

L'utilisation de données LIDAR dans l'expertise quantitative du phénomène d'érosion post-événement intense

L'exemple du bassin versant de la Baillmarsane (Escaro, Pyrénées-Orientales) à la suite de l'épisode méditerranéen GLORIA





Sommaire

1. Contexte général.	5
2. Pourquoi ce guide ?	7
3. Propositions de traitements de données LIDAR	13
4. Résultats des analyses.	19
5. Limites de l'utilisation des données LIDAR	23



1. Contexte général

L'exemple mis en avant dans ce guide se réfère à la commande du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) au service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) des Pyrénées-Orientales de réaliser une Etude de Bassin de Risques (EBR). La rédaction d'une EBR nécessite la collecte d'une quantité d'informations la plus exhaustive possible afin de traiter tous les aspects afférant au bassin versant. A l'issue de la valorisation des données, le document unique fait l'état des connaissances des systèmes de protection et du niveau de maîtrise des aléas conduisant à la définition d'un programme d'intervention fondé sur des scénarios de référence et de diminution des aléas au droit des enjeux menacés.

Le bassin versant de la Baillmarsane (15 km²), sur les territoires communaux d'Escaro et de Serdinya (*Figure 1*), se situe sur le flanc Nord du massif du Très Estelles (2099m) et conflue

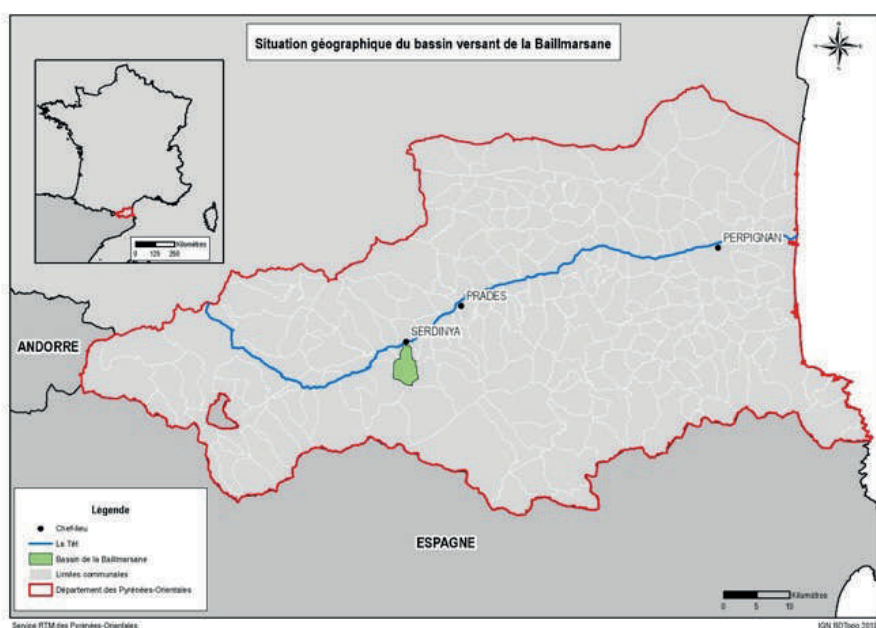


Figure 1: Carte de la situation géographique du bassin versant de la Baillmarsane.

avec la Têt (540m). Même s'il ne représente qu'1% du bassin versant de la Têt, son importance en termes de phénomènes gravitaires, d'apports de matériaux et de torrentialité se situe bien au-delà de ce ratio.

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle et l'acquisition par l'Etat des terrains devenus domaniaux, plusieurs stratégies visant à diminuer la fréquence et l'intensité de nombreux phénomènes (crue torrentielle, érosion et ravinement, glissement de terrain) ont été conduites. Les objectifs sont de plusieurs ordres : ralentir la dynamique torrentielle et l'incision du profil en long, drainer les eaux superficielles, lutter contre les érosions de versant. Le bassin versant de la Baillmarsane est atypique : seuls les affluents de la Baillmarsane sont compris dans le périmètre de la forêt domaniale du Conflent. Le réseau hydrographique se structure en plusieurs ravins principaux et secondaires qui lacèrent profondément les pentes et génèrent régulièrement des événements marquants. Ce sont sur ces ravins que l'on retrouve les ouvrages dits RTM (*Figure 2*).

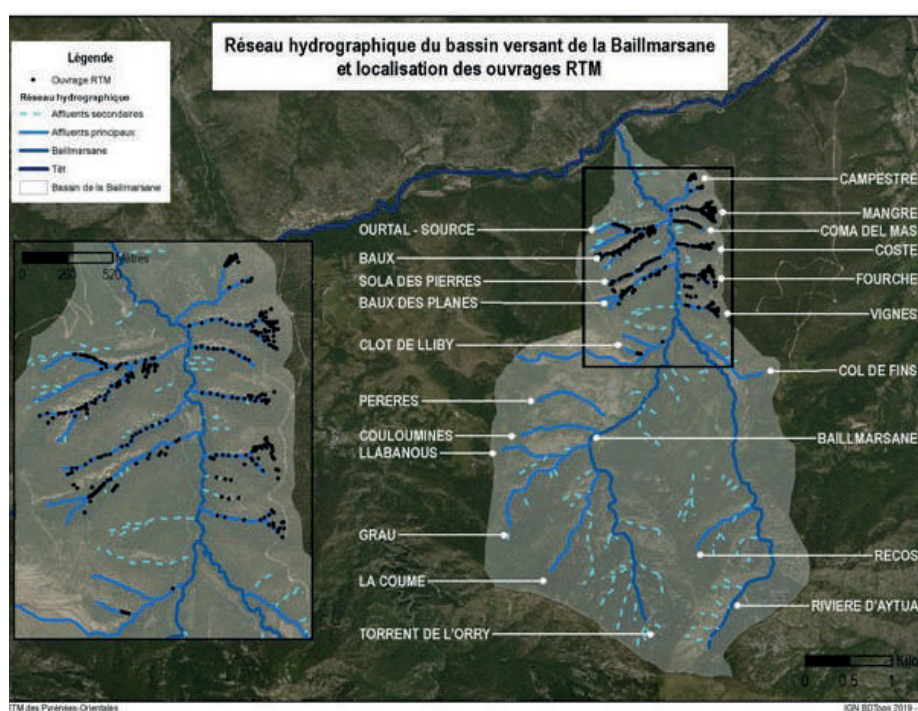


Figure 2: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Baillmarsane et de localisation des ouvrages RTM.

L'utilisation et la comparaison de données LIDAR dans le contexte de l'EBR permet notamment de quantifier les phénomènes d'érosion. Cette information quantitative est d'autant plus intéressante à mettre en perspective à la suite d'un événement pluvieux intense, événement de plus en plus récurrent et dommageable par le changement climatique. L'objectif de ce guide est de fournir des éléments clés dans l'utilisation de données LIDAR en situation post-événement sur des terrains sensibles à l'érosion.

