concordant avec les témoignages recueillis après crue (cf. § 4.3). La valeur du pic de débit, de l'ordre de 1 350 m³/s est cohérente avec les estimations hydrauliques. Elle correspond à une période de retour de 100 ans sous hypothèse d'un débit de référence centennal de 1 330 m³/s et d'environ 400 ans avec hypothèse d'un débit de référence de l'ordre de 900 m³/s.

À Saint-Dalmas de Tende, en amont de la confluence avec la Bieugne, le modèle donne une autre image de la magnitude hydraulique de la crue. Le pic de débit modélisé est de 885 m³/s soit une période de retour de l'ordre de 1 000 ans (sur la base des quantiles SHYREG INRAE). Cette estimation est cohérente avec les cumuls pluviométriques exceptionnels enregistrés dans la partie amont de la Roya, notamment dans les sous bassins rive droite, ainsi qu'avec les évolutions géomorphologiques spectaculaires observées (cf. chapitre 5).

Enfin, au droit du barrage des Mesches, le pic de débit est évalué à 360 m³/s soit une période de retour de l'ordre de 200 à 300 ans. La période de retour est moindre qu'à St-Dalmas en raison du fait que la partie supérieure du bassin de la Bieugne (en amont du barrage) semble avoir été notablement moins arrosée que la partie aval (hors vallon de Casterino, frontière Nord du BV). On notera une divergence notable entre le pic de débit issu du modèle MORDOR et les informations remontées en COD au cours de la soirée du 02/10/2020 avec des débits entrants n'ayant pas excédé 200 m³/s (cf. § suivant). D'après EDF (communication orale), les estimations données par l'exploitant au cours de la crue sont des valeurs très incertaines à considérer par conséquent avec un crédit bien moindre que les estimations MORDOR.

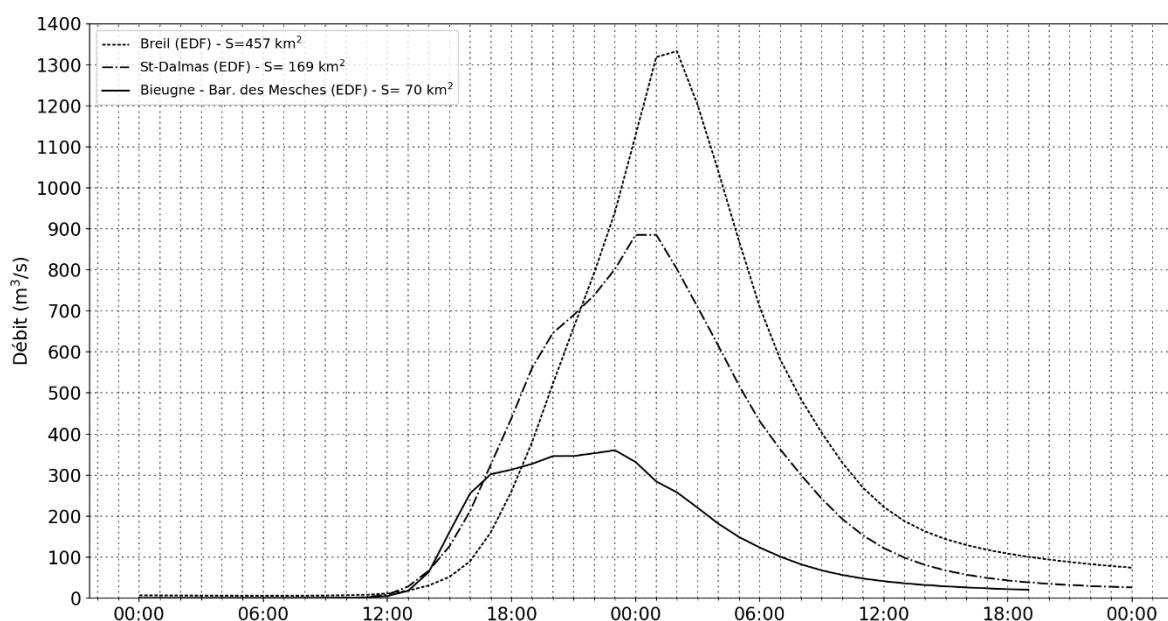


Figure 18 : Hydrogrammes de crue Alex reconstitués avec modèle MORDOR EDF.

Soulignons enfin l'existence de deux estimations de débit réalisées par l'ONF-RTM dans le bassin versant de la Roya (cf. [Annexe 6](#)). La première a été réalisée au droit du pont aval du tunnel de Saorge, avec une estimation de débit de l'ordre de 1 370 m³/s basée sur les hypothèses suivantes : (a) variation faible du fond de lit et de la géométrie de la section en travers au cours de la crue ; (b) interprétation d'un niveau de charge ayant atteint le tablier du pont (dépôt de flottants) ; (c) calcul d'écoulement en régime critique. La seconde estimation, de l'ordre de 1 300 à 1 800 m³/s, a été effectuée à Breil-sur-Roya suite à des relevés de laisses de crues avec le cabinet de géomètre OPSIA et à l'analyse d'une dynamique de crue atypique dans la traversée de Breil-sur-Roya (régime d'écoulement fluvial entre le pont Supérieur et le barrage EDF, cf. [Annexe 6](#)). Elle agrège en fait deux calculs :

- Le premier a été réalisé au droit de la contraction du lit formée par le pont de la déchetterie et le barrage EDF. Celle-ci a opéré comme point de contrôle hydraulique avec formation d'un régime d'écoulement

fluvial dans la traversée de Breil (à l'aval du pont Supérieur). Avec une charge d'écoulement de 286,0 m NGF et une largeur de la section contractée comprise entre 12,5 et 18,0 m, le débit de pointe serait compris entre 970 et 1 390 m³/s ;

- Le second correspond à un calcul d'écoulement en charge au droit des conduites de dérivation creusées dans le rocher dont le déversoir d'entrée est situé en amont immédiat du pont supérieur. Pour une charge de l'écoulement entrée de 287,0 m NGF le débit déversé est de l'ordre 300 à 375 m³/s.

4.4 DEROULE DE LA CRUE D'APRES LES TEMOIGNAGES

Des réunions avec les communes de la vallée de la Roya ont été organisées en début d'année 2021, afin de recueillir leurs témoignages sur le déroulement de l'évènement du 2 octobre 2020. Ces réunions ont été élargies aux services de secours qui sont directement intervenus en gestion de crise (Force 06, la gendarmerie, le SDIS), ainsi qu'aux différents partenaires du territoire (MNCA, SMIAGE Maralpin).

Plusieurs thématiques ont été abordées à l'occasion de ces réunions – la gestion de crise, la réaction des cours d'eau, les désordres observés – en tentant d'obtenir pour chaque observation un **horodatage le plus précis possible**, afin de mieux **appréhender la dynamique de crue**.

Le déroulé chronologique des faits marquants de la crue du 2 octobre 2020 est présenté par commune dans les tableaux ci-après. Des informations extraites des points de situation rédigés par le Comité Opérationnel Départemental (COD) et des vidéos prises durant la crue viennent par ailleurs compléter les témoignages des communes.

On peut tirer les principaux enseignements suivants sur la dynamique de crue :

- A Tende, la montée de crue semble avoir lieu avant 16h00. Les premières coupures de route sont survenues à partir de 17h00. Le pont des 14 Arches et le pont du Bourg Neuf ont été détruits entre 18h00 et 21h00.
- A St-Dalmas, les principaux désordres sont survenus entre 20h30 et 23h00 ;
- À Fontan, l'arrivée de l'onde de crue est décrite vers 18h00 ;
- En amont de Breil sur Roya les premiers débordements sont documentés à partir de 18h20. Le pic de crue est décrit comme ayant eu lieu entre 00h45 (niveau de +2m par rapport au tablier du pont Charabot) et 02h00 du matin.

Commune de Tende (Village)			
Date	Horaire	Observations	Source
02/10/2020	07h30	Ouverture du poste de commandement en mairie. Déclenchement du Plan Communal de Sauvegarde	[1]
	Matinée	Reconnaissances et porte à porte pour informer les habitants. Les pompiers interviennent dès le matin à l'EHPAD : parking souterrain inondé, groupe électrogène hors-service	[1]
	12h00	Fermeture des routes de la Pia (vallée du Refréi) et de Speggi par la commune (points sensibles habituels)	[1]
	12h30	<u>Premier désordre</u> : Eboulement à la sortie des gorges de Paganin	[1]
	15h30	Pluie battante et vent violent	[1]
	15h50	Pont des truites : pas de mise en charge. Vidéo prise par Mme FRANCA	[1]
	16h00	Montée soudaine du niveau de la Roya	[1]
	Avant 16h30	<u>Deuxième désordre</u> : Glissement de terrain à Vievola au niveau du captage d'eau. Personnes bloquées et isolées	[1]
	17h00	Effondrement de la chaussée RD6204 au-dessus de Vievola à quelques kilomètres du tunnel de Tende. Des personnes sont isolées et bloquées. Les pompiers partent en reconnaissance pour tenter de les évacuer ou les regrouper au niveau de la gare de Vievola.	[2]
	16h20-16h30	<u>Troisième désordre</u> : Tronçon de route en rive gauche à l'aval du vallon de St Pancrace emporté. Les gendarmes et le SDA, partis à Vievola, n'ont pas pu redescendre vers Tende et sont restés bloqués à Vievola. Pont du Bourg Neuf toujours présent, absence d'embâcle, pas de mise en charge	[1]
	17h00	Les terrains de tennis et le jardin d'enfants sont déjà emportés, tandis que la piscine est toujours présente.	[1]
	Entre 18h-19h	Destruction du pont des 14 arches : 1er ouvrage emporté. Obstruction par un embâcle, montée des eaux en amont, rupture et aspiration. Contournement en rive droite, les débordements ont emprunté la route et rejoint la Roya à l'aval de la STEP. Coupure d'électricité	[1]
	18h30	Bouffée sédimentaire du Vallon de St-Pancrace observée par M. Gaglio (Force 06). Route déjà recouverte par des matériaux, infranchissable	[1]
	19h00	Pont du Bourg Neuf toujours présent	[1]

Commune de Tende (Village)			
Date	Horaire	Observations	Source
	19h47	En route vers Tende pour évacuer une famille, M. BOLGARI doit faire demi-tour, impossible de passer au niveau du pont des 14 arches : l'ouvrage est détruit	[3]
	Vers 20h00	Premières arrivées au centre d'accueil communal	[1]
	20h00	L'hôpital de Tende n'a plus d'électricité.	[4]
	Un peu avant 21h	Destruction du pont du Bourg Neuf	[1]
	21h00	Déclenchement de la sirène par la commune lorsque 1 m d'eau observé sur la place du Riou. Evacuation des habitations en rive droite au niveau de la confluence avec le Riou. Evacuation par les gendarmes des habitations en rive gauche à l'aval immédiat du pont des truites.	[1]
	21h00-22h00	Maison située en amont immédiat du pont du Bourg Neuf est entièrement emportée. Le pont du Bourg Neuf est déjà détruit à ce moment-là.	[1]
	21h30	L'hôpital St-Lazare [EHPAD] a 50 cm d'eau dans les sous-sols, les groupes électrogènes ont lâché. Pas de patient en danger. Route emportée au niveau du pont sud de Tende (proximité station d'épuration, risque de pollution non évalué)	[5]
	21h30-22h	Evacuation de l'EHPAD (70 résidents) vers le CHU. L'évacuation se produit après la destruction du pont du Bourg Neuf.	[1]
03/10/2020	00h00-01h00	Fin de l'évacuation de l'EHPAD	[1]
	<u>Autres :</u>	Le pont des Truites a été obstrué par des embâcles et a fait bouchon. Il a été contourné en rive droite ("geyser") et en rive gauche, ce qui a entraîné les débordements au niveau du lotissement situé en rive gauche à l'aval immédiat de l'ouvrage.	[1]
		<u>Vallon du Réfrei</u> : dégâts observés à partir des granges de la Pia. Matériaux arrivés au lac de la Pia	[1]

Sources Tende (Village) :

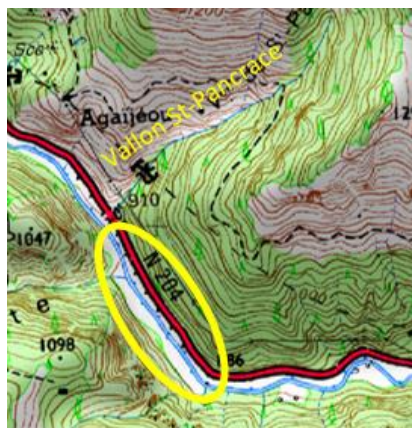
[1] Réunion avec la commune du 15/02/2021

[2] : COD Point de situation n°7 - 17h (dernier point n°6 à 16h)

[3] : Entretien du 18/02/2021 avec M. BOLGARI (Secrétaire général à La Brigue et pompier intervenu en gestion de crise à St-Dalmas-de Tende le 02/10/2020)

[4] COD Point de situation n°8 - 20h (dernier point n°7 à 17h)

[5] : COD Point de situation n°9 - 21h30 (dernier point n°8 à 20h)



(gauche) : localisation route coupée (cf. 16h20-16h30) / (droite) : localisation place du Riou (cf. 21h00)

Commune de Tende (St-Dalmas de Tende)			
Date	Horaire	Observations	Source
02/10/2020	17h00-18h00	Destruction de la passerelle EDF (usine hydroélectrique de Paganin)	[1]
	17h30-18h00	Début de débordement vers les terrains de M. DENIS. Vidéo prise à 18h35	[1]
	18h00	Début d'évacuation vers l'école primaire	[1]
	19h00-20h00	Coupure du réseau téléphonique et de l'électricité	[1]
	19h30	Croisement du Granile infranchissable	[1]
	20h00	Barrage des Mesches : 200 m ³ /s entrant. Ouverture de la vanne de fond (80 m ³ /s) pour éviter de solliciter les parties supérieures du barrage.	[2]
	20h00	En route pour aller au barrage des Mesches (manœuvre manuelle d'une vanne), M. BOLGARI fait demi-tour, route emportée, aucun accès vers les Mesches. Début d'évacuation des rez-de-chaussée vers les étages	[3]
	20h30	Pont D43 vers la Brigue : 2 m de revanche avant surverse. Evacuation du lotissement EDF : les arbres commencent à s'écraser contre les maisons, présence d'eau autour des maisons	[3]
	21h00	Pont de Teris en charge, "ça tapait", un peu d'eau sur la chaussée, et pas encore de contournement en rive droite	[3]
	21h30	Barrage des Mesches : 155 m ³ /s entrant. Réouverture de la vanne de fond (80 m ³ /s) pour éviter de solliciter les parties supérieures du barrage. Dépôt balayé par les eaux contenant 120 kilos d'explosifs et 200 détonateurs. PGHM demande si risque d'explosion.	[4]
	21h-21h30	Mur au niveau des bâtiments Balagayrie détruit par la Bieugne, niveau d'eau monte au niveau de la route. Pont D43 vers la Brigue : 1 m de revanche avant surverse	[1,2]
	22h15	Barrage des Mesches : 191 m ³ /s entrant. Réouverture de la vanne de fond souhaitée par EDF (80 m ³ /s) pour éviter de solliciter les parties supérieures du barrage, mais impossible sans héliportage	[5]
	22h-23h	La Bieugne : impossible de passer pour évacuer une maison en rive gauche. "On entendait les hangars tomber".	[1]

Commune de Tende (St-Dalmas de Tende)			
Date	Horaire	Observations	Source
10/3/2020	Vers 01h00	Destruction du pont Teris : tablier invisible, à la rupture le niveau d'eau est descendu "d'un coup"	[1]
	01h00	La Bieugne, 2 ponts en amont du terrain de football : Pont : niveau d'eau 4 m sous le tablier ; Pont SNCF : tablier invisible, surverse	[1]
	2h06	Secteur lac des Mesches : L'exploitant devait décharger le lac par action des vannes mais aucun retour sur la réussite d'atteindre la retenue par voie terrestre au moyen d'un CCFM SP	[6]
	3h	Bref moment avec retour du réseau téléphonique. Pas d'accalmie de la pluie ressentie	[1]
	4h-5h	Accalmie de la pluie	[1]
Autres		Pont D43 vers la Brigue : pas de surverse	
		Pont ferroviaire : aucun désordre côté Roya et côté Bieugne	
		Pont sur la Bieugne en amont immédiat de la confluence : détruit lors de la crue de 1993	

Sources Tende (St-Dalmas) :

[1] : Entretien du 18/02/2021 avec M. Nicolas DENIS (pompier intervenu en gestion de crise à St-Dalmas-de Tende le 02/10/2020)

[2] : COD Point de situation n°8 - 20h (dernier point n°7 à 17h)

[3] : Entretien du 18/02/2021 avec M. BOLGARI (Secrétaire général à La Brigue et pompier intervenu en gestion de crise à St-Dalmas-de Tende le 02/10/2020)

[4] : COD Point de situation n°9 - 21h30 (dernier point n°8 à 20h)

[5] : COD Point de situation n°10 - 00h16 (dernier point n°9 à 21h30)

[6] : COD Point de situation n°11 - 2h06h (dernier point n°10 à 00h16)



(gauche) : direction écoulement reportées (cf. 21h00-21h30) / (droite) : maison n'ayant pu être évacuée (cf. 22h00-23h00), Façade avant éventrée, affouillement des fondations. Propriétaires restés dans la maison pendant toute la durée de la crue

Commune de La Brigue			
Date	Horaire	Observations	Source
02/10/2020	16h00	Coupure d'électricité	[1]

Sources La Brigue :

[1] : COD Point de situation n°6 - 16h (dernier point n°5 à 14h)

Commune de Fontan			
Date	Horaire	Observations	Source
01/10/2020	-	Alerte Prédict	[1]
	12h30	Pluie forte / intense et vent fort	[1]
	Début d'après-midi	Vent très fort	[1]
	16h	Les premiers désordres apparaissent au niveau la Céva : Avant dernier pont depuis la confluence : surverse et contournement en rive droite de la Céva Pont de la confluence : contournement en rive droite de la Céva, les débordements empruntent la route jusqu'à la borne incendie	[1]
	16h	Fermeture de la route du vallon de Berghe au niveau du carrefour de la RD6204 et route de Berghe. Le vallon déborde sur la RD6204.	[1]
02/10/2020	18h-18h30	Pont d'Ambo toujours présent jusqu'à 18h, pluie forte mais aucun dégât engendré par la Roya. A partir de 18h, montée de la Roya d'un coup. Débordements du Vallon du Conseil qui empruntent la route principale vers l'aval et vers l'amont (jusqu'au feu tricolore) et le pont de Fontan.	[1]
	18h30-19h	Première évacuation vers la salle du conseil municipal. Les personnes accueillies ne mentionnent pas de submersion ou dégâts sur leur habitation. Fermeture du pont de Fontan par le SDA suite à la demande de la mairie	[1]
	20h	Coupure du réseau téléphonique, électricité et internet. Evacuation des habitations de l'autre côté de la rue et des personnes déjà évacuée à la mairie vers les bâtiments de la colonie de vacances. Traversée risquée du pont de Fontan : absence d'eau sur le tablier à ce moment, "le pont vibrait, certainement à cause du courant et des arbres qui tapaient". Terrains en rive droite en aval du pont de Fontan emportés	[1]
	22h	Pont du Campanet toujours présent, divers chocs sur la pile par une citerne de gaz	[1]
03/10/2020	00h16	Village de Fontan en cours d'évacuation. 200 personnes environ vont vers la colonie de vacances à proximité de la gare de Saorge - plus de nouvelle du groupe - réseau tph hs et pas d'électricité.	[2]
	02h06	Village de Fontan environ 150 personnes ont été évacuées vers la colonie de vacances à proximité de la gare de Saorge. Pont d'Ambo détruit	[3]
	03h00	Accalmie de la pluie	[1]
	04h30-05h00	Arrêt de la pluie	[1]

Commune de Fontan			
Date	Horaire	Observations	Source
	07h-08h	Temps clair, ciel bleu. Niveau de la Roya important. Des flottants continuent de descendre.	[1]
		Les désordres sont survenus durant la nuit	[1]
		Pont de Fontan : pas de surverse, ni d'obstruction, cour de récréation en rive droite à l'aval immédiat du pont non submergée	[1]
		Habitations en rive droite de la Roya en amont du pont de Fontan non submergées, à l'exception des caves	[1]
	Autres :	Centrale hydroélectrique : 2,5 m de limons/boue/eau. Contournement de l'usine par les débordements de la Roya, écoulements par la route jusqu'au terrain de boules (2 m de boue)	[1]
		Vallon du Conseil : vallon sec, dernière crue en 2012 ou 2013 avec apports de matériaux au niveau du cône de déjection, Roya également en crue	[1]
		Vallon de la Céva : crues passées sans obstruction des 2 ponts, aucune intervention de curage habituellement, roche-mère affleurante sous le pont avant la tempête Alex	[1]

Sources Fontan :

[1] : Réunion avec la commune du 15/02/2021

[2] : COD Point de situation n°10 - 00h16 (dernier point n°9 à 21h30)

[3] : COD Point de situation n°11 - 2h06 (dernier point n°10 à 00h16)

Commune de Saorge			
Date	Horaire	Observations	Source
03/10/2020	00h16	Saorge inaccessible car pont de Fontan sous l'eau	[1]
	04h00	Pont de la Tourette et pont de la Bendola endommagés	[2]

Sources Saorge :

[1] : COD Point de situation n°10 - 00h16 (dernier point n°9 à 21h30)

[2] : COD Point de situation n°12 - 4h (dernier point n°11 à 2h06)

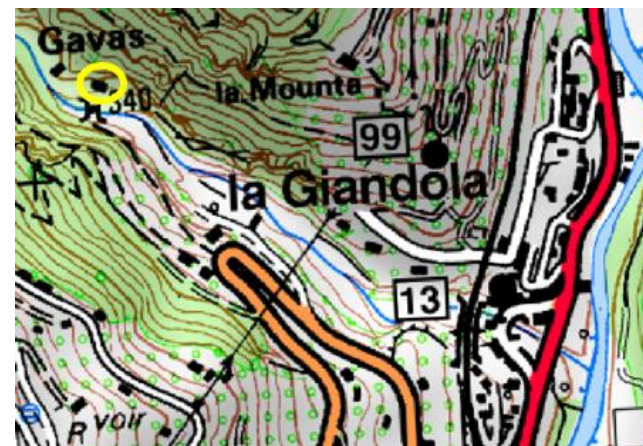
Commune de Breil sur Roya			
Date	Horaire	Observations	Source
01/10/2020	Fin de matinée	Alerte vigilance orange et rouge reçue par sms et mail	
02/10/2020	07h00	Ouverture du poste de commandement en mairie Déclenchement du Plan Communal de Sauvegarde	[1]
	11h00	Fin de l'évacuation du camping	[1]
	Fin de matinée	Pas de pluie mais vent fort : des pots de fleurs, des tôles s'envolent, des tuiles et toiture emportées	[1]
	Début après-midi	Evacuation de l'hôtel-restaurant Castel-du-Roy	[1]
	14h00	300 à 500 m ³ /s au niveau de Breil. Barrage EDF de Breil : effacement progressif 10 m ³ /s (sur 1h à 2h)	[2]
	16h00	Pluie intense renforcée par le vent mais, en termes de quantité d'eau, ce n'est pas exceptionnel	[1]
	16h-17h	Appel au standard des riverains habitant à Piene basse (rive gauche Roya, aval pont Ravai) : "l'eau monte" + organisation pour les évacuer	[1]
	????	Premier appel de la mairie à EDF pour ouvrir le barrage. Le seuil de 50 m ³ /s n'est pas atteint.	[1]
	17h00	Quartier Isola (rive droite amont pont Charabot) : évacuation des rez-de-chaussée. A ce moment, pas de débordement au niveau de ce secteur, ni de mise en charge du pont Charabot	[1]

Commune de Breil sur Roya			
Date	Horaire	Observations	Source
03/10/2020	17h30	Effacement du barrage par EDF (seuil de 50 m ³ /s atteint). "Le niveau du lac est bien descendu."	[1]
	18h00	Clos de boule : niveau d'eau affleurant la route	[3]
	18h00	Débit à Breil 400 m ³ /s. Prévision 600-800 m ³ /s vers 23h-0h	[4]
	18h23	Pont Viel déjà en surverse et débordement sur la route en rive droite. Les voitures présentes sur le parking en amont de la station-essence Total commencent à être emportées. Maglia : 2 ponts à la confluence non obstrués, débit important mais rien d'impressionnant. Photos et vidéos prises par M. Le Maire	[1]
	18h40	Le lac est à nouveau rempli malgré l'effacement du barrage	[1]
	19h30	Clos de boule : niveau d'eau atteint le haut du mur	[3]
	20h00	Pont Viel déjà emporté. Coupure de l'électricité	[1]
	21h00	Déménagement du poste de commandant vers la caserne	[1]
	21h00	Barrage de Breil : débit stable de 400 m ³ /s. Prévision 600-800 m ³ /s vers 23h00-00h00	[5]
	21h30	Pont supérieur : 2 m avant surverse + vibration du pont	[1]
	21h00-22h00	Maglia : maison en rive gauche emportée sur sa moitié	[1]
	22h15	Barrage de Breil : débit de 700 m ³ /s. Prévision 600-800 m ³ /s vers 23h00-00h00	[6]
	22h25	Quartier Isola : les rez-de-chaussée sont sous l'eau. Evacuation de tout le quartier Isola jusqu'à 00h00. Point de débordements en rive gauche en amont du pont Charabot au niveau de la place Brancion	[1]
	00h16	10 véhicules dont un camping-car, emportés par les eaux sur les berges de la Roya. Un VL parti par-dessus le barrage sans savoir s'il y avait quelqu'un dans le véhicule, mais les pompiers ont vu les phares allumés. Le camping-car est certainement bloqué sous le pont du lac de Breil. L'eau passe par-dessus et monte sur le secteur de la mairie. Coupure eau potable à Breil. Breil coupé en deux par la Roya. Village sous l'eau. 5 toitures arrachées. Gymnase prend l'eau par le toit. Déplacement en cours des personnes qui s'y étaient réfugiées vers le collège de Breil,	[6]
	00h45	Pont Charabot : surverse de 2 m au-dessus de la chaussée	[3]
	00h30 - 1h	Accalmie de la pluie	[1]

Commune de Breil sur Roya			
Date	Horaire	Observations	Source
	1h-2h	Pic de crue. Pont Charabot : surverse, niveau maximal atteint et correspondant au niveau du 1er étage de l'immeuble du quartier Isola. D'après les témoignages "la rivière était bombée au milieu".	[1]
	2h06	Suite au débordement du ruisseau La Maglia, une partie d'une maison a été emportée. Un homme sur place fait des signes avec une lampe mais il n'est pas accessible, et ne peut pas être secouru pour l'heure. Mise en place d'un centre d'hébergement d'urgence. Evacuation du centre du gymnase vers le collège pour cause d'inondation.	[7]
		Les dégâts sont survenus principalement durant la nuit.	[1]
		Le pont Charabot a fait obstacle aux écoulements et constitue le point noir durant l'évènement	[1]
	Autres :	Hauteur maximale atteinte : Clos de boule : 40 cm ; Place Brancion : 40 cm ; Village : 2,5 m	[1]
		Pont supérieur : pas de surverse, niveau max atteint correspondant au jardin d'enfants en rive droite	[1]
		Pont inférieur : pas d'obstruction, ni de surverse	[1]
		Crue de 1975 ou 1979 : pont de Viel et pont du stade détruits, 1 m d'eau dans le stade	[1]

Sources Breil :

- [1] : Réunion avec la commune du 18/02/2021
- [2] : COD Point de situation n°5 - 14h (dernier point n°4 à 11h30)
- [3] : Témoignage recueilli par JM. MASSON (RTM) le 08/10/2020
- [4] : COD Point de situation n°8 - 20h (dernier point n°7 à 17h)
- [5] : COD Point de situation n°9 - 21h30 (dernier point n°8 à 20h)
- [6] : COD Point de situation n°10 - 00h16 (dernier point n°9 à 21h30)
- [7] : COD Point de situation n°11 - 2h06h (dernier point n°10 à 00h16)



Localisation de la maison emportée sur moitié en rive gauche de la Maglia

4.5 INTENSITE DES PHENOMENES TORRENTIELS

Les observations de terrain réalisées par l'ONF-RTM lors de visites sur site entre le 8 octobre et le 20 novembre 2020, ainsi que l'analyse de l'orthophotographie et du LiDAR post-crue réalisés par l'IGN les 5 et 6 octobre 2020, ont permis d'**identifier les secteurs impactés, et de classer et cartographier l'intensité des phénomènes torrentiels survenus lors de l'événement du 2 octobre 2020**. L'analyse a été menée sur la Roya et ses principaux affluents.

4.5.1 Rappel sur la notion d'intensité de crue

La notion d'intensité fait ici référence à celle utilisée dans le guide « Construire en montagne » (MEDDTL, 2010), dans lequel la qualification de l'aléa résulte du croisement de l'intensité des phénomènes torrentiels et de la probabilité d'atteinte.

Le travail réalisé correspond à une cartographie représentative de **l'intensité atteinte par les phénomènes torrentiels (hors mouvement de terrain) lors de la crue du 2 octobre 2020**. Il ne s'agit donc pas d'une carte d'aléas, des secteurs non touchés ou faiblement impactés pouvant être concernés lors d'autres événements compte tenu de la forte évolution des lits des cours d'eau et des quantités très importantes de matériaux mobilisés et mobilisables dans la Roya et ses vallons affluents.

4.5.2 Définition et critères de qualification des classes d'intensité

Les classes d'intensité et les critères de qualification retenus sont issus de la méthodologie proposée dans le guide *Construire en montagne – la prise en compte du risque torrentiel* (MEDDTL, 2010).

La hiérarchisation des phénomènes torrentiels est basée sur **trois classes d'intensité : forte, moyenne et faible**. Chacune de ces classes est définie à partir des principaux critères suivants : les paramètres hydrauliques (niveau d'écoulement, niveau d'engrèvement, niveau d'affouillement, taille des blocs), l'impact des flottants et les effets sur les enjeux (infrastructures, ouvrages, bâtiments, espaces agricoles).

La grille suivante détaille l'ensemble de ces critères pour les trois niveaux d'intensité.

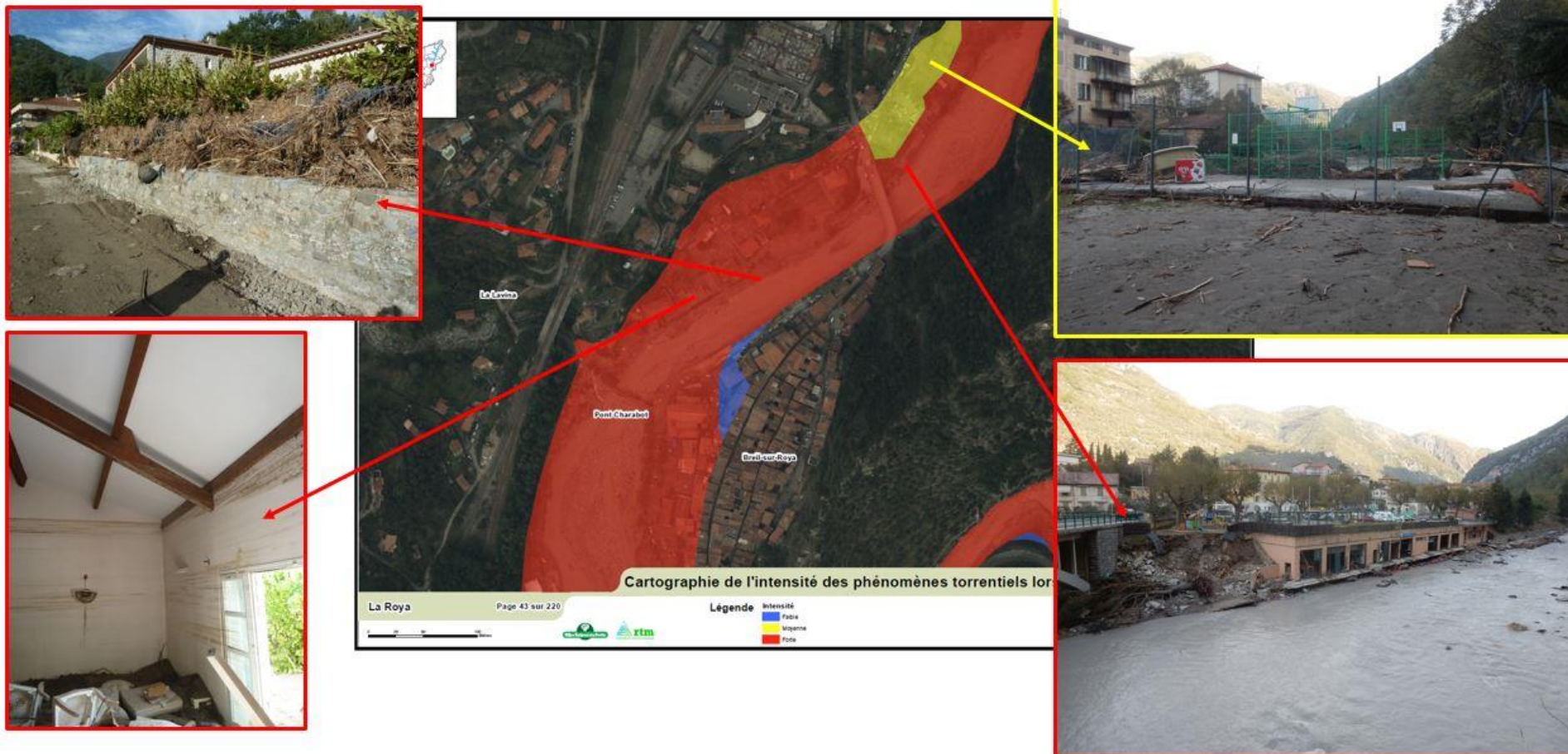
CRITÈRES	CLASSE D'INTENSITÉ		
	Forte	Moyenne	Faible
Ordres de grandeur des paramètres hydrauliques	La brutalité des phénomènes et des débordements ne laisse pas la possibilité d'anticiper et de se déplacer hors de la zone exposée ou jusqu'à une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement dépasse 1 m. Les affouillements ont une profondeur supérieure à 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés excède 50 cm.	Les phénomènes sont suffisamment progressifs pour laisser la possibilité d'anticiper et, au moins, de rejoindre une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 1 m. Les affouillements ont une profondeur qui ne dépasse pas 1 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 50 cm.	Les phénomènes sont progressifs et laissent la possibilité d'anticiper pour quitter la zone menacée ou rejoindre une zone refuge. La hauteur d'écoulement ou d'engravement reste inférieure à 0,5 m. Les affouillements ont une profondeur qui ne dépasse pas 0,5 m. La taille des plus gros sédiments transportés n'atteint pas 10 cm.
Flottants	Les risques d'impact par des flottants de grande taille (arbres) sont importants.	Les risques d'impact par des flottants de grande taille sont faibles.	Les flottants sont de petite taille et ne peuvent pas endommager une façade de maison.
Infrastructures et ouvrages	Les ponts sont engravés, submergés ou emportés. Les routes ou les équipements (pylônes, captages, ...) faisant obstacle aux divagations du torrent sont détruits ou ensevelis par des dépôts. Les voies de circulation sont impraticables du fait de la perte du tracé. De longs travaux de déblaiement et remise en service sont nécessaires.	Les dégâts aux infrastructures, aux ouvrages et aux équipements (pylônes, captages...) restent modérés ou ponctuels et leur remise en service peut être rapide.	Les routes sont submergées mais sans endommagement et avec possibilité de remise en service rapide.
Bâtiments	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés induisent la destruction des bâtiments exposés. La ruine des constructions peut notamment intervenir par impacts sur les façades ou par sapement des fondations (notamment sur les angles des bâtiments, plus particulièrement menacés d'affouillement par la concentration des écoulements et les survitesses).	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement et les matériaux charriés peuvent endommager gravement des façades non renforcées mais sont insuffisantes pour endommager des façades renforcées. Les affouillements prévisibles ne sont pas assez profonds pour entraîner la ruine des constructions normalement fondées.	Les contraintes dynamiques imposées par l'écoulement sont modérées et ne peuvent pas endommager des façades usuelles même non renforcées. Les affouillements prévisibles sont faibles et ne peuvent pas menacer les fondations des bâtiments
Espaces naturels et agricoles	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion de grande ampleur sont prévisibles à cause des divagations du lit du torrent. Ils conduisent à de profonds remaniements des terrains exposés.	Des phénomènes d'engravement ou d'érosion sont prévisibles mais leur ampleur reste limitée.	Les écoulements prévisibles sont de faible hauteur. Les dépôts peuvent être boueux mais sans matériaux de plus de 10 cm. Les affouillements prévisibles sont faibles.

Tableau 6 : Critères de qualification des classes d'intensité
(Source : d'après le guide Construire en montagne, MEDDTL, 2010)

Extraits de la cartographie : La Roya à Tende et St-Dalmas-de-Tende



Extraits de la cartographie : La Roya à Breil-sur-Roya



4.5.3 Principaux résultats

L'atlas cartographique de l'intensité de la crue du 2 octobre 2020 pour la vallée de la Roya est disponible en [Annexe 7](#) du présent rapport. À noter qu'il ne s'agit pas d'une cartographie exhaustive de tous les secteurs impactés, certains secteurs n'ayant pas pu être reconnus. Par ailleurs, l'analyse étant basée sur des constats de terrain faits une semaine, voire plus, après la crue, elle peut donc prendre en compte l'effet de travaux d'urgence qui auraient effacé d'éventuels indices morphologiques.

L'analyse de la cartographie met en évidence que l'intensité atteinte par les phénomènes torrentiels à la suite de la tempête Alex est majoritairement forte sur l'ensemble des secteurs cartographiés. On constate en effet que 90%, voire plus, de l'emprise impactée par les crues torrentielles de la Roya, de la Bieugne et du Caïros correspond à la classe d'intensité forte.

Classe d'intensité	Roya		Bieugne		Caïros	
	S [ha]	S [%]	S [ha]	S [%]	S [ha]	S [%]
Faible	12,07	7,4	0,57	1,5	1,25	6,2
Moyenne	7,60	4,7	0,93	2,4	1,27	6,2
Forte	142,88	87,9	37,55	96,1	17,79	87,6
Total :	162,54		39,06		20,31	

Tableau 7 : Superficies des secteurs impactés par classe d'intensité et par cours d'eau

4.6 DOMMAGES AUX BATIS ET AUX INFRASTRUCTURES

La crue du 2 octobre 2020 a fait 18 victimes et a généré de nombreux dégâts au bâti et aux infrastructures, avec de très forts niveaux d'endommagement. Nous analyserons dans ce qui suit les liens entre la nature des dommages, leur importance, et le niveau d'intensité des phénomènes torrentiels. Cette analyse ne porte que sur les dommages directs, c'est-à-dire qui sont relatifs à la dégradation physique des enjeux impactés par le phénomène, et plus précisément les dégâts structuraux et les pertes humaines. Ne seront pas abordés ici les dommages indirects, tels que les pertes d'exploitation, les coupures de réseaux, et encore moins les dommages intangibles tels que les désordres psychologiques ou environnementaux : ce n'est pas l'objet de ce Retex et les données ne sont pas disponibles à ce stade.

L'analyse est réalisée à partir des données collectées dans le cadre des relevés de terrain sur les désordres aux bâtis, aux infrastructures et aux ponts. Les données ont par ailleurs été complétées par les informations transmises par les gestionnaires d'infrastructures ou la DDTM. La classification des enjeux retenue est présentée au Tableau 8. Des informations intéressantes sur les modes de défaillance des ouvrages de protection au cours de la crue ont pu être recueillies à cette occasion.

Les tableaux de données fournis en annexe sur les bâtiments ([Annexe 8](#)) et les ponts ([Annexe 9](#)) en sont la re-transcription tout comme l'atlas cartographique de l'[Annexe 10](#) qui permet d'identifier le niveau d'endommagement de ces enjeux par rapport à la carte d'intensité précédemment établie.

Deux niveaux d'analyse sont proposés :

1. Localisation et dénombrement des enjeux atteints et de leur niveau d'endommagement ;
2. Analyse du niveau d'endommagement constaté selon les caractéristiques physiques de l'enjeu et le niveau d'intensité auquel il a été exposé.

Les résultats de ces analyses conduisent à un certain nombre de recommandations concernant la réduction de la vulnérabilité structurale des enjeux.

Type d'enjeu	Classification retenue
Bâtiment	○ Habitation individuelle (<i>maison</i>) ○ Habitation collective (<i>immeuble</i>) ○ Receiving du public (<i>logements touristiques (hôtel, colonies, accueil UCPA...), lieux de culte, autres ERP</i>) ○ Centre de secours (<i>pompier, gendarmerie, centre gestion des routes...</i>) ○ Santé (<i>EHPAD, hôpital...</i>) ○ Enseignement (<i>de la crèche au lycée</i>) ○ Activité économique (<i>agriculture, artisanat, commerce dont restauration, industrie, hangars et entrepôts entreprise TP</i>) ○ Administratif (<i>mairie, poste, impôts...</i>) ○ Camping (<i>bâtiment d'accueil, bungalows</i>) ○ Activité sportive (<i>terrain de sport, centre équestre, piscine</i>) ○ Autre (<i>garage, abris, grange</i>)
Infrastructure de réseau public	○ Routier (<i>ponts et linéaire : voie piétonne, piste, route communale, route métropolitaine, route départementale</i>) ○ Ferré (<i>ponts et linéaire</i>) ○ Eaux usées (<i>bâtis : station d'épuration, et réseau de collecte</i>) ○ Eau potable (<i>bâtis : captage/prise d'eau/station de traitement, et réseau de distribution</i>) ○ Irrigation (<i>bâtis : prise d'eau/station de pompage, et canal de distribution</i>) ○ Électricité (<i>bâtis : centrale/bâtiments/postes, et réseau de distribution</i>) ○ Télécommunication (<i>bâtis : centrale/bâtiments/ transformateur, et réseau de distribution</i>)
Ouvrage de protection	○ Transversal (<i>seuil et barrage</i>) ○ Longitudinal (<i>digue et protection de berge</i>)

Tableau 8 : Classification des enjeux retenue

4.6.1 Préambule concernant l'acquisition des données - Limites

Le taux d'endommagement dépend des caractéristiques propres à chaque type d'enjeu et du niveau d'intensité auquel il est exposé.

Ainsi, en Suisse, pour tous les types de phénomènes, dont les crues torrentielles (dénommées « inondation dynamique ») et les laves torrentielles, un niveau d'endommagement moyen, mais également de létalité (mortalité humaine), est affecté à chaque type d'enjeu, selon chaque niveau d'intensité (faible, moyen, fort). En France, il n'existe pas, à ce jour, de données comparables.

Les résultats obtenus dans le cas de la crue Alex seront donc comparés avec les données suisses pour en esquisser une analyse critique.

C'est pourquoi les modalités de définitions de ces deux paramètres sont tout d'abord établies avant de décrire celles ayant permis l'acquisition des données correspondantes pour le RETEX.

4.6.1.1 Les différents modes d'endommagement

Selon le type d'enjeux, les modes d'endommagement varient selon les types d'effets localisés :

- **Pour le bâti** : inondation, affouillement, engravement, impact (effet dynamique de gros blocs) ;

- **Pour les routes et voies ferrées** : inondation, érosion de berge, glissement de versant, recouvrement par des matériaux, dépôt de flottants ;
- **Pour les ponts** : submersion, affouillement de culée/du radier aval, contournement/érosion latérale, engravement, dépôt de flottants, dégâts au tablier soulignant des impacts (par des blocs, des flottants), obstruction par des embâcles/blocs.

Le Tableau 9 illustre ces différents modes d'endommagement sur la base d'exemples constatés sur la Roya.

4.6.1.2 Classification du taux d'endommagement structural

Les taux d'endommagement aux structures des bâtis, routes et ponts sont estimés selon des classes inspirées des classes Hazus utilisées de façon standard dans d'autres études (Jakob et al. 2011, Kean et al., 2019) :

- Destruction complète (100% d'endommagement) ;
- Dégâts importants – menace de ruine (taux d'endommagement > 25%) ;
- Partiellement détruits (5% < taux d'endommagement < 25%) ;
- Dégâts mineurs (taux d'endommagement < 5%) ;
- Aucun dégât structurel visible (taux d'endommagement ~ 0%).

Le Tableau 10 ci-après illustre chacune de ces classes sur la base d'exemples de dommages constatés sur la Roya. Les classes utilisées par Jakob *et al.* (2011) sont plus précises dans les taux d'endommagement structural forts qui sont classés dans les intervalles 25%-75%, >75% et 100%. Comme dans l'analyse de Kean *et al.* (2019), nous avons rassemblé les classes 25-75% et >75% en une seule classe.

Pour les bâtis, l'affouillement étant défini comme le mode d'endommagement le plus préjudiciable en contexte torrentiel (Givry et Péteuil, 2011), le niveau d'endommagement des fondations a également été relevé. La classification spécifique suivante a été définie pour le RETEX :

- Totalement détruit (100 %) ;
- Fondations avec affouillement général ;
- Fondations avec affouillement local ;
- Fondations visibles mais non affouillées ;
- Fondations intactes ;
- Inconnu (car fondations non visibles).

4.6.1.3 Intensité de la crue – Intensité d'affouillement et d'engravement des bâtiments

Différents niveaux d'intensité d'affouillement ou d'engravement ont été notés, sur le terrain, pour chaque bâtiment. C'est sur cette base et à partir d'une analyse complémentaire sur la base d'orthophotographies, que la carte d'intensité de la crue a été établie (§ 4.5). La carte d'intensité qualifie l'intensité moyenne du phénomène torrentiel d'une zone donnée. Elle n'exclut pas l'observation d'une intensité localement plus forte (par exemple des affouillements concentrés autour de l'angle d'une maison) ou plus faible (par exemple des dépôts plus faibles dans l'ombre d'un obstacle).

Concernant l'endommagement des bâtis, sont systématiquement identifiés, en sus des modes d'endommagement et des taux d'endommagement structural :

- La profondeur d'affouillement (A) : faible ($A < 50$ cm) ; moyenne ($50 \text{ cm} < A < 1$ m) ; forte ($A > 1$ m) ;
- La hauteur d'engravement (E) : faible ($E < 50$ cm) ; moyenne ($50 \text{ cm} < E < 1$ m) ; forte ($E > 1$ m).

Lorsque les endommagements étaient liés à de l'inondation, la hauteur d'eau n'a pas été relevée car non spécifique aux crues torrentielles.

Les données ont été compilées sur SIG, contrôlées et complétées par analyse orthophotographique (pré et post crues), notamment pour ce qui concerne les bâtiments totalement détruits et la définition des taux d'endommagement structuraux des linéaires de voirie.

Mode d'endommagement	Bâti	Route	Pont
Inondation / submersion par de l'eau liquide			
Affouillement des fondations (bâti) par érosion de berge ou glissement de terrain de la chaussée (routes) de culée/du radier aval ou contournement/érosion latérale (ponts)			
Engrèvement dépôt /recouvrement de matériaux (bâti, routes et ponts)			

Mode d'endommagement	Bâti	Route	Pont
Dépôt de flottants dépôt/recouvrement par des flottants (bâti, routes et ponts)			
Impacts par des blocs, voire des flottants (bâti et tabliers des ponts)		Non concerné	
Obstruction par des floes et/ou des embâcles (ponts)	Non concerné	Non concerné	

Tableau 9 : Modes d'endommagement des bâtis, routes et ponts illustrés à partir de constats sur la vallée de la Roya (Source photos : ONF-RTM)

Taux d'endommagement structural général

Description	Taux de perte	Bâti	Route	Pont
Destruction complète : dépassement de la capacité de résistance à la rupture d'une partie importante des éléments structuraux → décalage permanent dangereux entre éléments, effondrement partiel voire total, déplacement du bâtiment hors de ses fondations	100 %			
Dégâts importants – menace de ruine rupture localisée d'éléments, fissures importantes dans les murs, grands décalages permanents des étages inférieurs ; érosion ou affouillement localisé ; tassement limité des fondations	25%-100 %			
Partiellement détruits dommages limités aux éléments des étages inférieurs, fissures dans les murs, pas de décalages permanents ou seulement des décalages mineurs	5%-25%			
Dégâts mineurs défaillance d'éléments non porteurs, dont les fenêtres et portes	<5%			

Tableau 10 : Classes et taux d'endommagement structural illustrés à partir de constats sur la vallée de la Roya (adaptées de Hazus et d'une figure tirée de Kean et al., 2019) (Source photos : ONF-RTM)

4.6.1.4 Limites des données collectées

Au vu de la très importante campagne de recueil de données nécessaires, les classes d'endommagement des enjeux sur le terrain ont été établies par différents opérateurs. Les utilisateurs conviennent globalement que les classes sont assez différenciées pour limiter les doutes. Le niveau de fiabilité a donc été jugé suffisant pour les analyses qui suivent. Toutefois si ces données devaient être utilisées pour mener de nouvelles analyses, potentiellement plus précises, un regard critique sur l'ensemble de ces données par un groupe de 2 à 3 personnes serait nécessaire pour disposer d'un jeu de données homogénéisé et limitant ces biais.

L'inventaire des dommages aux routes a été mené partiellement lors des missions de terrain et complété par une analyse orthophotographique, notamment pour affecter les taux d'endommagement. Le linéaire relevé et analysé, sur les vallées de la Roya et de la Vésubie, est ainsi inférieur au linéaire impacté relevé par les gestionnaires principaux (Tableau 11). Cependant, des éléments complémentaires sont fournis par leur localisation et taux d'endommagement associé, ainsi que par le relevé, non exhaustif, des voiries communales impactées (6,3 km).

Au final, ce sont près de 21 km de routes impactées qui ont été recensées sur la vallée de la Roya, et environ 15 km sur la vallée de la Vésubie, qui constituent la base du retour d'expérience sur leurs modalités d'endommagement.

Vallée	Route Métropolitaine (RM)		Route Départementale (RD)		Route Communale (RC/VC)	TOTAL levé RTM
	Levé RTM	Info Préf. 06	Levé RTM	Info Préf. 06	Levé RTM	
Roya	0 km	0 km	17,9 km	35 km	2,7 km	20,7 km
Vésubie	10,4 km	35 km	1,1 km	0 km	3,6 km	15,1 km
Total	10,4 km	<i>(environ)</i>	19,0 km		6,3 km	35,8 km

Tableau 11 : Linéaire de routes impactées relevés lors de cet inventaire (hors 600 m de pistes et voies piétonnes)

4.6.2 Dommages structuraux aux bâtiments

4.6.2.1 Nombre de bâtiments impactés et niveaux d'endommagement

Ne sont pas pris en compte, au titre du bâti, les bâtiments d'infrastructure de réseau public (eau, électricité, télécom). Les bâtiments sont considérés impactés dès lors qu'ils se trouvent dans l'emprise d'intensité de la crue, même faible, ce qui explique que certains bâtiments impactés ne présentent pas de dommages.

Le nombre de bâtiments impactés est établi par type d'usage, d'abord à l'échelle des deux vallées traitées (Tableau 12), puis par commune et cours d'eau de la vallée de la Roya (Tableau 13 et Figure 19). L'inventaire ainsi réalisé recense au total 429 bâtiments impactés, dont 277 habitations (individuelles et collectives). **Pour la vallée de la Roya, cela correspond à 224 bâtiments impactés, dont 127 habitations.**

Ainsi, **le nombre de bâtiments impactés se répartit de manière homogène entre les vallées de la Roya** (51% si tous types de bâtiments, 46% si seulement bâtiments d'habitation) **et de la Vésubie** (resp. 49%, 54%).

Vallée	Type de bâtiment									TOTAL
	habitation individuelle (maison)	habitation collective (immeuble)	recevant du public	centre de secours	santé	activité économique	de camping	activité sportive	autre	
Roya	105	22	5	3	1	32	14	5	37	224
Vésubie	144	6	4	2	0	23	2	4	20	205
Total	249	28	9	5	1	55	16	9	57	429
	277									

Tableau 12 : Nombre de bâtiments impactés dans les vallées de la Roya et la Vésubie selon leur type

Dans la vallée de la Roya, les bâtiments impactés se concentrent sur la commune de Tende (60% si tous types de bâtiments, 61% si seuls bâtiments d'habitation), puis sur celle de Breil-sur-Roya (resp. 24%, 18%). Cela se répartit ensuite entre les communes de Fontan (resp. 9%, 11%), Saorge (resp. 6%, 7%) et La Brigue (resp. 2%, 3%).

Commune	Type de bâtiment									TOTAL
	habitation individuelle (maison)	habitation collective (immeuble)	recevant du public	centre de secours	santé	activité économique	de camping	activité sportive	autre	
Breil-sur-Roya	21	2	4	0	1	5	12	0	9	53
Fontan	7	7	0	0	0	1	1	0	4	20
La Brigue	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Saorge	9	0	0	0	0	1	0	0	3	13
Tende	64	13	1	3	0	25	1	5	21	134
Total	105	22	5	3	1	32	14	5	37	224
	127									

Tableau 13 : Nombre de bâtiments impactés dans la vallée de la Roya selon leur type

Comme le montre la Tableau 19, les bâtiments impactés se concentrent le long de **la Roya**, dans la traversée des communes de Breil-sur-Roya, Fontan, La Brigue et Tende, y compris son versant rive droite sur cette dernière commune (152 bâtiments impactés dont 85 habitations). Ils se répartissent ensuite principalement sur les quatre cours d'eau que sont **le torrent de la Bieugne**, celui **de la Morte** et **le Refrei** sur la commune de Tende et **le Cairos** sur la commune de Saorge (50 bâtiments dont 26 habitations). Enfin, les 22 bâtiments restant (dont 16 habitations) se répartissent dans les **différents autres vallons** des communes de Tende (vallons de la Conscience, la Minière, de Priou et de Casterino, de Caramagne, de Cassette, de St-Pancrace), de Breil-sur-Roya (vallons de la Maglia et la Lavina) et Fontan (la Céva).

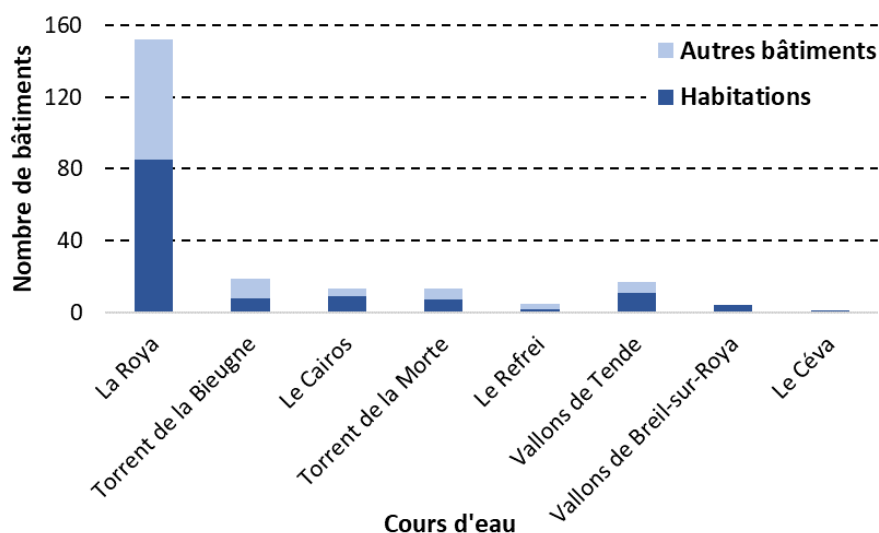


Figure 19 : Répartition des bâtiments impactés sur les cours d'eau de la vallée de la Roya

Parmi l'ensemble des 429 bâtiments impactés sur les vallées de la Vésubie et de la Roya, **40% sont totalement détruits, 12% menacent ruine**, 31% présentent des dommages même mineurs et 14% ne présentent aucun dommage structural (Tableau 14). Si on ne considère que les 277 habitations individuelles et collectives (Tableau 15), ces taux varient peu (resp. 34%, 11%, 35% et 19%).

75% des habitations totalement détruites et 63% des habitations avec menace de ruine se trouvent dans la vallée de la Vésubie pour respectivement 25% et 37% dans la vallée de la Roya. A l'inverse, 64% des habitations présentant des dommages limités (taux d'endommagement <25%) se situent en vallée de la Roya, contre 36% localisées en vallée de la Vésubie (Tableau 15). Ainsi, sur la Roya, ce sont environ 21% des habitations impactées qui n'ont pas subi de dommages structuraux, 50% qui ont subi des dommages limités (<25%) et 28% des dommages importants (menace de ruine et totalement détruit). En comparaison, ces ratios sont de 17%, 24% et 60% sur la Vésubie. **Pour ce qui concerne les habitations, le niveau d'endommagement est donc nettement supérieur sur la vallée de la Vésubie par rapport à la Roya pour un nombre équivalent d'habitations.**

Même moins marquée, cette différence de répartition des taux d'endommagement sur les bâtiments, avec un niveau d'endommagement plus important sur la vallée de la Vésubie que la Roya, se retrouve si on considère l'ensemble des bâtiments et pas seulement les habitations (Tableau 14).

Vallée	Aucun dégât structurel visible (0%)	Dégâts mineurs (0-5%)	Partiellement détruit (5-25%)	Dégâts importants – Menace de ruine (sup. 25%)	Totalement détruit (100%)	inconnu	TOTAL
Roya	35	53	36	23	74	3	224
Vésubie	34	35	10	29	97	0	205
Total	69	88	46	52	171	3	429
	16%	20%	11%	12%	40%	1%	100%

Tableau 14 : Nombre de bâtiments (hors infrastructures de réseau public) impactés par vallée selon leur taux d'endommagement

Vallée	Aucun dégât structurel visible (0%)	Dégâts mineurs (0-5%)	Partiellement détruit (5-25%)	Dégâts importants – Menace de ruine (sup. 25%)	Totalement détruit (100%)	inconnu	TOTAL
Roya	27	36	27	11	24	2	127
Vésubie	26	25	10	19	70		150
Total	53 19%	61 22%	37 13%	30 11%	94 34%	2 1%	277 100%

Tableau 15 : Nombre d'habitations (individuelles et collectives) impactées par vallée selon leur taux d'endommagement

Dans la vallée de la Roya, le niveau d'endommagement des bâtiments impactés est nettement plus élevé sur la commune de Breil-sur-Roya que sur les autres communes de la vallée, et notamment Tende, où le nombre de bâtiments impactés est le plus important. **Ce niveau d'endommagement général faible sur la commune de Tende est la principale explication du niveau d'endommagement plus faible sur la vallée de la Roya que sur celle de la Vésubie.** Ceci est d'autant plus marqué pour les seuls bâtiments d'habitation (Figure 20).

A noter que 2 bâtiments à Breil-sur-Roya et 1 autre à Tende, localisés le long de la Roya, ont un taux d'endommagement inconnu (Figure 20). Comme la rive n'était pas accessible lors de la mission de terrain, le taux d'endommagement structural n'a pas pu être analysé et aucune photographie n'a permis une analyse postérieure.

Si on s'intéresse aux différents cours d'eau le long desquels des bâtiments ont été impactés dans la vallée de la Roya (Figure 21), il s'avère que **le niveau d'endommagement des bâtiments impactés est particulièrement important le long du torrent de la Bieugne, avant même la Roya.** Le taux d'endommagement est également élevé dans les vallons de Breil-sur-Roya même si cela se limite à un panel de 4 bâtiments.

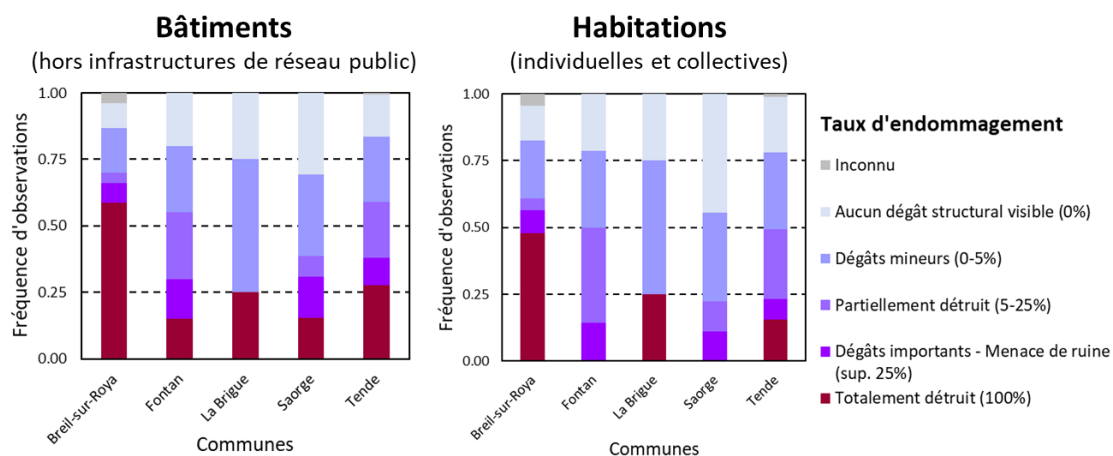


Figure 20 : Fréquence d'observations des taux d'endommagement sur les bâtis dans les différentes communes de la Roya

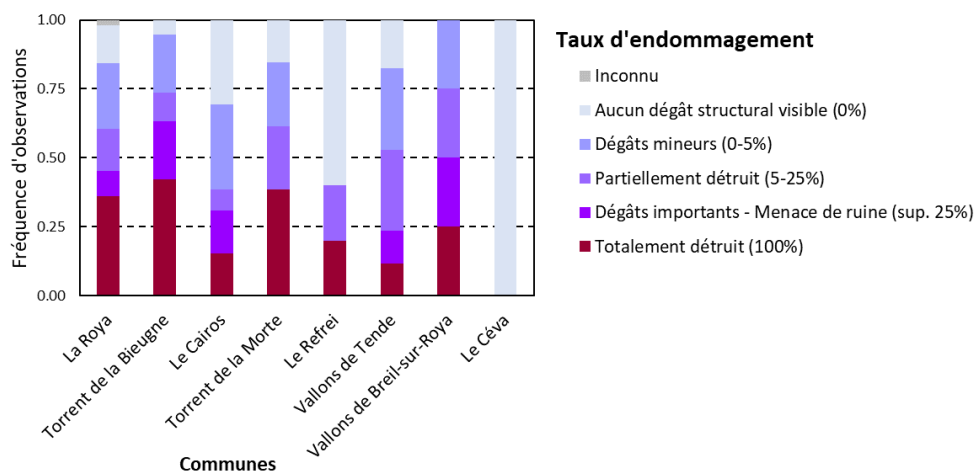


Figure 21 : Taux d'endommagement sur les bâtiments le long des différents cours d'eau de la vallée de la Roya

D'une manière générale, le nombre de dommages et les taux d'endommagement observés traduisent le caractère très exceptionnel de la crue du 2 octobre 2020, tant dans son intensité que dans son ampleur géographique.

4.6.2.2 Analyse des modalités d'endommagement structural

L'objectif de cette analyse est de comprendre le lien entre le niveau d'endommagement structural des bâtiments selon leurs caractéristiques propres, et le niveau d'intensité auxquels ils sont exposés. Afin de mener cette analyse statistique, **l'ensemble des données disponibles dans les vallées de la Roya et de la Vésubie sont utilisées pour disposer de l'échantillon le plus large possible.**

4.6.2.2.1 Taux d'endommagement selon le niveau d'intensité de la crue

Selon le Tableau 14 et le Tableau 15, ce sont 429 bâtiments dont 277 habitations (individuelles et collectives) qui ont été impactés. Si on ne considère que la vallée de la Roya, ce sont 224 bâtiments pour 127 habitations. Sur cette base, la Figure 22 et la Figure 23 montrent le nombre et la fréquence d'observations de taux d'endommagement en fonction du niveau d'intensité de la crue, en considérant respectivement tous les types de bâtiments (hors infrastructures de réseau public) et les seuls bâtiments d'habitation (individuelle et collective).

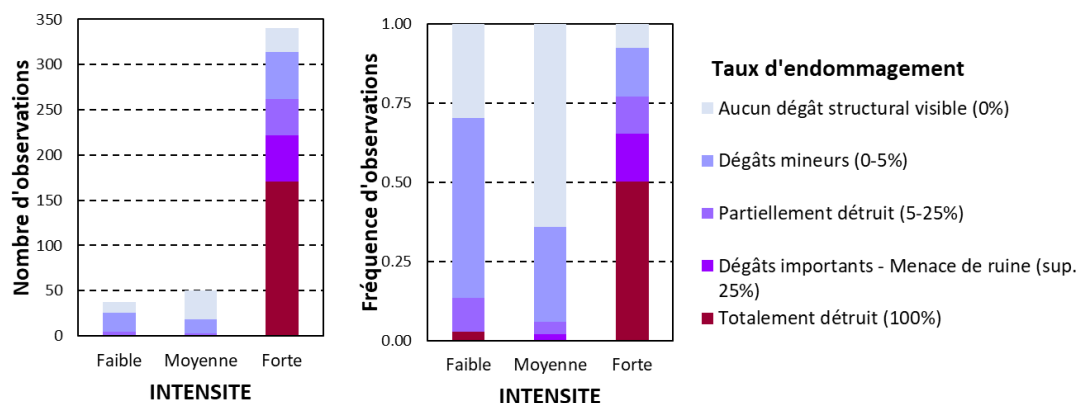


Figure 22 : Taux d'endommagement des bâtis (hors infrastructures de réseau public) selon le niveau d'intensité macroscopique

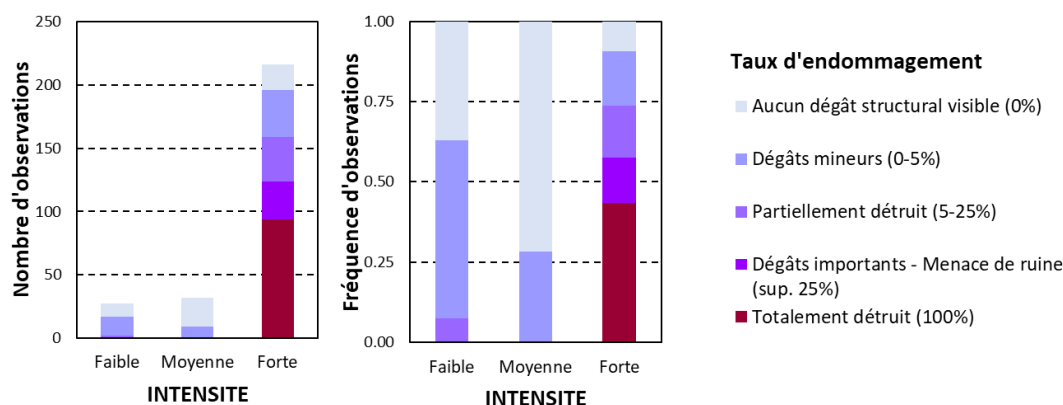


Figure 23 : Taux d'endommagement des bâtiments d'habitation selon le niveau d'intensité macroscopique

Logiquement, l'observation de dégâts structuraux importants (>25%) est quasi absente dans l'enveloppe d'intensité faible ou moyenne de la crue si on considère tous les bâtiments, et est totalement absente pour les seuls bâtiments d'habitation. Par contre, il est étonnant de constater que plus du quart des observations en enveloppe d'intensité forte de la crue, correspondent à l'absence de dégâts ou à des dégâts mineurs.

Une observation plus attentive de la carte d'intensité (Figure 24) montre que ces observations correspondent à des bâtis qui se trouvent en limite de l'enveloppe d'intensité forte (intensité notée « Forte_L » sur la Figure 25) : cela concerne 74 bâtis sur 342 si on considère l'ensemble des bâtiments et 55 habitations sur 163.

Logiquement, on constate que les taux d'endommagement sont plus faibles en bordure qu'au cœur de la zone d'intensité forte.

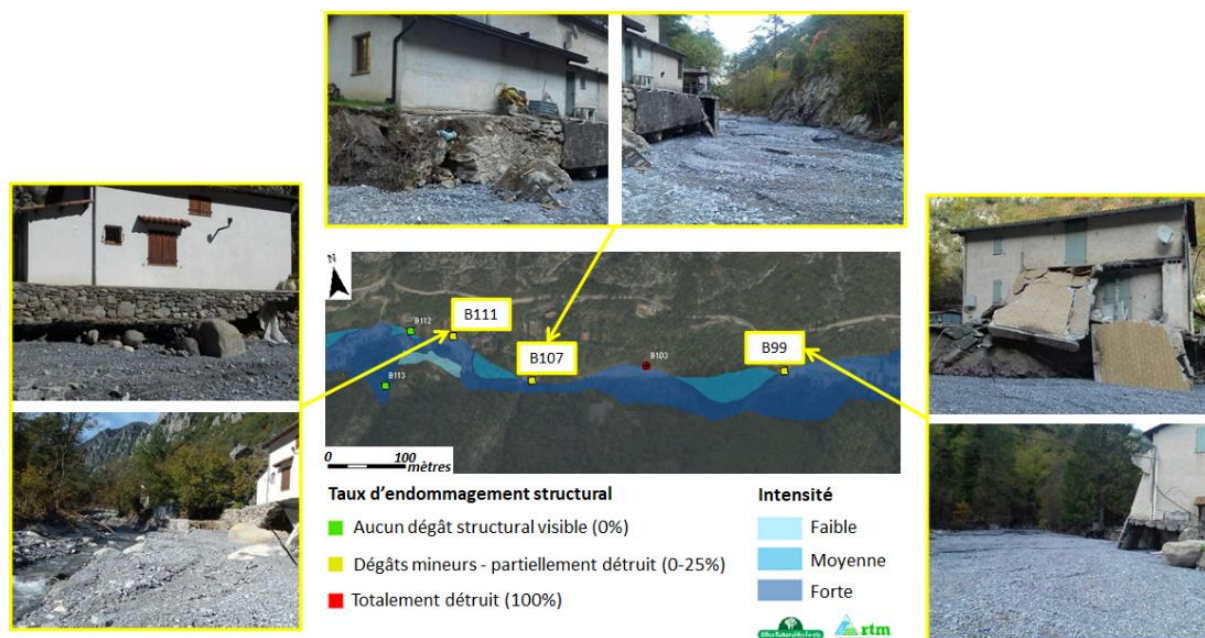


Figure 24 : Illustration de la présence de bâtis présentant peu de dégâts structuraux en limite de l'enveloppe d'intensité forte de la crue. La correspondance avec les numéros de bâtiments et leur description est disponible en [Annexes 8 et 9](#). Le niveau d'endommagement limité de l'habitation B99 peut paraître surprenant au vu des photos mais seul le garage attenant a été impacté et la structure du bâtiment principal d'habitation n'est, elle, pas endommagée. (Source photos : ONF-RTM)

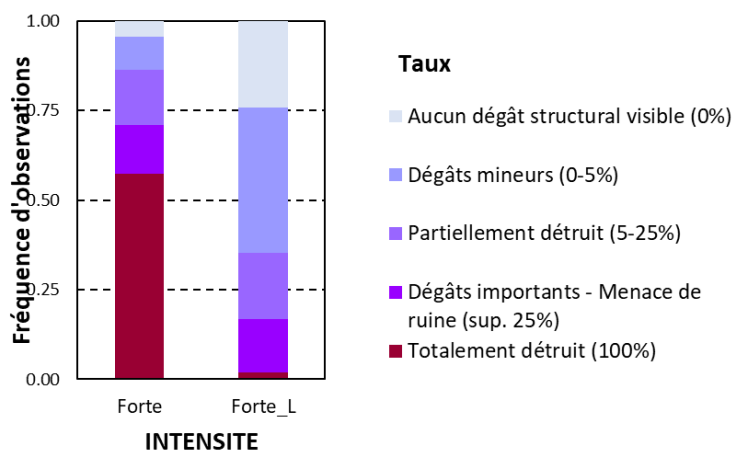


Figure 25 : Corrélation entre niveau d'intensité macroscopique et taux d'endommagement des bâtiments d'habitation, en différenciant les bâtiments atteints en limite de zone classée en intensité forte (Forte_L)

Ces observations questionnent les modalités d'établissement des cartes d'intensité nécessaires à la réalisation d'études d'aléas pour la prévention des risques torrentiels (PPR, analyses coûts bénéfices ou multicritères...). En effet, la caractérisation du niveau d'intensité est associée à l'estimation d'un niveau d'endommagement du bâti (élevé en zone d'intensité forte, modéré en zone d'intensité moyenne et limité en zone d'intensité faible).

On constate ici que, en limite de recul de berge et d'intensité forte, les dommages sur les bâtis sont limités car les fondations des bâtiments n'ont été atteintes que partiellement. Cependant, ces zones deviennent des zones plus exposées au recul de berge qui peut, à court ou moyen terme, menacer la stabilité de ces habitations qui n'ont pourtant subi que des dommages limités lors de cette crue.

Dès lors, une attitude prudente consiste à intégrer ces zones dans la zone d'intensité forte en prévision du recul de berge à venir et à l'origine de dommages potentiellement importants. Une poursuite des observations sur ces secteurs permettrait d'appréhender comment le recul de berges évolue et les endommagements réels occasionnés à ces bâtiments.

4.6.2.2 Taux d'endommagement structural selon le mode d'endommagement principal et les intensités d'affouillement et d'engrèvement sur les bâtiments

L'ensemble du jeu de données a été analysé pour extraire le mode d'endommagement préférentiel : inondation seule, affouillement, engrèvement ou à la fois affouillement et engrèvement. Pour cela, les règles suivantes ont été appliquées sur les 429 bâtis impactés lors de la crue pour établir le Tableau 16 :

- Lorsque le type d'aléa relevé sur le terrain est « inondé » sans aucune information sur un niveau d'engrèvement ou d'affouillement, le mode d'endommagement préférentiel par « inondation » est retenu ;
- Lorsque le bâti totalement détruit (100%) est identifié après la visite de terrain par croisement d'orthophotographie et bd topo® en zone d'intensité forte de la crue, il est en fait localisé dans la bande active, avec des effets majeurs d'affouillement et d'engrèvement : le mode d'endommagement préférentiel retenu est « affouillement et engrèvement estimé » ;
- Le mode d'endommagement préférentiel par « affouillement » est retenu lorsque seul un niveau d'intensité d'affouillement est indiqué et, si un niveau d'engrèvement est relevé, lorsque le niveau d'affouillement lui est supérieur ou égal ;
- Le mode d'endommagement préférentiel par « engrèvement » est retenu selon le même principe inversé que pour l'affouillement ;
- Lorsque le niveau d'intensité d'affouillement est le même que celui d'engrèvement, le mode d'endommagement par « affouillement et engrèvement relevé » est retenu.

Intensité	Inondation	Affouillement	Engrèvement	Affouillement et engrèvement		Total
				relevé	estimé	
Faible	5 / 6	12 / 12	12 / 19	4 / 4	-	33 / 41
Moyenne	20 / 28	8 / 12	14 / 23	2 / 2	-	44 / 65
Forte	4 / 4	73 / 108	31 / 46	10 / 15	82 / 149	200 / 323
Total	29 / 38	93 / 132	57 / 88	16 / 21	82 / 149	277 / 429

Tableau 16 : Nombre d'habitations / Nombre de bâtiments (hors infrastructures de réseau public) identifiés par type de mode d'endommagement et niveau d'intensité d'affouillement ou d'engrèvement

Sur cette base, le taux d'endommagement selon le niveau d'intensité d'affouillement ou d'engrèvement a été analysé pour chacun des modes d'endommagement (Tableau 17). Cette analyse a été réalisée en considérant d'abord tous les types de bâtis puis seulement les habitations. Du fait de la faible variation des résultats et donc de leur interprétation, les résultats présentés dans le Tableau 17 sont ceux qui considèrent l'ensemble des bâtis.

Pour les modes d'endommagement par affouillement et/ou engrèvement, les fréquences d'apparition de forts taux de dommages (>25% et totalement détruits) croissent avec le niveau d'intensité. Ceci n'est pas vérifié pour le mode d'endommagement principal par inondation pour lequel le nombre d'observations (73%) se concentre très clairement sur le niveau d'intensité moyenne : ces éléments ne peuvent pas être considérés comme représentatifs de ce mode d'endommagement.

Si on ne considère pas le mode d'endommagement par "affouillement et engrèvement", très largement influencé par les 149 bâtiments totalement détruits en bande active, **le niveau d'endommagement structural des bâtiments est globalement plus élevé par affouillement que par engrèvement** :

- Pour des intensités fortes, la fréquence d'apparition des dommages élevés (>25%) est nettement supérieure par affouillement (50%) que par engrèvement (24%) ;
- Pour des intensités moyennes, la fréquence d'apparition de dégâts limités (<25%) est équivalente (environ 75%) mais sachant que la proportion de cas avec de très faibles dommages (<5%) est nettement inférieure en cas d'affouillement (31%) que d'engrèvement (69%) ;
- Pour des intensités faibles, on constate des dégâts limités (<25%) dans 75% des cas d'affouillement pour 43% des cas d'engrèvement, le reste ne présentant pas de dégâts.

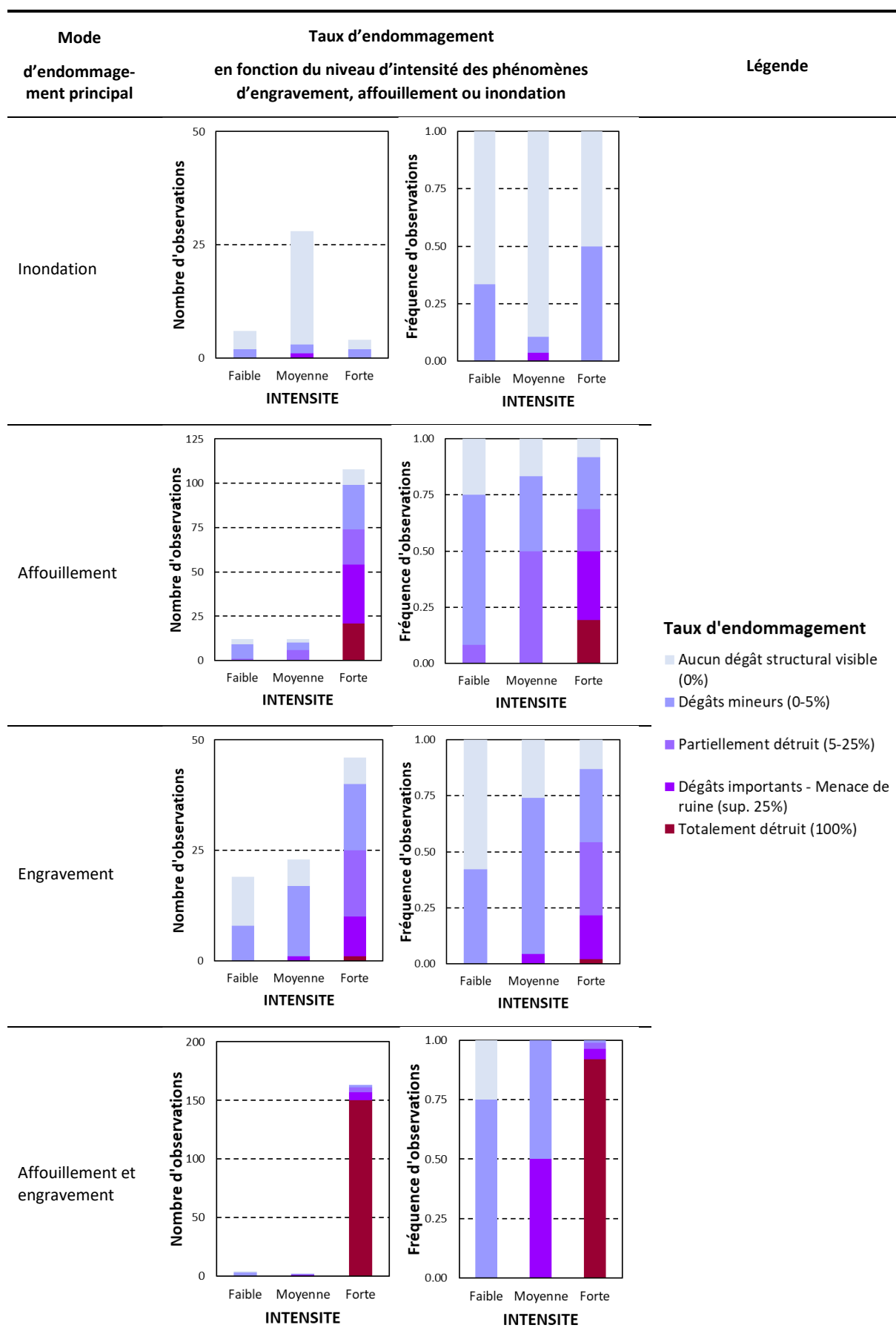


Tableau 17 : Taux d'endommagement des bâtis (hors infrastructures de réseau public) selon l'intensité locale relevée pour chaque mode d'endommagement

4.6.2.2.3 Importance des fondations de bâtis tenant compte de l'affouillement

- Effet de la sollicitation des fondations

Pour les 429 bâtiments impactés, dont 277 habitations, pour lesquels un niveau d'affouillement des fondations a été relevé, la Figure 26 croise, quel que soit le niveau d'intensité d'affouillement, le taux d'endommagement structural avec le niveau d'affouillement des fondations en considérant tous les types de bâtiments (hors infrastructures de réseau public). Après vérification, les résultats sont en effet très peu variables si seulement les habitations sont considérées.

Dans tous les cas, il apparaît que **le niveau d'attaque des fondations est un point clé pour établir le taux de d'endommagement structural. En effet, le taux d'endommagement augmente nettement quand les fondations deviennent localement puis généralement affouillées.**

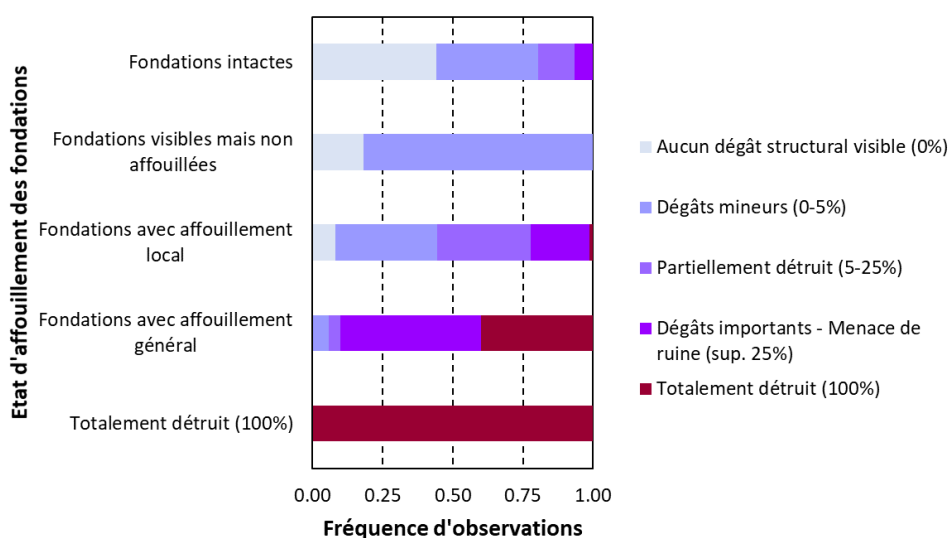


Figure 26 : Corrélation entre taux d'endommagement des fondations et taux d'endommagement de la structure des bâtiments (hors infrastructures de réseau public)

- Cas de faible endommagement en zone d'affouillement d'intensité forte

Selon les éléments d'analyse précédent, dans l'enveloppe d'intensité forte de la crue, impactée par un affouillement d'intensité forte, le niveau d'endommagement attendu est élevé. Or, dans l'échantillon, on relève 27 cas (dont 20 habitations), avec notamment 17 bâtiments dans la vallée de la Vésudie (pour 10 habitations), qui ne présentent aucun dégât structural visible (0%) ou des dégâts mineurs (0-5%).

Ces cas particuliers s'expliquent par différents processus illustrés dans le Tableau 18 :

- **La présence de l'enjeu en limite de bande active ou en limite haute d'érosion de berge (affectation à la zone d'intensité Forte_L, Figure 25) avec un affouillement marqué constitue une limite de l'extension du phénomène dans le cadre de cet événement particulier mais ne constitue pas un sous-endommagement lié au bâti lui-même ;**
- **La présence d'une fondation suffisamment dimensionnée, soit avec une profondeur supérieure à celle de la hauteur de l'affouillement, soit avec un dimensionnement structural permettant une répartition de la reprise des efforts même en l'absence d'une partie de la fondation, constitue une adaptation propre au bâti qui permet d'assurer sa stabilité structurale en cas d'affouillement (jusqu'à une certaine profondeur ou une certaine emprise sous la fondation du bâtiment) : il s'agit d'une mesure de réduction locale de la vulnérabilité du bâti ;**

- La protection locale de la fondation par une protection de berge, un mur constitue également une réduction locale de la vulnérabilité du bâti mais est limitée par sa propre résistance qui peut être dépassée au cours de l'événement ;
- La protection locale du bâtiment par la présence d'un autre enjeu, comme un pont ou un autre bâtiment, permet également de réduire la vulnérabilité en tenant compte de l'aménagement du territoire à une échelle plus large que le seul bâti concerné.

Mode de sous-endommagement	Illustrations	
En limite de bande active / érosion de berge		
Protection locale : - gauche : de la fondation (potentiellement dépassée durant l'événement) - droite : par un autre enjeu amont (pont, bâti...)		
Fondation du bâti suffisamment dimensionnée : - gauche : en profondeur - droite : en type et structure		

Tableau 18 : Configurations avec un faible endommagement des bâtiments en zone d'intensité par affouillement fort (exemples extraits dans la vallée de la Roya) (Source photos : ONF-RTM)

4.6.3 Dommages aux infrastructures de transport

Deux principaux types de dommages structuraux impactent les infrastructures de transport : l'impact direct des voitures et trains circulant et l'endommagement de la chaussée/voie ferrée sur un certain linéaire, avec un niveau d'endommagement plus ou moins importants. Le nombre de voitures impactées n'a pas été relevé. De manière évidente, le niveau d'endommagement de la voirie et le linéaire impacté va occasionner une interruption plus ou moins longue de la circulation (dommages indirects). C'est pourquoi, par la suite, nous analysons les modes d'endommagement constatés sur l'échantillon relevé, même si celui-ci est partiel (Tableau 11).

4.6.3.1 Vision globale des dommages (informations provisoires, à consolider)

Comme déjà indiqué précédemment, les dommages indirects n'ont pas fait l'objet d'un recueil détaillé dans le cadre de ce rapport. Nous rappelons seulement les éléments mis à disposition par la Préfecture 06 en charge de ce recueil pour disposer d'un aperçu général que la simple analyse des dommages structuraux ne permet pas.

La desserte de la vallée de la Roya a été impactée à la fois par la coupure de voie SNCF (15 ouvrages d'art, 10 ouvrages en terre et 1,3 km de voie dégradée voire détruite) et par celle des routes départementales (12 ponts inutilisables, accès au tunnel de Tende détruit et 35 km de voie touchée) et quelques routes communales. Dans la vallée de la Vésubie, en notant l'absence de voie SNCF, l'impact sur le réseau routier est similaire à celui de la Roya avec, sur le réseau départemental métropolitain qui est le réseau principal, une estimation provisoire à 8 ponts détruits, 24 ouvrages à conforter et environ 35 km de linéaire endommagé (dont moins de 10 km de voirie secondaire).

Si l'impact direct sur les routes paraît similaire entre les deux vallées, il est notable que la vallée de la Roya est marquée par une absence de déviation, entraînant un isolement total le temps que les voies de transport soient remises en service. En outre, les dommages sont plus distribués spatialement dans la vallée de la Roya que dans celle de la Vésubie où ils sont plus concentrés : ce fractionnement rend la gestion de la reconstruction plus difficile dans la vallée de la Roya. Il convient cependant de noter l'importance de la voie SCNF, sur laquelle le trafic a pu être rétabli jusqu'à Fontan dès le 8 octobre 2020, puis rapidement jusqu'à Saint-Dalmas-de-Tende, permettant l'accès à la vallée dans l'attente de la réparation du réseau routier.

4.6.3.1.1 Dommages structuraux aux linéaires de route

La Figure 27 montre, pour l'échantillon partiel relevé dans le cadre de ce Retex (Tableau 11), les linéaires concernés par les différents types de désordres et taux d'endommagement par commune. Pour cet échantillon, on note que les érosions de berge prévalent sur les dépôts de matériaux, voies inondées, dépôts de flottants et voies impactées par les glissements de terrains. Cependant, sur la vallée de la Roya, les voies inondées (33%) sont équivalentes à celles impactées par érosions de berge (35%). Les voies recouvertes de matériaux restent d'un poids important (23%). A noter que la majorité des dégradations sur routes liées à des flottants et à des glissements de versant se situent dans la vallée de la Roya.

A l'échelle de l'ensemble de l'échantillon, alors qu'on ne constate aucun dégât structural visible pour 21% du linéaire inventorié, le niveau d'endommagement est majoritairement élevé : 47 % du linéaire totalement détruit ou qui menace ruine, et 32% partiellement détruit ou avec des dégâts mineurs. Cependant, comme pour les bâtis, il apparaît que ce niveau d'endommagement structural est globalement plus faible sur la vallée de la Roya (pour l'échantillon relevé) : 29 % sans dégâts, 39 % avec dégâts mineurs ou partiellement détruits, 32 % menaçant de ruine ou totalement détruits.

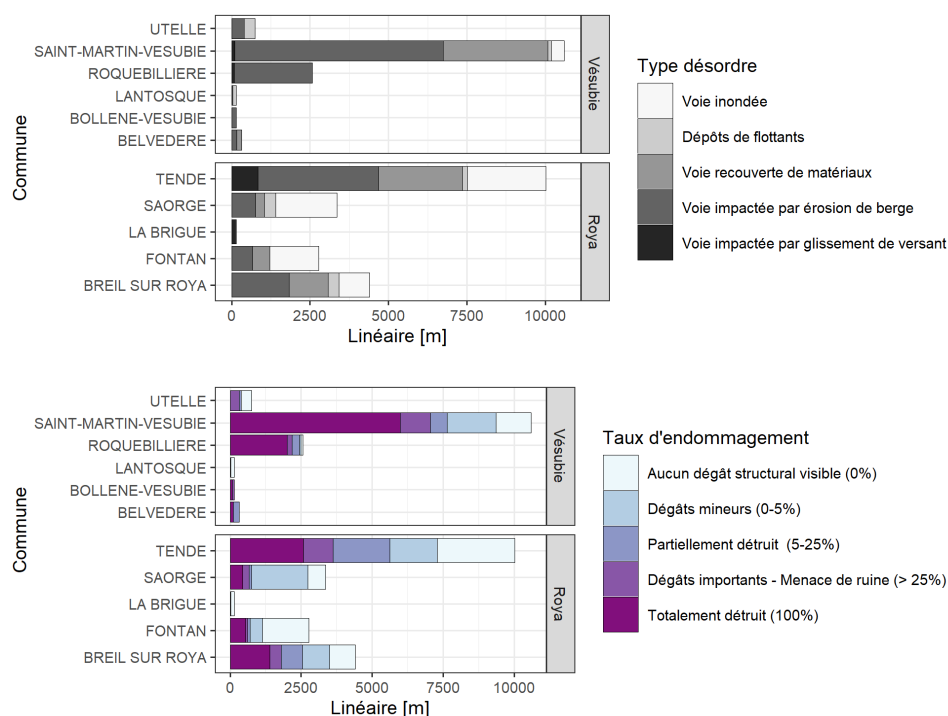


Figure 27 : Linéaire de routes relevé selon les différents types de désordres et taux d'endommagement

4.6.3.1.2 Domages structuraux aux ponts / ouvrages traversants

Lors des missions de terrain, le taux d'endommagement des principaux ponts et passerelles a été relevé pour différents types d'ouvrages (Tableau 20). De multiples ouvrages secondaires et buses n'ont pas été intégrées dans l'analyse.

Les observations de terrain répertoriées ont été croisées avec différentes sources d'information vis-à-vis des types d'ouvrages et de leur dimensions caractéristiques (portée et hauteur sous poutre). Les sources d'informations mobilisées ont été, par ordre de priorité :

1. Pour la Roya :

- GEOPEKA-EGIS, 01/2021, Étude des cours d'eau des Alpes Maritimes visant la Restauration du fonctionnement hydromorphologique et la prévention des risques d'inondation. Phase 1 : Etat des lieux du fonctionnement du bassin versant de la Roya. En particulier, les fiches ouvrages en annexes de l'étude ;
- Base de données photographique du service ONF-RTM.

2. Pour la Vésubie :

- Base de données du Service Ouvrages d'Art de la Métropole Nice Côte d'Azur, dont une extraction a été mise à disposition de l'INRAE en octobre 2021 ;
- ONF-RTM, 12/2007, Étude globale des risques d'inondation et des phénomènes torrentiels sur la Vésubie et ses affluents - Hydraulique et inondabilité - Inventaire et diagnostic des ouvrages hydrauliques.

Les typologies des ponts indiquées dans les bases de données consultées étaient variables. Des détails sur le type des travées était souvent indiqués (poutres métalliques, poutres en béton précontraint, etc.). Dans le cadre de ce Retex, la typologie simplifiée suivante a été retenue : pont à arches (unique ou multiples), pont travées (unique ou multiples), pont cadre ou passerelle (Tableau 20). Les buses n'ont pas été intégrées. L'importance des caractéristiques structurales (typologie d'ouvrage, matériaux de construction) n'a pas été retenue comme discriminante ici et pourrait faire l'objet d'une analyse dans un second temps. En effet, la plupart des ouvrages ayant vraisemblablement été endommagés par affouillement et contournement, le type précis de structure est probablement secondaire devant le gabarit et l'emprise de l'ouvrage dans le corridor fluvial.

L'échantillon de données collectées (hors vallée de la Tinée) comprend des observations sur 132 ouvrages sur l'ensemble des secteurs de la Vésubie (62 ouvrages) et de la Roya (70 ouvrages). On relève que les ponts à arches sont plus nombreux sur la Roya tandis que les ponts à travées sont plus nombreux sur la Vésubie (Tableau 19).

Parmi l'ensemble des ponts recensés sur les vallées de la Roya et de la Vésubie, 34% ne présentent aucun dégât structural, 31% présente des dommages limités (dégâts mineurs et destruction partielle) et 34% présentent des dommages élevés (menace de ruine et destruction totale). Au contraire des bâtis et des routes, il n'y a pas de distinction notable de la répartition des niveaux d'endommagement structuraux globaux entre les vallées de la Roya et de la Vésubie. En effet, pour la Roya, les proportions apparaissent équivalentes : 24% des ponts ne présentent pas de dégâts, 40% ont des dommages limités et 35% présentent des dommages élevés.

Taux d'endommagement	Vésubie	Roya	Total
Aucun dégât structural visible (0%)	28	17	45
Dégâts mineurs (0-5%)	9	19	28
Partiellement détruit (5-25%)	5	9	14
Dégâts importants - Menace de ruine (sup. 25%)	7	8	15
Totalement détruit (100%)	13	17	30
Total	62	70	132

Tableau 19 : Taux d'endommagement des ponts et passerelles visités dans le cadre de ce retour d'expérience

Ces niveaux de dommage traduisent le caractère très exceptionnel de la crue du 2 octobre 2020, tant dans son intensité que dans son ampleur géographique.

Type	Nombre de ponts		Exemples	
	Vésubie	Roya		
Arche Unique	16	26		
			Pont Neuf (Roquebillière)	& Pont de la Bendola (Saorge)
Arches Multiples	4	10		
			Pont du Suquet (Lantosque)	& Pont Quai de la Roya (Fontan)
Travée Unique	28	19		
			Pont Venanson (Saint-Martin-Vésubie)	& Pont Pauvre (Tende)
Travées Multiples	8	5		
			Pont Vieux (Roquebillière)	& Pont de la Colonie (Tende)
Cadre		5		
			Pont de Slaussi	& Pont Stele (Tende)
Passerelle	6	4		
			Passerelle 3 (Utelle)	& Passerelle des Mesches (Tende)
Total	62	70	Nombre total d'ouvrages : 132	

Tableau 20 : Typologie des ponts retenue

4.6.3.2 Analyse des modes et niveaux d'endommagement des linéaires de routes

4.6.3.2.1 Lien entre types de désordres et taux d'endommagement structural

Il est intéressant de vérifier si le type de désordre, sans vérifier le niveau d'intensité du processus, a un lien avec le taux d'endommagement (Figure 28).

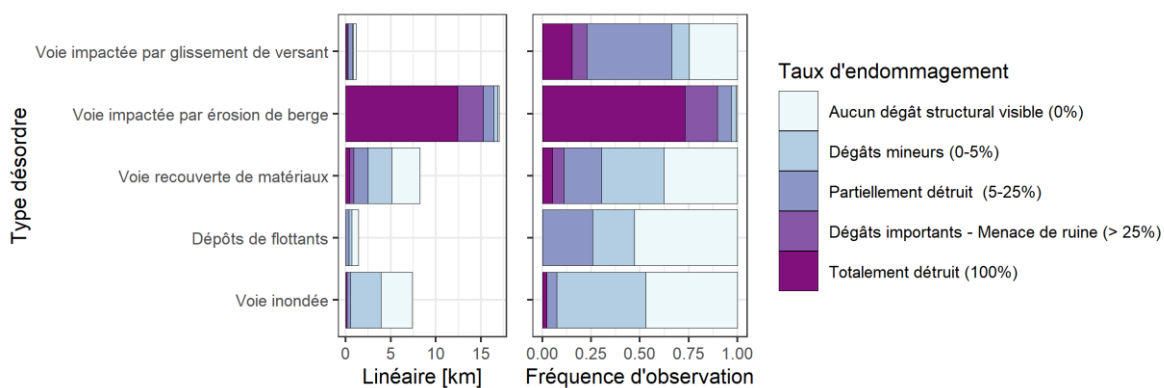


Figure 28 : Liens entre types de désordres et taux d'endommagement

On retrouve un résultat similaire à celui des bâtis :

- Les érosions de berges génèrent les taux d'endommagement les plus forts ;
- Les dépôts de matériaux et les glissements de terrain peuvent générer aussi des taux de destruction importants même si le nombre limité de dégâts observés par glissement de terrain limite la portée de cette analyse pour ce mode d'endommagement ;
- Les dépôts de flottants et l'inondation des voiries génèrent les taux de dommage les plus faibles, même si là aussi, le nombre très limité d'observations de dégâts liés aux flottants limite la portée de cette analyse.

4.6.3.2.2 Effet de l'intensité des processus sur le taux de destruction

Sur SIG, les polygones représentant les voiries ont été croisés avec la carte d'intensité de la crue. Seuls 72% du linéaire de route de l'échantillon sont compris dans un polygone de la carte d'intensité. La Figure 29 montre le lien entre intensité et taux d'endommagement. On observe bien une augmentation de la sévérité des dommages avec l'intensité, avec une augmentation très significative des taux de dommages forts (>25% et 100%) dans la classe d'intensité forte (75% du linéaire de routes affectées par un tel niveau d'intensité). Notons que la classe d'intensité forte est sur-représentée dans l'échantillon (19 km contre un peu plus de 3 km pour les classes d'intensité moyenne et faible).

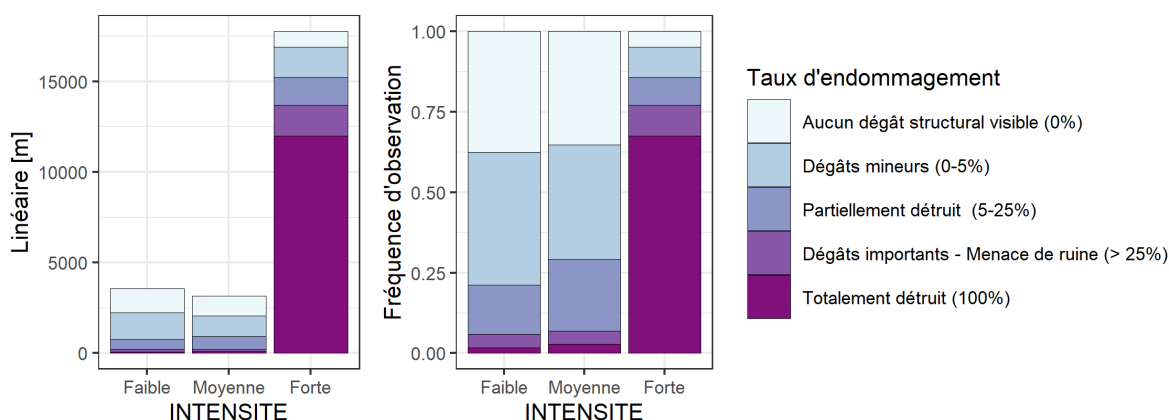


Figure 29 : Lien entre intensité du processus torrentiel et taux d'endommagement des routes

4.6.3.3 Analyse des modes et niveaux d'endommagement des ponts

4.6.3.3.1 Lien entre types de ponts et taux d'endommagement

Pour mener cette analyse, les 132 ponts identifiés au Tableau 20 sont considérés. La Figure 30 présente le lien entre taux d'endommagement et type d'ouvrage dans chacune des vallées de la Roya et de la Vésubie.

De manière générale, les ouvrages ayant subi des endommagements plus sévères sont les passerelles (ouvrages plus légers et moins solides), les ponts à travées multiples (présence de pile en rivière aggravant le risque d'afouillement et d'obstruction par les embâcles) et les ponts à travée unique (trop souvent étroits et formant un verrou hydraulique). Sur la Roya, on note que sensiblement un quart des ponts à arche unique ont aussi subi des dommages significatifs (taux d'endommagement <25%). C'est moins le cas sur la Vésubie où les ponts de cette catégorie ont des portées plus longues ou des hauteurs très significatives, par exemple dans les gorges.

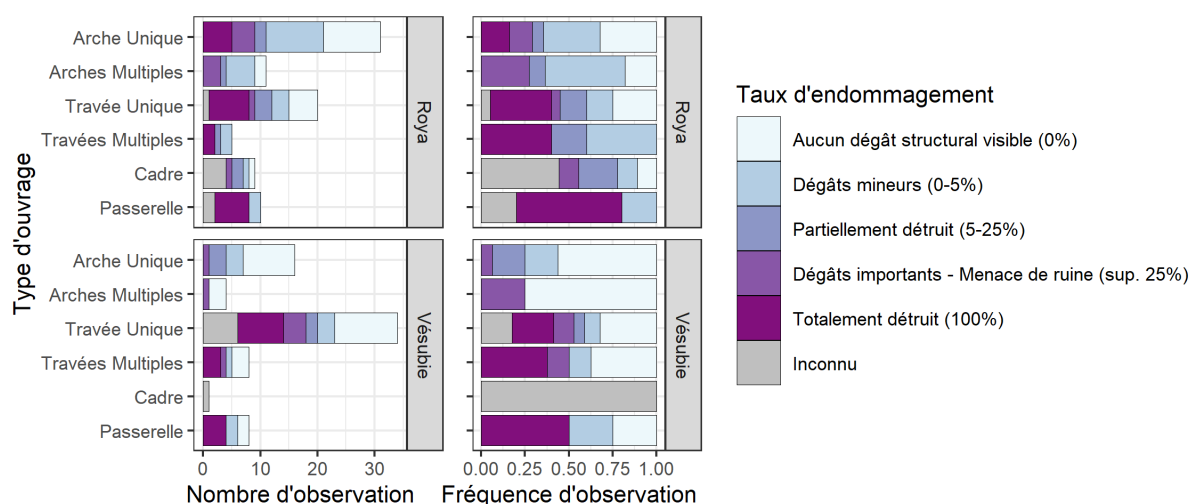


Figure 30 : Nombre et fréquence des niveaux d'endommagement en fonction du type de pont

4.6.3.3.2 Lien entre dimensions de ponts et taux d'endommagement

• Notion d'ouverture relative

Les travaux scientifiques portant sur la formation des embâcles au droit des ponts et autres ouvrages hydrauliques démontrent clairement que le ratio entre la largeur d'ouverture des travées et arches (B) et la longueur des grands flottants (L) est un paramètre clé (Lange et Bezzola, 2006). Ce ratio est nommé "ouverture relative" (Figure 31).

Les dimensions des largeurs des travées et arches des ponts (B) n'étaient parfois pas renseignées dans les bases de données consultées. Dans ce cas, le croisement de photos de terrain avec des photos aériennes a occasionnellement permis d'estimer approximativement la portée des ouvrages. Si aucun repère n'était disponible (absence d'arbres, de blocs ou de signe distinctif de la position des piles et culées), la donnée n'a pas été complétée. Pour les arches, c'est la largeur en base qui a été prise comme référence.

Pour la longueur des flottants (L), nous disposons d'une estimation précise de la variabilité de ce paramètre, dans la mesure où un travail de digitalisation manuelle a été mené sur les bois flottants déposés dans le lit de la Vésubie et de la Roya (cf. § 6.3.3). Le quantile 95% a été retenu (L95), c'est-à-dire la longueur telle que seuls 5% des flottants sont plus longs : elle est de 5,2 m sur la Roya et de 11,8 m sur la Vésubie. La longueur moindre sur la Roya est vraisemblablement à associer à un plus fort taux de casse en lien avec une plus fréquente présence de gros blocs rocheux dans le lit et à une largeur de chenal par ailleurs plus faible.

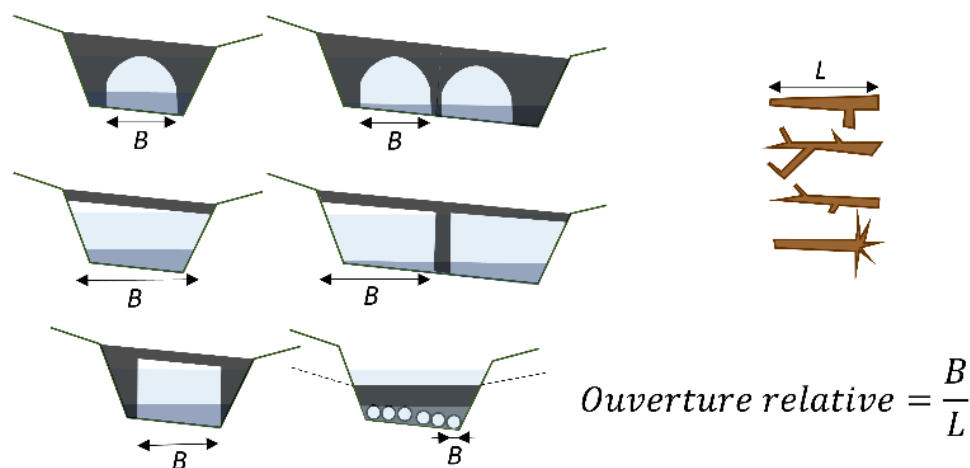


Figure 31 : Définition schématique de la notion d'ouverture relative

• Lien entre ouverture relative des ponts et taux d'endommagement

L'analyse s'est concentrée sur les ponts à arches et à travées qui sont les catégories d'ouvrages les plus représentées dans l'échantillon (88%). La Figure 32 compile les observations des liens entre taux d'endommagement des ponts et leur ouverture relative. En théorie, une ouverture relative inférieure à 1 est propice à la formation d'un embâcle (Lange et Bezzola, 2006).

Un lien clair entre faiblesse de l'ouverture relative et aggravation des dommages apparaît pour les ponts à travées multiples et unique (bien qu'on manque d'observations pour des états intermédiaires d'endommagement sur les travées multiples). Le lien n'apparaît par contre pas clairement pour les ponts à arches : on manque toutefois de cas où les arches auraient des ouvertures relatives trop faibles, c'est à dire proches ou inférieures à 1. Ce type d'ouvrage a en général une portée plus grande que les ponts à travées unique ou multiples.

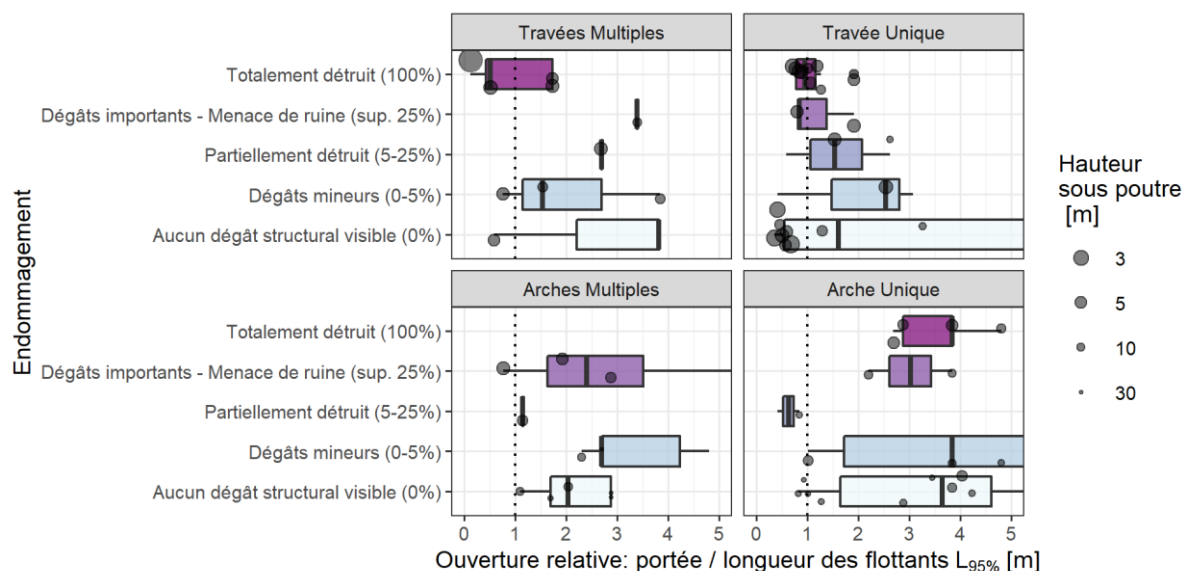


Figure 32 : Liens entre ouverture relative des ouvrages et état d'endommagement (un panneau par type de pont)

Il en ressort que les ponts à travées (unique ou multiples) ont généralement subi des dommages plus sévères, que les autres types d'ouvrages en particulier si leur ouverture relative était faible ou s'ils étaient équipés de

piles en rivières. **Les ouvrages les plus résistants à l'occurrence de crues torrentielles sont donc des ouvrages de longue portée, sans pile en rivière.**

4.6.4 Dommages humains (mortalité)

4.6.4.1 Répartition sur le territoire impacté

L'événement Alex a marqué les esprits par la survenue de 18 morts (10 décès avec corps retrouvés et 8 disparitions) dont 14 dans la vallée de la Vésubie et 6 dans la vallée de la Roya (Tableau 21).

Dans la vallée de la Roya, les morts ont essentiellement été localisés sur la commune de Breil-sur-Roya avec 1 autre mort (un berger emporté avec une partie de ses bêtes par une vague d'eau chargée de boue) sur la commune de Tende. Les données transmises sous forme de tableau par le SIDPC 06 permettent de disposer des éléments qui décrivent les conditions dans lesquelles ces décès sont survenus.

Vallee	Commune	Nombre de morts par type d'enjeux				TOTAL
		dans maison individuelle	sur route	en zone naturelle	Inconnu*	
Roya	Breil-sur-Roya	3			2	5
	Tende			1**		1
	La Bollène-Vésubie		2***			2
Vésubie	Roquebillière	2				2
	Saint-Martin-Vésubie	5	2	1		8
TOTAL		10	4	2	2	18

Tableau 21 : Répartition de la survenue des décès par vallée, commune et types d'enjeu (* : conditions inconnues car témoignages non concordants ; ** : un berger en activité ; *** : deux pompiers sur route pour mission de secours)

4.6.4.2 Conditions de mortalité

Dans les maisons individuelles, 10 personnes sont décédées dans 7 habitations, toutes situées en zone définie comme d'intensité forte, et dont les taux d'endommagement sont (Tableau 22) :

- Totalemment détruites (100%) car totalement emportées durant la crue ;
- 1 avec dégâts importants, menaçant de ruine (>25%) : 1 personne a été emportée avec la moitié de la maison, 1 autre est restée dans la moitié non emportée mais qui présente un affouillement général.

On note que l'unique cas relevé du décès d'une partie seulement des personnes présentes correspond précisément au seul bâtiment partiellement détruit de l'échantillon des sept bâtiments dans lesquels des décès ont eu lieu (notée n°2 dans Tableau 22). D'après les informations disponibles, les personnes n'ayant pas évacué les six autres bâtiments totalement détruits sont toutes décédées.

Au vu des données disponibles, il n'est pas possible d'extraire un taux de létalité sur toute la zone impactée sans faire de fortes hypothèses sur les taux d'occupation au moment de la crue : le nombre de personnes présentes dans les différentes habitations impactées n'est pas à disposition.

Dans la Roya, les 3 décès dans les habitations sont intervenus dans deux habitations à 21h et 00h40 (Tableau 22).

VALLEE	COMMUNE	N°	Nb présent	Nb décès	Taux de létalité	Age décès (ans)	Heure décès	Niveau d'endommagement de l'habitation
Roya	Breil-sur-Roya	1	2	2	100%	81 ; 99	21h00	100%
		2	2	1	50%	51	0h40	> 25%
Vésubie	Roquebillière	3	2	2	100%	85 ; 88	17h15	100%
	Saint-Martin-Vésubie	4	1	1	100%	88	17h15	100%
		5	1	1	100%	85	?	100%
		6	1	1	100%	67	17h00	100%
		7	2	2	100%	76 ; 77	17h00	100%

Tableau 22 : Conditions de survenue des décès dans les sept habitations selon le nombre de personnes présentes, l'âge des victimes, l'heure des décès et le niveau d'endommagement constaté de l'habitation dans laquelle s'est produit le décès

Sur la route, les 4 morts en Vésubie sont répartis sur deux voitures, chacune occupée par deux personnes décédées : le taux de létalité est donc de 100% dès lors que la voiture est emportée. Dans le cas des 2 décès à La Bollène-Vésubie, le véhicule a été emporté après l'effondrement de la route minée par la Vésubie et les personnes étaient âgées de 49 et 31 ans. Dans le cas des 2 décès à Saint-Martin de Vésubie, le véhicule a été emporté par la Vésubie et les personnes étaient âgées de 50 et 55 ans.

On constate que, pour cet événement, l'âge des morts est en moyenne beaucoup plus élevé dans les habitations individuelles (80 ans, Tableau 22) que sur la route (46 ans). Dès lors, on peut indiquer que **l'âge est un facteur important d'augmentation de la vulnérabilité humaine dans les habitations individuelles exposées aux phénomènes de crues torrentielles de forte intensité.**

5 ANALYSE DES ÉVOLUTIONS GÉOMORPHOLOGIQUES

5.1 SOURCES SEDIMENTAIRES DANS LES HAUTS BASSINS VERSANTS

L'objectif de cette partie consiste à déterminer l'origine des apports sédimentaires dans les hauts bassins versants, de relever les évolutions les plus remarquables et de réaliser une analyse comparative de l'état des versants avant et après l'événement. Faute de données LiDAR couvrant l'ensemble des zones de versant actives, elle ne fera pas l'objet d'une analyse quantitative des apports mobilisés par la crue sur ces versants.

Une carte géomorphologique, sous forme d'atlas disponible en [Annexe 11](#), constitue la synthèse des phénomènes survenus dans les versants à la suite de la crue du 2 octobre, observés sur site (et avec l'aide des photographies prises par drone) ou par photo-interprétation, dans la limite de l'emprise de l'orthophotographie IGN post-crue.

Des fiches de synthèse, disponibles en [Annexe 12](#), ont été réalisées sur les cours d'eau dans les parties hautes des bassins versants. Elles correspondent aux tronçons suivants :

- Tunnel de Tende (Haute Roya et Caramagne) ;
- Madone de Viévol (torrent de la Morte et torrent de Consciente) ;
- Vallon de Castérino ;
- Vallons de la Minière et de la Bieugne.

Ces fiches détaillent par tronçon les évolutions géomorphologiques des versants et précisent la source des apports sédimentaires. Un extrait de la carte géomorphologique est joint pour chacun des tronçons analysés.

Dans la vallée de la Roya, la partie haute du bassin versant a subi d'importantes évolutions morphologiques, notamment en fond de vallée, mais également, dans une moindre mesure, sur les versants. Les visites de terrain les 17 et 18 novembre 2020 ont permis d'investiguer les vallons de Casterino et de la Minière ainsi que les secteurs du tunnel de Tende et de la Madone de Viévol.

5.1.1 Synthèse des observations

On note que la contribution solide des versants aux cours d'eau principaux a été plutôt importante sur la haute Roya (en amont de Breil), en comparaison des relevés effectués sur le bassin de la Vésubie.

1/ La **nature géologique des terrains** permet d'expliquer en grande partie ce constat :

- Les terrains du substratum constitués de **marnes, argiles, flyschs et cargneules** y sont fortement représentés. L'érosion par ravinement (coulées de boue) et les glissements superficiels (coulées boueuses) se concentrent en majorité sur ces terrains. Les phénomènes sont nombreux mais de petite taille.
- Les **calcaires dolomitiques** très fracturés ont contribué aux apports solides, mais pour de petits secteurs et sur des sous-bassins déjà en érosion importante avant la crue du 02 octobre (vallon de St Pancrasse).
- Les autres terrains géologiques, **calcaires massifs** et **roches magmatiques**, ont plutôt participé à l'immunité érosive des versants : très peu de phénomènes y sont répertoriés. Quand ils y sont présents, ils sont de grande ampleur, en lien avec des sorties d'eau exceptionnelles (résurgences) issues des karsts locaux ou d'anciennes galeries de mines (Vallauria), mais souvent sans rapport avec un bassin versant topographique.

2/ La **géologie superficielle des versants**, c'est à dire les terrains remaniés et déposés durant l'ère Quaternaire, est le principal contributeur sédimentaire :

- **Moraines argileuses** en placage sur les versants, qui par saturation hydrique entraînent des coulées boueuses superficielles et des ravinements.
- **Eboulis calcaires à matrice argileuse**, qui ont été déstabilisés par érosion régressive des talwegs et ravinements subséquents. Les sous-bassins de Rabay et de Dente en amont de Viévola illustrent parfaitement ces phénomènes.
- **Alluvions fluvio-glaciaires** obturant les vallons torrentiels, fortement remaniées par les crues (amont de Viévola notamment et vallon de Consciente).

3/ **Certaines particularités géomorphologiques sont à noter :**

- Glissements profonds historiques du col de Tende. Le versant s'est partiellement réactivé en amont du tunnel.
- Ré-engravements partiels ou en totalité de cônes de déjections torrentiels : vallon de Viévola, vallons latéraux de Casterino et de la Minière.
- Immunités des zones d'éboulis et moraines constituées de roches magmatiques (haute Caramagne), et des glaciers rocheux. Ces secteurs n'ont pas changé de physionomie après l'évènement.

4/ **Apport par les berges des cours d'eau et des ravins/talwegs** : comme pour la Vésubie, une bonne partie de la charge solide mobilisée provient des berges et des pieds de versants des lits majeurs torrentiels : les vallons de Viévola et de Consciente illustrent ces phénomènes de reprise et dépôts. Mais l'empreinte géomorphologique des formations quaternaires est beaucoup plus atténuée sur la Roya et ses affluents que sur la Vésubie : peu de cônes de déjections et d'éboulis en fond de vallée, quasi-absence de moraines et de dépôts fluvio-glaciaires. Aussi la crue sédimentaire générale de la Roya provient-elle d'abord d'un transfert solide des bassins versants amont productifs (vallon du Tunnel, vallon d'Ourtigue, vallons de Viévola, vallon de Consciente, Bieugne, Céva, Cairos).

5/ Comme pour la vallée de la Vésubie, **le phénomène dominant**, quasi-invisible sur les photographies aériennes, et décelable uniquement sur le terrain, est **le ruissellement** : les moindres inflexions topographiques, sentiers, routes... ont vu s'écouler une lame d'eau souvent peu chargée en matériaux, mais qui a contribué à une crue exceptionnelle dans les vallées principales.

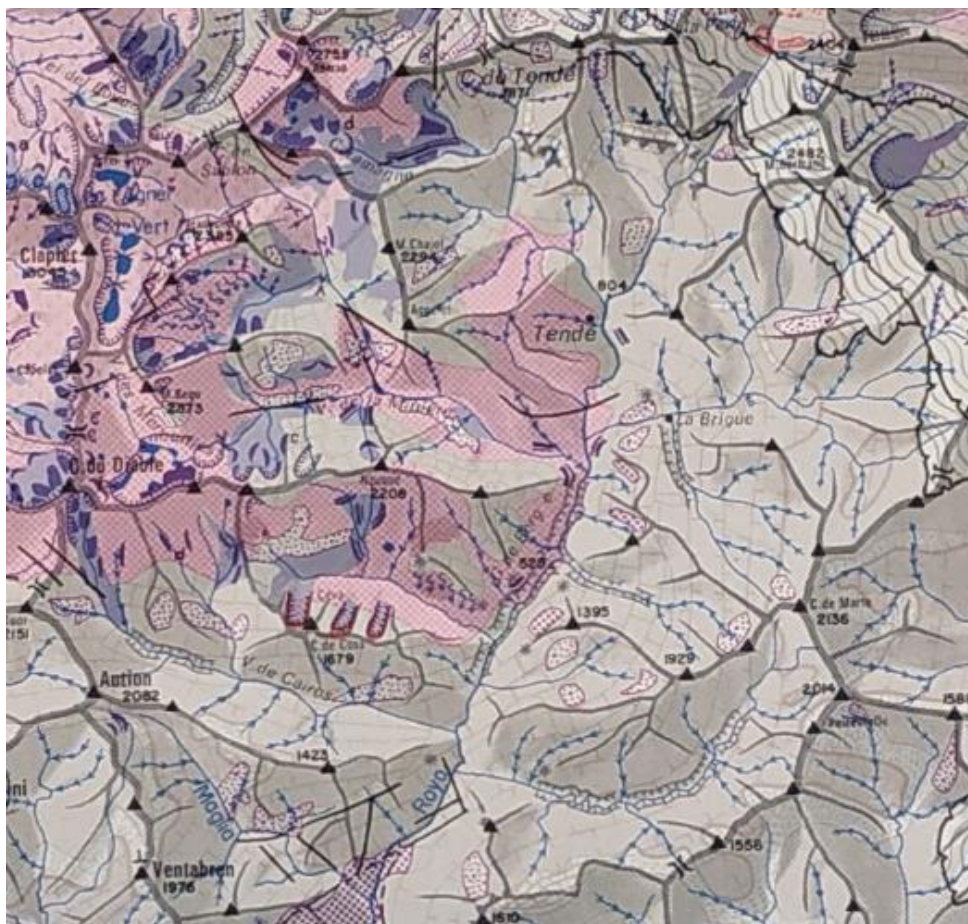


Figure 33 : Extrait de la carte géomorphologique générale des Alpes-maritimes (Source : Julian, 1980)

5.1.2 La haute Roya entre le col de Tende et Vievola

La haute Roya comprend deux bassins versants très différents :

- La Roya proprement-dite, qui s'inscrit géologiquement dans des terrains sédimentaires Eocène, Crétacé et Jurassique (calcaires, dolomies, marnes, flyschs marno-calcaires).
- Le vallon de Caramagne, fortement marqué par l'empreinte des dernières grandes glaciations Quaternaire, creusé dans des roches du socle (anatexites et migmatites) et les grés arkosiques du Permien.

Les grandes masses géologiques sont mises en contact par des failles et des chevauchements, soulignés par des terrains du Trias (gypses et cargneules).

À leur confluence, le vallon de Caramagne a une superficie deux fois plus importante que celui de la Roya : 12,5 km² contre 6,6 km², et l'altitude moyenne est plus élevée (2 755 m au Rocher de l'Abisse contre 2 214 m à la Cime du Bec Roux). Cela explique aisément l'empreinte glaciaire héritée dans le bassin du Caramagne, qui couvre 5,5 km² (moraines, glaciers rocheux, éboulis fluants) alors que la Roya ne comporte aucun modelé de ce type.

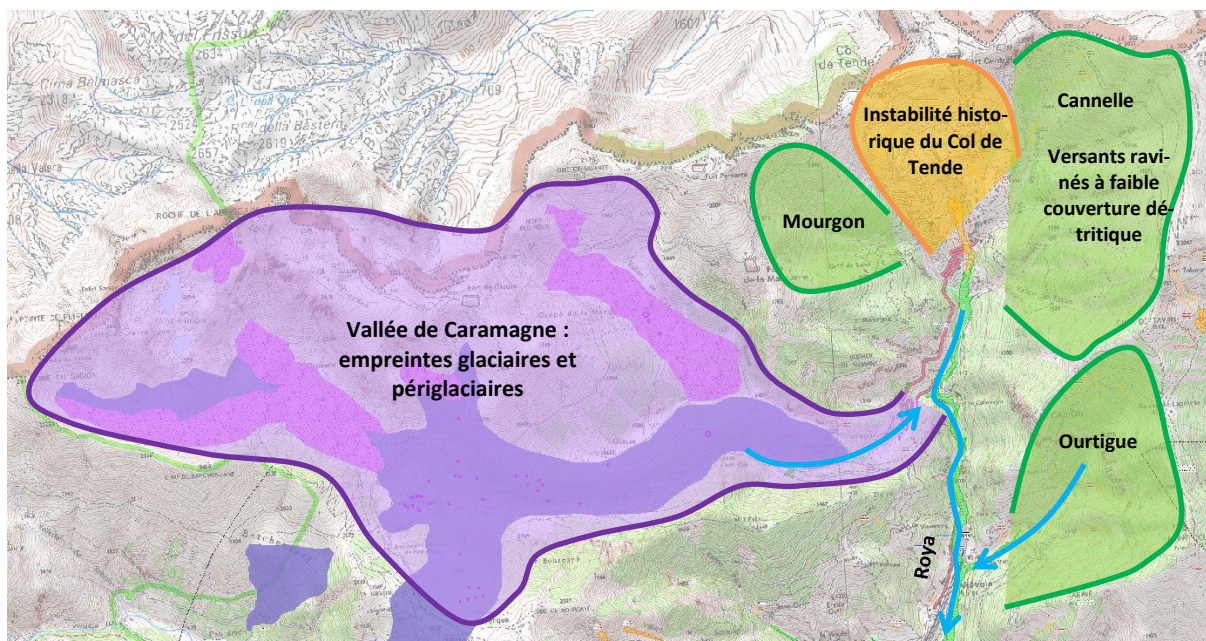


Figure 34 : Carte géomorphologique synthétique

5.1.2.1 Tunnel de Tende

L'événement du 2 octobre 2020 a exacerbé l'hydrologie de la haute Roya, sans remettre en cause les grands fonctionnements hydromorphologiques décrits ci-avant :

- Les ruissellements intenses et prolongés, en lien avec la durée et le volume des précipitations, ont généré des ravinements sur les terrains géologiquement favorables : flysch noirs marno-calcaires Eocène et strates marneuses du Crétacé. **En amont du Caramagne, c'est donc la Roya qui a le plus contribué à la crue solide.** Le moindre ravin a été parcouru par un écoulement avec décapage des maigres sols couvrant les versants et remobilisation des éboulis accumulés dans les talwegs. Les volumes mobilisables dans chaque ravin étant peu importants avant le 2 octobre, ils ont été facilement charriés par les eaux. Les zones déjà ravinées avant le 2 octobre ont été contributives, mais sans excès (pas de nouvelles ravines) : vallons de Mourgon et de Pénolègue. Sur le bassin versant du Caramagne, seul le modeste ravin de Beccaire a apporté des matériaux provenant des versants. La nature argileuse et marno-calcaire des terrains a fortement contribué à une crue solide efficace de la haute Roya.



Figure 35 : Importance des ravinelements dans les talwegs existants, accompagnés ou ayant pour origine de petits glissements superficiels boueux. Vallon de Romanin (affluent du Mourgon) à gauche, vallon de Begin à droite (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

- Dynamique hydro-gravitaire : les coulées boueuses superficielles sont majoritaires. On distingue les petites coulées très superficielles à haute énergie, se transformant assez vite en ravinement, des coulées un peu plus profondes dont les arrachements (2 à 5 m de profondeur) se manifestent dans les matériaux de couvertures (colluvions) et les terrains anthropisés (prairies, pâturages). Les premières ont souvent contribué à apporter des matériaux argileux aux cours d'eau, les secondes, plus impressionnantes, se sont arrêtées sur les versants (ruptures de pentes).



Figure 36 : Exemples parmi d'autres de petites coulées boueuses affectant les versants. À gauche, sur la rive droite du Caramagne ; au centre sur une terrasse agricole, à droite dans des éboulis calcaires



Figure 37 : Petites coulées boueuses affectant les versants du vallon de Mourgon ; glissements plus importants dans le vallon de Cannelle en amont du tunnel

- Dynamique gravitaire : le glissement du tunnel de Tende est apparu post-crue (aucune contribution à l'évènement du 2 octobre) les 4 ou 5 octobre. Les raisons d'un déclenchement tardif ne sont pas connues de nos services, mais d'autres glissements ont eu un comportement similaire dans le vallon de la Madone de Fenestre. Ce glissement s'inscrit **dans un contexte de versant historiquement instable**, avec de nombreuses formes anciennes de glissement du même type et de même ampleur. Risque important, connu de longue date, pour la route et l'entrée du Tunnel. L'ancienne route en lacets, à de nombreuses reprises, a été retracée au gré des glissements successifs.



Figure 38 : A gauche, vallon de la Ca avant déclenchement du glissement de terrain (03/10/2020) ; à droite après le glissement de terrain (09/10/2020) (Source : F. Adamo, CEREMA)

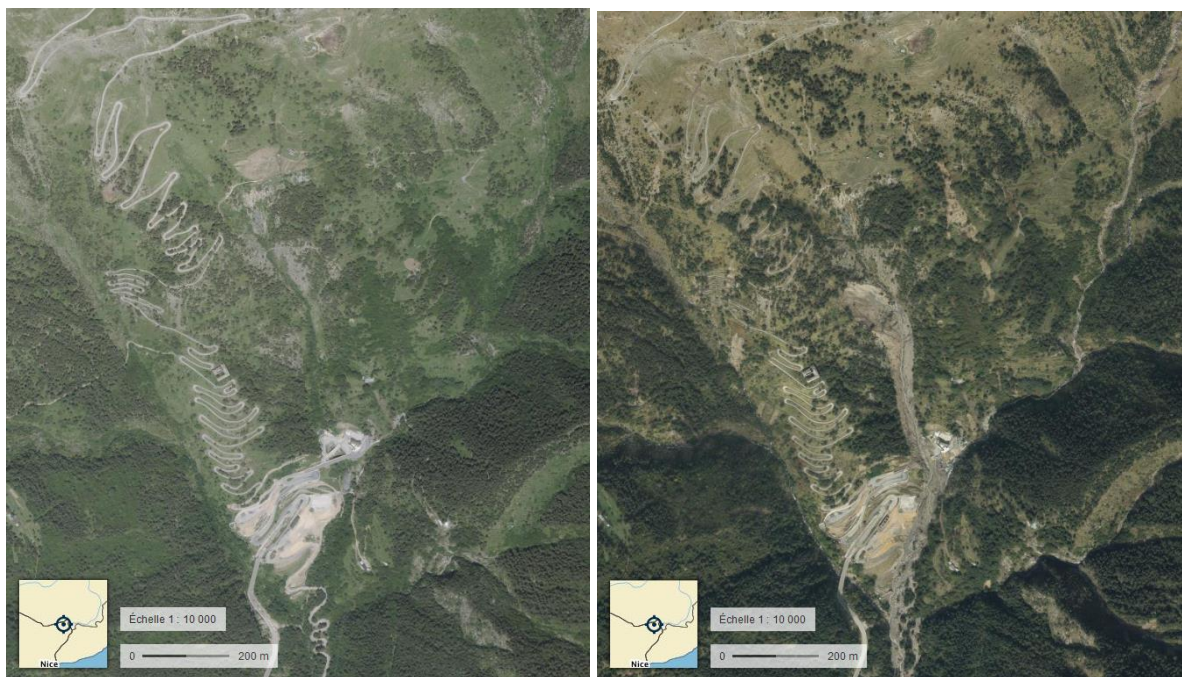


Figure 39 : Diachronie avant et post-crue (Source : BD Ortho 2017, IGN ; Orthophotographie post-crue, 2020, IGN)

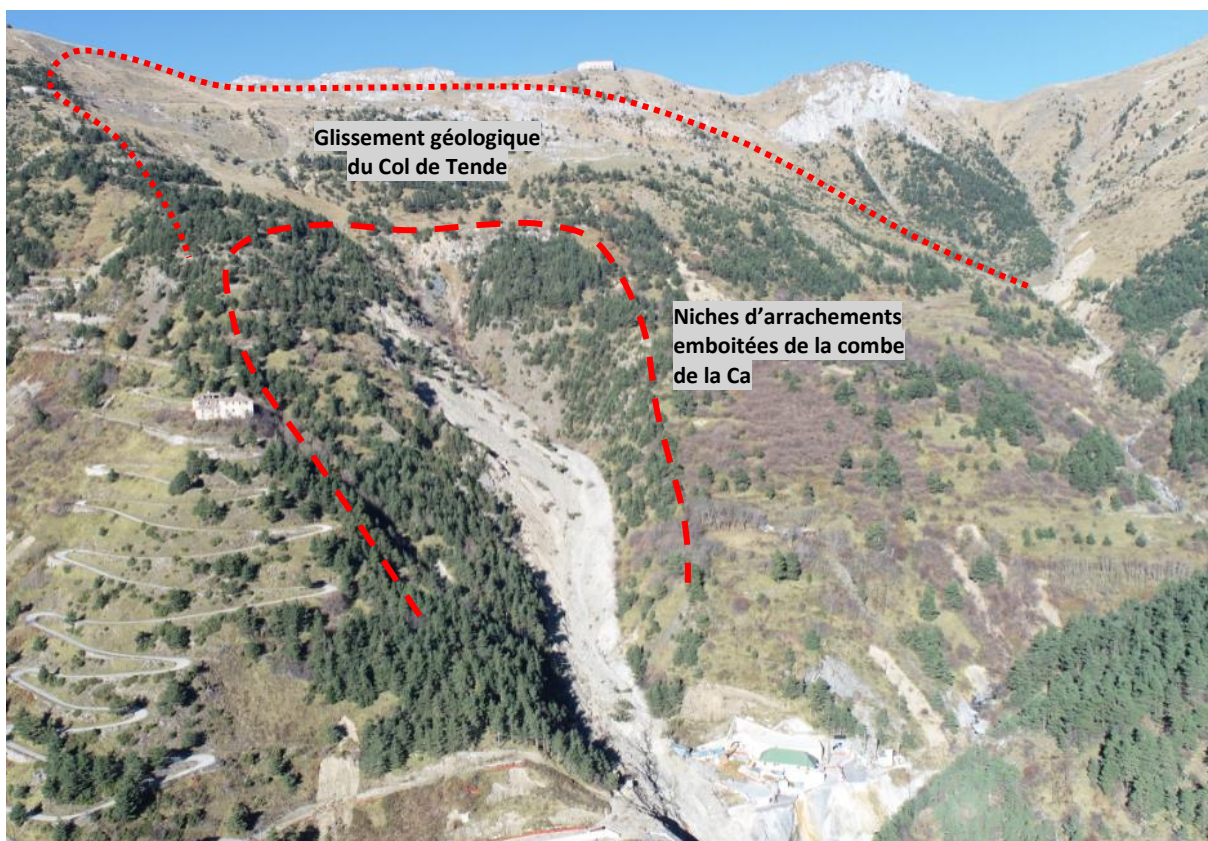


Figure 40 : Le glissement de la Ca dans son contexte géomorphologique (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

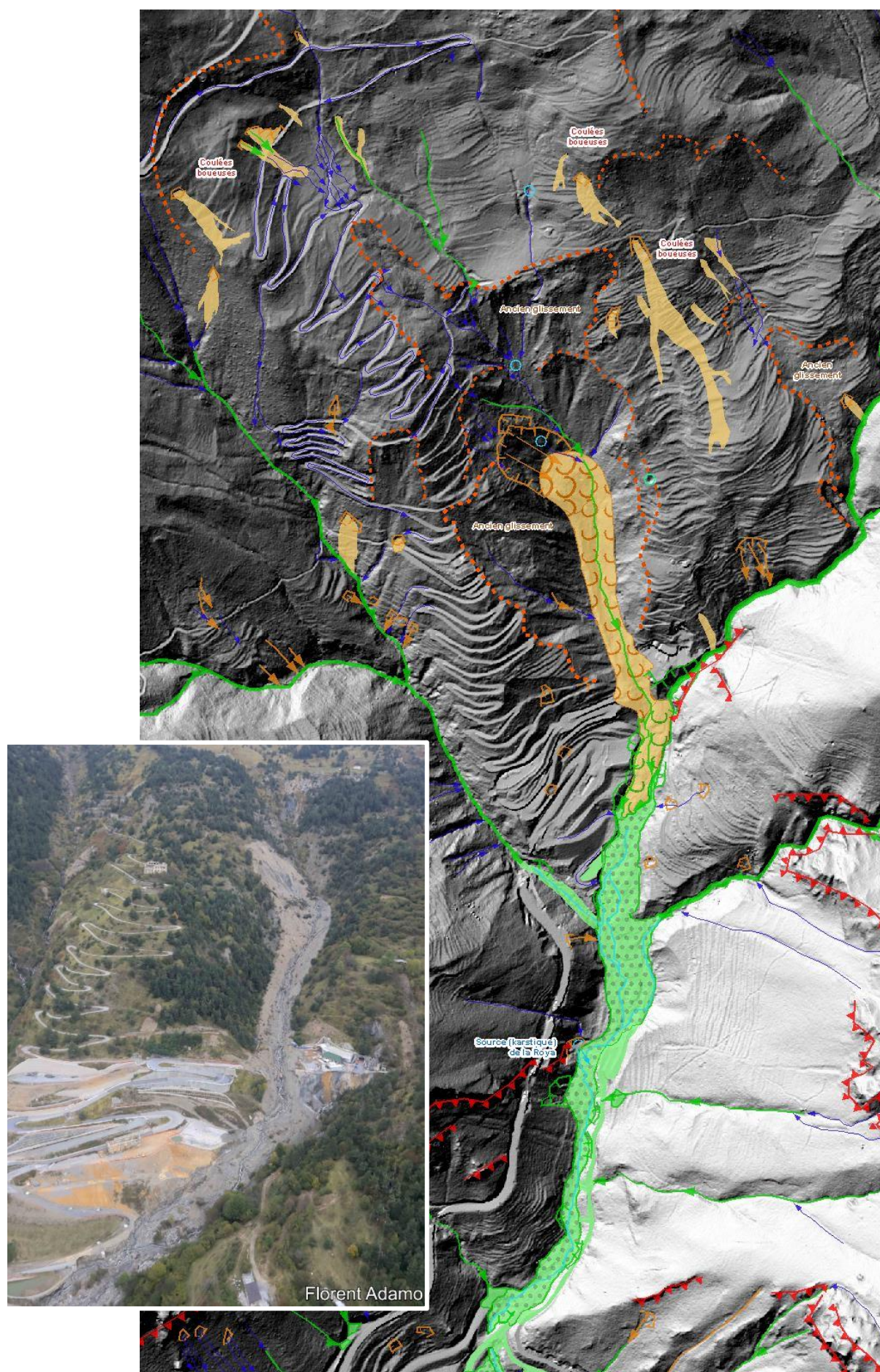


Figure 41 : Extrait de la carte géomorphologique : glissements superficiels, coulées boueuses et glissement de la Ca. En tiretés, les principales niches d'arrachements anciennes antérieures au 02/10/2020

- Crue liquide du Caramagne et du Lagon : mobilisation des matériaux dans les lits et sur les berges. Crues en lien avec des sorties d'eau importantes au front des moraines et glaciers rocheux. Difficulté de reprise des matériaux dans les lits (pavage de très gros blocs morainiques)
- Forte mise en charge de la source karstique de la Roya : apport d'eau claire favorisant la reprise et le charriage des matériaux en aval.
- A noter une immunité préservée des versants couverts d'éboulis calcaires épais (vallon de Cannelle sous le fort Central) : l'infiltration a dominé, sans déstabilisation des matériaux.

En aval de la confluence, jusqu'au débouché du vallon de Viévol, les versants ont très peu contribué. La zone traversée est surtout calcaire, en gorges. Les apports solides du vallon d'Ourtigue à la Roya sont cependant importants, bien plus que le Caramagne (pour un bassin versant de seulement 2 km²!), mais l'essentiel du charriage provient du lit et des berges, initié en amont par une belle coulée superficielle sous la Tête de Chavan.

5.1.2.2 Madone de Viévol

Le bassin versant de Viévol présente un réseau hydrographique radial important constitué des vallons Para, Scabrie, la Morte, Dente et Rabay ainsi que de nombreuses ravines adjacentes. La crue d'octobre a réactivé ces vallons dont la largeur, autrefois réduite, a augmenté significativement pour certains tronçons, érodant les berges et charriant les matériaux jusqu'aux habitations en rive gauche du vallon de la Morte où ils se sont déposés sur plusieurs mètres d'épaisseur.

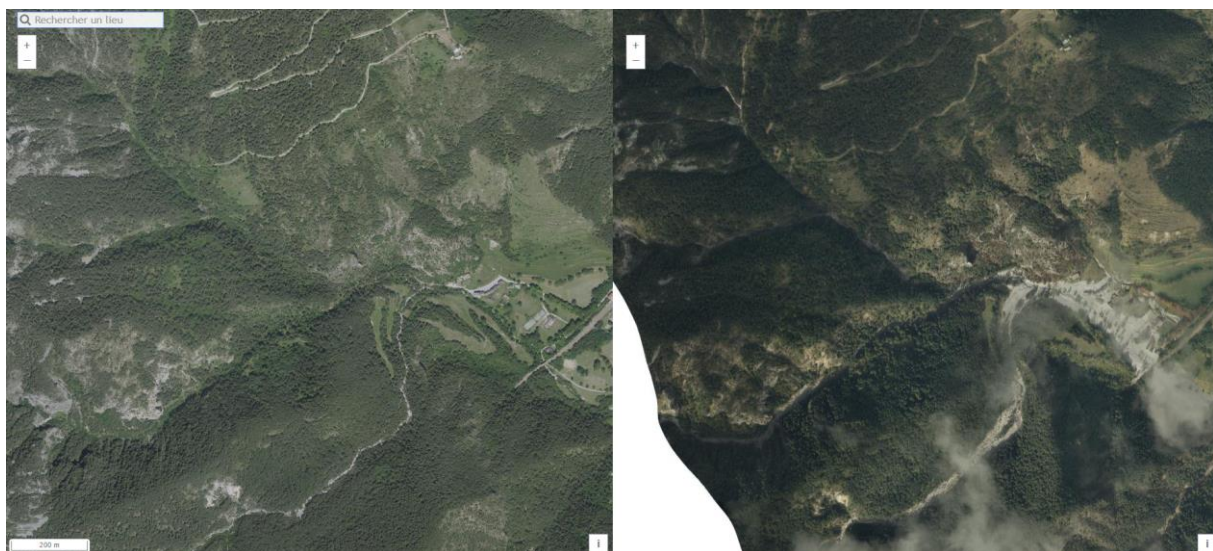


Figure 42 : Analyse diachronique secteur Madone de Viévol (Source : Remonter le temps, IGN)

Le vallon Para, traversant les calcaires marneux et marnes dans sa majeure partie, a été alimenté par de nombreuses ravines affluentes, en majorité depuis sa rive gauche. Sur cette même rive, de petites coulées boueuses se sont déclenchées juste en amont de la confluence avec le vallon de Scabrie mais sans se connecter au vallon. Le vallon de Scabrie, reposant sur des terrains type éboulis (excepté en partie haute où les formations de marnes et calcaires sont présentes) et de taille plus modeste que le vallon Para, a été parcouru par une coulée boueuse en tête de bassin versant. Peu de ravines sont venues alimenter le vallon, elles proviennent uniquement de sa rive gauche. En partie basse, une coulée boueuse de faible superficie est venue se connecter au vallon.



Figure 43 : Glissement dans le vallon de Scabrie (à gauche) et glissement dans le vallon de la Morte (à droite)
(Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

Le vallon de la Morte est pourvu d'une ramification importante de ravines qui ont été activées lors de la crue. Deux coulées boueuses, situées en partie haute du bassin versant, sont venues alimenter le vallon mais les apports restent minimes, les coulées étant superficielles et relevant plutôt d'un lessivage des terrains calcaires et marneux.

Plus au sud, le vallon de Dente, et son affluent rive gauche le vallon de Rabay, ont été fortement impactés par l'événement. Le long du vallon de Rabay de nombreuses ravines se sont initiées dans les tabliers d'éboulis calcaires, mobilisant les matériaux dont une partie s'est déposée en aval de la confluence avec le vallon de Dente. Ce dernier a vu son réseau de ravines réactivé sans toutefois impacter le tablier d'éboulis présent en partie haute. Les venues d'eau ont probablement circulé au sein de l'éboulis et sont ressorties au pied de celui-ci.



Figure 44 : Partie amont du vallon de Rabay – Éboulis calcaires à matrice argileuse déstabilisés et ravinés (en orange) par les écoulements dans les talwegs (en vert) (Source : ONF-RTM : 17-18/11/2020)

Sur ce secteur, quelques glissements et coulées boueuses superficiels se sont initiés dans les versants, avec un très faible apport aux vallons. Ce sont surtout les berges de ces derniers qui ont subi une érosion importante, notamment le vallon de Dente et, dans une moindre mesure, le vallon de la Morte, accompagnée par la quantité importante de matériaux déjà présente en fond de lit, qui a contribué au dépôt considérable de ces matériaux au niveau du hameau de la Madone de Viévol.

5.1.3 Vallon de Consciente

Le vallon est très encaissé et possède des zones de ravinements, déjà actives avant le 2 octobre 2020, en tête de bassin versant. Ces zones ont peu évolué en extension après l'évènement, mais elles ont toutefois apporté des matériaux plus en aval. Le vallon est ensuite très encaissé et boisé jusqu'à Canarresse : les reprises alluvionnaires dans le lit ont été importantes. Les nombreux petits talwegs affluents ont tous apporté des matériaux via leurs lits (reprise et dépavage). On note toutefois l'absence de glissements de terrains et de coulées boueuses, les formations géologiques encaissantes (migmatites) étant peu propices à ces phénomènes.

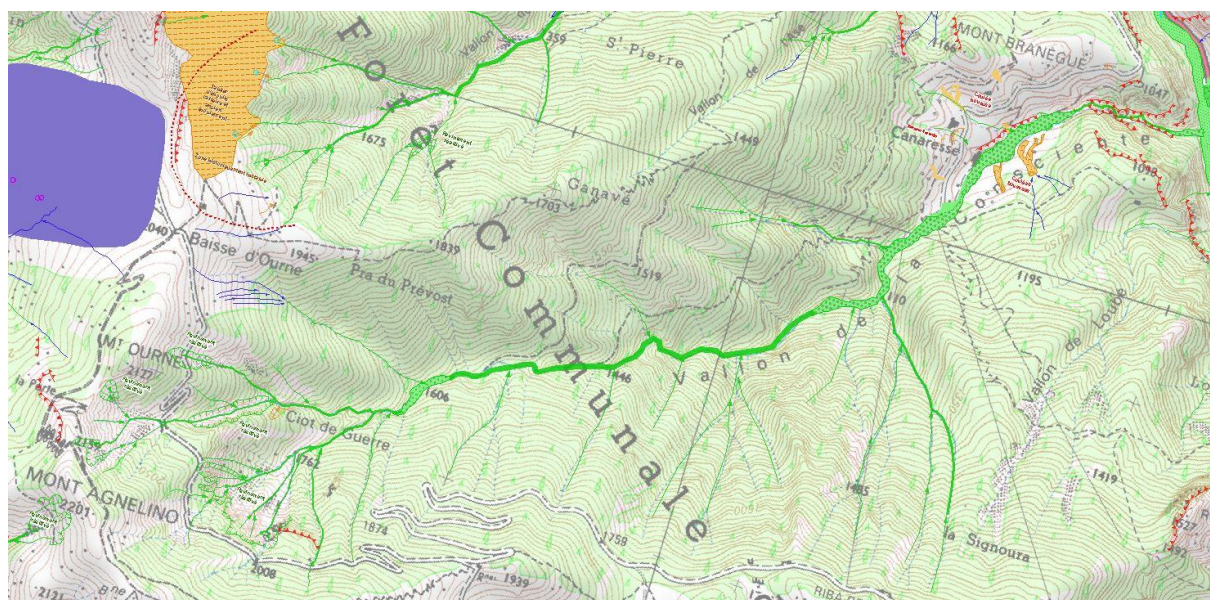


Figure 45 : Phénomènes relevés sur le vallon de Consciente ; extrait de la carte géomorphologique

L'élargissement de la vallée au niveau de Canarresse, à la faveur d'un surcreusement local par le glacier de la Roya, a permis au torrent d'élargir son lit alluvial avec de fortes érosions de berges. La nature plus argileuse des terrains de couverture a aussi favorisé des glissements et coulées boueuses sur les versants agricoles (terrasses, prairies). Les glissements de rive droite ont atteint le torrent.



Figure 46 : Glissements superficiels et coulées boueuses autour de Canaressse (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

5.1.4 Vallon de Castérino

La partie supérieure du vallon de Castérino, au niveau de la confluence avec le ruisseau de Valmasque, n'a pas subi d'évolution majeure. Les ravines existantes, traversant les terrains constitués de calcaires, dolomies, carogneule et gypse, étaient déjà actives et n'ont que peu alimenté le vallon de Castérino. Ce sont surtout les deux ravines, situées à 1 km en aval de la confluence, qui ont charrié des matériaux jusqu'au vallon.

Plus en aval, au droit du Plan d'Arreil, deux vallons affluents en rive gauche ont été réactivés à la suite de l'épisode pluvieux et ont remobilisé des matériaux morainiques, éboulis et dolomies. Le vallon situé le plus au sud, inactif avant la crue, a mobilisé une quantité importante de matériaux, impactant au passage une habitation, les matériaux s'étant déposés au droit et à l'aval de celle-ci, sur des terrasses agricoles et créant un cône de déjection. Cependant, une quantité minime, avec notamment des matériaux très fins, a contribué à l'apport sédimentaire du vallon de Castérino.



Figure 47 : Analyse diachronique secteur vallon de Castérino en amont du hameau (Source : Remonter le temps, IGN)

À l'aval du Plan d'Arreil, les matériaux issus du vallon de Cardon, essentiellement morainiques, se sont déposés au niveau du centre de secours et n'ont pas alimenté le vallon de Castérino.



Figure 48 : Vallon au droit du Plan d'Arreil (à gauche) et vallon de Cardon (à droite) (Source : F. Adamo, CEREMA, 09/10/2020)

En aval du hameau de Castérino, un glissement s'est produit en rive droite, détruisant au passage l'annexe d'une habitation et obstruant la route d'accès au hameau.



Figure 49 : Analyse diachronique secteur vallon de Castérino à l'aval du hameau (Source : Remonter le temps, IGN)

Le glissement, de 100 m de dénivelée, s'est initié dans les grès arkosiques et a repris sur sa trajectoire des dépôts morainiques. Il s'est ensuite étalé le long de la route au niveau de la station d'épuration et a atteint le torrent, alimentant celui-ci en matériaux fins.

A l'aval du glissement, en rive gauche, la réactivation du vallon de Cassette a permis le charriage des matériaux, dont leur origine est principalement calcaire et dolomitique, et leur dépôt sur le cône de déjection avec une part de contribution réduite au vallon de Castérino. En aval, des coulées boueuses ont peu, voire n'ont pas, alimenté le vallon en matériaux.



Figure 50 : Glissement de terrain (à gauche) et vallon de Cassette (à droite) (Source : F. Adamo, CEREMA, 09/10/2020)

A l'amont du lac des Mesches, deux glissements de terrain se sont déclenchés en rive droite du vallon et ont coupé la route. De quelques dizaines de mètres de hauteur, et compte tenu de la forte pente, les matériaux issus des glissements (de type migmatites, pélites et schistes) ont atteint le torrent et ont été repris par ce dernier, pour être retenus immédiatement en aval par le lac des Mesches.



Figure 51 : Analyse diachronique secteur vallon de Castérino à l'amont du lac des Mesches (Source : Remonter le temps, IGN)



Figure 52 : Glissements de terrains en rive droite du vallon de Casterino, en lien probable avec des sorties d'eau drainant naturellement (karst) et/ou artificiellement (anciennes galeries de mines) le massif de Plan Tendasque (Source : F. Adamo, CEREMA, 09/10/2020)

Pour le secteur du vallon de Castérino, les sources sédimentaires proviennent essentiellement du charriage des matériaux déjà présents dans le vallon principal ainsi que des deux glissements à proximité du lac des Mesches. Les ravines et vallons affluents n'ont que très peu contribué à l'apport sédimentaire du vallon de Castérino, tout comme les autres glissements et coulées.

Le lac des Mesches a, comme le lac du Boréon en Vésubie, formé un piège à sédiments grossiers. Seuls les sédiments assez fins pour être transportés en suspension, ainsi que potentiellement du bois flottant, ont passé le barrage.

5.1.5 Vallon de la Minière

5.1.5.1 Secteur en amont du Lac de la Minière

Comme pour le vallon de Casterino, les débits liquides qui ont transité dans la vallée sont importants, mais non morphogènes jusqu'aux granges de Vallauria. Les reconnaissances et les vols Drone n'ont pas mis en évidence d'apports solides des versants (torrentiels ou glissements de terrains).

On constate des débordements en lit majeur sans transport solide entre les Granges hautes et Granges basses de Vallauria.

A ce niveau, les apports de versants sont faibles, la crue des talwegs issus de Chanvirai et la Cime de Plan Tendasque a charrié très peu de matériaux.

Les apports sont nettement plus conséquents de la part des ravins de Gias de Plan Tendasque en rive gauche, avec engravement du cône de déjection sous forêt, et en lien avec un **important glissement de terrain en rive droite** très probablement associé à des résurgences (vallon glaciaire de Gias Vioré supérieur, encombré de moraines, et circulations karstiques dans les calcaires dolomitiques du massif Escandail-Cime de la Nauque). Cette zone de glissement ne semblait pas exister avant le 2 octobre 2020.

L'essentiel de la charge solide se dépose en amont de la courte gorge de Gias Vioré, les sédiments plus fins qui transitent finissent piégés dans le lac de retenue EDF de la Minière.

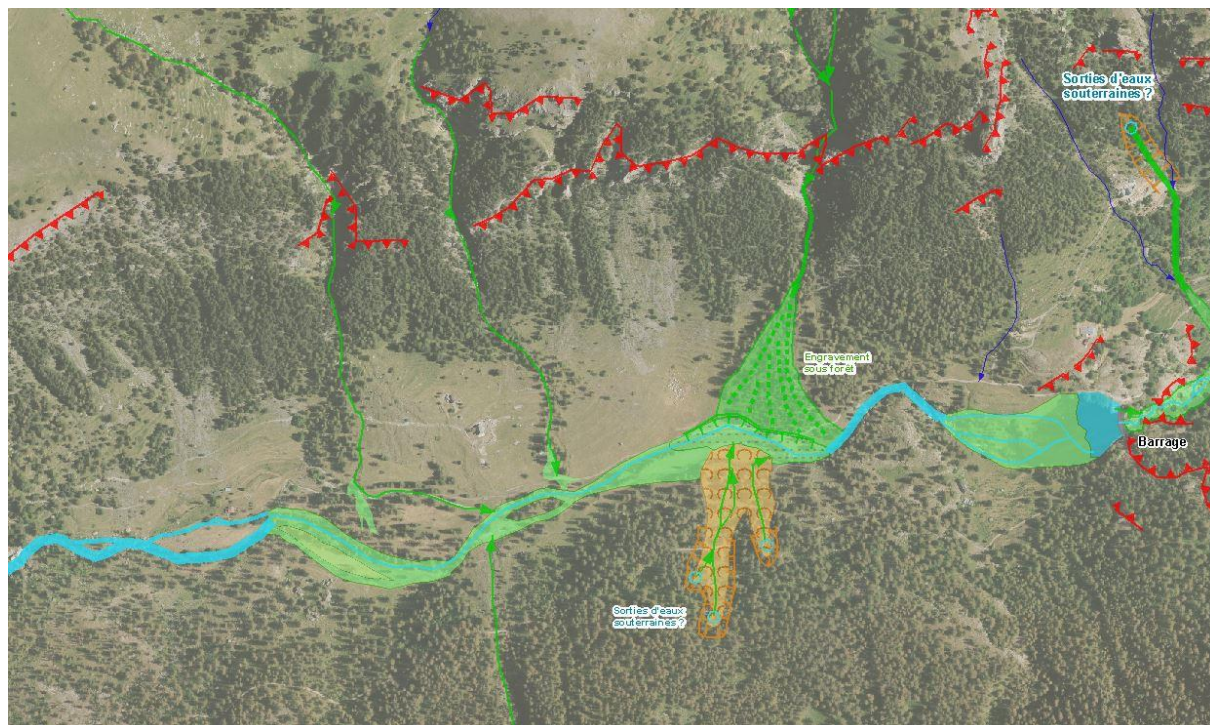


Figure 53 : Vallon et versants de la Minière en amont du lac. Engravement du cône de déjection en rive gauche (torrent de Plan Tendasque) sans apports importants à la Minière, et glissement puis engravement de la rive gauche en vis-à-vis, repoussant la Minière sur la rive opposée

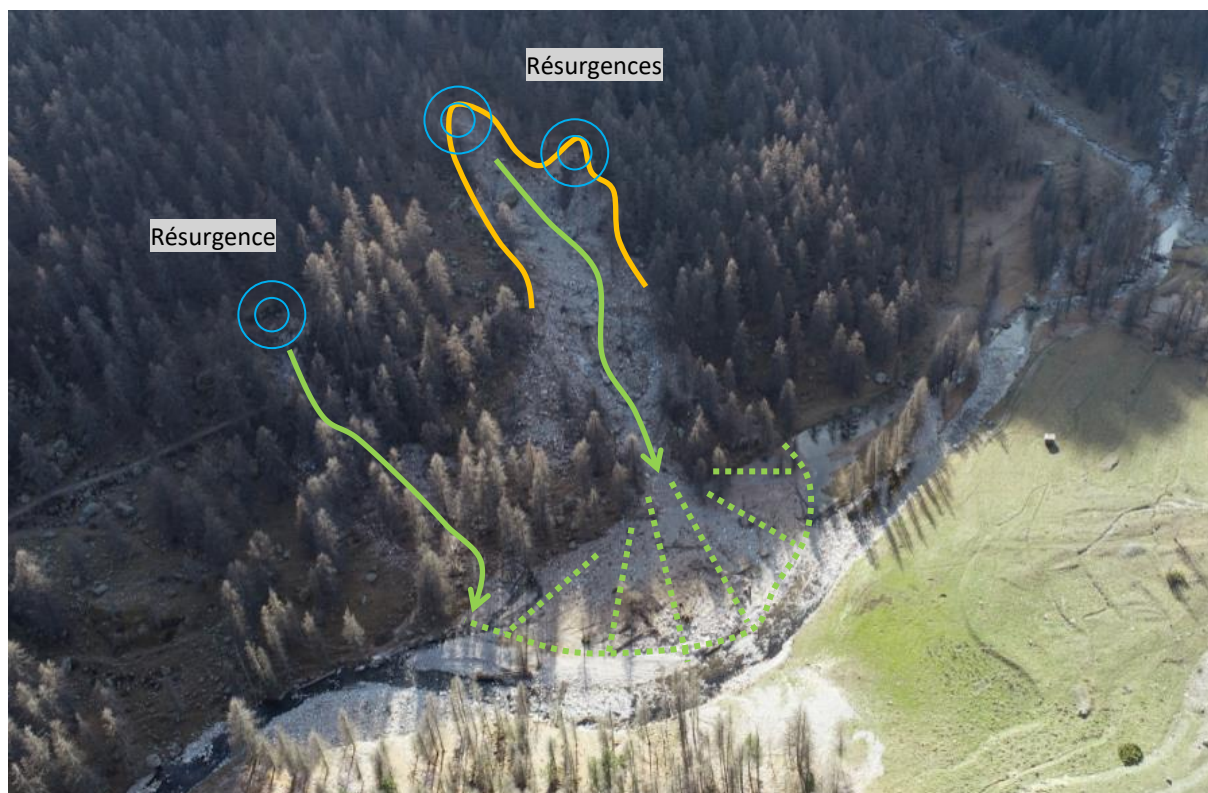


Figure 54 : Résurgences-glissements-coulées torrentielles de Gias Vioré, formant un cône alluvial dans le lit majeur de la Minière
(Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)



Figure 55 : Diachronie avant (2012) et après (11/2020) la crue de la Minière au niveau de Gias Vioré inférieur
(Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

5.1.5.2 Secteur lac de la Minière – lac des Mesches

A l'aval du déversoir du barrage de la Minière, on constate un dépavage du lit au niveau du verrou rocheux (migmatites de Fenestre).

Des **apports solides importants proviennent de la rive gauche**, ayant pour origine un talweg torrentiel et plus en amont, on observe une grosse résurgence d'eau au niveau des calcaires dolomitiques. Le fonctionnement karstique est exceptionnel, le profond vallon créé par cette résurgence était à peine dessiné avant le 2 octobre 2020.

En aval du hameau de Vallauria, le lit du torrent s'élargit avec des divagations et des reprises en berges. On note des apports notables par ruissellement de deux petits talwegs, issus vraisemblablement de grosses sources karstiques ou de galeries de mine pour le talweg de rive gauche (pour mémoire, 15 km de galeries sont répertoriés dans l'ancienne concession de Vallauria).

On note un dernier apport conséquent en rive droite via le **torrent du Taupé**, dont le cône de déjection s'est fortement engravé, ayant pour origine d'une part la crue du torrent lui-même (branche Est) en lien avec des émergences au front du vallum morainique, et d'autre part **une crue importante de la Branche Ouest**, en face du Gias du Taupé, générée par un glissement de terrain dans les moraines consolidées. Les calcaires dolomitiques sont localisés juste en amont : il est très probable qu'une résurgence de type karstique soit à l'origine de ce phénomène.

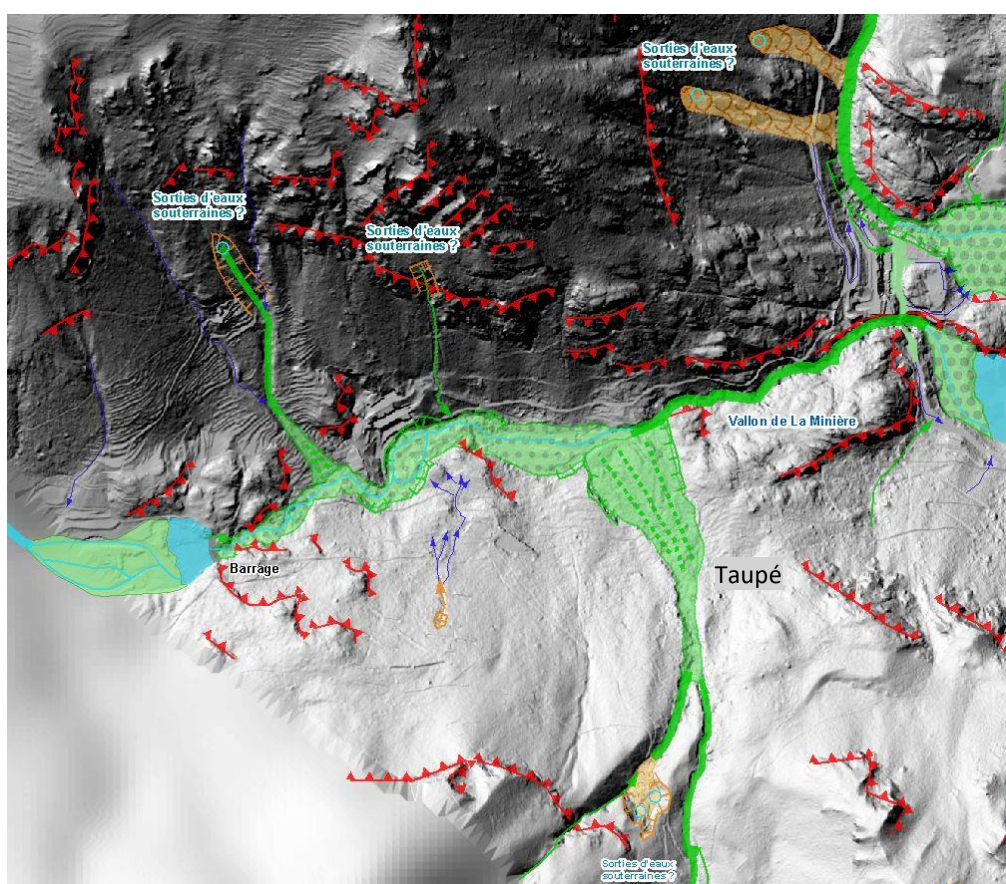


Figure 56 : Fonctionnement exceptionnel du talweg en rive gauche en amont de Vallauria, en lien avec une émergence karstique temporaire. Fonctionnement similaire en rive droite dans le vallon de Taupé branche Ouest.



Figure 57 : Talweg torrentiel en amont de Vallauria (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)



Figure 58 : Engravement du cône par le torrent de Taupé. En médaillon, la zone d'émergence De la branche Ouest, au pied des calcaires dolomitiques karstifiés. La moraine a été décapée et emportée (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

5.1.6 Vallon de la Bieugne

Entre le lac des Mesches et St Dalmas de Tende, la Bieugne a fortement remanié son lit alluvial (cf. § 5.3). Par rapport aux autres vallées affluentes de la Roya, le dénivelé est important entre les Mesches (1 350 m) et St Dalmas (700 m). Le mole rocheux très résistant constitué de migmatites au niveau des Mesches a empêché les glaciations quaternaires successives de creuser la vallée, formant alors un verrou important. Le glacier a eu plus de facilités pour creuser sa vallée en aval dans les roches détritiques (arkoses, grés et marnes), en laissant des dépôts de moraines latérales sur le versant rive droite. On retrouve donc d'importants amoncèlements de blocs en fond de vallée, issus du transport par le glacier, et des éboulis de gravité plus récents.

En rive droite, le versant a fourni peu de matériaux, à l'exception de trois coulées de matériaux. L'origine, comme pour le vallon de la Minière et certains glissements de Casterino, est à rechercher dans le fonctionnement hydrogéologique du massif de la Nauque (cf. Figure 59 et Figure 63) :

- Écoulement souterrain des eaux précipitées dans les calcaires dolomitiques et les moraines des petits vallons glaciaires suspendus ;
- Résurgence par un réseau de failles drainantes dans les arkoses fracturées avec mise en charge des éboulis et moraines à bloc à mi-versant. Trois coulées sont parvenues jusqu'à la Bieugne et marquent durablement le paysage.

Les autres talwegs ont eu des écoulements solides mais sans apports décisifs pour la Bieugne.

En rive gauche, le vallon de Sapelle et les talwegs qui descendent de la Pointe de Vergou ont subi des crues à fort transport solide de type lave torrentielle. La raideur des pentes et la nature fracturée des roches (grés et arkoses), la disponibilité en matériaux dans les ravins (éboulis) expliquent ce phénomène, ainsi que les quantités remarquables des précipitations du 2 octobre 2020 sur ce massif. La plus grande partie des matériaux charriés sont parvenus jusqu'à la Bieugne.

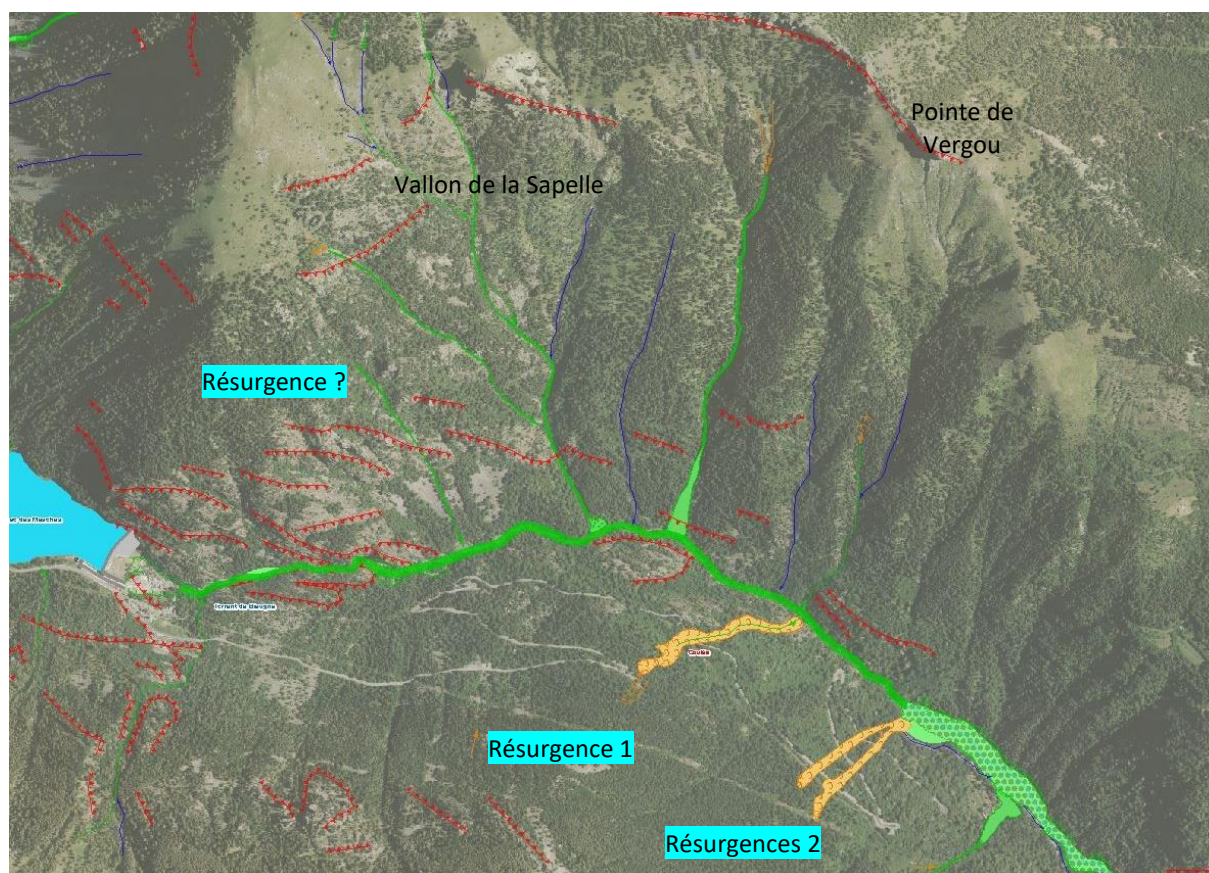


Figure 59 : Apports solides des versants entre les Mesches et Ferrairone



Figure 60 : Coulée Ouest en rive gauche et, au fond en rive droite, les apports torrentiels de la Sapelle et de Vergou
(Source : F. Adamo, CEREMA)



Figure 61 : Coulées Est en rive gauche (Source : F. Adamo, CEREMA)



Figure 62 : Apports torrentiels de la Sapelle. Arkoses très fracturées au premier plan, avec possibles circulations souterraines des eaux. Pé-
lites et grès au second plan, plus favorables aux ravinements et aux petits glissements superficiels boueux. Calcaires dolomitiques coiffant
les sommets, fournissant des éboulis sous corniche mobilisés par les têtes de ravines (Source : ONF-RTM, 17-18/11/2020)

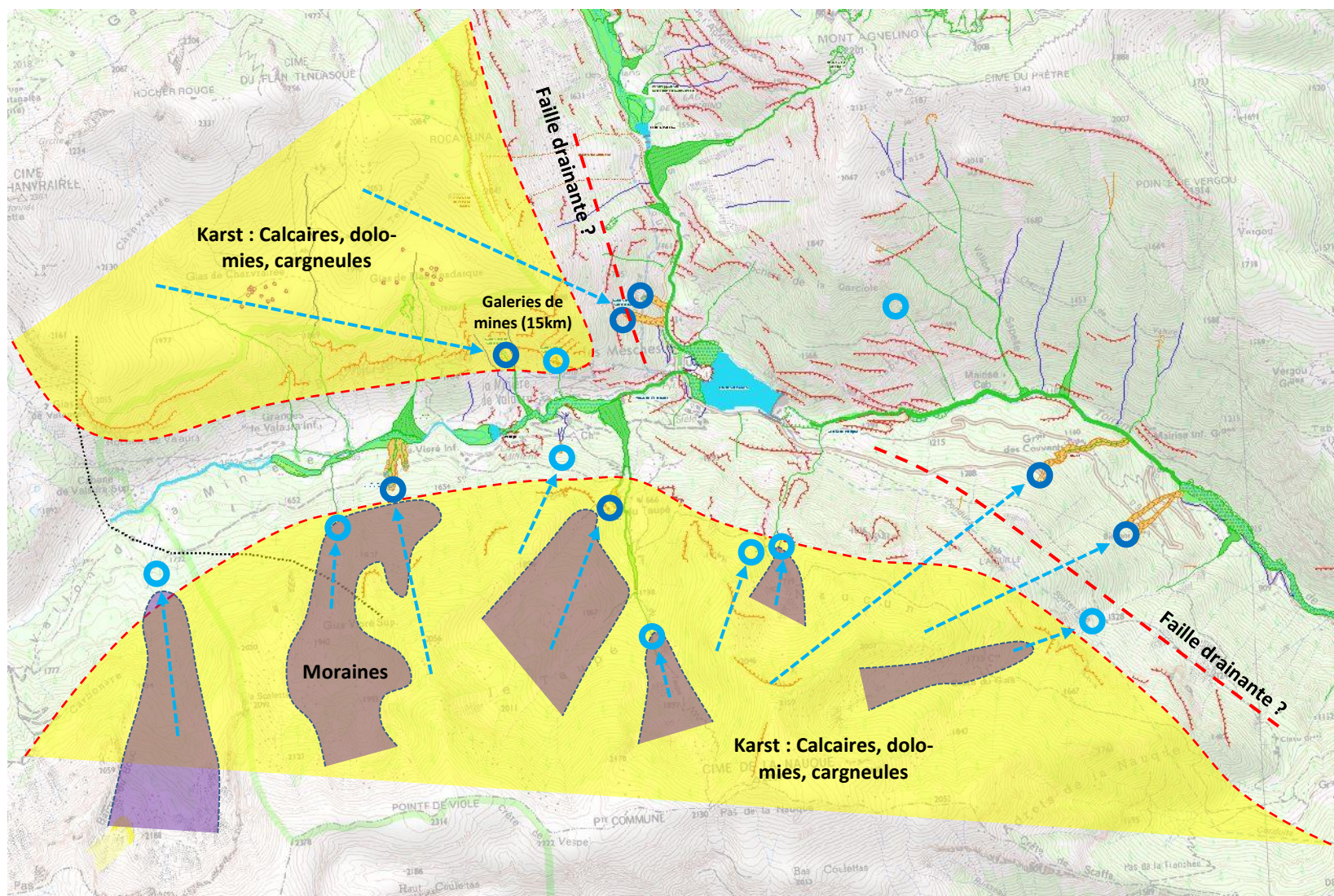


Figure 63 : Secteur Minière-Mesches-Bieugne. Relations présumées entre les réservoirs hydrogéologiques (calcaires karstifiés, moraines, éboulis) et les glissements/ravinements/coulées torrentielles apparus aux pieds des versants, à l'origine des principaux apports sédimentaires aux cours d'eau.