2. Pourquoi ce guide ?

Le changement climatique engendre l'augmentation et l'intensification d'événements pluvieux intenses, dont les conséquences notamment sur les enjeux sont de plus en plus prégnantes. En zone de montagne, les facteurs physiques de ces milieux (formation géologique, exposition, pente, occupation des sols, type de végétation, etc.) jouent un rôle prédominant et sont donc d'autant plus importants à considérer. En complément des prospections de terrain, la mise en œuvre de campagnes de LIDAR permet une vision d'ensemble et à plusieurs échelles de ces différents facteurs. L'utilisation de ces données facilite les expertises plus fines, de la compréhension des phénomènes jusqu'à leur mitigation ou la proposition de parades de protections des enjeux.



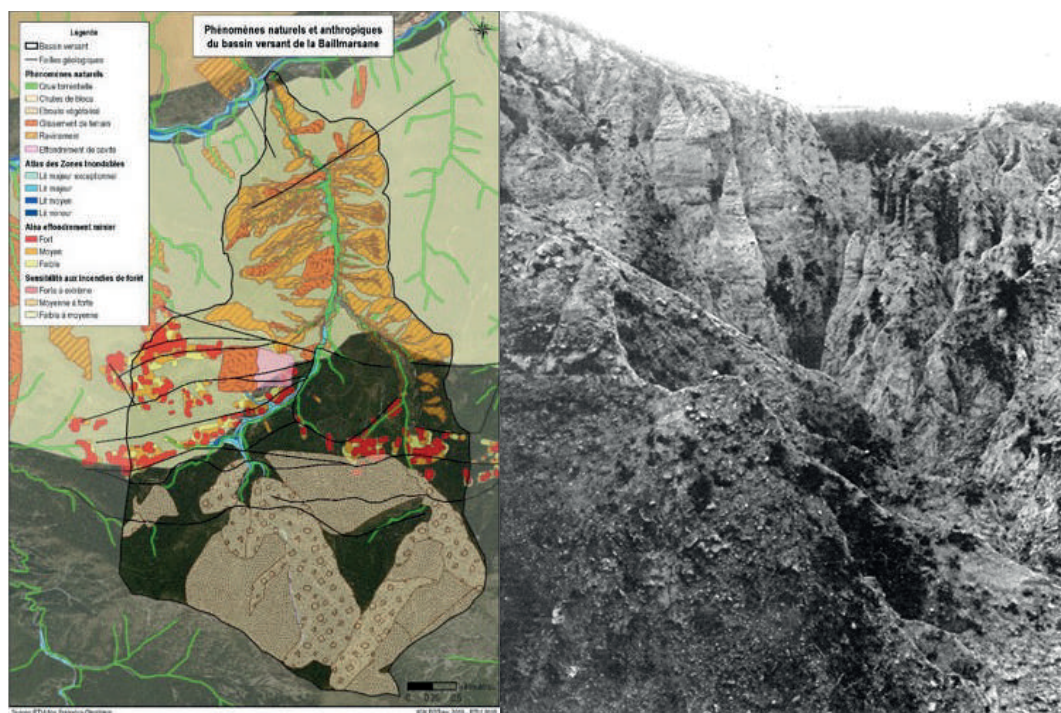


Figure 3: (à gauche) Carte des phénomènes naturels et anthropiques du bassin versant de la Baillmarsane
(à droite) État des terrains de la partie supérieure du sous-bassin versant des Baux à la fin du XIX^{ème}.

L'exemple du bassin versant de la Baillmarsane donne un cadre concret à la théorie développée ci-dessus. L'EBR se focalise sur la partie inférieure de la Baillmarsane qui est marquée par des terrains miocènes conglomératiques (alternance de sables grossiers quartzo-feldspatiques très mal triés jusqu'aux blocs métriques essentiellement de gneiss). Malgré une géologie uniforme (*Figure 5 A*), chaque ravin reste singulier, relatif à plusieurs facteurs comme la stratification de cette formation conglomératique : le pendage et l'induration des strates jouent localement des rôles importants dans l'occurrence de mouvements de terrain et d'érosion (*Figure 3*).

L'exposition des terrains (*Figure 5 B*) impacte la physionomie des sols et des berges ainsi que la dynamique de la couverture végétale. On notera ainsi des différences entre les versants exposés Sud (sol sec et caillouteux avec une végétation arbustive éparse) et ceux exposés Nord (sol plus humide engageant une dynamique végétale plus prononcée). Par ailleurs, ces terrains se situent dans la partie la moins pentue du bassin versant avec des pentes globalement inférieures à 30° (*Figure 5 C*). Cependant, à la faveur d'une compétence de roche plus faible, les incisions torrentielles dans cette formation géologique génèrent des ravins dont les rives atteignent des pentes très fortes, parfois supérieures à 45°, voire la verticalité sur des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres. La puissance d'érosion des eaux est considérable donnant des bad-lands typiques.

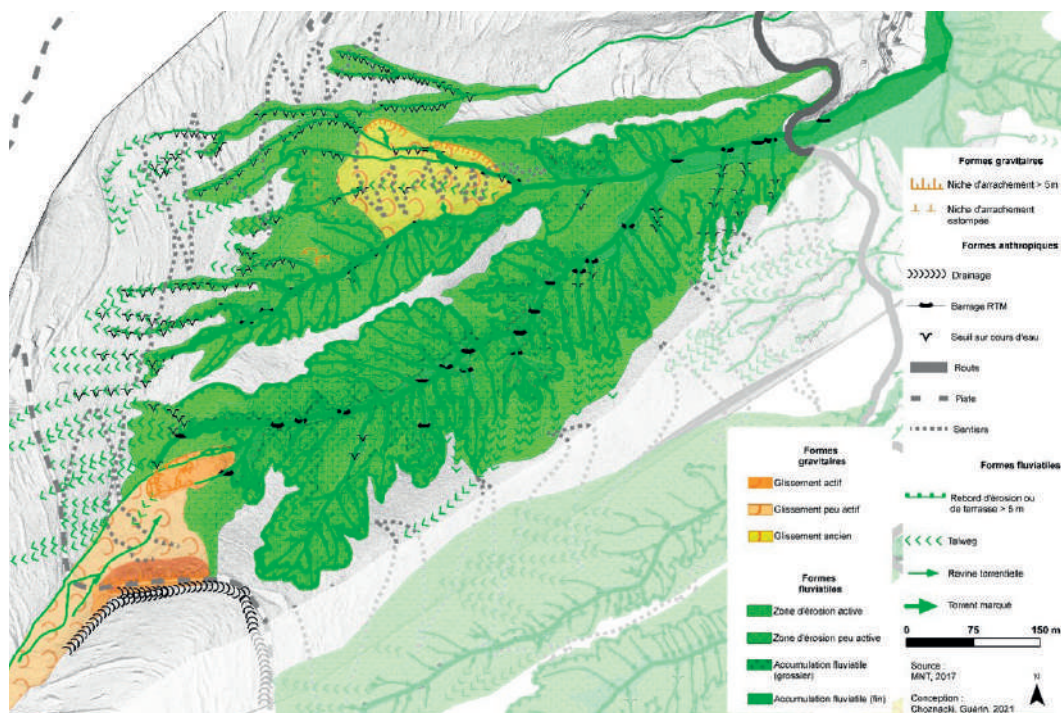


Figure 4: Carte géomorphologique du sous-bassin versant des Baux (extrait EBR, 2022).