5.2 ÉVOLUTION DE BANDE ACTIVE – COMPARAISON DIACHRONIQUE

5.2.1 Avant-propos

Les crues extrêmes en zone de montagne sont souvent à l'origine d'ajustements morphologiques majeurs qui se traduisent entre autres par une augmentation de la largeur de bande active, définie ici comme l'espace fluvial occupé par les chenaux en eau et les bancs sédimentaires non végétalisés. Parmi les exemples documentés les plus frappants d'expansion de bande active post-crue, on peut citer le cas du Guil en juin 1957 (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005), ou encore celui plus récent de la Magra dans les Apennins en octobre 2011 (Rinaldi *et al.*, 2016). L'évaluation des effets de largeur imputables aux crues extrêmes est importante, car elle permet d'une part de mettre en perspective un événement morphologique majeur vis-à-vis d'autres cas connus, et d'autre part de replacer cet événement dans l'histoire morphologique récente du cours d'eau. Un autre élément crucial est de pouvoir tirer des enseignements sur la reconquête de bande active dans les vallées alpines, qui peut se produire de manière catastrophique, avec des implications fortes en matière de prévention contre les crues torrentielles. Ceci alimente directement la problématique de l'espace de bon fonctionnement (ou espace de liberté) des cours d'eau, qui constitue un principe de gestion largement reconnu comme bénéfique non seulement pour la protection contre les crues, mais aussi pour la préservation de la qualité des hydrosystèmes (Malavoi *et al.*, 1998 ; Terrier et Stroffek, 2016). En donnant plus de place à la rivière, on lui permet d'éroder des terrains dépourvus d'enjeux à protéger et on restaure des conditions morphologiques favorables à la création de mosaïques d'habitats diversifiés.

Une analyse de l'effet de la tempête Alex sur la bande active de la Roya a donc été réalisée à partir de données d'imagerie. Nous sommes remontés jusqu'aux plus anciennes photographies aériennes disponibles (1948), de façon à pouvoir replacer l'événement d'octobre 2020 dans un cadre temporel le plus large possible. Le linéaire hydrographique retenu intègre les secteurs les plus impactés, mais il ne recouvre pas l'ensemble du cours de la Roya car celui-ci poursuit son cours en Italie. Seul le linéaire français du fleuve est ici traité.

5.2.2 Matériel et méthodes

5.2.2.1 Linéaire d'étude

L'analyse porte sur un linéaire de 37 km, qui comprend la Roya depuis le tunnel de Tende jusqu'à la frontière franco-italienne.

5.2.2.2 Imagerie

Huit campagnes de prises de vues aériennes réalisées depuis 1948 sont mises à disposition dans les bases de données d'ortho-imagerie de l'IGN et du CRIGE PACA. Elles permettent de couvrir une période allant de 1948 à 2020 (post-crue). Ces campagnes sont disponibles au sein des bases de données d'ortho-imagerie de l'IGN et du CRIGE PACA et projetées en Lambert 93. Pour des raisons de qualité des informations issues des orthophotographies, seules 4 campagnes de prises de vues aériennes (1948, 2009, 2017, 2020 post-crue) ont servi à l'extraction des bandes actives de la Roya (Tableau 23). En effet, plusieurs contraintes relatives aux orthophotographies (résolution des images, ombrages, végétation) et/ou au terrain étudié (vallée étroite, faible largeur du cours d'eau) n'ont pas permis l'extraction des informations sur l'ensemble du corpus orthophotographique sur la vallée de la Roya. Ces campagnes d'orthophotographies concernent 2004, 2012, 2014 et 2017 ont été utilisées comme données complémentaires (Tableau 24).

La campagne IGN express réalisée quelques jours après la tempête Alex permet de caractériser l'état post-crue. La campagne de 1948 (BD-ORTHO historique) permet de renseigner un état ancien, trop éloigné cependant (temporellement) des crues pour pouvoir caractériser un état post-crue (1926) ou pré-crue (1993). De la même manière, la campagne de 2009 ne permet de caractériser qu'un état « intermédiaire », trop éloigné temporellement de la crue de 1997. La campagne 2017 (haute résolution) permet quant à elle d'appréhender un état ante-Alex, et doit également permettre de caractériser localement les effets de la crue de 2014.

En complément de l'imagerie aérienne, les MNT issus du RGE à 1m et des levés LiDAR aéroportés de 2020 ont été utilisés pour améliorer l'extraction des bandes actives d'une part, et pour délimiter le fond de vallée moderne d'autre part. En outre, pour tenter de combler les lacunes temporelles de données sur la période 1948-2004, des campagnes de photographies aériennes argentiques haute résolution (échelle < 1/10 000^e) ont été consultées (Tableau 24). Au regard de leur emprise spatiale réduite, elles n'ont toutefois pas fait l'objet d'implémentation dans le projet SIG.

Date	Type	Résolution (m)	Dates des campagnes aériennes	Source
1948	Orthophotos NB	0,50	23/08/1948	BD-ORTHO-Historique IGN
2009	Orthophotos couleur	0,20	28/05 – 30/07/2009	CRIGE PACA
2017	Orthophotos couleur	0,20	13/06/2017 04-06/07/2017	BD-ORTHO-HR IGN
2020	MNT RGE 1 m	1,00	15/09/2020	RGE IGN
2020	Orthophotos couleur	0,10	05-07/10/2020	ORTHO-EXPRESS IGN
2020	MNT LiDAR	1,00	05-07/10/2020	IGN

Tableau 23 : imagerie utilisée pour l'extraction des bandes actives et du fond de vallée moderne de la Roya

Dates	Type	Échelle / Résolution	Dates campagnes aériennes	Emprise	Source
1950	Photos aériennes argentiques	1/4972 ^e	01/12/1950	Aval du bassin-versant (frontière franco-italienne)	IGN C3741-0111_1950_CDP3553_0011
1950		1/5285 ^e	12/12/1950	Environs de Tende	IGN C3841-0031_1950_CDP3565_0392
1972		1/8183 ^e	01/07/1972	Environs de Breil	IGN C3741-0231_1972_EDFBREIL-SURROYA_9503
1972		1/5271 ^e	01/09/1972	Environs de Saorge	IGN C3741-0151_1972_EDFVALLEEDE LAROYA_9494
2004	Orthophotos couleur	0,50 m	09-26/06/2004	Département	BD-ORTHO IGN
2012		0,50 m	-	Département	BD-ORTHO IGN
2014		0,50 m	-	Département	BD-ORTHO IGN
2017		0,50 m	-	Département	BD-ORTHO IGN

Tableau 24 : Imagerie complémentaire utilisée pour l'analyse des évolutions morphologiques de la Roya

5.2.2.3 Extraction des bandes actives et du fond de vallée moderne

L'extraction des bandes actives a été réalisée manuellement sous SIG (QGIS), selon une approche classique de cartographie par photo-interprétation. Pour la Roya, les digitalisations ont été réalisées par un nombre réduit d'opérateurs (2) pour les différentes dates, afin de réduire le biais opérateur et de s'assurer de l'homogénéité des extractions. Les surfaces intégrées dans la bande active comprennent les chenaux en eau et les bancs sédimentaires non végétalisés ou occupés par une végétation clairsemée (Figure 64A). Les îles végétalisées ont été exclues des polygones de bandes actives à partir du moment où leur taille dépasse une valeur seuil, de l'ordre de 150 m² (Figure 64B). Les terrains en marge de la bande active portant les traces du passage des eaux après la tempête (dépôts de fines, laisses de crue...) ont également été exclus (Figure 64C et D), afin de respecter la notion

la plus communément admise de bande active, qui représente un espace de transport et de stockage temporaire de la charge alluviale grossière (charge de fond) en transit.

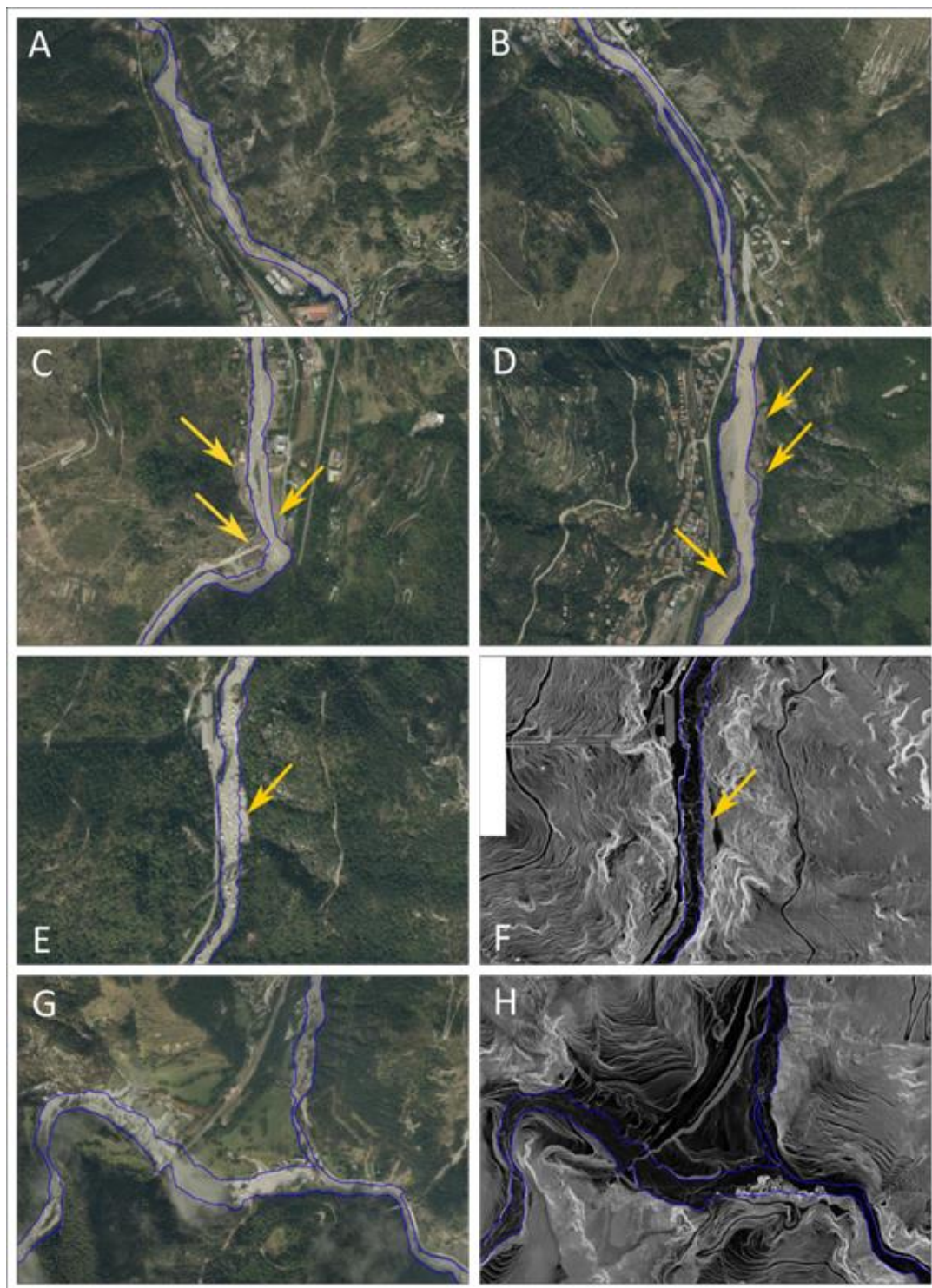


Figure 64 : Exemples d'extraction manuelle sous QGIS des bandes actives (en bleu sur l'ensemble des images) : (A) bande active post-Alex de la Roya en Amont de Tende, incluant les chenaux en eau et bancs de graviers non végétalisés ; (B) bande active post-Alex de la Roya en aval de Tende (Ciagé) avec exclusion des îles végétalisées ; (C) bande active de la Roya en aval de Tende (Loubaira), avec exclusion des zones inondées en rive gauche et en rive droite (dépôts de fines, laisses de crues) ; (D) bande active de la Roya à Breil-sur-Roya, avec exclusion des zones inondées en rive gauche et en rive droite (dépôts de fines, laisses de crues) ; (E) bande active post-Alex en aval de Saint-Dalmas de Tende, avec exclusion du talus de berge déstabilisé en rive droite ; (F) exemple d'utilisation de la carte des pentes du LiDAR 2020 pour exclure le talus de berge instable visible en E ; (G) bande active post-Alex de la Roya sur le secteur de la Madone de Viévola où le lit est masqué par la végétation et le couvert nuageux (H) exemple d'utilisation de la carte des pentes du LiDAR 2020 pour faciliter la délimitation de la bande active dans un secteur où le lit est masqué par la végétation et le couvert nuageux, visible en G.

Malgré la bonne résolution des images récentes disponibles, la visualisation et l'interprétation du lit à partir de l'imagerie seule ne permet pas toujours de bien distinguer la limite entre la bande active et un front de berge ou un pied de versant déstabilisé. Ce problème se pose surtout pour les images capturées immédiatement après une crue ayant décapé la végétation des marges fluviales. Le recours aux données LiDAR a permis d'améliorer très nettement la détection de ces limites, notamment sur les images d'octobre 2020 (Figure 64E et F). Les produits dérivés du LiDAR (ombrages et cartes des pentes) ont également été très utiles pour améliorer l'extraction des bandes actives dans les secteurs où le lit est masqué par la ripisylve ou par le couvert nuageux. Ce problème se pose principalement dans les parties apicales du bassin-versant, comme sur le secteur du Col de Tende ou de la Madone de Viévol (Figure 64G et H).

En complément des bandes actives, nous avons également procédé à l'extraction manuelle de l'espace de divagation fluvial moderne (ou fond de vallée moderne), défini ici comme l'emprise des dépôts fluviaux historiques (pluriséculaires). Cette emprise est bornée soit par un versant, soit par un cône de déjections, soit par une haute terrasse alluviale (Figure 65). Un critère s'impose pour séparer les hautes terrasses et le fond de vallée moderne. Une hauteur maximale de 10 m a été utilisée pour cette segmentation, conformément à d'autres travaux d'extraction du fond de vallée (Alber et Piégay, 2011). L'espace de divagation fluvial moderne intègre donc l'ensemble des dépôts fluviaux situés à une altitude relative de moins de 10 m par rapport au fond du lit. Sa délimitation a été réalisée sous QGIS à partir du MNT LiDAR 2020. Ne disposant pas de couverture Lidar ante-crue, le travail effectué renseigne donc le fond de vallée moderne « post-crue », qui peut, sur certains secteurs, avoir été marqué par un élargissement vis-à-vis du fond de vallée ante-crue (*i.e.* érosion des cônes ou des hautes terrasses).

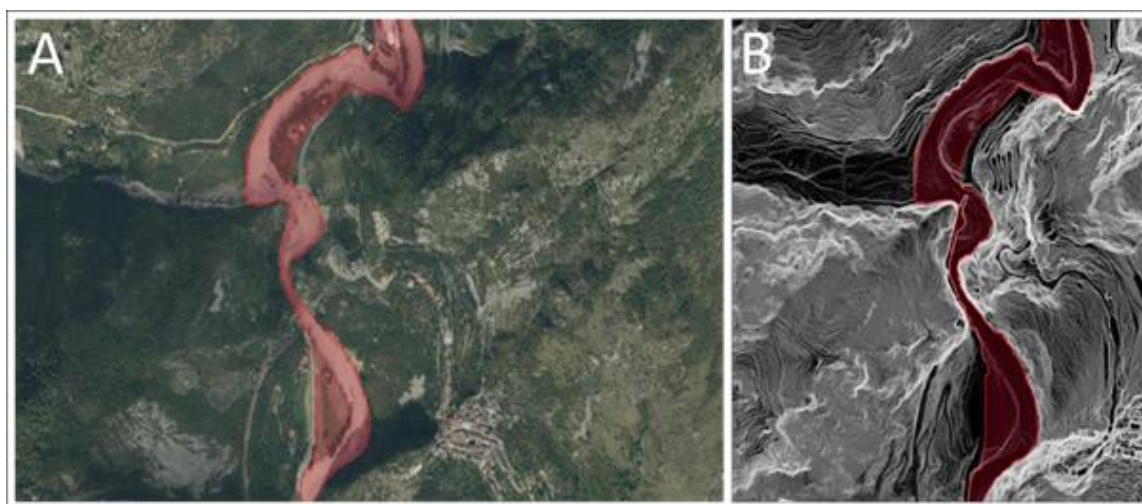


Figure 65 : Exemples d'extraction manuelle du fond de vallée moderne à partir du MNT LiDAR de 2020 : (A) sur la Roya à proximité de Saorge, sur le secteur de la confluence du Vallon de Caïros, avec la présence de cônes de déjections en rive droite et d'une haute terrasse fluvio-glaciaire plus en aval en rive droite ; (B) La carte des pentes extraite du MNT 2020 permet de délimiter l'emprise du fond de vallée moderne.

5.2.2.4 Segmentation spatiale

Une procédure de segmentation spatiale des bandes actives et du fond de vallée moderne a été réalisée à partir d'un référentiel commun de façon à pouvoir extraire les largeurs de bandes actives et analyser la signature morphologique amont-aval de la Roya. Cette procédure repose sur une suite de traitements géomatiques réalisés sous QGIS à partir notamment du plugin *Geometric Attributes* (Nyberg *et al.*, 2015). Le fond de vallée moderne de 2020 a été utilisé comme canevas et constitue un référentiel commun. L'extraction d'un axe de la vallée (centerline) sur cette emprise, puis le traçage automatique de transects selon une interdistance de 100 m ont permis de segmenter 368 unités spatiales de référence. Ces opérations ont été répétées pour chaque emprise de bande active de façon à obtenir pour chaque date et pour chaque unité spatiale de référence une surface active et une longueur de l'axe de la bande active (Figure 66A) ; la largeur de bande active a été ensuite calculée en faisant le ratio surface/longueur (Figure 66B).

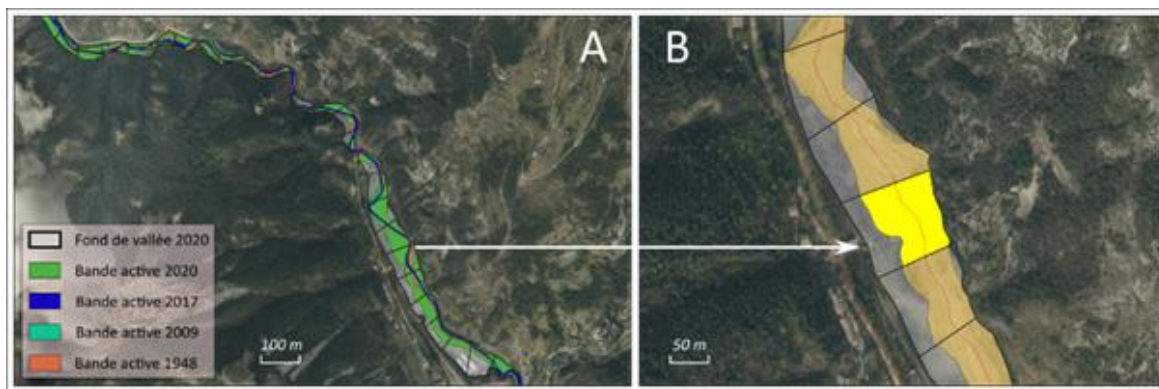


Figure 66 : Procédure de segmentation spatiale des bandes actives pour l'extraction des largeurs par segments de 100 m : (A) segmentation du fond de vallée moderne en unités spatiales de référence interdistantes de 100 m (en noir), avec emprises des 4 couches de bandes actives cartographiées entre 1948 et 2020 en amont de Tende; (B) zoom sur une unité spatiale de référence avec la bande active post-Alex de 2020 en marron clair, et sa centerline en rouge ; la largeur moyenne de bande active est obtenue en faisant le ratio entre la surface active (en jaune) et la longueur de centerline qui traverse l'unité spatiale de référence.

La vallée de la Roya est, d'une manière générale, relativement étroite (la largeur du fond de vallée est systématiquement inférieure à 200 m) et comprend de nombreux secteurs en gorges. Les aménagements anthropiques récents (de la seconde moitié du XX^e siècle) ont ainsi été particulièrement prégnants dans le fond de vallée : remblais, talus, digues, infrastructures routières ou ferroviaires ont entraîné sur certains secteurs une réduction significative de l'emprise du fond de vallée « disponible ».

La méthodologie proposée pour déterminer le fond de vallée récent à partir du MNT LiDAR de 2020 conduit ainsi à certaines incohérences très ponctuelles sur les secteurs où la bande active de 1948 « sort » de l'emprise du fond de vallée (Figure 67). Les valeurs sur ces secteurs ont été ôtées du jeu de données utilisées pour l'interprétation des résultats.

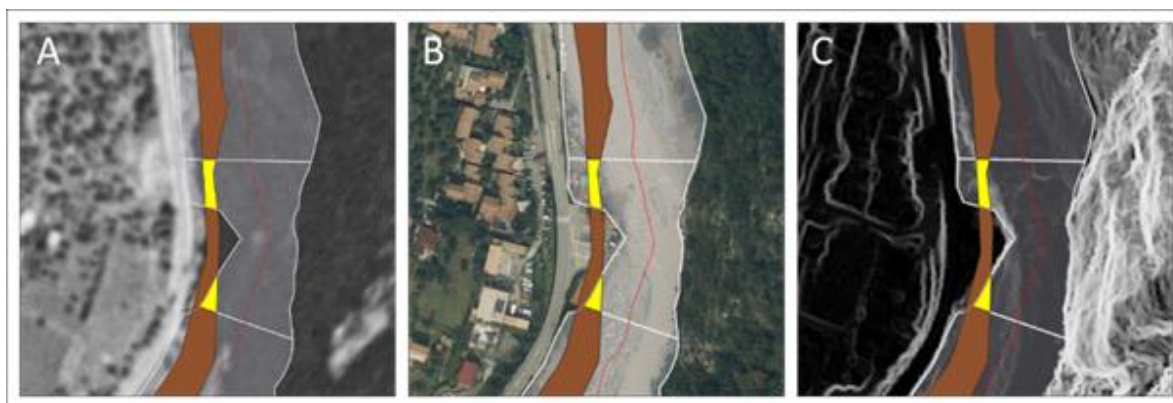


Figure 67 : Exemple d'incohérence quant à l'évaluation de la largeur moyenne d'une bande active de la Roya en 1948 (en marron), au niveau du hameau de Giandola. Cette incohérence est inhérente à la modification récente de l'emprise du fond de vallée (en blanc), ici par un remblai. Seule la zone en jaune aurait été prise en compte, conduisant à une sous-évaluation de la largeur. Ce bloc de bande active a été ôté du jeu de données utilisé. (A) Digitalisation sur l'orthophotographie de 1948. (B) La zone remblayée semble bien exclue du fond de vallée et n'a pas été impactée par la crue de 2020 (B). Validation de l'exclusion du fond de vallée par la carte des pentes (C).

5.2.3 Résultats de l'analyse des bandes actives

5.2.3.1 Évolution des surfaces actives à l'échelle de la vallée

L'analyse diachronique de l'imagerie de la Roya montre que la surface de bande active a augmenté d'un facteur de 2,3 suite à la tempête Alex (Figure 68). Elle est passée de 59 ha en 2017 à 137 ha en 2020. Cette expansion est sans commune mesure avec toute observation antérieure puisque la surface de bande active entre 1948 et 2017 montre une légère tendance à la contraction, caractérisée par une réduction de l'ordre de 15 % de surface

de bande active (de 69 ha à 59 ha). On constate en outre qu'à la fin des années 1940, à une période où de nombreuses vallées alpines étaient occupées par des bandes actives beaucoup plus vastes qu'aujourd'hui (Lié-bault et Piégay, 2002 ; Lallias-Tacon *et al.*, 2017), la Roya présentait une surface active déjà très rétractée (69 ha). Cette contraction est bien confirmée par les campagnes de photographie aériennes argentiques de 1950 (Figure 69 ; voir aussi les comparaisons diachroniques en plan en [Annexe 13](#) et les photographies anciennes en [Annexe 14](#)). Il faut peut-être remonter au milieu ou à la fin du 19^{ème} siècle pour retrouver localement des engravements proches de ceux observés en octobre 2020, comme le suggèrent quelques photos anciennes des Eaux et Forêts de la Roya et de ses affluents (Figure 70). Ces anciens clichés sont très illustratifs, car ils témoignent probablement d'une intensité supérieure de la torrentialité et d'apports sédimentaires accrus vers les fond de vallées entre le milieu du XIX^e et le début du XX^e siècle.

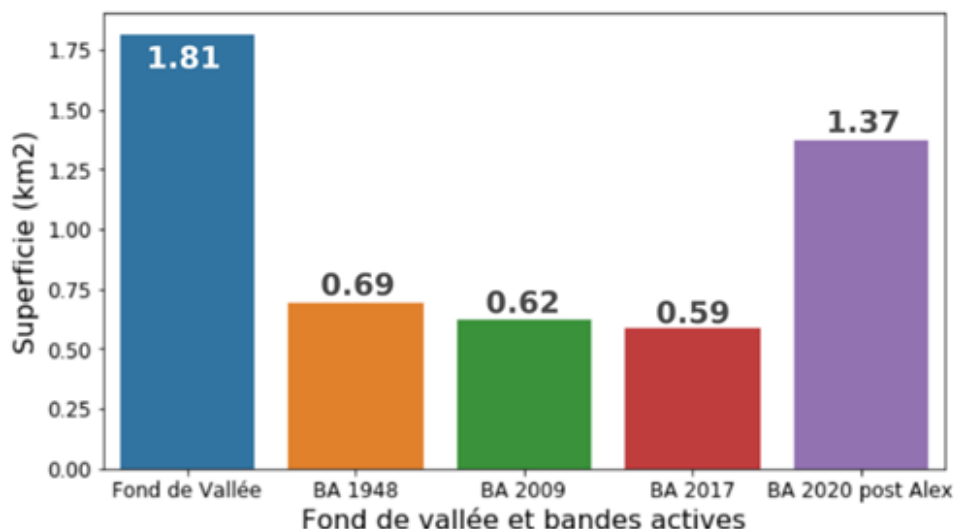


Figure 68 : Évolution des surfaces actives (BA) entre 1948 et 2020 sur l'ensemble du linéaire étudié de la Roya
Les valeurs de surface du fond de vallée (en km²) sont également indiquées.

Les données disponibles et traitées ne montrent pas d'évolutions morphologiques majeures de la Roya sur la période 1948-2017. Elles ne permettent ainsi pas d'appréhender clairement les cycles « classiques » d'expansion lors des crues et de rétraction post-crue (Pitlick, 1993 ; Sloan *et al.*, 2001 ; Lallias-Tacon *et al.*, 2017). Il est cependant possible que plusieurs de ces cycles, de moindre ampleur, se soient produits entre 1948 et 2017 (notamment à l'occasion des crues de 1993 et 1997).

La bande active post-Alex d'octobre 2020 occupe 76% du fond de vallée moderne, alors qu'aux dates antérieures étudiées, ce taux ne dépasse pas 38%. **La reconquête de bande active post-Alex s'est donc faite sur une grande partie de l'emprise du fond de vallée et se traduit par la remobilisation des matériaux constitutifs de marges alluviales du lit et des terrasses ou dépôts récents (XIX^e – XX^e siècles).** Au-delà, il est localement possible que les limites-mêmes du fond de vallée moderne aient été repoussées par la crue.

Il apparaît que **la reconquête de bande active a été fortement contrôlée par l'espace disponible** : dans les secteurs non (ou peu) confinés, les lits étroits avant la crue ont modifié leur morphologie de manière très significative vers une expansion (Figure 69A et B) afin de permettre le transit des grandes quantités d'eau et de sédiments. Dans les secteurs plus confinés, les lits sont marqués par une stabilité de leur morphologie mais le « lessivage » visible des lits rocheux témoigne de l'intensité de la crue ; quelques rares élargissements y sont caractérisés par des extensions immédiates de bande active (Figure 69C et D).

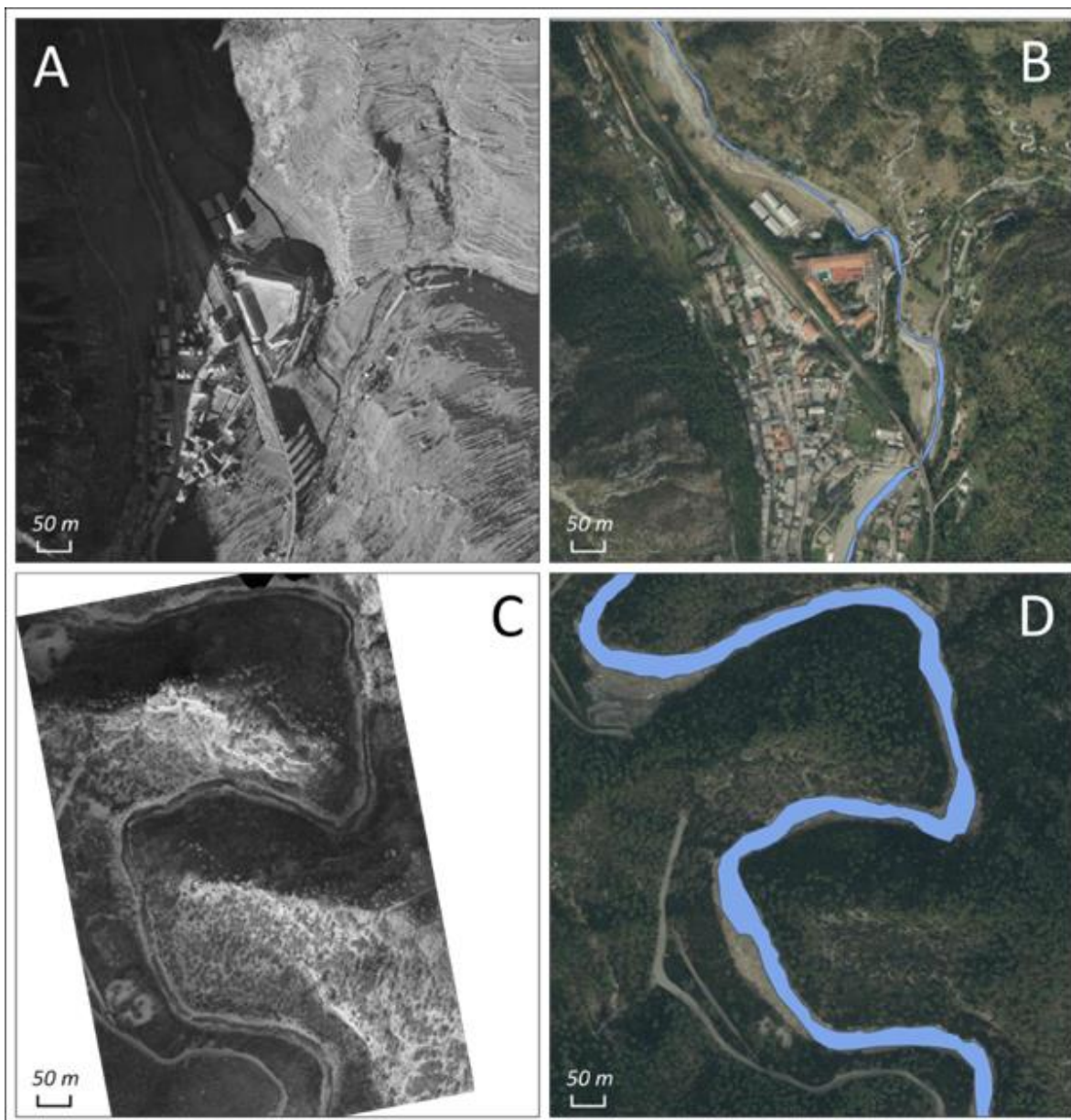


Figure 69 : La bande active de la Roya en 1950 (clichés de gauche) montre déjà une morphologie contractée comparable à celle observable en 2017 (en bleu sur le cliché de droite). Cette similitude vaut autant dans la partie amont du bassin, comme à Tende (A, B) que plus en aval, dans les gorges de Piène Haute (C, D)

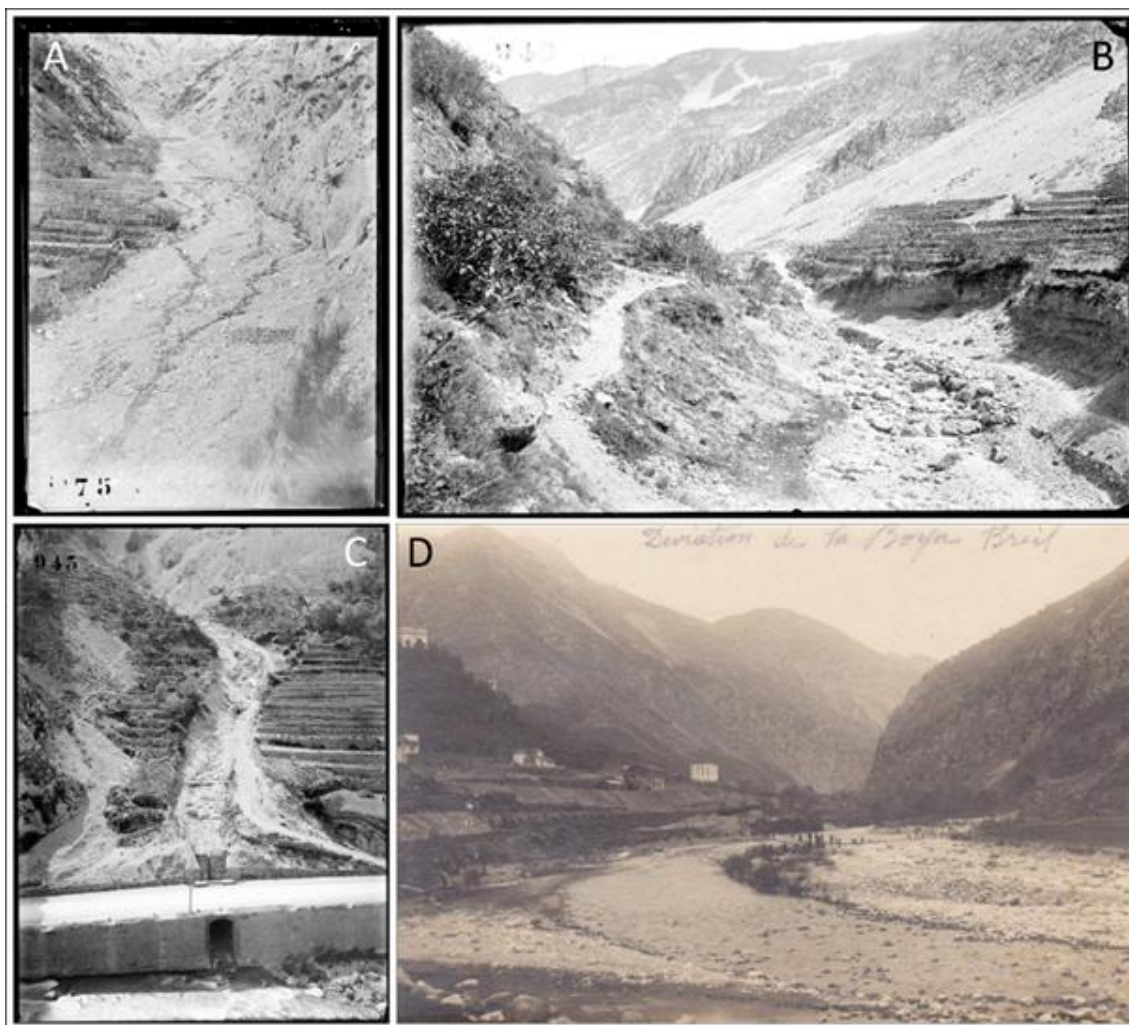


Figure 70 : Illustrations de la fourniture sédimentaire exacerbée dans le lit de la Roya et de ses affluents entre 1890 et 1930. (A) La Lavina à Breil-sur-Roya en 1894 (©AD06 - cote n°23FI1023). (B) Le torrent de Fontaine Froide (Acqua Fredda) à Fontan en 1902 (©AD06 - cote n°23FI1048). (C) Le ravin de Malmort à Saorge en 1902 ((©AD06 - cote n°23FI10489). (D) La Roya en 1929 lors de la déviation du lit de la Roya suite à la mise en place du barrage de Breil (image transmise par M. G. Cattalorda). Ce dernier cliché montre très probablement la bande active résiduelle de la Roya suite à la crue de 1926.

Dans l'objectif d'illustrer le caractère exceptionnel des évolutions géomorphologiques associées à la tempête Alex, la comparaison diachronique couvre une large échelle temporelle sur quelques secteurs (Tende, St-Dalmas de Tende et Breil-sur-Roya). Les comparaisons s'appuient sur trois photographies aériennes IGN (Alex IGN post-crue 2020, IGN ante-crue (nommé 2019), BD historique années 1950-1960) ainsi que sur le cadastre de 1901 pour Tende et 1864 pour Breil-sur-Roya ([Annexe 13](#)).

L'ensemble des planches présentées révèle une très faible mobilité en plan du lit ainsi que de très faibles évolutions de largeur de la bande active avant la crue Alex. À noter que d'autres photographies aériennes historiques ont également été consultées. Notamment à St-Dalmas de Tende, où l'on peut observer la photographie aérienne IGN de 1994 suite à la crue très intense dans le bassin de la Bieugne en juin 1993. Aucune d'entre elles ne montre d'évolution significative du tracé en plan et de la largeur de bande active avant la crue Alex.

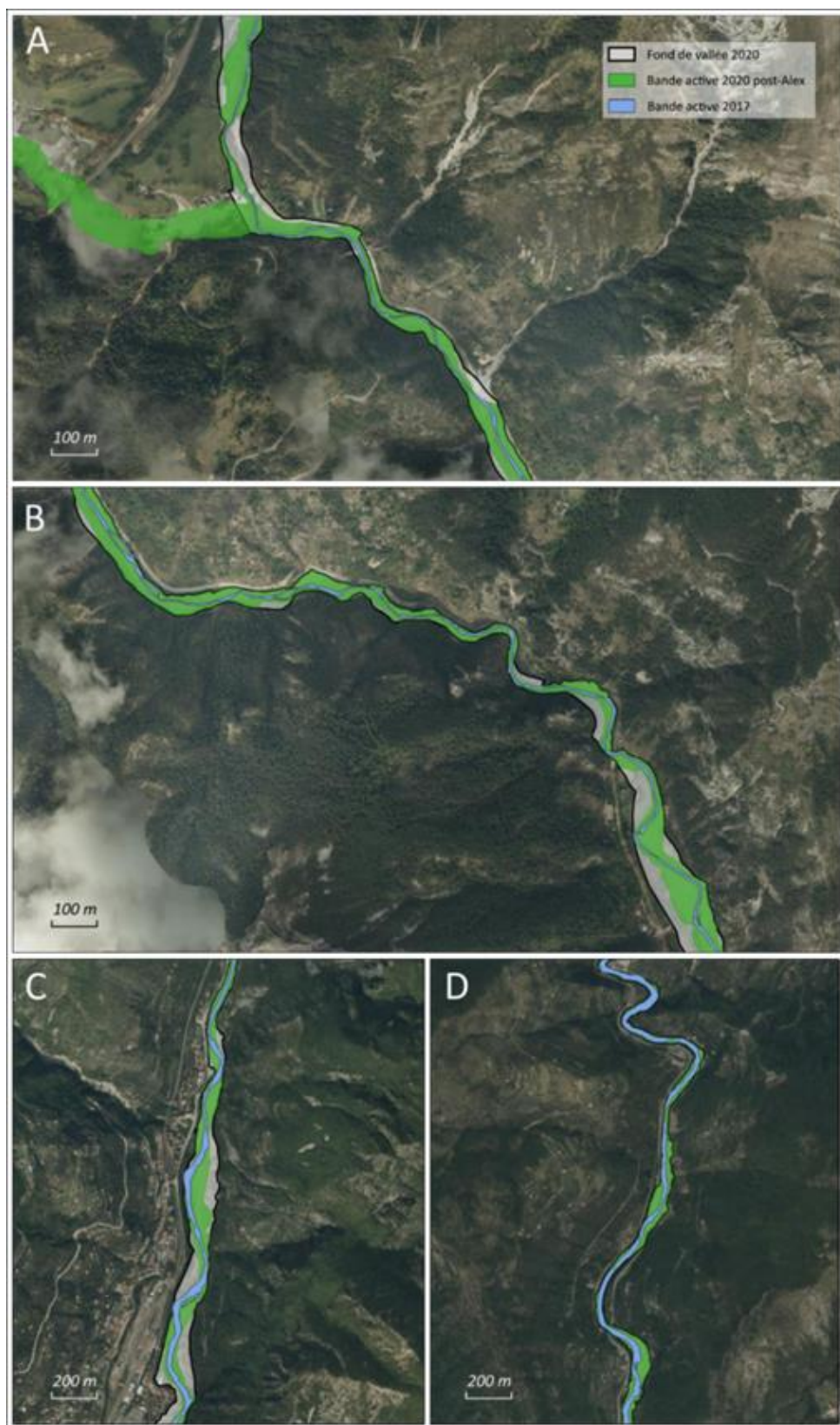


Figure 71 : Emprise des bandes actives de la Roya en 2017 (en bleu) et en 2020 post-Alex (en vert). Dans les secteurs plus larges comme sur le secteur de la Madone de Viévol (A) ou en amont de Tende (B) la Roya a occupé une grande partie du fond de vallée moderne. Sur son cours médian et aval, plus fréquemment contraint par les secteurs en gorges, la Roya a également occupé une grande partie du fond de vallée à la faveur des rares élargissements comme en amont de Breil (C) ou en amont du hameau de Libre (D).

L'extraction des largeurs de bande active réalisée selon un pas régulier de 100 m permet de visualiser l'évolution de cet indicateur sur la période 1948-2020 (Figure 72). Les valeurs de référence sont également présentées pour l'ensemble du linéaire de la Roya (Tableau 25). L'analyse montre que les valeurs moyennes de largeur de la Roya entre 1948 et 2017 sont restées globalement stables autour de 16-18 m. Les valeurs de largeurs maximales sur la même période montrent une très légère décroissance de 98 à 91 m. Ces valeurs ne sont cependant pas représentatives du fonctionnement hydromorphologique naturel de la Roya puisqu'elles ne concernent que l'emprise de la retenue de Breil-sur-Roya. Si ces valeurs sont exclues les largeurs maximales observées sont nettement inférieures et comprises entre 35 et 49 m.

Suite à la tempête Alex, la largeur active moyenne est passée de 16 m en 2017 à 38 m en 2020 post-Alex, ce qui donne un ratio d'expansion moyen de 2,4, semblable à celui obtenu à partir des surfaces actives (2,3). Les valeurs de largeurs maximales ont été multipliées par 2,6, passant de 42 à 110 m. L'évolution des valeurs de largeurs minimales (facteur 7,5) suite à la crue témoignent de l'importance prise par le lit et de l'intensité des processus hydromorphologiques dès l'amont du bassin-versant.

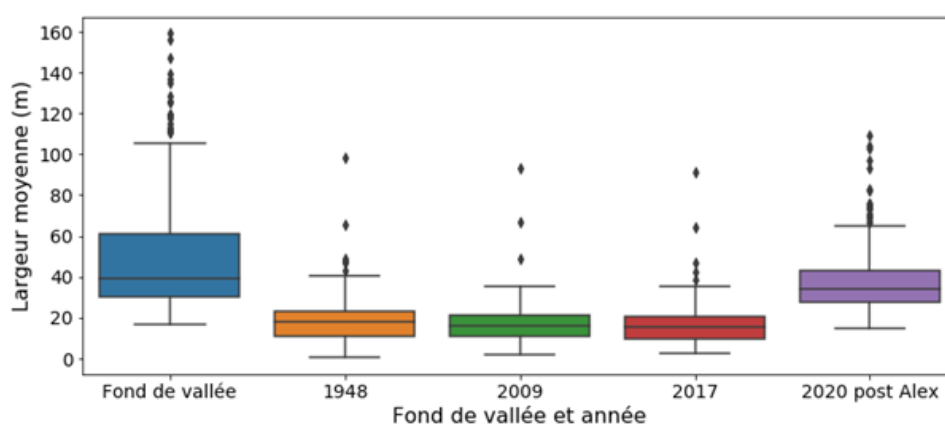


Figure 72 : Évolution de la largeur de la bande active de la Roya entre 1948 et 2020
Les valeurs de largeur du fond de vallée sont également indiquées.

VALEUR	Largeur de fond de vallée (FDV) et de bande active pour différentes années analysées (m)				
	FDV	1948	2009	2017	2020
MAX.	159	49 (98*)	35 (93*)	42 (91*)	110
MIN.	16	4	2	2	15
MOYENNE	49	18	16	16	38
MEDIANE	39	18	16	16	34

Tableau 25 : Valeurs de référence en mètres (max., min., moyenne, médiane) issues de l'évaluation des largeurs du fond de vallée (FDV) et des bandes actives de la Roya en 1948, 2009, 2017 et 2020. *En 1948, 2009 et 2017, les valeurs de largeurs maximales sont artificiellement augmentées au niveau de la retenue du barrage de Breil-sur-Roya (PK 27.45 à 27.65). On indique ces valeurs maximales dans l'emprise de l'ouvrage entre parenthèse. Les faibles valeurs de largeurs minimales pour 1948, 2009 et 2017 (respectivement 4, 2 et 2 m) peuvent être liées aux difficultés de photo-interprétation inhérentes au boisement important des marges du lit.

5.2.3.2 Analyse des gradients amont-aval

L'analyse longitudinale des effets morphologiques de la tempête Alex montre une **expansion de bande active qui touche la quasi-totalité du linéaire étudié** (Figure 73). Les rares secteurs qui conservent une largeur comparable dans le temps correspondent systématiquement aux secteurs de gorges particulièrement resserrés au sein des gorges de Berghe et de Saorge (Figure 73 - ①). Ceci confirme que **la reconquête de bande active est fortement contrôlée par l'espace disponible** et par les contraintes structurales exercées par les versants.

En dehors des secteurs de gorges, on observe d'une manière générale une grande variabilité de la largeur du fond de vallée, qui oscille entre des secteurs larges (supérieurs à 80 m) et plus étroits (Figure 73 - ②). Dans les secteurs plus larges, la bande active a donc reconquis une grande partie - voire la totalité - de l'espace disponible (fond de vallée). Ces secteurs plus larges - et plus plats - sont historiquement des lieux propices aux implantations anthropiques. Localement, on met d'ailleurs en évidence l'influence des infrastructures récentes au niveau des zones urbaines (Tende, Saint-Dalmas de Tende, Breil-sur-Roya), qui ont limité, dans une certaine mesure, l'expansion de la bande active (Figure 73 - ③). Les rares élargissements au sein des gorges ont très souvent fait l'objet d'une reconquête totale du fond de vallée par la bande active – voire d'une expansion du fond de vallée – lors de la crue (Figure 73 - ④).

L'évolution longitudinale du ratio d'expansion de la bande active peut être calculée en faisant le rapport W_{2020}/W_{2017} , avec W_{2020} la largeur de bande active post-Alex et W_{2017} la largeur de la bande active en 2017 (Figure 74). Cet indice permet d'identifier les secteurs où l'effet morphologique de la crue en plan a été le plus important. Nous observons une décroissance significative du ratio vers l'aval traduisant un effet morphologique majeur dans les parties hautes du bassin versant puis une réduction de l'intensité des processus hydrogéomorphologiques vers l'aval. Ceci traduit directement l'influence des secteurs en gorges, très prégnants dans les parties médiane et aval du bassin de la Roya. D'un point de vue géomorphologique, ces secteurs contraints n'ont pas permis la mise en place d'une plaine ou de terrasses alluviales holocènes (après les dernières glaciations). Dépourvus en sédiments, ils limitent toujours fortement les possibilités de divagation et de recharge sédimentaire par érosion latérale. Or, on a vu précédemment que la remobilisation des matériaux constitutifs de marges alluviales du lit et des terrasses récentes constituait un vecteur essentiel de la reconquête de la bande active lors des crues. **Le gradient du ratio d'expansion de la bande active permet donc de caractériser un épuisement vers l'aval de la vague sédimentaire induite par la crue d'octobre 2020.**

L'analyse comparative de l'évolution 2D des surfaces et des largeurs actives sur la période 1948-2020 suggère donc que la crue d'octobre 2020 a entraîné des évolutions géomorphologiques sans précédents sur l'ensemble de la vallée de la Roya au cours des 70 dernières années. On note dans le détail une dichotomie entre les secteurs non contraints de la vallée, où ces évolutions ont été particulièrement manifestes, et les secteurs en gorges, qui sont naturellement caractérisés par une capacité d'ajustement extrêmement réduite.

Concernant le style fluvial de la Roya, l'analyse visuelle ne permet pas de mettre en évidence la mise en place systématique d'un tressage du fleuve. Si cette morphologie en tresses s'observe encore assez régulièrement jusqu'à Tende (PK7) où le fond de vallée est suffisamment large et les capacités de recharge conséquentes, elle tend à disparaître plus en aval, où elle n'est plus observée que très ponctuellement, à la faveur d'élargissements de vallée (*i.e.* confluence du torrent de Cairos, Breil-sur-Roya ou à l'aval du torrent de la Bieugne à Saint-Dalmas de Tende). Les secteurs de gorges, qui prédominent sur le linéaire français de la Roya limitent drastiquement les possibilités de divagation de la rivière et les processus de recharge par remobilisation latérale. Les infrastructures de type ponts ou barrages, comme à Tende, ont également contribué – par contraction latérale ou modification de la pente du lit – à diminuer ou intercepter localement une partie de la charge sédimentaire en transit vers l'aval. Ceci concourt à la réduction nette des apports sédimentaires vers l'aval, et empêche *in fine* une recharge sédimentaire suffisante au maintien de cette morphologie en tresses lorsqu'on progresse vers l'aval. Les tronçons plus larges situés en Italie retrouvent par contre un lit plus divaguant.

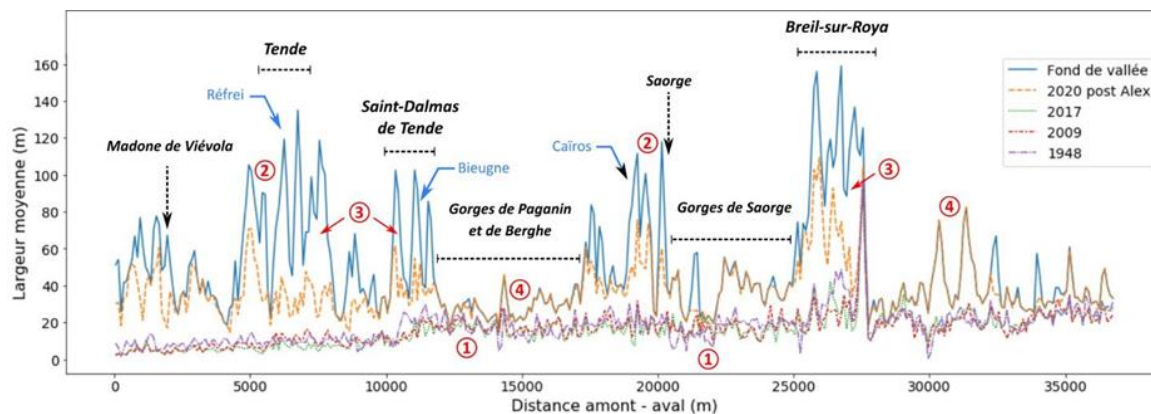


Figure 73 : Gradient longitudinal de l'emprise des bandes actives de la Roya en 1948, 2009, 2017, 2020 post-Alex par rapport au fond de vallée. Les principaux affluents sont indiqués en bleu. Les numéros en rouge renvoient au texte.

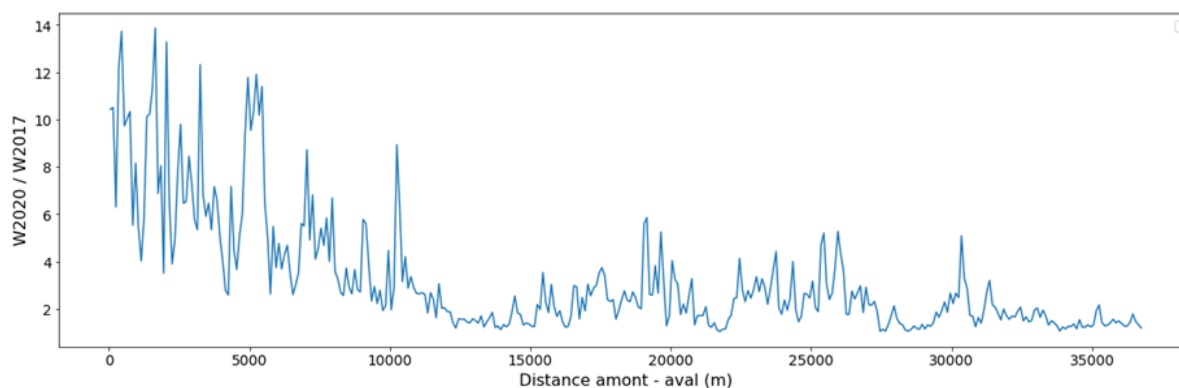


Figure 74 : Gradient longitudinal du ratio d'expansion de la crue (W_{2020}/W_{2017})

5.2.3.3 Atlas cartographique

Une comparaison diachronique de photographies aériennes ante et post crue a été réalisée sur l'ensemble du linéaire de la Roya. Les cartes sont disponibles dans l'atlas cartographique en [Annexe 15](#) du présent rapport. Sur chaque planche, sont reportées la bande active avant crue et la bande active post crue.

L'ensemble des cartes montrent des évolutions spectaculaires de la bande active. Les secteurs où les évolutions sont les plus fortes sont les linéaires de la Roya où le fond de vallée s'élargit et où la pente longitudinale diminue. Elles correspondent aux secteurs urbanisés.

5.3 ANALYSE GENERALE DES PROFILS EN LONG

5.3.1 Méthodologie

5.3.2 Méthodologie d'analyse des profils en long

Les premières analyses seront consacrées à **l'étude générale des profils en long**. L'objectif principal est ici de discriminer les tronçons à fonctionnement alluvionnaire, où la pente est représentative d'un équilibre avec l'hydraulique et la fourniture sédimentaire, des tronçons non alluvionnaires, prenant généralement la configuration de lits à blocs ou rocheux, où la pente ne traduit pas un équilibre avec la fourniture sédimentaire et où la capacité de transport solide est supérieure aux apports solides effectifs. On peut également trouver dans certains cours d'eau, des tronçons avec un excès de fourniture sédimentaire et une tendance systématique au dépôt, mais ces configurations restent rares.

La caractérisation de ces zones permettra à la fois de mieux appréhender les évolutions survenues au cours de la crue, mais aussi d'anticiper les évolutions à venir. Ce travail sera mené en étudiant l'allure générale du profil (profil parfaitement concave ou présence « d'anomalies » dans la forme), l'évolution des pentes longitudinales, en lien avec la carte d'ombrage du Lidar et les observations de terrain.

L'analyse de la forme des profils en long des cours d'eau est riche d'enseignement pour l'identification de tronçons de dynamiques hydro-sédimentaires différentes (zones alluvionnaires, excès ou insuffisance de la fourniture sédimentaire vis-à-vis de la capacité de transport solide). Un profil en long de cours d'eau en terrains facilement affouillables présente une forme régulière concave. Une rupture dans la concavité du profil constitue une anomalie qui doit être expliquée. Elle peut avoir des origines diverses : affleurement du substratum, glissement de terrain, rehausse du profil par un cône torrentiel... Chaque convexité présente sur le profil en long est caractérisée par deux zones (cf. figure suivante) : à l'aval une zone de transit sédimentaire et à l'amont une zone à fonctionnement alluvionnaire. Ces deux zones à dynamique distincte sont séparées par un point de contrôle, correspondant à la limite amont d'un tronçon inaffouillable et dont l'altitude peut être considérée comme invariante sur le temps long.

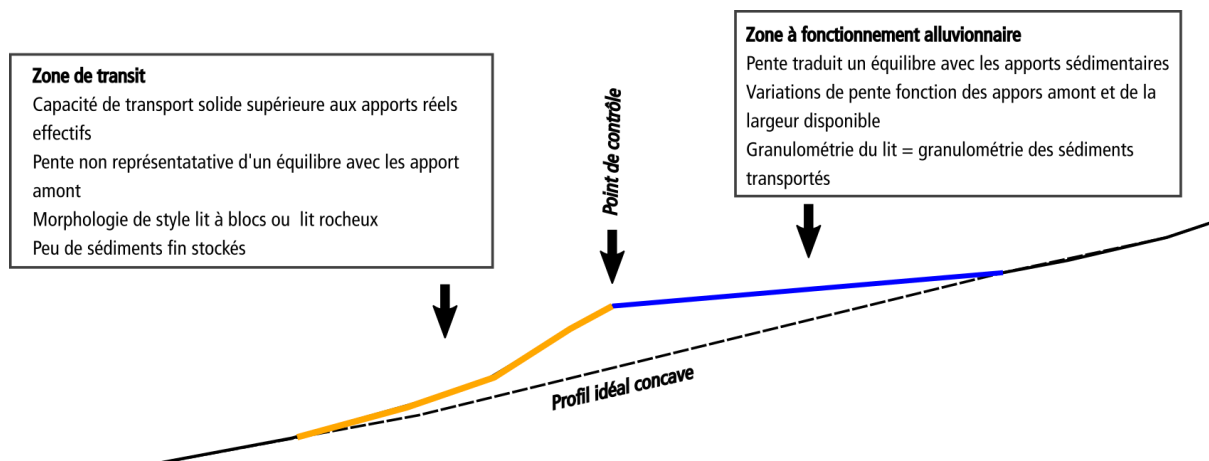


Figure 75 : Zones de transit et alluvionnaire présentes en cas de présence de convexités dans le profil en long d'un cours d'eau

Les zones de transit correspondent à des lits où la capacité de transport solide est supérieure aux apports effectifs. Le style fluvial prend souvent la forme de lits à blocs ou de lits rocheux. Les affleurements de substratum ou le pavage du lit par de très gros blocs bloquent l'ajustement de la pente qui sans ces « freins » diminuerait jusqu'à atteindre une valeur représentative d'un équilibre avec la fourniture sédimentaire. Ce facteur explique pourquoi au cours de la plupart des crues, ces tronçons ne connaissent pas d'évolution significative de l'altimétrie du fond de lit.

Dans les zones alluvionnaires, le trait caractéristique est l'ajustement permanent de la pente aux variations de fourniture sédimentaire. La dynamique temporelle de variation de la pente longitudinale est corrélée au stock alluvial disponible. Celui-ci est fortement lié à la largeur active du cours d'eau. Si le stock est grand devant les fluctuations des apports amont, le débit solide transitant dans le tronçon sera globalement régulé avec des variations de pente faibles. Dans le cas contraire, les respirations du lit seront conséquentes et s'ajusteront rapidement aux fluctuations d'apports solides.

La largeur disponible pour le cours d'eau dans ces zones à fonctionnement alluvionnaire varie au cours du temps. Après des crues exceptionnelles comme celles observées le 2 octobre 2020, si les apports amont se tarissent, ces zones connaissent une rétraction de la largeur active de leur lit. Dans le même temps, la pente longitudinale baisse provoquant donc une incision des lits. L'incision se trouve alors limitée par le pavage du lit par les plus gros blocs. Cette dynamique est selon toute vraisemblance celle qui a prévalu depuis la fin du XIX^{ème} siècle, à l'instar de très nombreux cours d'eau des Alpes du Sud, aussi bien dans la vallée de la Roya que de la Vésubie. Bien que le fond de vallée puisse être localement très large, ces tronçons qui ont subi une rétraction de leur largeur active et une incision sont extrêmement sensibles à des apports massifs sédimentaires, la largeur disponible réduite ne permettant plus de réguler l'excès de charge sédimentaire.

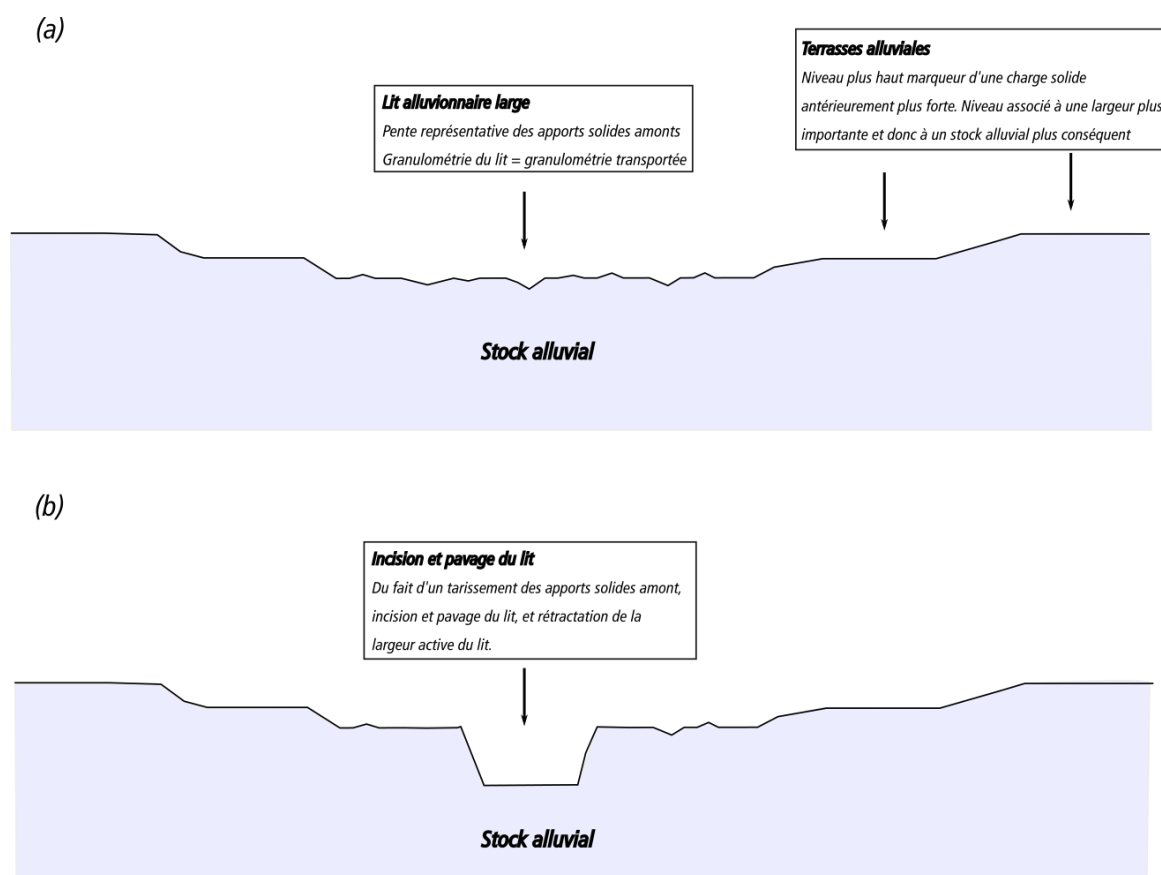


Figure 76 : Illustration de la dynamique de rétraction de largeur active de lit et d'incision en cas de tarissement des apports solides amont

L'évolution de la pente longitudinale le long du profil en long, si elle est analysée sur des tronçons à dynamique alluvionnaire, constitue une mesure indirecte des flux sédimentaires. La décroissance régulière de la pente est le marqueur d'une plus grande efficacité de transport, et donc d'une augmentation relative plus rapide vers l'aval des débits liquides que des débits solides. La baisse ou l'augmentation de la pente au droit de zones de confluences fournit une indication des apports relatifs liquides et solides du confluent par rapport à ceux de la rivière étudiée.

5.3.3 Méthodologie de réalisation des profils en long

Les profils en long présentés dans le rapport ont été réalisés avec la méthodologie suivante :

- Digitalisation manuelle du fil d'eau post-crue Alex en utilisant plusieurs sources d'informations disponibles : orthophotographie post-crue (IGN, 05/10/2020), ombrage du levé LiDAR post-crue (IGN, 05/10/2020), courbes de niveaux générées à parti du MNT LiDAR ;
- Ajout d'information d'altitude aux polygones de fil d'eau par drapage automatique des altitudes sur le MNT LiDAR ;
- Digitalisation d'un axe de projection correspondant à l'axe d'écoulement en crue. Cet axe, nettement moins sinueux que celui du fil d'eau, suit dans les tronçons où la rivière n'est pas contrainte latéralement l'axe du fond de vallée. La prise en compte d'un axe de projection correspondant à la direction des écoulements en crue est nécessaire pour une bonne interprétation des pentes dans les tronçons alluvionnaires et dans le cadre de comparaisons diachroniques de profils en long (cf. § 5.5). On notera que l'axe pris en compte pour les profils en long est différent de celui généré pour l'analyse diachronique des bandes actives présentée précédemment ;
- Repérage sur l'axe de projection des annotations à reporter sur le profil en long : ouvrages de franchissement, confluences, points d'intérêt ponctuels... ;
- Projection du fil d'eau post-crue sur l'axe de projection et export en format texte avec informations tabulées d'abscisse et d'altitude. On notera que seuls les sommets des polygones sont projetés et exportés ;
- Simplification automatisée des profils en long avec algorithme de Visvalingam et Whyatt (1993) complétée par une simplification interactive au moyen du logiciel Pylong créé par les services ONF-RTM. Cette étape est nécessaire pour le calcul de pentes sur des tronçons homogènes. Les profils ainsi générés portent sur les graphiques la mention de « profil simplifié » ;
- Calcul de la pente longitudinale sur la série de profil simplifié.

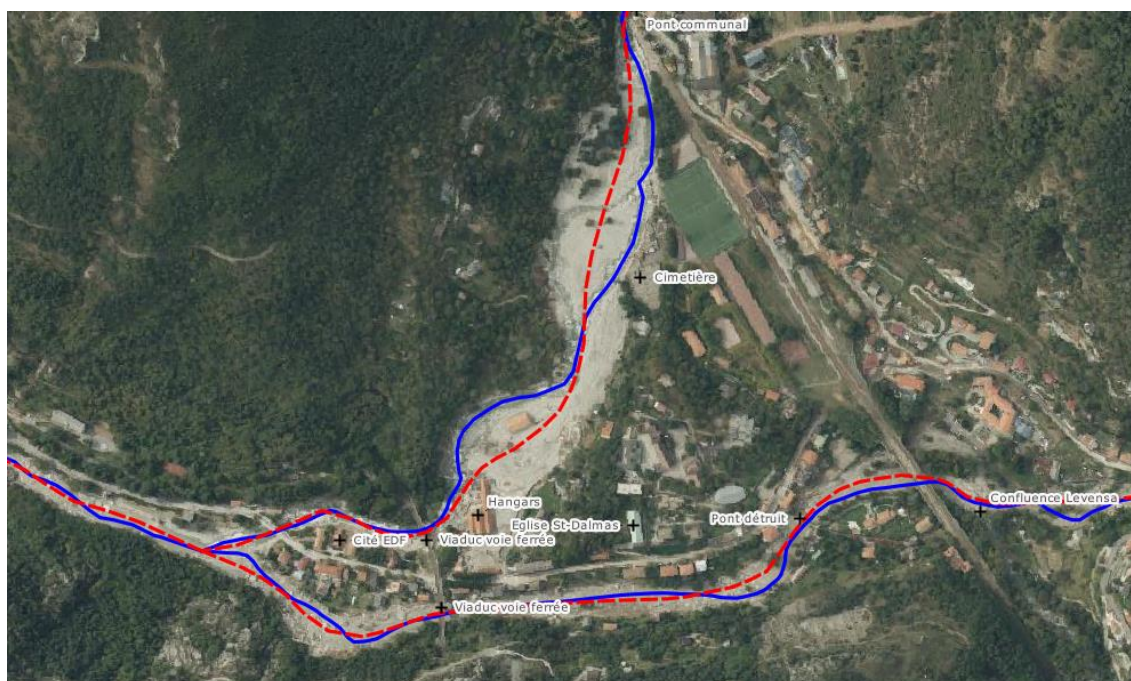


Figure 77 : Illustration de la digitalisation du fil d'eau (bleu) et de l'axe de projection retenu à St-Dalmas de Tende

5.3.4 Analyse du profil en long général de la Roya

Le profil en long général de la Roya extrait du levé Lidar 2020 et projeté selon un axe est présenté en Figure 79. Son analyse révèle une allure générale perturbée par la présence de plusieurs convexités avec une succession de zones de transit sédimentaire - à capacité de transport solide supérieure aux apports effectifs - et de zones à fonctionnement alluvionnaire. Ce constat couplé à l'analyse de l'évolution de la pente longitudinale le long du profil conduit au découpage suivant, de l'aval vers l'amont :

Tronçon T1 (alt. 100 à 192 m). Il s'agit d'un tronçon exclusivement en gorges. La pente longitudinale est comprise entre 0,9 et 1,3 %. Ces valeurs de pente sont cohérentes avec les valeurs de pente des zones alluvionnaires identifiées dans les tronçons supérieurs. La pente longitudinale observée dans ce tronçon est donc vraisemblablement représentative d'un équilibre avec les apports sédimentaires.

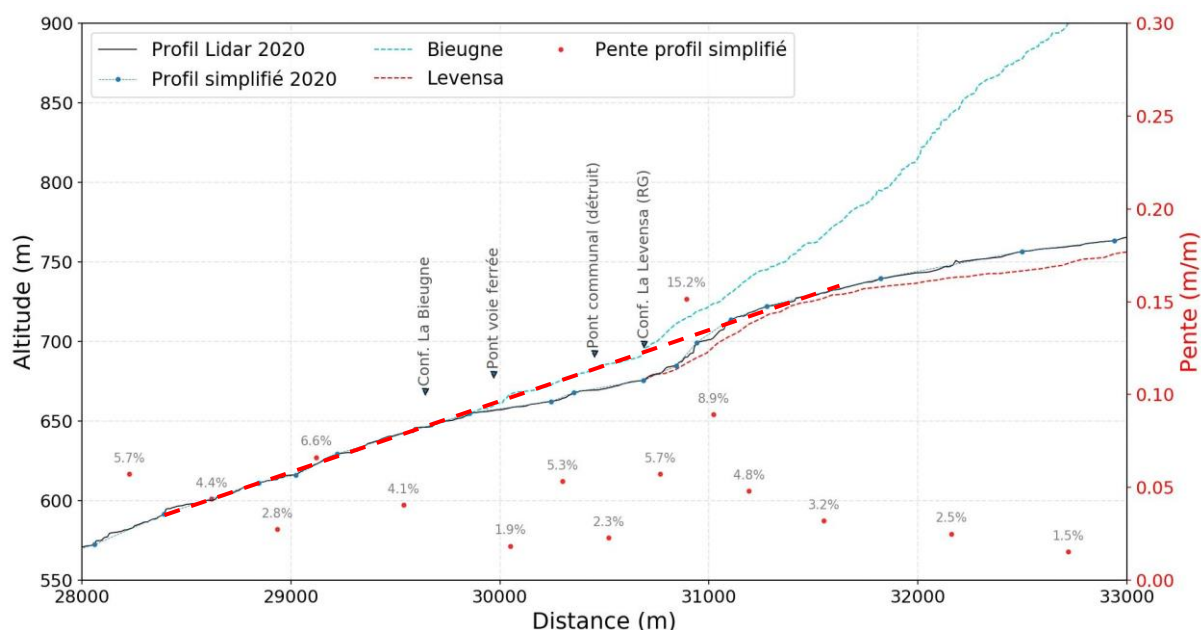
Tronçon T2 (alt. 192 à 273 m). La Roya s'écoule encore ici dans des gorges profondes. Mais la pente longitudinale se raidit, fluctuant entre 1,1 et 1,9 % et générant une première convexité dans la forme du profil en long. L'augmentation de la pente trouve s'explique par des affleurements résistants du substratum. La surélévation du profil par rapport au profil « idéal concave » suggère que la capacité de transport est dans la partie aval du tronçon supérieure aux apports solides réels effectifs.

Tronçon T3 (alt. 273 à 337 m). Ce tronçon s'étend du barrage EDF de Breil-sur-Roya jusqu'à l'aval des gorges de Saorge. On retrouve ici une zone à fonctionnement alluvionnaire dont l'existence est directement liée à la convexité observée sur le profil en long. La pente dans la traversée de Breil-sur-Roya jusqu'en amont du confluent avec la Maglia est de l'ordre de 1,0 %, soit une valeur du même ordre de grandeur que celle observée dans le tronçon T1. La baisse de la pente longitudinale va de concert avec un élargissement du fond de vallée. Les profils en travers tracés dans la traversée de Breil-sur-Roya montrent la présence de terrasses alluviales aujourd'hui perchées en rive droite du cours d'eau et correspondant à un niveau de remplissage par des alluvions hérité d'une période d'érosion et de torrentialité beaucoup plus active. Entre la station-service et l'entrée des gorges, il existe une zone de raccordement, de pente plus forte de l'ordre de 1,3 %, où la vallée se rétrécit et où les terrasses anciennes perchées ne sont plus visibles. Dans cette zone, on peut considérer que la capacité de transport solide est légèrement supérieure aux apports effectifs.

Tronçon T4 (alt. 337 à 420 m). Ce tronçon couvre les gorges de Saorge et la traversée de Fontan. On observe ici une convexité sur le profil en long avec une zone de transit correspondant aux gorges de Saorge et une zone à fonctionnement alluvionnaire dans la traversée de Fontan. Le point de contrôle est situé en amont immédiat de la confluence avec le torrent du Cairos. Dans les gorges et jusqu'en amont de la confluence avec le Cairos, la pente fluctue entre 1,9 et 2,1 %. Les gorges sont ici extrêmement escarpées avec un tracé en plan sinueux illustrant la présence de mouvement de versants anciens ou de points durs que la Roya contourne. Dans la traversée de Fontan, la pente diminue et atteint 1,3 %. Comme souligné précédemment, la vallée s'élargit ici très localement et dans la traversée de Fontan, le lit de la Roya conserve un lit peu large.

Tronçon T5 (alt. 420 à 685 m). Il s'étend de l'amont de la traversée urbaine de Fontan jusqu'au confluent avec la Levensa à St-Dalmas de Tende. On retrouve une configuration identique au tronçon précédent avec une convexité sur le profil long dont la limite supérieure correspond à la confluence avec le torrent de la Bieugne. A l'aval de ce confluent, le lit prend la forme de gorges avec une pente longitudinale comprise entre 2,1 et 3,6 % puis se raidissant jusqu'à atteindre 5,1 %. Entre la confluence avec la Bieugne et la confluence avec la Levensa, la pente est de l'ordre de 3,0 %. Ces valeurs de pente sont vraisemblablement supérieures à la pente d'équilibre. La pente moyenne dans la traversée de Saint-Dalmas est en effet très influencée par la présence de nombreux blocs plurimétriques qui structurent le lit. Localement, entre deux ressauts formés par ces blocs, on peut retrouver des valeurs de pente plus faibles de l'ordre 2,0 % (cf. analyse du profil en long détaillée). L'analyse de la carte d'ombrage du Lidar et de la carte géologique, montrent l'existence d'imposantes formes de dépôts quaternaires en rive droite de la Roya entre l'actuelle confluence avec la Bieugne et la Levensa. D'après Julian (1997), il s'agit en fait d'un vallum morainique lié à l'imposant glacier qui occupait la vallée des Merveilles et la Val de Casterino au Würm. Ces dépôts sont perchés 27 m au-dessus du niveau actuel du lit de la Roya. Le lit de la Roya semble depuis cette dernière période glaciaire les avoir réincisés. Le tracé des profils de la Roya, de la Bieugne et de la Levensa semble confirmer cette interprétation. Le profil de la Levensa (cf. figure suivante) montre en amont du confluent un profil similaire à celui de la Roya avec : une zone de raccordement à pente raide suivie par un profil régulier de pente de l'ordre 1,5 %, soit le même ordre de grandeur que la pente de la Roya dans la traversée de Tende.

On constate une continuité entre le profil aval de la Roya, celui de la Bieugne sur son cône, et celui de la Levensa et de la Roya en amont.



En rouge pointillé : la continuité entre le profil aval de la Roya, celui de la Bieugne sur son cône de déjection et celui de la Roya et de la Levensa

Figure 78 : Interprétation géomorphologique de l'ajustement du profil de la Roya dans la traversée de Saint-Dalmas de Tende

Tronçon T6 (alt. 685 à 790 m). Ce tronçon s'étend de l'amont de la confluence avec la Levensa jusqu'à la confluence avec le Refreï dans la traversée de Tende. Comme sur les deux tronçons aval, on retrouve encore une convexité sur le profil en long. L'analyse géomorphologique du tronçon T5 suggère que la convexité visible sur le profil en amont de la confluence avec la Levensa est le fruit combiné de l'activité glaciaire pendant la période du Würm suivi d'un réajustement du profil de la Roya depuis le recul glaciaire, et du resserrement de la vallée entre le pont des 14 arches et l'ancienne carrière où un chevauchement géologique ferme la vallée entre Loubaira et la Tête de Tinti. En amont de ce verrou, le profil devient alluvionnaire en amont du pont des 14 Arches avec une pente de l'ordre de 1,5 % jusqu'à la confluence avec le Refreï. Comme dans les zones alluvionnaires présentées dans les tronçons aval, la diminution de pente s'accompagne d'un élargissement de la vallée. Celui-ci n'est toutefois pas continu avec la présence d'un resserrement important face à la confluence avec le vallon du Riou.

Tronçon T7 (alt. 792 à 934 m). Les limites du tronçon sont à l'aval la confluence avec le Refreï et à l'amont la confluence avec le torrent de Morte (ou torrent du Golf). La pente longitudinale augmente progressivement de l'aval vers l'amont. Elle est de l'ordre de 2,0 % en amont de la confluence avec le Refreï et de 3,8 % au niveau de la confluence avec le torrent de Morte. Ces tronçons à forts gradients de pente sont le signe de formes d'érosions récentes (à l'échelle géologique) avec une capacité de transport (en conditions moyennes) supérieure aux apports solides moyens effectifs.

Tronçon T8 (alt. 934 à 1 242 m). Il s'agit du dernier tronçon avec une limite amont située sous le col de Tende. Comme sur le tronçon précédent, on retrouve une forme concave, typique de cours d'eaux torrentiels en terrains facilement affouillables. La pente longitudinale augmente progressivement, passant de 5,8 % à l'aval à 19,0 % à l'amont. La capacité de transport, en conditions moyennes, est supérieure aux apports solides effectifs.

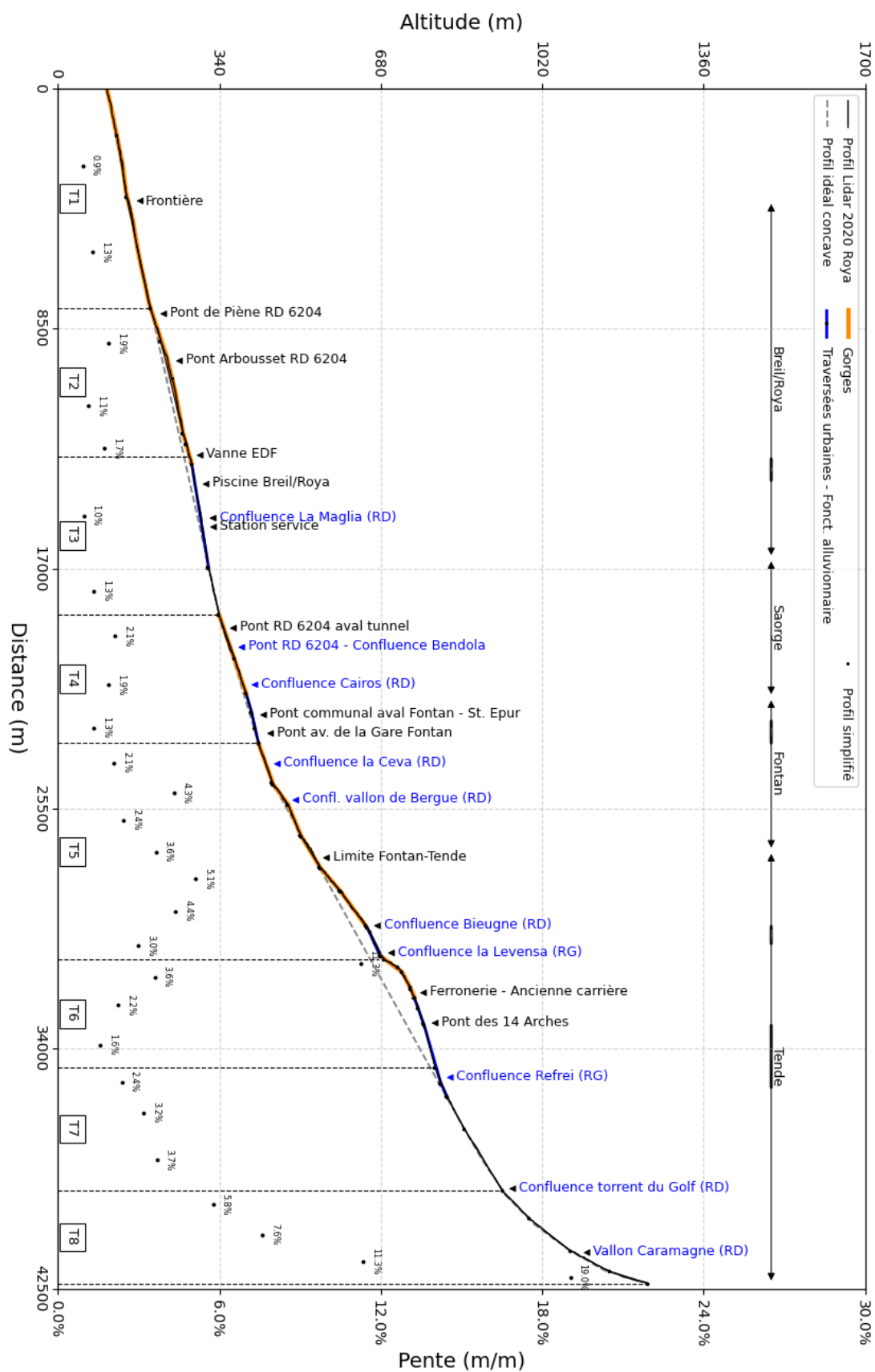


Figure 79 : Profil en long général de la Roya
Les traits noirs gras superposés aux flèches localisant les communes indiquent les traversées urbaines



Figure 80 : Situation des tronçons sur la carte du bassin versant de la Roya

5.3.5 Analyse du profil en long général de la Bieugne

Le profil en long général de la Bieugne extrait du levé Lidar 2020 et projeté selon un axe est présenté sur la Figure 81. Son analyse conduit à un découpage en cinq tronçons homogènes.

Tronçon T1 (alt. 646 à 690 m). Ce tronçon qui s'étend de la confluence avec la Roya jusqu'au pont communal correspond au cône de déjection de la Bieugne. Dans ce secteur, le cours d'eau a réincisé le vallum morainique lié au glacier qui occupait la vallée des Merveilles et la Val de Casterino au Würm. La pente moyenne du lit est de 4,5 % soit la même valeur que sur la Roya à l'aval de la confluence. La pente est par contre nettement inférieure à la pente moyenne du tronçon T2 de 11,8 %. La rupture de pente explique des dépôts potentiels et des divagations d'écoulement lors des crues les plus intenses du cours d'eau.

Tronçon T2 (alt. 690 à 1361 m). Il est situé entre le barrage des Mesches et le cône de déjection. Le barrage est situé au niveau de la confluence des vallons de la Minière et de Casterino. La pente moyenne est de 11,8 % avec des valeurs locales dépassant 30 %. L'augmentation de la pente s'accompagne d'un changement de morphologie. Le lit est étroit, avec des blocs plurimétriques d'origine glaciaire fixant le fond de lit. Les versants sont aussi constitués de matériaux morainiques. Si les crues successives de la Bieugne ont chassé les matériaux fins du fond de lit, le potentiel d'apport sur les versants est quant à lui immense. A noter en facteur aggravant que le barrage EDF bloque pendant les crues la charge sédimentaire favorisant ainsi à l'aval les affouillements de pied de versant.

Tronçon T3 (alt. 1361 à 1500 m). Le profil en long représente à partir de ce tronçon le vallon de Casterino. Le tronçon s'étend jusqu'au barrage du lac de Casterino. Il présente une pente moyenne, en amont du barrage des Mesches, de l'ordre de 10,5 %. La pente est légèrement inférieure à celle du tronçon T2 mais la morphologie est similaire avec la présence de blocs plurimétriques en fond de lit. Ce tronçon constitue une zone de raccordement avec la zone alluvionnaire constituée par le fond du vallon de Casterino en amont du lac éponyme. A la transition entre les deux zones en amont, le substratum est visible et affleurant (500 m en aval du lac de Casterino).

Tronçon T4 (alt. 1500 à 1631 m). Il s'agit d'un tronçon à fonctionnement alluvionnaire avec une pente très faible comprise entre 1,7 % et 3,5 % qui joue une fonction de régulation du transport solide. Entre le lac de Casterino et la confluence avec le ravin de Barchenzane, le fond de vallée s'élargit considérablement et les écoulements peuvent divaguer lors des crues les plus intenses. On note toutefois un resserrement en aval immédiat du hameau de Casterino où plusieurs cônes de déjection successifs restreignent l'espace de divagation. La fonction de régulation limite le transfert vers l'aval de sédiments. Le barrage des Mesches (tronçon T3) bloque l'ensemble du transport solide.

Tronçon T5 (alt. > 1631 m). Le profil présente ici une pente moyenne de 10,0 %. La forme est globalement convexe. Elle est le marqueur d'affleurement réguliers du substratum en fond de lit. On note au sein de ce tronçon une zone de replat à dynamique alluvionnaire dont la pente est du même ordre de grandeur que la pente moyenne du fond de vallon de Casterino dans le tronçon T4.

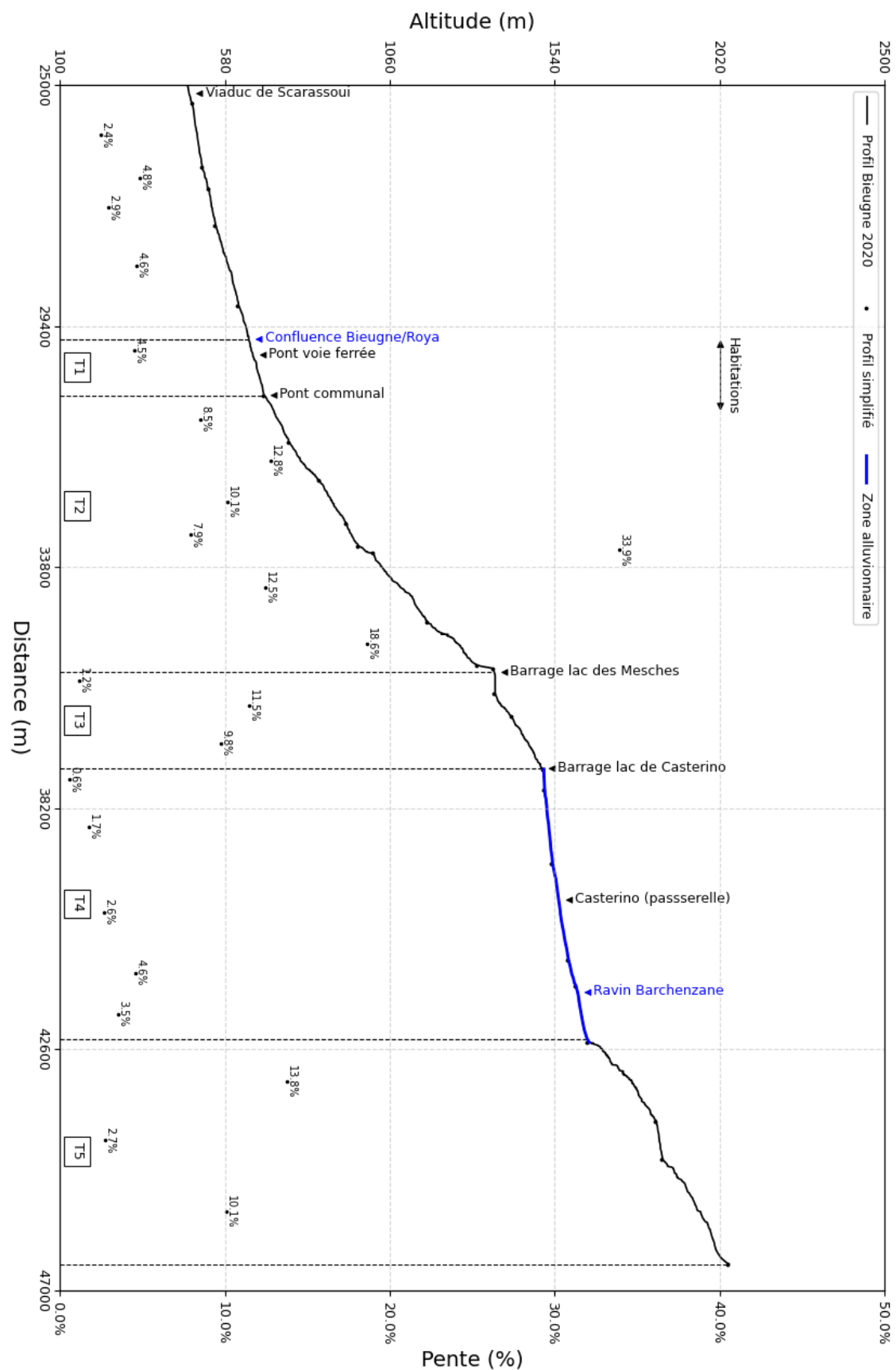


Figure 81 : Profil en long général de la Bieugne

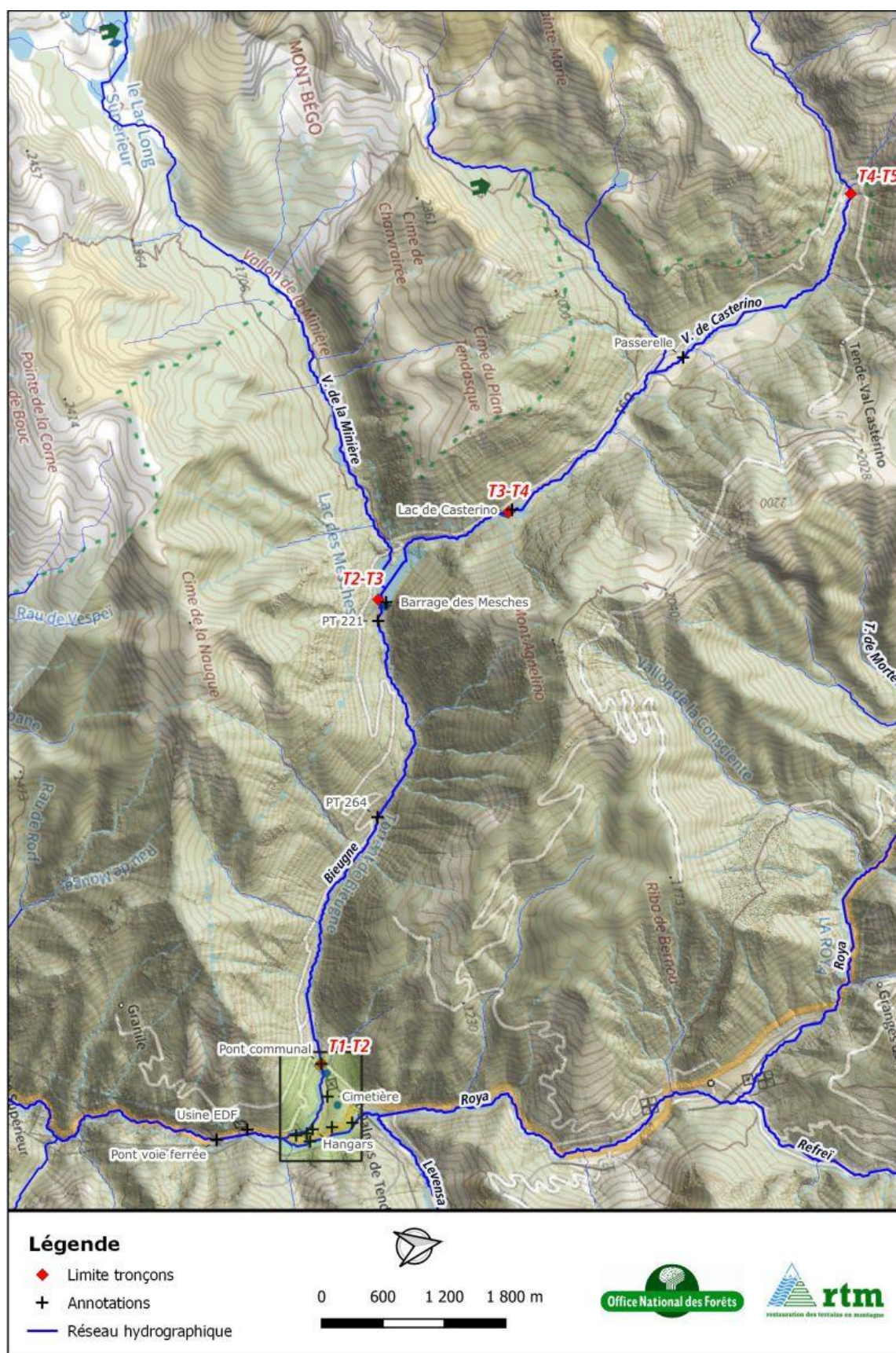


Figure 82 : Vue en plan des lites de tronçons du profil en long de la Bieugne



Figure 83 : Vue de détail de la confluence Bieugne Roya (emprise de l'encadré représenté sur la figure précédente)

5.4 ANALYSE SECTORISEE DES PROFILS EN LONG

Cette partie a pour objectif de réaliser une analyse sectorisée des profils en long superposée avec : (a) une comparaison des profils en long avant et après crue ; (b) une comparaison, de l'évolution de la largeur de la bande active avant et après crue.

Sept secteurs ont fait l'objet de cette analyse détaillée du profil en long : la Roya à Tende, la Roya dans la traversée urbaine de Tende, la Roya à St-Dalmas de Tende, la Bieugne de St-Dalmas au barrage des Mesches, la Roya à Fontan, la Roya dans le secteur de Breil-sur-Roya/Saorge et la Roya dans la traversée urbaine de Breil-sur-Roya. Ces secteurs correspondent aux principales communes de la vallée et reprennent par ailleurs le découpage administratif retenu dans le cadre des ateliers d'appui à la GEMAPI organisés par les services de l'État, lesquels visaient à proposer aux collectivités territoriales maîtres d'ouvrages et aux élus des principes d'aménagement pour les travaux de réaménagement de la vallée.

5.4.1 Méthodologie

5.4.1.1 Données prise en compte

Comparaison des profils en long avant et après crue

Aucun levé LiDAR n'étant disponible sur la Roya avant la crue, le profil en long avant crue correspond au profil issu de la BD TOPO de l'IGN. Le profil en long post-crue est quant à lui extrait du levé Lidar 2020 post-crue réalisé par l'IGN. Le profil BD topo de l'IGN est une couche vectorielle 3D qui encapsule les données d'altitude du cours d'eau. Compte tenu des faibles variations morphologiques observées avant la crue Alex (cf. § 5.2), on considère ce profil représentatif de la topographie ante-crue. Le tracé de cette couche a été projeté sur l'axe de projection avec la même méthodologie que celle mise en œuvre au § 5.1.1.1.

Comparaison de l'évolution de la largeur de bande active

Sur les bassins versants de la Roya et de la Bieugne, les bandes actives ont été digitalisées par l'ONF-RTM sur la base des orthophotographies et de l'ombrage du levé Lidar. Cette délimitation est distincte de celle présentée au paragraphe 5.2, car issue d'un travail antérieur réalisé notamment pour les réflexions d'aménagement menées dans le cadre des ateliers GEMAPI. Les largeurs de bande active ont été obtenues par intersection des limites de bandes actives avec des profils en travers espacés tous les 50 m le long de l'axe de projection défini précédemment (cf. § 5.3.3). À noter que la délimitation de la bande active avant crue en amont de Tende a été un exercice particulièrement difficile compte tenu de l'étroitesse du lit. Dans ce secteur, on se concentrera donc davantage sur les ordres de grandeurs obtenus que sur les valeurs absolues présentées.

5.4.1.2 Discussion concernant la précision altimétrique du levé IGN BD TOPO

Pour que les comparaisons de profil en long aient un sens, il faut s'assurer que les incertitudes sur les altimétries des deux profils soient inférieures à l'ordre de grandeur des évolutions observées.

Alors que l'incertitude sur l'altimétrie d'un levé Lidar est communément de l'ordre de 20 à 30 cm, aucun élément ne permet de caractériser la précision altimétrique du profil IGN BD TOPO 2019. On peut toutefois tenter d'estimer la précision altimétrique du profil IGN BD TOPO sur le bassin de la Vésubie en le comparant au levé Lidar réalisé par la Métropole Nice Côte d'Azur (MNCA) en 2018, avec par conséquent deux profils représentatifs de la topographie du lit avant crue.

Le graphique suivant représente donc la différence d'altitude obtenue le long du profil en long de la Vésubie à partir des profils IGN BD Topo et du Lidar 2018 MNCA. Celle-ci est en moyenne de -0,91 m avec de fortes variations locales (écart type de 1,85 m). En considérant une précision altimétrique d'un levé Lidar de l'ordre de 0,2 à 0,3 m, la propagation de l'incertitude du différentiel topographique donne un seuil de détection de l'ordre de 1,8 m. Ainsi, tout changement altimétrique inférieur ou égal à 1.8 m doit être considéré comme non significatif. Il n'est pas possible de savoir si cet ordre de grandeur est conservé sur le bassin de la Roya. On gardera toutefois

à l'esprit dans les analyses qui suivent cet ordre de grandeur. L'utilisation de la BD TOPO comme référence dans les paragraphes qui suivent nous conduit donc à surestimer selon toute vraisemblance les dépôts.

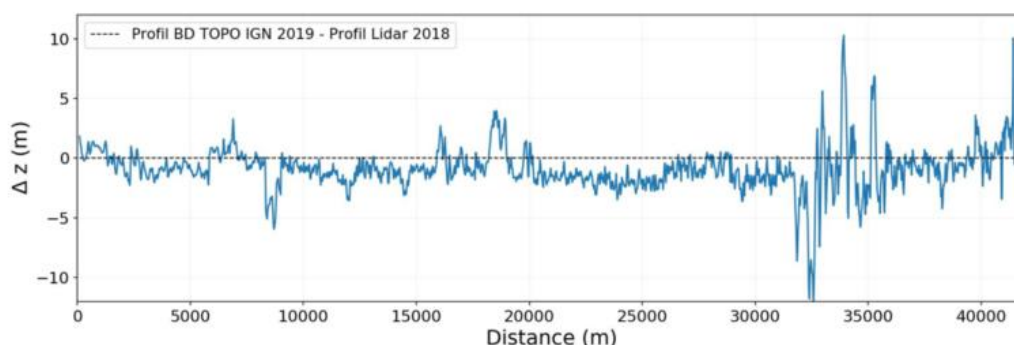


Figure 84 : Différence d'altitude entre le profil Vésubie BD TOPO IGN et le profil Vésubie Lidar 2018 MNCA

5.4.2 Roya – Secteur de Tende – Analyse d'ensemble

Le profil en long de la Roya est présenté sur la figure page suivante. Il s'étend de la confluence avec le vallon de Caramagne jusqu'à la ferronnerie située à l'aval du pont des 14 Arches.

Analyse des pentes

La pente d'un cours d'eau traduit l'énergie disponible pour le transport de sédiments. L'identification des ruptures de pente dans un profil en long permet donc de localiser des lieux privilégiés de dépôt. L'analyse du profil en long révèle la présence de deux ruptures de pente principales :

- La première est située au niveau de la confluence avec le torrent de Morte (ou torrent du Golf). La pente passe brutalement de 5,9 % à 3,5 % ;
- La seconde est située au niveau du secteur pont de la route de la Pia / confluence avec le Refreï. A l'amont du pont de la route de la Pia, la pente de la Roya est très régulière : elle fluctue entre 3,2 et 3,7 % jusqu'à la confluence avec le torrent de Morte. La crue Alex a lissé le profil en long du cours d'eau, masquant toutes les irrégularités présentes avant la crue. En aval du pont de la route de la Pia, dans la traversée de Tende, la pente de la Roya décroît rapidement : 2,0 % au niveau du pont des Truites, 1,6 % au niveau de l'EHPAD et 1,2 % au droit du pont des 14 Arches.

On notera que la pente de la Roya à l'aval de la confluence avec le Refreï est le marqueur d'un ajustement de la pente de la Roya suite aux apports liquides et solides du Refreï. La baisse de la pente indique ici que le Refreï, en conditions « moyennes » fournit à la Roya des apports liquides importants (et relativement peu de sédiments). Lors de crues extrêmes comme la crue Alex, les équilibres d'apports respectifs de la Roya et du Refreï en eau et sédiments peuvent être sensiblement modifiés (cf. Figure 87). Ce fut vraisemblablement le cas le 2 octobre 2020 avec une crue très intense sur le bassin amont de la Roya et une crue beaucoup plus modeste dans le bassin du Refreï. Ce scénario de crue couplé à la rupture de pente à l'aval de la confluence avec le Refreï entraîne de manière inévitable des dépôts importants dans la traversée de Tende.

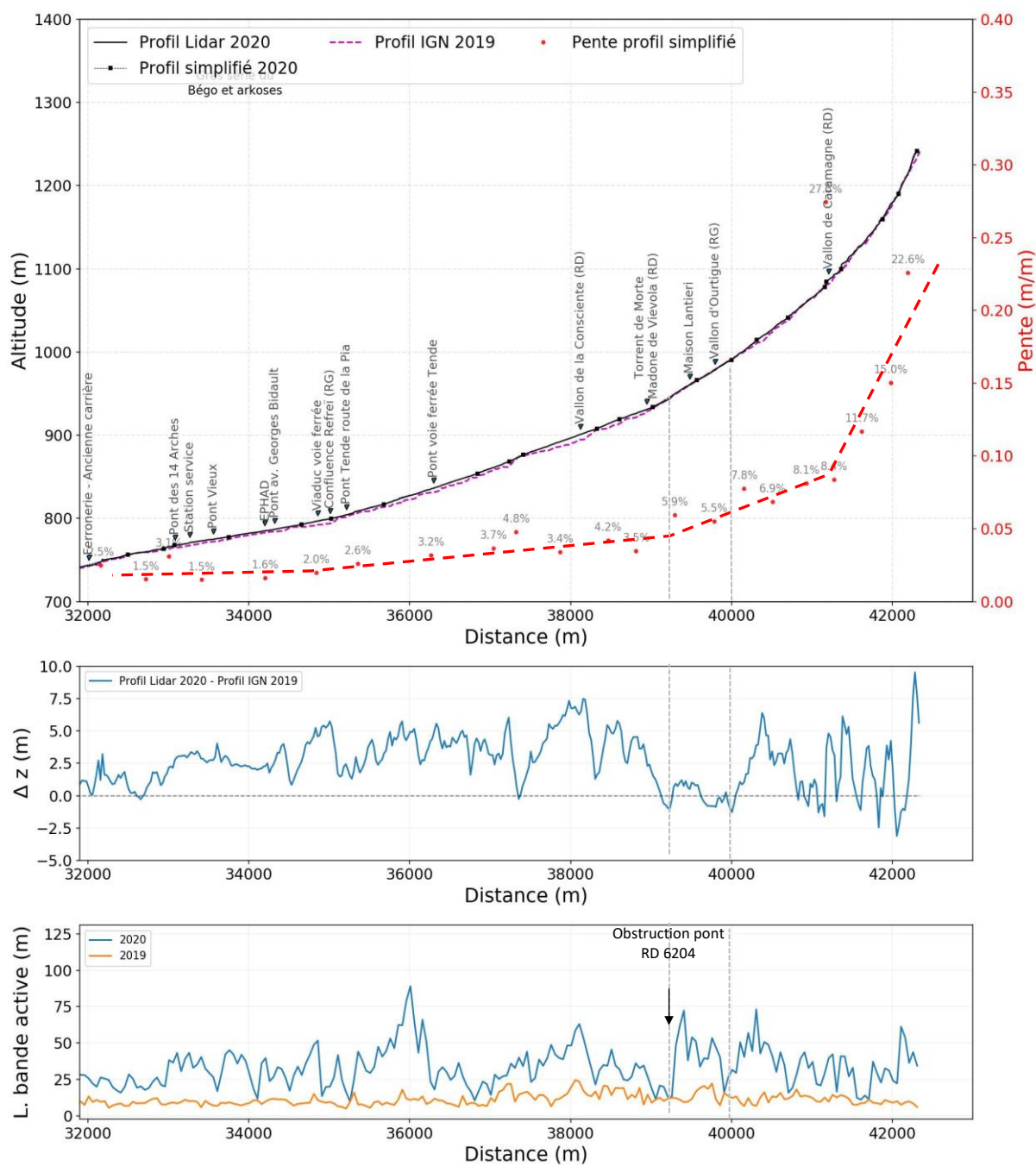
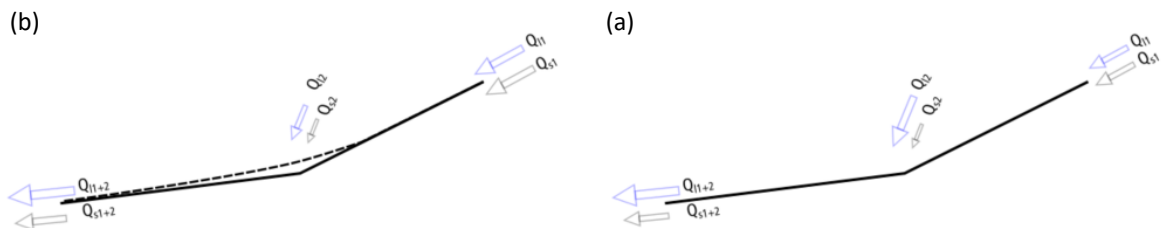


Figure 85 : Profil en long détaillé de la Roya en amont et dans la traversée urbaine de Tende



Figure 86 : Vue en plan sur le linéaire correspondant au profil en long de la figure précédente



- (a) Conditions « moyennes » (à droite sur la figure). Bief amont avec débit liquide moyen Q_{l1} et débit solide moyen Q_{s1} . La pente du bief amont est représentative d'un équilibre entre le débit liquide et le solide moyen. Sous l'effet d'apports liquides et solides d'un affluent dans des proportions différentes, la pente du bief aval s'ajuste. Dans le cas représenté, elle diminue en raison d'un faible apport solide comparativement au débit liquide.
- (b) Situation de crue intense (à gauche sur la figure). Lors de crues intenses, suivant la sollicitation hydrométéorologique dans chaque sous bassin versant, et suivant la charge solide disponible dans chaque cours d'eau, les équilibres respectifs de débits liquides solides peuvent être complètement modifiés. Dans le cas représenté le rapport Q_{s1}/Q_{s2} en crue est supérieur à celui observé en condition moyenne. Il résulte des dépôts à la confluence avec un ajustement de la pente à la hausse (trait pointillé).

Figure 87 : Principe d'ajustement de pente dans une situation de confluence

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison entre les profils ante et post-crue révèle :

- Un engravement exceptionnel du lit, en moyenne de l'ordre de 2-3 m sur l'ensemble du tronçon ;
- Des niveaux de dépôts de sédiments semblant entièrement contrôlés par les ruptures de pente du profil en long. En effet, d'après les graphiques, les dépôts deviennent significatifs en aval de la rupture de pente visible sur le profil au niveau la confluence avec le torrent de Morte. Les hauteurs de stocks de sédiments atteignent jusqu'à 7-8 m au droit de la confluence avec le vallon de la Consciente (RD). Ils sont présents jusqu'en aval du pont des 14 Arches où la pente de la Roya se raidit (passage en gorges entre Tende et St-Dalmas) ;
- Des apports solides conséquents en provenance du torrent de Morte, les niveaux les plus importants intervenant à l'aval de la confluence avec ce torrent. Les observations de niveaux de dépôts atteints sur le cône du torrent de Morte (cf. § 5.4.3) révèlent des niveaux d'apports exceptionnels et confirment donc cette analyse ;
- Des apports liquides et solides vraisemblablement modérés en provenance du Refreï comparativement à ceux en provenance de la Roya, ce qui est d'ailleurs confirmé par les observations de terrain.

La précision des variations altitudinales de fond de lit doit être nuancée en fonction des observations de terrain. En effet, en amont de la confluence avec le torrent de Morte les bouleversements du lit sont également majeurs, avec des niveaux d'engravement qui semblent également plurimétriques (cf. ▲ Photo 18 à ▲ Photo 21). On notera que les évolutions observées sur l'extrémité amont du cours de la Roya sont dues à deux phénomènes successifs : (1) la crue du 02/03 octobre 2020 et (2) un glissement de terrain survenu en fin de décrue entre les 03 et 04 octobre partant de l'amont du vallon de la Ca. Ce glissement de terrain a emporté les ponts routiers d'accès au tunnel de Tende. Plus bas, la coulée de matériaux s'est propagée jusqu'aux sources / résurgences de la Roya comblant le vallon de Canelle sur plus de 5 m de haut, emportant le pont de la vieille route du col de Tende et débordant dans les bassins de décantation du chantier du tunnel. La survenue de ce glissement après la crue n'a pas permis de transporter les matériaux plus bas que les sources de la Roya (résurgence rive droite). En aval de ce point, les dépôts sont faibles jusqu'au pont de Caramagne, la forte pente ayant semble-t-il suffi à faire transiter tous les apports amont.

En amont de la confluence avec le torrent de Morte, plusieurs facteurs concourent à l'engravement et l'élargissement du lit exceptionnels observés :

1 – Apports solides massifs. Il n'est pas possible d'identifier les contributions respectives des apports amonts (ou des vallons affluents) et ceux provenant d'érosions de berges / pied de versant. En effet, contrairement à la

vallée de la Vésubie, on ne dispose pas ici de levé Lidar ante-crue permettant d'effectuer un bilan topographique et une estimation des érosions latérales.

2 – Rupture de pente dans le profil en long en aval du vallon de Caramagne, se caractérisant par une diminution de l'énergie disponible pour le transport de matériaux. Les dépôts peuvent avoir été accentués par les divagations des écoulements et la déstabilisation de pieds de berges/ versants.

3 – Largeur de lit ponctuellement contrainte. Par exemple largeur de lit faible au niveau d'un verrou rocheux situé entre le vallon de Caramagne et le vallon d'Ourtigue, mais aussi au niveau du pont SNCF situé en amont immédiat du vallon d'Ourtigue. La limitation de la largeur du lit peut conduire en contexte torrentiel à des aggrada-tions très importantes du lit. Les observations de terrain suggèrent une remontée des niveaux de l'ordre 3 à 4 m en aval du vallon de Caramagne (3 m au niveau du pont de la voie ferrée en amont du vallon d'Ourtigue).

4 – Obstruction d'ouvrages de franchissement. On peut ici citer l'exemple de l'obstruction du pont de la RD 6204 situé une centaine de mètres en amont de la confluence avec le torrent de Morte (cf. Figure 88). Cet ouvrage, implanté de biais par rapport à l'axe des écoulements, présente une configuration propice à des dysfonctionnements hydrauliques en crue. Au cours de la crue, il a été obstrué par des flottants, bloquant pendant une partie de la crue le transport solide et provoquant à l'amont une remontée spectaculaire des niveaux. Il est vraisemblable que l'obstruction du pont a joué un rôle sur l'augmentation des niveaux jusqu'à la confluence avec le vallon d'Ourtigue. L'obstruction du pont a de plus probablement été favorisée par un engrèvement régressif lié aux apports massifs du torrent de Morte.

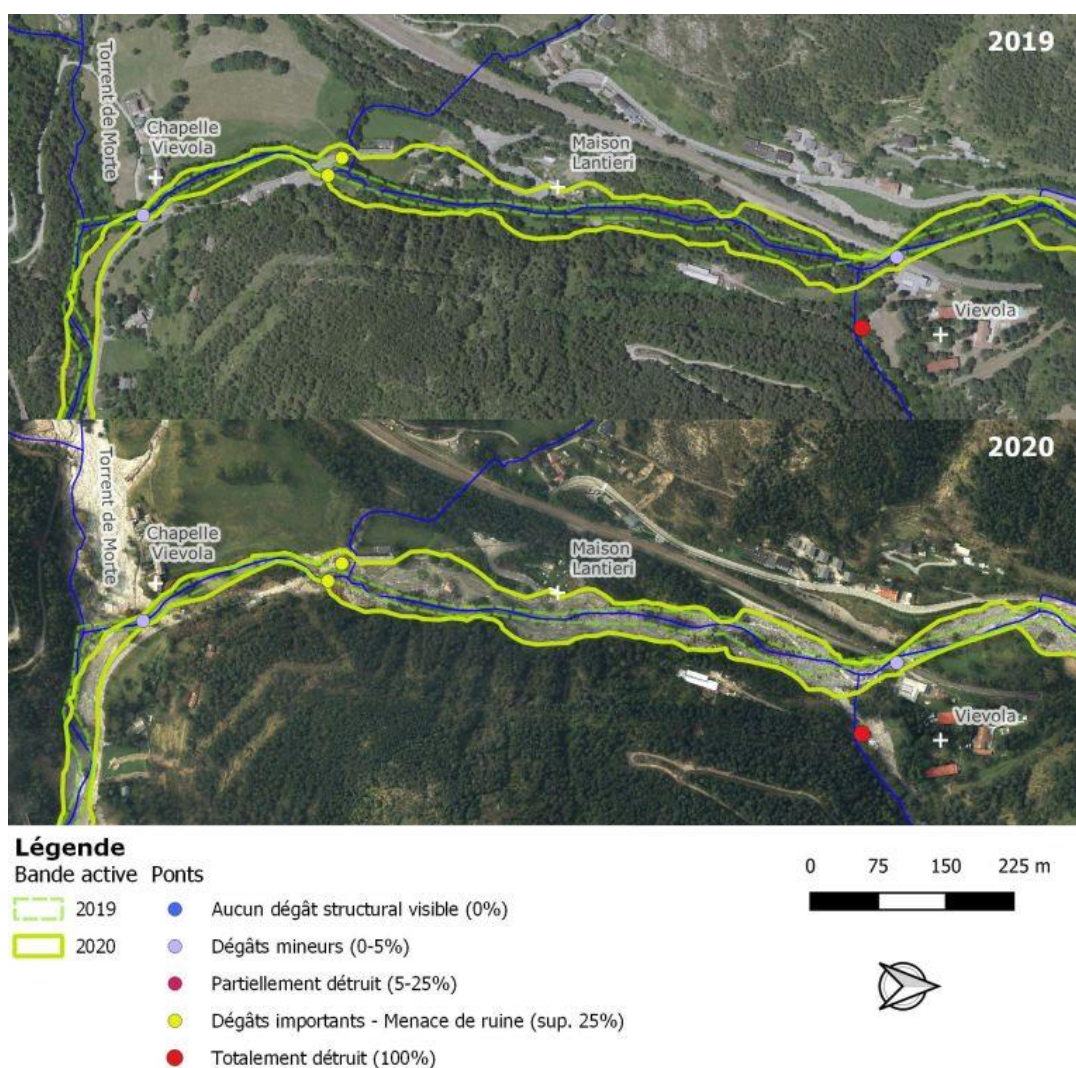


Figure 88 : Evolution de bande active – Secteur allant de la confluence avec le torrent de Morte jusqu'au hameau de Viévola (confluence vallon d'Ourtigue)



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 13 : Glissement survenu en aval du tunnel de Tende (localisation cf. Figure 86 réf. P0 Tende)



▲ Photo 14 : Photo de l'entrée du tunnel de Tende le 18 nov. (RTM) post glissement (Localisation cf. Figure 86 réf. P0 Tende)



▲ Photo 15 : Roya en amont du vallon d'Ourtigue (localisation cf. Figure 86 réf. P1 Tende)



▲ Photo 16 : Pont de la RD 6204 obstrué par les flottants en amont de la confluence avec le torrent de Morte (localisation cf. Figure 86 réf. P2 Tende)



▲ Photo 17 : Roya au niveau de la confluence avec vallon de St-Pancrace
(localisation cf. Figure 86 réf. P3 Tende)



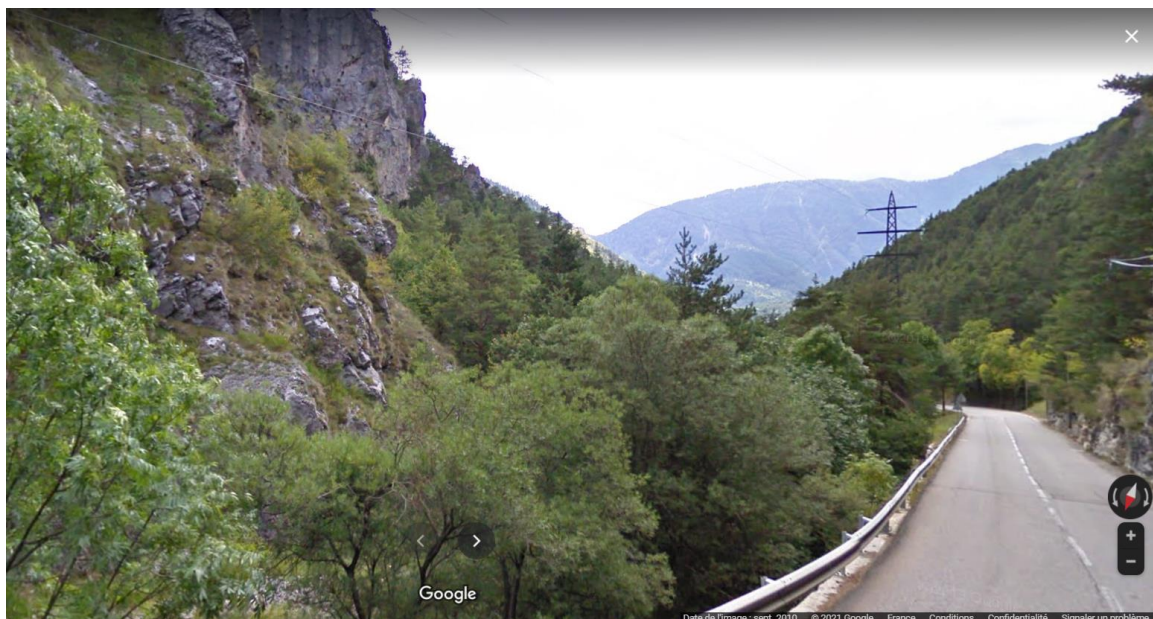
▲ Photo 18 : Coupure de route à l'aval du vallon d'Arimonde
(localisation cf. Figure 86 réf. P4 Tende)

Evolution de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

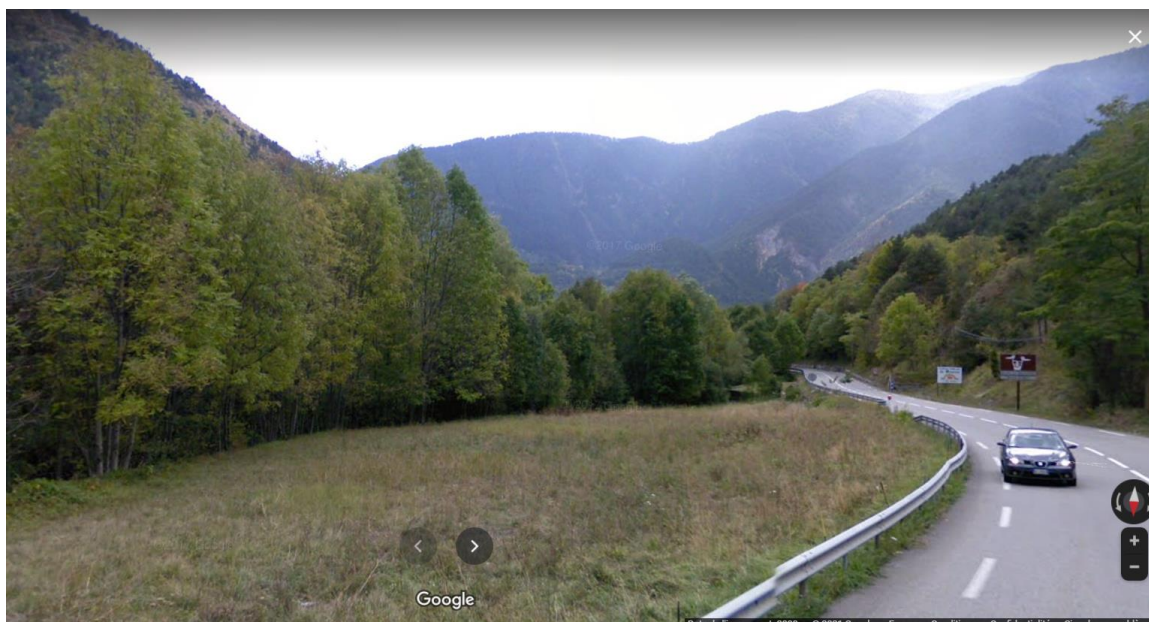
La Figure 85 et le tableau suivant montrent une explosion généralisée de la largeur de la bande active suite à la crue Alex, passant en moyenne entre la confluence avec le vallon de Caramagne et la ferronnerie de 11 m avant crue à 34 m après crue. L'augmentation de la largeur de bande active est liée principalement à l'augmentation des niveaux et aux stocks massifs de sédiments dans le lit de la Roya mais aussi probablement aux érosions de berges et au recrutement des arbres situés sur ces dernières (la canopée de ces derniers couvraient les lits avant la crue).

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2018 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 207 à 186	Ferronnerie à pont des 14 Arches	0,021	9	23	1,1
PT 185 à 161	Pont 14 arches à pont av. Georges Bidault	0,016	9	33	2,7
PT 160 à 150	Pont av. Georges Bidault à Viaduc voie ferrée	0,018	10	34	3,2
PT 149 à 120	Viaduc voie ferrée à pont voie ferrée	0,028	10	40	3,7
PT 119 à 68	Pont voie ferrée à Torrent de Morte	0,036	14	33	4,1
PT 67 à 2	Torrent de Morte à aval Col de Tende	0,094	12	35	1,4
Ensemble	Ferronnerie à Vallon de Caramagne	0,049	11	34	2,6

Tableau 26 : Synthèse de l'évolution de la largeur de bande active et du niveau de fond de lit de la Roya dans le secteur de Tende



▲ Photo 19 (Haut) Photo 20 (bas) : Roya entre pont de Caramagne et musée Vallo Alpino (vue vers l'aval).
 Haut : 2010, source google Street View / Bas : 05/2021 après rétablissement de l'accès routier coupé, source ONF-RTM



▲ Photo 21 (Haut) Photo 22 (bas) : Roya entre musée du Vallo Alpino et pont SNCF amont du vallon d'Ourtigue (vue vers l'aval). Haut : 208, source google Street View / Bas : 21/10/2020, source ONF-RTM

5.4.3 Torrent de Morte

Le torrent de Morte est un affluent rive droite de la Roya. Compte tenu de la magnitude des apports sédimentaires en provenance de ce petit bassin versant, il nous est apparu utile d'effectuer sur ce torrent une comparaison de profils.

Le bassin versant du torrent de Morte présente une superficie de 6,6 km² à la confluence avec la Roya. Il comporte deux branches principales qui confluent à l'apex du cône de déjection. La branche Nord avec deux sous-branches confluent 200 m à l'amont de l'apex du cône, présente une superficie de bassin de 3,0 km². La branche Sud résultant de la confluence du vallon de Rabay et de Dente, présente quant à elle une superficie de bassin de 2,4 km².

Les observations post-crue issues des photos aériennes IGN et de drones (clichés ERTM, Vincent KOULINSKI), montrent que la branche Sud est à l'origine de la majorité des apports sédimentaires (cf. également § 5.1.3). Le cône de déjection a subi un engravement exceptionnel (cf. infra). Les divagations torrentielles ont engravé les bâtiments à l'apex du cône (centre de vacances) sans dommages importants à la structure. Il s'agit d'un point important à noter, puisque dans de nombreux cas en Vésubie et Roya, les maisons situées dans des zones de dépôt ont été affectées par des affouillements de fondations, montrant ainsi une succession de phases de dépôt et de reprise de matériaux. Ici ce n'est pas le cas. On peut donc supposer dans le cas du torrent de Morte une propagation de vagues sédimentaires avec des écoulements très concentrés en matériaux (pendant l'ensemble de la crue) ayant conduit au comblement du lit à l'apex et au remplissage des bâtiments par les matériaux.

On présente ci-après le profil en long détaillé de la branche sud (vallon de Rabay) sur la partie inférieure couverte par le levé Lidar post-crue.

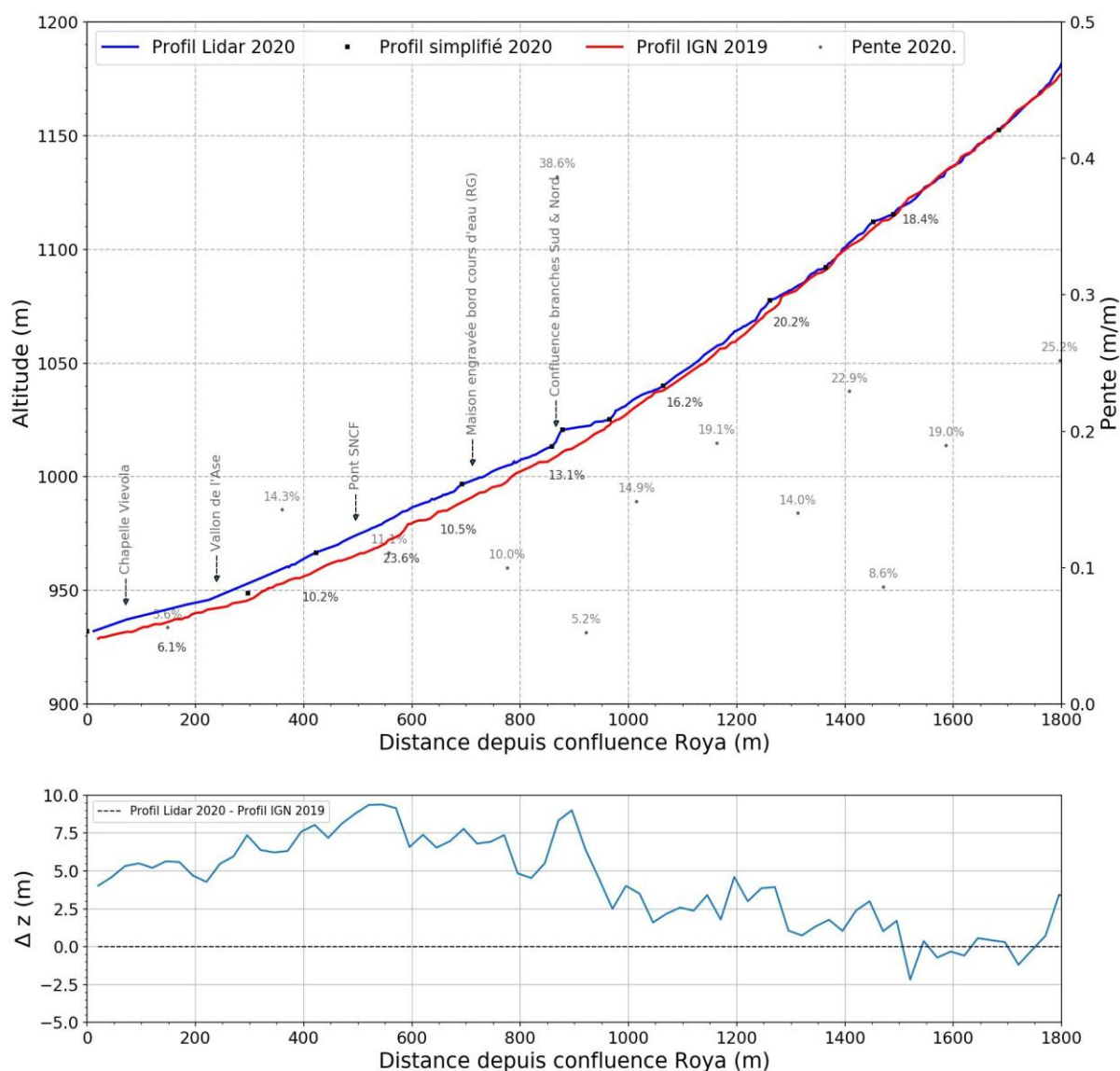


Figure 89 : Profil en long détaillé du torrent de Morte dans sa partie inférieure (branche sud, vallon de Rabay)

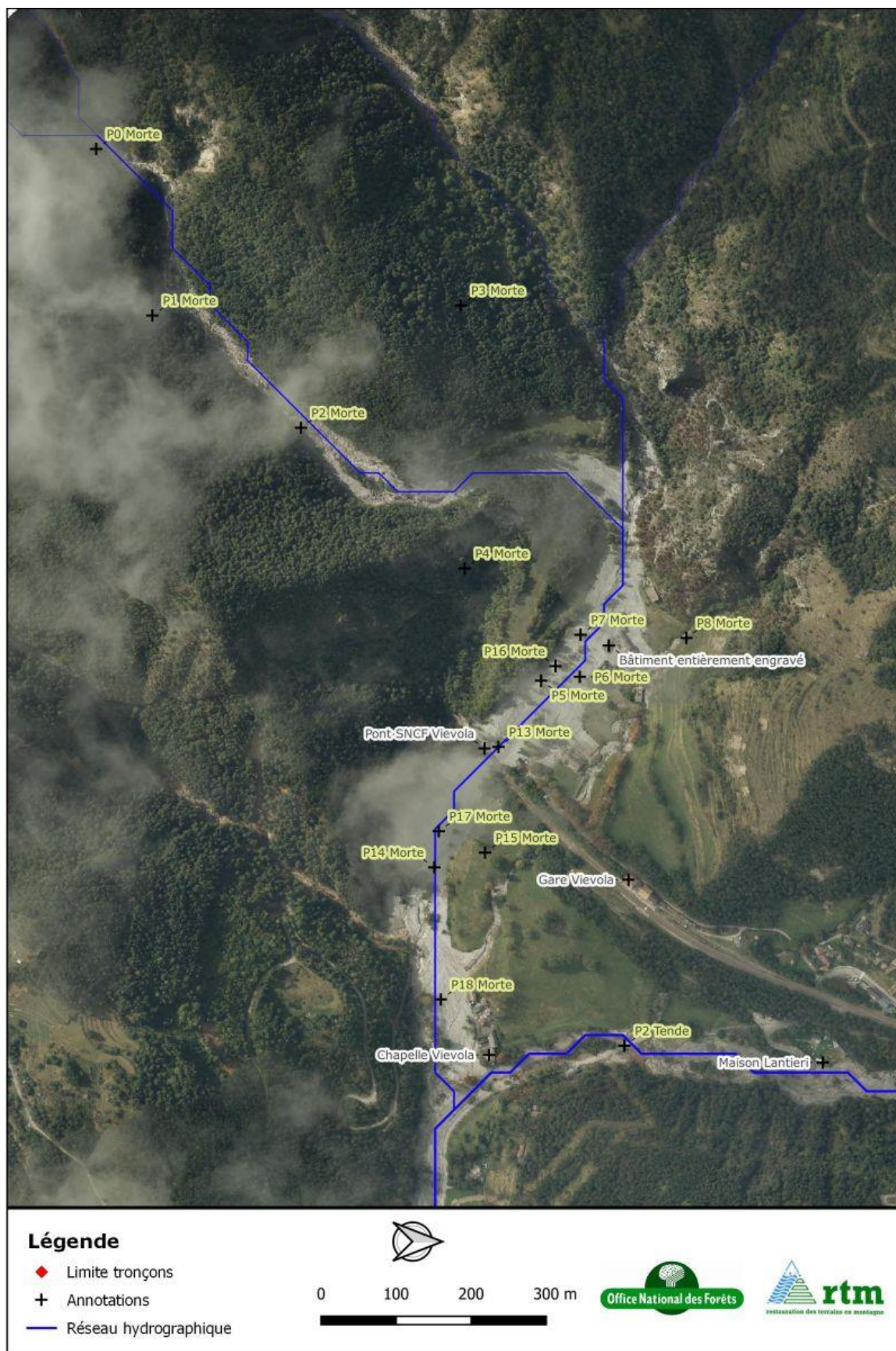


Figure 90 : Vue en plan centrée sur le bassin versant du Torrent de Morte

La comparaison de profil en long montre des engravements remarquables sur le cône de déjection du torrent avec hauteurs de dépôt qui atteignent jusqu'à 9 m en amont du pont SNCF !

Le volume de dépôts sur le cône est remarquable : il est de l'ordre de 85 000 m³ sur une superficie d'analyse ne couvrant pas toutes les zones de dépôts. Il pourrait donc avoisiner 100 000 m³ en considérant l'ensemble de la superficie des dépôts. Ce volume a été estimé en utilisant et filtrant un modèle numérique de surface fourni par l'IGN. Celui-ci est issu d'une photogrammétrie sur l'ensemble des Alpes (prises de vue 2017). Un modèle numérique de terrain a été reconstruit après sélection de points sol. Les bâtiments sur le cône ont été exclus de l'analyse. La superficie couverte par l'analyse ne couvre pas la totalité de l'emprise des dépôts, certaines parties n'ayant pu être reconstituées en raison de la densité de végétation. On gardera à l'esprit que les données et techniques utilisées pour l'analyse ne permettent d'accéder qu'à un ordre de grandeur des volumes de matériaux déposés.

Les dépôts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **Des apports sédimentaires massifs** dus à des pluies et débits exceptionnels qui ont été en mesure : (a) de mobiliser des stocks de sédiments préexistants notamment en tête de ravins ; (b) de déstabiliser des pieds de versant. Comme en Vésubie et sur le reste du bassin de la Roya, les apports liés à la déstabilisation de pied de versants sont selon, toute vraisemblance, prépondérants. L'intensité des érosions est possiblement liée à la géologie, avec des déstabilisations ayant affecté des versants constitués de matériaux sablo-graveleux.
- **La diminution de la pente longitudinale qui entraîne une diminution de la capacité de transport.** En amont de la confluence avec la branche Nord, la pente avant crue était de l'ordre de 16 à 20 %. En aval elle passe brutalement à 10,5 %, puis à 6,1 % 300 m en amont de la confluence avec la Roya. La pente continue de diminuer dans la Roya (cf. § précédent). On note une continuité du fond de lit post crue en amont et en aval du pont SNCF. Ceci est le signe que le niveau des dépôts est contrôlé par l'aval.



▲ Photo 23 : Lit du Vallon de Rabay. Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020
(localisation cf. Figure 90, réf. P2)



▲ Photo 24 : Lit du Vallon de Rabay. Vue d'ensemble du cône engravé. Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P3)



▲ Photo 25 : Cône de déjection engravé. Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P4)



▲ Photo 26 : Vue de détail du cône engravé. En rive droite bâtiments du centre de vacances.
Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020. (Localisation cf. Figure 90, réf. P5)



▲ Photo 27 : Cône de déjection engravé. Vue de détail
Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P6)



▲ Photo 28 : Vue par l'amont des bâtiments du centre de vacances.
Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P8)



▲ Photo 29 : Cône de déjection engravé – Amont du pont SNCF.
Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P13)



▲ Photo 30 et Photo 31 : Cône de déjection engravé –pont SNCF.
Gauche : avant crue. Source ONF-RTM. / Droite : 13/10/2020. Source : ONF-RTM



▲ Photo 32 : Pont SNCF en cours de déblaiement.
Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, ref. P15)



▲ Photo 33 : Tronçon à l'aval du pont SNCF.

Source : V. KOULINSKI, 07/11/2020 (localisation cf. Figure 90, réf. P17)

5.4.4 Roya – Traversée urbaine de Tende

On présente en Figure 91 le profil en long détaillé dans la traversée urbaine de Tende. Les principales conclusions de l'analyse du graphique sont les suivantes.

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

Le niveau d'engravement est en moyenne de 3 m (PT 185->120) et atteint jusqu'à 5 m en aval immédiat de la confluence avec le Refreï. L'engravement reste significatif jusqu'au niveau du pont des 14 Arches détruit pendant la crue.

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, les dépôts s'expliquent en premier lieu par les ruptures de pente observées dans le profil en long, et notamment celle présente au niveau de la confluence avec le Refreï. Mais il est vraisemblable que plusieurs contractions du lit (naturelles ou formées par des ouvrages de franchissement) aient favorisé une augmentation des niveaux. On trouvera au § 5.4.10 une illustration du phénomène d'engravement lié à la présence de contractions dans un lit torrentiel. Dans la traversée de Tende, les singularités ayant pu jouer un rôle sur les niveaux de dépôts sont les suivants :

- **Pont des 14 Arches.** Ce pont, implanté en amont d'un coude à 90°, a été détruit au cours de la crue. Il présentait plusieurs arches de gabarit modeste, lesquelles ont pu être obstruées pendant la crue. Une contraction naturelle du lit est présente à l'aval. Le substratum est vraisemblablement affleurant au droit du pont ou en aval. Le profil en long montre l'existence d'un front de dépôt solide au droit de cet ouvrage, ce qui renforce l'hypothèse d'une influence de cet ouvrage et de la contraction naturelle du lit observée à l'aval.
- **Vieux pont.** Cet ouvrage ancien remarquable n'a pas été détruit. Le profil en long ne présente pas de singularité de pente au droit de cet ouvrage ce qui indique qu'il n'a eu qu'une influence mineure et/ou temporaire pendant la crue sur la remontée des niveaux. On note toutefois des divagations de la Roya en amont de l'ouvrage avec un bras en rive droite qui s'est réactivé.

- **Contraction au droit du moulin.** D'après le profil en long IGN 2019, il est vraisemblable que le substratum soit sub-affleurant dans le secteur du moulin. La contraction est due ici à un resserrement du fond de vallée.

Evolutions de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

L'engravement du lit a causé des divagations torrentielles, des affouillements de berges et un élargissement important de la bande active dans la traversée de Tende (facteur de 3,9 entre le pont des 14 Arches et le pont de la voie ferrée). Dans la traversée urbaine stricto-sensu, de nombreux bâtiments ou infrastructures implantés en bordure du cours d'eau ont été atteints par la crue (par affouillement de fondations et/ou engravements).

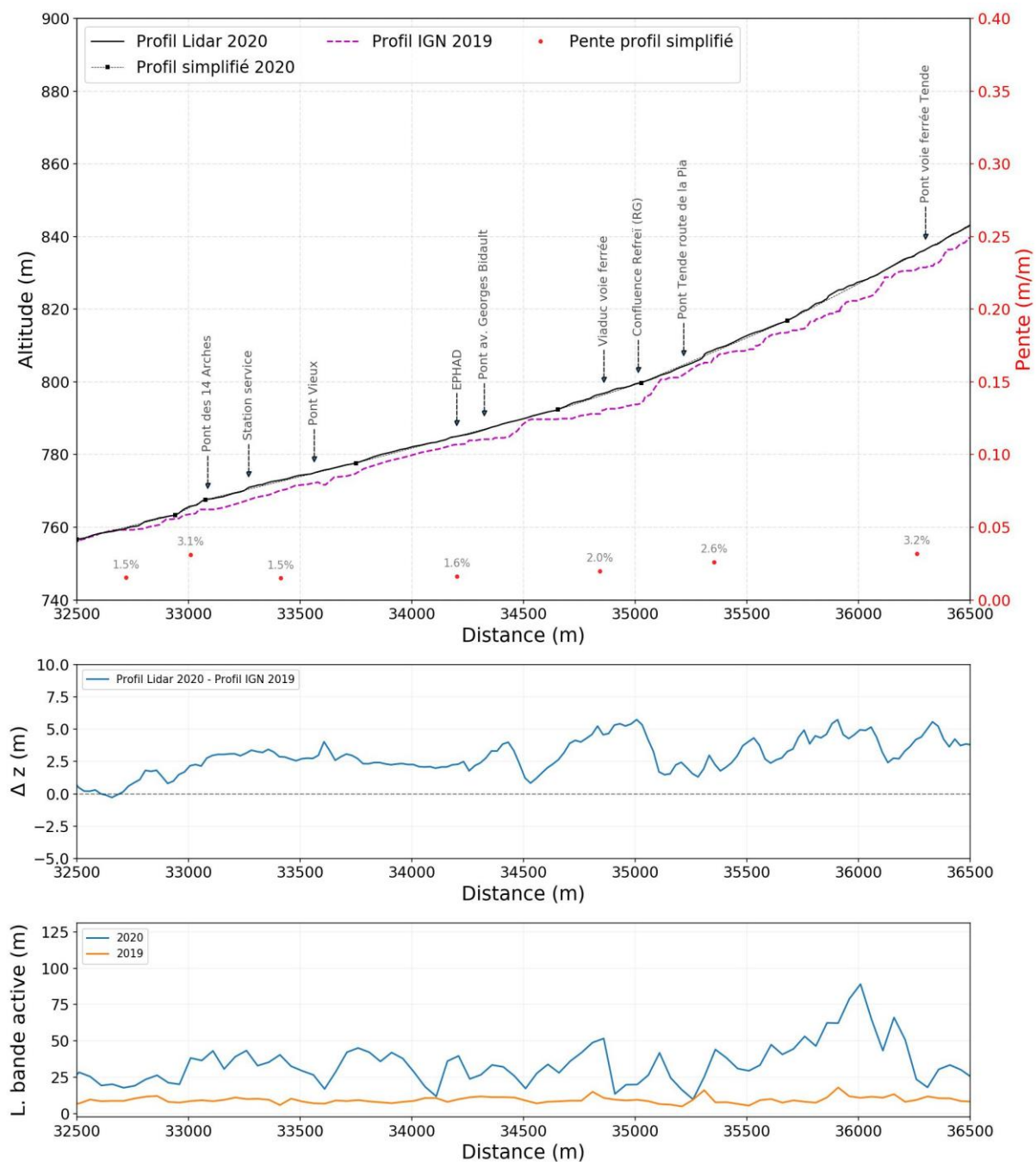


Figure 91 : Profil en long détaillé de la Roya dans la traversée urbaine de Tende

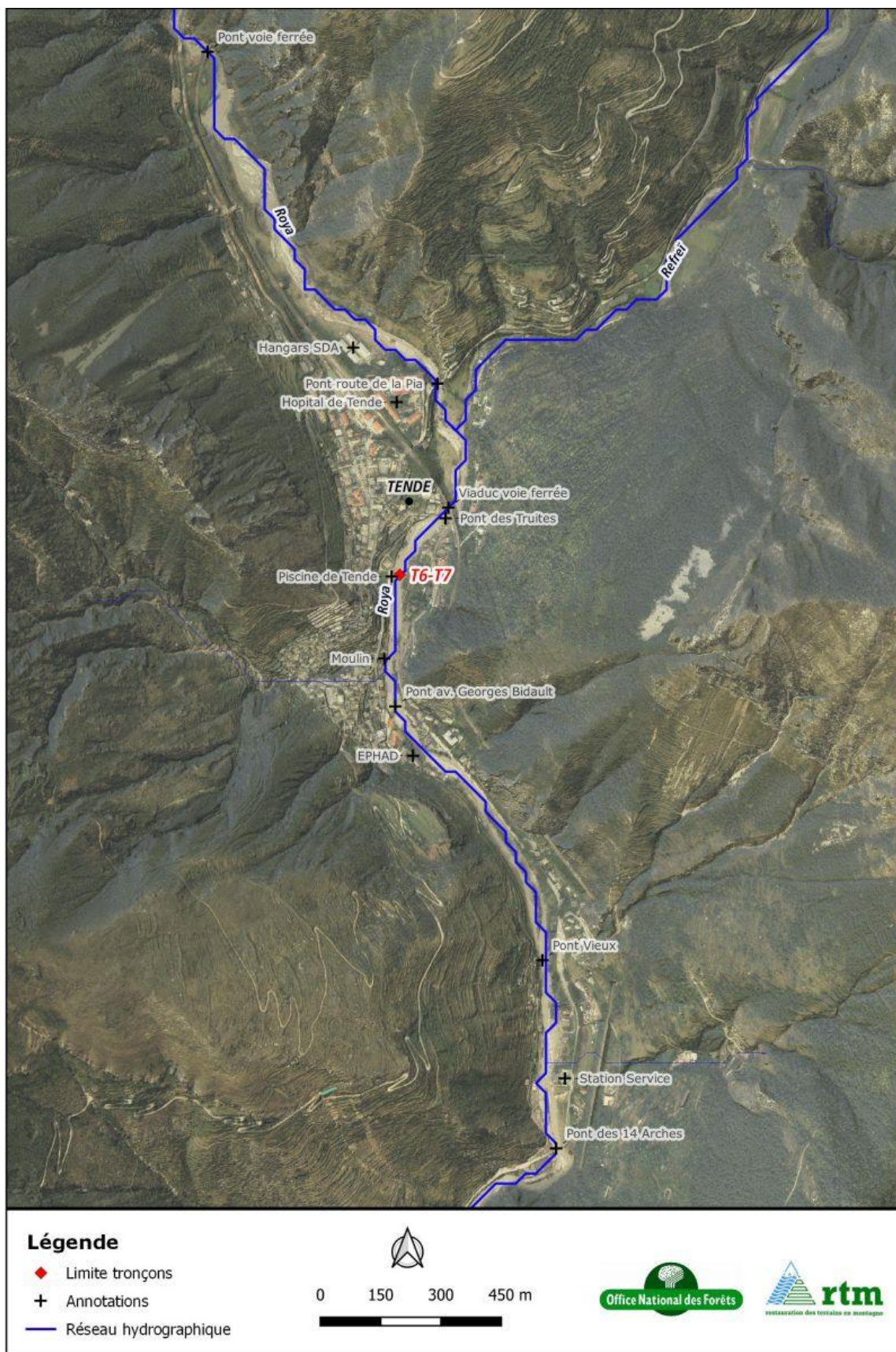


Figure 92 : Vue en plan dans le secteur de Tende



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 34 : Pont des Truites et viaduc voie ferrée. Cliché : F. ADAMO, CEREMA.
(Localisation cf. Figure 86 réf. P6)



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 35 : Débordement RG en aval du pont des Truites. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation cf. Figure 86 P6)



▲ Photo 36 : Engrèvement et submersion de la piscine de Tende. *Cliché : F. ADAMO, CEREMA*
(Localisation cf. Figure 86, réf. P7)



▲ Photo 37 : Destruction du pont av. Georges Bidault et de 3 bâtiments en amont du pont
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 86, réf. P8



▲ Photo 38 : Engrèvement, destruction du pont av. Georges Bidault, affouillement des fondations. Affouillement des fondations de l'EHPAD (bâtiment rouge en rive droite)
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 86, réf. P9



▲ Photo 39 : Pont des 14 Arches détruit.
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation cf. Figure 86, réf. P10



▲ Photo 40 : Bâtiment de la ferronnerie détruit. Cliché : F. ADAMO, CEREMA
Localisation cf. Figure 86, réf. P11

5.4.5 Roya – Secteur de St-Dalmas de Tende

Le profil en long détaillé dans le secteur de St-Dalmas de Tende est présenté sur la Figure 93. Il couvre le secteur allant de la ferronnerie jusqu'au pont de la voie ferrée en aval de la confluence avec la Bieugne.

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison des niveaux de fond de lit avant-après crue conduit aux conclusions suivantes :

- Malgré la pente forte du lit observée dans l'ensemble du secteur analysé – plus élevée que dans le tronçon alluvial situé en amont du pont des 14 Arches – la comparaison des profils en long indiquent la présence de dépôts généralisés.
- A l'amont de la confluence avec la Levensa, l'ordre de grandeur des hauteurs de dépôts correspond à l'ordre de grandeur du biais systématique potentiel (cf. § 5.4.1.2). Ceci suggère donc une stabilité générale des niveaux de lits. L'observation détaillée des orthophotographies suggère que les dépôts restent faibles avec des blocs plurimétriques restés immobiles et n'étant pas recouverts par des dépôts de sédiments fins. La configuration en gorges avec une pente élevée, toujours supérieure à 3,0 %, et un fond de lit fixé par de très gros blocs explique les faibles variations d'altitude ;
- Les hauteurs de dépôt augmentent sensiblement en aval du pont de Ste-Anne (détruit) avec un ordre de grandeur d'engravement de 2 m. Les facteurs explicatifs de l'augmentation sont ici : (1) la fourniture sédimentaire massives en provenance de l'amont, les érosions du versant/berges rive gauche dans la traversée de St-Dalmas, et les apports massifs de la Bieugne ; (2) la réduction de la pente longitudinale entre la confluence avec la Levensa et celle avec la Bieugne ;
- En aval de la confluence avec la Bieugne, les hauteurs de dépôt augmentent encore. Elles atteignent 3 à 5 m. Ces valeurs sont surprenantes au vu de la forte pente du lit comprise entre 4,1 et 6,6 %. Même si elles constituent vraisemblablement une borne haute d'estimation d'engravement, elles illustrent les apports massifs en provenance de la Bieugne.

Evolutions de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

La Figure 93 et le tableau suivant montrent, comme dans la traversée de Tende, une augmentation significative de la largeur de bande active. Celle-ci passe en moyenne de 13 m à 36 m sur l'ensemble du secteur allant de la ferronnerie au pont de la voie ferrée en aval de la confluence avec la Bieugne.

Comme l'illustre le tableau suivant, l'augmentation de la largeur de bande active est corrélée à l'augmentation des niveaux de fond de lit. Toutefois, comme sur la Bieugne, les très gros blocs présents en fond de lit et dans les berges ont probablement joué un rôle majeur en accentuant les affouillements des vestiges de moraine formant les berges par redirection des écoulements et/ou contraction localisée de la section d'écoulement. Certaines maisons rive droite dont les fondations ont été affouillées sont situées juste à l'aval de très gros blocs qui ont été déchaussés latéralement de la berge et ont basculé dans le lit provoquant des remous localisés. A l'échelle géologique, la crue paroxysmique de la Roya à St Dalmas de Tende a élargi son chenal dans les dépôts morainiques, sans modifier notablement le fond pavé d'énormes blocs.

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2018 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 266 à 254	Pont voie ferrée à confluence Bieugne	0,044	17,6	21,3	3,0
PT 253 à 238	Confluence Bieugne à confluence Levensa	0,029	12,4	26,5	2,0
PT 237 à 207	Confluence Levensa à Ferronnerie	0,049	12,2	33,2	1,1
Ensemble	Pont voie ferrée à ferronnerie	0,04	13,4	36,0	2,7

Tableau 27 : Synthèse de l'évolution de la largeur de bande active et du niveau de fond de lit de la Roya dans le secteur de St-Dalmas de Tende

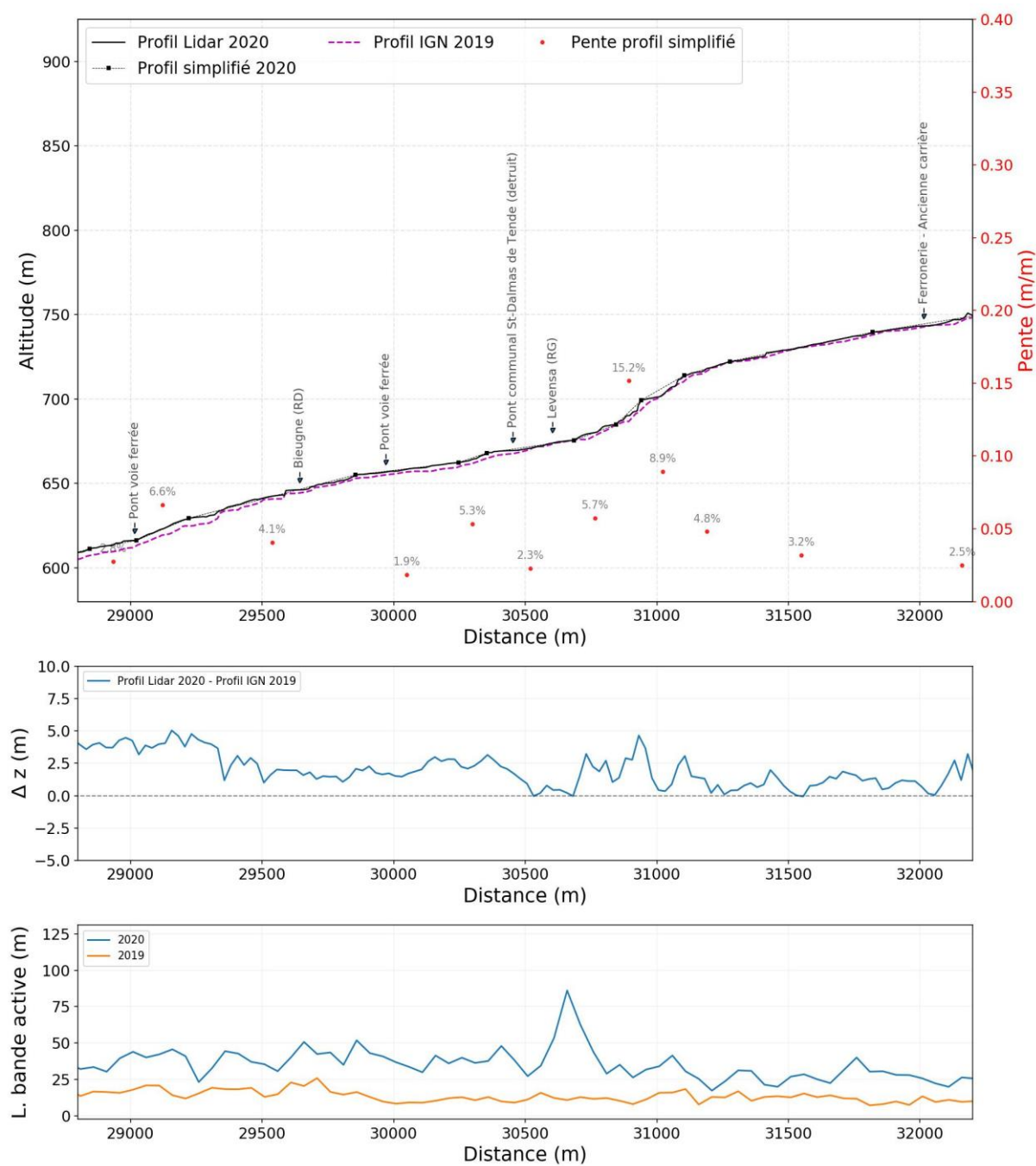


Figure 93 : Profil en long détaillée de la Roya dans le secteur de St-Dalmas de Tende



Figure 94 : Vue en plan sur le linéaire du profil en long présenté précédemment



Légende

Bande active Ponts

- 2019
- 2020
- Inconnu
- Aucun dégât structural visible (0%)
- Dégâts mineurs + part. détruit (0-25%)
- Dégâts importants - Menace de ruine (sup. 25%)
- Totalelement détruit (100%)

Bâtiments

- ▲ Aucun dégât structural visible (0%)
- ▲ Dégâts mineurs + part. détruit (0-25%)
- ▲ Dégâts importants - Menace de ruine (sup. 25%)
- ▲ Totalelement détruit (100%)

0 20 40 60 m



Figure 95 : Evolution de la bande active en amont de St-Dalmas de Tende



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 41 : Linéaire à l'amont de la confluence avec Levensa. Vue amont -> aval
 Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 94 ref. P0c



▲ Photo 42 : Amont viaduc voie ferrée au droit de la confluence avec la Levensa. Cliché : ONF-RTM
 Vue aval -> amont. Localisation : cf. Figure 94 ref. P1



▲ Photo 43 : Pont route de Ste-Anne détruit. *Cliché : ONF-RTM*
Localisation : cf. Figure 94 ref. P0



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 44 : Linéaire entre viaduc voie ferrée et pont route Ste-Anne détruit. Vue amont -> aval
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 94 ref. P0b



▲ Photo 45 : Pont route de Ste-Anne détruit. *Cliché : ONF-RTM*
Localisation : cf. Figure 94 réf. P2



▲ Photo 46 : Lit de la Roya au droit de l'Eglise de St-Dalmas. 2 maisons détruites. Vue amont -> aval
Cliché : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 94 ref. P3



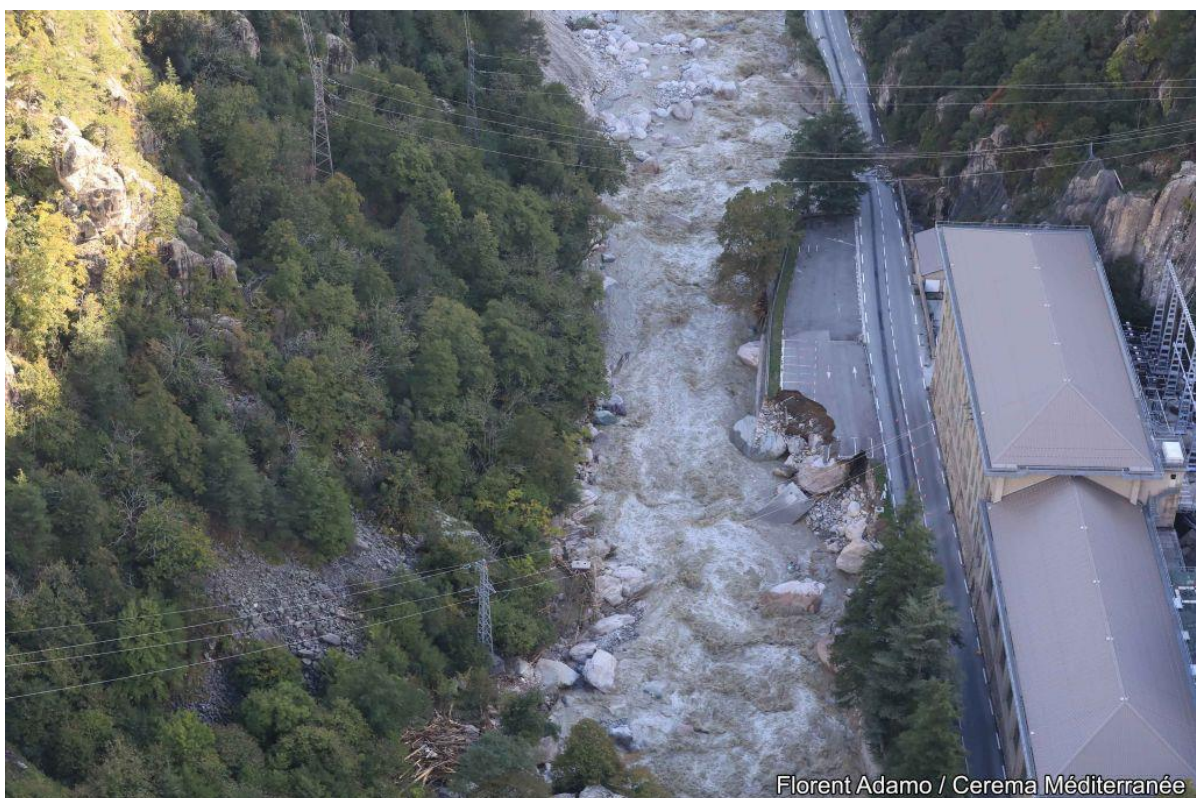
▲ Photo 47 : Lit de la Roya au droit de l'Eglise de St-Dalmas. 2 maisons détruites. Vue amont -> aval
Cliché : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 94 ref. P4



▲ Photo 48 : Lit de la Roya (à gauche) et de la Bieugne (à droite). Vue amont -> aval
Cliché : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 94 réf. P5



▲ Photo 49 : Lit de la Roya au droit de l'Eglise de St-Dalmas. Pont route Ste-Anne et maison d'habitation détruits. Vue aval -> amont. Cliché : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 94 réf. P6



▲ Photo 50 : Lit de la Roya au droit de l'usine EDF (aval confluence avec Bieugne). Destruction de la plateforme face à l'usine. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 94 ref. P7



▲ Photo 51 : Lit de la Roya en amont du viaduc de la voie ferrée (aval confluence avec Bieugne). Brèche dans la route. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 94 réf. P8

5.4.6 Bieugne – St-Dalmas au barrage des Mesches

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison des profils 2020 et 2019 (cf. Figure 96) montre un engrèvement généralisé du lit de la confluence avec la Roya jusqu'au barrage des Mesches. Celui-ci est en moyenne de 2 m avec des valeurs pouvant localement dépasser 5 m. Les niveaux de dépôt sont particulièrement marqués sur le cône de déjection de la Bieugne en aval du pont communal avec une hauteur moyenne de 3 m. La diminution de pente visible sur le profil à partir du pont communal a donc joué un rôle majeur.

L'aspect remarquable de la crue Alex tient ici non seulement à l'ordre de grandeur des hauteurs de dépôts observées sur le cône, mais aussi aux valeurs de dépôt dans le lit à l'amont qui est plus raide avec une pente longitudinale dépassant en moyenne 10,0 %. En amont du pont communal, la pente élevée du lit permet au cours d'eau de disposer d'une capacité de transport 5 à 10 fois supérieure⁷ à celle qu'il possède au niveau du cône. La présence généralisée de dépôts dans des biefs aussi raides témoigne donc d'apports solides exceptionnels. De plus, en faisant l'hypothèse vraisemblable que le transport solide en provenance des vallons de Casterino et de la Minière a été entièrement piégé par le barrage des Mesches, les évolutions altitudinales seraient alors essentiellement dues à des érosions latérales des pieds de versant et aussi à des apports ponctuels de ravins transversaux. Comme dans la traversée de St-Dalmas, les blocs plurimétriques présents en fond de lit ont possiblement joué un rôle prépondérant dans l'hydraulique de la crue, en redirigeant localement des écoulements contre les pieds de versant, ou en accentuant localement les vitesses. En amont du profil en travers 264, on a par ailleurs recensé cinq coulées (flèches rouges sur le profil de la Figure 25) dont deux en rive droite ont coupé la route d'accès au barrage des Mesches.

⁷ La capacité de transport solide d'un chenal est *grosso modo* proportionnelle au carré de la pente longitudinale.

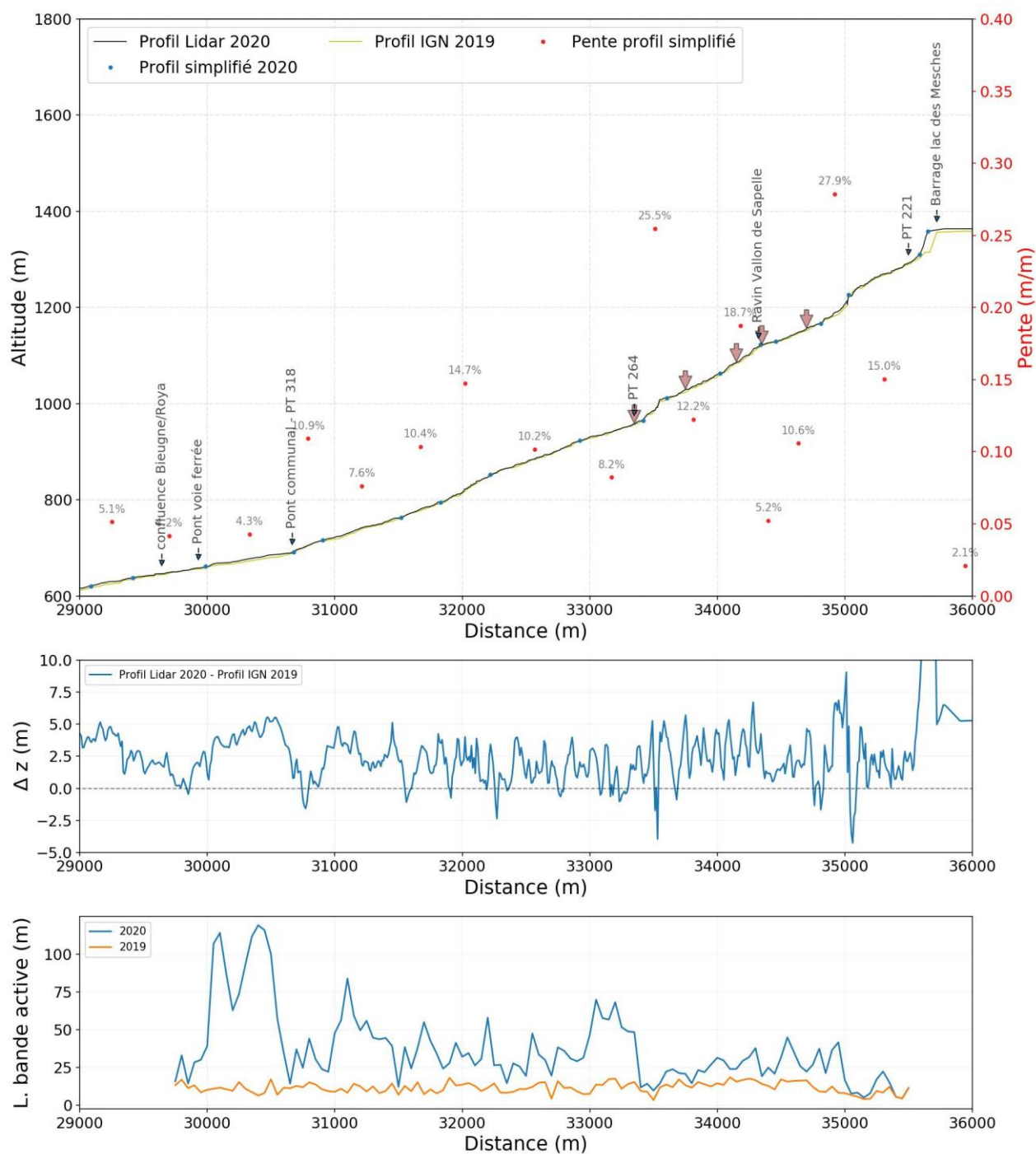


Figure 96 : Profil en long détaillé de la Bieugne de la confluence avec la Roya jusqu'au barrage des Mesches
Les flèches rouges localisent les apports ponctuels latéraux de matériaux

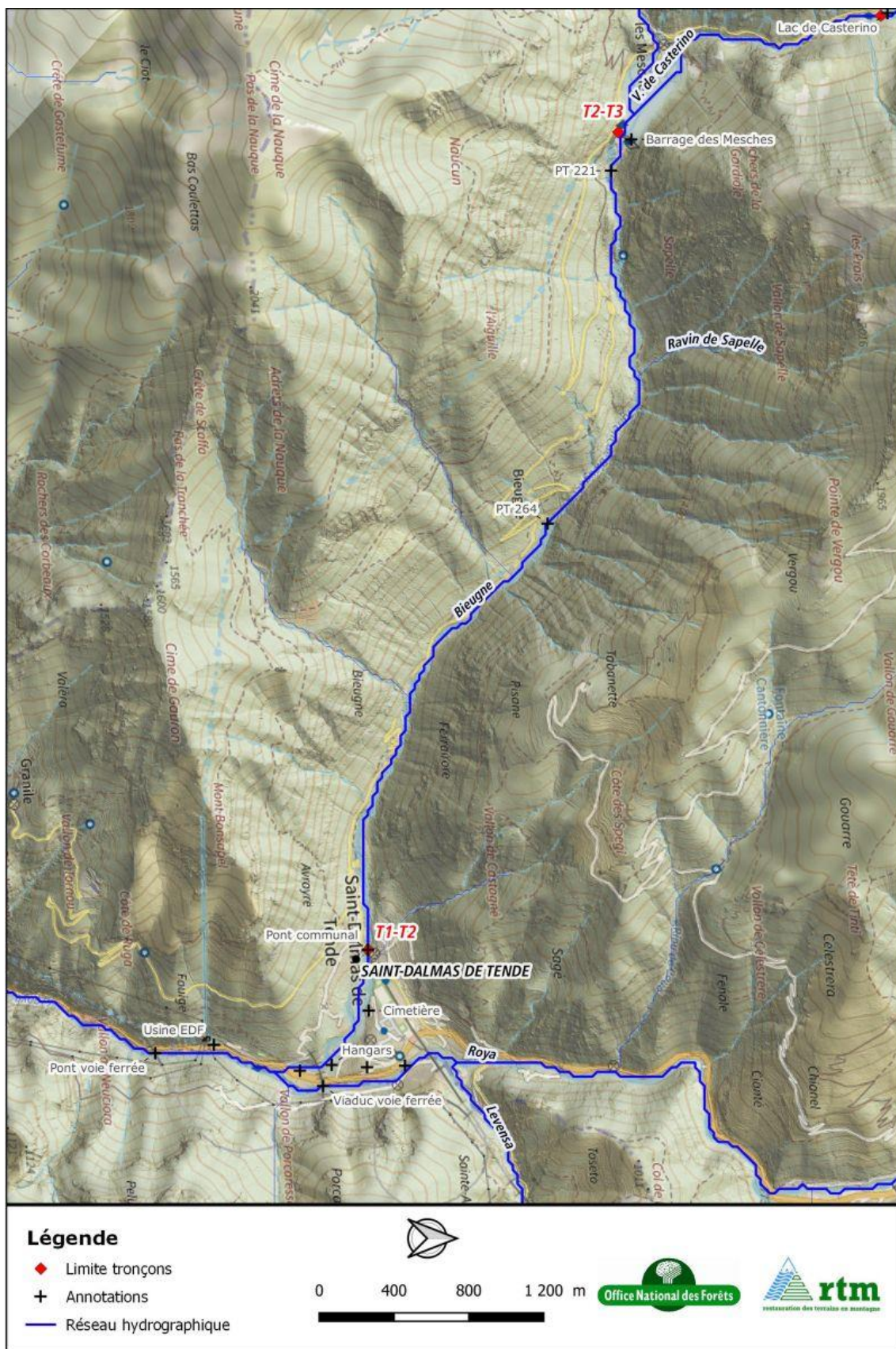


Figure 97 : Vu en en plan. Bieugne. Du barrage des Mesches à la confluence avec la Roya



Figure 98 : Vu en en plan. Bleugne sur son cône de déjection.

Evolution de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

La bande active de la Bieugne s'est considérablement élargie passant de 12 m à 37 m en moyenne de la confluence avec la Roya jusqu'en aval immédiat du barrage des Mesches. Les évolutions les plus spectaculaires sont observées sur le cône de déjection de la Bieugne, en aval du pont de la RD 91, où la bande active passe de 11 à 66 m en moyenne.

L'explosion de la bande active est due à des apports massifs de sédiments ayant provoqué des dépôts puis des divagations torrentielles sur l'ensemble du cône. Les dépôts ont vraisemblablement été amplifiés par les érosions du versant rive droite causées par les divagations des écoulements.

Les divagations et les érosions ont été fortes sur les parties amont et médiane du cône emportant une grande partie du cimetière et des maisons en amont de la zone d'activité des Silices. L'exhaussement du lit a permis aux écoulements de rentrer massivement dans la zone des Silices, engravant les bâtiments industriels sous 1 m (en aval) à 2 m (en amont) de graviers.

La situation est différente sur le tronçon aval entre la zone des Silices et la confluence avec la Roya où le lit s'est élargi de 15 m à 30 m dans son chenal pavé de gros blocs avec un exhaussement qui semble faible. Cette situation trouve son explication dans l'accroissement de la pente dans ce tronçon de raccordement entre le cône et la Roya (franchissement de la moraine frontale de la Bieugne, voir chapitre 5.3.3)

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2019 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 336 à 318	Confluence Bieugne à pont communal	0,044	11,1	65,8	3,1
PT 317 à 264	-	0,099	11,6	39,1	1,7
PT 263 à 221	-	0,156	11,7	21,9	2,4
Ensemble		0.04	11,6	37,1	2,2

Tableau 28 : Synthèse de l'évolution de la largeur de la bande active et du niveau de fond de lit de la Bieugne dans le secteur de St-Dalmas de Tende



▲ Photo 52 : Lit de la Bieugne en aval du barrage des Mesches. Vue amont -> aval
Cliché : ONF-RTM.



▲ Photo 53 : Lit de la Bieugne sur son cône de déjection. Vue aval -> amont
Cliché : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 98 réf. P0



▲ Photo 54 et Photo 55 : Lit de la Bieugne sur son cône de déjection.