Le couvert forestier représente aujourd'hui près de 70% de la surface du bassin versant contre quelques pourcents à la fin du XIXème siècle (*Figures 3 et 5 D*). Depuis les essais concluants des plantations à partir de 1889, l'objectif réside dans le maintien de cette couverture végétale pour protéger ces sols sensibles à l'érosion. Malgré un fort taux de boisement et jusqu'alors une fréquence faible en termes d'événements d'ampleur, les ravins réagissent très vite et systématiquement avec une torrentialité affirmée. Enfin, l'analyse géomorphologique des terrains (*Figure 4*) permet de caractériser les divers sous-bassins versants, d'analyser l'imbrication des divers phénomènes et leur traduction concrète sur les terrains (érosion, incision, accrétion, etc.).

La production de matériaux solides et la protection des sols face à l'érosion est d'autant plus remise en question face aux événements météorologiques majeurs. Ces interrogations se sont posées lors de l'épisode méditerranéen GLORIA. Cet épisode pluvio-neigeux actif entre le 20 et le 23 janvier 2020 est consécutif du débordement sur le Sud de la France de la tempête GLORIA qui a impacté l'Ouest du bassin méditerranéen. Cette tempête s'est manifestée de différentes manières entre le littoral (submersion marine avec des vagues de 5 à 8m), les zones de plaines (fortement affectées par des cumuls importants de pluie) et les zones de piémont et de montagne (à la fois impactées par des cumuls liquides et solides). On a pu relever l'équivalent de 4 à 5 mois de pluies tombée en 72 heures. Ces forts cumuls ont généré des crues exceptionnelles dans le département (*Figure 6*).

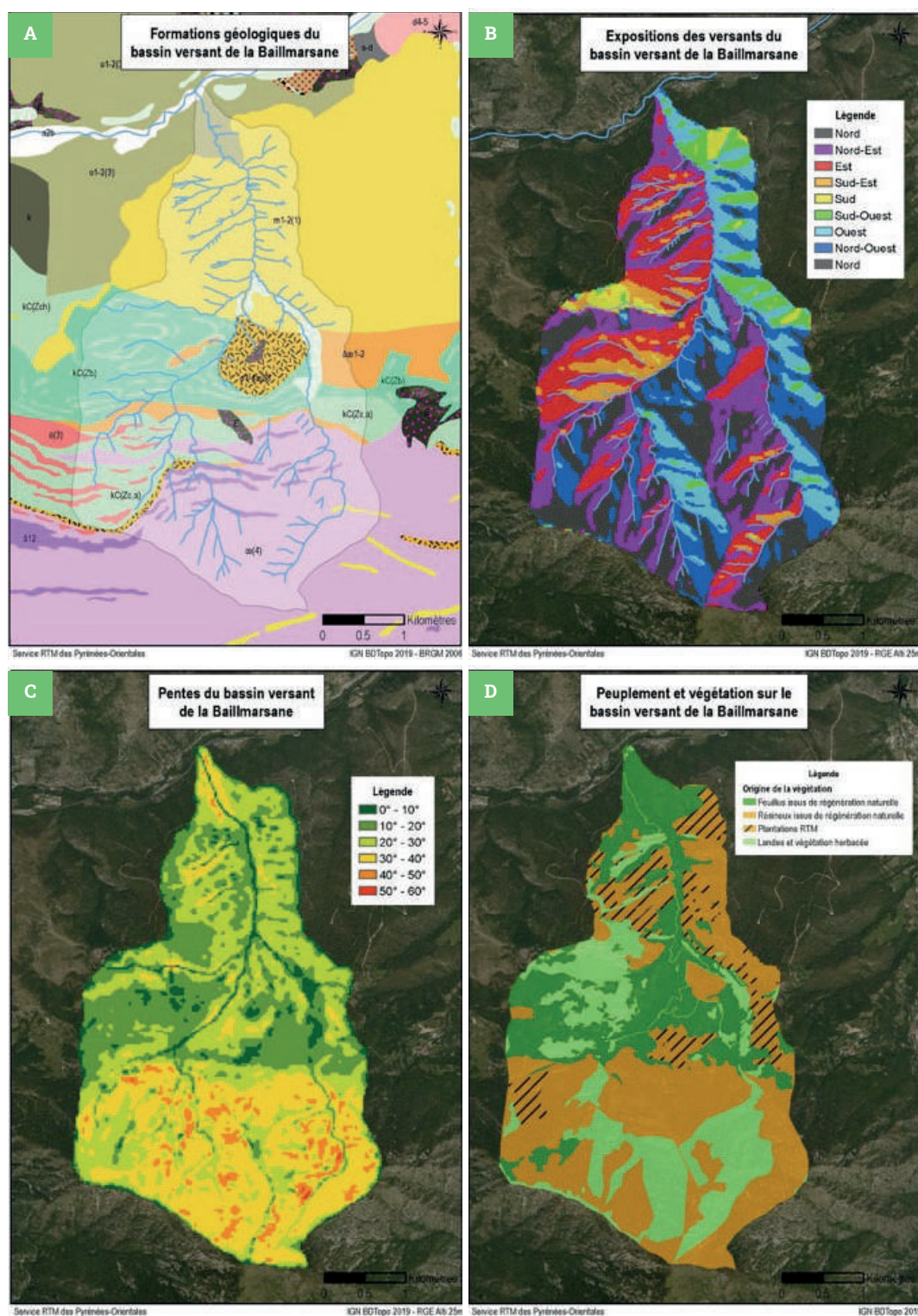


Figure 5: Cartes des formations géologiques (A), des expositions des versants (B), des pentes (C) et des peuplements (D) du bassin versant de la Baillmarsane.

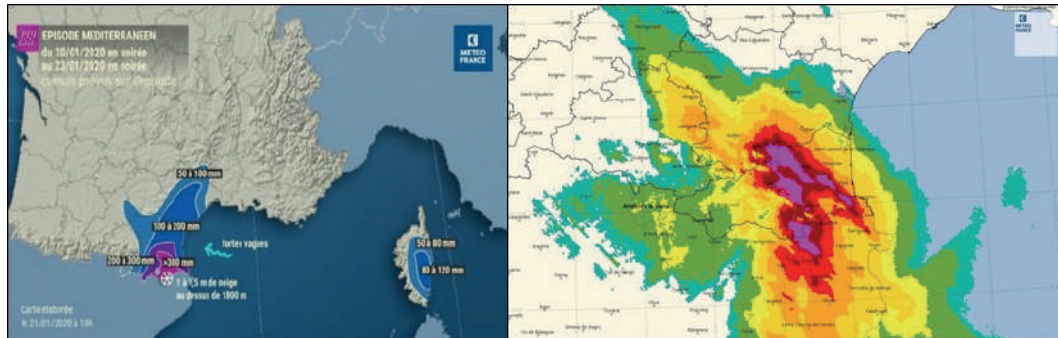


Figure 6: Cartes de Météo-France de la tempête au 21/01/2020 et lame d'eau cumulée sur 72h (20/01/2020 14h au 23/01/2020 10h).