Haut : avant crue. Non daté. Bas : Cliché post crue 11/2020 : ONF-RTM. Localisation : cf. Figure 98 réf. P1



▲ Photo 56 : Lit de la Roya (à gauche) et de la Bieugne (à droite). Vue amont -> aval
 Cliché : F. ADAMO (CEREMA). Localisation : cf. Figure 98 réf. P2



▲ Photo 57 : Hangars engravés et partiellement détruits en amont du viaduc de la voie ferrée. Divagations en rive gauche ayant rejoint la Roya. Cliché : F. ADAMO (CEREMA). Localisation : cf. Figure 98 réf. P3



▲ Photo 58 : Confluence Bieugne-Roya
Cliché : ONF-RTM

5.4.7 Roya – Secteur de Fontan

Le profil en long détaillé dans le secteur de Fontan est présenté sur la Figure 99. Il s'étend du pont de la voie ferrée situé en aval de la confluence avec la Bieugne jusqu'au verrou rocheux situé en aval de la confluence avec le Cairos.

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison des niveaux de fond de lit avant-après crue montre un engravement généralisé sur l'ensemble du secteur, avec une valeur moyenne de dépôts de sédiments de 3-4 m et un intervalle de variation compris entre 1 et 6 m. Les valeurs les plus élevées sont situées dans la partie en amont de la confluence avec le vallon de Berghes dans un tronçon de lit à blocs contraint latéralement et à forte pente.

Il est probable que la faible qualité des données altimétriques du profil de 2019 conduise à une surestimation de la hauteur des dépôts comme semble par exemple l'illustrer la comparaison des photos terrestres au niveau du pont de la gare (cf. Photos 64 à 66), avec un niveau d'engravement en amont du pont qui ne semble pas dépasser 0,5 m (contre plus 2 m d'après la comparaison de profils). Cependant, l'analyse détaillée des orthophotographies avant et après crue confirme que l'engravement est bien réel sur l'ensemble du tronçon avec un recouvrement partiel de très gros blocs restés immobiles. D'autre part, il nous a été rapporté par un élu de la commune des engravements significatifs au droit du camping : une vasque dans laquelle les vacanciers se baignaient en période estivale a été entièrement comblée par des dépôts de matériaux (hauteur estimée de l'ordre de 3 à 5 m)

Les niveaux de dépôts observés dans la partie aval, où le fond de vallée s'élargit, est vraisemblablement lié à des facteurs multiples : (a) forts apports amont de la Roya et de la Bieugne ; (b) mais aussi apports conséquents du torrent du Cairos ; (c) et enfin présence d'un verrou rocheux de faible largeur avec vraisemblablement substratum sub-affleurant. La présence de contractions brusques où le fond est inaffouillable constitue un facteur aggravant et entraîne de manière systématique sur des cours d'eau torrentiels une remontée des niveaux à l'amont.

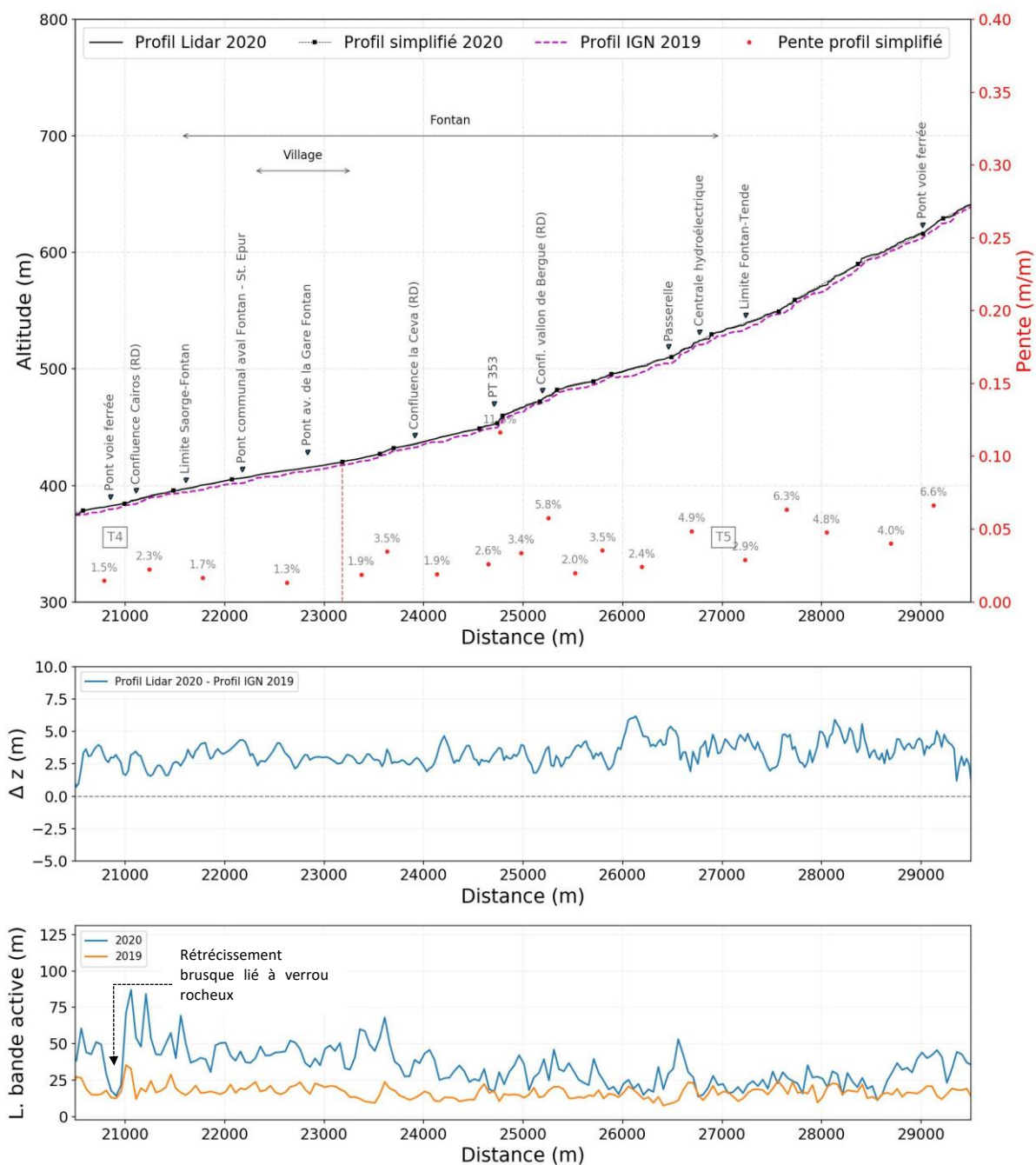


Figure 99 : Profil en long détaillé de la Roya dans le secteur de Fontan

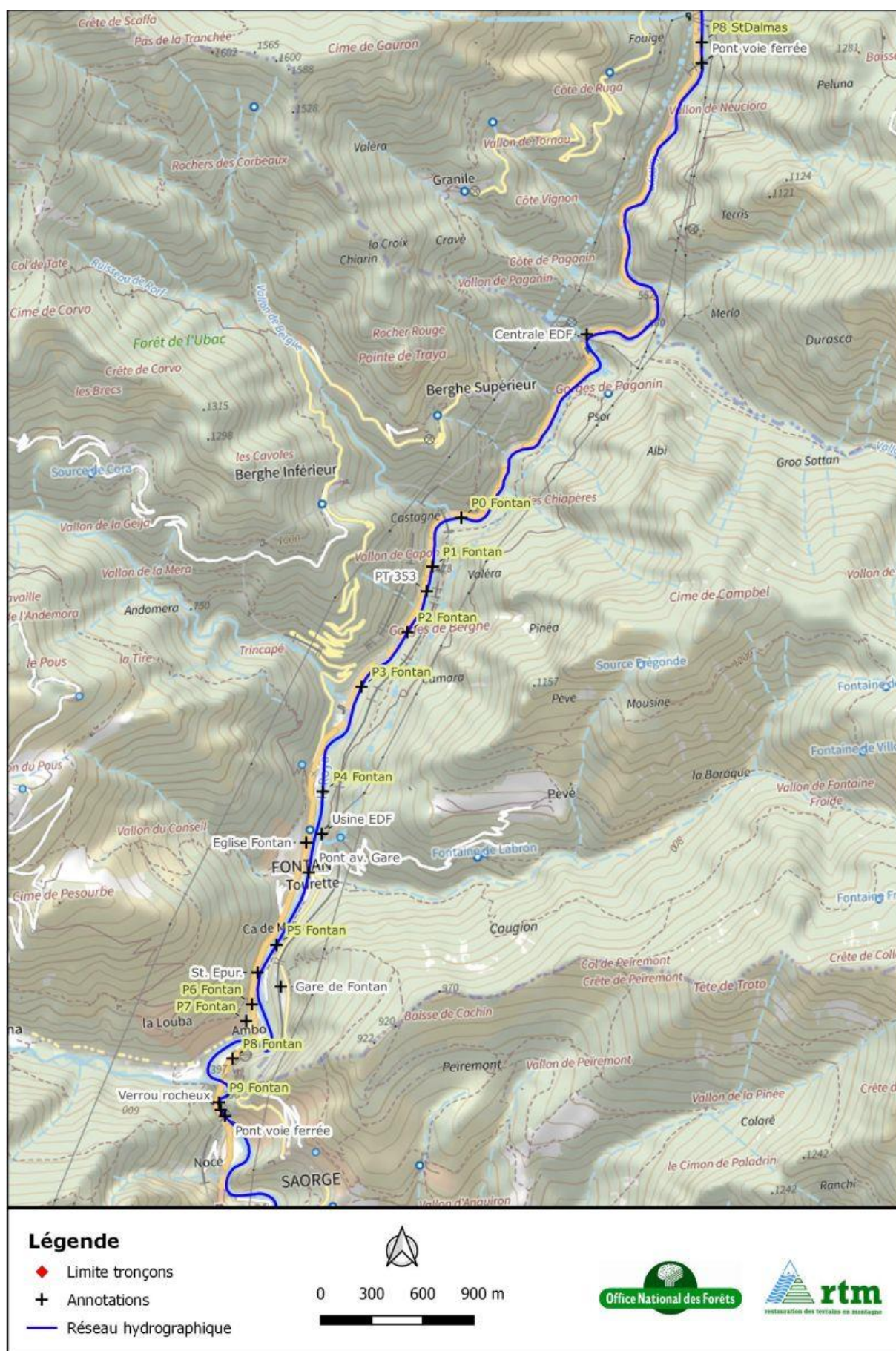


Figure 100 : Vue en en plan. Secteur de Fontan correspondant à l'emprise du profil en long tracé page précédente

Evolutions de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

L'analyse de la bande active révèle des élargissements très nets uniquement dans la partie aval du profil (à partir du PT 353) où la pente longitudinale baisse et la vallée s'élargit (cf. tableau suivant). Sur ce tronçon, la largeur moyenne de bande active passe de 17 à 42 m, soit un élargissement d'un facteur 2,4. Le graphique inférieur présenté en Figure 99 suggère que l'influence du verrou rocheux sur l'augmentation de la largeur de lit et la remontée des niveaux s'étend jusqu'au niveau de la confluence avec la Céva.

En amont, le lit est contraint naturellement du fait de la morphologie en gorges. Même si les variations sont ici plus faibles, avec des largeurs moyennes avant et après respectivement de 16 et 26 m, elles confirment l'augmentation des niveaux décrite précédemment.

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2018 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 427 à 353	Verrou rocheux à rupture de pente amont Ceva	0.019	17.3	42.2	3.0
PT 352 à 268	Rupture de pente amont Ceva à pont voie ferre aval Bieugne	0.038	15.9	26.3	3.7
Ensemble	Pont voie ferrée à ferronnerie	0.029	16.6	33.8	3.4

Tableau 29 : Synthèse de l'évolution de la largeur de bande active et du niveau de fond de lit de la Roya dans le secteur de Fontan



▲ Photo 59 : Roya en amont du viaduc de la voie ferrée (confluence vallon de Berghe). Coupure de route en rive droite. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 100, réf. P0

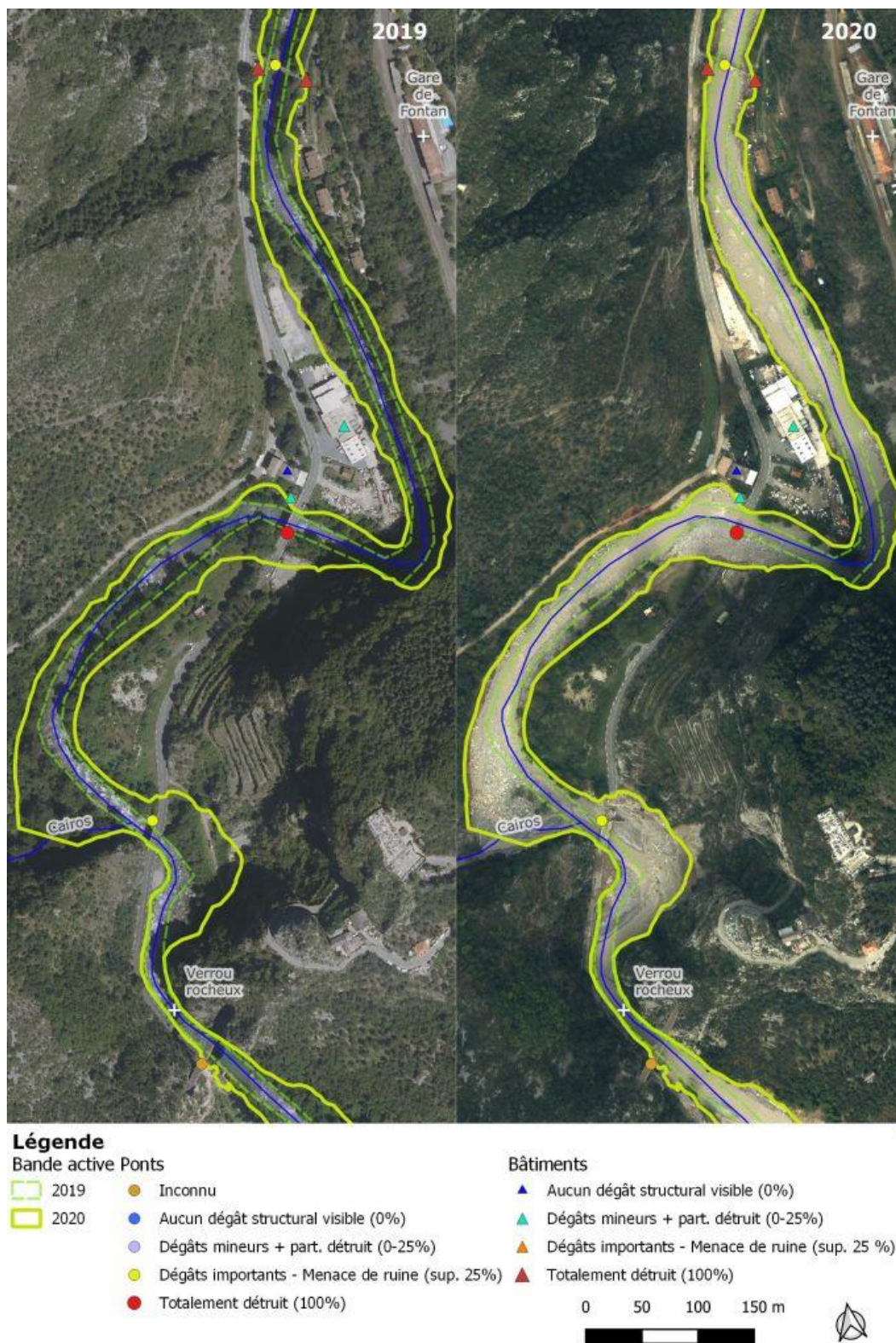


Figure 101 : Evolution de la bande active à l'aval de la traversée urbaine de Fontan



▲ Photo 60 : Roya au niveau des gorges de Berghe. Coupure de route en rive droite Vue amont -> aval
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 100, réf. P1

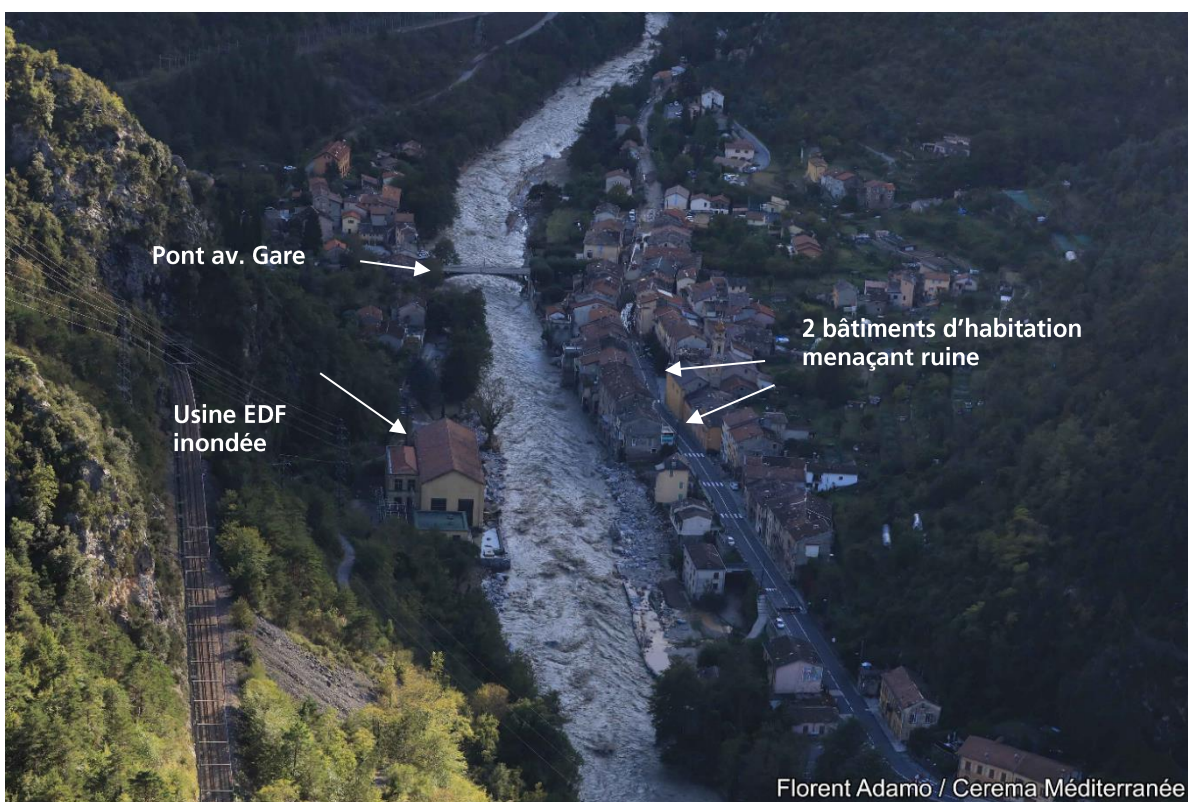


▲ Photo 61 : Roya au niveau des gorges de Berghe. Coupure de route en rive droite Vue amont -> aval
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 100, réf. P3



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 62 : Roya au niveau de la confluence avec le torrent de la Ceva. Route en rive droite inondée. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 100, ref. P3



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 63 : Roya dans la traversée de Fontan. Vue amont -> aval
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 100, réf. P4



▲ Photo 64 : Roya entre le Bourg de Fontan et la confluence avec le Caisos. Vue amont -> aval
 Cliché : F. ADAMO, CEREMA. cf. Figure 100, ref. P5

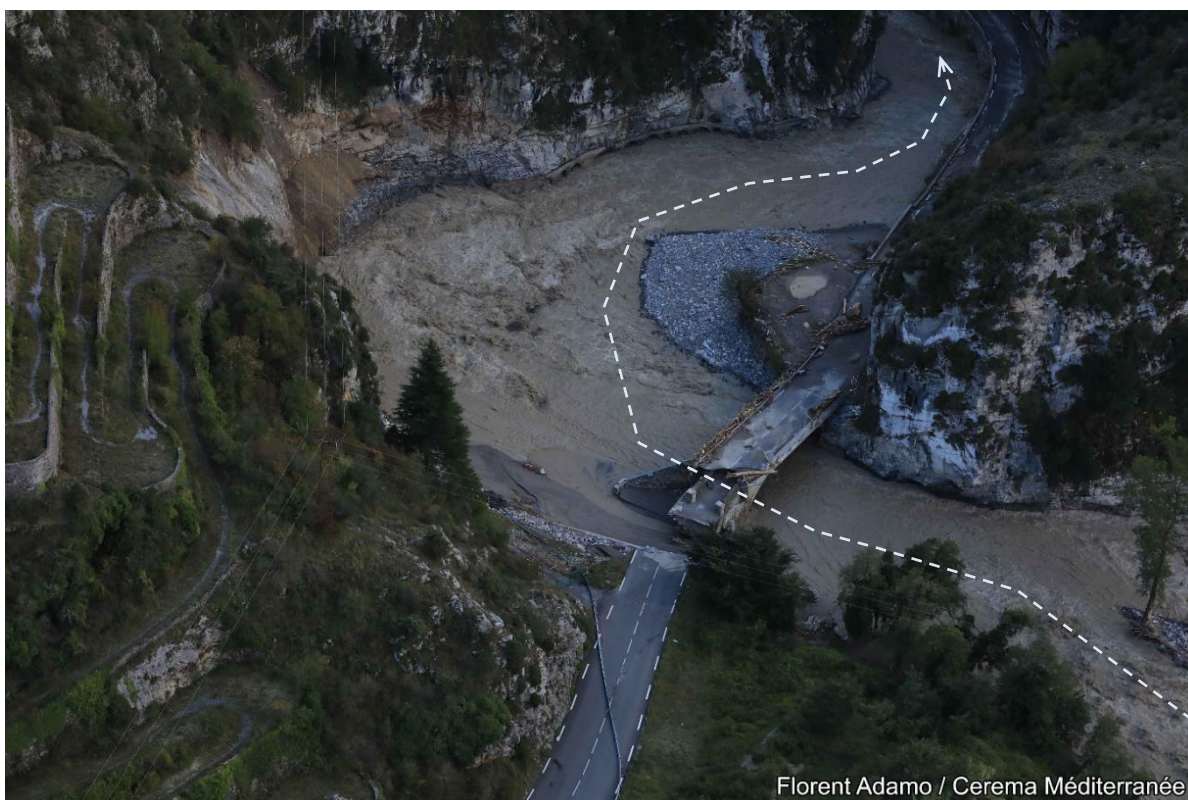


▲ Photo 65 : Destruction du pont d'Ambo. Vue amont -> aval
 Cliché : F. ADAMO, CEREMA. cf. Figure 100, réf. P6



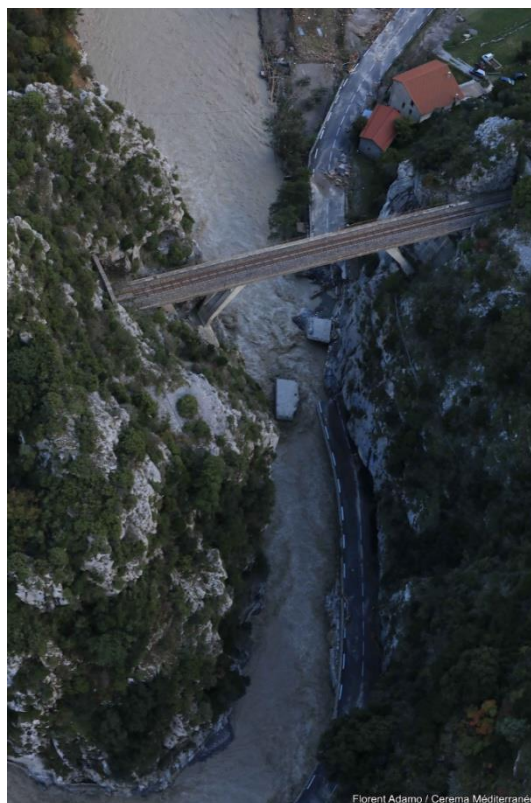
Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 66 : Destruction du pont d'Ambo. Vue de détail Vue aval -> amont
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation cf. Figure 100, réf. P7

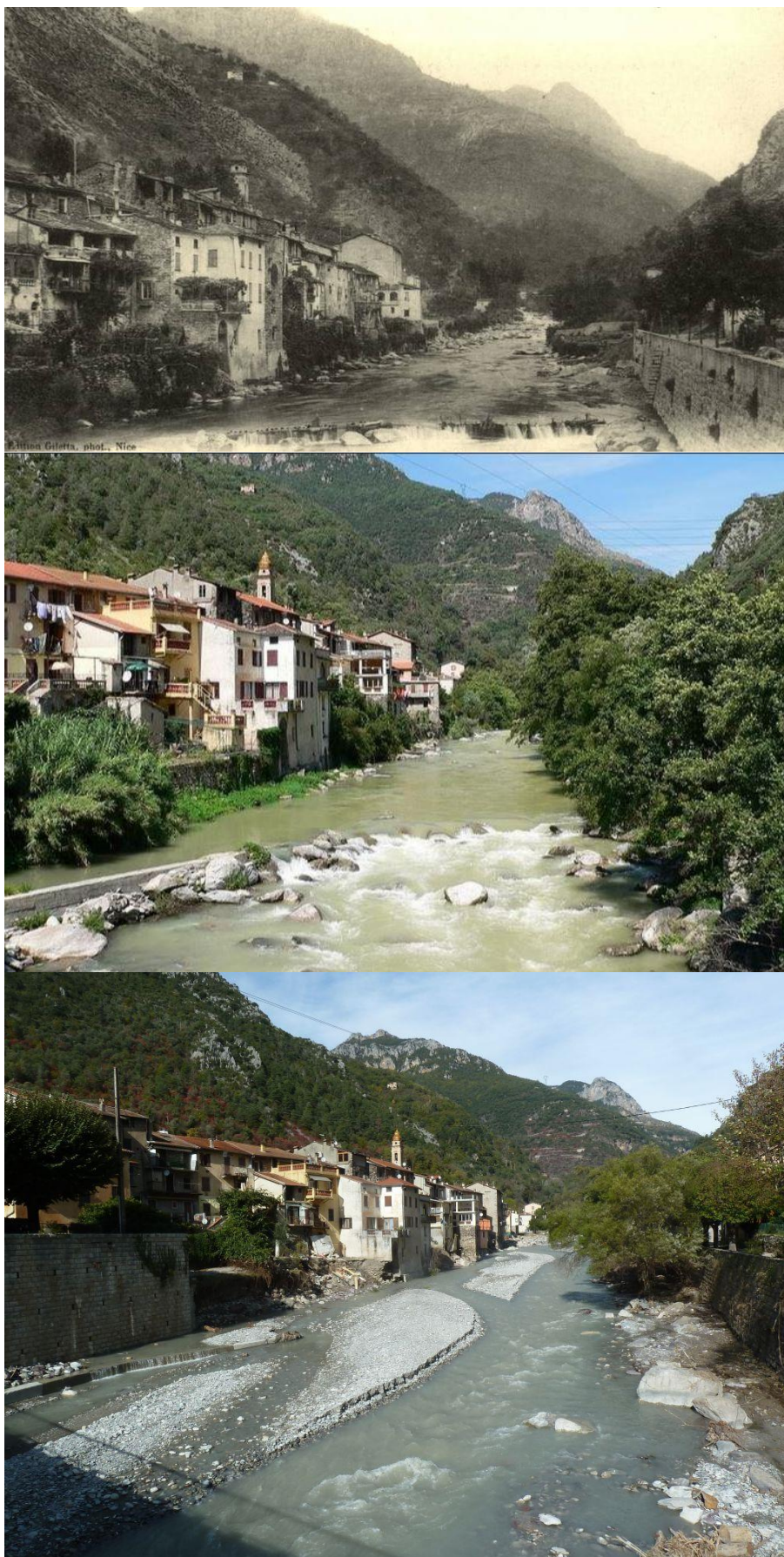


Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 67 : Roya à l'aval immédiat de la confluence avec le Caïros. Pont détruit et submergé par les écoulements. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation cf. Figure 100, réf. P8



▲ Photo 68 : Roya à l'aval de la confluence avec le Caïros. Route détruite au droit du verrou rocheux.
Vue amont -> aval. *Cliché : F. ADAMO, CEREMA.* Localisation cf. Figure 100, réf. P9



▲ Photo 69 (Haut), Photo 70 (milieu), Photo 71 (bas) : Roya au niveau du pont de la gare (vue vers l'amont)
Haut : 1930, source AD06 / Milieu : 2010, source AD06 / Bas : 21/10/2020, source ONF-RTM



▲ Photo 72 (Haut) Photo 73 (bas) : Roya en amont de la confluence avec le torrent de la Céva (vue vers l'aval)
Haut : 208, source google Street View / Bas : 21/10/2020, source ONF-RTM. Localisation cf. Figure 100, réf. P3



▲ Photo 74 (Haut) Photo 75 (bas) : Roya en amont du camping municipal de Fontan (vue vers l'aval)
Haut : 208, source google Street View / Bas : 21/10/2020, source ONF-RTM

5.4.8 Caïros – Partie inférieure

Le profil en long détaillé du Caïros sur la partie inférieure couverte par le levé Lidar IGN post-crue est présenté ci-après. Le profil en long général du cours d'eau est présenté en [Annexe 16](#), de même que les photos illustrant les dégâts et les évolutions géomorphologiques.

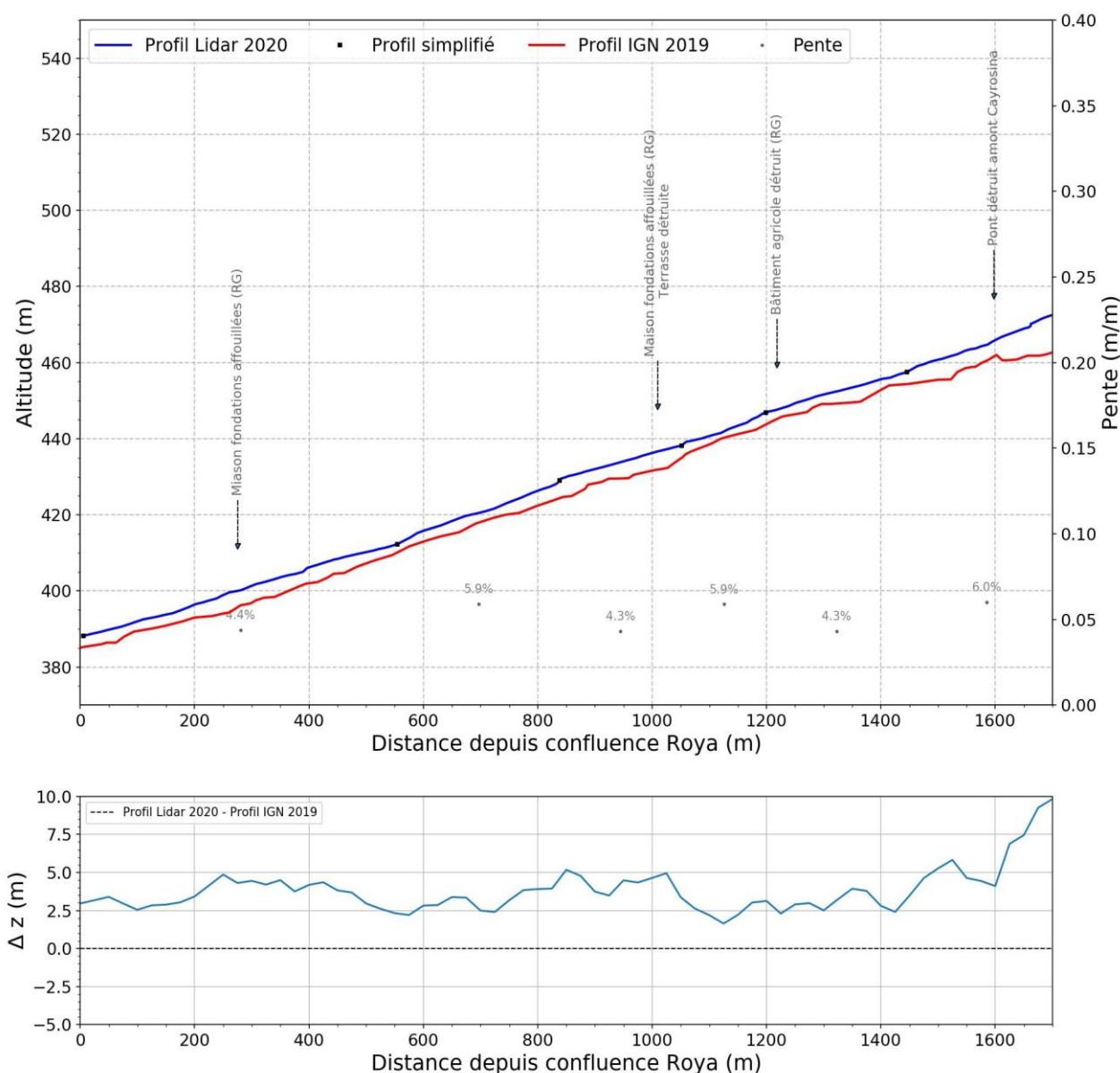


Figure 102 : Profil en long détaillé du Caïros dans la partie inférieure couverte par le levé Lidar 2020

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

Comme sur la Roya, l'engravement du lit est spectaculaire. Il est compris entre 2 et 5 m sur la majorité du linéaire présenté sur la figure précédente. A l'amont du pont de Cayrosina détruit par la crue, l'engravement pourrait atteindre jusqu'à 10 m.

Les dépôts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **Des apports sédimentaires massifs** dus à des pluies et débits exceptionnels qui ont été en mesure : (a) de mobiliser des stocks de sédiments préexistants dans le lit ; (b) de déstabiliser des pieds de versant. Comme en Vésubie et sur le reste du bassin de la Roya, les apports liés à la déstabilisation de pied de versants sont selon toute vraisemblance prépondérants.

- **La diminution de la pente longitudinale**, laquelle a pour conséquence de diminuer la capacité de transport du cours d'eau. Le profil en long du Caïros (cf. [Annexe 16](#)) présente une forme concave avec une diminution progressive de la pente. Celle-ci passe 10,0 % au niveau de la piste du Caïros (La Castagna) à 4,4 % en amont de la confluence avec la Roya.
- **Une rehausse des niveaux au niveau de la confluence avec la Roya**. Cette rehausse joue le rôle de point de contrôle de la même manière qu'un niveau imposé par un seuil. La rehausse à la confluence est très probablement amplifiée par la configuration du site avec une contraction de lit marquée quelques dizaines de mètres en aval de la confluence, un pont et un méandre. L'ensemble de ces facteurs ont pu provoquer un passage en régime fluvial des écoulements et un engravement marqué à l'amont.

5.4.9 Roya – Secteur de Breil-sur-Roya – Saorge

Le profil en long de la Roya dans le secteur de Breil-sur-Roya – Saorge est présenté en Figure 103. Il couvre le secteur allant du pont de la voie ferrée alt. 382 m jusqu'en aval de la traversée urbaine de Breil-sur-Roya (PT 623).

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison des niveaux de fond de lit avant-après crue montre, comme dans le secteur de Fontan, un engravement généralisé sur l'ensemble du secteur analysé. La hauteur des dépôts est en moyenne de 3 m. La comparaison de photos avant après crue confirme une tendance à l'engravement, mais vraisemblablement plus limitée (cf. Photos 76-77, et Photos 80 à 83). La tendance à l'engravement dans les tronçons amont et aval en gorges plus pentus et plus étroits est surprenante. Elle dénote un transport solide exceptionnel. **Dans le tronçon amont (PT 474 à 430), les écoulements ont atteint des hauteurs remarquables comme en témoignent le décapage de la végétation sur les versants et les dépôts de flottants sur le tablier des ponts** (cf. Photo 77 et clichés [Annexe 17](#)). D'après les observations de terrain, la hauteur d'écoulement au droit des différents ponts du tronçon est comprise entre 7,8 et 9,7 m. Dans ce tronçon, la mise en charge des ponts a contribué à surélever les niveaux d'écoulement et probablement aussi favorisé des dépôts en amont direct des ponts. La présence de flottants doit aussi avoir contribué à augmenter le niveau des écoulements, par obstruction partielle et temporaire des ouvrages de franchissement. Ces obstructions ont été temporaires et partielles puisqu'après la crue, les travées et arches des ouvrages n'étaient pas obstruées. Plus de 350 troncs (environ 600 m linéaire de bois flottants) ont toutefois été digitalisés sur les photos aériennes dans les 300 m situés autour du pont amont du tunnel de Saorge et du pont de la Bendola (cf. § 6.3.3).



▲ Photo 76 (A) et Photo 77 (B) : Comparaison de niveaux de fond de lit d'après photos terrestres.

(A) : Juillet 2019. Source : Eugénie Merzagora ; <https://structurae.net/fr/ouvrages/tunnel-de-saorge-sud>

(B) : 13/10/2020. Source : ONF-RTM. Noter le dépôt de flottants au niveau du tablier à la sortie du tunnel

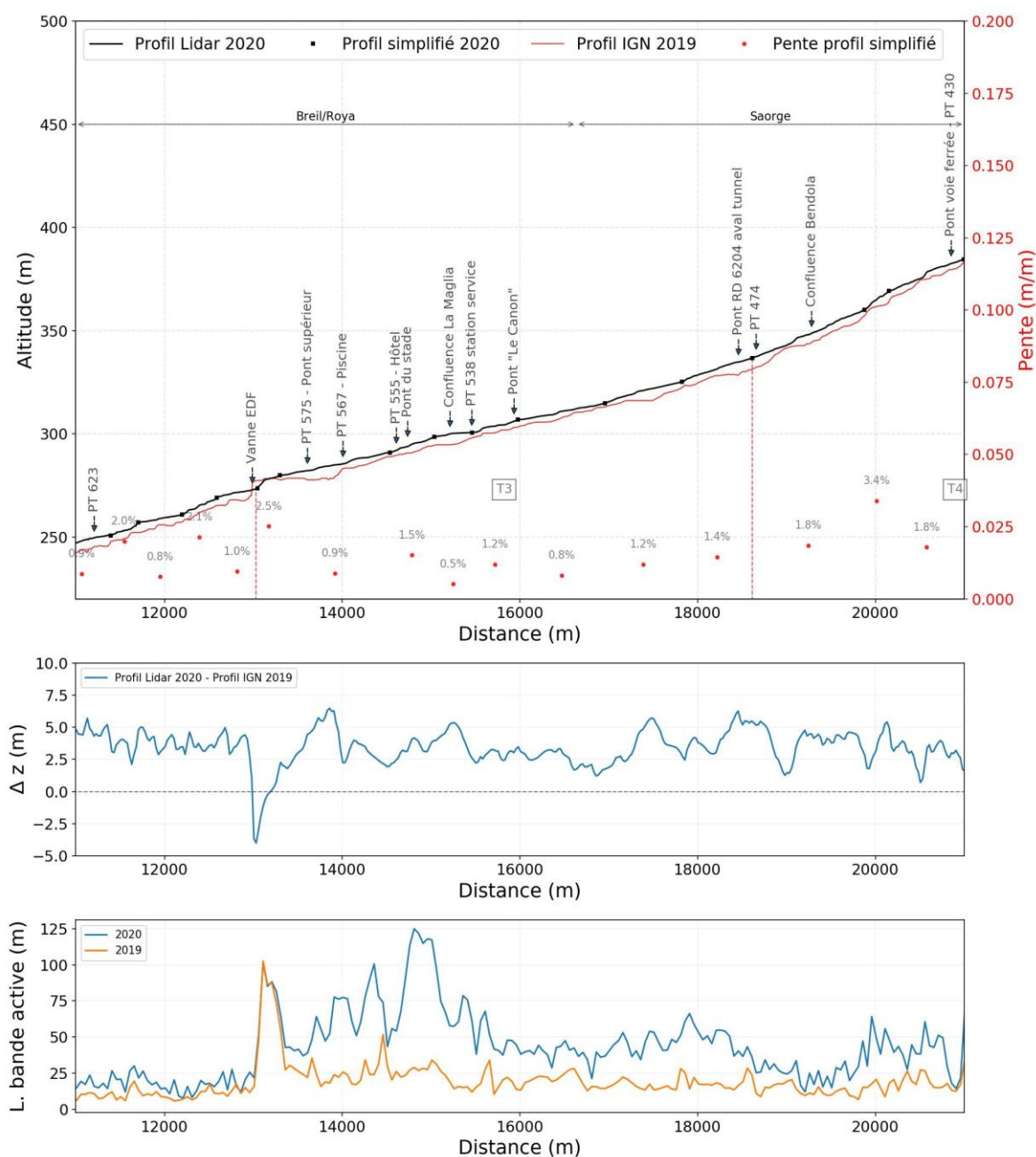


Figure 103 : Profil en long détaillé de la Roya dans le secteur de Breil-sur-Roya/Saorge

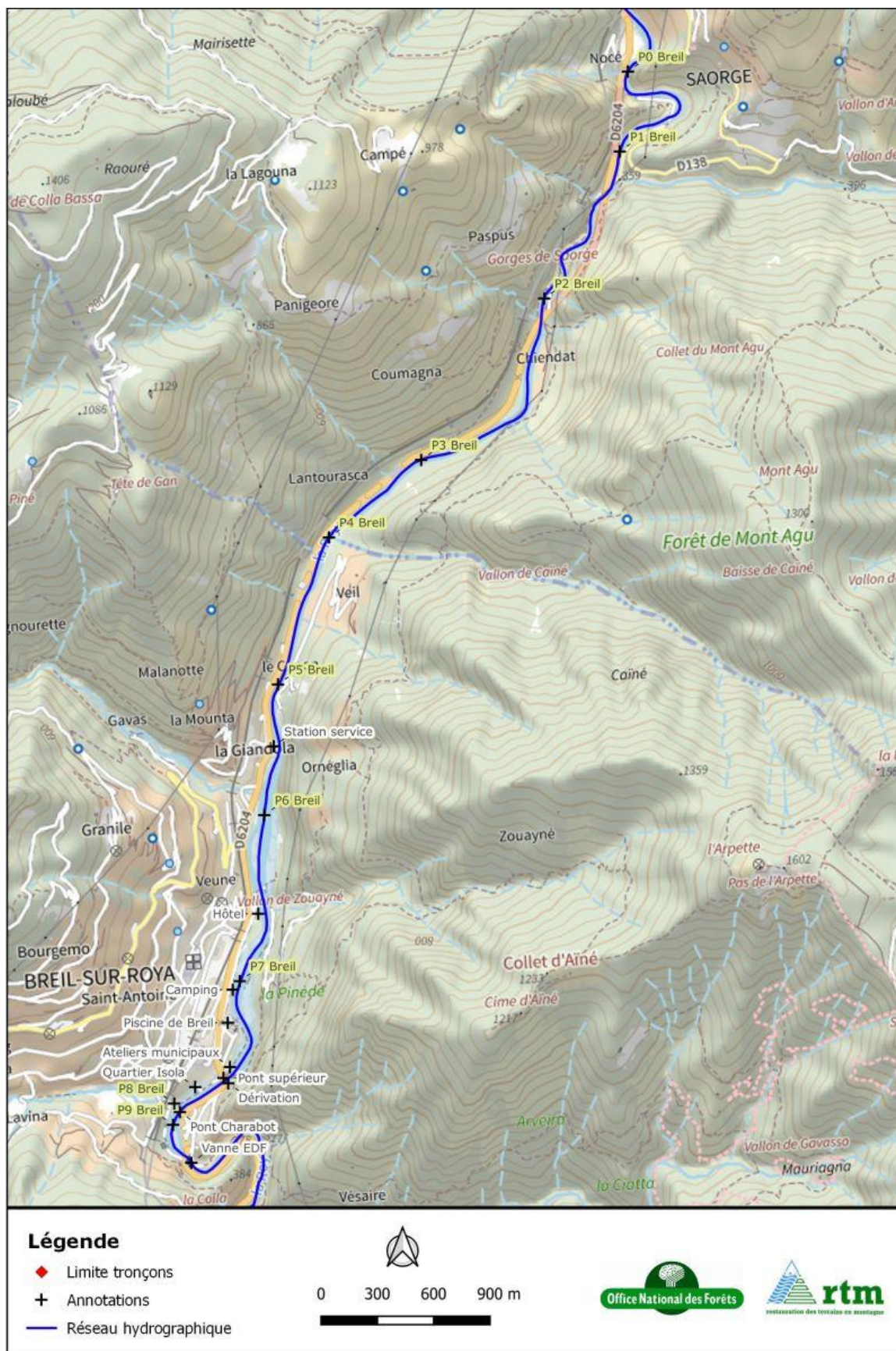


Figure 104 : Vue en plan – Secteur de Breil sur Roya

Localisation	Zfond (m)	Zchaussée (m)	Largeur lit (m)	Δz (m)
Ancien pont RD (PT 450)	360,3	370,0	15	9,7
Pont de Saorge (PT 459)	350,2	359,3	15	9,1
Entrée tunnel de Saorge (PT 462)	348,5	360,00	20	11,5
Sortie du tunnel de Saorge (PT 475)	334,9	342,7	35	7,8

Tableau 30 : Ponts submergés par les écoulements dans le tronçon amont

Au sein du tronçon central (PT 474 à 588), plusieurs contractions brusques semblent avoir joué un rôle notable dans la dynamique du transport solide. Ce point sera développé au § 5.4.10.

En sortie de gorges et jusqu'à la piscine de Breil, on retrouve les mêmes marqueurs qu'à Tende : dépôts liés à la baisse de la pente longitudinale et à l'élargissement du lit ; divagations torrentielles liées aux dépôts, aux obstructions d'ouvrages de franchissement, aux interactions des écoulements avec les flottants et obstacles divers ; érosions de berges et de terrasses alluviales. Cette dynamique de dépôt, divagations - qui n'exclue pas les affouillements – est responsable de la majorité des impacts jusqu'au niveau de la piscine de Breil.

Evolutions de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

L'analyse de la bande active révèle des élargissements sur l'ensemble de secteur analysé. Ceux-ci sont particulièrement marqués sur l'ensemble du tronçon à dynamique alluvionnaire T3 (cf. § 5.3.4) où la pente du cours d'eau diminue et le fond de vallée s'élargit. En amont de la traversée urbaine de Breil-sur-Roya, les évolutions de bande active sont spectaculaires.

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2018 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 623 à 588	PT 263 à Pont déchetterie	0,014	10,5	18,0	3,8
PT 588 à 474	Tronçon T3 : pont déchetterie à tunnel de Saorge	0,011	23,8	56,1	3,2
PT 474 à 430	Tunnel de Saorge à pont voie ferrée alt. 382 m	0,020	15,3	33,3	3,5
Ensemble		0,014	19,4	43,9	3,4

Tableau 31 : Synthèse de l'évolution de la largeur de bande active et du niveau de fond de lit de la Roya dans le secteur de Breil-sur-Roya/Saorge



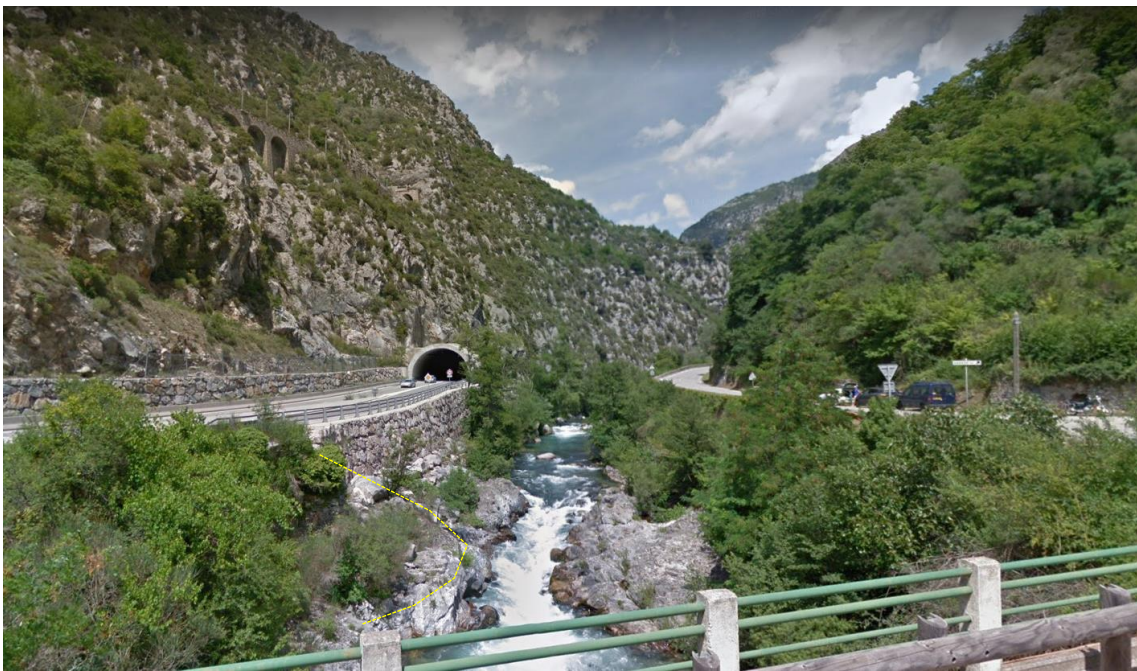
Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 78 : Roya au droit de l'entrée du tunnel amont de Saorge. Ecoulements dans le tunnel. Erosion de la route au droit de l'entrée. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P0



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

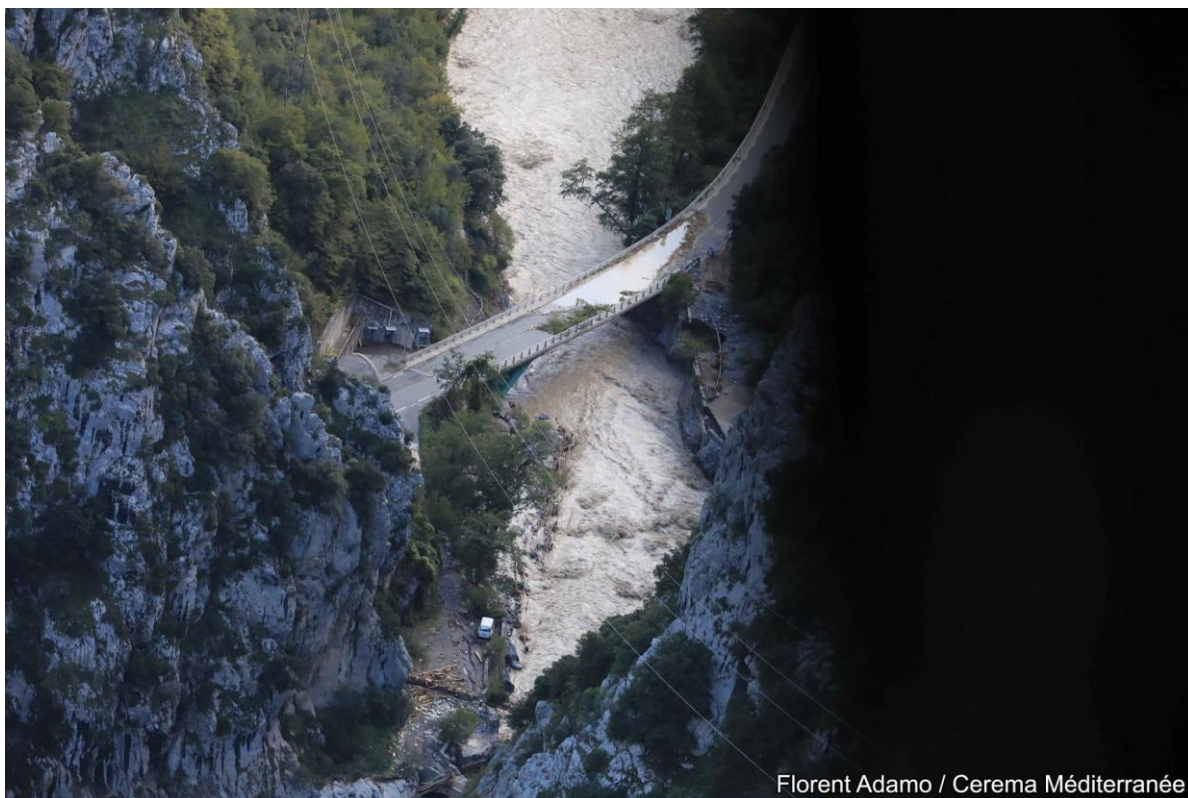
▲ Photo 79 : Roya entre les deux tunnels. Pont de Saorge submergé par les écoulements. Dépôt de flottants en amont de l'entrée du second tunnel. Traces d'écoulements dans le second tunnel. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P1



▲ Photo 80 (haut) et Photo 81 (milieu) : Evolution avant après crue en amont du pont de la RD 138
 Bas : google street view 07/2014 / Haut : photos post crue 13/10/2020 (ONF-RTM)
 En pointillé jaune : points de repère identique sur les 2 clichés. Légère remontée du niveau de fond de lit visible en amont immédiat du pont



▲ Photo 82 (haut) et Photo 83 (milieu) : Evolution fin XIXème début XXème vs 10/2020 – vue vers l’amont
 Bas : carte postale non datée du pont de Giémanos / Haut : photo post crue 13/10/2020 (ONF-RTM)
 A noter contour jaune : vestige de pile rive gauche du pont visible sur carte postale ancienne. Flèches blanches : points de repères identiques sur les 2 clichés. Le niveau post crue Alex est supérieur au niveau de fond de lit ancien. En atteste aussi le découvrement de la fondation du mur rive gauche en aval du pont



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 84 : Roya au droit de la sortie du second tunnel. Traces de flottants en rive gauche au niveau du tablier. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P3



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 85 : Roya en sortie des gorges. Coupure de la route en rive droite. Vue amont -> aval.
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P4



▲ Photo 86 : Roya au droit du hameau de Veil. Coupure de la route en rive droite. Vue amont -> aval.
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P4



▲ Photo 87 : Roya au droit des hameaux du Canon et de la Giandola. Coupure de la route rive droite en amont de la Giandola. Affouillement des fondations du bâtiment de la station service. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, ref. P5



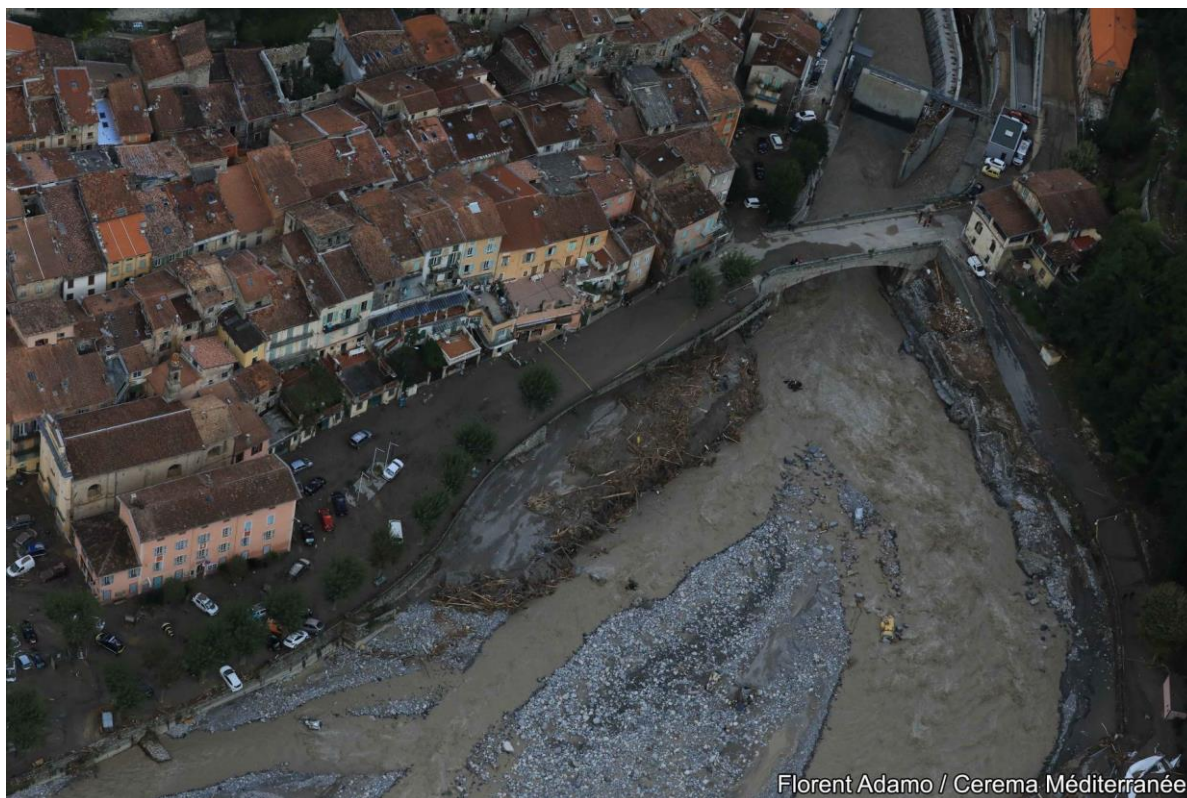
Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 88 : Roya au droit du stade de football (détruit). 4 bâtiments détruits en rive gauche et pont d'accès détruit. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, réf. P6



Florent Adamo / Cerema Méditerranée

▲ Photo 89 : Roya au droit du pont Charabot obstrué par les flottants. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, réf. P8



▲ Photo 90 : Roya au droit du « lac » de Breil. En aval pont de la déchetterie (datant de 1947) et vanne EDF. Vue amont -> aval. Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 104, réf. P9

5.4.10 Roya - Traversée urbaine de Breil-sur-Roya

Le profil en long détaillé de la Roya dans la traversée urbaine de Breil-sur-Roya est présenté sur la Figure 105. Il a été ajouté plusieurs séries supplémentaires : (a) levé des plus hautes eaux (PHE) réalisé par l'ONF-RTM et le cabinet de géomètres OPSIA ; (b) fond du lit post travaux 2015 (EDF, 2015b) ; (c) niveau de la berge rive droite.

L'analyse du profil en long couplée aux observations de terrain conduit aux conclusions suivantes :

- **La contraction marquée du lit au droit du pont de la déchetterie et de la vanne EDF a accentué les niveaux de crue dans la traversée de Breil avec l'inondation du bourg en rive gauche et du quartier Isola en rive droite provoquée par un régime d'écoulement fluvial.** Le profil en long post-crue 2020 montre l'arrêt d'un front solide en amont du pont de la déchetterie. De manière conjointe, on observe que le niveau des PHE est globalement horizontal avec une cote moyenne de 286,0 m. Il s'agit de deux points caractéristiques montrant sans équivoque la perturbation des écoulements par la contraction. Des expériences menées en laboratoire dans un canal à forte pente munie d'une contraction brusque permettent d'illustrer le phénomène qui s'est produit ici pendant la crue (cf. Figure 106).
- **Le pont Charabot a vraisemblablement joué un rôle temporaire dans l'inondation du quartier Isola.** Il a été obstrué par des flottants au cours de la montée de crue. L'inondation du quartier est au moins en montée de crue (et peut être en descente) liée à l'obstruction de cet ouvrage. Rappelons ici, que ce pont, reconstruit pendant la seconde guerre mondiale, était jusqu'alors un pont métallique sans travées intermédiaires. **Compte tenu du rôle de la contraction du pont déchetterie/vanne EDF sur les écoulements, le pont Charabot a été submergé au pic de crue. Les niveaux maximums atteints dans la traversée de Breil sont sans lien avec l'obstruction du pont Charabot par des flottants.** Le cas échéant, le profil en long des plus hautes eaux serait marqué d'une dénivelée entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ce qui ne semble pas être le cas.
- **La dérivation EDF en amont du pont supérieur, est responsable d'une baisse de la capacité de transport solide et d'une remontée localisée du niveau de fond de lit.** Les conduites n'ont pas été obstruées

pendant la crue. Au pic de crue, la cote maximale atteinte a été de 287,0 m avec un débit dérivé de l'ordre de 380 m³/s (calculs simples d'écoulement dans des conduites en charge).

- **La contraction du lit présente en aval immédiat de la piscine de Breil est également susceptible d'avoir entraîné une remontée des niveaux à l'amont pendant les premières heures de la crue.** Au pic de crue et postérieurement, les niveaux atteints jusqu'à la piscine de Breil ont été influencés par le niveau du front solide en amont du barrage EDF. À noter (cf. [Annexe 14](#)) des travaux de chenalisation du lit et de réduction de la bande active effectués dans les années 1960 au droit du camping visant, on le suppose, à permettre l'installation d'un centre de vacances UCPA (aujourd'hui fermé) dans le lit du cours d'eau. Il est certain que la réduction de la largeur du lit dans le secteur camping-piscine de Breil n'a fait qu'accroître les vitesses, hauteurs d'écoulement et désordres observés pendant la crue Alex.

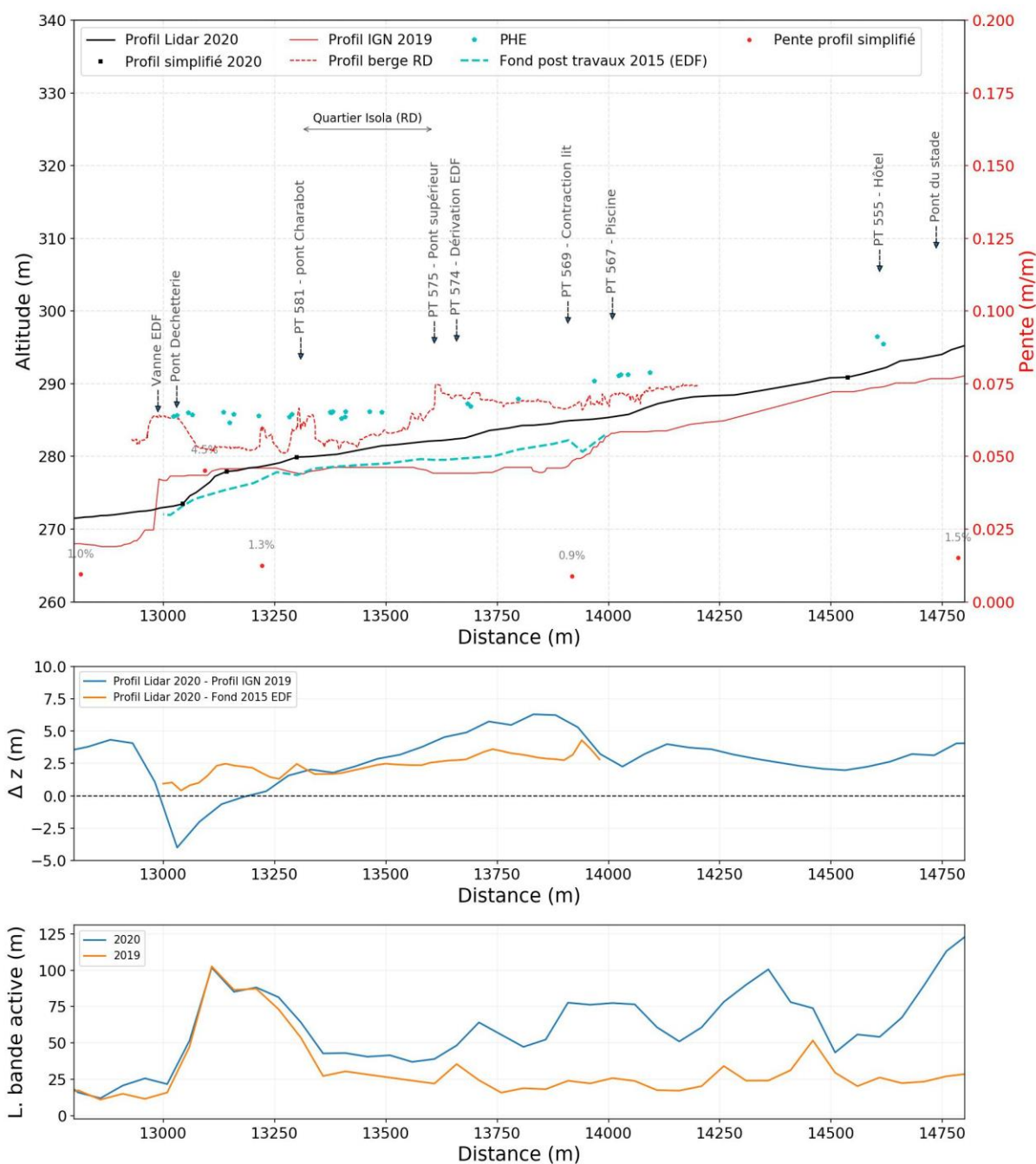


Figure 105 : Profil en long détaillé de la Roya dans la traversée urbaine de Breil-sur-Roya

A noter, selon les informations données par la commune de Breil sur Roya que la vanne a été relevée à 17h30. D'après EDF (communication orale), elle n'aurait pas été en charge pendant la crue. Nous n'avons pas pu récupérer d'informations de la part de l'exploitant concernant la section effectivement disponible au cours de la crue. La configuration du site est propice à la réalisation d'estimations de débit. Une estimation a été réalisée à Breil par les services RTM. Elle est intégrée au RETEX hydrologique piloté par le CEREMA.

Les observations réalisées précédemment indiquent donc un régime d'écoulement fluvial au plus fort de la crue entre le pont de la déchetterie et à l'amont du pont supérieur. Ceci n'exclut pas un régime d'écoulement torrentiel en début de montée de crue ou en fin de crue, avec les impacts associés, notamment les érosions latérales dans les secteurs de lit les plus contraints. Ces impacts se sont produits :

- Entre la piscine de Breil sur Roya et le pont supérieur avec destruction de la route communale en rive droite ;
- Entre le pont Supérieur et le pont Charabot avec érosions importantes de la berge en bordure de voirie communale.

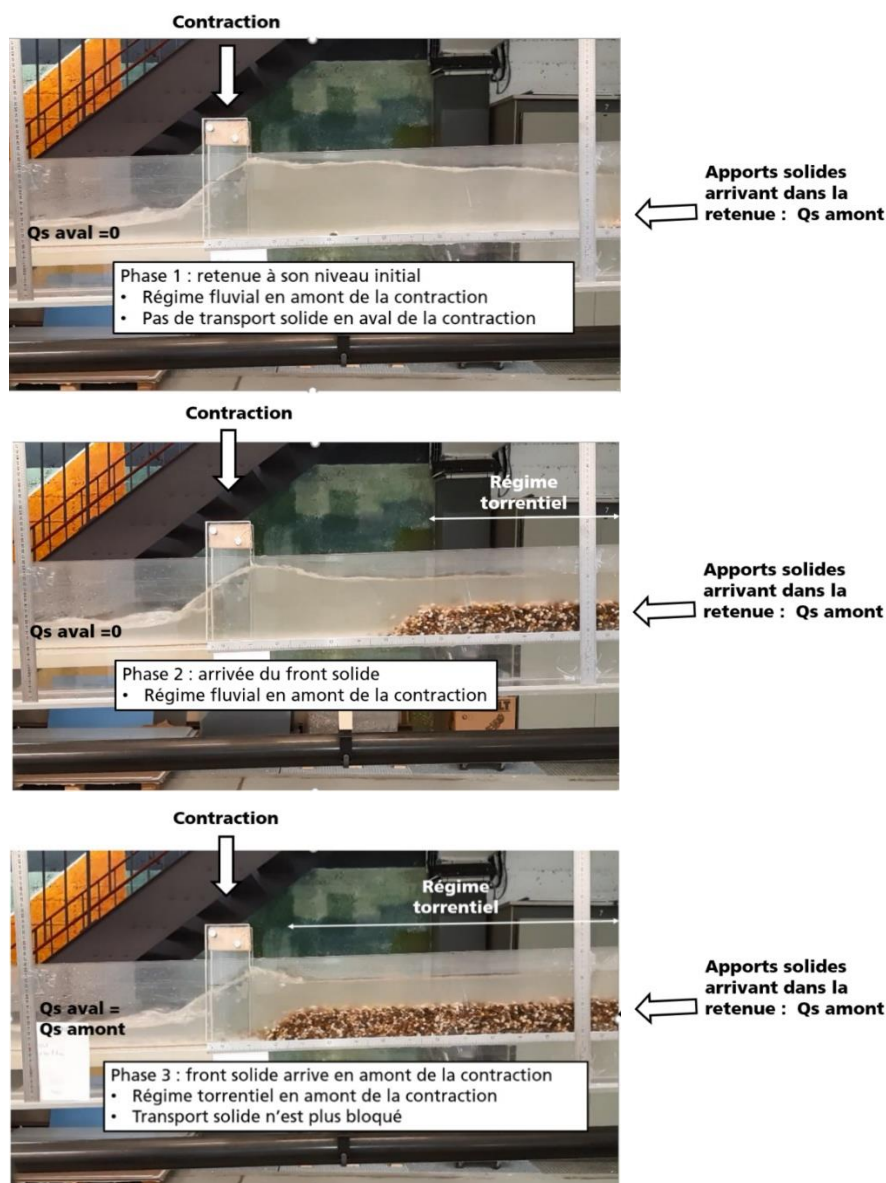


Figure 106 : Illustration de la dynamique du crue en présence d'une contraction avec fond inaffouillable en contexte torrentiel



▲ Photo 91 (haut) et Photo 92 (bas) : Roya en amont du Pont Charabot
Haut : 2014. Cliché RTM / Bas : 06/10/2020. Cliché RTM

5.4.11 Roya – Secteur aval de Breil sur Roya

Le profil en long de la Roya dans le secteur aval de Breil-sur-Roya est présenté en Figure 42. Il couvre le secteur allant de la vanne EDF jusqu'à l'aval de Piene Basse (PT 727).

Evolutions altimétriques observées pendant la crue Alex

La comparaison de profils en long montre un engravement généralisé sur l'ensemble du secteur étudié. On distingue cependant deux parties :

- **A l'amont du pont d'Arbousset, la pente longitudinale du fond lit post crue est faible, en moyenne comprise entre 0,8 et 1,3 %, avec une hauteur des dépôts est comprise entre 2 et 5 m.** La rupture de pente en aval du pont d'Arbousset et la contraction du lit ont joué le rôle de point de contrôle. On observe par ailleurs que le profil de dépôt de fin de crue présente des singularités (au droit du pont du Pertus, et du PT 614) avec des rehausses brutales du fond de lit. Celles-ci peuvent être le signe de contractions de la section d'écoulement (par exemple obstruction partielle par des flottants) ou de pertes de charges localisées liées au tracé très sinueux (deux coudes successifs en amont et en aval du PT 614) ;
- **A l'aval du pont d'Arbousset, le lit présente une pente nettement plus forte, comprise entre 1,3 % et 2,5 %. Malgré cela la hauteur des dépôts reste du même ordre de grandeur que celle observée sur le tronçon amont.** La rupture de pente à l'aval du domaine étudié (frontière France/Italie) a également joué le rôle de point de contrôle. On note en outre un profil de dépôt beaucoup plus lissé avec une seule singularité correspondant au coude situé en amont de l'huilerie de Piene Basse. Ici encore, il est fort probable que l'augmentation brutale du niveau du fond de lit à l'amont soit liée à un phénomène de contraction localisée de la section d'écoulement et/ou à une perte de charge hydraulique notable.

Le niveau d'engravement atteint en fin de crue reste surprenant et exceptionnel compte tenu de la faible largeur de lit, des berges souvent rocheuses et peu « rugueuses ». Et ce d'autant plus dans le tronçon aval qui présente une pente plus forte. Les hauteurs de dépôt sont confirmées à Piene Basse par des photos terrestres prises avant et après l'évènement le 03/10 au matin (cf. comparaisons avant après crue pages suivantes). Ceci laisse penser que la situation est transitoire et potentiellement associée à l'arrêt d'une vague sédimentaire s'étant propagée depuis l'amont. La vitesse relative des sédiments charriés étant très inférieure à celle des écoulements et de l'onde de crue, les dépôts observés dans ces secteurs de gorges peuvent avoir été laissés sur place par l'onde de crue. Il est vraisemblable qu'ils seront re-transportés par les crues suivantes et que ces secteurs de gorges retrouvent rapidement leur faciès usuel.

Evolutions de largeur de bande active observées pendant la crue Alex

La largeur de la bande active a doublé sur l'ensemble du secteur étudié passant en moyenne de 12 à 26 m (cf. tableau suivant). Le graphique d'évolution de la bande active superposé au profil en long (Figure 107) révèle deux secteurs où les élargissements sont plus importants : (a) dans le coude rive gauche situé à l'aval du pont d'Arbousset avec une maison en rive gauche disparue (ancienne terrasse alluviale ou dépôt en pied de versant entièrement érodée par la crue) ; (b) en amont rive gauche du pont du Pertus. Les élargissements sont dus à des affouillements du pied de versant qui ont provoqué des glissements. **A noter au niveau du pont de Pertus après la crue des accumulations de flottants contre les piles et sous le tablier. Celles-ci semblent avoir joué un rôle dans les désordres observés à l'amont en rive gauche. Elles peuvent aussi avoir un lien avec l'augmentation des niveaux de fond de lit observés en amont.**

Il est vraisemblable que les glissements de versant survenus au cours de la crue aient largement contribué à la rehausse des niveaux de fond de lit.

On notera en outre en aval immédiat de la frontière la destruction du pont romain Fanghetto à Olivetta situé dans une section d'écoulement particulièrement contrainte (cf. photos 82 à 84). Cette destruction qui illustre le caractère exceptionnel des écoulements, semble peu compatible avec les périodes de retour de débits estimées dans le RETEX hydrologique.

Profil en travers	Limites	Pente moy (m/m)	BA 2018 (m)	BA 2020 (m)	Δz 2020-2019 (m)
PT 588 à 657	Vanne EDF à coude aval pont d'Arbousset	0,013	12,6	25,7	3,5
PT 658 à 727	Aval coude pont d'Arbousset à PT 727	0,017	12,2	25,3	3,4
Ensemble		0,015	12,4	25,5	3,5

Tableau 32 : Synthèse de l'évolution de la largeur de bande active et du niveau de fond de lit de la Roya
Aval de traversée urbaine de Breil sur Roya

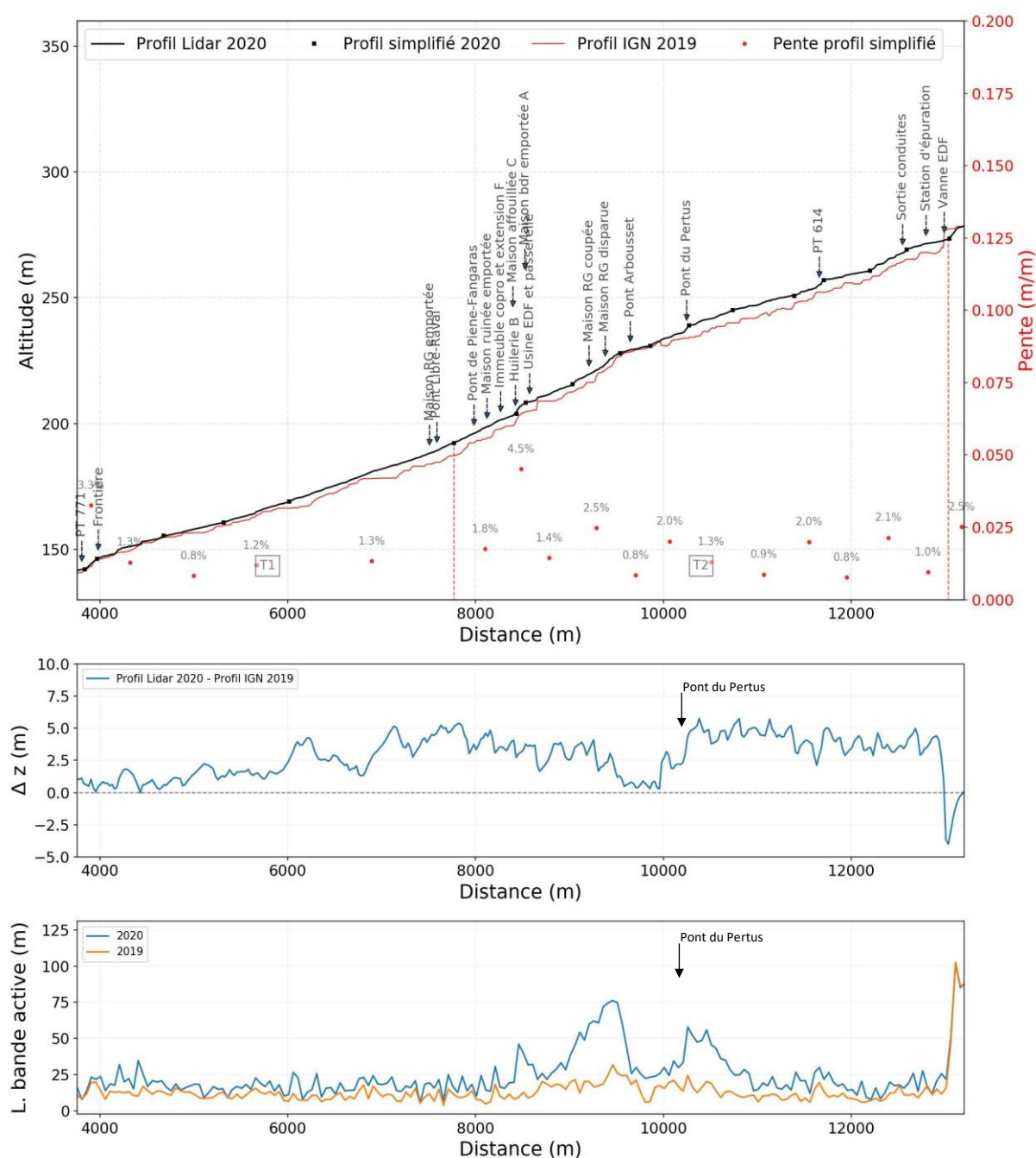


Figure 107 : Profil en long détaillé de la Roya en aval de Breil-sur-Roya

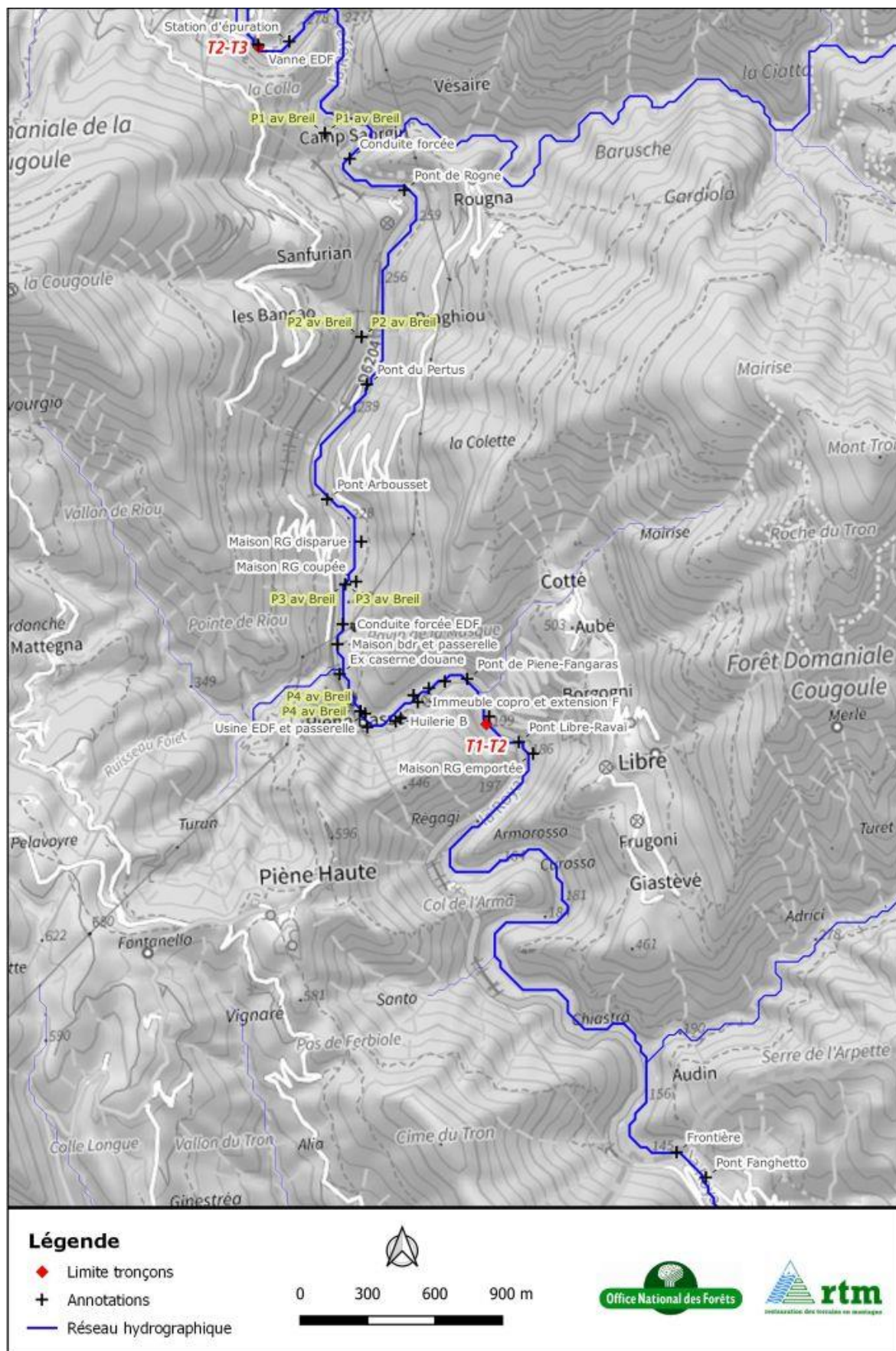


Figure 108 : Vue en plan sur le tronçon aval de Breil sur Roya



▲ Photo 93 (haut) et Photo 94 (bas) : Illustration de la remontée des niveaux au droit de Piene Basse (Entre Passerelle EDF et huilerie). Haut : google street view 2010 / Bas : capture vidéo 03/10/2020



▲ Photo 95 (haut) et Photo 96 (bas) : Illustration de la remontée des niveaux au droit de Piene Basse (Passerelle et seuil EDF). Haut : google street view 2010 / Bas : cliché 03/10/2020, source internet



▲ Photo 97 (haut) et Photo 98 (bas) : Illustration de la remontée des niveaux au droit de Piene Basse (Passerelle et seuil EDF). Haut : cliché 2007, source AD06 / Bas : cliché 06/2021, source ONF-RTM



▲ Photo 99 (haut), Photo 100 (milieu), Photo 76 (bas) : Illustration de la remontée des niveaux au droit de Pienne Basse (Huilerie) Haut : capture d'écran Google Street View 2010 - Milieu : capture vidéo 03/10/2021 – Bas : cliché ONF-RTM 05/2021



▲ Photo 101 (haut) et Photo 102 (milieu) Photo 103 (bas) : Illustration de la remontée des niveaux au droit du pont Fanghetto Haut : google street view 2011 / Milieu : pendant la crue source internet <https://www.facebook.com/EmissionLaPlaceDuVillage/photos/pcb.1756186747880700/1756185154547526/?type=3&theater> / Bas : google street view 07/2021



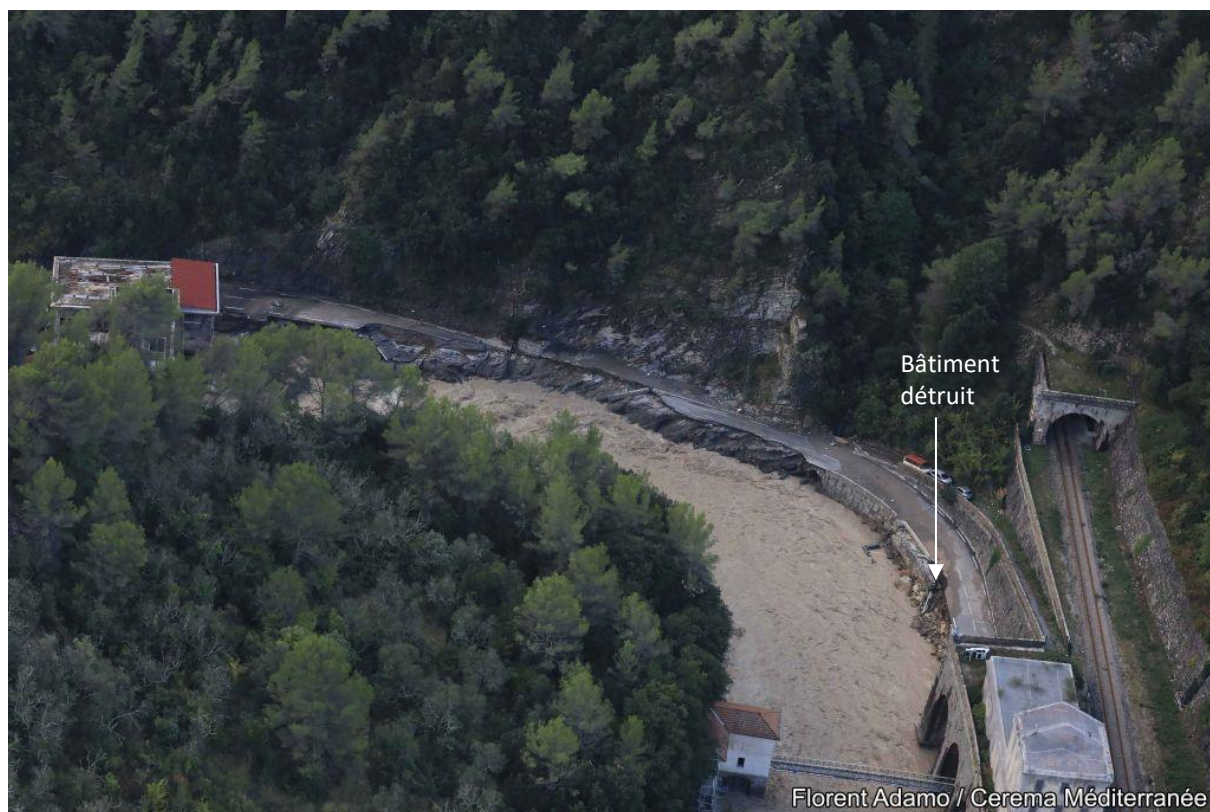
▲ Photo 104 : Roya en aval de Breil sur Roya. Entre Vanne EDF et rejet des conduites de dérivation
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 108, ref. P1



▲ Photo 105 : Roya en aval de Breil sur Roya. Pont du Pertus
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 108, ref. P2



▲ Photo 106 : Roya en aval de Breil sur Roya. Conduite forcée EDF
 Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 108, ref. P3



▲ Photo 107 : Roya en aval de Breil sur Roya. Coude à l'amont de l'Huilerie
 Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 108, ref. P4



▲ Photo 108 : Roya en aval de Breil sur Roya. Aval de l’Huilerie
Cliché : F. ADAMO, CEREMA. Localisation : cf. Figure 108, réf. P5

6 BOIS FLOTTANTS ET EMBÂCLES : ANALYSE DES ZONES SOURCES ET DES TRANSFERTS

L'activité géomorphologique extraordinaire associée à la tempête Alex a sollicité et mobilisé de grandes quantités de bois flottants issus des ripisylves des cours d'eau actifs. Il a par ailleurs été relevé que de nombreux ponts ont été détruits, notamment les ponts étroits et/ou équipés de piles de rivières. La présence de grands flottants peut perturber les écoulements et le transport solide. Quand de grands flottants obstruent des ouvrages tels que les ponts, le risque de dommage par affouillement et contournement augmente significativement. Il est donc intéressant d'analyser et de comprendre la dynamique et la mobilité des grands flottants pendant les crues majeures afin d'anticiper leur transport, de concevoir des ouvrages transparents, de promouvoir une gestion du corridor fluvial qui maximise leur régulation naturelle et, en dernier ressort, de mettre en place des pièges à flottants pour protéger les ouvrages critiques inadaptés et inadaptables.

L'objet de cette section est de quantifier la quantité de bois flottant ayant été arrachée, transférée puis déposée au cours de la crue à l'échelle du bassin versant français de la Roya.

Avertissement au lecteur : La plupart des analyses présentées dans les chapitres précédents font appel à des approches classiques utilisées dans le cadre des études des cours d'eau torrentiels (à l'exception peut-être des analyses des taux de dommages aux enjeux qui, dans le cadre torrentiel, relèvent encore majoritairement du domaine de la recherche). Le bois flottant et les problèmes d'embâcles sont par contre un domaine encore très peu couvert par les études d'ingénierie. L'analyse des flux de bois flottant présentée dans ce chapitre a donc nécessité de nombreux développements ce qui justifie une présentation beaucoup plus longue de l'approche et des méthodes utilisées.

6.1 DONNEES UTILISEES

Les jeux de données suivants ont été utilisés :

- Cartographie du contexte :
 - o Polygones de fond de vallée digitalisés par Gabriel Melun (OFB). Objectif : support de segmentation du réseau hydrographique en tronçons homogènes de 200 m de long ;
 - o Polygones de bande actives *ante*-Alex digitalisés par l'ONF-RTM. Objectif : illustration de l'élargissement de la bande active ;
 - o Localisation des ponts et ouvrages transversaux par INREA et l'ONF-RTM. Objectif : contextualiser les zones de dépôts et d'érosion de la ripisylve ;
- Analyse des zones contributrices :
 - o Polygones de bande actives *post*-Alex digitalisés par Gabriel Melun (OFB). Objectif : estimation des surfaces érodées ;
 - o Polygones des zones boisées issues de la BD Forêt V2 de l'IGN⁸. Objectif : estimation des surfaces boisées ;
 - o Données de peuplement forestiers de l'IFN⁹ (Inventaire Forestier National). Objectif : estimation du nombre de tiges par hectare et du volume de bois par hectare ;

⁸ Cette base de données fournit des polygones relevant les zones boisées d'une étendue dépassant 5000 m² ainsi que des éléments sur le type de peuplement (feuillus, conifères, etc.), sa densité (fermée, ouverte, lande) ainsi que l'essence majoritaire. Elle est téléchargeable depuis le 1^{er} janvier 2021 sur le site : <https://geoservices.ign.fr>.

⁹ IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005 et suivantes, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020. Cette base de données fournit des informations concernant des placettes et leur peuplement forestier : arbres sur pied vivants et morts (circonférence, hauteur totale, volume du tronc, essence, nombre d'éléments similaires par hectare).

- o Levé LiDAR d'urgence IGN *post-Alex* : modèle numérique de surface (MNS) et modèle numérique de terrain (MNT). Objectif : localiser automatiquement les arbres situés le long du corridor de la rivière afin de mesurer les densités de peuplement et hauteurs des individus ;
- o Nuages de point Lidar 25pts/m² 2018 SIGMNCA. Objectif : analyse des boisements sur les plaquettes IFN pour correction des analyses sur LiDAR d'urgence ;
- Analyse des dépôts :
 - o Orthophotographies d'urgence IGN *post-Alex* (résolution : 10 cm). Objectif : support de digitalisation manuelle des dépôts de flottants.

6.2 SEGMENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE EN TRONÇONS

Afin de mener une analyse longitudinale, une segmentation du cours d'eau a été opérée dans l'esprit classique des analyses longitudinales (Roux *et al.*, 2015) :

- a. Vérification du polygone délimitant le fond de vallée ;
- b. Extraction de la centerline, contrôle et correction manuelle ;
- c. Tracé des transects orthogonaux à la centerline et d'espacement régulier (200 m), contrôle et correction manuelle ;
- d. Découpage de tronçons homogènes sur la base de ces transects.

Des polygones de fond de vallée identifiés par leur point kilométrique (PK) sont ainsi disponibles pour estimer l'évolution longitudinale des différentes grandeurs mesurées. Lors de la digitalisation du bois flottant, il est à noter que la couche supportant le polygone fond de vallée a été contrôlée et modifiée afin de comprendre les récents élargissements post-crue. Cette manipulation permet d'intégrer les pieds de versants ayant été érodés par la crue. Par ailleurs, le travail de digitalisation s'est focalisé sur le bois flottant transporté par la crue et provenant en grande majorité de la ripisylve. Les dépôts de chablis, i.e., de bois morts localisés dans l'emprise des autres processus entraînant une mobilisation du bois frais ou du bois mort, notamment à l'œuvre sur les versants (processus de glissements de terrains), n'ont pas été compris dans la digitalisation dans le but de ne pas prendre en compte les forêts sur les versants.

6.3 ANALYSE DE LA PRODUCTION DE FLOTTANTS

Les volumes de flottants produits sont estimés au droit de chaque tronçon ou affluent par le produit de la surface de boisement contributrices multiplié par les densités de peuplement [tiges/ha] ou les volumes sur pied [m³/ha].

6.3.1 Surfaces de boisement contributrices

Les zones contributrices à la production de flottants naturels dans les bassins versants de montagne sont principalement de trois types (OFEV, 2019) : glissements de terrains, affluents torrentiels et érosions de berges. A cela s'ajoute le recrutement de flottants anthropiques : dépôts de grumes d'exploitation forestière ou bois de scieries. Bien que des glissements de terrain relativement nombreux aient été inventoriés sur le bassin versant de la Roya, leur contribution au bilan global des flottants est marginal : les surfaces concernées ont une extension faible par comparaison avec les surfaces mobilisées par érosion de berge au niveau des affluents et du cours principal. Il n'est pas non plus relevé d'apport majeur d'origine anthropique.

Les surfaces des zones contributrices sont donc principalement estimées via le croisement entre les polygones de bande active et les polygones des zones boisées de la BD Forêt V2. Les cours d'eau du bassin versant de la Roya étant en règle générale étroits, ils ne sont souvent pas clairement visibles sur les orthophotos avant crues (voir l'atlas cartographique en annexe du mémoire de Flipo 2021). En première approche, il a donc été décidé de négliger la bande active avant crue : la largeur de cette dernière est inférieure à marge d'incertitude du travail.

Les linéaires, superficies de bande active post-crue, la largeur moyenne associée et les superficies de boisement érodées sont rapportées dans le Tableau ci-dessous. **Sur un linéaire total de 54.7 km, une bande active de 188 ha s'est développée (équivalente à une largeur moyenne de 34 m sur l'ensemble du linéaire). Une superficie totale de l'ordre de 110 ha de boisement aurait ainsi été érodée par les écoulements à l'échelle du bassin versant de la Roya situé en France.**

Cours d'eau	Roya amont	Viévolà	Refrei	Levensa	Bieugne	Caïros	Lavina	Roya
Longueur à l'axe de la vallée [km]	1,5	1,7	2,9	2,9	4,9	5,9	2,2	36,7
Bande active post-crue [ha]	7,2	12,1	8,3	6,9	21,5	8,8	5,5	117,6
Largeur moyenne [m]	48	69	29	24	45	46	25	32
Zones boisées érodées [ha]	6,0	6,4	5,8	3,2	11,6	8,1	2,8	68,3

Tableau 33 : Quantiles des hauteurs des arbres détectés, diamètres et longueur des flottants prédits et mesurés

L'ensemble du lit de la Roya depuis la frontière Italienne jusqu'aux gorges en amont de Viévolà (où la superficie du bassin versant est de l'ordre de 6 km²) a été traitée. De même, les bandes actives de six torrents affluents ayant été les plus actifs (Lavina, Caïros, Bieugne, Levensa, Refrei et Torrent de la Morte à Viévolà), ainsi que le cours supérieur de la Roya, ont été digitalisées par Flipo (2021). Les apports liés aux affluents n'ayant que marginalement modifier leur bande active ont été négligés.

A noter que le cours supérieur de la Bieugne, en amont du barrage des Mesches, n'a pas été intégré dans les surfaces contributrices. Les formations boisées du vallon de Casterino sont relativement peu denses et le torrent a divagué entre les surfaces boisées. Ni les volumes produits, ni les volumes déposés n'ont été estimés.

Le vallon du Caïros a au contraire significativement recruté sa ripisylve assez dense. Le linéaire couvert par le LiDAR d'urgence (1,9 km) a permis de caractériser la largeur moyenne de bande active aval ($\approx$ 46 m). Des images drone mises à disposition gracieusement par l'entreprise Drone-De-Regard (<http://www.drone-de-regard.fr>) ont permis d'estimer le linéaire actif additionnel de l'ordre de 4 km avec une surface contributive additionnelle estimée à sensiblement 13 ha (bande active semblable au bief terminal, soit $\approx$ 46 m sur sensiblement 1,5 km puis moitié moindre sur 2,8 km).

6.3.2 Peuplement forestier des zones contributrices

Deux sources de données différentes ont été combinées pour estimer les peuplements des zones contributrices :

- Les données l'IFN : données de terrain précises mais éventuellement peu représentatives de la ripisylves car situés plutôt sur les versants ;
- Des extractions automatiques du LiDAR : données générées par un algorithme, donc entaché de plus d'incertitudes, mais mesurant les caractéristiques de la ripisylve résiduelle donc plus représentatives.

La démarche a en premier lieu été de mener deux estimations indépendantes utilisant les deux sources d'informations (voir Flipo, 2021). Dans un second temps, les deux sources de données ont été combinées pour le présent rapport.

6.3.2.1 Analyses de l'Inventaire Forestier National (IFN)

Les données de l'IFN sont levées à l'échelle de placettes dont la localisation est connue avec une précision de ± 900 m. Afin d'analyser des données forestières de boisement relativement similaires aux forêts du bassin versant, nous avons extrait les données relatives à la Sylvo-écorégion « H41 – Alpes intermédiaires du Sud »¹⁰ laquelle inclue la Roya et la Vésubie. Cette dernière comprend 490 placettes uniques, certaines ayant été relevées plusieurs fois sur la période 2005-2019. Ces 490 placettes sont toutefois localisées pour leur grande majorité sur les versants et non dans la ripisylve. On peut donc s'interroger sur leur représentativité des peuplements forestiers de fond de vallée recrutés par la crue.

Le nombre de tiges par hectare et le volume de bois sur pied ont été évalués sur la base des caractéristiques des arbres et de leur coefficient de pondération représentant le nombre d'arbres équivalents par hectare de forêt. Pour évaluer le volume de bois, c'est la formule « EMERGE » qui a été utilisée car elle prend l'ensemble du houppier en compte (Deleuze et al., 2014), tandis que les volumes de bois « tige forte » fournis directement par l'IFN se cantonnent au volume du tronc. A partir de ce jeu de données sont extrait des valeurs de densité de peuplement et volumes sur pied caractéristiques de la région.

Les forêts de la zone présentent une grande variabilité de densité de peuplement et de volume sur pied (Figure 109), aussi bien les placettes pour lesquelles la proximité du réseau hydrographique est inconnue (bleu foncé) que celles éventuellement représentatives des ripisylves (beiges à bleu). L'analyse d'autres données sources plus représentatives et potentiellement moins variables a donc été menée via les données LiDAR.

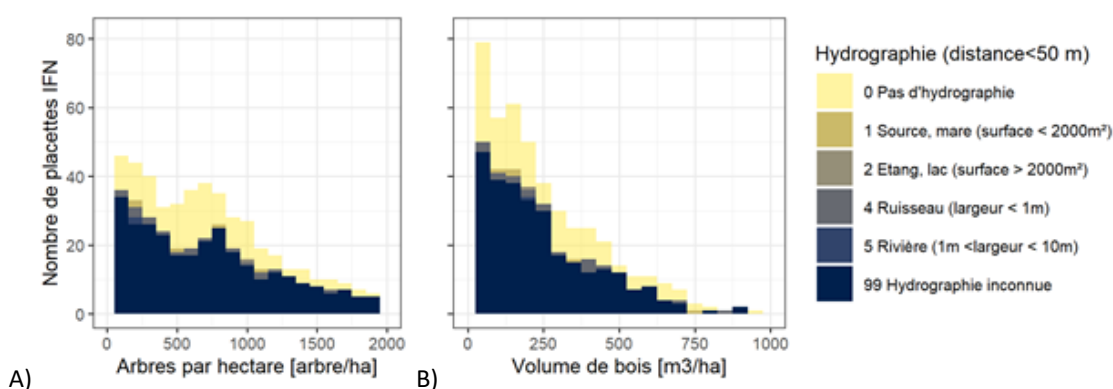


Figure 109 : Distributions des A) nombres d'arbres par hectares et B) volume de bois sur pied par hectares dans la Sylvo-Eco-Region H41 « Alpes intermédiaires du Sud » (Données IFN 2005-2018, <https://inventaire-forestier.ign.fr/>)

Pour ce travail, les valeurs hautes, basses et intermédiaires ont été extraites sur les 128 placettes situées dans le bassin versant de la Roya. Les valeurs retenues sont présentées au Tableau 34.

6.3.2.2 Analyse des données LiDAR

En complément des données forestières, une autre méthode indépendante a été mobilisée. Les données LiDAR récoltées par l'IGN ont pu être traitées à partir du programme R. Le script se base sur la librairie LidarTree (Monnet, 2020) qui permet une détection automatique des arbres sur des données LiDAR. Le script original a été adapté pour mener une analyse sur l'ensemble du fond de vallée élargi d'une bande tampon de 100 m.

Le script mène une série d'opérations, en synthèse : (i) calcul du MNC (modèle numérique de canopée = modèle numérique de surface – modèle numérique de terrain, théoriquement seulement sur les points de végétation et de sol, si la catégorisation des points LiDAR est entachée d'erreur, le MNC l'est aussi), (ii) localisation des points hauts considérés comme étant le sommet des arbres, (iii) segmentation des arbres (délimitation des contours du

¹⁰ Plus d'informations à propos de cette SER : https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/H_41.pdf

houppier), (iv) extraction de la hauteur totale h_{tot} (et d'autres paramètres : volume apparent du houppier, surface projetée au sol) et enfin (v) export de la localisation des arbres sous forme de fichier SIG (voir atlas en annexe de Flipo, 2021).

Une étape de contrôle sommaire a permis d'écarter plus de 5000 points douteux (hauteur trop forte, détection de lampadaire, maisons, dépôts d'embâcle, berge abrupte) de l'échantillon de plus de 183 000 arbres détectés. La table attributaire comprend chaque arbre détecté, sa hauteur et son volume de bois flottants estimé par une régression moyenne proposée par Quiniou and Piton (2021) sur les plus de 605 000 feuillus mesurés par l'IFN : $V_{BF} = 1.46 \cdot 10^{-5} \cdot h_{tot}$, avec h_{tot} la hauteur totale de l'arbre (m) et V_{BF} le volume solide (m^3) estimé via la formule EMERGE (Figure 110).

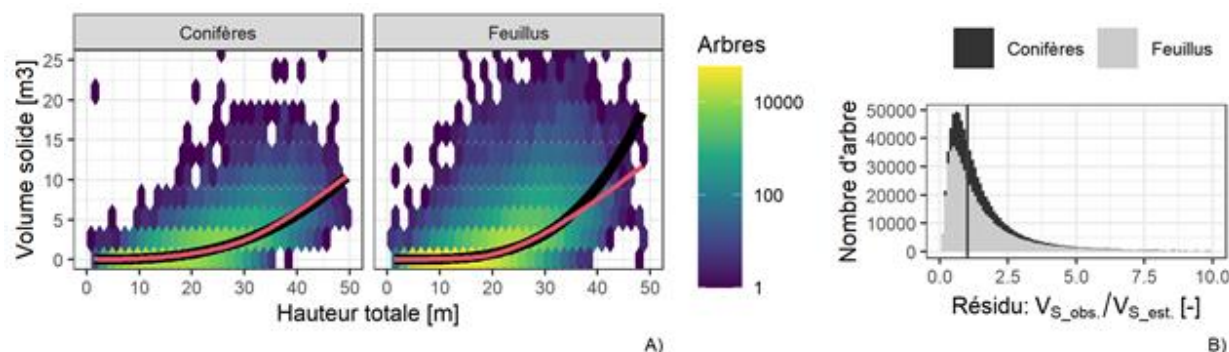


Figure 110 : Calibration des lois volume de bois flottant par arbres = $f(\text{hauteur totale})$: A) distribution des valeurs, B) distribution des résidus des équations

Le nombre d'arbres par hectare et le volume de bois par hectare ont été estimés en croisant la couche de points avec les polygones de la BD Forêt V2 compris dans la zone d'extraction (fond de vallée + bandes tampons de 100 m) auxquels a été retirée la bande active (les arbres y ont disparu et ne peuvent donc pas être détectés sur la donnée LiDAR post-crue). Le nombre d'arbres identifiés et les volumes sur pied de chaque polygone ont finalement été normalisés par la surface du polygone pour fournir des nombres de tiges par hectares et des volumes en m^3/ha . Les polygones résiduels de surface $< 5\,000\,m^2$ n'ont pas été conservés pour cette évaluation, car ils ne comprenaient pas suffisamment d'arbres.

6.3.2.3 Comparaison des approches et combinaison

Trois calculs sont systématiquement menés quand les données sont incertaines : une estimation intermédiaire accompagnée d'estimations haute et basse. La médiane des valeurs de chaque source de donnée est utilisée dans l'estimation intermédiaire des peuplements. Les quantiles 25% et 75% ont aussi été systématiquement calculés pour être réutilisés dans les estimations hautes et basses des volumes produits. Le Tableau 34 montre que les estimations IFN sont très supérieures aux estimations basées sur le LiDAR. Le nombre de tiges détectées varie peu comparé aux données IFN. Les volumes sur pied varient plus mais la gamme reste inférieure aux mesures IFN. Une analyse visuelle a permis de mettre en évidence que les scripts de traitement des données LiDAR ne détectaient pas une certaine partie des arbres. Ces scripts sont optimisés pour détecter les formes de conifères, ces derniers se démarquant mieux que la canopée d'aspect « moutonnée » des forêts de feuillus. Il existe donc un biais dans les densités forestières détectées sur le LiDAR.

Une opération de combinaison des deux jeux de données a donc été lancée : les scripts de détection des arbres ont été appliqués au droit des placettes IFN localisées dans l'emprise du LiDAR 2018 de la MNCA (levé de plus large emprise que le LiDAR d'urgence). Dans la mesure où les localisations des placettes sont connues à $\pm 900\,m$, la détection a été menée dans des cercles de rayon 900 m centrés sur les coordonnées des placettes fournies par l'IFN. La détection est donc menée sur une zone plus grande que la placette réellement mesurée. On fait l'hypo-

thèse que les densités forestières mesurées au droit des placettes sont représentatives des boisements des alentours. Les volumes détectés ont été rapportés à la superficie de boisement de la BD Forêt V2 comprise dans ces cercles (les polygones de « Landes » et de « Formations herbacées » ont été exclues).

L'analyse des 168 placettes IFN situées au sein de l'emprise du LiDAR 2018 MNCA est montrée Figure 111. Elle met bien en évidence que les scripts automatiques sous-estiment les densités et volumes sur pied mesurés par l'IFN. Les volumes sur pied estimés via le LiDAR sont en moyenne 2,17 fois inférieurs aux volumes mesurés par l'IFN ($V_{BF,Lidar} = V_{BF,IFN} / 2.17$). Bien que la dispersion des points soit forte, la corrélation n'est pas si mauvaise ($r^2 = 0.54$). La comparaison des prédictions des données IFN via les données LiDAR corrigés du facteur 2.17 : $V_{BF,Pred} = 2.17 * V_{BF,Lidar}$ avec les volumes réellement mesurés par l'IFN montre que 50% de l'échantillon est dans la gamme 0.57 – 1.82 (i.e., les quantiles du ratio $2.17 * V_{BF,Lidar} / V_{BF,IFN}$ sont $res_{25\%} = 0.57$, $res_{50\%} = 1.00$ et $res_{75\%} = 1.82$). L'incertitude sur le facteur de correction est intégrée à l'analyse par la suite en considérant une approche conservatrice : l'estimation basse des volumes sur pied correspond à la densité basse mesurée, corrigée par le facteur bas ($V_{BF,Pred,bas} = 2.17 * V_{BF,Lidar,25\%} * res_{25\%} = 51 * 2.17 * 0.57 = 62$). Symétriquement, l'estimation haute de volume sur pied intègre la valeur haute de densité mesurée via la LiDAR et le facteur de correction haut ($V_{BF,Pred,haut} = 2.17 * V_{BF,Lidar,75\%} * res_{75\%} = 114 * 2.17 * 1.82 = 451$).

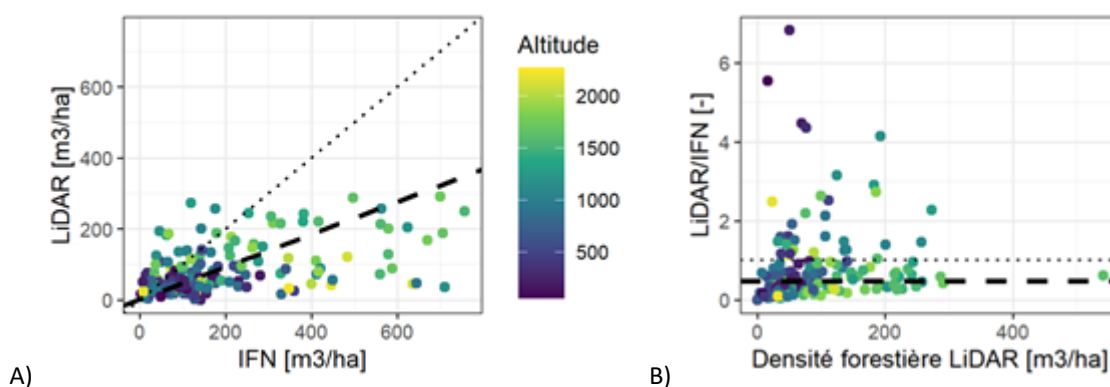


Figure 111 : Comparaison des volumes de bois sur pied estimé par l'IFN et par l'analyse des LiDAR sur les 169 placettes IFN situées dans l'emprise du LiDAR 2018 MNCA : A) distribution des points, B) résidus du modèle linéaire (ligne pointillée : ligne de parfaite égalité, ligne tiretée : modèle linéaire de coefficient de proportionnalité 2.17)

Dans la suite de l'analyse, les deux sources de données sont donc combinées en menant à bien une détection LiDAR dans les zones d'intérêt, les volumes sur pied détectés sont ensuite corrigés par un facteur moyen et des facteurs différents pour les estimations hautes et basses. Les valeurs finales de volume sur pied sont indiquées dans le Tableau 34.

Cette analyse très exploratoire nous amène à retenir une valeur moyenne de bois flottant de 176 m³/ha de forêt (intervalle d'incertitude : 62 – 451 m³/ha) et un nombre moyen de 150 tiges/ha de forêt (intervalle d'incertitude : 133 - 166 tiges/ha)

Paramètre	Source	Zone de mesure	n	Estimations		
				Basse	Intermédiaire	Haute
Densité de peuplement [tige/ha]	IFN	SER H41	128	337	628	885
Densité de peuplement [tige/ha]	LiDAR	(Fond de vallée + 100 m) x BD Forêt V2	443	133	150	166
Volume sur pied [m ³ /ha]	IFN	SER H41	128	92	208	343
Volume sur pied [m ³ /ha]	LiDAR	(Fond de vallée + 100 m) x BD Forêt V2	443	50	81	114
Volume sur pied [m ³ /ha]	LiDAR débiaisé	(Fond de vallée + 100 m) x BD Forêt V2	443	62	176	451

Tableau 34 : Comparaison des densités (volumiques) et des densités de peuplement des différentes sources (n : placettes ou formations boisées)

6.3.3 Analyse des dépôts de flottants

6.3.3.1 Localisation des flottants

La résolution de 10 cm des orthophotos IGN d'urgence, particulièrement fine, a permis de mener à bien une digitalisation manuelle des troncs et branches d'arbres déposés dans les bandes actives sous la forme de poly-lignes. La précision de la mesure est dépendante de la résolution des images ainsi que de la visibilité des pièces sur les photos. Les troncs partiellement ensevelis, ceux appartenant à des accumulations de bois formé de plusieurs couches ou ceux déposés sous des arbres ayant tenu et dont le houppier occulte l'image ne sont pas complètement mesurés. Il semble donc raisonnable de penser que les longueurs mesurées sont probablement précises à ± 50 cm et qu'elles constituent une borne inférieure (elles sont soit correctes, soit inférieures à la longueur réelle partiellement cachée).

La Figure 112 illustre le travail au niveau du Suquet sur la Vésubie à une échelle proche de celle utilisée pour la digitalisation. Ce travail a été mené sur 54,7 km au sein du bassin versant de la Roya : 36,7 km du cours principal et 18 km d'affluents. **AUn total, 16 868 pièces indépendantes formant une longueur totale de 32.89 km de troncs et branches ont été identifiées** (Tableau 35).



Figure 112 : Exemple de dépôts d'embâcles sur les orthophotos d'urgence : A) image brute et B) exemple des embâcles digitalisés

Cours d'eau	PK de la confluence à la frontière	Longueur à l'axe de la vallée (L)	Superficie bande active (S)	Largeur moyenne (S/L)	Nombre de bois flottants digitalisés	Longueur cumulée bois flottants	Nombre de bois flottants par kilomètre	Nombre de bois flottants par hectares	Superficie boisée érodée (BD Forêt V2)
	[km]	[m]	[m²]	[m]	[pièces]	[m]	[pièces/km]	[pièces/ha]	[m²]
Roya	-	36 700	1 175 803	32	12 382	24 777	337	105	682 888
Lavina	9,4	2 201	54 860	25	346	465	157	63	27 874
Caïros	17,2	1 915 + 4 000	87 912*	46*	612*	1 035*	320*	70*	67 535 + 13 000
Bieugne	25,6	4 901	214 594	45	926	1 850	189	43	115 538
Levensa	26,4	2 885	68 886	24	332	513	115	48	32 211
Refreï	30,8	2 904	82 917	29	635	865	219	77	58 184
Viévol	34,8	1 736	120 699	69	718	1 692	414	59	64 460
Roya am.	36,7	1 477	71 697	48	917	1 694	621	128	60 348
Somme	-	54,7 km	187,7 ha	-	16 868	32,89 km	-	-	110,9 ha

* Les valeurs suivies d'un * correspondent aux mesures réalisées sur le bief terminal du Caïros, dans la zone couverte par le LiDAR IGN d'urgence. En amont, des estimations sommaires sont fournies basées sur l'analyse d'images drones.

Tableau 35 : Synthèse des quantités des flottants déposés dans les différents cours d'eau

Les affluents ayant produit le plus – Roya amont, Bieugne, Viévol – ont déposé entre 900 et 700 bois flottants dans leur lit, tandis que les affluents moins actifs – Réfreï, Caïros, Lavina et Levensa - ont des dépôts compris entre 600 et 300 pièces. Dans la majorité des secteurs, l'ordre de grandeur du nombre de flottants déposés est inférieur à 200 pièces / km. Certains secteurs sont toutefois plus chargés, e.g., plus de 600 pièces / km en Roya amont.

Le croisement des polygones des tronçons avec les centroïdes des polygones représentant les troncs déposés permet le comptage de flottants par tronçon. Le nombre de bois flottants déposés dans chaque tronçon est comparé à la largeur de la bande active dans la Figure 113. La dispersion reste large mais le nombre de flottants déposés semble bien augmenter avec la largeur de la bande active. On constate l'absence de tronçons d'une largeur de moins de 10-20 mètres ayant stocké plus de 150-200 éléments. Les secteurs étroits ne sont pas propices aux dépôts. A l'inverse, la tendance des dépôts à être souvent forts (>50-100 éléments) se manifeste dans les secteurs larges (Largeur > 50 m). Aucun tronçon de largeur supérieure à 70 m n'a de dépôt inférieur à 100 pièces. Ce diagramme n'analyse cependant que les dépôts au niveau de la Roya, excluant ses affluents.

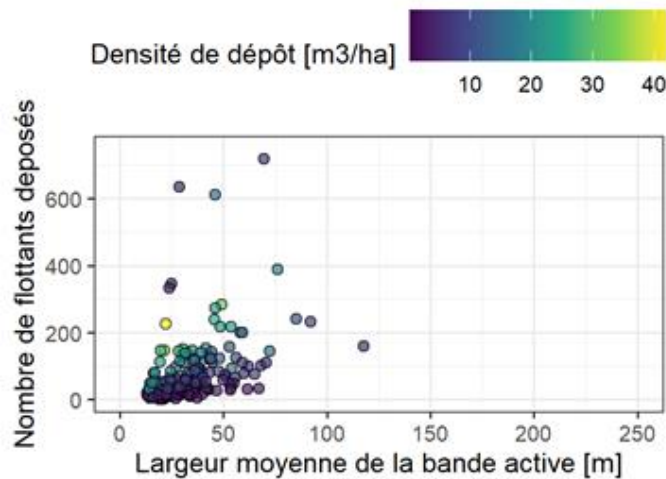


Figure 113 : Nombre de flottants en fonction de la largeur de bande active

Une hypothèse à explorer dans les analyses à venir serait la corrélation entre une importante quantité de flottants déposés dans les fonds de vallée étroits et la présence de ponts. Cette démonstration s’inscrirait dans une démarche de connaissance et de compréhension accrue du phénomène.

6.3.3.2 Longueur des flottants

La digitalisation d’un tel échantillon de bois flottants est une bonne occasion d’étudier la distribution de la longueur des flottants. Le Tableau 36 compile les quantiles des divers échantillons rassemblés ou prédits dans le cadre de ce travail sur l’ensemble des arbres inventoriés (Roya et affluents).

Les flottants sont majoritairement des éléments courts (longueur médiane : 1.4 m, 75% des éléments < 2.1 m). Seul 10% des flottants font plus de 3.6 m, 5% plus de 5.2 m et 1% plus de 10 m. Ces pièces maîtresses sont une minorité au sein d’une multitude : bien que constituant seulement 1% de l’échantillon, il en a été dénombré plus de 1500.

Paramètre	Source	Quantile						
		0%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
Hauteur arbres (m)	LiDAR	5,0	8,9	13,0	17,5	21,5	24.4	30
Longueur des bois flottants mesurés (m)	Digitalisation	1,0	1,0	1,4	2,1	3,6	5,2	10,3
Longueur des bois flottants prédite (m)	Monte Carlo	0,1	1,2	2,1	3,4	5,1	6.5	9.6
Diamètre des flottants (m)	Digitalisation	0,11	0,16	0,19	0,23	0,25	0,26	0,30
Diamètre feuillus (m)	Monte Carlo	0,01	0,10	0, 16	0,25	0,36	0,44	0,65
Diamètre conifères (m)	Monte Carlo	0,02	0,13	0,20	0,29	0,40	0,48	0,69

Tableau 36 : Quantiles des hauteurs des arbres détectés, diamètres et longueur des flottants prédits et mesurés

6.3.3.3 Taux de réduction de la longueur des arbres : théorie et observations

La distribution des longueurs des flottants ayant été mesurée, il est intéressant de comparer ces observations avec les méthodes prédictives de ce paramètre. L'approche probabiliste de Quiniou et al. (2021) a été utilisée pour estimer la longueur des flottants sur la base des hauteurs des arbres sur pied. Il s'agissait de considérer que la longueur des bois flottants pouvait être prédite par la multiplication d'un coefficient de réduction (noté R) que multiplie la hauteur totale des arbres : $L = R * h_{tot}$

Cette méthode théorique est comparée avec les mesures des arbres digitalisés dans la Figure 114.

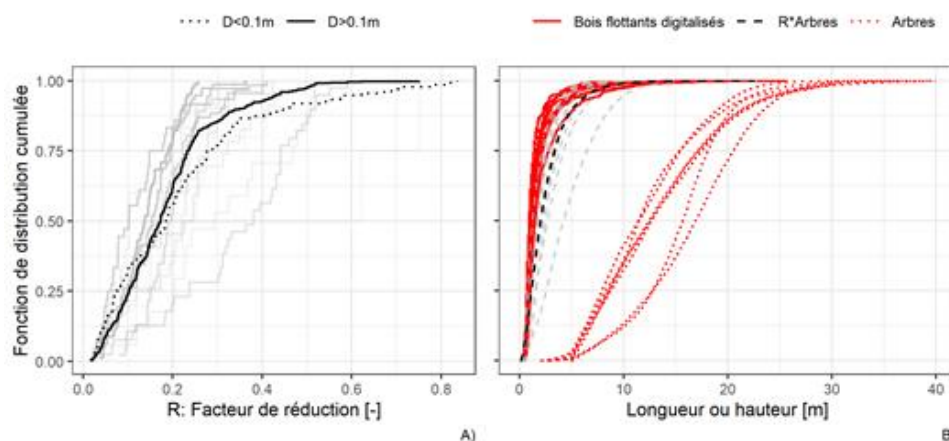


Figure 114 : A/ Distribution statistique du taux de réduction des bois flottants R tiré de Rickli et al. (2018) ; B/ Distribution statistique des hauteurs des arbres détectés dans le fond de vallée de la Roya et de ses affluents (pointillés rouges), et des longueurs de bois flottants prédites par tirage aléatoire (tirets gris et noirs) et mesurées par digitalisation (lignes continues rouges)

Les données ayant permis de tracer la Figure 114A sont tirées d'une étude menée par Rickli et al. (2018) après les crues de 2005 en Suisse. Les chercheurs ont mesuré sur le terrain la longueur et le diamètre du bois flottant déposé. Leur démarche a permis de reconstruire la valeur théorique de la longueur h_{tot} des arbres avant qu'ils ne soient cassés à travers des données et modèles forestiers. Le taux de réduction R est ainsi déduit par le ratio L / h_{tot} . La courbe noire continue de la Figure 114A représente l'ensemble de l'échantillon des éléments dont le diamètre est supérieur à 10 cm, les courbes grisées représentent les sous-échantillons associés à chaque cours d'eau inventorié. Elles montrent la variabilité spatiale du coefficient de réduction R entre les cours d'eau. La distribution des valeurs de R estimées sur les éléments plus fins est représentée en pointillés pour information.

On observe que l'immense majorité des valeurs de R sont inférieures à 0.5 et la grande majorité est inférieure à 0.3 montrant que la plupart des éléments de bois flottants sont significativement plus courts que la longueur du tronc d'origine : les flottants sont quasi-systématiquement 2 ($=1/0.5$) fois plus courts que l'arbre sur pied et en majorité 3 à 5 ($\sim 1/0.3 - 1/0.2$) fois plus courts. Ces courbes démontrent aussi qu'une certaine variabilité existe dans le taux de réduction. Rappelons qu'il s'agit d'un taux de réduction évalué sur de petits torrents Suisses, en une temporalité autre que celle de la tempête Alex.

La Figure 12B repose sur une comparaison entre les arbres détectés sur le LiDAR (pointillés, une courbe par cours d'eau : Roya ou affluents). On remarque que les arbres les plus hauts atteignent 30 à 40 mètres. Pour procéder à une prédiction de la longueur des bois flottant via l'équation $L = R * h_{tot}$ et sur la base de ces données et des valeurs de taux de réduction de la Figure 114A, un tirage aléatoire par approche Monte-Carlo a été adopté selon l'approche probabiliste proposée par Quiniou et al. (2021). La longueur des bois flottants ainsi prédite est assez courte pour la majorité des éléments (c.f. Tableau 36 : 1er quartile : 1,2 m, médiane : 2.1 m). Selon le tracé de cette courbe de simulation (courbes tirets pleine), la majorité des bois flottants potentiellement issus des boisements rivulaires du bassin de la Roya mesureraient moins de 10m de longueur.

Les courbes continues rouges de la Figure 114B correspondent aux distributions statistiques des flottants effectivement mesurés sur la Roya et ses affluents. La forme générale de la distribution est très similaire à celle prédite

par l'approche probabiliste. On constate à la comparaison des quantiles que les chiffres mesurés sont très légèrement inférieurs aux estimations probabilistes, l'ordre de grandeur est toutefois correct (Figure 114). Le taux de réduction observé sur la tempête Alex dans le bassin versant de la Roya semble donc un peu supérieur à celui observé sur les petits torrents Suisse par Rickli et al. (2018) mais l'ordre de grandeur et la distribution sont finalement assez similaires. Notons qu'une tendance inverse a été détectée sur la Vésubie. La moindre fréquence des gorges étroites occupées de très gros blocs formant des obstacles contre lesquels le courant a fracassé les flottants explique vraisemblablement cette observation.

Cette analyse démontre que les bois flottants mesurés sur le bassin versant de la Roya sont significativement plus courts que les arbres qui bordent le cours d'eau, typiquement d'un facteur 2 à 10, voire plus. Ceci explique que la majorité des flottants ne faisaient que quelques mètres de long.

6.3.3.4 Diamètre des flottants

La résolution des images était par contre trop limitée pour mener à bien une mesure systématique des diamètres des flottants. Cette donnée est toutefois nécessaire pour estimer le volume des flottants déposés en faisant l'hypothèse qu'il s'agit de troncs cylindriques : $V_{BF} = L \cdot D^2 \cdot \pi / 4$, avec L la longueur des flottants (m), D le diamètre (m) et V_{BF} leur volume solide (m³). On notera que la très grande majorité des flottants digitalisés sont dépourvus de branches et de racines et que cette hypothèse est généralement valable.

Deux approches ont été adoptées pour estimer les diamètres des embâcles :

- Une digitalisation manuelle des diamètres d'une cinquantaine de pièces sélectionnées aléatoirement ;
- Une méthode statistique de type Monte Carlo basée sur les hauteurs des arbres détectés sur le LiDAR.

Un échantillon de 54 pièces a été sélectionné au hasard dans les flottants digitalisés. Ces flottants ayant été sélectionnés au hasard, ils sont, de même que l'ensemble du jeu de donné, en majorité relativement courts (quantile 75% et 95% des longueurs : 2.0 et 4.6 m). Leur diamètre a aussi été digitalisé aux extrémités et au centre afin d'estimer la robustesse de cette mesure imprécise compte tenu de la résolution des images sources. Les diamètres mesurés font en moyenne 0.18 m et varient dans la gamme 0,11 – 0,30 m $\pm$ 0.04 m (Tableau 36 et Figure 115). Ces valeurs sont vraisemblablement un bon ordre de grandeur mais n'intègrent pas les diamètres des quelques pièces maîtresses plus massives.

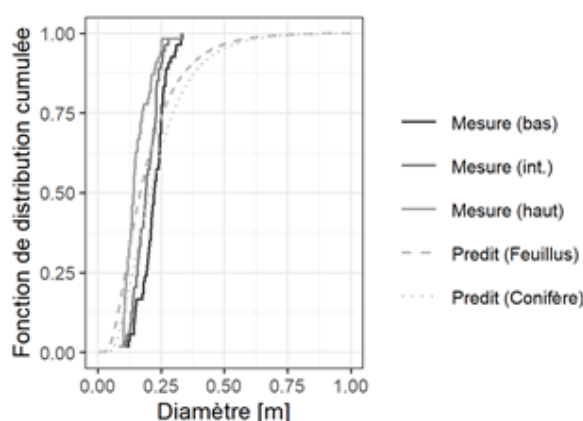


Figure 115 : Distribution des diamètres des 54 flottants digitalisés et des valeurs prédites selon l'approche de Monte Carlo proposée par Quiniou et al. (2021)

En faisant l'hypothèse que les arbres arrachés étaient semblables à ceux localisés dans les ripisylves ayant survécu à la tempête Alex, nous avons tenté de qualifier le diamètre des arbres via les données LiDAR (distribution des hauteurs totales, cf. Figure 114) et une relation simplifiée entre diamètre et hauteur. L'analyse des données

de l'IFN sur l'ensemble du territoire métropolitain a permis de caractériser les liens entre le diamètre des troncs et leur hauteur (Figure 114A). Les formules suivantes ont été proposées :

- $D = 0,012 * h_{tot}$ pour les feuillus
- $D = 0,015 * h_{tot}$ pour les conifères

Avec D le diamètre mesuré à une hauteur de 130 cm au-dessus du sol (m). La Figure 14B illustre la distribution des résidus de calibration. On note que 90% des diamètres réels sont compris dans l'intervalle $0.5x - 2x$ la valeur prédite. Sur la base de la mesure de la hauteur totale des arbres de la ripisylve des différents cours d'eau, il est ainsi possible de prédire la gamme de variation des diamètres en utilisant les équations fournies ci-dessous. La prise en compte des incertitudes de l'approche est intégrée en multipliant la valeur obtenue par une valeur tirée au hasard dans la distribution des résidus de calibration (Figure 114B).

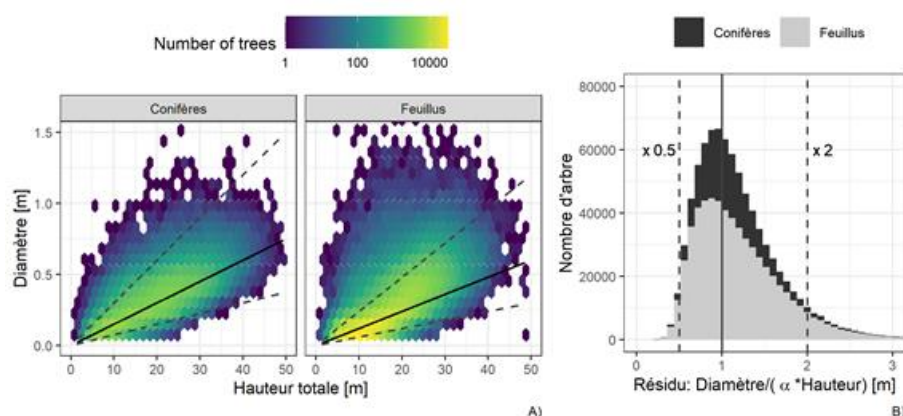


Figure 116 : A) Graphique montrant le diamètre des arbres et leur hauteur totale (605 000 feuillus et 222 000 conifères, données IFN). Les droites continues montrent les ajustements des équations. Noter que le code couleur est en échelle logarithmique, les pixels foncés comprennent donc 1000 à 10000 fois moins d'arbres que les pixels clairs. B) Distribution statistique des résidus des ajustements des équations

La Figure 14 illustre la distribution prédite des diamètres selon une approche équivalente à celle utilisée pour les longueurs de flottants (utilisation de l'équation $D = 0.012 * h_{tot}$ et tirage aléatoire dans les résidus de la Figure 114B). Les premiers et troisièmes quartiles des diamètres pour les conifères et les feuillus sont compris entre 0,10 et 0,29 m. La courbe montre que la grande majorité des arbres ont une valeur prédite de diamètre inférieure à 0,50 m. Le plateau du haut de la courbe des diamètres indique que les plus grosses espèces - très rares - ont un diamètre de 1m. Les valeurs digitalisées sur les bois flottants de la Roya et de ses affluents varient moins mais recoupent les valeurs prédites. Les quantiles extraits des deux courbes théoriques sont fournis dans le Tableau 36.

Afin d'estimer les volumes déposés via l'équation $V_{BF} = L * D^2 * \pi / 4$, il était nécessaire de fixer une estimation moyenne et une gamme d'incertitude du diamètre des flottants. Il a d'abord été tenté d'utiliser le premier et le troisième quartile de la distribution prédite des diamètres afin de fournir une estimation basse et une estimation haute de ce paramètre de façon analogue à l'approche retenue pour les densités de peuplement. Ces valeurs apparaissent plutôt faibles : de l'ordre de 10 et 30 cm. Les opérateurs ayant participé à la digitalisation des embâcles (deux sur la Vésubie et une sur la Roya) considèrent que ces valeurs sont probablement sous-estimées : les pièces digitalisées font généralement plusieurs pixels de diamètre sur les images, hors la résolution est de 10 cm / pixel. Il est donc supposé que l'ordre de grandeur des troncs est plutôt supérieur ou égal à 25cm, plutôt que 15cm, soit une valeur supérieure aux premier et troisième quartiles des distributions prédites ou mesurées. Cela indiquerait que les troncs déposés dans le lit ne correspondent pas à des arbres de diamètre moyen, mais plutôt à des arbres plus larges, moins mobiles que les pièces moins épaisses. Ce qui est cohérent avec les observations de terrain et la littérature. Pour autant, il est important de ne pas surévaluer le diamètre moyen : choisir, par exemple, comme valeur basse et valeur haute 50 cm et 1m respectivement, serait excessif étant donné que les troncs dont le diamètre est supérieur à 50 cm et 1 m ne constituent qu'une minorité des arbres de la Roya (Tableau 36 et Figure 115). La plupart des troncs ont vraisemblablement un diamètre inférieur à 50 cm. **En première**

approche, il a donc été décidé d'utiliser arbitrairement les quantiles 50%, 75% et 95% des diamètres estimés pour les feuillus afin d'évaluer les valeurs basse, intermédiaire et haute des diamètres des flottants (i.e., 0.16 m, 0.25 m et 0.44m). Ces valeurs et les longueurs des flottants digitalisées ont permis de fournir des estimations intermédiaire, basse et haute des volumes de flottants déposés dans le bassin versant de la Roya.

6.3.4 Bilan des flux de bois flottant

L'ensemble des estimations présentées plus haut permettent d'établir un bilan longitudinal des sources et dépôts en fonction du PK (Figure 117). Pour la Roya, l'estimation du PK repose sur l'axe de la vallée (centerline). Il est donc légèrement différent des abscisses utilisées dans les profils en long du chapitre 5. Ainsi, la Roya est un cours d'eau de 44km au total méandrant légèrement dans une vallée dont le cours principal objet de la présente étude, c'est-à-dire sans la Roya amont, fait 36,7km si l'on se reporte à l'axe de la vallée. La localisation des communes est représentée pour illustrer le bilan. On se reportera à l'atlas cartographique en [Annexe 18](#) pour une localisation précise des valeurs.

Les apports respectifs des sept affluents actifs ont été introduits au droit des PK de confluences. Les volumes déposés au sein du corridor fluvial de ces affluents, c'est-à-dire en amont des confluences avec le cours principal de la Roya, sont aussi reportés dans le graphique sous forme de dépôts assignés au PK de confluence. Les apports et dépôts associés aux affluents sont toutefois représentés par un code couleur différent de celui des flux issus du cours principal. Les valeurs d'apports des affluents étant significatives en comparaison aux volumes mobilisés dans les tronçons de 200 m du cours principal. Ces valeurs, trop élevées pour apparaître dans le graphique, sont fournies au Tableau 37. Ces apports localement élevés génèrent des hausses soudaines (« marches d'escaliers ») dans le bilan de la Figure 117d.

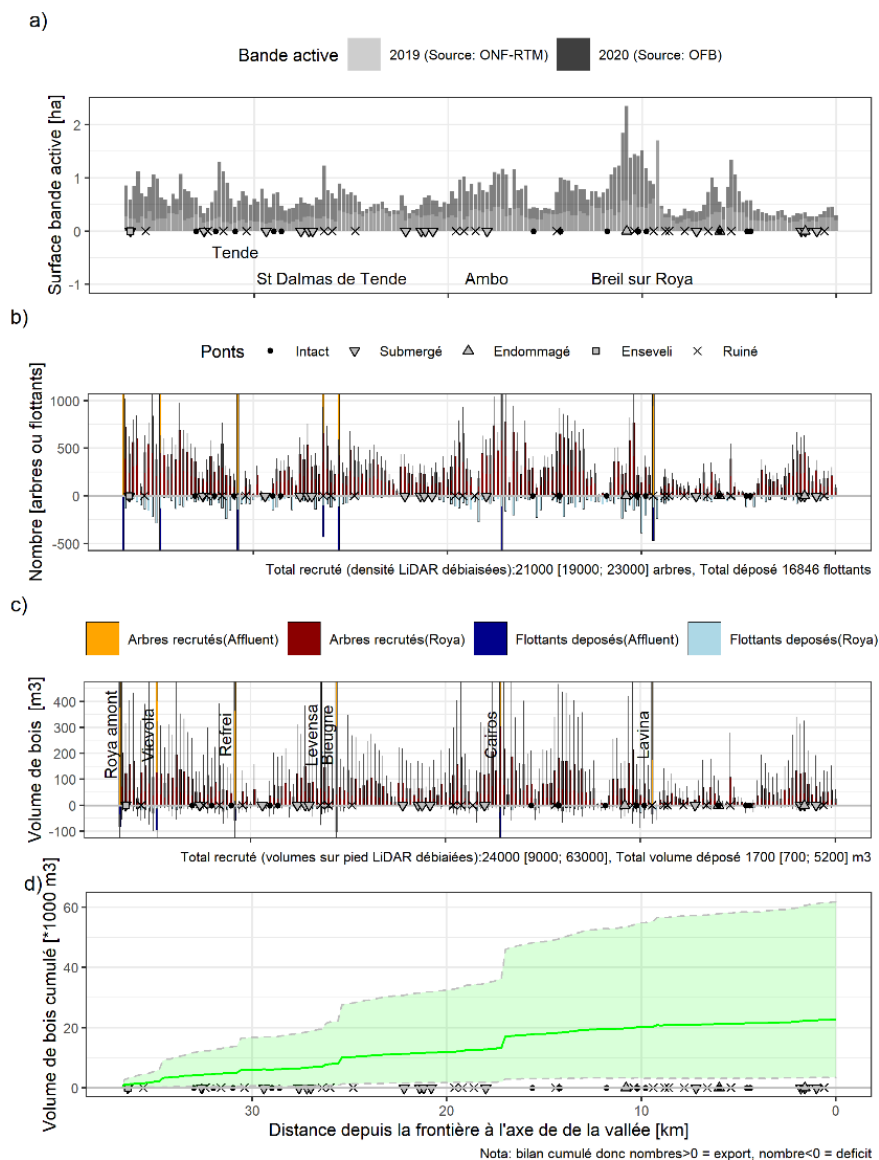


Figure 117 : Analyse longitudinale du cours principal de la Roya : a) Evolution de la largeur de bande active ; b) Nombre d'arbres recrutés (densité IFN) et nombre de pièces déposées ; c) Volume de bois recruté (volumes sur pied LiDAR débiaisés) et déposé et d) Bilan volumétrique cumulé. Les barres et fuseaux d'incertitudes sont estimés avec les enveloppes hautes et basses des estimations des différents bilans (voir texte)

La Figure 117a rappelle l'ordre de grandeur des superficies de bande active ante- et post-crise par tronçon de 200 m. Les secteurs de gorges rocheuses, en aval de Saint-Dalmas-de-Tende, en aval d'Ambo et en aval de Breil-sur-Roya se distinguent par des taux d'élargissement plus faibles.

La Figure 117b illustre le nombre d'arbres probablement recrutés et de flottants déposés. Les densités de peuplement utilisées dans le graphique sont celles de l'IFN, plus variables et précises que celles des analyses LiDAR (les barres d'incertitudes représentées sont associées aux estimations hautes et basses des densités de peuplement de l'IFN). Des secteurs homogènes de recrutement élevé ou faible sont aussi visibles, ils sont directement associés à l'élargissement plus ou moins marqué de la bande active. Les élargissements très marqués de Breil-sur-Roya n'ont toutefois pas produit autant de flottants en lien avec une occupation des sols moins dominée par les zones boisées. On constate aussi que le nombre d'éléments déposés est très significativement plus faible que le nombre d'arbres recrutés. Notons de plus qu'un arbre recruté produit nécessairement plusieurs bois flottants en lien avec le phénomène de taux de réduction étudié plus haut.

La Figure 117c présente le bilan des volumes de bois arrachés et déposés (avec incertitude associée à l'hypothèse de diamètres des bois flottants). Les données volumiques utilisent les estimations de volumes sur pied combinant

les données LiDAR et IFN. Là encore, les volumes déposés, bien que dépassant *très localement* 50 m³ par tronçon de 200 m, sont tout à fait marginaux comparés aux volumes recrutés qui dépassent *régulièrement* 100 m³ par tronçon.

La Figure 117d fait le bilan cumulé avec propagation des incertitudes de l'amont vers l'aval. Compte tenu des incertitudes associées aux sources utilisées pour les données de densités de peuplement des zones boisées (LiDAR corrigé par les données IFN), la tendance moyenne est encadrée par des estimations hautes et basses assez différentes. Les estimations sont globalement croissantes démontrant que les volumes déposés sont systématiquement plus faibles que les volumes érodés. Les apports des affluents génèrent des augmentations locales dans le bilan ("marches d'escalier" sur le graphique). **Les valeurs de ces apports sont fournies dans le tableau ci-dessous. Il montre que les apports des affluents de la Roya étaient typiquement de l'ordre du millier de m³ de bois flottants** (par exemple Roya amont, torrent de la Morte à Viévola ou Refreï). La Levensa et la Lavina étant considérées comme légèrement moins productrices (quelques centaines de m³ de bois flottants) et les torrents de Bieugne et du Caïros comme plus producteurs (plusieurs milliers de m³ de bois flottants). Le producteur principal de bois flottant est donc considéré comme étant le cours principal de la Roya (58% des exports), les affluents apportant le complément (42%). Ces contributions respectives sont très cohérentes avec les linéaires de zones très actives morphologiquement : 36.7 km sur la Roya et 22.0 km sur les affluents soit 60% et 40% du linéaire total à l'échelle du bassin versant français. **La production moyenne de bois flottant a ainsi été de l'ordre de 416 m³/km de tronçon actif géomorphologiquement (gamme d'incertitude : 146 – 1050 m³/km).**

Bois flottants	Volume de bois flottants pour les différents cours d'eau [*1000 m ³]							
	Roya amont	Viévola	Refreï	Levensa	Bieugne	Caïros	Lavina	Roya*
Érodés	1,1 (0,4-2,7)	1,1 (0,4 – 2,9)	1,0 (0,4 - 2,6)	0,6 (0,2-1,5)	2,0 (0,7 - 5,2)	3,5 (1,2 - 9,0)	0,5 (0,2 - 1,2)	14,6 (5,2 - 37,5)
Déposés	0,08 (0,03 - 0,26)	0,08 (0,03 - 0,26)	0,04 (0,02 - 0,13)	0,03 (0,01 - 0,08)	0,09 (0,04 - 0,28)	0,12 (0,05 - 0,39)	0,02 (0,01 - 0,07)	1,2 (0,5 - 3,8)
Exportés en aval	1,0 (0,3-2,5)	1,0 (0,4 - 2,6)	1,0 (0,3 - 2,5)	0,5 (0,2-1,4)	2,0 (0,7 - 5,0)	3,4 (1,2 - 8,6)	0,5 (0,2 - 1,2)	13,4 (4,7 - 33,7)

* Les chiffres fournis correspondent au cours principal de la Roya, sans les affluents

Tableau 37 : Volumes de bois flottants érodés, déposés et exportés dans les différents sous-bassins versants : Estimation intermédiaire (intervalle bas – intervalle haut)

En synthèse, on estime que le bassin versant de la Roya a exporté un volume de bois flottants très significatif à l'échelle de la crue associée à la tempête Alex. Ce volume exporté par la partie française du cours d'eau étant :

- **A minima de l'ordre de 3 000 m³** (estimation très basse faisant une hypothèse basse sur les volumes sur pied et une hypothèse haute sur les diamètres des flottants déposés) ;
- **L'estimation intermédiaire est de l'ordre de 23 000 m³** (basée sur les volumes sur pied intermédiaires et sur le diamètre intermédiaire des pièces déposées) ;
- **Les estimations maximums atteignant 62 000 m³** (volumes sur pied hauts et diamètre bas des pièces déposées).

Ces volumes ont été exportés vers l'Italie puis la Mer Méditerranée. Nous ne disposons pas de données quantitatives pour préciser notre bilan, mais les images issues de la presse ou des réseaux sociaux montrent bien que la quantité de bois exportée à la mer par la tempête était exceptionnellement élevée (photo ci-dessous).



Figure 118 : Tapis de bois flottant sur le littoral suite à la tempête Alex (Source : Denise Delahaye, France TV)

7 ÉVOLUTIONS PRÉVISIBLES DES COURS D'EAU, PRINCIPES D'AMÉNAGEMENT ET CONNAISSANCE DU RISQUE

7.1 DETERMINATION DES ÉVOLUTIONS PRÉVISIBLES DES COURS D'EAU TORRENTIELS À COURT OU MOYEN TERMES

Même si la prédiction de l'évolution morphologique d'une rivière constitue encore aujourd'hui un défi scientifique majeur compte tenu de la multiplicité des facteurs de contrôle qui interagissent, et de la complexité des processus naturels qui entrent en jeu, il est néanmoins possible de proposer un scénario d'évolution de la Roya qui apparaît comme le plus vraisemblable, en raisonnant par analogie avec des cas précédents d'engravings exceptionnels en zone de montagne. On peut notamment s'appuyer ici sur plusieurs cas documentés de trajectoires morphologiques post-crise : (1) le réajustement post-Petit Age Glaciaire (PAG) des rivières alpines ; (2) le Guil après la crue de juin 1957 ; (3) les engravings miniers en contexte néo-calédonien.

La plupart des rivières alpines ont été fortement impactées par la crise torrentielle dite du Petit Age Glaciaire, qui s'est traduite par des engravings massifs et par la formation de grandes bandes de tressage dans les fonds de vallée (Bravard, 1989 ; Liébault *et al.*, 2005 ; Astrade *et al.*, 2011). Ces métamorphoses fluviales ont été directement induites par l'accélération de l'érosion en montagne, d'origine climatique et anthropique (déboisement). À partir de la fin du 19^e siècle, la situation s'améliore sous l'effet cumulé du changement climatique et de la mise en place de la politique de lutte contre l'érosion en montagne (correction torrentielle et reboisement). Cette tendance se renforce encore après la seconde guerre mondiale du fait de la reconquête forestière spontanée des versants, liée à la déprise rurale. On assiste donc progressivement à la stabilisation des engravings, qui se traduit par la rétraction des bandes actives et l'incision des lits fluviaux. Les anciens tressages laissent progressivement place à un style divaguant, puis à des lits pavés à chenal unique, en marge desquels se sont formées des terrasses boisées (Figure 119A). Dans les montagnes drômoises, la datation dendrochronologique de ces terrasses a permis de mettre en évidence une phase majeure d'incision progressive (de l'amont vers l'aval) à partir de la fin des années 1940, qui s'est propagée vers l'aval selon des vitesses comprises entre 300 et 500 m/an (Liébault *et al.*, 2005). Cette incision a été sans doute très rapide, comme le suggère l'absence de sédimentation fine dans la partie terminale des séquences stratigraphiques visibles au droit de ces terrasses (Figure 119B).

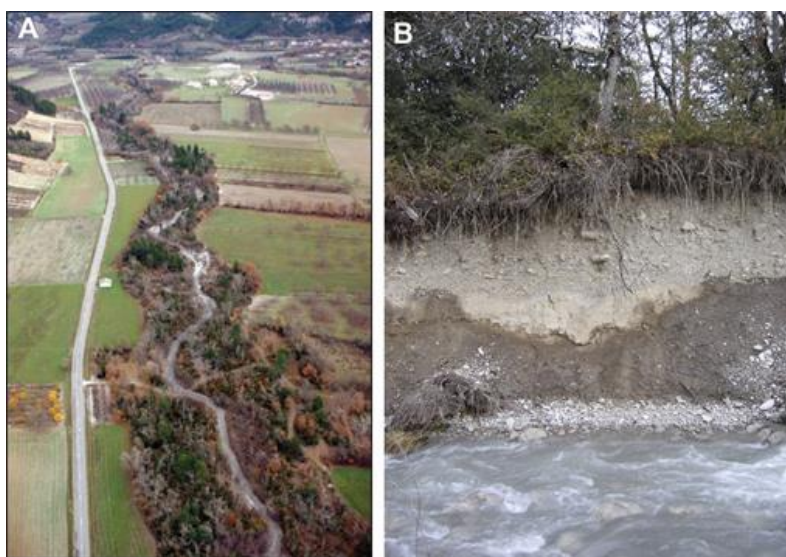


Figure 119 : Les engravings du Petit Age Glaciaire aujourd'hui : des basses terrasses boisées qui témoignent d'une dynamique de rétraction et d'incision des bandes actives ; (A) l'ancienne bande de tressage de la Béoux (Drôme) du 19^e siècle est aujourd'hui occupée par un corridor forestier (photo R. Montagnon) ; (B) ces terrasses récentes montrent très souvent une stratigraphie de nappes caillouteuses sans dépôts de fines en surface (comme ici sur la Béoux, photo F. Liébault), ce qui témoigne d'une incision rapide dans les dépôts

Le réajustement du Guil après la crue de 1957 est aussi riche d'enseignements, dans la mesure où l'engrèvement du lit consécutif à cette crue est sans doute le seul analogue alpin d'après-guerre comparable à celui de la Vésubie et dans une certaine mesure à celui de la Roya, rivière plus confinée que ne le sont le Guil et la Vésubie. La surface de bande active a été multipliée quasiment par 3, et un tressage est apparu sur un linéaire important, qui peut être estimé à une vingtaine de km (Arnaud-Fassetta et Fort, 2004). Le réajustement post-crue montre une phase très marquée de rétraction du lit, avec une perte de surface active de 79% une quarantaine d'année après la crue (Figure 120). Même si cette rétraction est en partie liée aux grands travaux de protection contre les crues qui ont été réalisés après la catastrophe de 1957, elle est aussi la résultante d'une dynamique spontanée de retour vers la morphologie d'avant-crue.

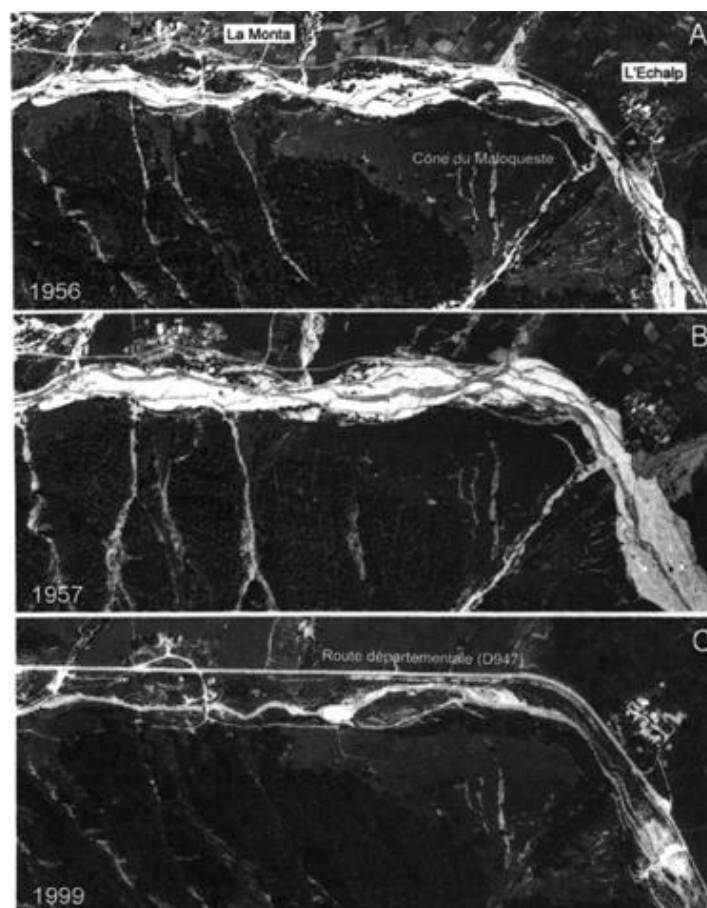


Figure 120 : Cycle d'expansion et de rétraction de la bande active du Guil avant et après la crue de juin 1957 (Arnaud-Fassetta et Fort, 2004)

Le contexte minier néo-calédonien est également intéressant à considérer, dans la mesure où de nombreuses rivières de montagne ont subi des engravements catastrophiques dans la seconde moitié du 20^e siècle, sous l'effet de vagues sédimentaires successives qui se sont propagées depuis les sites d'extraction du nickel (Bertrand et Liébault, 2019). Ces engravements ont commencé à se former suite aux premières grandes crues cycloniques qui se sont produites après l'ouverture des mines, et qui ont déstabilisé les stériles miniers déversés dans les parties hautes des têtes de bassin (les décharges minières). Ils ont généré rapidement des tressages sur des linéaires importants, selon un mécanisme sans doute équivalent à celui observé sur la Vésubie et la Roya (substitution de charge). Dans les années 1970, la législation intervient et les décharges minières sont interdites par le code minier, qui impose l'obligation de mise en verse des stériles (stockage sécurisé sur zones stables). La baisse consécutive de la recharge sédimentaire a été importante, et les lits fluviaux en aval se sont ajustés progressivement par la formation de terrasses. L'analyse combinée des photos aériennes historiques, des données LiDAR et des reconnaissances de terrain réalisée dans un bassin versant fortement engravé a montré la présence

de plusieurs niveaux de terrasses qui correspondent à des engravements cycloniques successifs, et qui témoignent d'une dynamique de rétraction et d'incision du lit (Figure 121). L'évaluation du volume engravé et du déstockage par incision montre que la reprise des 40 dernières années représente moins de la moitié du passif minier stocké dans la plaine alluviale (Garcin et al., 2018). Cet exemple illustre que même dans des régions à forte activité cyclonique, les engravements hérités des crises géomorphologiques récentes persistent longtemps dans le paysage, pendant des dizaines, voire des centaines d'années. On peut imaginer un sort équivalent pour les engravements de la Vésubie et de la Roya.

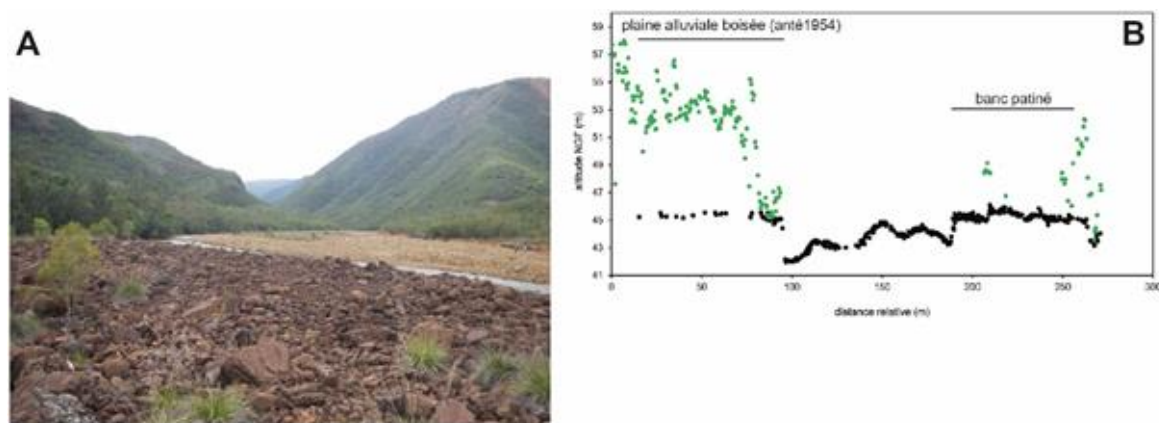


Figure 121 : Engravement du cyclone Alison de 1975 sur la Neburu en Nouvelle-Calédonie (banc patiné au premier plan), toujours en place dans le lit 45 ans après l'évènement (A) (photo F. Liébault) ; le profil en travers montre que l'engravement forme aujourd'hui une terrasse (banc patiné) perchée à environ 2 m au-dessus du lit actif actuel (B) ; en noir, points LiDAR classés en sol ; en vert, points LiDAR classés en sursol (végétation)

Même si la tempête Alex a été à l'origine de reprises d'érosion sur les versants du bassin de la Vésubie et de la Roya, on ne voit pas de nouvelles zones de production sédimentaire majeures au niveau des têtes de bassin qui seraient susceptibles de maintenir, sous un régime hydroclimatique normal, une charge sédimentaire équivalente à celle qui a été mobilisée pendant la tempête. **Il apparaît ainsi raisonnable de considérer la morphologie post-crue comme un état très transitoire et ponctuel dans le temps, même si le contexte de changement climatique interroge sur l'amplification des phénomènes extrêmes. Il est clair que si des phénomènes équivalents à celui d'Alex étaient amenés à se reproduire régulièrement dans les prochaines décennies, alors il faut s'attendre au maintien de faciès de tressages là où ils sont apparus dans la vallée de la Roya, c'est-à-dire dans les zones suffisamment larges, comme c'est d'ailleurs le cas dans plusieurs secteurs des Alpes du Sud où les rivières sont ajustées à des fournitures sédimentaires élevées (Bléone, Asse, haute-vallée du Var...). Si ces phénomènes climatiques extrêmes restent l'exception, la Roya va naturellement évacuer la charges sédiment disponible. Les gros blocs erratiques partiellement ensevelis vont peu à peu apparaître. En fonction des crues, des vagues sédimentaires vont se propager dans le système, plus ou moins vite selon la capacité de ce dernier à les réguler. Ce scénario conduirait la Roya à entrer rapidement dans une phase d'incision et de rétraction, et à la formation de terrasses (dans les zones plus larges) sur lesquelles la végétation va s'installer.** Ce processus devrait démarrer à l'amont et se propager vers l'aval, induisant ainsi des apports de matériaux soutenus pour les secteurs aval, qui vont donc nécessiter plus de temps pour rétablir une morphologie proche de celle qui prévalait avant la crue. Même si l'état de dégradation des versants permet difficilement d'imaginer des apports massifs de matériaux dans les prochaines années, le processus de remobilisation des terrasses ou de versants instables par sapement de berges va sans doute contribuer à maintenir un niveau de recharge sédimentaire supérieur à celui d'avant Alex, et on peut donc imaginer que le lit va maintenir une bande active plus large par rapport à l'état avant crue. **Outre le caractère incertain du régime hydroclimatique futur, un autre facteur susceptible d'avoir une grande influence sur la trajectoire morphologique de cette rivière, ce sont les aménagements et travaux post-crue, dont l'ampleur est déjà très importante et qui auront nécessairement un impact sur la morphodynamique et le transport solide.** Compte tenu de l'ampleur des moyens déployés pour la reconstruction de la vallée, ce facteur peut devenir prépondérant devant la dynamique naturelle tant que les crues restent de magnitudes limitées. En cas de crue forte (il est difficile de prédire à partir de quelle valeur), les dynamiques décrites plus haut redeviendront probablement prépondérantes et l'effet de nombreux travaux pourrait être balayé en quelques heures.

7.2 PRINCIPES D'AMENAGEMENT ADAPTES AU CONTEXTE TORRENTIEL

Cette partie synthétise les éléments d'analyse et les propositions de principes d'aménagement qui ont été formulés par l'ONF-RTM à la demande de l'Etat au fur et à mesure des ateliers d'appui à la GEMAPI mis en place par le Préfet nommé à la reconstruction des vallées. Il s'agit de préconisations sur les aménagements hydrauliques qui visent à réduire l'effet des prochaines crues sur les biens et les personnes et se faisant à réduire la vulnérabilité des enjeux.

L'objectif est de créer des aménagements et infrastructures plus résilients face aux crues torrentielles c'est-à-dire conçus pour résister à de futurs événements météorologiques marqués ou a minima pour garantir leur remise en service rapide.

7.2.1 Préambule

L'ONF-RTM apporte un appui technique au Préfet et aux services de l'Etat, à la suite de la crue du 2 octobre 2020, dans le cadre des interventions techniques auprès des préfets et de leurs services, prévues à la Mission d'Intérêt Général « Prévention des risques naturels en montagne » confiée par la DGPR à l'ONF.

Le Préfet nommé à la reconstruction des vallées à la suite de la catastrophe a initié, dès le début de l'année 2021, la collaboration entre les acteurs institutionnels du territoire impacté, autour des problématiques du réaménagement résilient des cours d'eau. Le principe d'ateliers Gemapi, associant les collectivités locales, les collectivités gemapiennes, les experts et plus largement les organismes concernés par la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations, a ainsi été acté le 5 février 2021. Il s'agissait de partager les constats, les priorités de réparation et de reconstruction, les points de vigilance, pour aboutir à des schémas de principe d'aménagements hydrauliques, portés par les gemapiens.

Dans le cadre de ces ateliers, l'Etat (préfet à la reconstruction, DDTM 06) a demandé à l'ONF-RTM d'émettre des avis (notes, présentations, avis sur PAC ...) et de participer à des réunions de concertation et visites sur place relatives aux travaux d'urgence et/ou travaux de réaménagement /reconstruction.

Les objectifs principaux étaient de :

- Donner des premiers éléments d'analyse pour aider l'Etat à formuler des avis sur les travaux qui avaient débuté ou qui allaient être réalisés rapidement (travaux d'urgence), puis sur les travaux de reconstruction ;
- Esquisser sur les secteurs urbanisés à enjeux, par un schéma, les propositions de lignes directrices de l'aménagement du cours d'eau afin de réduire la vulnérabilité des biens et des personnes ;
- Prendre en compte rapidement les premiers enseignements de la crue et d'éviter ainsi que des "erreurs manifestes" (qui pourraient avoir un impact hydraulique fort par la suite) ne soient commises dans les premiers temps, dans l'attente d'études générales de réaménagement ;
- Rester réaliste et pragmatique en démontrant que certaines infrastructures routières peuvent être remises en place tout en conservant un espace le plus large possible au cours d'eau.

Dans un premier temps, ces avis transmis dès le mois de novembre 2020 ont été établis à partir des seuls constats faits sur place suite à la crue, dans l'attente des données topographiques notamment issues du levé LIDAR de l'IGN et des premiers résultats du présent Retex qui ont permis d'affiner l'analyse des phénomènes. Les estimations des débits de la crue n'étaient pas encore connues à cette date et ce jusqu'à l'été 2021 (cf. Volet Hydrologique du Retex).

Il s'agissait donc de propositions ou de premières esquisses qui avaient surtout vocation à faciliter les échanges avec les différents partenaires pour se mettre d'accord aussi vite que possible sur les parties et propositions d'aménagement faisant consensus et pour pointer les secteurs et tronçons nécessitant d'autres échanges, analyses ou arbitrages.

Ces premières propositions concernaient principalement les largeurs des lits et leur position planimétrique. Il n'était en général pas possible à ce stade de donner tous les éléments de calage précis sur les niveaux, ni de fondation ni d'arase de ces protections de berge ; il fallait pour cela approfondir les analyses sur le profil en long, les évolutions avant et après crue, afin d'apprécier les évolutions prévisibles suite aux travaux. Certains éléments d'appréciation sont indiqués maintenant au paragraphe précédent (cf. § 7.1).

Les grands principes d'aménagement préconisés dès le départ restent valables, mais ceux-ci ont pu être affinés au fur et à mesure de l'avancement des analyses réalisées par les experts de l'ONF-RTM et de l'INRAE dans le cadre du présent volet torrentiel du Retex, analyses qui viennent d'être développées dans les chapitres précédents.

Pour certains secteurs, des notes techniques spécifiques ont été rédigées à la demande de l'État (secteur du pont de Venanson à Saint Martin Vesubie, traversée de Tende depuis l'amont du pont des Truites jusqu'en aval de l'EHPAD) pour apporter des éléments complémentaires d'analyse au(x) maître(s) d'ouvrages.

7.2.2 Principes généraux de la démarche d'études à engager

7.2.2.1 Nécessité d'une approche globale d'aménagement

Les principes d'aménagement hydraulique que nous avons proposés ne se substituent pas une étude globale de réaménagement des vallées. Les aménagements proposés ne visent pas à bloquer tout projet de reconstruction ce qui serait localement inacceptable, mais à intégrer d'emblée les infrastructures notamment routières (routes et ponts) dont la reconstruction est indispensable, tout en maintenant un espace le plus large possible aux cours d'eau.

C'est pourquoi il faut réfléchir aux réaménagements de façon globale en intégrant dès le départ dans la réflexion toutes les contraintes et les besoins des différents maîtres d'ouvrages et ainsi prendre en compte tous les aménagements, les infrastructures, les relocalisations à prévoir pour éviter qu'un projet n'apparaisse au dernier moment et ne puisse être accepté sans compromettre l'aménagement hydraulique d'ensemble.

De surcroît, il faut réfléchir à une échelle suffisamment grande avec une réflexion parfois pluri-communale (l'espace étant contraint, toutes les infrastructures ne pourront pas forcément être reconstruites sur chaque commune) et pour bien appréhender les effets d'un aménagement à l'amont et à l'aval de ce dernier : par exemple une contraction de la section d'écoulement peut avoir un impact à l'amont (remous solide favorisant le dépôt de matériaux, un exhaussement des niveaux, les divagations et les érosions latérales) et à l'aval (accélération des écoulements favorisant une incision du lit, une déstabilisation des protections latérales, un appauvrissement du milieu...).

Certains bâtiments détruits ou menaçant ruine ne doivent pas être reconstruits s'ils sont trop exposés et ne permettent pas de maintenir un lit suffisamment large, de même pour la reconstitution de tous les terrains emportés par la crue qu'il s'agisse de terres agricoles, comme de terrains voués à d'autres usages (terrains privatifs, terrains de sport...). Cela peut nécessiter des procédures d'acquisition amiable sur le FPRNM pour indemniser les riverains concernés, voire d'expropriation en cas de refus.

Les maîtres d'ouvrages doivent par ailleurs décider des éventuels tronçons qui ne seront pas protégés et/ou adapter les ouvrages de protection en fonction du type d'enjeux : enjeux éloignés, absence d'enjeux humains... Des analyses d'aide à la décision (analyse coût-bénéfice - ACB ou multicritères - AMC) doivent par ailleurs être engagées pour faire certains choix.

Tout ceci nécessite dans un premier temps de conduire des études générales de réaménagement à grande échelle avant de passer dans un second temps à des études hydrauliques approfondies.

7.2.2.2 Etudes hydrauliques approfondies à engager impérativement

Les propositions de principes d'aménagement hydrauliques ne constituent pas des études hydrauliques. Il s'agit d'esquisses dont l'objectif a été rappelé ci-dessus, mais qui nécessitent avant leur mise en œuvre d'être approfondies dans le cadre d'études hydrauliques qui dépassent la mission de conseil apportée par l'ONF-RTM à l'Etat. Ces études ne sont de toute façon pas du ressort de l'Etat, mais des collectivités maîtres d'ouvrages.

Il appartient en effet au(x) maître(s) d'ouvrage de réaliser ou de commander avant d'engager les travaux toutes les études nécessaires (topographiques, hydrauliques, géotechniques, structures, mission de MOE ...) à la définition précise des ouvrages et travaux à réaliser. Il reste beaucoup de choix à faire et à justifier sur les secteurs à protéger, les types de protections à mettre en œuvre et définir toutes les caractéristiques dimensionnelles et les modes opératoires de ces ouvrages.

Les scénarios de référence que le maître d'ouvrage retient pour le dimensionnement des protections à mettre en place devront être précisés dans ces études. Il faudra notamment faire le choix d'un débit de référence centennal ou celui a priori plus élevé pour les cours d'eau principaux de la crue du 2 octobre 2020. Nous rappelons qu'il ne faut pas se focaliser uniquement sur le débit de pointe qui en contexte torrentiel ne constitue qu'un élément, certes important, de(s) scénario(s) de référence. La durée de la crue, les volumes de matériaux transportés, déposés, érodés, le volume de flottants... sont autant de paramètres qu'il faut bien prendre en compte dans le(s) scénario(s) de référence retenu(s) pour la conception des systèmes de protection.

7.2.3 Grands principes des aménagements hydrauliques post-crue pour un réaménagement plus résilient

L'analyse des évolutions morphologiques de la Vésubie et de ses principaux affluents, survenues lors de la crue du 2 octobre 2020, et les constats de dégâts engendrés par cette crue, illustrent de manière significative les principes fondamentaux du fonctionnement des cours d'eau torrentiels.

Les crues intenses des cours d'eau de montagne (rivières torrentielles et torrents) sont le plus souvent associées à un transport solide très conséquent, sous forme de charriage de matériaux pouvant atteindre des dimensions considérables, et à la mobilisation de flottants, parfois de grande taille. Cela se traduit par d'importantes modifications morphologiques qui peuvent survenir en quelques minutes ou quelques heures : aggradation du fond de lit pouvant atteindre plusieurs mètres, déplacement du lit vif, érosion intense des berges, élargissement significatif de la bande active, déstabilisations des versants... Les conditions d'écoulement sont souvent perturbées par le transport de flottants, avec formation possible d'embâcles, obstruction d'ouvrages de franchissement, amplification des phénomènes d'érosion et de divagation.

Le transport solide, et les évolutions morphologiques qui en sont la conséquence, concourent, au moins autant voire plus sur certains secteurs que le débit liquide, aux débordements et aux dégâts observés. La crue du 2 octobre 2020 n'échappe pas à cette règle.

Les particularités de ce fonctionnement, l'expérience acquise sur d'autres grandes crues notamment celles récentes des Pyrénées (juin 2013), les constats faits à l'occasion de la crue du 2 octobre 2020, nous amènent dans un premier temps à rappeler quelques grands principes pour la gestion des cours d'eau torrentiels, dans la perspective de réduire les risques et d'assurer la pérennité des aménagements qui seront maintenus ou réimplantés à proximité des cours d'eau.

Ces grands principes d'aménagement hydrauliques avec leurs bénéfices attendus sont synthétisés dans le tableau suivant.

N°	Principe d'aménagement	Bénéfice attendu
1	Conserver ou aménager une section d'écoulement suffisante dans les traversées urbaines (lits suffisamment larges)	- Limiter l'amplitude des évolutions de fond de lit - Réduire la vitesse d'écoulement - Limiter l'affouillement des fondations de protections de berges ou bâtiments à proximité - Permettre l'écoulement du débit liquide sans débordement
2	Préserver ou aménager des zones de régulation de transport solide à l'amont des secteurs urbanisés (dans les secteurs fortement engravés lors de la crue)	- Limiter l'amplitude des évolutions de fond de lit dans les secteurs urbanisés - Favoriser le dépôt de sédiments et de flottants en amont des secteurs urbanisés - Limiter les opérations de curage avec le risque de déstabilisation des ouvrages
3	Augmenter la portée des ouvrages de franchissement à reconstruire, éviter les piles centrales et prévoir en amont et en aval des protections et des entonnements très progressifs	- Limiter le risque d'obstruction des ouvrages par les flottants - Eviter les dépôts de sédiments régressifs en amont des contractions de lit - Limiter les survitesses et affouillements au passage des ouvrages
4	Protéger les berges des infrastructures qu'il faut conserver ou à reconstruire (zones bâties, routes)	- Limiter les effets des divagations torrentielles - Protéger les principaux enjeux - Réduire les dégâts lors des crues
5	Traiter préventivement les flottants ou boisements de berge qui menaceraient encore d'être arrachés dans les traversées urbaines étroites	- Eviter les renvois d'écoulements sur les berges et les déstabilisations de berges causées par le basculement d'arbres dans le lit ; - Eviter l'obstruction des ouvrages de franchissement

Tableau 38 : Principes d'aménagement hydrauliques et leurs effets escomptés

Chaque principe fait l'objet d'une description détaillée dans les sous paragraphes qui suivent.

Les aspects environnementaux, paysagers et sociétaux, même s'ils ne sont pas abordés ici, sont tous aussi importants à prendre en compte ; par exemple, le principe d'aménagement de lits larges est bénéfique tant pour limiter les effets des crues que pour la biodiversité et l'intégration paysagère.

Si les principes d'aménagement proposés ci-dessus sont bien respectés (sans doute à nuancer pour la protection des berges qui limite de fait ponctuellement la continuité latérale sédimentaire), cela devrait permettre d'assurer la continuité sédimentaire, notamment par la conservation ou l'aménagement de vastes zones de régulation où les cours d'eau pourront divaguer naturellement et reprendre des matériaux.

7.2.3.1 Principe d'aménagement n°1 – Conserver ou aménager une section d'écoulement suffisante

La crue générée par la tempête Alex a mis en évidence l'inadaptation et l'insuffisance des lits mineurs qui étaient bien trop étroits pour supporter une telle crue, pour faire transiter le débit de pointe liquide, mais aussi et surtout contenir les volumes de matériaux transportés et déposés (engravement du lit), supporter les fortes contraintes des écoulements torrentiels (vitesses élevées, à l'origine d'érosion massive et de destruction d'ouvrages) et l'effet des flottants transportés en quantité très importante.

Ce constat est particulièrement frappant dans la vallée de Vesubie et dans une moindre mesure dans la vallée de la Roya (du fait du faciès différent de la vallée de la Roya, moins ouverte).

7.2.3.1.1 Inconvénients des lits étroits

Contraintes hydrauliques extrêmes en crue favorisant les érosions et l'appauvrissement du milieu : Les lits trop étroits favorisent des vitesses élevées qui peuvent générer des érosions des berges marquées, voire un dépavage du fond du lit. Lorsque le lit est pavé de gros blocs (cas de la Roya à St Dalmas), les écoulements peuvent être déviés par ces derniers et venir amplifier les érosions. Ces phénomènes d'érosion en fond et sur les berges sont susceptibles de déstabiliser les ouvrages et infrastructures implantés en bordure de lit et arracher des ligneux de grande taille qui peuvent venir obstruer partiellement ou totalement le lit et/ou dévier les écoulements. Cela conduit par ailleurs à dégrader le milieu qui devient uniforme et peu intéressant.

L'analyse de la crue du 2 octobre a également montré que ce sont les lits les plus étroits avant la crue qui ont subi les élargissements les plus marqués après la crue.

Risque d'exhaussement du fond et de débordement accru : Lorsqu'une réduction naturelle de pente existe sur le profil en long et/ou la présence d'une contraction marquée (naturelle, anthropique ou temporaire par exemple par amoncellement de flottants), un dépôt de matériaux est probable et, selon son importance, peut être à l'origine d'une surverse. Plus le lit est étroit, plus son engravement peut être rapide. Les deux phénomènes peuvent d'ailleurs se succéder durant la même crue (incision du lit à la montée de crue, puis exhaussement à la décrue) ou lors de crues successives plus ou moins chargées en matériaux.

Dès qu'une fraction significative du débit liquide déborde en dehors du lit étroit, la capacité de transport solide est fortement réduite, ce qui amplifie le dépôt de matériaux et augmente d'autant le débit débordant. Le phénomène peut s'emballer rapidement conduisant à un engravement total du chenal et à un changement de lit. Tout le débit peut alors déborder en dehors du lit mineur et les écoulements divagués en fond de vallée. Les eaux qui débordent ainsi ont tendance à éroder les terrains parcourus pouvant affouiller les bâtiments et infrastructures à proximité.