Figure 7: Vues de la ravine depuis la RD27 en direction d'Escaro et d'un ouvrage du ravin des Baux après la tempête GLORIA.

Cet épisode pluvieux, plutôt inhabituel sur le pourtour méditerranéen en saison hivernale, a la particularité d'avoir alterné des séquences pluvieuses et neigeuses à la faveur de la fluctuation altitudinale de l'isotherme 0°C. Cette alternance a modifié considérablement le régime des écoulements de surface et a généré des taux d'infiltrations importants, favorables à des instabilités de sols. Un nombre important de phénomènes de mouvement de terrain et d'érosion ont ainsi été répertoriés (*Figure 7*). En complément, le rapport de la DREAL du 12 février 2020 indique que la Têt a connu un épisode de crue d'occurrence supérieur à la décennale généralisée sur l'ensemble de son cours de Mont-Louis jusqu'à Perpignan, ainsi que sur ses affluents.

Au regard des conditions intrinsèques de ces terrains sensibles aux phénomènes d'érosion face à un événement d'ampleur tel que l'épisode GLORIA, le service de Restauration des Terrains en Montagne s'est engagé dans une réflexion sur la quantification des phénomènes d'érosion et l'impact d'un événement de cette ampleur par la comparaison de données LIDAR pré- et post-événement sur le bassin versant de la Baillmarsane.



3. Propositions de traitements de données LIDAR

L'utilisation de données LIDAR rend possible l'estimation de la quantification et l'analyse spatiale du phénomène d'érosion. A travers une série de traitements, on pourra identifier des zones d'érosion et d'accrétion ainsi que des fourchettes de volumes permettant de faire des liens directs entre ces zones. Ce guide a vocation à présenter des exemples de traitements réalisés pour l'EBR de la Baillmarsane et transposables à des études similaires.

Dans le cadre de l'EBR, deux campagnes LIDAR ont été réalisées par un même prestataire : l'une en 2018 en vue de la préparation de l'étude et l'autre en 2021 à la suite de l'épisode méditerranéen. Les caractéristiques principales des deux levés (2018 et 2021 A) sont présentées ci-dessous (Figure 8), auxquelles s'ajoutent celles d'un dernier levé (2021 B). Celui-ci correspond à la reconduite du levé de 2021 à la demande du service RTM du fait d'une qualité nettement inférieure par rapport au levé de 2018. Les campagnes de 2021 se composent d'un levé global homogène sur toute l'emprise du levé, et d'un levé haute définition exclusivement sur les sous-bassins versant les plus problématiques ayant eu une réaction observable sur les enjeux lors de la tempête GLORIA.

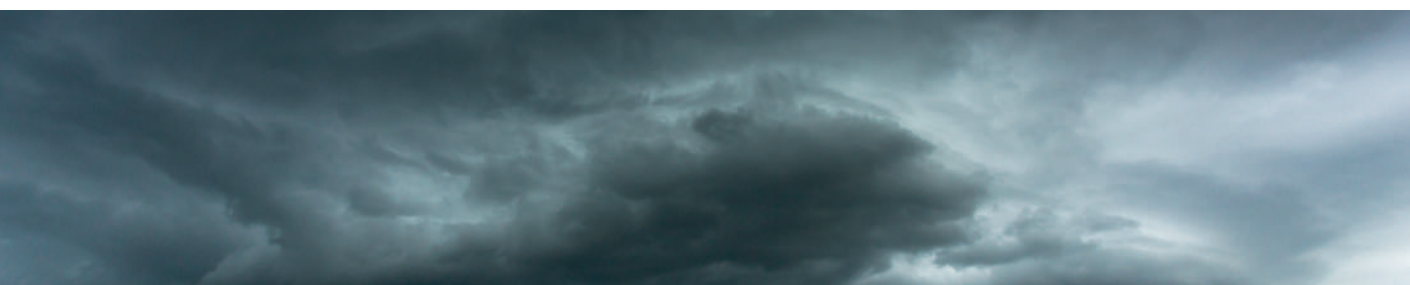


	Commande 2018	Commande 2021 A		Commande 2021 B	
		Global	HD	Global	HD
Matériel	LIDAR Riegl avec centrale inertielle IXBLUE AIRINS III monté sur un Partenavia P68	LIDAR Riegl avec centrale inertielle IXBLUE AIRINS III, GPS Trimble et caméra IXU RS 1000 montés sur un Partenavia P68			
Date du vol	5 avril 2018 entre 8h10-12h25	8 juin 2021 entre 8h30-14h30		19 novembre 2021 entre 9h15-13h55	
Emprise sur le BV	Baillmarsane partie inférieure	Baillmarsane en totalité		Baillmarsane en totalité	
Hauteur de vol (m)	950 m	1550 m	1300 m	1370 m	1100 m
Vitesse de vol (km/h)	150 km/h	205 km/h	205 km/h	205 km/h	205 km/h
Fréquence d'émission laser (kHz)	400 kHz	1100 kHz	2000 kHz	600 kHz	1100 kHz
Largeur de bande de vol (m)	1100 m	1790 m	1500 m	1580 m	1270 m
Recouvrement latéral (%)	52%	55%	78%	70%	80%
Angle de scan	60°	60°	60°	60°	60°
Diamètre de la tâche LIDAR	24 cm	29 cm	24 cm	25 cm	20 cm
Densité (pts/m²)	11 pts/m²	14 pts/m²	45 pts/m²	13.5 pts/m²	50 pts/m²
Résolution d'acquisition (cm)	9 cm	10 cm	4 cm	-	-
Contrôle de la précision	5 relevés : écarts < 10 cm	4 relevés : écarts < 10 cm		4 relevés : écarts < 10 cm	

Figure 8: Tableau des principales caractéristiques des divers levés LIDAR renseignées dans les rapports de mission.

La différence de qualité entre la campagne 2021 A et 2018 a fait l'objet d'un échange avec le prestataire, avec à l'appui plusieurs captures d'écran de zones où la densité de points paraissait insuffisante (Figure 9). Lors de la réception et de la validation des dernières données, la qualité correspondait davantage aux attentes et ont permis la réalisation des divers post-traitements par le service RTM.

Afin que les traitements puissent être réalisés, des pré-traitements par le prestataires sont nécessaires et doivent être clairement identifiés dans le cahier des charges de la commande. Un premier traitement consiste à la classification des points en fonction du type d'objet ayant reflété l'impulsion du laser. La classification est normée par l'ASPRS¹ et se matérialise par un code entre 0 et 18 inscrit dans les fichiers au format .las. Le cahier des charges doit lister les codes et leur correspondance. La classification des points permet notamment la réalisation de MNT qui ne tient pas compte des points classés en végétation par exemple.



1. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

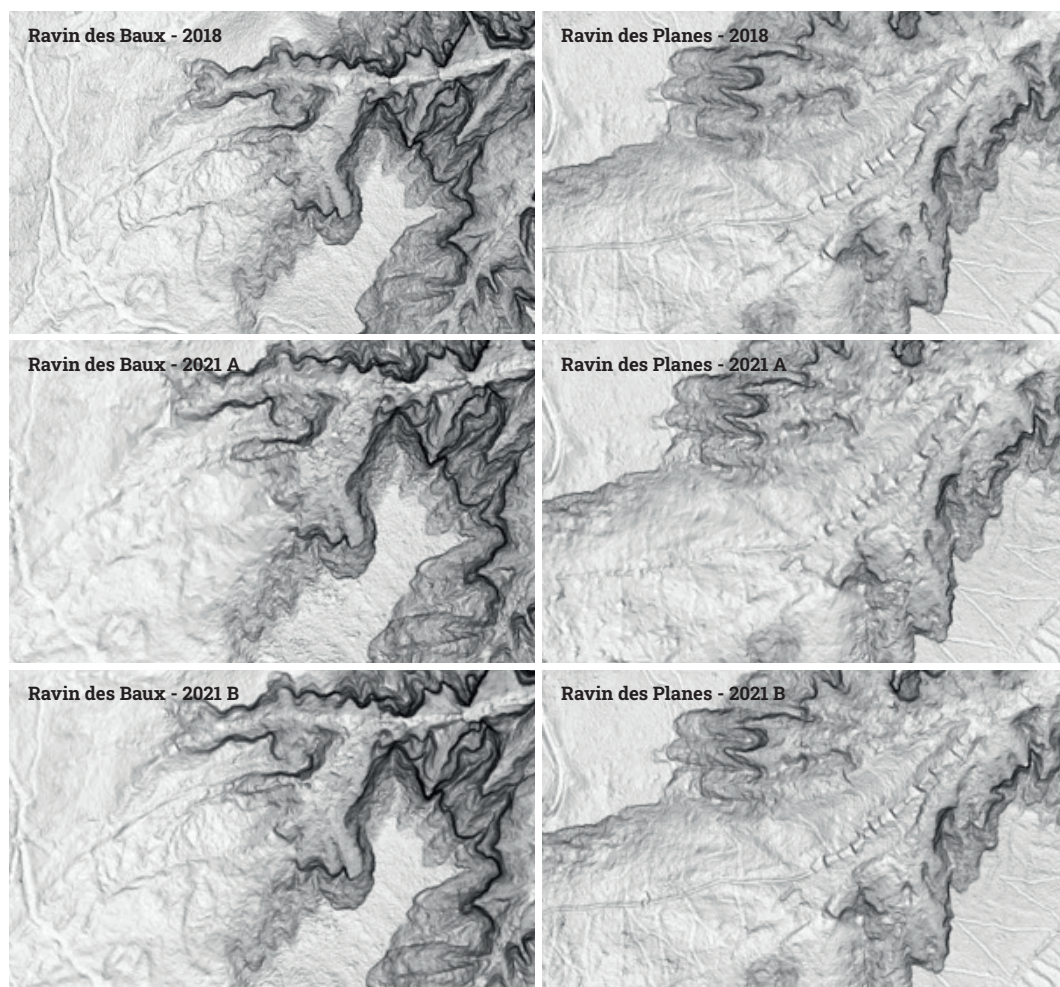


Figure 9: Exemples de zones de perte de qualité entre les divers vols.

Un second type de traitement consiste à la mise à disposition des données sous des formats et des précisions spécifiques. La majorité des livrables permettent une visualisation directe des données. On peut citer comme livrable un MNT au pas de 1m au format .asc, un MNT MKP à 10cm au format .xyz, un tableau d'assemblage des dalles 500m par 500m au format .shp, une orthophotographie au format .ecw, des photographies brutes au format .jpg. Une partie des autres livrables correspond aux données quasi-brutes, c'est-à-dire le nuage de points classifiés sur des dalles de 500m au format .las. Ces derniers fichiers permettront de reproduire des traitements et de générer de nouvelles données à des pas différents.

A la réception de l'ensemble des livrables, il est désormais possible de réaliser des traitements spécifiques pour alimenter la rédaction de l'étude. On pourra distinguer des traitements réalisés depuis des données issues d'un unique levé et des traitements basés sur la comparaison de données issues de deux levés. Les traitements réalisés sur un unique levé LIDAR peuvent avoir plusieurs vocations. La réalisation d'une carte d'exposition et de plusieurs ombrages vont

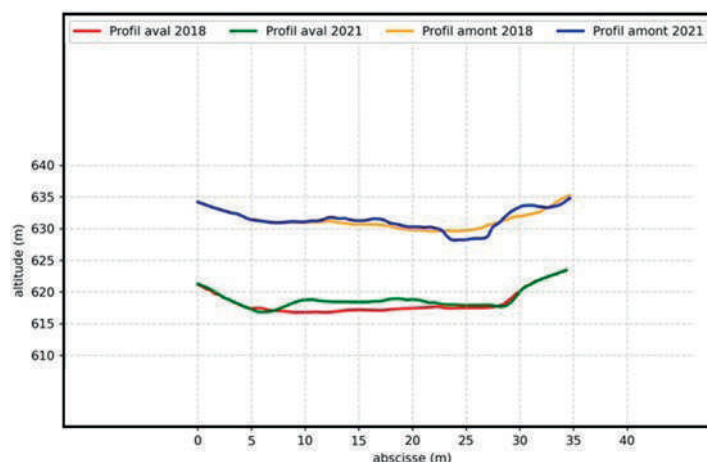


Figure 10: Exemples de comparaisons de profils en travers dans le ravin des Baux.

permettre de visualiser les terrains en place à diverses échelles. Cette mise en perspective sera complétée par l'appréhension de la topographie de manière plus fine par la réalisation de cartes de pentes en jouant sur les classes de valeur et en associant des isolignes à plusieurs espacements. Ces éléments pourront notamment servir de base dans la cartographie de la géomorphologie des terrains étudiés. Enfin des traitements relatifs aux profils en long et en travers des cours d'eau seront utiles tant dans la partie géomorphologique qu'hydraulique de l'étude.