Augmentation de la capacité de transport solide - Un argument parfois avancé pour « justifier » un lit étroit, mais très souvent une erreur d'appréciation : La capacité de transport peut être augmentée par des lits étroits, mais cet effet n'est en général pas suffisant pour s'opposer à un engravement régressif depuis l'aval lié à une décroissance de pente, à un élargissement du lit, à la formation d'un obstacle à l'écoulement...

Tous ces constats militent pour conserver ou aménager des lits les plus larges possibles. L'urbanisation de nos vallées a souvent omis ce principe avec des enjeux implantés très – trop – près des cours d'eau et donc fortement exposés lors des crues (soit en cas de débordement, soit par érosion des berges).

7.2.3.1.2 Objectifs visés

Conserver un lit large vise à disposer d'une section suffisante non seulement pour éviter le débordement du débit liquide, mais également pour prendre en compte et ne pas perturber le transport solide lors des crues.

Des lits larges permettent ainsi de :

- Limiter l'amplitude des évolutions de fond de lit (engravement systématique)¹¹ et donc le risque de surverse, qui lorsqu'il se produit peut vite dégénérer (engravement total du lit) et provoquer un changement total de lit ;
- Réduire la vitesse d'écoulement et se faisant de limiter les phénomènes d'affouillement des fondations des protections de berges ou de bâtiments ou infrastructures implantés à proximité ;
- Mieux supporter le basculement, le transit ou l'amoncellement de flottants

Un dimensionnement purement hydraulique n'est en général pas suffisant pour s'assurer de l'absence de débordement (défaillance fonctionnelle du dispositif).

¹¹ L'élargissement du lit peut aussi favoriser le dépôt de matériaux, c'est ce qui est recherché notamment dans les zones de régulation plus larges, mais il est quoi qu'il arrive préférable d'aménager des lits larges plutôt qu'étroits. Comme indiqué précédemment, le profil en long décroît progressivement et le surplus de capacité de transport des lits étroits n'empêche pas le dépôt régressif depuis l'aval à la décrue. Le risque d'obstruction par des flottants est par ailleurs accru avec des chenaux étroits.

Bien entendu la largeur du lit ne suffit pas à assurer une section suffisante, il faut par ailleurs des hauteurs de berges qui soient elles-mêmes suffisantes pour éviter la surverse. Ce point est évoqué par la suite.

7.2.3.1.3 Rappel préalable sur les conditions d'écoulement en contexte torrentiel

Pour déterminer les sections d'écoulement (qui servent à l'écoulement, mais également aux dépôts selon les secteurs), il faut être en capacité d'estimer les conditions d'écoulement.

En contexte torrentiel, une des principales difficultés est d'estimer de façon fiable le niveau atteint en crue par les écoulements. Les conséquences du transport solide en termes de types d'écoulement et d'évolutions morphologiques (incision ou exhaussement du fond du lit, modifications des sections d'écoulement durant la crue, etc.) influencent directement et indirectement le niveau d'écoulement dans des proportions considérables. Le calcul d'écoulement classique en ne tenant compte que du débit liquide sur une topographie fixe perd alors tout son sens.

Le niveau pouvant être atteint par les eaux dépend de trois paramètres (figure suivante) : 1- l'évolution systématique du fond, 2- les respirations du lit durant la crue et 3- la hauteur d'eau.

Les trois hauteurs ou épaisseurs correspondantes ne doivent pas être directement cumulées, car certains phénomènes se succèdent dans le temps plus qu'ils ne se superposent. Dans les zones d'engravement par exemple, ce niveau maximum est généralement atteint plutôt durant la décrue.

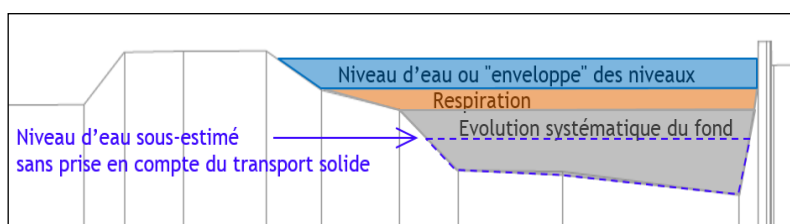


Figure 122 : Illustration de l'estimation du niveau atteint en crue avec charriage (Queffélec et al 2019)

- 1- L'évolution systématique du fond** résulte de la variation de la capacité moyenne de transport. Ces variations du fond sont d'abord liées aux irrégularités du profil en long, mais peuvent aussi être provoquées par les apports des affluents et une obstruction éventuelle du lit (embâcles, par ex).

Le recours à des modèles numériques spécifiques en 1D est relativement courant de nos jours pour évaluer, à partir de formules de transport solide, l'évolution du lit durant les crues. Comme pour tout modèle, leur utilisation doit rester critique (pratiquer des tests de sensibilité) et venir en appui du dire d'expert et non l'inverse.

- 2- La respiration du lit durant la crue** regroupe toutes les variations temporaires et souvent chaotiques du niveau du lit dues aux irrégularités de la fourniture en matériaux et au caractère intrinsèquement instable du charriage torrentiel (divagations, antidunes, effet des contractions marquées, etc.). Son estimation reste délicate et repose essentiellement sur l'expérience et l'observation détaillée du lit.
- 3- La hauteur d'eau** est elle-même généralement influencée par une série de phénomènes : faible submersion relative, fort transport solide, modifications géométriques du lit durant la crue, présence de bras multiples, turbulence des écoulements, obstacles éventuels, etc. Etant données les fortes rugosités de fond, la submersion relative est en général faible et l'équation de Manning-Strickler n'est plus valable (validité limitée à une submersion relative (hauteur d'eau/ D_{84}) > 7 (Recking *et al.*, 2013).

Des observations et mesures poussent à considérer que les écoulements à forte pente sur lit mobile ont tendance à modifier la morphologie du lit en maintenant des écoulements proches du régime critique. Dans les lits contraints (protections adaptées ou roche mère), les écoulements peuvent par contre être supercritiques (Nb. de Froude >1). Les instabilités de la surface libre peuvent être fortes. L'analyse des conditions d'écoulement doit donc intégrer à la fois les hauteurs d'écoulement et de charge, en particulier à proximité

d'obstacles dans le lit. Ainsi, la détermination des hauteurs d'écoulement est plutôt appréciée en régime critique et par application d'équations adaptées, notamment celle de Ferguson (chapitre 3 du guide (Recking *et al.*, 2013)). Évidemment, ces hypothèses simplifiées ne sont valables que pour des sections simples. Toute singularité pouvant créer un remous liquide devra faire l'objet d'analyses et de calculs spécifiques.

7.2.3.1.4 Détermination de la largeur "minimale" du lit

Le principe de base serait de conserver des lits les plus larges possibles, mais certaines contraintes notamment le rétablissement de routes indispensables pour desservir les vallées ne peuvent être occultées.

Dans ces conditions, il faut déterminer des largeurs de lit "minimales" à respecter lors des travaux de réaménagement des vallées qui soient acceptables en tenant compte des autres contraintes, et en sachant tout de même que plus les lits sont larges plus les conséquences des prochaines crues seront réduites et inversement. Tout l'espace laissé au cours d'eau sera cela de moins qu'il viendra essayer d'éroder lors des futures crues. Bien entendu toutes les crues à venir n'auront pas les mêmes conséquences que celle du 2 octobre, mais on sait pertinemment qu'elle peut se reproduire un jour. D'où l'intérêt de laisser un espace suffisant aux cours d'eau dans le cadre d'un réaménagement résilient.

Plusieurs approches peuvent être employées pour déterminer la largeur "minimale" de lit.

La plus simple et la moins adaptée serait de faire un calcul simple d'hydraulique avec une formule de type Manning-Strickler. On obtiendrait une section hydraulique réduite étant donné les fortes pentes du lit et donc de fortes vitesses attendues en crue. Ce calcul ne prend pas du tout en compte le transport solide et les évolutions morphologiques liées à ce dernier (les deux premiers paramètres évoqués précédemment pour estimer les niveaux) et mal le troisième (estimation de la hauteur d'eau).

L'approche la plus adaptée est d'utiliser un outil de modélisation de l'évolution du fond durant la crue, voire un modèle réduit, sur les bases des scénarii de référence (débit de pointe, volume de matériaux transportés, volume et dimensions des flottants, voire de gros blocs) retenus par le maître d'ouvrage. Nous avons pu voir que cette approche aussi sophistiquée soit elle, aurait pu être mis en défaut lors de la crue du 2 octobre 2020 du fait des effondrements massifs de berges qui ont constitué une grande partie des apports solides, mais c'est tout de même l'approche qu'il faudrait mettre en œuvre maintenant dans le cadre des études hydrauliques de conception des aménagements, notamment dans les zones de confluence pour éviter de sous-estimer l'espace nécessaire pour supporter les apports de matériaux et leur dépôt provisoire dans ces zones. Seule cette approche (à partir de modèles numériques ou physiques) permet d'estimer les trois paramètres (évolution systématique, respiration et niveau d'eau).

D'autres approches basées sur des analyses géomorphologiques peuvent être employées et sont sûrement parmi les plus robustes en contexte torrentiel, mais la délimitation de l'espace de fonctionnement optimal (Terrier *et al.*, 2016) reviendrait à retenir tout le fond de vallée, qui a quasiment été entièrement balayé par la crue, voire même parfois élargi par endroit. Avec la contrainte de rétablissement des voiries, on ne peut retenir cet objectif d'EBF optimal. L'objectif si les principes d'aménagement proposés sont respectés (notamment les principes n°1 et n°2) est de tendre à minima vers l'espace de bon fonctionnement nécessaire, voire par endroit optimal (hors zones urbanisées). Les orientations prises par les travaux dans certains secteurs ne vont malheureusement pas forcément dans ce sens.

Approche sommaire retenue – critère du rapport de forme L/h :

A défaut de pouvoir mettre rapidement en œuvre des modélisations d'évolution de fond, nous avons retenu une approche sommaire basée sur une valeur minimale du rapport de forme L/h en régime critique. Des expérimentations et observations ont en effet montré que lorsqu'un écoulement a la possibilité de divaguer (écoulement non contraint latéralement), le rapport entre la largeur de l'écoulement et la hauteur d'eau (L/h) est souvent compris entre 15 et 40 dans un écoulement naturel. G. Parker (2005) propose pour sa part une gamme de variation plus importante entre 10 et 60.

Le "rapport de forme" $\beta = L/h$ est à l'origine un critère géomorphologique utilisé pour déterminer la forme du lit mineur avant débordement (ou plutôt déduit des proportions géométriques des lits mineurs avant débordement). h est la profondeur moyenne du chenal et L la largeur à pleins bords correspondante.

Il est employé notamment dans la classification des cours d'eau naturels de Rosgen [1994]. Lorsque le rapport L/H est inférieur à 12 le lit est étroit et encaissé, à partir d'un rapport de 12 des bancs alternés peuvent apparaître et au-delà de 40 des chenaux à lits multiples.

From Channel Type	E4	TO	C4	TO	C4 (BAR 6)	TO	D4
PLAN VIEW							
CROSS-SECTION VIEW							
WIDTH DEPTH RATIO	OF 2	Increases To >>>	16	To >>>	30	To >>>	60
WATER SURFACE SLOPE	OF .006	Increases To >>>	.009	To >>>	.011	To >>>	.014
CHANNEL SINUOSITY	OF 2.5	Decreases To >>>	1.7	To >>>	1.3	To >>>	1.1

Figure 123 : Ajustement progressive du style de lit des cours d'eau en raison de l'instabilité des berges (Rosgen, 1994)

En présence de lits multiples, notamment des rivières en tresses, ce rapport peut être bien supérieur (60, voire plus).

Plus récemment, Fauré (2015) a travaillé sur l'évaluation du rapport L/h suite à des crues exceptionnelles (Tech, 1941 ; Guil et Arc, 1957 ; Burthier et Lys (Val d'Aoste) en 2000 ; Bastan, 2013). On retombe sur une gamme de L/h cohérente avec les estimations de Parker entre 8 et 53 pour les quantiles 10-90, avec une moyenne de 28 et médiane de 20. Dans ce cas, ce n'est pas les largeurs d'écoulement, mais la largeur de la bande active post-crue qui a été analysée.

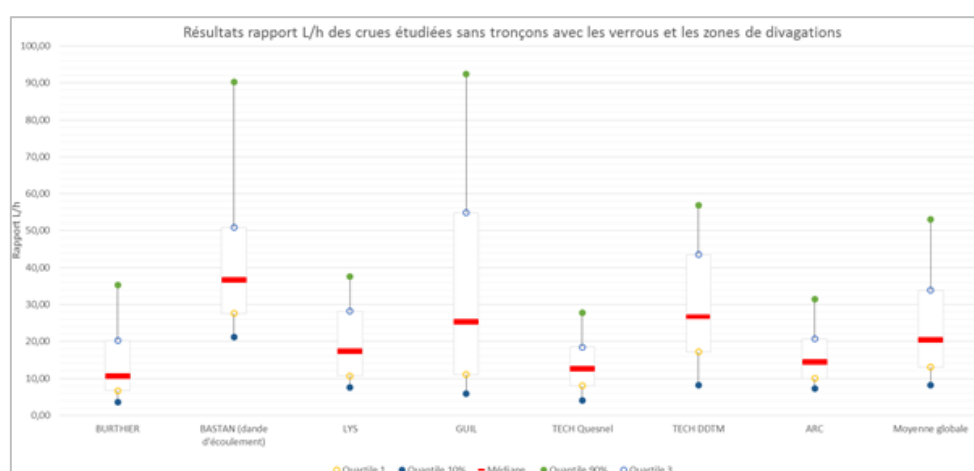


Figure 124 : Rapport L/H déduits des bandes actives lors de 6 crues extrêmes (A. Fauré, 2015)

Si on intègre les largeurs de bande active dans les zones de confluence ou de vastes divagations, le critère L/h dépasse largement 60 (quantile à 90 % proche de 90).

Puisqu'en contexte torrentiel, le débit de plein bord est proche de débit morphogène, nous proposons d'utiliser ce critère L/h pour notre part pour déterminer les caractéristiques d'un lit à réaménager.

Pour un débit donné (pris comme référence : centennal ou plus forte crue connue), lorsque ce rapport L/h est inférieur à 10-15, le lit est bien trop étroit et les fortes vitesses induites provoquent des érosions latérales et une incision du lit lorsqu'ils ne sont pas protégés, ce qui a tendance à élargir (ou à creuser) le lit. Pour des lits très étroits, un dépavage du lit et des destructions d'ouvrages de protection peuvent se produire. C'est souvent le cas au niveau des ponts, s'ils ne sont pas protégés contre l'affouillement par un pavage intégral du lit (radier avec bêche amont et aval) ou un seuil à l'aval immédiat.

À l'inverse, lorsque le rapport L/h est supérieur à 40, le lit devient suffisamment large pour que l'écoulement n'utilise pas forcément toute la largeur du lit, en se concentrant en un ou plusieurs bras vifs. Cette configuration de lit large est plutôt favorable pour réguler le transport solide, mais peut favoriser les divagations du cours d'eau notamment en zones propices au dépôt sédimentaire (et donc attaquer les berges lorsque les divagations les atteignent).

Les travaux de Ramette (1979) aboutissent à un rapport L/h de 18 lorsque le rendement énergétique est maximal. Dans son « Essai d'explication et de quantification des morphologies fluviales à partir de la théorie du régime » (Ramette, 1990), suite à l'étude menée sur la Jamuna et la Rivière des galets (à La Réunion), il constate que pour « Les valeurs β_0 déterminées pour les cas extrêmes que constituent la Jamuna et la Rivière des galets et pour des débits maxima les plus fréquents (limite de débordement), sont de l'ordre de 50 ». Dans un autre article (1988 - Morphologie et transport solide de rivières à forte pente), Ramette retient un rapport L/H supérieur à 50 pour dimensionner l'endiguement de la rivière des Galets suite à des essais sur modèle réduit pour réduire les vitesses moyennes et limiter les érosions de berges et donc l'importance des protections.

L'objectif est donc de retenir un rapport L/h d'au moins 40 comme valeur minimale pour calculer la largeur de lit à conserver, voire bien plus dans les zones de régulation (> 60-80). D'une manière générale, le rapport L/h a plutôt tendance à baisser lorsque la pente augmente, mais cela dépend aussi beaucoup du faciès des vallées. Sur la Roya, il est souvent impossible de façonner des lits avec un L/h supérieur à 15 pour le débit de référence, alors que sur la Vésubie on peut conserver des lits larges (L/H de l'ordre de 40 voire plus) en dehors des zones de contractions naturelles. Donc le critère L/h n'est pas le seul critère à prendre en compte dans l'analyse.

L'utilisation de ce critère L/h sur des lits étroits non divagants est d'ailleurs moins légitime, mais c'est aussi un critère d'évaluation de "survitesse" favorable à l'érosion ; plus le rapport L/h baisse, plus le lit est étroit, plus la hauteur d'eau est importante et donc la vitesse et les contraintes appliquées augmentent. Il est aussi possible d'estimer la vitesse moyenne ou la contrainte à la paroi pour apprécier les risques d'érosion.

En résumé : Il s'agit ici d'une approche sommaire pour éviter de réduire trop la largeur des lits lors des premiers réaménagements, mais il est parfois nécessaire de disposer d'un lit plus large pour supporter sans dommage des apports massifs en matériaux et réguler le transport solide dans les zones de confluence. C'est notamment le cas à Breil sur Roya où nous préconisons le maintien d'un lit large en amont de la traversée urbaine.



Figure 125 : Illustration d'un lit d'une soixantaine de mètres préconisé sur la Roya en amont de Breil-sur-Roya

Cette approche prend ainsi indirectement en compte les deux paramètres liés au transport solide (évolution du fond et respiration du lit) en dégagant plus d'espace pour ces derniers, mais comme indiqué précédemment au stade des études de conception des ouvrages, il faut impérativement avoir recours à des modélisations d'évolution du fond du lit (numérique ou physique) et prendre en compte différents scénarios (concomitance de crues ou non dans les zones de confluence, effet des flottants ...). L'analyse doit être menée sur un tronçon suffisamment étendu pour prendre en compte un éventuel dépôt régressif depuis l'aval (lié à la présence d'une contraction ou d'une diminution progressive de la pente longitudinale).

7.2.3.1.5 Hauteur de berge

Si la recommandation d'aménager des lits larges est respectée, l'erreur serait ensuite pour estimer les hauteurs d'eau de considérer que l'écoulement s'étale sur toute la largeur du lit.

Dans le cas de lit large laissant un réel espace de divagation, les écoulements ne s'étalent pas forcément sur toute la largeur du lit et vont se concentrer en un ou plusieurs bras, et en changer pendant la durée de la crue. La détermination précise d'une hauteur d'écoulement, basée sur des profils établis à un instant donné est donc inadaptée. Il convient plutôt de définir une enveloppe des niveaux atteints lors de la crue en considérant une section d'écoulement réduite qui peut se déplacer au gré des dépôts dans le système de protection et/ou entre les berges (figure ci-dessous).

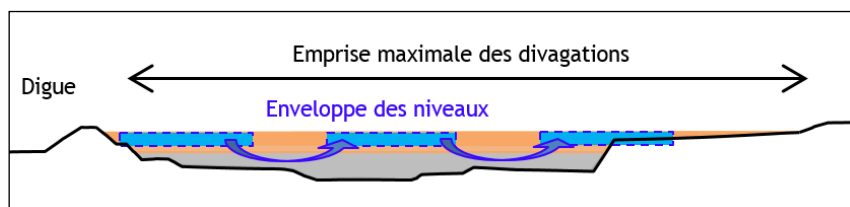


Figure 126 : Illustration de la détermination de l'enveloppe des niveaux (cas d'un lit large et divagant)
(Source : Queffélec et al., 2019)

On retient alors dans le cas de lits larges et divagants, un rapport L/h compris entre 15 et 20 (voire 12 par précaution, valeur correspondant au début de l'apparition des bancs alternés) pour estimer la hauteur d'eau. Les niveaux ainsi obtenus peuvent correspondre à une section très importante, mais qui ne sera pas entièrement occupée par l'écoulement à un instant donné.

7.2.3.1.6 En résumé

La détermination précise d'une hauteur d'écoulement, basée notamment sur des profils établis à un instant donné est souvent illusoire, voire inadaptée. Le transport solide, intense durant les crues, est en effet capable d'adapter la forme des sections aux conditions d'écoulement en crue. Il modifie profondément les conditions d'écoulement et les rapproche d'un écoulement critique ($F=1$).

Pour déterminer la largeur minimale du lit, nous préconisons en première approche de retenir un rapport $L/h > 40$, voire plus pour réguler le transport solide, mais ensuite pour estimer les niveaux d'eau dans cet espace, il faut tenir compte que l'écoulement peut rester concentré sur une partie de cette largeur (L/h de l'ordre de 15).

L'utilisation d'outil de modélisation du transport solide pour apprécier l'évolution du fond du lit en crue est nécessaire au stade de conception des ouvrages, notamment pour déterminer les hauteurs de berge à aménager.

Etant donné les quantités importantes de matériaux qui restent mobilisables et les fortes incertitudes sur les prochaines crues (transfert par bouffées de charriage qui présente un caractère aléatoire), il faut par ailleurs retenir une revanche supplémentaire suffisante de l'ordre du mètre. Les respirations du lit ont été plus importantes lors de la crue, mais on peut espérer vu l'ampleur des travaux engagés que l'amplitude des respirations sera plus réduite. Une revanche de quelques décimètres n'est en revanche pas du bon ordre de grandeur vu les incertitudes et l'ampleur de évolutions morphologiques récentes.

7.2.3.2 Principe d'aménagement n°2 – Préserver ou aménager des zones de régulation de transport solide

L'analyse du profil en long de la Roya met en évidence des tronçons de plus faible pente, dans la traversée des principaux bourgs : Tende, Fontan et Breil-sur-Roya notamment, sujets à des dépôts massifs et divagations lors de crues intenses. A Tende par exemple, la pente du profil de la Roya s'abaisse aux alentours de 1,5%, provoquant le dépôt des matériaux charriés avec un exhaussement significatif du fond de lit (3 m en moyenne), associé à un élargissement de bande active ainsi qu'à des érosions intenses des berges qui ont généré d'importants affouillements sur nombre de bâtiments. Les observations et les analyses de profil en long en amont de ce tronçon ont montré que des volumes considérables avaient été déstabilisés par la crue, et restaient fortement mobilisables par des crues intenses. Ces constats doivent nous amener à anticiper des évolutions de lit qui, en cas de crue morphogène, ressembleront fortement à ce qui s'est produit le 2 octobre, même s'il s'écoule d'ici là plusieurs dizaines d'années sans crue morphogène au cours desquelles le lit va probablement s'inciser sur plusieurs mètres et se revégétaliser.

D'autre part, il est aujourd'hui largement reconnu que les lits larges (lits en tresses ou à style divagant) sont largement capables de s'accommoder de forts apports sédimentaires sans que cela génère une augmentation démesurée de leur emprise spatiale et de leur niveau lors des crues extrêmes. Ce principe a été largement confirmé par l'analyse des effets morphologiques de la tempête Alex.

Comme indiqué au 7.1, il est difficile de prédire les évolutions morphologiques à venir dans un régime hydroclimatique incertain lié au changement climatique. En l'absence de nouvelle crue morphogène et du fait des prélèvements de matériaux pratiqués lors des travaux post-crue, la tendance générale au cours des prochaines années, décennies, pourrait être à l'incision du lit. Etant donné les volumes de matériaux qui restent mobilisables (les observations et les bilans volumétriques réalisés ont en effet montré que des volumes considérables avaient été déstabilisés par la crue et restaient fortement mobilisables lors de prochaines crues), on ne peut exclure malgré tout lors des prochaines années un transit de quantités importantes de matériaux par bouffée de charriage, dont on maîtrise mal l'amplitude et la localisation, ni l'occurrence de nouvelle(s) crue(s) morphogène(s).

Il est donc plus que jamais nécessaire d'anticiper des apports de matériaux potentiellement importants et de faire en sorte de réguler ces apports pour limiter l'amplitude des variations altitudinales du lit qui peuvent être source de désordres dans les traversées urbaines.

La préservation de vastes zones de régulation naturelles, voire l'aménagement de nouvelles en bénéficiant de l'espace regagné par la rivière lors de la dernière crue est primordial, particulièrement en amont des traversées urbaines à forts enjeux et au niveau des zones de confluence où un espace plus vaste doit être préservé. Ne surtout pas réduire les espaces naturels encore disponibles ce qui limiterait les capacités de régulation dans des zones stratégiques, par exemple à la confluence avec le Refrei, à l'amont du pont ferroviaire à Tende.

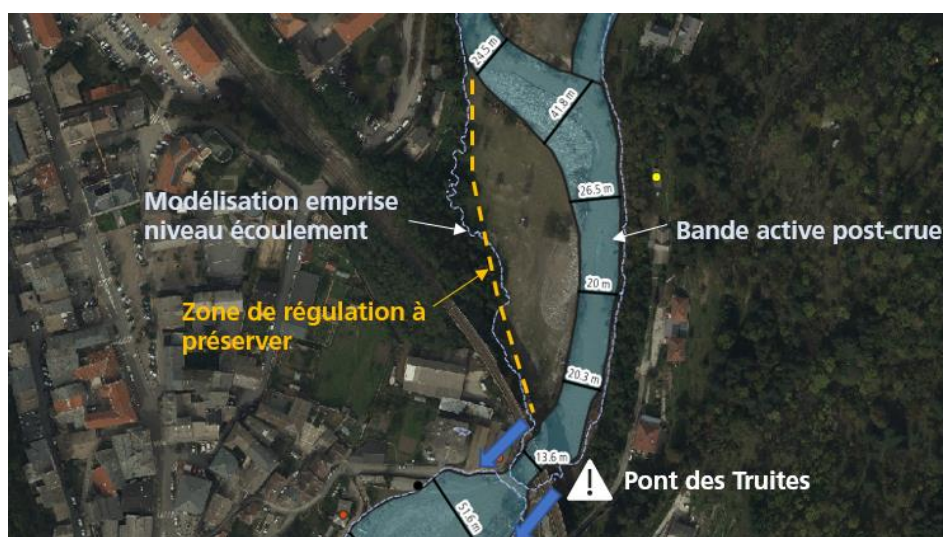


Figure 127 : Exemple de zone de régulation du transport solide (matérialisée par le pointillé jaune) préconisée sur la Roya à Tende

7.2.3.2.1 Objectifs visés

Ces zones de régulation permettent d'optimiser le transport sédimentaire : en cas d'apports massifs, elles favoriser le dépôt d'une partie des matériaux et limitent ainsi le transit sédimentaire en aval vers des zones à forts enjeux. Lorsque les apports en matériaux sont plus faibles, les érosions du lit reprennent des matériaux et permettent d'assurer un transit de matériaux suffisant vers l'aval, ce qui limite les risques d'affouillement en aval et redonne dans le même temps de l'espace à la zone de régulation amont pour supporter une prochaine crue.

Ce type de fonctionnement est optimal et permet d'assurer la continuité du transport solide, de réduire les risques de débordement en aval en période de crues et les risques d'affouillement hors crue. Il est particulièrement net dans les zones de confluence où un vaste espace doit être préservé pour assurer un stockage temporaire des matériaux durant la crue. Réduire l'espace dans ces zones revient à entériner des opérations de curage coûteuses et impactantes pour le milieu, et qui par ailleurs ne permettent pas de se prémunir des débordements lors des fortes crues.

Un second effet mis en évidence par l'analyse du chapitre 3 est que les zones larges qui permettent la régulation du transport solide permettent aussi des dépôts significatifs de flottants. Elles régulent ainsi les flux de bois flottants et protègent les tronçons situés en aval.

Ne pas confondre zone de régulation du transport solide et plage de dépôt :

Les plages de dépôt sont des ouvrages de protection passive présentant une zone de dépôt à pente faible, l'objectif étant de favoriser les dépôts en crue. Elles sont curées post-crue pour maintenir une capacité de stockage suffisante et rétablir la pente initiale. Ces ouvrages sont en outre quasi-systématiquement fermés par des barrages qui peuvent prendre des configurations diverses : barrages à pertuis, barrages à grilles, barrages de type fente. L'objectif des plages de dépôt n'est pas de réguler le transport solide, mais de le limiter fortement à l'aval.

Elles ont vocation à piéger tout ou partie du transport solide parce que ce dernier ne peut pas traverser les zones aval en général à cause d'un déficit de capacité de transport solide. De tels ouvrages coûtent souvent cher à entretenir et peuvent avoir des effets secondaires très lourds à gérer (incision, dégradation des milieux).

7.2.3.2 Limitation de l'entretien

Une zone de régulation du transport solide, n'a en temps normal, pas vocation à être curée. L'intensité des phénomènes torrentiels diminue naturellement depuis les têtes de bassins vers les rivières de basse vallée. Les zones préférentielles d'atténuation de cette intensité sont des zones larges et de relativement faible pente où les sédiments et les flottants peuvent se déposer lors des crues les plus intenses et être repris lors des crues suivantes, naturellement moins chargées en sédiment. Dans le même esprit que les débordements liquides dans les lits majeurs permettent d'écarter les crues dans les rivières (ce qui justifie la protection de ces ZEC : zones d'écarterement des crues), les zones de régulations du transport solide modulent, régulent et atténuent l'intensité des phénomènes torrentiels. Au contraire des plages de dépôts, elles ne nécessitent de plus pas ou très peu d'entretien. Il est nécessaire d'accepter ces dépôts temporaires dans la mesure du possible et de ne prélever que les apports exceptionnels pouvant causer des débordements. C'est pourquoi les opérations de curage, voire de reprofilage pour favoriser la reprise de matériaux resteront exceptionnelles et ponctuelles, en cas d'apports sédimentaires massifs dans certaines zones et en fonction des niveaux de fond observés à l'aval au droit des enjeux. Dans tous les cas, ces opérations si elles se révélaient nécessaires devront être surveillées étroitement pour éviter des curages excessifs susceptibles de déstabiliser les ouvrages.

L'aménagement de vastes zones de régulation est justement prévu pour limiter ces opérations de curage au strict minimum et réduire l'impact environnemental, mais également financier à moyen terme.

7.2.3.2.3 Aménagements associés

Si la zone de régulation est suffisamment large, des aménagements paysagers, récréatifs, sportifs ... qui constituent de faibles enjeux peuvent être autorisés sur les terrasses latérales. Il faut avoir conscience que ces aménagements peuvent être détruits lors de crues. Il faut par conséquent qu'ils soient peu onéreux, pouvant être remis en place facilement et bien entendu sans couchage et facilement évacuable en cas de besoin.

D'une manière générale même si aucun aménagement paysager n'est prévu, les terrasses seront rapidement recolonisées par de la végétation, qui va se développer naturellement. Il faudra veiller à ne conserver qu'une végétation arbustive et ne pas laisser pousser des grands ligneux qui pourraient à terme être arrachés et constitués des embâcles.

7.2.3.3 Principe d'aménagement n°3 – Augmenter la portée des ouvrages de franchissement

L'analyse des modes et niveaux d'endommagement des ponts (cf. § 4.6.3.3) a révélé que les ouvrages ayant subi les endommagements plus sévères sont les passerelles (ouvrages plus légers et moins solides), les ponts à travées multiples (présence de pile en rivière aggravant le risque d'affouillement et d'obstruction par les embâcles) et les ponts à travée unique (trop souvent étroits et formant un verrou hydraulique).

Il a été évoqué précédemment le rôle potentiel d'ouvrages trop étroits dans la remontée des niveaux à l'amont des ouvrages. Les ponts, sont également susceptibles, d'autant plus en présence de piles multiples dans le lit du cours d'eau, d'être obstrués partiellement ou totalement par des flottants. Ces cas peuvent mener à la destruction des ouvrages par concentration des écoulements et affouillement des fondations, chocs, surverse sur le tablier. Ils peuvent également engendrer des érosions notables en amont ou en aval immédiat des ouvrages. Les ouvrages les plus étroits peuvent être menacés y compris en l'absence de transit de bois flottants. En effet, les vitesses d'écoulement élevées sous l'ouvrage peuvent également conduire à sa ruine par affouillement des fondations. Les vitesses sont également élevées en aval, ce qui peut générer d'importantes érosions de berges en aval. Des phénomènes d'érosion de berges peuvent aussi se produire suite au dépôt de matériaux qui se forme à l'aval des ouvrages en cas d'élargissement.

Les cas documentés de ponts étroits ou à piles dans le lit du cours qui ont été détruits, obstrués par des flottants, et/ou ayant généré des désordres notables dans leur environnement immédiat (par concentration des écoulements, remontée des niveaux ou érosion de berge) sont très nombreux en Roya.

Dans une démarche de réaménagement résiliente, il convient donc d'augmenter autant que possible la portée des ouvrages franchissement et de ne pas mettre de piles centrales.

Dans la mesure du possible, leur portée sera calée sur la largeur du lit en amont et en aval (préconisation par exemple pour le pont des truites à Tende ou encore le pont de Venanson à Saint Martin Vesubie).

En cas de réduction de largeur, des ouvrages d'entonnement très progressifs seront mis en place en amont et en aval pour favoriser l'entonnement des écoulements et le transit des flottants. Il ne faudrait pas descendre sous un rapport de forme L/h inférieur à 20 sous l'ouvrage. Si cette condition ne peut être respectée, il est fortement recommandé de mettre en place un radier intégral du fond (rampe à macro-rugosités pour garantir la franchissabilité piscicole), pourvu d'une bêche para fouille en amont et en aval, suivie d'une protection para fouille en enrochements libres (en trois couches) à l'aval immédiat.

Les sous-poutres des ouvrages de franchissement ne doivent par ailleurs pas réduire trop le tirant d'air, un rehaussement localisé de la chaussée permet de mettre l'arase inférieure de la sous-poutre au niveau des berges latérales.

Pour les ouvrages existants, ce gain de section peut aussi être obtenu par suppression de piles dans le lit. Rappelons à ce sujet que le pont Charabot à Breil sur Roya était jusqu'à sa destruction au cours de la seconde guerre mondiale un pont métallique sans travées intermédiaires. Il peut également être obtenu par déplacement de l'ouvrage. L'exemple du pont des truites à Tende, avec une esquisse réalisée par les services ONF-RTM dans le cadre d'ateliers de reconstructions, est présenté en Annexe 20.

7.2.3.4 Principe d'aménagement n°4 - Protéger les enjeux à proximité des cours d'eau

Comme indiqué lors des différents ateliers d'appui Gemapi, il ne nous appartient pas de déterminer les enjeux qui doivent être protégés ou non. C'est une décision qui relève du propriétaire du bien en question ou de la collectivité qui se porte maître d'ouvrage dans le cadre d'une opération de protection collective.

7.2.3.4.1 Privilégier les opérations collectives sous maîtrise d'ouvrage publique

Il n'est pas opportun de laisser les propriétaires se protéger eux-mêmes, sans concertation préalable dans le cadre d'un aménagement hydraulique d'ensemble, car en protégeant leur parcelle, ils peuvent accroître les risques d'érosion sur les parcelles avoisinantes. En durcissant un tronçon de berge et selon l'orientation de la protection, les écoulements peuvent être renvoyés sur la rive opposée (la protection d'une rive se fait généralement aux dépens de la rive opposée) et /ou provoquer une accélération des écoulements qui vont éroder les terrains en aval. Si la protection empiète sur le lit, cela peut également générer des désordres en amont (dépôt favorisant les divagations qui vont éroder le terrain en amont). Les protections individuelles doivent rester l'exception pour éviter ce type de désagrément. Par ailleurs, les extrémités des protections doivent être solidement ancrées dans les berges ce qui nécessitent souvent une maîtrise foncière plus large que la seule parcelle à protéger. Tout ceci milite pour des opérations sous maîtrise d'ouvrage publique, assurée par des collectivités territoriales.

7.2.3.4.2 Protection indispensable pour préserver les enjeux les plus sensibles

Sur la Vesubie ou la Roya, vu les pentes des cours d'eau, le caractère très morphogène des crues et le pouvoir érosif des écoulements torrentiels, il est indispensable de mettre en place une protection robuste bien protégée contre l'affouillement (la plupart de ouvrages sont détruits par affouillement de leur fondation en contexte torrentiel) si on veut préserver des enjeux situés à proximité des berges.

Les enjeux prioritaires à protéger sont les secteurs urbanisés, les zones bâties, les routes et les infrastructures publiques. Les berges qui ne présentent pas d'enjeux directs à leur proximité peuvent en revanche être non protégées ou protégées plus légèrement par exemple par des techniques de génie végétale (SfN).

Par ailleurs, les berges hautes et subverticales depuis leur érosion massive vont continuer à régresser ce qui pourrait à court, moyen ou long terme selon le cas venir éroder les fondations de certains bâtiments situés en retrait. Une protection du pied de berge et/ou un soutènement plus imposant pourrait se révéler nécessaire pour éviter d'aggraver la situation et pérenniser ces enjeux.

Toute berge non protégée pourrait se faire éroder lors des prochaines crues avec une probabilité plus ou moins forte selon la proximité du lit. La crue du 2 octobre nous a tristement rappelé que la notion d'éloignement par rapport au lit était parfois toute relative, mais il faut bien que les collectivités se fixent des priorités d'intervention.

Sur les zones de régulation par exemple on peut parfois tolérer l'érosion des pieds de berges ou de versants lors d'une crue aussi exceptionnelle, si leur effondrement potentiel ne risque pas de détruire des enjeux implantés plus haut. La protection n'est pas une fin en soi, mais doit être proportionnée aux enjeux. Une analyse coût-bénéfice (ACB) ou mieux une analyse multi-critères (AMC) devrait permettre d'apporter une aide à la décision des maîtres d'ouvrages concernés.

7.2.3.4.3 Protection même pour les lits plus larges ou en bordure des zones de régulation en cas d'enjeux à proximité

Si le maintien de largeurs d'écoulement est fondamental pour limiter l'amplitude des variations altitudinales de lit, réduire globalement les vitesses d'écoulement et limiter l'intensité des affouillements sur les berges, il n'en demeure pas moins que le cheminement des écoulements reste aléatoire en crue, sous l'influence des transports solides et des flottants, et que le débit peut se concentrer en un bras vif emportant les écoulements vers une berge ou une autre.

Les lits étroits doivent bien entendu être protégés en fond et sur les berges du fait des fortes vitesses et du risque d'incision du lit (incision qui peut être à l'origine d'effondrement de berge) c'est une évidence, mais également les lits plus larges. Ils favorisent quant à eux le dépôt de matériaux (c'est d'ailleurs l'objectif recherché pour les zones de régulation) et donc les divagations du cours d'eau qui sont susceptibles également d'attaquer les berges, parfois frontalement du fait des sinuosités issues des divagations, même si celles-ci paraissent initialement plus éloignées du lit mineur. Si les berges extérieures de la zone de régulation ou du lit large présentent également des enjeux importants, elles doivent également être protégées par un dispositif de protection.

7.2.3.4.4 Protection adaptée au contexte torrentiel

Les protections à mettre en place doivent être suffisamment dimensionnées et robustes pour résister aux fortes contraintes des écoulements torrentiels (forte capacité d'érosion, impacts par des gros blocs ou de flottants), supporter potentiellement une incision importante à leur base (fondations idéalement positionnées en appui sur le substratum rocheux s'il existe, à défaut minima au niveau du fond du lit avant crue avec un sabot para fouille correctement dimensionné) et ne pas être submergés par les écoulements (exhaussement prévisible du lit pris en compte). Ces points sont approfondis au § 7.2.5.

7.2.3.5 Principe d'aménagement n°5 – Traiter préventivement les flottants qui menaceraient encore d'être arrachés

Objectifs visés : réduire les dommages liés directement aux corps flottants transportés lors des crues.

La majeure partie des flottants présents dans les lits ont été traités rapidement et de façon efficace par les équipes de Force 06.

Il ne s'agit pas ici d'essayer de couper tous les arbres qui restent en bordure du cours d'eau, la tâche serait encore démesurée et le résultat hasardeux, mais de traiter préventivement les rares flottants ou boisements de berge qui menaceraient encore d'être arrachés ou de basculer dans les traversées urbaines étroites ou en amont immédiat des ouvrages de franchissement.

Le potentiel de flottants présents dans la bande active ou à proximité est ainsi bien important maintenant qu'avant la crue, mais la ripisylve va repousser. A moyen terme, il conviendra de mettre en place un plan de gestion de la ripisylve afin de réaliser un **entretien non systématique et très sélectif**. On veillera notamment à ne pas laisser pousser des grands ligneux et à maîtriser le développement de la végétation (qui a tendance à fixer les bancs et les terrasses alluviales limitant ainsi la reprise de matériaux) dans les zones de régulation de matériaux et dans les traversées urbaines. L'entretien systématique de la végétation en dehors de ces secteurs est en revanche illusoire sur l'ensemble du bassin versant.

Il est souvent considéré par les gestionnaires que l'entretien des ripisylves permet la réduction du risque de production de bois flottant. Sur les rivières torrentielles, c'est faux le plus souvent. Les rivières torrentielles telle que la Vésubie et ses affluents ont de tout temps subi des épisodes de crues élargissant leur bande active de façon épisodique. Entre deux crues morphogènes, cette bande active se rétracte par incision du lit dans un chenal préférentiel de faible largeur et colonisation par des espèces végétales pionnières de la bande qui ne se retrouve plus régulièrement parcourue par les écoulements (cf. Figure 52 b). Très rapidement des bosquets et forêts prennent place sur les terrasses alluviales. Ces dernières seront à coup sûr érodées un jour. **Il faut donc apprendre à vivre avec le bois flottant dont la production et le transport pendant les crues morphogènes sont certains.** Le maintien d'un large espace de bon fonctionnement et le retrait des verrous hydrauliques (pas de pile en rivière, ponts de larges portées, passages à gués submersibles) est la seule solution résiliente à ce problème.

Comme cela a été mis en évidence au chapitre 6, les grands principes énoncés précédemment, s'ils sont respectés, auront pour effet de limiter les problèmes associés au transport des flottants. D'une part, le maintien d'un gabarit de lit large et de ponts de grande portée limite, voire annule, la possibilité qu'un embâcle barre le lit du court d'eau. Les espaces de divagation larges permettent d'absorber les chutes des arbres en travers du lit et les détournements des écoulements associés aux embâcles dans les zones naturelles. Au contraire, les chenaux étroits, barrés de quelques troncs ne peuvent que renvoyer les écoulements en lit majeur dans les zones à enjeux.

La protection grâce à des pièges à embâcles des ouvrages et secteurs ne pouvant être réaménagés est possible mais devrait être la solution de dernier recours puisqu'elle peut impacter le transport solide.

7.2.4 Recommandations pour le réaménagement des traversées urbaines

Le Préfet nommé à la reconstruction des vallées à la suite de la catastrophe a initié, dès le début de l'année 2021, la collaboration entre les acteurs institutionnels du territoire impacté, autour des problématiques du réaménagement résilient des cours d'eau. Le principe d'ateliers Gemapi, associant les collectivités locales, les collectivités gemapiennes, les experts et plus largement les organismes concernés par la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations, a ainsi été acté le 5 février 2021. Il s'agissait de partager les constats, les priorités de réparation et de reconstruction, les points de vigilance, pour aboutir à des schémas de principe d'aménagements hydrauliques, portés par les gemapiens.

Dans le cadre de ces ateliers, les services de restauration des terrains en montagne de l'ONF ont été amenés à rappeler et expliquer les grands principes prévalant en matière de fonctionnement torrentiel des cours d'eau, et à énoncer des recommandations pour le réaménagement résilient d'un certain nombre de secteurs sensibles du point de vue des enjeux en présence, et notamment les traversées urbaines. Ce travail, basé sur l'expérience et sur les constats post-crue du 2 octobre 2020, s'est nourri à l'avancement des analyses réalisées par les experts de l'ONF-RTM et de l'INRAE dans le cadre du retex « crue torrentielle », analyses qui viennent d'être développées dans les chapitres précédents.

Dans certains cas particulièrement sensibles ou complexes, des modélisations hydrauliques spécifiques ont été proposées, pour affiner la compréhension des phénomènes ou consolider des points de vue concernant l'évolution prévisible des cours d'eau.

7.2.4.1 Réaménagement de la Roya dans la traversée de Tende

7.2.4.1.1 Rappel des éléments de diagnostic

Dans la traversée urbaine de Tende sensu stricto, comme cela a été explicité au chapitre 5.4.4, le lit de la Roya s'est exhaussé de 3 à 5 m au cours de la crue, générant d'importantes divagations et l'endommagement de nombreux bâtiments sur les 2 rives. Plusieurs points de contraction ont exacerbé ce phénomène. Le gabarit limité du pont des Truites a occasionné son obstruction partielle par des flottants et des débordements en rive gauche impactant un lotissement en rive gauche en aval. La forte vitesse des écoulements au niveau de l'ouvrage a vraisemblablement constitué un facteur aggravant des érosions observées en aval en rive droite (avec destruction de la piscine municipale).

Les observations de terrain post crue montrent par ailleurs une très forte disponibilité en matériaux à l'amont de Tende, avec des stocks susceptibles d'être massivement mobilisés lors de prochaines crues.

La quantité des stocks alluviaux, couplée à la rupture de pente observée dans la traversée de Tende génèrent des conditions favorables aux dépôts de sédiments lors de prochaines crues. La magnitude de ces dépôts dépendra : (a) de l'intensité de la crue sur le bassin amont de la Roya ; (b) des apports liquides et solides du Refreï.

Le lit dans la traversée de Tende est fortement contraint latéralement, notamment du fait d'aménagements anthropiques sur d'anciennes terrasses alluviales. Ceci rend illusoire un élargissement du lit compatible avec le respect de critères hydrauliques permettant de minimiser l'impact des écoulements en crue (vitesse des écoulements, contrainte tractrice, hauteur d'écoulement, ratio L/h ...). On verra plus loin que dans le meilleur des cas, il n'est pas possible de viser une largeur minimale de plus 24m dans la traversée du bourg.

En contexte torrentiel le ratio L/h est souvent utilisé pour caractériser la largeur minimale nécessaire pour le lit. Il ne s'agit évidemment pas du seul critère à prendre en compte. Par exemple, dans la vallée de la Vésubie, on a pris en compte un ratio minimum de 15 pour limiter les contraintes hydrauliques en crue centennale. Comme l'illustrent les résultats présentés dans le tableau suivant, l'application de ce ratio conduit à une largeur de lit de 35 m. Or, la largeur minimale pouvant être obtenue dans la traversée du Bourg est de 24 m. On notera en outre que la vitesse d'écoulement et la contrainte de cisaillement au fond associées au ratio $L/h=15$ sont déjà très élevées (valeurs respectivement de 7,8 m/s et de 406 N/m²). Le choix de largeurs minimales de lit inférieures à 24 m conduirait par conséquent à des conditions d'écoulement encore plus pénalisantes.

$Q_{100}^{(a)}$ (m ³ /s)	Paramètre	Largeur, hauteur, vitesse, contrainte au fond pour					
		$L/h=3,2$	$L/h=7,9$	$L/h=15$	$L/h=20$	$L/h=30$	$L/h=40$
395	Largeur (m)	14	24	35	42	53	63
	Hauteur (m)	4,3	3,0	2,3	2,1	1,8	1,6
	Vitesse (m/s)	6,5	5,4	4,8	4,5	4,2	3,6
	Contrainte au fond (N/m ²)	525	474	406	373	327	296

(a) : Pour l'estimation du débit centennal à Tende, il a été choisi une approche sécuritaire avec calcul avec méthode de Myer en fonction de la valeur de référence à Breil sur Roya de 1 332 m³/s (EDF, 2006c). L'utilisation de la valeur de référence à St-Dalmas aurait conduit à une valeur inférieure.

Tableau 39 : Largeur, hauteur, vitesse et contrainte au fond pour un débit centennal et différentes valeurs de ratio Largeur/hauteur d'écoulement (hypothèse d'écoulement en régime critique) à Tende

Compte tenu de la faible largeur du lit, de la tendance au dépôt lors de crue intenses, et de l'influence de contractions brutales du lit sur l'augmentation de la hauteur des dépôts, il apparaît donc d'autant plus indispensable de ménager des zones de régulation du transport solide en amont de la traversée du bourg.

7.2.4.1.2 Principes de réaménagement

Les principes de réaménagement recommandés dans la traversée de Tende sont donc les suivants (cf. document de présentation de l'atelier Gemapi du 25/02/2021 en [Annexe 19](#)) :

- Aménagement d'une zone de régulation en amont du secteur du CHU et protection des berges contre l'affouillement au droit des enjeux conservés ;
- Aménagement d'une zone de régulation en amont du pont ferroviaire, à la confluence avec le Refreï ;
- Reconfiguration du pont des truites, par son déplacement vers l'aval et une augmentation de son gabarit ;
- Recherche de solutions pour réduire les singularités hydrauliques : reconstruction du pont du bourg neuf avec une portée plus large, recul d'un nombre limité d'enjeux pour gagner en largeur de lit, notamment au niveau du moulin et en face de l'Ehpad. Il apparaît ainsi possible de tendre vers une largeur minimale de 24m.

7.2.4.1.3 Esquisse d'un réaménagement dans la traversée de Tende – Apports de la modélisation

On l'a vu dans ce qui précède, le lit de la Roya dans la traversée de Tende est particulièrement contraint et la question se pose, dans l'hypothèse d'une crue centennale et compte tenu des évolutions subies par le cours d'eau lors de la crue Alex, des réelles possibilités de protéger les enjeux habités.

Une modélisation d'évolution du fond de lit en crue « centennale » a donc été réalisée pour guider les collectivités dans la définition de scénarios de reconstruction dans la traversée de Tende. Le rapport d'analyse est joint en [Annexe 20](#).

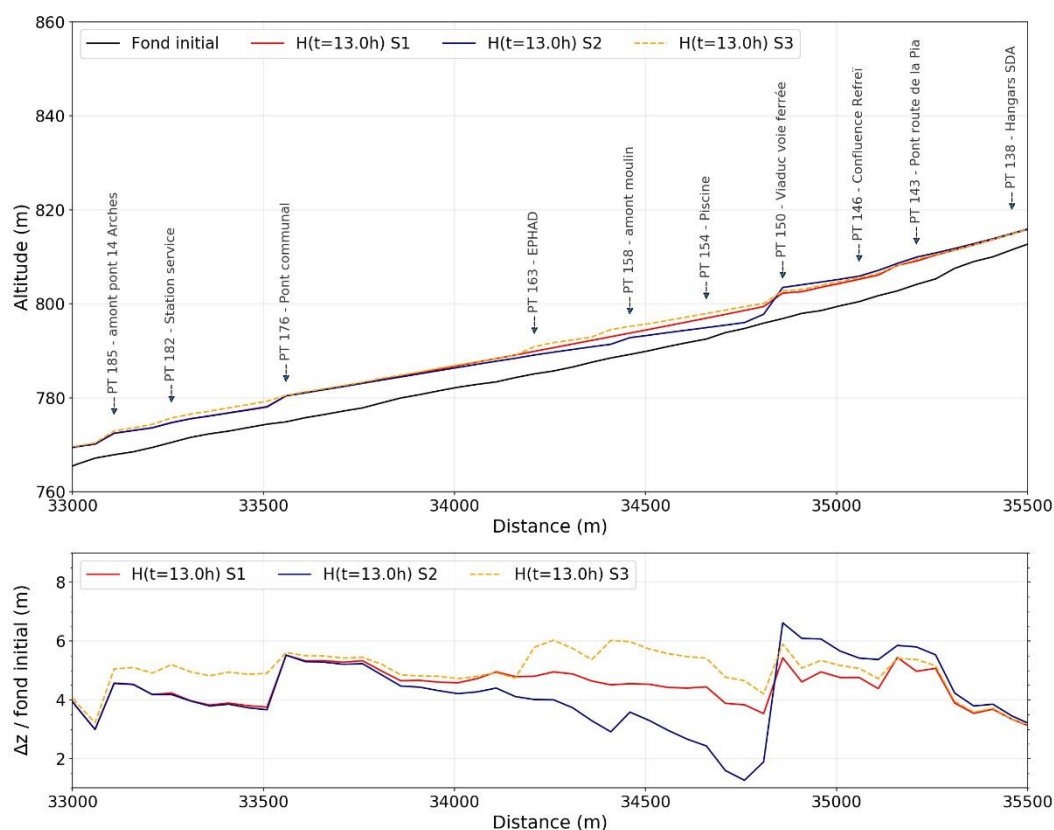
Trois scénarios d'aménagement caractérisés par des largeurs différentes ont été pris en compte : (a) emprise « large » (Scénarios S1 et S2) ayant pour objectif de maximiser les largeurs du lit, moyennant le recul de quelques enjeux ; (b) emprise plus étroite (scénario S3), sans recul d'enjeux et avec une largeur moins importante que la largeur de bande active résultant de la crue Alex. Le scénario S1 diffère du scénario S2 par la présence d'une zone de régulation en amont de la traversée urbaine de Tende.

Pour chacun de ces scénarios, sont fournies dans le tableau suivant les caractéristiques géométriques du lit et les conditions d'écoulement en crue centennale, ainsi que les contraintes en termes d'enjeux à délocaliser.

Critère		Scénarios S1 et S2	Scénario S3
Enjeux impactés par augmentation de la largeur du lit		- 1 ^{ère} maison RG aval pont des Truites (aval PT 151)	- 1 ^{ère} maison RG aval pont des Truites (aval PT 151)
		- Cabanons lotissement RG (PT 153 à 154)	
		- Moulin RD (PT 158 à 159)	
		- Annexe garage automobile RG (PT 163 à 164)	
Zone lotissement RG PT 151 à 156	L_{min} (m)	32	24
	L_{min}/h	12,8	7,9
Secteur central (-> pont Bourg Neuf) PT 157 à 160	L_{min} (m)	24	14
	L_{min}/h	7,9	3,2
Secteur aval (pont Bourg Neuf -> aval EHPAD) PT 161 à 167	L_{min} (m)	23	15
	L_{min}/h	7,4	3,6

Tableau 40 : Comparaison des géométries testées pour la modélisation : largeurs minimales et rapports largeur / hauteur d'écoulement

Les modélisations ont porté sur un scénario de crue centennal associé à 3 scénarios d'aménagement de lit. Elles montrent (voir graphique page suivante) que les niveaux d'engravement à attendre d'une crue centennale sont moindres avec un lit large, et ce d'autant plus si une zone de régulation est aménagée en amont de la traversée urbaine. Elles renforcent le diagnostic préalablement établi sur la base de l'analyse du profil en long, des rapports Largeur/hauteur d'écoulement, et des observations réalisées suite à la crue Alex.



La modélisation permet notamment de montrer qu'il est possible, en gagnant de la largeur de lit tout en préservant un maximum d'enjeux, et en aménageant une zone de régulation entre la confluence avec le Refreï et le viaduc de la voie ferrée, de protéger, pour le scénario de référence centennal, le lotissement situé en rive gauche en aval du pont des Truites par le biais d'une digue. Compte tenu de l'implantation des habitations, il apparaît possible de remblayer le terrain naturel en arrière des digues, qui deviendraient alors de simples protections de berge. La faisabilité de cette solution au niveau de la seconde maison en aval du pont reste à préciser. Elle est à tout le moins conditionnée par le devenir du rez-de-chaussée de la maison concernée.

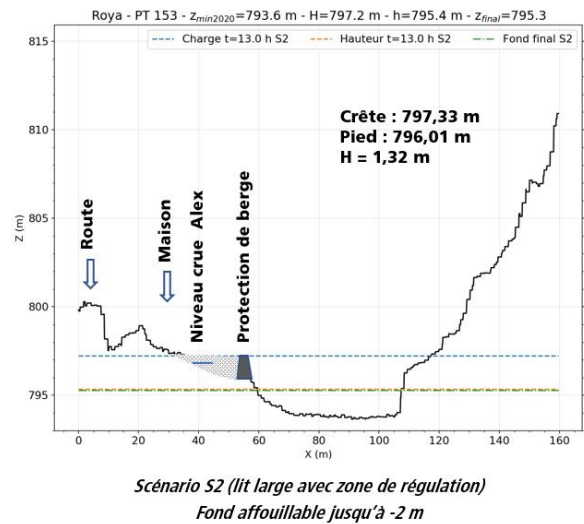


Figure 129 : Paramètres hydrauliques au niveau du profil en travers 153. Possibilité de protéger pour le scénario centennal, par une protection de berge, sous réserve de remblayer le terrain naturel

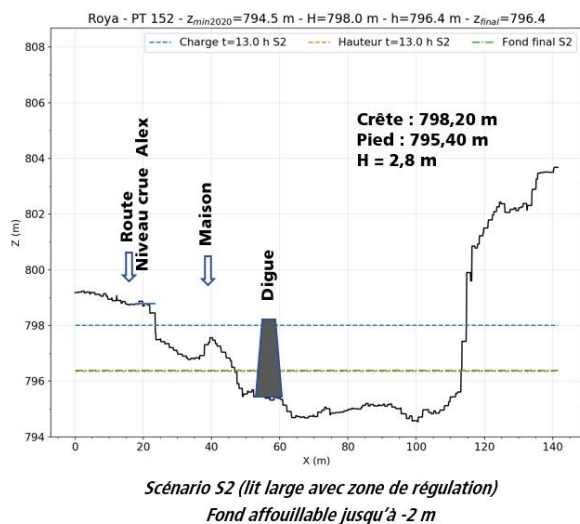


Figure 130 : Paramètres hydrauliques au niveau du profil en travers 152 (seconde maison en rive gauche en aval du pont des truites)

Cette esquisse a été partagée lors d'un atelier gemapi le 19 avril 2021, sous forme d'une contribution et d'un rapport joints en Annexe 20 et Annexe 21.

7.2.4.2 Réaménagement de la Roya et de la Bieugne dans la traversée de Saint Dalmas de Tende

7.2.4.2.1 Réaménagement de la Roya

L'analyse du profil en long de la Roya dans la traversée de Saint-Dalmas de Tende met en évidence un engravement généralisé du lit, particulièrement dans la partie aval du tronçon et notamment en aval de la confluence avec la Bieugne, et un élargissement significatif de la bande active, qui s'est traduite par des phénomènes d'érosion intense ayant conduit à la destruction du pont Ste Anne et à l'affouillement de nombreux bâtiments. Le rôle important joué par les très gros blocs pavant le lit, dans l'intensité de ces affouillements, est également mis en évidence.

À Saint-Dalmas de Tende le fond de vallée est étroit, et le lit est par ailleurs contraint par l'urbanisation. Il n'est donc pas possible d'envisager un élargissement important du lit dans le but de minimiser les contraintes hydrauliques en crue.

Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Paramètre	Largeur, hauteur, vitesse, contrainte au fond pour				
		L/h=10	L/h=15	L/h=20	L/h=30	L/h=40
(a) 420	Largeur (m)	28	36	43	55	65
	Hauteur (m)	2,8	2,4	2,1	1,8	1,6
	Vitesse (m/s)	5,3	4,9	4,6	4,2	4,0
	Contrainte au fond (N/m ²)	462	416	382	335	303
(b) 525	Largeur (m)	31	39	47	60	71
	Hauteur (m)	3,1	2,6	2,3	2,0	1,8
	Vitesse (m/s)	5,5	5,1	4,8	4,4	4,2
	Contrainte au fond (N/m ²)	505	455	417	366	331

(a) : valeur présentée à l'atelier Gemapi, calculée avec Méthode de Myer avec valeur de référence à Breil sur Roya de 900 m³/s (EDF-DTG, 2002). (b) valeur de référence retenue par l'étude EDF (2006c). Les valeurs de référence utilisées ont changé au fur et à mesure des ateliers et de la connaissance d'études antérieures.

Tableau 41 : Largeur, hauteur, vitesse et contrainte au fond pour un débit centennal et différentes valeurs de ratio Largeur/hauteur d'écoulement (hypothèse d'écoulement en régime critique) à St-Dalmas de Tende

Il est proposé de tendre vers une largeur minimale de 30 à 35m, soit un ratio L/h de 10 à 15. Cela implique d'envisager de :

- Définir une portée beaucoup plus longue qu'initialement pour la reconstruction du pont Ste Anne ;
- Protéger les enjeux sur les rives droite et gauche, par des ouvrages suffisamment dimensionnés pour tenir compte de fortes contraintes hydrauliques.

Il apparaît également nécessaire de miner le très gros bloc qui supportait le pont Ste Anne et qui a influencé très défavorablement les écoulements en crue, en exacerbant les érosions en rive droite.

7.2.4.2.2 Réaménagement sur le cône de déjection de la Bieugne

L'analyse du profil en long de la Bieugne montre l'importante rupture de pente que constitue le cône de déjection, et les effets de cette rupture dans la dynamique des dépôts. Ce n'est pas la 1^{ère} fois que les enjeux sur le

cône de déjection subissent d'importants dégâts, même si les apports massifs de matériaux qui ont caractérisé la crue Alex ont conduit le 2 octobre 2020 à des désordres sans précédent.

Il apparaît indispensable de tenir compte de ces 2 paramètres, pour un réaménagement résilient du secteur :

- En préservant sur le cône de déjection une vaste zone de régulation, tout en protégeant les enjeux maintenus en rive gauche par des ouvrages suffisamment dimensionnés pour anticiper l'exhaussement du lit et prévenir des débordements ;
- En conservant autant que possible, au droit du lotissement edf et du pont ferroviaire, la nouvelle largeur de bande active, en limitant l'emprise des reconstructions de la route communale rive droite, des protections du lotissement edf, et en maintenant ouverte l'arche rive gauche du pont ferroviaire.

7.2.4.3 Réaménagement de la Roya dans la traversée de Fontan

La crue Alex a causé des dégâts importants aux immeubles situés en bordure du lit dans la traversée de Fontan. Les comparaisons diachroniques de profil en long et de photos révèlent une tendance au dépôt dans la traversée du Bourg. Toutefois celle-ci semble avoir été limitée (cf. variations de niveau au droit du pont de la gare) et de magnitude plus faible que celle observée à Tende et St-Dalmas de Tende.

Les facteurs de prédisposition aux dégâts observés sont : (a) la tendance au dépôt liée à la rupture de pente observée en sortie de gorge ; (b) mais surtout la faible largeur du lit dans la traversée du bourg. Le lit de la Roya est en effet extrêmement contraint dans la traversée du bourg de Fontan : sa largeur ne dépasse pas 35 à 40 m au mieux. Ici encore, il n'est pas possible d'élargir de manière importante le lit sans recul des enjeux situés en bordure de lit.

Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Paramètre	Largeur, hauteur, vitesse, contrainte au fond pour				
		L/h=10	L/h=15	L/h=20	L/h=30	L/h=40
(a) 675	Largeur (m)	34	44	52	66	78
	Hauteur (m)	3,4	2,9	2,6	2,2	2,0
	Vitesse (m/s)	5,8	5,3	5,0	4,6	4,4
	Contrainte au fond (N/m ²)	558	503	462	405	366
(b) 995	Largeur (m)	40	51	60	77	92
	Hauteur (m)	4,0	3,4	3,0	2,6	2,3
	Vitesse (m/s)	6,3	5,8	5,4	5,0	4,7
	Contrainte au fond (N/m ²)	652	587	539	473	428

(a) : valeur présentée à l'atelier Gemapi, calculée avec Méthode de Myer avec valeur de référence à Breil sur Roya de 900 m³/s (EDF-DTG, 2002). (b) valeur calculée avec Méthode de Myer avec valeur de référence à Breil sur Roya de 1 332 m³/s (EDF-DTG, 2002). Les valeurs de référence utilisées ont changé au fur et à mesure des ateliers et de la connaissance d'études antérieures.

Tableau 42 : Largeur, hauteur, vitesse et contrainte au fond pour un débit centennal et différentes valeurs de ratio Largeur/hauteur d'écoulement (hypothèse d'écoulement en régime critique) à St-Dalmas de Tende

Les solutions à déployer pour protéger les fondations des immeubles, fragiles, en tenant compte de fortes contraintes hydrauliques qui ne pourront être réduites par une amélioration de la largeur du lit, sont complexes.

On ne peut que recommander :

- Limiter autant que possible l'empiètement des protections de berge sur l'espace disponible pour le lit, en tenant compte des risques d'incision du lit au droit de ces futures protections ;
- Préserver l'espace disponible pour le cours d'eau en amont de la traversée du bourg, afin de réguler les transports solides en amont de ce secteur sensible.

7.2.4.4 Réaménagement de la Roya dans la traversée de Breil-sur-Roya

L'analyse diachronique de l'évolution des bandes actives de la Roya ainsi que l'analyse du profil en long général de la Roya mettent en évidence un exhaussement généralisé du lit dans toute la traversée de Breil, ainsi qu'un élargissement spectaculaire des bandes actives ayant remobilisé les marges alluviales et des terrasses constituées de dépôts récents.

Après la sortie des gorges de Saorge, la pente de la Roya diminue progressivement jusqu'à Breil, faisant de la traversée de la commune une zone propice aux dépôts. L'exhaussement du lit a fortement exacerbé les divagations des écoulements, générant d'importants dégâts aux infrastructures routières et au bâti (station service, hôtel, piscine).

Dans la traversée de Breil sensu stricto, la contraction marquée du lit au droit du pont de la déchetterie et de la vanne EDF a accentué les niveaux de crue dans la traversée de Breil avec l'inondation du bourg en rive gauche et du quartier Isola en rive droite provoquée par un régime d'écoulement fluvial. La situation reste critique pour des crues d'occurrence inférieure à celle du 2 octobre 2020.

La forte dynamique des transports solides attendue en crue, la nouvelle configuration du lit et la forte sensibilité de la traversée du bourg nous conduisent à recommander :

- De maximiser en amont de Breil l'espace disponible pour le lit, en tendant autant que possible vers une largeur minimale d'une soixantaine de mètres. Cela implique de renoncer à protéger en l'état la station service et l'hôtel, en limitant au maximum l'emprise de ces activités sur le lit, et de limiter la reconquête d'espace sur la nouvelle bande active, au droit de l'ancien terrain de football et du camping. Ce principe est fondamental pour réguler le flux solide en amont du bourg, et participera à l'arrêt des flottants en amont de cette zone particulièrement sensibles aux embâcles ;
- D'étudier de manière approfondie les conditions d'écoulement dans la traversée du bourg, en lien avec le fonctionnement des ouvrages hydrauliques, de manière à déterminer les conditions de l'amélioration de la protection des quartiers du centre et de l'Isola.

Ces recommandations ont été partagées lors d'un atelier gemapi le 30 avril 2021, sous forme d'une contribution jointe en [Annexe 22](#).

7.2.5 Recommandations complémentaires pour la conception et le dimensionnement des protections de berges

7.2.5.1 Calage des niveaux des ouvrages de protection

Pour caler les niveaux de fondation et d'arase supérieure des ouvrages de protection, il est indispensable de prendre en compte différents scénarios d'évolution prévisible.

Comme cela a déjà été précisé (§ 7.1), il est difficile au vu du changement climatique de prédire les évolutions à venir. Après une très forte crue comme celle du 2 octobre, la tendance la plus probable à moyen terme serait plutôt à la réincision et la contraction du lit, mais il est possible que de nouvelles crues se produisent et conduisent à un nouvel engravement des lits dans les zones propices au dépôt. Deux scénarios opposés d'évolution des

lits doivent donc être considérés (mais une multitude d'autres scénarios intermédiaires peuvent également se produire avec des phases successives d'incision et de dépôts) : le scénario probable d'incision, en l'absence durable de crue morphogène, et le scénario d'exhaussement, correspondant à la survenue d'une nouvelle crue intense avec fort transport solide.

Dans ces conditions, il faut tenir compte de scénarios d'incision du lit pour caler le niveau d'assise des fondations des ouvrages, alors que le sommet de la berge ou de la protection doit quant à lui être calé en considérant des scénarios d'aggradation supplémentaire des fonds du lit.

Les cours d'eau ont été très fortement remaniés par la crue, puis par les travaux, dans ces conditions l'application de méthode telle que celle des fonds perturbés pour estimer des profondeurs d'affouillement n'est pas du tout adapté dans ce contexte, puisque les lits sont encore fortement instables. Il est préférable d'utiliser des outils de modélisation de l'évolution du fond du lit à partir de plusieurs scénarios de crue. Cela nécessite de nouveaux levés topographiques pour apprécier l'effet des travaux pratiqués depuis le levé lidar IGN d'octobre 2020.

En première approche, nous avons indiqué qu'il fallait soit rechercher à se fonder sur le substratum rocheux, mais en dehors que quelques tronçons dans la Roya, il est rarement observable ou présent ailleurs (notamment sur le cours amont de la Vésubie), soit de fonder les ouvrages profondément au niveau du fond du lit avant crue (protégés de surcroît par un gros sabot parafouille).

Les travaux réalisés depuis la crue ont très fortement remanié les lits des cours d'eau. Le prélèvement massif des matériaux les plus grossiers (blocs), mais également les matériaux de calibre moyen (galets pour remplir les gabions) sont susceptibles de provoquer une incision plus marquée des lits. Il est en effet probable que les prélèvements massifs réalisés dans le cadre des travaux post-crue aient des conséquences sur le niveau final du lit, même s'il est toujours difficile de prédire de telles évolutions fortement dépendantes de la dynamique des prochaines crues et de la fraction grossière contenue dans les couches sous le niveau de l'ancien lit. Dans l'idéal, il aurait fallu trier les matériaux, mais pour faire l'inverse pour conserver la fraction la plus grossière sur place pour paver le fond du lit.

En réincisant les dépôts, le lit reconstitue progressivement et naturellement un pavage, mais si tous les matériaux grossiers ont été enlevés du lit et à proximité, il faut attendre qu'il rencontre des nouveaux blocs en nombre suffisant en fond ou sur les berges. Le temps de reconstitution d'un pavage naturel sera sans doute plus long du fait du prélèvement des matériaux grossiers et le lit continuera à s'inciser tant qu'il ne sera pas reconstitué.

Le niveau final pourrait ainsi descendre plus bas que le niveau du lit avant la crue. La présence de gros blocs sous l'ancien lit pourrait réduire cet approfondissement. A défaut, une diminution significative de la pente n'est pas à exclure ce qui peut générer des approfondissements conséquents. Une surveillance de l'évolution du fond du lit doit être mise en place pour anticiper toute insuffisance des dispositifs parafoilles.

Pour se prémunir contre cet enfoncement probable, il convient donc de descendre profondément les fondations des ouvrages et/ou de mettre des sabots parafoilles de grandes dimensions (volume important pour supporter et compenser l'enfoncement du lit).

Dans un cas un peu similaire, les travaux engagés sur le Bastan à Barèges suite à la crue de Pyrénées en juin 2013 ont provoqué un enfoncement du lit en haut du village, passant d'une pente de 8-9 % à 5 % en moins d'un an (le Bastan ayant connu quelques crues importantes après celle du juin 2013) suite au prélèvement des gros blocs dans le lit du Bastan pour créer les protections latérales de berges (ce qui a nécessité la mise en place de trois seuils pour arrêter le phénomène d'incision du lit).

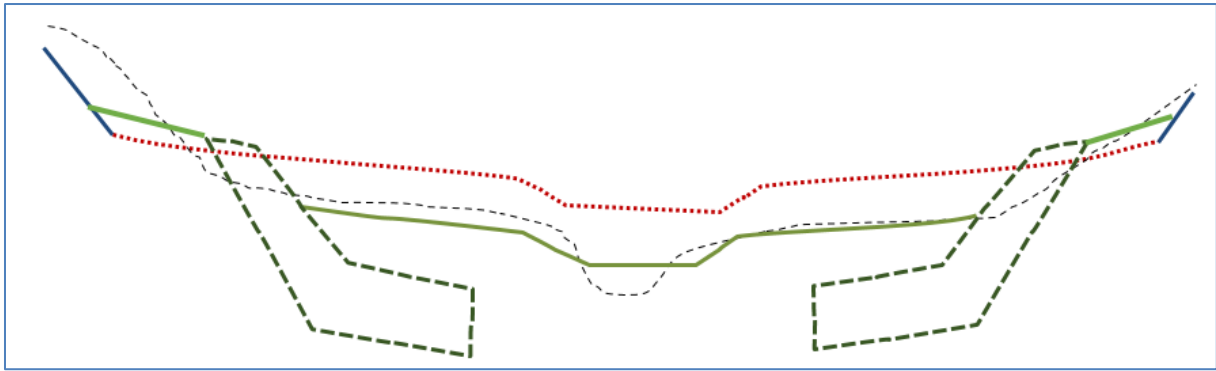


Figure 131 : Illustration d'un lit large réaménagé avec protections latérales

7.2.5.2 Protection parafouille

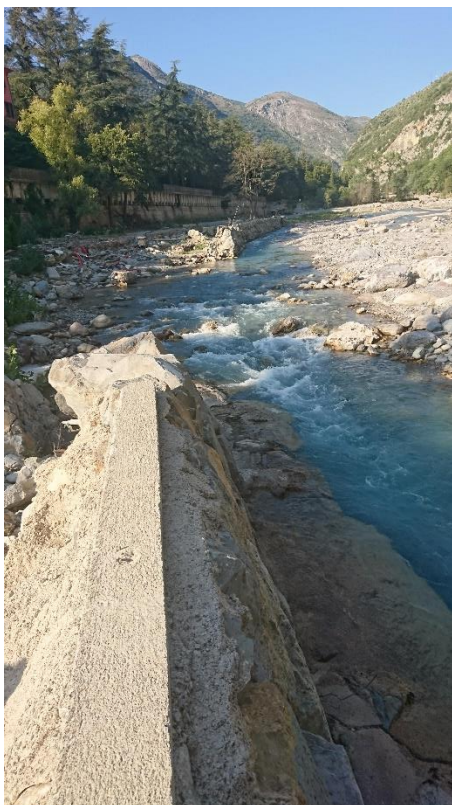
En contexte torrentiel, la majeure partie des ouvrages sont détruits par affouillement de leur fondation. La crue du 2 octobre n'a pas dérogé à cette règle (bien que certains d'entre eux ont pu aussi être détruit par surverse et érosion de la berge derrière le parement de protection).

Que la protection soit rigide ou souple, il est donc indispensable de mettre en place des protections parafoilles qui empêcheront l'incision du lit (protection totale du fond du lit : pavage intégral du fond, par radier ou rampe) ou limiteront les effets d'un enfoncement du lit pour éviter l'affouillement des ouvrages : protection partielle, par des ouvrages longitudinaux (sabots, recharges en pied, poutres) ou par des ouvrages transversaux (seuils d'un chenal à biefs affouillables, épis).

Lorsque le lit est étroit ($L/h < 15$), de même lorsque les deux sabots de part et d'autre ne laissent qu'un tiers central du lit non protégé, il est préférable de mettre en place un radier de fond (rampe à macro-rugosités sous le niveau de fond pour assurer sa franchissabilité piscicole). Tout comme les extrémités de protection de berges, les extrémités de protection du fond du lit par radier sont des zones particulièrement sensibles à l'affouillement (l'accélération locale provoquant un creusement en sortie de zone protégée). Ces radiers doivent être munis en amont et en aval de bèches de protection et prolongés à l'aval par une recharge de gros blocs (en trois couches) pour s'adapter un enfoncement éventuel du lit en aval.

La mise en place d'épis ne constitue en général pas une bonne solution en contexte torrentiel, il vaut mieux les éviter ou les réserver à la protection de berges à faibles enjeux (où l'intérêt de la protection peut d'ailleurs être remis en cause).

La protection parafouille la plus répandue est le sabot en enrochements constitués de trois couches de gros blocs disposés en vrac pour qu'ils puissent basculer progressivement pour suivre l'enfoncement du lit. Pour ce type de protection, c'est le volume de blocs qui est important. Il faut une recharge importante qui viendra compenser l'enfoncement du lit. Des protections de 2 m x 2 m ou 2 m x 3 m sont en général très insuffisantes, car rapidement les blocs ne sont plus imbriqués les uns dans les autres et vont pouvoir être emportés par roulement en fond du lit.



Dans le cas de la Vésubie ou de la Roya, la protection minimale devrait être constituée de trois couches de gros blocs de 0,8 à 1 m de diamètre (soit une épaisseur de 2,5 -3 m) sur une longueur comprise entre 7,5 et 10 m. Les dimensions peuvent éventuellement être réduites pour protéger les berges extérieures des zones de régulation (2 m x 6 m en deux couches). Un rapport longueur / épaisseur du sabot de l'ordre de 3 minimum doit être retenu.

Les sabots rigides ne sont pas conseillés, car ils ne s'adaptent pas à l'enfoncement du lit. La digue du camping à Breil a été détruite, alors qu'elle disposait d'un solide sabot en enrochements bétonnés ; ce dernier a été affouillé ce qui a provoqué la rupture du mur en enrochement bétonné qu'il était censé protéger.

Figure 132 : Brèche sur la digue de protection du camping de Breil – digue en enrochements bétonnés avec sabot rigide

7.2.5.3 Types de protections

Le choix de mettre en place une protection et du type de protection est du ressort du maître d'ouvrage (conseillé par son maître d'œuvre).

Plusieurs types de matériaux et de structures peuvent être utilisés pour constituer une protection de berge. Il peut s'agir de techniques dites de « génie civil » ou de « génie biologique ou végétal ». Chaque type a son domaine d'utilisation et ses limites.

Les protections végétales devraient être réservées aux zones de faibles contraintes hydrauliques et mécaniques et, a priori, ne conviennent pas pour les berges de torrents ou de rivières torrentielles divagantes (qui ont un fort potentiel de divagations et/ou de fortes variations du niveau du fond) ce qui est le cas de la plupart des cours d'eau sur la vallée de la Vésubie et de la Roya. Il est conseillé, du moins sur les tronçons avec de forts enjeux à proximité de la berge, de ne pas avoir recours à une protection strictement et uniquement végétale en bordure de ces cours d'eau capables, en crue, d'arracher des berges entièrement végétalisées...

La crue du 2 octobre a été capable d'arracher des boisements de rives adultes, des berges entièrement végétalisées et boisées de longue date. L'utilisation de technique de génie végétal est donc relativement hasardeuse dans ce contexte. Elles doivent être réservées à des zones de plus faibles contraintes ou à faibles enjeux.

De techniques mixtes (enrochements bouturés de saules, protection par génie civil en partie basse et par génie végétal en partie haute) peuvent être mises en œuvre pour réduire l'impact paysager des travaux par rapport à des ouvrages entièrement minéraux, sur les secteurs les moins contraints en sachant qu'en conservant des lits larges la végétation va de toute façon se développer rapidement dans le lit d'ici 3-5 ans.

Les protections par génie civil ont également leurs limites. Elles ne peuvent tenir que si elles sont solidement protégées contre l'affouillement et ne sont pas submergées. On a de nouveau pu le constater lors de la crue du 2 octobre où de nombreux ouvrages et un linéaire important de protections de berges ont été détruits. Cette crue ayant provoqué un dépavage massif du lit à la montée de crue, l'incision du lit et l'affouillement des fondations des ouvrages au contact des berges, la destruction des protections de berge s'est faite par suppression de leur appui en fondation ou consécutivement à une érosion à l'arrière des ouvrages suite à une surverse. Il est rassurant de constater que de nombreux ouvrages en maçonnerie ou en béton (mur de soutènement) ont résisté

à la crue du moment que leur fondation n'a pas été entièrement sous-cavée, ce qui n'est pas le cas de la plupart des berges végétalisées non protégées.

Le type de structure à mettre en place dépend de la pente, de la stabilité des talus et des contraintes hydrauliques. Il est parfois nécessaire que la protection joue aussi un rôle de soutènement, en plus de sa fonction de lutte contre l'érosion. L'ensemble des techniques de soutènement sont envisageables, comme des structures poids ou auto-stable, des remblais en sol renforcé avec une protection spécifique coté torrent, ...

Les protections les plus répandues en contexte torrentiel sont constituées d'une carapace en enrochements appareillés (carapace constituée de gros enrochements appareillés en une seule couche posés un à un, en "tuiles") ou libres (en bordure de rivières torrentielles, carapace en deux couches de gros blocs libres) ou liaisonnés par du béton (en fonction de la pente du talus ou des contraintes hydrauliques) et mis en œuvre contre le talus d'une berge préalablement décaissée (pour ne pas réduire la section d'écoulement).

Dans certaines zones très contraintes latéralement (Tende, St Dalmas, Fontan ...), l'emprise au sol des protections doit être réduite et implantées directement contre les aménagements à protéger pour ne pas réduire le lit. Il suffit de conserver un verrou hydraulique (contraction marquée) pour que le niveau à l'amont soit influencé, ce qui augmente le risque de surverse et de divagation donc d'érosion des berges.

Dans ces secteurs étroits, la mise en place d'ouvrages poids ou auto-stables, voire l'emploi de techniques spéciales de soutènement (paroi clouée, paroi berlinoise ...) est recommandé. Le parement de ces ouvrages est souvent relativement lisse, ce qui aura tendance à accélérer les écoulements à leur contact et accroître les phénomènes d'incision du lit et d'affouillement des ouvrages. Ce phénomène qui est d'autant plus marqué que le lit est étroit, doit être pris en compte en approfondissant la fondation de l'ouvrage ou en renforçant son para fouille.

Dans tous les cas, une protection para fouille (sabot de pied) est indispensable comme évoqué précédemment. En effet, même en présence d'un parement rugueux, une protection augmentera toujours la profondeur d'affouillement ou de surcreusement, par rapport à une berge non protégée.

7.3 CONNAISSANCE DU RISQUE INONDATION – COMPARAISON DE L'EMPRISE DE LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020 AVEC LES CARTOGRAPHIES EXISTANTES

Comme indiqué au § 3.5, la connaissance du risque inondation sur le territoire s'appuie sur les cartes d'affichage du risque dans les PPR et sur les cartes informatives comme l'Atlas des Zones Inondables (AZI) et les Enveloppes Approchées d'Inondations Potentielles (EAIP). En sus, sur la vallée de la Roya, une autre cartographie informative a été établie par le BRGM (cf. [Annexe 4](#)) : non digitalisée, elle n'est pas exploitée ici.

7.3.1 Couverture du territoire impacté par les cartes existantes

Le Tableau 43 : nombre de bâtiments et d'habitations impactés sur la Roya lors de la crue du 02/10/2020 et localisés sur le territoire couvert par les cartographies de connaissance du risque d'inondation existantes présente le nombre de bâtiments impactés lors de la crue du 2 octobre 2020 qui sont localisés sur un territoire couvert par une des trois cartographies (PPRI, AZI et EAIP). Sur la vallée de la Roya, la seule commune couverte par un PPRI étant Saorge, seuls les 13 bâtiments impactés par la crue du torrent du Caïros sur cette commune sont implantés sur un territoire couvert par un PPR inondation. Les 4 bâtiments impactés en rive gauche de la Roya sur la commune de La Brigue n'étaient pas couverts par le PPR inondation approuvé sur cette commune, qui ne concernait que le vallon de la Levensa. Alors que l'EAIP couvre l'ensemble du réseau hydrographique et donc concerne tous les bâtiments impactés lors de la crue, l'AZI ne couvre que les traversées urbaines de Breil-sur-Roya, Fontan et Tende ce qui concerne 143 bâtiments sur les 224 bâtiments impactés par la crue.

	Dans zone couverte			Impactés lors de la crue du 02/10/2020
	par PPR	par AZI	par EAIP	
Bâtiments (hors infrastructures de réseau public)	13	143	224	224
Dont habitations	9	76	127	127

Tableau 43 : nombre de bâtiments et d'habitations impactés sur la Roya lors de la crue du 02/10/2020 et localisés sur le territoire couvert par les cartographies de connaissance du risque d'inondation existantes

Le taux de couverture du territoire impacté de la vallée de la Roya, selon l'indicateur du nombre de bâtiments touchés, est très faible (6%) pour les PPR, moyen (64%) pour l'AZI et très important (100%) pour l'EAIP. On note cependant que le seul territoire couvert par un PPR ne l'était pas par l'AZI ce qui rend ces deux cartographies complémentaires, en termes d'information pure.

7.3.2 Emprise de la zone impactée par rapport au PPR inondation sur le torrent du Caïros

Le premier niveau d'analyse présenté dans le Tableau 44 croise la zone impactée par la crue (carte d'intensité avec un niveau d'intensité non nulle) avec la carte de zonage du PPR inondation sur le torrent du Caïros (cf. [Annexe 23](#)).

On constate que :

- Plus de 70% de l'emprise impactée par des phénomènes torrentiels lors de la tempête Alex sur ce vallon est couverte par une zone rouge ou bleue du PPR inondation ; autrement dit, 30% des zones bleues ou rouges du PPR n'ont pas été impactées.
- La différenciation est nette entre le tronçon du Caïros en amont des gorges (seulement 48% du zonage PPR touché par la crue) et en aval (plus de 80% du zonage PPR touché par la crue) ;

Zone	S_{INT} (ha)	S_{PPR} (ha)	$S_{INT \cap S_{PPR}}$ (ha)	$(S_{INT \cap S_{PPR}})/S_{INT}$ (%)	$(S_{INT \cap S_{PPR}})/S_{PPR}$ (%)
Caïros aval	14,24	16,20	11,46	80,7	70,7
Caïros amont	5,68	3,66	2,74	48,2	74,9
Global	19,92	19,86	14,20	71,3	71,5

S_{INT} : Superficie de l'emprise impactée par la crue du 02/10/2020 ; S_{PPR} : Superficie de l'emprise couverte par une zone bleu ou rouge du PPR ; $S_{INT \cap S_{PPR}}$: Superficie impactée par la crue et située dans une zone bleu ou rouge du PPR ; $(S_{INT \cap S_{PPR}})/S_{INT}$: Part de l'emprise impactée par la crue incluse dans une zone bleu ou rouge du PPR ; $(S_{INT \cap S_{PPR}})/S_{PPR}$: Part du zonage PPR (bleue ou rouge) impacté par la crue

Tableau 44 : Croisement de la cartographie d'intensité de crue avec la carte de zonage du PPR inondation sur le torrent du Caïros

Le deuxième niveau d'analyse présenté par la Figure 133 s'appuie sur la localisation des bâtiments impactés lors de crue par rapport au zonage du PPR. Les deux habitations touchées, situées en zone blanche, n'ont pas subi de dommages tandis que les deux autres bâtis ont subi des dégâts importants. Les six habitations situées en zone bleue ont subi des dommages limités tandis que les deux autres bâtis ont subi des dommages importants pour l'un et des dommages importants pour l'autre. Enfin l'habitation située en zone rouge a subi des dommages importants.