Lorsque deux levés LIDAR sont disponibles sur un même secteur d'étude, d'autres traitements sont envisageables, notamment pour visualiser et quantifier l'évolution des terrains sur plusieurs plans. On pourra dans un premier temps faire des comparaisons visuelles depuis des orthophotographies et des ombrages réalisés aux deux dates. Les avant-après pourront mettre en évidence des zones de recul du haut de berge ou une niche d'arrachement d'un glissement de terrain. La quantification du phénomène d'érosion des sols et de l'accumulation des matériaux constitue un second axe de travail. Il sera possible de traiter les données à plusieurs échelles, du bassin versant à une zone très ciblée de quelques m², afin de quantifier les volumes d'érosion et d'accrétion (*Figure 11*). Ce type de traitement est d'autant plus intéressant à mener lorsque les terrains en place sont prédisposés à s'éroder à la suite d'événements pluvieux intenses. Dans le même sens et en complément, des comparaisons de profils en long et en travers aux divers pas de temps permettront de mettre en avant et de manière très localisée, les secteurs de recul de berges ou encore d'exhaussement du lit d'un torrent (*Figure 10*).

La réalisation de ces traitements nécessite en amont un pré-traitement des données, afin de pouvoir les comparer à divers pas de temps. En effet, la comparaison induit d'avoir des données « superposables », que ça soit au niveau de la localisation (coordonnées des points) que de l'échelle (résolution du pixel) et du format des fichiers.

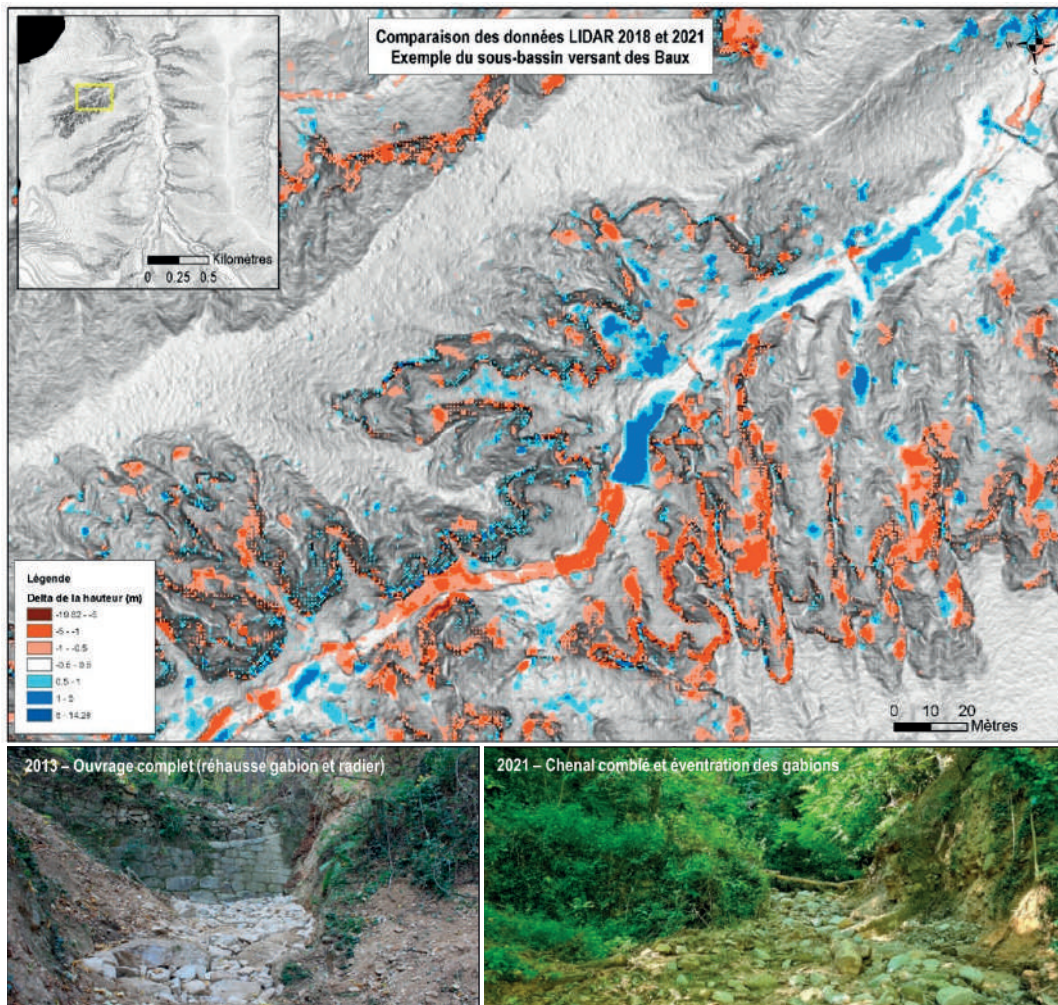
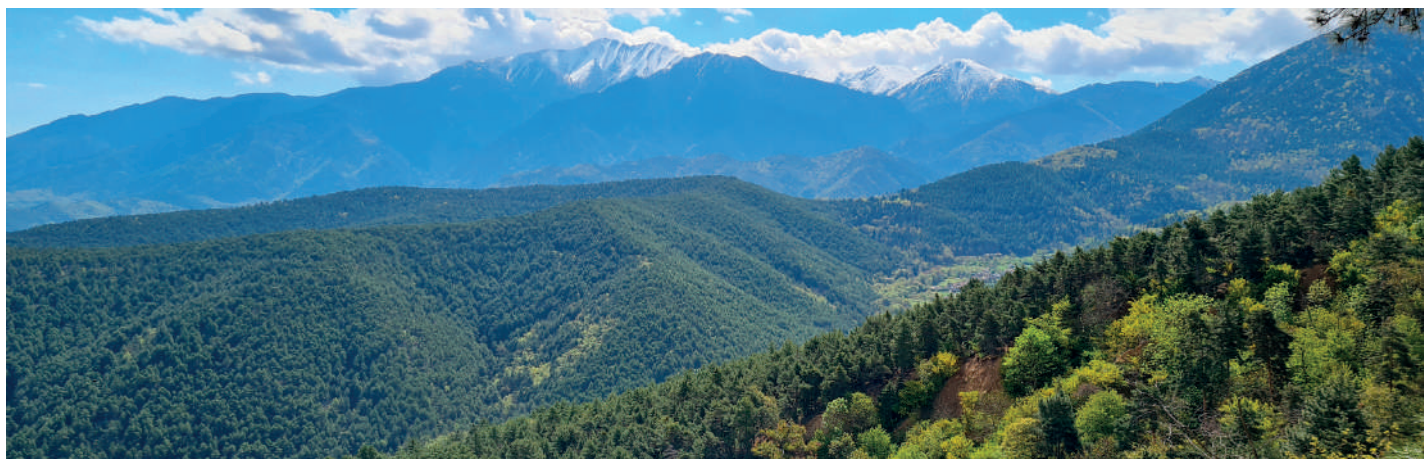


Figure 11: Comparaison des données LIDAR 2018-2021 et exemple de l'évolution de l'ouvrage B34 du ravin des Baux.