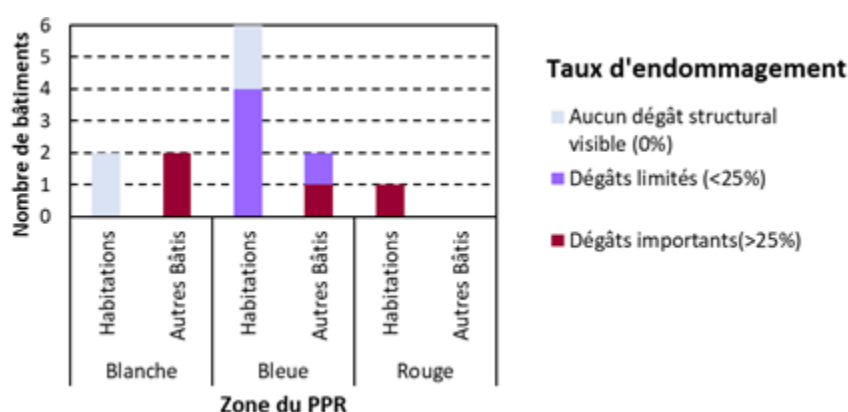


Figure 133 : Répartition de l'endommagement des bâtiments, dont les habitations, selon la cartographie existante du PPR inondation approuvé sur le torrent du Caïros (commune de Saorge)

Comme le taux de couverture du nombre de bâtiments impactés lors de la crue est très faible pour le PPR, les constats qui peuvent être faits sur ce cas ne peuvent avoir qu'une portée limitée. On note cependant que le **taux d'endommagement constaté des habitations est en corrélation avec le zonage PPR** ce qui est de nature à démontrer sa légitimité : pas de dommages en zone blanche, des dommages limités en zone bleue, des dommages importants en zone rouge. Ceci ne se vérifie pas pour les autres bâtis (grange, bâti de loisir et bâtiment d'activité économique) qui sont fortement endommagés en zones blanche et bleue.

7.3.3 Emprise de la zone impactée par rapport à l'AZI à Breil-sur-Roya, Fontan et Tende

Le premier niveau d'analyse présenté dans le Tableau 45 croise la zone impactée par la crue (intensité forte, moyenne ou faible de la carte d'intensité de la crue) avec la carte de l'AZI, en se limitant aux zones couvertes par l'AZI. Les cartes présentant cette superposition de la carte d'intensité de la crue Alex avec la carte de l'AZI sont disponibles en [Annexe 24](#).

On constate que plus de 93% de l'emprise impactée par les phénomènes torrentiels exceptionnels de la tempête Alex est couverte par la zone inondable de l'AZI sur les communes de Tende et Breil-sur-Roya, et près de 80% sur la commune de Fontan (col.5 du Tableau 45) ; cette couverture est même très large puisqu'elle s'étend au-delà

de l'emprise de la crue Alex (plus d'1/3 au-delà de cette emprise, col. 6). L'AZI est dépassée localement, notamment dans la traversée urbaine de Fontan et à Tende sur le cône de déjection de la Bieugne.

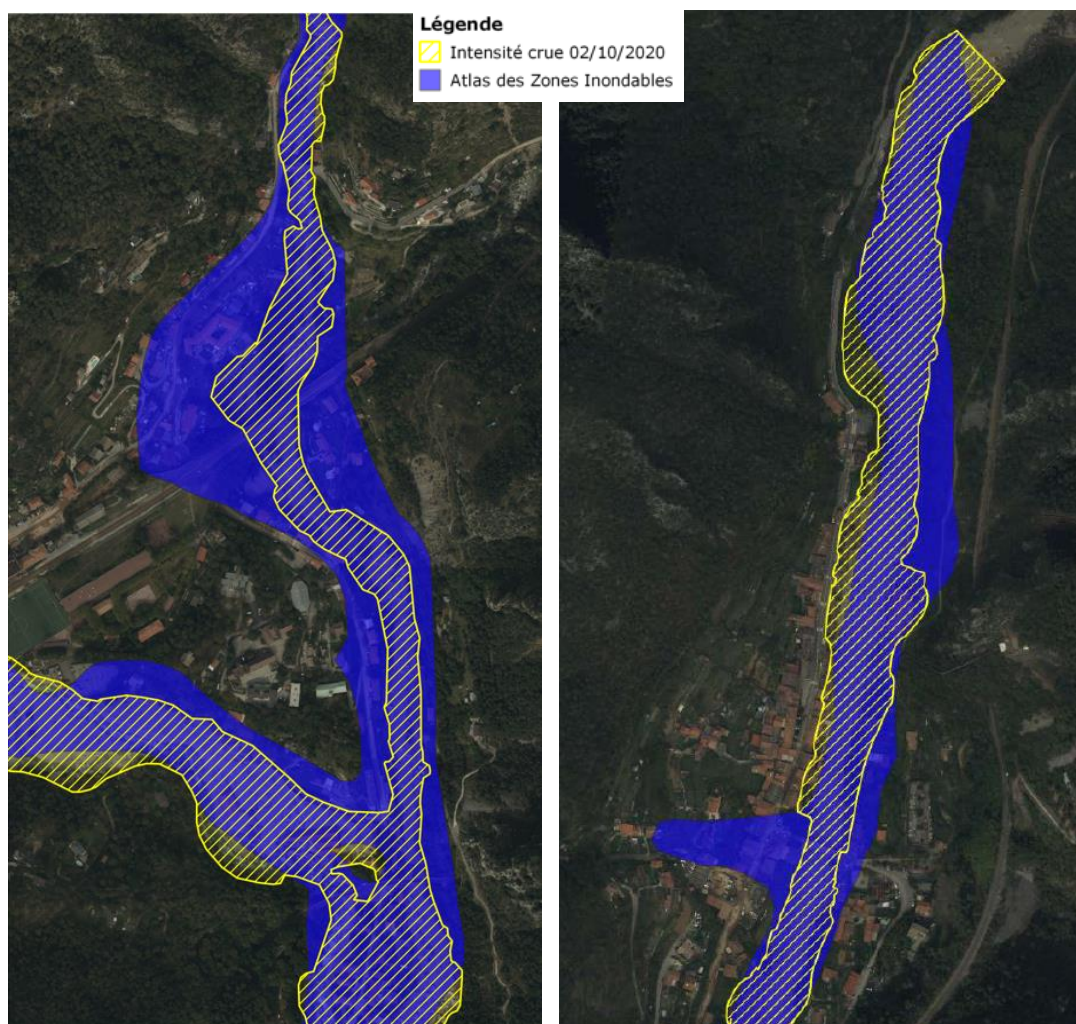


Figure 134 : Croisement de l'AZI avec la cartographie de l'intensité de la crue Alex à Saint-Dalmas-de-Tende (à gauche) et à Fontan (à droite)

Commune	S_{INT} (ha)	S_{AZI} (ha)	$S_{INT \cap S_{AZI}}$ (ha)	$(S_{INT \cap S_{AZI}})/S_{INT}$ (%)	$(S_{INT \cap S_{AZI}})/S_{AZI}$ (%)
Tende	54	99	50	93%	50,5%
Fontan	12	14	11,5	80%	65%
Breil-sur-Roya	35,5	47	35	98%	74%

S_{INT} : Superficie de l'emprise impactée par la crue du 02/10/2020 ; S_{AZI} : Superficie de l'emprise couverte par les zones inondables de l'AZI ; $S_{INT \cap S_{AZI}}$: Superficie impactée par la crue et située dans une zone inondable de l'AZI ; $(S_{INT \cap S_{AZI}})/S_{INT}$: Part de l'emprise impactée par la crue incluse dans une zone inondable de l'AZI ; $(S_{INT \cap S_{AZI}})/S_{AZI}$: Part des zones inondables de l'AZI impactée par la crue

Tableau 45 : Croisement de la cartographie d'intensité de crue avec l'AZI sur les trois communes concernées

Le deuxième niveau d'analyse présenté par la Figure 135 s'appuie sur la localisation des bâtiments impactés lors de la crue par rapport à la cartographie des zones inondables de l'AZI, en se limitant là aussi aux zones couvertes par l'AZI. La localisation des bâtiments et de leur niveau d'endommagement par rapport aux zones inondables de l'AZI est présentée en [Annexe 25](#).

Les 18 bâtiments (dont 17 habitations) impactés hors zone inondable de l'AZI se concentrent dans la traversée de Fontan par la Roya (11 habitations et 1 industrie) et sur Tende (6 habitations équitablement réparties le long de la Roya, du vallon du Riou de Tende et du torrent de la Bieugne).

Pour l'ensemble des zones couvertes par l'AZI, ce sont ainsi 87% des bâtiments impactés lors de la crue qui se situent dans la zone inondable. Le long de la Roya, ce taux est très faible à Fontan (33%) et élevé sur les autres communes (93% à Tende et 100% à Breil-sur-Roya). Il est nul le long du Vallon du Riou où l'enveloppe de l'AZI apparaît non pertinente.

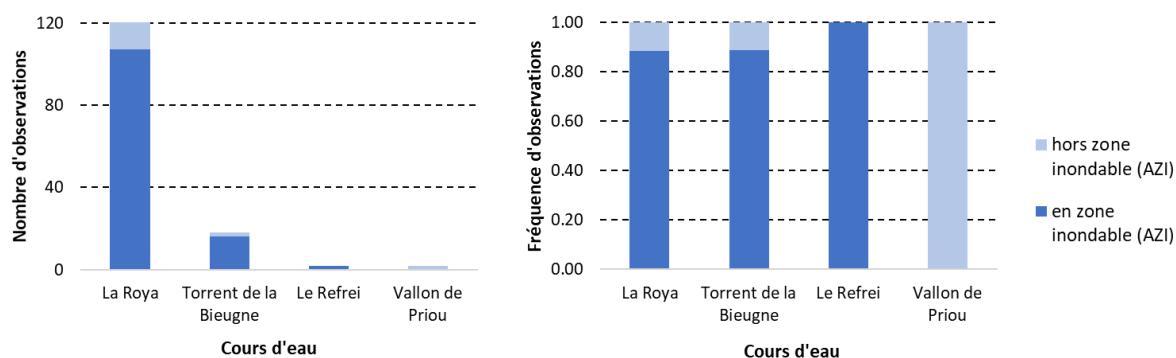


Figure 135 : Localisation des bâtiments (hors infrastructures de réseau public) impactés lors de la crue dans ou hors zone inondable cartographiée dans l'AZI

La Figure 136 zoome sur les 11 habitations impactées hors zone inondable de l'AZI (en bleu clair) dans la traversée de Fontan. Leur endommagement est resté très majoritairement limité avec 9 habitations sur 11 dont le taux d'endommagement constaté était inférieur à 25% (vert et jaune) pour 2 habitations avec un endommagement supérieur (orange).

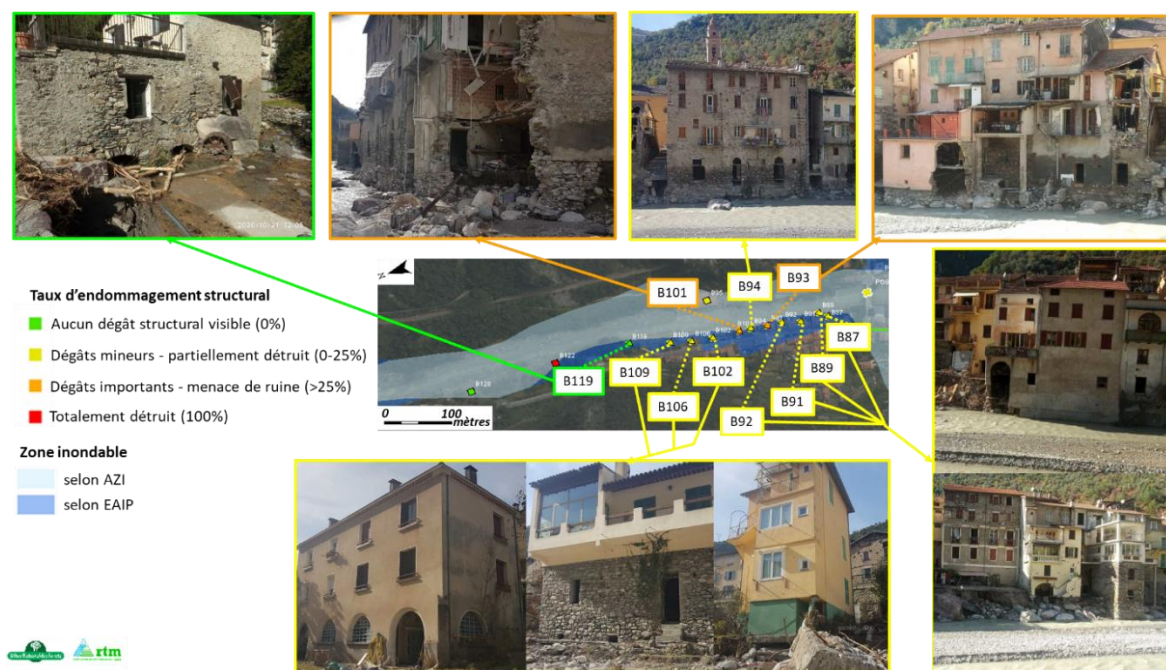


Figure 136 : Localisation et niveau d'endommagement des 11 habitations impactées hors zone inondable cartographiée dans l'AZI (et dans l'emprise de l'EAIP) en rive droite de la Roya dans la traversée de Fontan. La correspondance avec les numéros de bâtiments et leur description est disponible en [Annexe 8](#)

La Figure 137 zoome quant à elle sur les 6 habitations impactées hors zone inondable de l'AZI (en bleu clair) sur la commune de Tende. Leur endommagement est resté limité (jaune) le long du vallon du Riou mais avec un endommagement plus élevé le long du torrent de la Bieugne et de la Roya.

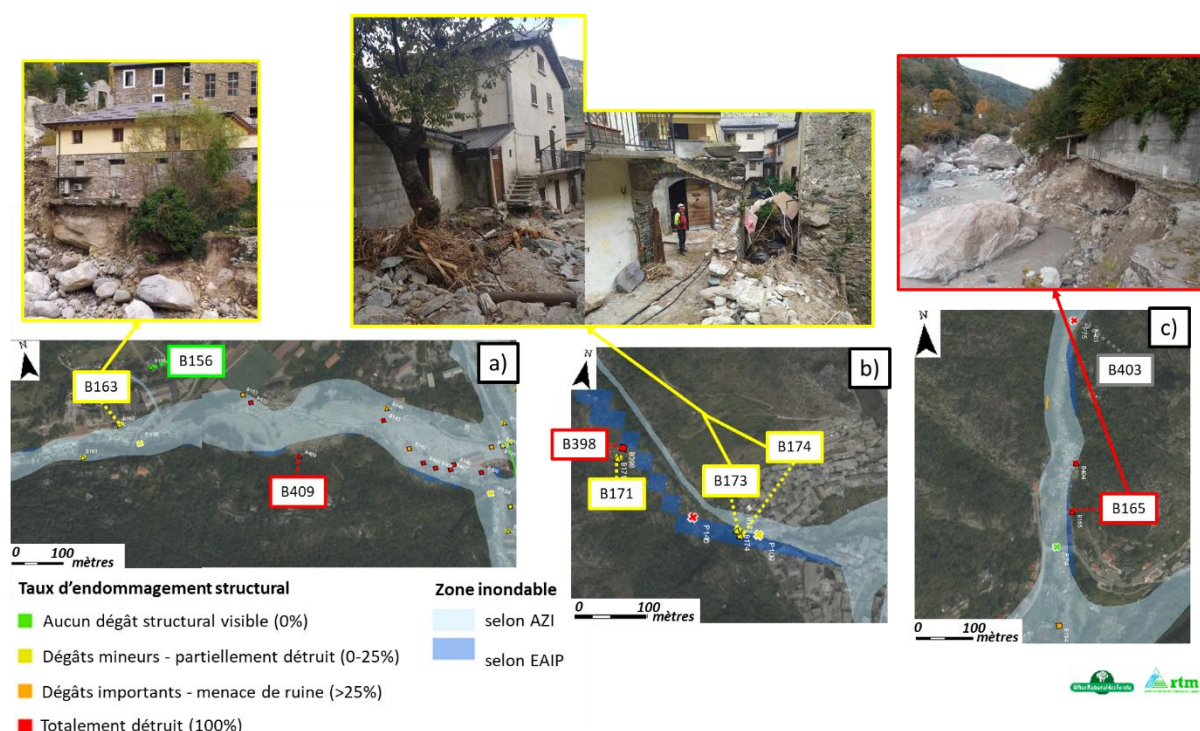


Figure 137 : Localisation et niveau d'endommagement des 6 habitations impactées hors zone inondable cartographiée dans l'AZI sur la commune de Tende : a) en rive droite du torrent de la Bieugne ; b) en rive droite du vallon de Priou, c) en rive gauche de la Roya. La correspondance avec les numéros de bâtiments et leur description est disponible en [Annexe 8](#).

En conclusion, même si l'enveloppe de l'AZI couvre plutôt largement la zone potentiellement inondable du fond de vallée, cette enveloppe a été notablement dépassée le long de la Roya à Fontan, avec des impacts sur les habitations du centre bourg (Figure 136), ainsi que sur le cône de déjection de la Bieugne à Tende. Cet écart traduit la difficulté à anticiper les phénomènes exceptionnels d'érosions de berges.

7.3.4 Emprise de la zone impactée par rapport à l'EAIP sur l'ensemble du réseau hydrographique

La Figure 138 présente le nombre de bâtiments, impactés lors de la crue, localisés dans l'enveloppe de zone inondable selon l'EAIP. La localisation des bâtiments et de leur niveau d'endommagement par rapport aux zones inondables de l'EAIP est présentée en [Annexe 25](#).

Le taux moyen de localisation en zone inondable selon l'EAIP est de 74% sur l'ensemble de la vallée de la Roya avec un taux supérieur à 80% pour la Roya, le torrent de la Bieugne, le Réfrei et la Céva, un taux compris entre 60% et 80% pour le Cairros et les vallons de Breil-sur-Roya, et un taux faible inférieur à 50% sur le torrent de la Morte et les vallons de Tende. **L'extension de la crue a donc dépassé l'emprise de la zone inondable définie selon l'EAIP sur l'ensemble des cours d'eau de la vallée de la Roya, avec plus ou moins d'importance selon les cours d'eau.**

La Figure 139 présente la répartition des niveaux d'endommagement des bâtiments impactés selon leur localisation dans ou hors zone inondable définie par l'EAIP.

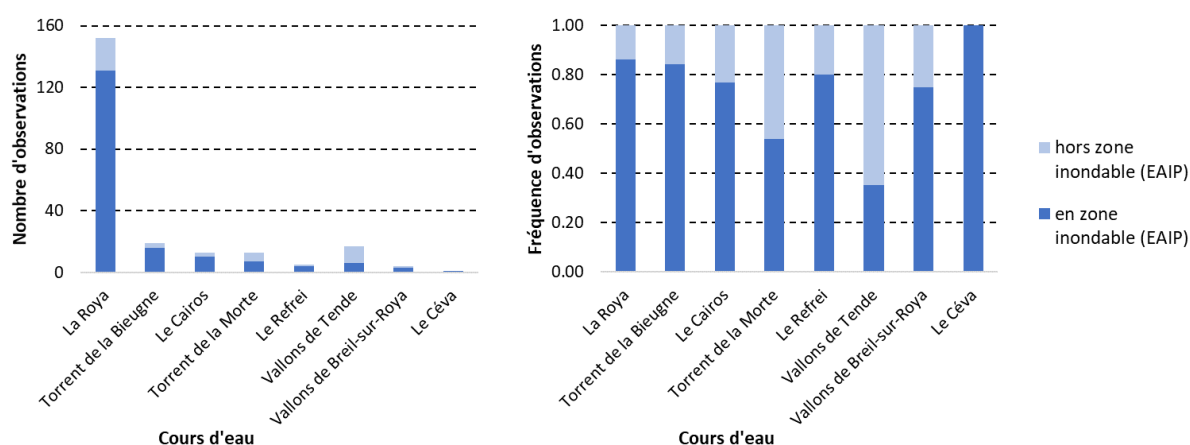


Figure 138 : Localisation des bâtiments (hors infrastructures de réseau public) impactés lors de la crue dans ou hors zone inondable cartographiée dans l'EAIP

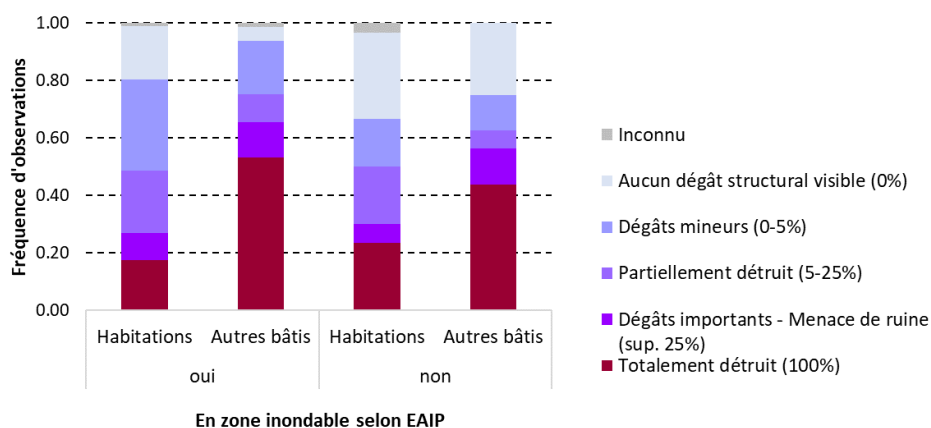


Figure 139 : Taux d'endommagement des bâtiments (hors infrastructures de réseau public), impactés lors de la crue sur la vallée de la Roya, selon leur localisation dans ou hors zone inondable de l'EAIP

De manière générale, les taux d'endommagement sur les habitations sont moins importants que sur les autres bâtiments qu'on soit en zone définie comme inondable ou non, ce qui n'est pas discriminant. Par contre, si on tient compte de l'ensemble des bâtiments, on constate que :

- La part des bâtiments impactés, mais sans dégâts visibles, est beaucoup moins importante en zone définie comme inondable qu'en zone non inondable (12% contre 28%) ;
- La part des bâtiments impactés avec des dégâts mineurs (0-5%) est beaucoup plus importante en zone cartographiée que non cartographiée ;
- Dès lors que le taux d'endommagement est remarquable (>5%), la part des bâtiments impactés est équivalente que l'on soit en zone définie comme inondable ou non : 14% pour des bâtiments partiellement détruits, 11% pour des bâtiments présentant des dégâts importants et 35% pour des bâtiments totalement détruits.

Ce dernier point supporte le fait que, dans la vallée de la Roya, le phénomène a été suffisamment exceptionnel pour provoquer des dommages notables aux bâtiments au-delà de la zone cartographiée comme inondable par l'EAIP, au même titre qu'en zone définie comme non inondable.

Cours d'eau	Commune	Taux d'endommagement						Total
		Aucun dégât structural (0%)	Dégâts mineurs (0-5%)	Partiellement détruit (5-25%)	Dégâts importants menace de ruine (> 25%)	Totalement détruit (100%)	Inconnu	
Torrent de la Bieugne	Tende	1		1		1		3
Torrent de la Morte		1	2	1				4
Vallon de la Consciente		1			1	1		3
Vallon St-Pancrace				1				1
Ravine affluente du vallon de Priou				1				1
Ravine affluente de Casterino			1					1
Vallon de Cassette		1						
Versant RD Roya		2		1	1			4
Roya		2	1	1		1	1	6
	Breil-sur-Roya					4		4
Vallon de la Lavina			1					1
Le Caïros	Saorge	1						1
Total		9	5	6	2	7	1	30

Tableau 46 : Nombre d'habitations impactées lors de la crue et localisées hors zone inondable selon l'EAIP, réparties selon leur niveau d'endommagement

7.3.5 Quels enseignements ?

L'événement du 2 octobre 2020 sur la vallée de la Roya a été suffisamment exceptionnel pour dépasser non seulement l'emprise de la zone inondable définie selon l'AZI pour les zones qui en étaient couvertes, mais également l'emprise de la zone inondable selon l'EAIP qui est considérée comme une extension extrême. Ce constat général à l'échelle de la vallée peut se préciser à l'échelle des différents cours d'eau avec un dépassement notable le long du torrent de la Bieugne, du vallon de la Consciente et de la Roya en rive gauche à Tende et en aval de Breil-sur-Roya.

Malgré ce dépassement, la **couverture des zones impactées par les zones inondables définies dans l'AZI et l'EAIP peut être considérée comme majoritairement fiable**. Cependant, la **validité de cette représentativité des cartographies est posée pour certains secteurs** :

- Sur le vallon du Riou de Tende, l'AZI représente mal les zones impactées tandis que l'EAIP apparaît plus fiable, pour ce qui est de cet événement (Figure 137b) ;
- Les écoulements sur versants, comme sur les versants rive droite de la Roya, ne paraissent pas bien pris en compte dans l'EAIP ;
- De même, les zones impactées dans les différents vallons, d'envergure limitée, sont mal représentées par l'EAIP (vallons de Breil-sur-Roya mais surtout vallons de Tende) ;

Sur le torrent du Caïros, seul secteur couvert à la fois par un PPR et par l'EAIP, la complémentarité entre les cartes de connaissance du risque mérite d'être soulignée, le PPR permettant de discriminer correctement les niveaux d'intensité, et l'EAIP couvrant l'emprise de la zone impactée lors de cet événement (une seule habitation impactée hors zone inondable de l'EAIP sans aucun dégât constaté – Tableau 46). Ce constat limité à ce seul cas ne peut par contre pas servir d'enseignement général.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alber, A. et Piégay, H., 2011. Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125(3): 343-360.
- Arnaud-Fassetta, G., Cossart, E. et Fort, M., 2005. Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps). *Geomorphology*, 66: 41-67.
- Blanchard R. 1949. Les grands Alpes françaises du Sud.
- Bubeck P, Kreibich H. 2011. Natural Hazards: direct costs and losses due to disruption of production processes, Report WP01-2. Rapport Technique CONHAZ Consortium
- Deleuze C, Morneau F, Renaud JP, Vivien Y, Rivoire M, Santenoise P, Longuetaud F, MOTHE F, Hervé JC, Vallet P. 2014. Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. Rendez-vous Techniques de l'ONF : 22–32. [online] Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797> (Accessed 14 June 2021)
- Fauré A. 2016 - Analyse des évolutions morphologiques latérales suite aux fortes crues torrentielles - Stage Master GCRN à l'ONF-RTM - Université de Montpellier- 79 pp
- 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) DGPR
- Hubert G, Ledoux B. 1999. Le coût du risqué. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations. Presses de l'ENPC.
- Jakob M, Stein D., Ulmi M. 2011. Vulnerability of buildings to debris flow impact. *Natural Hazards* 60(2)241–261. DOI: 10.1007/s11069-011-0007-2
- Julian, M. 1980. Les Alpes maritimes franco-italiennes: Étude géomorphologique. *Quaternaire*, (3), 156-157.
- Julian, M. 1997. Les glaciations des Alpes-Maritimes : essai de mise au point. *Géo-méditer: géographie physique et méditerranée: hommage à Gaston Beaudet et Etienne Moissenet*, 8, 245.
- 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. DOI: 10.1130/GES02048.1
- Lallias-Tacon, S., Liébault, F. et Piégay, H., 2017. Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterising the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses. *CATENA*, 149, Part 3: 742-759.
- Lange et Bezzola 2006. Schwemholz - Probleme und Lösungsansätze [Driftwood - Problems and solutions] (VAW) [online] Available from: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/188.pdf>
- Liébault, F. et Piégay, H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(4): 425-444.
- Malavoi, J.R., Bravard, J.P., Piégay, H., Hérouin, E. et Ramez, P., 1998. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau. Guide technique 2, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 39 pp.
- Monnet JM. 2020. lidaRtRee: Forest Analysis with Airborne Laser Scanning (Lidar) Data. Librairie R. [online] Available from: <https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidaRtRee>
- Nyberg, B., Buckley, S.J., Howell, J.A., Nanson, R.A., 2015. Geometric attribute and shape characterization of modern depositional elements: A quantitative GIS method for empirical analysis, *Computers & Geosciences*, 82: 191-204.

OFEV. 2010. EconoMe 2.0 – Programme de calcul en ligne du caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels. OFEV, DETEC

OFEV. 2019. Bois flottant dans les cours d'eau . Office fédéral de l'environnement, Berne [online] Available from: [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholtz-flieess-gewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholtz_2_GzD_12-12%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholtz-flieess-gewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholtz_2_GzD_12-12%20(002).pdf) (Accessed 25 May 2020)

Parker G. 2005. Shot Course "Morphology, morphodynamics and Ecology of Mountain Rivers" – NCED - déc. 2005. Slide 28

Pitlick, J., 1993. Response and recovery of a subalpine stream following a catastrophic flood. Geological Society of America Bulletin, 105: 657-670.

Piton G, Kuss D. 2021. Alpes Maritimes - Gestion post-Tempête Alex : Atlas large échelle pour le traitement des embâcles. [Note technique] INRAE & ONF-RTM. Version 1. 2 p+11 cartes

Quiniou M, Piton G. 2021. Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux . Rapport de recherche. INRAE pour le compte du MTES-DGPR, PLVG et de l'Agence de l'eau Adour-Garonne

Quiniou M, Piton G, Ruiz Villanueva V, Perrin C, Savatier J, Bladé E. 2021. Large wood transport-related flood risks analysis of lourdes city using iber-wood model. Actes de la Conference: SimHydro 2021: Models for complex and global water issues -Practices and expectations. **76** : 1–13

Ramette (1979). Une approche rationnelle de la morphologie fluviale- La Houille Blanche n°8-1979 – pp. 491-498

Ramette M. (1988) - Morphologie et transport solide de rivières à forte pente - La Houille Blanche n°3/4-1988- page 315-321

Ramette M. (1990) - Essai d'explication et de qualification des morphologies fluviales à partir de la théorie du régime - La Houille Blanche n°1-1990- page 43-60

Recking A., Richard D., Degoutte G. (2013) Torrents et rivières de montagne – Dynamique et aménagement – Editions Quae nov. 2013

Rickli C, Badoux A, Rickenmann D, Steeb N, Waldner P. 2018. Large wood potential, piece characteristics, and flood effects in Swiss mountain streams. Physical Geography **39** : 542–564. DOI: [10.1080/02723646.2018.1456310](https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1456310)

Rinaldi, M., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Comiti, F., Lucía, A., Marchi, L., Nardi, L., Righini, M. et Surian, N., 2016. An integrated approach for investigating geomorphic response to extreme events: methodological framework and application to the October 2011 flood in the Magra River catchment, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 41(6): 835-846.

Rosgen DL. 1994. A classification of natural rivers – Catena 22 (1994) 169-199

Roux C, Alber A, Bertrand M, Vaudor L, Piégay H. 2015. "FluvialCorridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. Geomorphology **242** : 29–37. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.018

Sloan, J., Miller, J.R. and Lancaster, N., 2001. Response and recovery of the Eel River, California, and its tributaries to floods in 1955, 1964, and 1997. Geomorphology (36): 129-154.

Terrier, B. et Stroffek, S. (coordinateurs), 2016. Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau. Guide technique du SDAGE, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, 182 pp.

ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : CUMUL MAXIMAL DE PLUIE SUR 24H AU COURS DE L'ÉVÉNEMENT « TEMPÊTE ALEX » DANS LES ALPES-MARITIMES ET QUALIFICATION FREQUENTIELLE DE LA LAME D'EAU SUR 12H (SOURCE : CEREMA, RETEX TECHNIQUE – VOLET HYDROLOGIE)	8
FIGURE 2 : CARTE DE SITUATION DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA	10
FIGURE 3 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA.....	14
FIGURE 4 : ÉVOLUTION DE LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA EN FONCTION DE LA DISTANCE DEPUIS L'AVAL DE LA CONFLUENCE AVEC LA BEVERA. LES ANNOTATIONS POSITIONNENT LES PRINCIPAUX AFFLUENTS DE LA ROYA. LES SUPERFICIES MENTIONNÉES DANS LES ANNOTATIONS CORRESPONDENT AUX SUPERFICIES DU BASSIN DE LA ROYA EN AVANT DE CHAQUE CONFLUENCE.	15
FIGURE 5 : REPRODUCTION DE LA CARTE DES GLACIERS DU MAXIMUM GLACIAIRE DU WÜRM (SOURCE : BLANCHARD, 1949)	17
FIGURE 6 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOLOGIQUE AVEC LIMITE DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA (BRGM)	18
FIGURE 7 : MORPHOLOGIE GLACIAIRE SCHEMATIQUE DE LA HAUTE ROYA.	19
FIGURE 8 :	19
FIGURE 9 : LA VALLÉE GLACIAIRE EN AUGUE DU CAIROS (SOURCE : BLANCHARD, 1949)	20
FIGURE 10 : L'OMBILIC GLACIAIRE DE ST-DALMAS DE TENDE	20
FIGURE 11 : REPARTITION MENSUELLE DES CRUES RECENSÉES DE LA ROYA (CRUE ALEX INTÉGRÉE À L'ANALYSE)	21
FIGURE 12 : PLUIE DE BASSIN SUR DIFFÉRENTES DURÉES ET PÉRIODES DE RETOUR SHYREG ASSOCIÉES (AVEC ABATTEMENT). BASSIN VERSANT CONSIDÉRÉ = BV DE LA ROYA À LA FRONTIÈRE AVEC L'ITALIE. SOURCE : RETEX HYDROLOGIQUE, CEREMA – METEO FRANCE – INRAE	32
FIGURE 13 : POSTE DES MESCHES EDF. HYETOGRAMME DE PLUIE ET ANALYSE DE LA FRÉQUENCE DES CUMULS POUR DIFFÉRENTES DURÉES SELON SHYREG PLUIE. SOURCE : RETEX HYDROLOGIQUE.	32
FIGURE 14 : BASSINS DE LA TINEE, DE LA VESUBIE, DE LA ROYA ET VAR AVAL. CUMUL 24 H DE PRÉCIPITATIONS. DONNÉES METEO FRANCE ANTILOPE. 02/10/2020 06H00 AU 03/10/2020 06H00 UTC. SOURCE : DONNÉES METEO FRANCE.....	34
FIGURE 15 : BASSIN VERSANT DE LA ROYA. CUMUL 24 H DE PRÉCIPITATIONS. DONNÉES METEO FRANCE ANTILOPE - EDF. 02/10/2020 07H00 AU 03/10/2020 06H00 UTC. FUSION ANTILOPE V1 (TEMPS REEL) + DONNÉES SOL COMPLÉMENTAIRES. ..	35
FIGURE 16 : BASSIN VERSANT DE LA ROYA. PÉRIODE DE RETOUR DES PRÉCIPITATIONS DE LA TEMPÊTE ALEX SUR LE BASSIN VERSANT DE LA ROYA. DURÉE D'ANALYSE 24 H. DONNÉES INRAE : MÉTHODE AIGA DE COMPARAISON AUX QUANTILES DE PLUIE SHYREG. PÉRIODES DE RETOUR CALCULÉES À PARTIR DES LAMES D'EAU DE LA REANALYSE FOURNIE DANS LE CADRE DU RETEX (ANTILOPE + ASSIMILATION DE PLUVIOMETRE PARTENAIRES PAR MF-DSO ET CEREMA, AU PAS DE TEMPS 60 MIN).....	36
FIGURE 17 : COMPARAISON DES ESTIMATIONS DE DÉBITS DE POINTE DE CRUE AUX ESTIMATIONS DE DÉBIT DE RÉFÉRENCE POUR T=50, 100 ET 500 ANS. SOURCE : RETEX HYDROLOGIE - CEREMA	37
FIGURE 18 : HYDROGRAMMES DE CRUE ALEX RECONSTITUÉS AVEC MODÈLE MORDOR EDF.	38
FIGURE 19 : REPARTITION DES BATIMENTS IMPACTÉS SUR LES COURS D'EAU DE LA VALLÉE DE LA ROYA	65
FIGURE 20 : FRÉQUENCE D'OBSERVATIONS DES TAUX D'ENDOMMAGEMENT SUR LES BATIS DANS LES DIFFÉRENTES COMMUNES DE LA ROYA.....	66
FIGURE 21 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT SUR LES BATIMENTS LE LONG DES DIFFÉRENTS COURS D'EAU DE LA VALLÉE DE LA ROYA	67
FIGURE 22 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BATIS (HORS INFRASTRUCTURES DE RÉSEAU PUBLIC) SELON LE NIVEAU D'INTENSITÉ MACROSCOPIQUE	67
FIGURE 23 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BATIMENTS D'HABITATION SELON LE NIVEAU D'INTENSITÉ MACROSCOPIQUE	68
FIGURE 24 : ILLUSTRATION DE LA PRÉSENCE DE BATIS PRÉSENTANT PEU DE DÉGÂTS STRUCTURAUX EN LIMITE DE L'ENVELOPPE D'INTENSITÉ FORTE DE LA CRUE. LA CORRESPONDANCE AVEC LES NUMÉROS DE BATIMENTS ET LEUR DESCRIPTION EST DISPONIBLE EN ANNEXES 8 ET 9. LE NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT LIMITE DE L'HABITATION B99 PEUT PARAÎTRE SURPRENANT AU VU DES PHOTOS MAIS SEUL LE GARAGE ATTENANT A ÉTÉ IMPACTÉ ET LA STRUCTURE DU BATIMENT PRINCIPAL D'HABITATION N'EST, ELLE, PAS ENDOMMAGÉE. (SOURCE PHOTOS : ONF-RTM).....	68

FIGURE 25 : CORRELATION ENTRE NIVEAU D'INTENSITE MACROSCOPIQUE ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BATIMENTS D'HABITATION, EN DIFFERENCIANT LES BATIMENTS ATTEINTS EN LIMITE DE ZONE CLASSEE EN INTENSITE FORTE (FORTE_L)	69
FIGURE 26 : CORRELATION ENTRE TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES FONDATIONS ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE LA STRUCTURE DES BATIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC)	72
FIGURE 27 : LINEAIRE DE ROUTES RELEVÉ SELON LES DIFFÉRENTS TYPES DE DESORDRES ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT.....	75
FIGURE 28 : LIENS ENTRE TYPES DE DESORDRES ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT	78
FIGURE 29 : LIEN ENTRE INTENSITE DU PROCESSUS TORRENTIEL ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES ROUTES	78
FIGURE 30 : NOMBRE ET FREQUENCE DES NIVEAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DU TYPE DE PONT	79
FIGURE 31 : DEFINITION SCHEMATIQUE DE LA NOTION D'OUVERTURE RELATIVE	80
FIGURE 32 : LIENS ENTRE OUVERTURE RELATIVE DES OUVRAGES ET ETAT D'ENDOMMAGEMENT (UN PANNEAU PAR TYPE DE PONT)...	80
FIGURE 33 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOMORPHOLOGIQUE GENERALE DES ALPES-MARITIMES (SOURCE : JULIAN, 1980)	85
FIGURE 34 : CARTE GEOMORPHOLOGIQUE SYNTHETIQUE.....	86
FIGURE 35 : IMPORTANCE DES RAVINEMENTS DANS LES TALWEGS EXISTANTS, ACCOMPAGNES OU AYANT POUR ORIGINE DE PETITS GLISSEMENTS SUPERFICIELS BOUEUX. VALLON DE ROMANIN (AFFLUENT DU MOURGON) A GAUCHE, VALLON DE BEGIN A DROITE (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020).....	87
FIGURE 36 : EXEMPLES PARMI D'AUTRES DE PETITES COULEES BOUEUSES AFFECTANT LES VERSANTS. À GAUCHE, SUR LA RIVE DROITE DU CARAMAGNE ; AU CENTRE SUR UNE TERRASSE AGRICOLE, A DROITE DANS DES EBOULIS CALCAIRES.....	87
FIGURE 37 : PETITES COULEES BOUEUSES AFFECTANT LES VERSANTS DU VALLON DE MOURGON ; GLISSEMENTS PLUS IMPORTANTS DANS LE VALLON DE CANNELLE EN AMONT DU TUNNEL.....	88
FIGURE 38 : A GAUCHE, VALLON DE LA CA AVANT DECLenchement DU GLISSEMENT DE TERRAIN (03/10/2020) ; A DROITE APRES LE GLISSEMENT DE TERRAIN (09/10/2020) (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA).....	88
FIGURE 39 : DIACHRONIE AVANT ET POST-CRUE (SOURCE : BD ORTHO 2017, IGN ; ORTHOPHOTOGRAPHIE POST-CRUE, 2020, IGN)	89
FIGURE 40 : LE GLISSEMENT DE LA CA DANS SON CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020).....	89
FIGURE 41 : EXTRAIT DE LA CARTE GEOMORPHOLOGIQUE : GLISSEMENTS SUPERFICIELS, COULEES BOUEUSES ET GLISSEMENT DE LA CA. EN TIRETES, LES PRINCIPALES NICHES D'ARRACHEMENTS ANCIENNES ANTERIEURES AU 02/10/2020	90
FIGURE 42 : ANALYSE DIACHRONIQUE SECTEUR MADONE DE VIEVOLA (SOURCE : REMONTER LE TEMPS, IGN)	91
FIGURE 43 : GLISSEMENT DANS LE VALLON DE SCABRIE (A GAUCHE) ET GLISSEMENT DANS LE VALLON DE LA MORTE (A DROITE) (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	92
FIGURE 44 : PARTIE AMONT DU VALLON DE RABAY – ÉBOULIS CALCAIRES A MATRICE ARGILEUSE DESTABILISES ET RAVINES (EN ORANGE) PAR LES ECOULEMENTS DANS LES TALWEGS (EN VERT) (SOURCE : ONF-RTM : 17-18/11/2020)	92
FIGURE 45 : PHENOMENES RELEVES SUR LE VALLON DE CONSCIENTE ; EXTRAIT DE LA CARTE GEOMORPHOLOGIQUE	93
FIGURE 46 : GLISSEMENTS SUPERFICIELS ET COULEES BOUEUSES AUTOUR DE CANARESSÉ (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)94	
FIGURE 47 : ANALYSE DIACHRONIQUE SECTEUR VALLON DE CASTERINO EN AMONT DU HAMEAU (SOURCE : REMONTER LE TEMPS, IGN)	95
FIGURE 48 : VALLON AU DROIT DU PLAN D'ARREIL (A GAUCHE) ET VALLON DE CARDON (A DROITE) (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA, 09/10/2020)	95
FIGURE 49 : ANALYSE DIACHRONIQUE SECTEUR VALLON DE CASTERINO A L'AVANT DU HAMEAU (SOURCE : REMONTER LE TEMPS, IGN)	96
FIGURE 50 : GLISSEMENT DE TERRAIN (A GAUCHE) ET VALLON DE CASSETTE (A DROITE) (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA, 09/10/2020)	96
FIGURE 51 : ANALYSE DIACHRONIQUE SECTEUR VALLON DE CASTERINO A L'AMONT DU LAC DES MESCHES (SOURCE : REMONTER LE TEMPS, IGN).....	97

FIGURE 52 : GLISSEMENTS DE TERRAINS EN RIVE DROITE DU VALLON DE CASTERINO, EN LIEN PROBABLE AVEC DES SORTIES D'EAU DRAINANT NATURELLEMENT (KARST) ET/OU ARTIFICIELLEMENT (ANCIENNES GALERIES DE MINES) LE MASSIF DE PLAN TENDASQUE (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA, 09/10/2020).....	97
FIGURE 53 : VALLON ET VERSANTS DE LA MINIERE EN AMONT DU LAC. ENGRAVEMENT DU CONE DE DEJECTION EN RIVE GAUCHE (TORRENT DE PLAN TENDASQUE) SANS APPORTS IMPORTANTS A LA MINIERE, ET GLISSEMENT PUIS ENGRAVEMENT DE LA RIVE GAUCHE EN VIS-A-VIS, REPOUSSANT LA MINIERE SUR LA RIVE OPPOSEE	98
FIGURE 54 : RESURGENCES-GLISSEMENTS-COULEES TORRENTIELLES DE GIAS VIORE, FORMANT UN CONE ALLUVIAL DANS LE LIT MAJEUR DE LA MINIERE (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	99
FIGURE 55 : DIACHRONIE AVANT (2012) ET APRES (11/2020) LA CRUE DE LA MINIERE AU NIVEAU DE GIAS VIORE INFERIEUR (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	99
FIGURE 56 : FONCTIONNEMENT EXCEPTIONNEL DU TALWEG EN RIVE GAUCHE EN AMONT DE VALLAURIA, EN LIEN AVEC UNE EMERGENCE KARSTIQUE TEMPORAIRE. FONCTIONNEMENT SIMILAIRE EN RIVE DROITE DANS LE VALLON DE TAUPE BRANCHE OUEST.	100
FIGURE 57 : TALWEG TORRENTIEL EN AMONT DE VALLAURIA (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	101
FIGURE 58 : ENGRAVEMENT DU CONE PAR LE TORRENT DE TAUPE. EN MEDAILLON, LA ZONE D'EMERGENCE DE LA BRANCHE OUEST, AU PIED DES CALCAIRES DOLOMITIQUES KARSTIFIES. LA MORAINES A ETE DECAPEE ET EMPORTEE (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	101
FIGURE 59 : APPORTS SOLIDES DES VERSANTS ENTRE LES MESCHES ET FERRAIRORE	102
FIGURE 60 : COULEE OUEST EN RIVE GAUCHE ET, AU FOND EN RIVE DROITE, LES APPORTS TORRENTIELS DE LA SAPELLE ET DE VERGOU (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA)	103
FIGURE 61 : COULEES EST EN RIVE GAUCHE (SOURCE : F. ADAMO, CEREMA).....	103
FIGURE 62 : APPORTS TORRENTIELS DE LA SAPELLE. ARKOSES TRES FRACTUREES AU PREMIER PLAN, AVEC POSSIBLES CIRCULATIONS SOUTERRAINES DES EAUX. PELITES ET GRES AU SECOND PLAN, PLUS FAVORABLES AUX RAVINEMENTS ET AUX PETITS GLISSEMENTS SUPERFICIELS BOUEUX. CALCAIRES DOLOMITIQUES COIFFANT LES SOMMETS, FOURNISSANT DES EBOULIS SOUS CORNICHE MOBILISES PAR LES TETES DE RAVINES (SOURCE : ONF-RTM, 17-18/11/2020)	104
FIGURE 63 : SECTEUR MINIERE-MESCHES-BIEUGNE. RELATIONS PRESUMEEES ENTRE LES RESERVOIRS HYDROGEOLOGIQUES (CALCAIRES KARSTIFIES, MORAINES, EBOULIS) ET LES GLISSEMENTS/RAVINEMENTS/COULEES TORRENTIELLES APPARUS AUX PIEDS DES VERSANTS, A L'ORIGINE DES PRINCIPAUX APPORTS SEDIMENTAIRES AUX COURS D'EAU.	105
FIGURE 64 : EXEMPLES D'EXTRACTION MANUELLE SOUS QGIS DES BANDES ACTIVES (EN BLEU SUR L'ENSEMBLE DES IMAGES) : (A) BANDE ACTIVE POST-ALEX DE LA ROYA EN AMONT DE TENDE, INCLUANT LES CHENAUX EN EAU ET BANCS DE GRAVIERS NON VEGETALISES ; (B) BANDE ACTIVE POST-ALEX DE LA ROYA EN AVAL DE TENDE (CIAGE) AVEC EXCLUSION DES ILES VEGETALISEES ; (C) BANDE ACTIVE DE LA ROYA EN AVAL DE TENDE (LOUBAÏRA), AVEC EXCLUSION DES ZONES INONDEES EN RIVE GAUCHE ET EN RIVE DROITE (DEPOTS DE FINES, LAISSES DE CRUES) ; (D) BANDE ACTIVE DE LA ROYA A BREIL-SUR-ROYA, AVEC EXCLUSION DES ZONES INONDEES EN RIVE GAUCHE ET EN RIVE DROITE (DEPOTS DE FINES, LAISSES DE CRUES) ; (E) BANDE ACTIVE POST-ALEX EN AVAL DE SAINT-DALMAS DE TENDE, AVEC EXCLUSION DU TALUS DE BERGE DESTABILISE EN RIVE DROITE ; (F) EXEMPLE D'UTILISATION DE LA CARTE DES PENTES DU LIDAR 2020 POUR EXCLURE LE TALUS DE BERGE INSTABLE VISIBLE EN E ; (G) BANDE ACTIVE POST-ALEX DE LA ROYA SUR LE SECTEUR DE LA MADONE DE VIEVOLA OÙ LE LIT EST MASQUE PAR LA VEGETATION ET LE COUVERT NUAGEUX (H) EXEMPLE D'UTILISATION DE LA CARTE DES PENTES DU LIDAR 2020 POUR FACILITER LA DELIMITATION DE LA BANDE ACTIVE DANS UN SECTEUR OÙ LE LIT EST MASQUE PAR LA VEGETATION ET LE COUVERT NUAGEUX, VISIBLE EN G.	108
FIGURE 65 : EXEMPLES D'EXTRACTION MANUELLE DU FOND DE VALLÉE MODERNE À PARTIR DU MNT LIDAR DE 2020 : (A) SUR LA ROYA À PROXIMITÉ DE SAORGE, SUR LE SECTEUR DE LA CONFLUENCE DU VALLON DE CAÏROS, AVEC LA PRÉSENCE DE CÔNES DE DÉJECTIONS EN RIVE DROITE ET D'UNE HAUTE TERRASSE FLUVIO-GLACIAIRE PLUS EN AVAL EN RIVE DROITE ; (B) LA CARTE DES PENTES EXTRAITE DU MNT 2020 PERMET DE DÉLIMITER L'EMPRISE DU FOND DE VALLÉE MODERNE	109
FIGURE 66 : PROCÉDURE DE SEGMENTATION SPATIALE DES BANDES ACTIVES POUR L'EXTRACTION DES LARGEURS PAR SEGMENTS DE 100 M : (A) SEGMENTATION DU FOND DE VALLÉE MODERNE EN UNITÉS SPATIALES DE RÉFÉRENCE INTERDISTANTES DE 100 M (EN NOIR), AVEC EMPRISES DES 4 COUCHES DE BANDES ACTIVES CARTOGRAPHIÉES ENTRE 1948 ET 2020 EN AMONT DE TENDE; (B) ZOOM SUR UNE UNITÉ SPATIALE DE RÉFÉRENCE AVEC LA BANDE ACTIVE POST-ALEX DE 2020 EN MARRON CLAIR, ET SA CENTERLINE EN ROUGE ; LA LARGEUR MOYENNE DE BANDE ACTIVE EST OBTENUE EN FAISANT LE RATIO ENTRE LA SURFACE ACTIVE (EN JAUNE) ET LA LONGUEUR DE CENTERLINE QUI TRAVERSE L'UNITÉ SPATIALE DE RÉFÉRENCE.	110

FIGURE 67 : EXEMPLE D'INCOHÉRENCE QUANT À L'ÉVALUATION DE LA LARGEUR MOYENNE D'UNE BANDE ACTIVE DE LA ROYA EN 1948 (EN MARRON), AU NIVEAU DU HAMEAU DE GIANDOLA. CETTE INCOHÉRENCE EST INHÉRENTE À LA MODIFICATION RÉCENTE DE L'EMPRISE DU FOND DE VALLÉE (EN BLANC), ICI PAR UN REMBLAI. SEULE LA ZONE EN JAUNE AURAIT ÉTÉ PRISE EN COMPTE, CONDUISANT À UNE SOUS-ÉVALUATION DE LA LARGEUR. CE BLOC DE BANDE ACTIVE A ÉTÉ ÔTÉ DU JEU DE DONNÉES UTILISÉ. (A) DIGITALISATION SUR L'ORTHOPHOTOGRAPHIE DE 1948. (B) LA ZONE REMBLAYÉE SEMBLE BIEN EXCLUE DU FOND DE VALLÉE ET N'A PAS ÉTÉ IMPACTÉE PAR LA CRUE DE 2020 (B). VALIDATION DE L'EXCLUSION DU FOND DE VALLÉE PAR LA CARTE DES PENTES (C).	110
FIGURE 68 : ÉVOLUTION DES SURFACES ACTIVES (BA) ENTRE 1948 ET 2020 SUR L'ENSEMBLE DU LINÉAIRE ÉTUDIÉ DE LA ROYA LES VALEURS DE SURFACE DU FOND DE VALLÉE (EN KM ²) SONT ÉGALEMENT INDIQUÉES.	111
FIGURE 69 : LA BANDE ACTIVE DE LA ROYA EN 1950 (CLICHÉS DE GAUCHE) MONTRE DÉJÀ UNE MORPHOLOGIE CONTRACTÉE COMPARABLE À CELLE OBSERVABLE EN 2017 (EN BLEU SUR LE CLICHÉ DE DROITE). CETTE SIMILITUDE VAUT AUTANT DANS LA PARTIE AMONT DU BASSIN, COMME À TENDE (A, B) QUE PLUS EN AVAL, DANS LES GORGES DE PIÈNE HAUTE (C, D).....	112
FIGURE 70 : ILLUSTRATIONS DE LA FOURNITURE SÉDIMENTAIRE EXACÉRBEÉ DANS LE LIT DE LA ROYA ET DE SES AFFLUENTS ENTRE 1890 ET 1930. (A) LA LAVINA À BREIL-SUR-ROYA EN 1894 (©AD06 - COTE N°23FI1023). (B) LE TORRENT DE FONTAINE FROIDE (ACQUA FREDDA) À FONTAN EN 1902 (©AD06 - COTE N°23FI1048). (C) LE RAVIN DE MALMORT À SAORGE EN 1902 ((©AD06 - COTE N°23FI10489). (D) LA ROYA EN 1929 LORS DE LA DÉVIATION DU LIT DE LA ROYA SUITE À LA MISE EN PLACE DU BARRAGE DE BREIL (IMAGE TRANSMISE PAR M. G. CATTALORDA). CE DERNIER CLICHÉ MONTRE TRÈS PROBABLEMENT LA BANDE ACTIVE RÉSIDUELLE DE LA ROYA SUITE À LA CRUE DE 1926.....	113
FIGURE 71 : EMPRISE DES BANDES ACTIVES DE LA ROYA EN 2017 (EN BLEU) ET EN 2020 POST-ALEX (EN VERT). DANS LES SECTEURS PLUS LARGES COMME SUR LE SECTEUR DE LA MADONE DE VIÉVOLA (A) OU EN AMONT DE TENDE (B) LA ROYA A OCCUPÉ UNE GRANDE PARTIE DU FOND DE VALLÉE MODERNE. SUR SON COURS MÉDIAN ET AVAL, PLUS FRÉQUEMMENT CONTRAINT PAR LES SECTEURS EN GORGES, LA ROYA A ÉGALEMENT OCCUPÉ UNE GRANDE PARTIE DU FOND DE VALLÉE À LA FAVEUR DES RARES ÉLARGISSEMENTS COMME EN AMONT DE BREIL (C) OU EN AMONT DU HAMEAU DE LIBRE (D).....	114
FIGURE 72 : ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE DE LA ROYA ENTRE 1948 ET 2020 LES VALEURS DE LARGEUR DU FOND DE VALLÉE SONT ÉGALEMENT INDIQUÉES.	115
FIGURE 73 : GRADIENT LONGITUDINAL DE L'EMPRISE DES BANDES ACTIVES DE LA ROYA EN 1948,2009,2017,2020 POST-ALEX PAR RAPPORT AU FOND DE VALLÉE. LES PRINCIPAUX AFFLUENTS SONT INDIQUÉS EN BLEU. LES NUMÉROS EN ROUGE RENVOIENT AU TEXTE.	117
FIGURE 74 : GRADIENT LONGITUDINAL DU RATIO D'EXPANSION DE LA CRUE (W_{2020}/W_{2017})	117
FIGURE 75 : ZONES DE TRANSIT ET ALLUVIONNAIRE PRESENTES EN CAS DE PRESENCE DE CONVEXITES DANS LE PROFIL EN LONG D'UN COURS D'EAU	118
FIGURE 76 : ILLUSTRATION DE LA DYNAMIQUE DE RETRACTION DE LARGEUR ACTIVE DE LIT ET D'INCISION EN CAS DE TARISSEMENT DES APPORTS SOLIDES AMONT	119
FIGURE 77 : ILLUSTRATION DE LA DIGITALISATION DU FIL D'EAU (BLEU) ET DE L'AXE DE PROJECTION RETENU A ST-DALMAS DE TENDE	120
FIGURE 78 : INTERPRETATION GEOMORPHOLOGIQUE DE L'AJUSTEMENT DU PROFIL DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE DE SAINT-DALMAS DE TENDE	122
FIGURE 79 : PROFIL EN LONG GENERAL DE LA ROYA LES TRAITS NOIRS GRAS SUPERPOSEES AUX FLECHES LOCALISANT LES COMMUNES INDIQUENT LES TRAVERSEES URBAINES.....	123
FIGURE 80 : SITUATION DES TRONÇONS SUR LA CARTE DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA.....	124
FIGURE 81 : PROFIL EN LONG GENERAL DE LA BIEUGNE	126
FIGURE 82 : VUE EN PLAN DES LITES DE TRONÇONS DU PROFIL EN LONG DE LA BIEUGNE.....	127
FIGURE 83 : VUE DE DETAIL DE LA CONFLUENCE BIEUGNE ROYA (EMPRISE DE L'ENCADRE REPRESENTÉ SUR LA FIGURE PRECEDENTE).....	128
FIGURE 84 : DIFFERENCE D'ALTITUDE ENTRE LE PROFIL VESUBIE BD TOPO IGN ET LE PROFIL VESUBIE LIDAR 2018 MNCA	130
FIGURE 85 : PROFIL EN LONG DETAILLEE DE LA ROYA EN AMONT ET DANS LA TRAVERSEE URBAINE DE TENDE.....	131
FIGURE 86 : VUE EN PLAN SUR LE LINEAIRE CORRESPONDANT AU PROFIL EN LONG DE LA FIGURE PRECEDENTE	132
FIGURE 87 : PRINCIPE D'AJUSTEMENT DE PENTE DANS UNE SITUATION DE CONFLUENCE	133

FIGURE 88 : EVOLUTION DE BANDE ACTIVE – SECTEUR ALLANT DE LA CONFLUENCE AVEC LE TORRENT DE MORTE JUSQU’AU HAMEAU DE VIEVOLA (CONFLUENCE VALLON D’OURTIGUE)	134
FIGURE 89 : PROFIL EN LONG DETAILLE DU TORRENT DE MORTE DANS SA PARTIE INFÉRIEURE (BRANCHE SUD, VALLON DE RABAY) ..	141
FIGURE 90 : VUE EN PLAN CENTRÉE SUR LE BASSIN VERSANT DU TORRENT DE MORTE	142
FIGURE 91 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE URBAINE DE TENDE	149
FIGURE 92 : VUE EN PLAN DANS LE SECTEUR DE TENDE	150
FIGURE 93 : PROFIL EN LONG DETAILLÉE DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE ST-DALMAS DE TENDE	156
FIGURE 94 : VUE EN PLAN SUR LE LINEAIRE DU PROFIL EN LONG PRÉSENTÉ PRÉCÉDEMMENT	157
FIGURE 95 : EVOLUTION DE LA BANDE ACTIVE EN AMONT DE ST-DALMAS DE TENDE	158
FIGURE 96 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA BIEUGNE DE LA CONFLUENCE AVEC LA ROYA JUSQU’AU BARRAGE DES MESCHES LES FLECHES ROUGES LOCALISENT LES APPORTS PONCTUELS LATÉRAUX DE MATÉRIAUX	165
FIGURE 97 : VU EN EN PLAN. BIEUGNE. DU BARRAGE DES MESCHES A LA CONFLUENCE AVEC LA ROYA	166
FIGURE 98 : VU EN EN PLAN. BIEUGNE SUR SON CONE DE DÉJECTION.	167
FIGURE 99 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE FONTAN	173
FIGURE 100 : VUE EN EN PLAN. SECTEUR DE FONTAN CORRESPONDANT A L’EMPRISE DU PROFIL EN LONG TRACE PAGE PRÉCÉDENTE	174
FIGURE 101 : EVOLUTION DE LA BANDE ACTIVE A L’AVAL DE LA TRAVERSEE URBAINE DE FONTAN.....	176
FIGURE 102 : PROFIL EN LONG DETAILLE DU CAÏROS DANS LA PARTIE INFÉRIEURE COUVERTE PAR LE LEVE LIDAR 2020.....	185
FIGURE 103 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE BREIL-SUR-ROYA/SAORGE.....	187
FIGURE 104 : VUE EN PLAN – SECTEUR DE BREIL SUR ROYA	188
FIGURE 105 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA ROYA DANS LA TRAVERSEE URBAINE DE BREIL-SUR-ROYA	197
FIGURE 106 : ILLUSTRATION DE LA DYNAMIQUE DU CRUE EN PRÉSENCE D’UNE CONTRACTION AVEC FOND INAFFOUILLABLE EN CONTEXTE TORRENTIEL.....	198
FIGURE 107 : PROFIL EN LONG DETAILLE DE LA ROYA EN AVAL DE BREIL-SUR-ROYA	201
FIGURE 108 : VUE EN PLAN SUR LE TRONÇON AVAL DE BREIL SUR ROYA	202
FIGURE 109 : DISTRIBUTIONS DES A) NOMBRES D’ARBRES PAR HECTARES ET B) VOLUME DE BOIS SUR PIED PAR HECTARES DANS LA SYLVO-ECO-REGION H41 « ALPES INTERMÉDIAIRES DU SUD » (DONNÉES IFN 2005-2018, HTTPS://INVENTAIRE-FORESTIER.IGN.FR/)	213
FIGURE 110 : CALIBRATION DES LOIS VOLUME DE BOIS FLOTTANT PAR ARBRES = $f(\text{HAUTEUR TOTALE})$: A) DISTRIBUTION DES VALEURS, B) DISTRIBUTION DES RÉSIDUS DES ÉQUATIONS.....	214
FIGURE 111 : COMPARAISON DES VOLUMES DE BOIS SUR PIED ESTIMÉ PAR L’IFN ET PAR L’ANALYSE DES LIDAR SUR LES 169 PLACETTES IFN SITUÉES DANS L’EMPRISE DU LIDAR 2018 MNCA : A) DISTRIBUTION DES POINTS, B) RÉSIDUS DU MODÈLE LINÉAIRE (LIGNE POINTILLÉE : LIGNE DE PARFAITE ÉGALITÉ, LIGNE TIRÉE : MODÈLE LINÉAIRE DE COEFFICIENT DE PROPORTIONNALITÉ 2.17)	215
FIGURE 112 : EXEMPLE DE DÉPÔTS D’EMBÂCLES SUR LES ORTHOPHOTOS D’URGENCE : A) IMAGE BRUTE ET B) EXEMPLE DES EMBÂCLES DIGITALISÉS.....	216
FIGURE 113 : NOMBRE DE FLOTTANTS EN FONCTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE	218
FIGURE 114 : A/ DISTRIBUTION STATISTIQUE DU TAUX DE RÉDUCTION DES BOIS FLOTTANTS R TIRÉ DE RICKLI ET AL. (2018) ; B/ DISTRIBUTION STATISTIQUE DES HAUTEURS DES ARBRES DÉTECTÉS DANS LE FOND DE VALLÉE DE LA ROYA ET DE SES AFFLUENTS (POINTILLÉS ROUGES), ET DES LONGUEURS DE BOIS FLOTTANTS PRÉDITES PAR TIRAGE ALÉATOIRE (TIRETS GRIS ET NOIRS) ET MESURÉS PAR DIGITALISATION (LIGNES CONTINUES ROUGES).....	219
FIGURE 115 : DISTRIBUTION DES DIAMÈTRES DES 54 FLOTTANTS DIGITALISÉS ET DES VALEURS PRÉDITES SELON L’APPROCHE DE MONTE CARLO PROPOSÉE PAR QUINIOU ET AL. (2021).....	220
FIGURE 116 : A) GRAPHIQUE MONTRANT LE DIAMÈTRE DES ARBRES ET LEUR HAUTEUR TOTALE (605 000 FEUILLUS ET 222 000 CONIFÈRES, DONNÉES IFN). LES DROITES CONTINUES MONTRENT LES AJUSTEMENTS DES ÉQUATIONS. NOTER QUE LE CODE COULEUR EST	

EN ÉCHELLE LOGARITHMIQUE, LES PIXELS FONCÉS COMPRENNENT DONC 1000 À 10000 FOIS MOINS D'ARBRES QUE LES PIXELS CLAIRS.	
B) DISTRIBUTION STATISTIQUE DES RÉSIDUS DES AJUSTEMENTS DES ÉQUATIONS	221
FIGURE 117 : ANALYSE LONGITUDINALE DU COURS PRINCIPAL DE LA ROYA : A) ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ; B) NOMBRE D'ARBRES RECRUTÉS (DENSITÉ IFN) ET NOMBRE DE PIÈCES DÉPOSÉES ; C) VOLUME DE BOIS RECRUTÉ (VOLUMES SUR PIED LIDAR DEBIASÉ) ET DÉPOSÉ ET D) BILAN VOLUMÉTRIQUE CUMULÉ. LES BARRES ET FUSEAUX D'INCERTITUDES SONT ESTIMÉS AVEC LES ENVELOPPES HAUTES ET BASSES DES ESTIMATIONS DES DIFFÉRENTS BILANS (VOIR TEXTE)	223
FIGURE 118 : TAPIS DE BOIS FLOTTANT SUR LE LITTORAL SUITE A LA TEMPÊTE ALEX (SOURCE : DENISE DELAHAYE, FRANCE TV)	225
FIGURE 119 : LES ENGRAVEMENTS DU PETIT ÂGE GLACIAIRE AUJOURD'HUI : DES BASSES TERRASSES BOISÉES QUI TÉMOIGNENT D'UNE DYNAMIQUE DE RETRACTION ET D'INCISION DES BANDES ACTIVES ; (A) L'ANCIENNE BANDE DE TRESSAGE DE LA BEOUX (DROME) DU 19 ^e SIÈCLE EST AUJOURD'HUI OCCUPÉE PAR UN CORRIDOR FORESTIER (PHOTO R. MONTAGNON) ; (B) CES TERRASSES RECENTES MONTRENT TRÈS SOUVENT UNE STRATIGRAPHIE DE NAPPES CAILLOUTEUSES SANS DÉPÔTS DE FINES EN SURFACE (COMME ICI SUR LA BEOUX, PHOTO F. LIEBAULT), CE QUI TÉMOIGNE D'UNE INCISION RAPIDE DANS LES DÉPÔTS	226
FIGURE 120 : CYCLE D'EXPANSION ET DE RETRACTION DE LA BANDE ACTIVE DU GUIL AVANT ET APRÈS LA CRUE DE JUIN 1957 (ARNAUD-FASSETTA ET FORT, 2004).....	227
FIGURE 121 : ENGRAVEMENT DU CYCLONE ALISON DE 1975 SUR LA NEBURU EN NOUVELLE-CALÉDONIE (BANC PATINE AU PREMIER PLAN), TOUJOURS EN PLACE DANS LE LIT 45 ANS APRÈS L'ÉVÉNEMENT (A) (PHOTO F. LIEBAULT) ; LE PROFIL EN TRAVERS MONTRE QUE L'ENGRAVEMENT FORME AUJOURD'HUI UNE TERRASSE (BANC PATINE) PERCHÉE À ENVIRON 2 M AU-DESSUS DU LIT ACTIF ACTUEL (B) ; EN NOIR, POINTS LIDAR CLASSES EN SOL ; EN VERT, POINTS LIDAR CLASSES EN SURSOL (VEGETATION)	228
FIGURE 122 : ILLUSTRATION DE L'ESTIMATION DU NIVEAU ATTEINT EN CRUE AVEC CHARRIAGE (QUEFFELEAN ET AL 2019)	234
FIGURE 123 : AJUSTEMENT PROGRESSIF DU STYLE DE LIT DES COURS D'EAU EN RAISON DE L'INSTABILITÉ DES BERGES (ROSGEN, 1994)	236
FIGURE 124 : RAPPORT L/H DEDUITS DES BANDES ACTIVES LORS DE 6 CRUES EXTREMES (A. FAURE, 2015).....	236
FIGURE 125 : ILLUSTRATION D'UN LIT D'UNE SOIXANTAINE DE MÈTRES PRÉCONISE SUR LA ROYA EN AMONT DE BREIL-SUR-ROYA ..	238
FIGURE 126 : ILLUSTRATION DE LA DÉTERMINATION DE L'ENVELOPPE DES NIVEAUX (CAS D'UN LIT LARGE ET DIVAGANT) (SOURCE : QUEFFELEAN ET AL., 2019)	238
FIGURE 127 : EXEMPLE DE ZONE DE RÉGULATION DU TRANSPORT SOLIDE (MATERIAISÉE PAR LE POINTILLÉ JAUNE) PRÉCONISÉE SUR LA ROYA À TENDE	240
FIGURE 128 : PROFILS EN LONG DU NIVEAU DES CHARGES D'ÉCOULEMENT AU DÉBIT DE LA DÉCRUE. SCÉNARIO P2 : LIMITATION AFFOUILLEMENT AU DROIT DES PRINCIPALES CONTRACTIONS DU LIT. ENSEMBLE DES RÉSULTATS AU NIVEAU DES PROFILS EN TRAVERS EN ANNEXE 20.....	247
FIGURE 129 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES AU NIVEAU DU PROFIL EN TRAVERS 153. POSSIBILITÉ DE PROTÉGER POUR LE SCÉNARIO CENTENAL, PAR UNE PROTECTION DE BERGE, SOUS RÉSERVE DE REMBLAYER LE TERRAIN NATUREL.....	248
FIGURE 130 : PARAMÈTRES HYDRAULIQUES AU NIVEAU DU PROFIL EN TRAVERS 152 (SECONDE MAISON EN RIVE GAUCHE EN AVANT DU PONT DES TRUITES).....	248
FIGURE 131 : ILLUSTRATION D'UN LIT LARGE REAMENAGE AVEC PROTECTIONS LATÉRALES	253
FIGURE 132 : BRECHE SUR LA DIGUE DE PROTECTION DU CAMPING DE BREIL – DIGUE EN ENROCHEMENTS BÉTONNES AVEC SABOT RIGIDE	254
FIGURE 133 : RÉPARTITION DE L'ENDOMMAGEMENT DES BÂTIMENTS, DONT LES HABITATIONS, SELON LA CARTOGRAPHIE EXISTANTE DU PPR INONDATION APPRÔUVÉ SUR LE TORRENT DU CAÏROS (COMMUNE DE SAORGE)	257
FIGURE 134 : CROISEMENT DE L'AZI AVEC LA CARTOGRAPHIE DE L'INTENSITÉ DE LA CRUE ALEX À SAINT-DALMAS-DE-TENDE (À GAUCHE) ET À FONTAN (À DROITE)	258
FIGURE 135 : LOCALISATION DES BÂTIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RÉSEAU PUBLIC) IMPACTÉS LORS DE LA CRUE DANS OU HORS ZONE INONDABLE CARTOGRAPHIÉE DANS L'AZI	259
FIGURE 136 : LOCALISATION ET NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT DES 11 HABITATIONS IMPACTÉES HORS ZONE INONDABLE CARTOGRAPHIÉE DANS L'AZI (ET DANS L'EMPRISE DE L'EAIP) EN RIVE DROITE DE LA ROYA DANS LA TRAVERSÉE DE FONTAN. LA CORRESPONDANCE AVEC LES NUMÉROS DE BÂTIMENTS ET LEUR DESCRIPTION EST DISPONIBLE EN ANNEXE 8	260

FIGURE 137 : LOCALISATION ET NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT DES 6 HABITATIONS IMPACTEES HORS ZONE INONDABLE CARTOGRAPHIEE DANS L'AZI SUR LA COMMUNE DE TENDE : A) EN RIVE DROITE DU TORRENT DE LA BIEUGNE ; B) EN RIVE DROITE DU VALLON DE PRIOU, C) EN RIVE GAUCHE DE LA ROYA. LA CORRESPONDANCE AVEC LES NUMEROS DE BATIMENTS ET LEUR DESCRIPTION EST DISPONIBLE EN ANNEXE 8.....	260
FIGURE 138 : LOCALISATION DES BATIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC) IMPACTES LORS DE LA CRUE DANS OU HORS ZONE INONDABLE CARTOGRAPHIEE DANS L'EAIP	261
FIGURE 139 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BATIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC), IMPACTES LORS DE LA CRUE SUR LA VALLEE DE LA ROYA, SELON LEUR LOCALISATION DANS OU HORS ZONE INONDABLE DE L'EAIP	262

TABLEAUX

TABLEAU 1 : SUPERFICIES, ALTITUDES CARACTERISTIQUES ET PENTE MOYENNE DES PRINCIPAUX SOUS BASSINS DE LA ROYA	16
TABLEAU 2 : HISTORIQUE DE CRUE LA ROYA.....	24
EN BLEU LA VALEUR RETENUE PAR LE GEMAPIEN DANS L'ETUDE EGIS-GEOPEKA (2021) TABLEAU 3 : VALEURS DE DEBIT DE CRUE RETENUES DANS DES ETUDES ANTERIEURES	27
TABLEAU 4 : VALEURS DE DEBIT DE CRUE CENTENNAL SHYREG DISPONIBLES DANS LE BASSIN DE LA ROYA ET DE LA BIEUGNE.....	28
TABLEAU 5 : MAXIMUMS RELEVES AUX POSTES PLUVIOMETRIQUES PRESENTS SUR LES BASSINS VERSANTS DE LA ROYA ET DE LA BEVERA. SOURCE : RETEX HYDROLOGIQUE. (*) LACUNES A ST-DALMAS DE TENDE.	33
TABLEAU 6 : CRITERES DE QUALIFICATION DES CLASSES D'INTENSITE (SOURCE : D'APRES LE GUIDE CONSTRUIRE EN MONTAGNE, MEDDTL, 2010).....	52
TABLEAU 7 : SUPERFICIES DES SECTEURS IMPACTES PAR CLASSE D'INTENSITE ET PAR COURS D'EAU	56
TABLEAU 8 : CLASSIFICATION DES ENJEUX RETENUE.....	57
TABLEAU 9 : MODES D'ENDOMMAGEMENT DES BATIS, ROUTES ET PONTS ILLUSTRES A PARTIR DE CONSTATS SUR LA VALLEE DE LA ROYA (SOURCE PHOTOS : ONF-RTM)	61
TABLEAU 10 : CLASSES ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT STRUCTURAL ILLUSTRES A PARTIR DE CONSTATS SUR LA VALLEE DE LA ROYA (ADAPTEES DE HAZUS ET D'UNE FIGURE TIREE DE KEAN ET AL., 2019) (SOURCE PHOTOS : ONF-RTM)	62
TABLEAU 11 : LINEAIRE DE ROUTES IMPACTEES RELEVES LORS DE CET INVENTAIRE (HORS 600 M DE PISTES ET VOIES PIETONNES)	63
TABLEAU 12 : NOMBRE DE BATIMENTS IMPACTES DANS LES VALLEES DE LA ROYA ET LA VESUBIE SELON LEUR TYPE.....	64
TABLEAU 13 : NOMBRE DE BATIMENTS IMPACTES DANS LA VALLEE DE LA ROYA SELON LEUR TYPE	64
TABLEAU 14 : NOMBRE DE BATIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC) IMPACTES PAR VALLEE SELON LEUR TAUX D'ENDOMMAGEMENT	65
TABLEAU 15 : NOMBRE D'HABITATIONS (INDIVIDUELLES ET COLLECTIVES) IMPACTEES PAR VALLEE SELON LEUR TAUX D'ENDOMMAGEMENT	66
TABLEAU 16 : NOMBRE D'HABITATIONS / NOMBRE DE BATIMENTS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC) IDENTIFIES PAR TYPE DE MODE D'ENDOMMAGEMENT ET NIVEAU D'INTENSITE D'AFFOUILLEMENT OU D'ENGRAVEMENT	70
TABLEAU 17 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BATIS (HORS INFRASTRUCTURES DE RESEAU PUBLIC) SELON L'INTENSITE LOCALE RELEVÉE POUR CHAQUE MODE D'ENDOMMAGEMENT	71
TABLEAU 18 : CONFIGURATIONS AVEC UN FAIBLE ENDOMMAGEMENT DES BATIMENTS EN ZONE D'INTENSITE PAR AFFOUILLEMENT FORT (EXEMPLES EXTRAITS DANS LA VALLEE DE LA ROYA) (SOURCE PHOTOS : ONF-RTM)	73
TABLEAU 19 : TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES PONTS ET PASSERELLES VISITES DANS LE CADRE DE CE RETOUR D'EXPERIENCE	76
TABLEAU 20 : TYPOLOGIE DES PONTS RETENUE.....	77
TABLEAU 21 : REPARTITION DE LA SURVENUE DES DECES PAR VALLEE, COMMUNE ET TYPES D'ENJEU (* : CONDITIONS INCONNUES CAR TEMOIGNAGES NON CONCORDANTS ; ** : UN BERGER EN ACTIVITE ; *** : DEUX POMPIERS SUR ROUTE POUR MISSION DE SECOURS) 81	

TABLEAU 22 : CONDITIONS DE SURVENUE DES DECES DANS LES SEPT HABITATIONS SELON LE NOMBRE DE PERSONNES PRESENTES, L'AGE DES VICTIMES, L'HEURE DES DECES ET LE NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT CONSTATE DE L'HABITATION DANS LAQUELLE S'EST PRODUIT LE DECES	82
TABLEAU 23 : IMAGERIE UTILISEE POUR L'EXTRACTION DES BANDES ACTIVES ET DU FOND DE VALLEE MODERNE DE LA ROYA.....	107
TABLEAU 24 : IMAGERIE COMPLEMENTAIRE UTILISEE POUR L'ANALYSE DES EVOLUTION MORPHOLOGIQUES DE LA ROYA.....	107
TABLEAU 25 : : VALEURS DE RÉFÉRENCE EN MÈTRES (MAX., MIN., MOYENNE, MÉDIANE) ISSUES DE L'ÉVALUATION DES LARGEURS DU FOND DE VALLÉE (FDV) ET DES BANDES ACTIVES DE LA ROYA EN 1948, 2009, 2017 ET 2020. *EN 1948, 2009 ET 2017, LES VALEURS DE LARGEURS MAXIMALES SONT ARTIFICIELLEMENT AUGMENTÉES AU NIVEAU DE LA RETENUE DU BARRAGE DE BREIL-SUR-ROYA (PK 27.45 À 27.65). ON INDIQUE CES VALEURS MAXIMALES DANS L'EMPRISE DE L'OUVRAGE ENTRE PARENTHÈSE. LES FAIBLES VALEURS DE LARGEURS MINIMALES POUR 1948, 2009 ET 2017 (RESPECTIVEMENT 4, 2 ET 2 M) PEUVENT ÊTRE LIÉES AUX DIFFICULTÉS DE PHOTO-INTERPRÉTATION INHÉRENTES AU BOISEMENT IMPORTANT DES MARGES DU LIT.....	115
TABLEAU 26 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE TENDE	138
TABLEAU 27 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE ST-DALMAS DE TENDE	155
TABLEAU 28 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA BIEUGNE DANS LE SECTEUR DE ST-DALMAS DE TENDE.....	168
TABLEAU 29 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE FONTAN.....	175
TABLEAU 30 : PONTS SUBMERGES PAR LES ECOULEMENTS DANS LE TRONÇON AMONT	189
TABLEAU 31 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA ROYA DANS LE SECTEUR DE BREIL-SUR-ROYA/SAORGE.....	189
TABLEAU 32 : SYNTHÈSE DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ET DU NIVEAU DE FOND DE LIT DE LA ROYA AVAL DE TRAVERSEE URBAINE DE BREIL SUR ROYA	201
TABLEAU 33 : QUANTILES DES HAUTEURS DES ARBRES DÉTECTÉS, DIAMÈTRES ET LONGUEUR DES FLOTTANTS PRÉDITS ET MESURÉES	212
TABLEAU 34 : COMPARAISON DES DENSITÉS (VOLUMIQUES) ET DES DENSITÉS DE PEUPLEMENT DES DIFFÉRENTES SOURCES (N : PLACETTES OU FORMATIONS BOISÉES)	216
TABLEAU 35 : SYNTHÈSE DES QUANTITÉS DES FLOTTANTS DÉPOSÉS DANS LES DIFFÉRENTS COURS D'EAU	217
TABLEAU 36 : QUANTILES DES HAUTEURS DES ARBRES DÉTECTÉS, DIAMÈTRES ET LONGUEUR DES FLOTTANTS PRÉDITS ET MESURÉES	218
TABLEAU 37 : VOLUMES DE BOIS FLOTTANTS ÉRODÉS, DÉPOSÉS ET EXPORTÉS DANS LES DIFFÉRENTS SOUS-BASSINS VERSANTS : ESTIMATION INTERMÉDIAIRE (INTERVALLE BAS – INTERVALLE HAUT)	224
TABLEAU 38 : PRINCIPES D'AMENAGEMENT HYDRAULIQUES ET LEURS EFFETS ESCOMPTES	232
TABLEAU 39 : LARGEUR, HAUTEUR, VITESSE ET CONTRAINTES AU FOND POUR UN DÉBIT CENTENNAL ET DIFFÉRENTES VALEURS DE RATIO LARGEUR/HAUTEUR D'ÉCOULEMENT (HYPOTHÈSE D'ÉCOULEMENT EN RÉGIME CRITIQUE) A TENDE	245
TABLEAU 40 : COMPARAISON DES GEOMETRIES TESTÉES POUR LA MODELISATION : LARGEURS MINIMALES ET RAPPORTS LARGEUR / HAUTEUR D'ÉCOULEMENT	246
TABLEAU 41 : LARGEUR, HAUTEUR, VITESSE ET CONTRAINTES AU FOND POUR UN DÉBIT CENTENNAL ET DIFFÉRENTES VALEURS DE RATIO LARGEUR/HAUTEUR D'ÉCOULEMENT (HYPOTHÈSE D'ÉCOULEMENT EN RÉGIME CRITIQUE) A ST-DALMAS DE TENDE.....	249
TABLEAU 42 : LARGEUR, HAUTEUR, VITESSE ET CONTRAINTES AU FOND POUR UN DÉBIT CENTENNAL ET DIFFÉRENTES VALEURS DE RATIO LARGEUR/HAUTEUR D'ÉCOULEMENT (HYPOTHÈSE D'ÉCOULEMENT EN RÉGIME CRITIQUE) A ST-DALMAS DE TENDE.....	250
TABLEAU 42 : NOMBRE DE BATIMENTS ET D'HABITATIONS IMPACTÉS SUR LA ROYA LORS DE LA CRUE DU 02/10/2020 ET LOCALISÉS SUR LE TERRITOIRE COUVERT PAR LES CARTOGRAPHIES DE CONNAISSANCE DU RISQUE D'INONDATION EXISTANTES	256
TABLEAU 43 : CROISEMENT DE LA CARTOGRAPHIE D'INTENSITÉ DE CRUE AVEC LA CARTE DE ZONAGE DU PPR INONDATION SUR LE TORRENT DU CAÏROS.....	257
TABLEAU 44 : CROISEMENT DE LA CARTOGRAPHIE D'INTENSITÉ DE CRUE AVEC L'AZI SUR LES TROIS COMMUNES CONCERNÉES.....	258

TABEAU 45 : NOMBRE D'HABITATIONS IMPACTÉES LORS DE LA CRUE ET LOCALISÉES HORS ZONE INONDABLE SELON L'EAIP, RÉPARTIES SELON LEUR NIVEAU D'ENDOMMAGEMENT	263
--	-----

ANNEXES

ANNEXE 1 : ALPES-MARITIMES – GESTION POST-TEMPÊTE ALEX : RÉFLEXIONS SUR L'ESTIMATION DE LA PÉRIODE DE RETOUR DES CHANGEMENTS MORPHOLOGIQUES MAJEURS ASSOCIÉS AUX CRUES EXTREMES – INRAE	
ANNEXE 2 : SUPERFICIE ET CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ROYA	
ANNEXE 3 : COMPILATION DES ESTIMATIONS DE DÉBITS CENTENNAUX SUR LES BASSINS VERSANTS DE LA VESUBIE ET DE LA ROYA	
ANNEXE 4 : EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE INONDATION RÉALISÉE PAR LE BRGM (2005)	
ANNEXE 5 : FORMULAIRES DE SAISIE MOBILE ÉLABORÉS DANS LE CADRE DU RELEVÉ DES DÉSORDRES SUR LES ENJEUX	
ANNEXE 6 : ESTIMATIONS ONF-RTM DES PICS DE DÉBIT DE CRUE À SAORGE ET BREIL-SUR-ROYA	
ANNEXE 7 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES TORRENTIELS DE LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020	
ANNEXE 8 : MODALITÉS ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BÂTIMENTS IMPACTÉS PAR LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020	
ANNEXE 9 : MODALITÉS ET TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES BÂTIMENTS IMPACTÉS PAR LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020	
ANNEXE 10 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – ENDOMMAGEMENT VS. INTENSITÉ DE LA CRUE ALEX	
ANNEXE 11 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – GEOMORPHOLOGIE	
ANNEXE 12 : ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE – FICHES-SYNTHESE	
ANNEXE 13 : COMPARAISON DIACHRONIQUE EN PLAN SUR QUELQUES SECTEURS LOCALISÉS	
ANNEXE 14 : PHOTOGRAPHIES ANCIENNES DE LA ROYA	
ANNEXE 15 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – DIACHRONIE DES BANDES ACTIVES AVANT ET APRÈS CRUE	
ANNEXE 16 : PROFIL EN LONG GÉNÉRAL ET VUE EN PLAN DU CAÏROS ET PHOTOGRAPHIES POST-CRUE DANS LE BASSIN DU CAÏROS	
ANNEXE 17 : PHOTOGRAPHIES PRISES PENDANT LA CRUE ALEX ET DANS LES JOURS QUI ONT SUIVI	
ANNEXE 18 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – SOURCES ET DÉPÔT DE BOIS FLOTTANT ROYA ET AFFLUENTS	
ANNEXE 19 : PRINCIPES DE REAMÉNAGEMENT RECOMMANDÉS DANS LA TRAVERSEE DE TENDE DANS LE CADRE DE L'ATELIER GEMAPI DU 25 FÉVRIER 2021	
ANNEXE 20 : ESQUISSE DU REAMÉNAGEMENT DU SECTEUR AVAL DU PONT DES TRUITES À TENDE – RAPPORT (ONF-RTM, 28/04/2021)	
ANNEXE 21 : ESQUISSE DU REAMÉNAGEMENT DU SECTEUR AVAL DU PONT DES TRUITES À TENDE – ATELIER GEMAPI DU 19 AVRIL 2021	
ANNEXE 22 : PRINCIPES DE REAMÉNAGEMENT RECOMMANDÉS DANS LA TRAVERSEE DE BREIL-SUR-ROYA DANS LE CADRE DE L'ATELIER GEMAPI DU 30 AVRIL 2021	
ANNEXE 23 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – INTENSITÉ DE LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020 VS. PPRI SAORGE	
ANNEXE 24 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – INTENSITÉ DE LA CRUE DU 2 OCTOBRE 2020 VS. ATLAS DES ZONES INONDABLES	
ANNEXE 25 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE – ENDOMMAGEMENT DES BÂTIS VS. ATLAS DES ZONES INONDABLES VS. ZONE INONDABLE SELON L'EAIP	

Agence RTM des Alpes du Sud

Service RTM des Alpes-Maritimes

62 rte de Grenoble, BP 3260 - 06205 NICE CEDEX 3

Tél: 04.93.18.54.74

rtm.nice@onf.fr