4. Résultats des analyses

Le traitement seul des données ne permet pas de mettre en perspective les résultats. Il est donc nécessaire de s'attacher à analyser les données obtenues et d'y porter un regard critique en fonction de la nature et des objectifs de l'étude lancée. C'est cette démarche qui sera développée ci-après, à la suite de la comparaison des données LIDAR de 2018 et 2021 à différentes résolutions.

L'ensemble des valeurs citées ci-après sont retranscrites dans les *Figures 12 et 13*. Un premier traitement a permis de comparer les données sur une maille de pixel à 0.50m, maille définie par expérience et sans fondement scientifique, avec pour objectif une estimation des volumes de matériaux érodés et accumulés par sous-bassins versants. Les résultats sont critiqués visuellement en ciblant plusieurs zones et en les confrontant avec la réalité du terrain, photographies à l'appui. L'analyse spatiale met en évidence de bonnes correspondances entre les principales zones d'érosion amont et les zones d'accumulation aval, d'autant que la plupart des ravins n'ont pas repris les matériaux faute de lit en crue. Toutefois en parallèle, on observe des pixels d'accumulation isolés, des zones d'érosion sans zones d'accumulation correspondantes et inversement. Des questions se posent également sur les lignes de crêtes verticales où l'érosion calculée dépasse localement la dizaine de mètre. Par ces premiers constats, le traitement sera reproduit sur une maille d'1m : l'objectif sera d'apprécier l'évolution des volumes totaux et par sous-bassins, ainsi que de répondre aux interrogations sur les zones de correspondances.

Le traitement à la maille 1m apporte une partie des réponses aux interrogations précédentes. On constate d'abord une baisse significative des volumes totaux alors que leur différence augmente fortement : de -20% (-7 232.62 m²) entre le volume érodé et le volume accumulé à la maille 0.50m à 54% (-15 580.58 m²) à la maille 1m. Dans un second temps, on observe des différences entre les ravines de part et d'autre de la Baillmarsane : les écarts entre les précisions 0.50m et 1m en rive gauche sont très variables, contrairement à la rive droite où les valeurs sont plus homogènes. Le phénomène des pixels isolés est anecdotique et les valeurs semblent davantage lissées, ce qui s'explique par l'agrandissement de la maille. La comparaison entre les deux traitements met en exergue l'intérêt de réaliser des traitements à plusieurs niveaux de précision pour valider ou in-valider des tendances issues de l'analyse spatiale et statistiques. Par conséquent, un travail similaire sur une maille plus fine, à 0.20m, est préparé.

La diminution de la maille à 0.20m engendre de facto l'augmentation significative de l'ensemble des volumes. Au regard des précédents traitements, la maille à 0.50m propose la balance totale la plus équilibrée. A l'inverse à l'échelle des sous-bassins, la pluralité des tendances reflète bien la personnalité propre de chaque ravin soulignée précédemment : certains s'équilibrent, d'autres voient leur volumes d'accrétion exploser. En parallèle, le phénomène des pixels d'accumulation isolés déjà observable à la maille 0.50m est ici largement dominant, majoritairement dans les versants des ravines en rive gauche et dans une moindre mesure en rive droite. Le ravin du Clot de Lliby, sous-bassin versant le plus anthropisé avec l'ancienne mine d'Escaro est l'exemple le plus significatif. Le traitement à la maille 0.20m met tout de même en avant une singularité : en partant de la maille 1m à 0.20m, les volumes d'érosion par sous-bassin augmentent en s'affinant, alors que les volumes d'accumulation augmentent de manière exponentielle. Il semble donc que le traitement donne une réponse différente sur le phénomène d'érosion que sur le phénomène d'accumulation. Jusqu'ici, la marge d'erreur appliquée en correspondance avec la maille du traitement, c'est-à-dire $-0.5\text{m}/+0.5\text{m}$ pour une maille à 0.5m, n'était pas prise en compte dans les calculs et donc considérée comme nulle. Désormais, ce curseur pourra être modifié pour extraire en partie les pixels isolés sans impacter les volumes d'érosion qui ont une certaine cohérence.

Les résultats qui suivent sont donc des déclinaisons du traitement de la maille 0.20m, avec modification de la valeur positive du curseur de la marge d'erreur. La première déclinaison est donc une maille à 0.20m avec une marge de $-0.2\text{m}/+0.5\text{m}$. Le volume d'accumulation est dès lors réduit significativement passant de $100\,546.39\text{m}^2$ à $29\,091.97\text{m}^2$. La comparaison des volumes d'érosion et d'accumulation par sous-bassins versants indique que la marge positive à $+0.5\text{m}$ est globalement trop sélective. Le curseur sera donc réduit à $+0.4\text{m}$ au prochain traitement.

Avec une maille à 0.20m et une marge de $-0.2\text{m}/+0.4\text{m}$, le volume total d'accumulation s'affine. Il en va de même à l'échelle des sous-bassins versants. On observe que les volumes des différents ravins en rive gauche tendent à s'équilibrer également, voire totalement. En rive droite, l'équilibre des volumes s'engage mais reste à cette étape moins significatif. On pourra donc faire un dernier traitement en réduisant le curseur à $+0.3\text{m}$.

Cette dernière manipulation avec une maille à 0.20m et une marge de $-0.2\text{m}/+0.3\text{m}$ permet d'obtenir l'équilibre total le plus intéressant avec seulement $4\,611\text{m}^2$ entre les volumes d'érosion et d'accrétion à l'échelle de la Baillmarsane. En revanche pour les ravins en rive droite et après comparaisons avec les valeurs précédentes, il semble que la variation du curseur ne constitue pas un levier de réponse : les ravins trouvent leur équilibre aux mailles d'1m ou de 0.20m. En complément et malgré une amélioration nette et constante concernant les pixels d'accumulation isolés, un certain nombre reste encore présent dans les versants. Ces éléments de par leur isolement, constituent des biais dans les statistiques des volumes d'accumulation, en particulier en rive gauche. Un dernier traitement est donc testé en partant de la cartographie géomorphologique des sous-bassins versants : les zones dites actives (en érosion, accumulation,

glissement et torrentiel) seront fusionnées et associées à une zone tampon de 5m pour inclure d'éventuels hauts de versants oubliés et pourvoyeurs de matériaux.

Le détournage à la maille 0.20m des sous-bassins versants aux uniques zones actives ne donne pas de résultats significatifs. Alors que les valeurs de différence tendent à diminuer, elles restent tout de même moins intéressantes en termes d'équilibre que les traitements précédents. Au regard de l'ensemble de ces traitements, on constate aisément qu'il n'y a pas de traitement unique et homogène pour obtenir la bonne correspondance entre l'érosion et l'accumulation. Par ailleurs, chaque traitement comporte un certain nombre de biais, auxquels s'ajoutent ceux de l'acquisition, des pré- et post-traitements et des analyses spatiales et statistiques des données.

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - MAILLE 1m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	28910.11	13329.53	-15580.58 -54%
	Source	1934.42	747.77	-1186.65 -61%
	Baux	11940.00	4933.34	-7006.66 -59%
	Sols des Pierres	2266.53	1324.36	-942.17 -42%
	Baux des Planes	4727.01	2625.54	-2101.47 -44%
	Clot de Libby	4913.71	2361.05	-2552.66 -52%
	RIVE DROITE	Campreste	213.05	265.92
Mangré		1162.40	284.29	-878.11 -74%
Coma del Mas		662.05	229.27	-432.78 -65%
Coste		552.50	205.45	-347.05 -63%
Fourche		415.90	254.10	-161.80 -39%
Vignes		182.54	98.44	-84.10 -46%

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - MAILLE 0.50m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	36636.77	29404.15	-7232.62 -20%
	Source	2445.68	2113.76	-331.92 -14%
	Baux	16039.30	6718.65	-9320.65 -58%
	Sols des Pierres	2857.33	2964.20	106.88 4%
	Baux des Planes	5510.55	7123.25	1612.70 29%
	Clot de Libby	4371.80	8895.80	4524.00 103%
	RIVE DROITE	Campreste	541.05	309.96
Mangré		1366.20	399.96	-966.22 -71%
Coma del Mas		1570.83	348.51	-1222.32 -78%
Coste		985.93	210.95	-774.99 -79%
Fourche		887.65	200.30	-687.35 -77%
Vignes		260.46	120.81	-139.65 -54%

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - Maille 0.20 m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	51333.08	100546.39	49213.31 96%
	Source	3540.63	5516.56	1977.93 56%
	Baux	19883.40	14341.80	-5541.60 -28%
	Sols des Pierres	3734.75	8536.66	4801.91 129%
	Baux des Planes	7734.28	18123.92	10389.64 134%
	Clot de Libby	8263.16	45268.40	37005.24 448%
	RIVE DROITE	Campreste	1018.55	1877.68
Mangré		2008.08	1670.36	-337.72 -17%
Coma del Mas		2058.29	1235.24	-823.04 -40%
Coste		1484.86	1306.32	-178.54 -12%
Fourche		1073.74	1388.02	312.28 29%
Vignes		533.34	1281.52	748.18 140%

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - MAILLE 0.20 m -0.2/+0.5m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	51333.08	29091.97	-22241.11 -43%
	Source	3540.63	1981.17	-1559.46 -44%
	Baux	19883.40	6737.44	-13145.96 -66%
	Sols des Pierres	3734.75	2891.38	-843.38 -23%
	Baux des Planes	7734.28	6875.76	-858.52 -11%
	Clot de Libby	8263.16	8921.24	658.08 8%
	RIVE DROITE	Campreste	1018.55	345.71
Mangré		2008.08	397.42	-1610.66 -80%
Coma del Mas		2058.29	361.95	-1696.34 -82%
Coste		1484.86	225.17	-1259.69 -85%
Fourche		1073.74	228.40	-845.35 -78%
Vignes		533.34	126.31	-407.03 -76%

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - MAILLE 0.20 m -0.2/+0.3m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	51333.08	55944.78	4611.70 9%
	Source	3540.63	3577.66	37.03 1%
	Baux	19883.40	10419.32	-9464.08 -48%
	Sols des Pierres	3734.75	5088.72	1353.97 37%
	Baux des Planes	7734.28	11890.20	4155.92 54%
	Clot de Libby	8263.16	21013.44	12750.28 154%
	RIVE DROITE	Campreste	1018.55	832.40
Mangré		2008.1	819.55	-1188.55 -59%
Coma del Mas		2058.29	753.47	-1304.82 -63%
Coste		1484.86	550.86	-934.00 -63%
Fourche		1073.74	605.52	-468.22 -44%
Vignes		533.34	383.64	-149.70 -28%

ESTIMATION DES VOLUMES ERODES ET ACCUMULES - MAILLE 0.20 m -0.2/+0.4m				
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE
RIVE GAUCHE	Total (m3)	51333.08	38898.28	-12434.80 -24%
	Source	3540.63	2633.51	-907.12 -26%
	Baux	19883.40	8320.08	-11563.32 -58%
	Sols des Pierres	3734.75	3723.23	-11.52 0%
	Baux des Planes	7734.28	8929.36	1195.08 16%
	Clot de Libby	8263.16	12618.60	4355.44 53%
	RIVE DROITE	Campreste	1018.55	512.32
Mangré		2008.1	548.07	-1460.01 -73%
Coma del Mas		2058.29	517.87	-1540.42 -75%
Coste		1484.86	332.31	-1152.54 -78%
Fourche		1073.74	360.57	-713.18 -66%
Vignes		533.34	202.65	-330.70 -62%

Figure 12: Tableaux des estimations des volumes érodés et accumulés aux diverses mailles.

RESULTATS PROBANTS DES DIVERS TRAITEMENTS						
	NOM	VOL. EROSION	VOL. ACCUMULATION	DIFFERENCE		TRAITEMENT
RIVE GAUCHE	Total (m3)	51333.08	55944.78	4611.70	9%	Maille 0.20m -0.2m/+0.3m
	Source	3540.63	3577.66	37.03	1%	Maille 0.20m -0.2m/+0.3m
	Baux	19883.40	14341.80	-5541.60	-28%	Maille 0.20m
	Sols des Pierres	3734.75	3723.23	-11.52	0%	Maille 0.20m -0.2m/+0.4m
	Baux des Planes	7734.28	6875.76	-858.52	-11%	Maille 0.20m -0.2m/+0.5m
	Clot de Libby	8263.16	8921.24	658.08	8%	Maille 0.20m -0.2m/+0.5m
RIVE DROITE	Campreste	213.05	265.92	52.87	25%	Maille 1m
	Mangré	2008.08	1670.36	-337.72	-17%	Maille 0.20m
	Coma del Mas	662.05	229.27	-432.78	-65%	Maille 1m
	Coste	1484.86	1306.32	-178.54	-12%	Maille 0.20m
	Fourche	415.90	254.10	-161.80	-39%	Maille 1m
	Vignes	182.54	98.44	-84.10	-46%	Maille 1m

Figure 13: Tableau des résultats probants des divers traitements.



5. Limites de l'utilisation des données LIDAR

De l'acquisition des données jusqu'à leur valorisation, il existe de nombreux biais dont il faut tenir compte lors de l'utilisation et des analyses. De nombreux paramètres rentrent en compte dans ces diverses phases. Ces paramètres sont associés à des biais, c'est-à-dire des limites critiquables qui peuvent remettre en question la pertinence de l'utilisation des données et leur analyse.

Lors de la phase d'acquisition des données, les biais sont liés à la commande, aux techniques et outils mobilisés ainsi qu'aux conditions d'acquisition. Il est par exemple intéressant d'impliquer le même prestataire dans l'acquisition à diverses dates pour obtenir les données les plus homogènes. Il sera davantage en mesure de remobiliser le même matériel et d'appliquer les mêmes paramétrages d'une acquisition à une autre. Le recul du service RTM depuis les derniers levés, a permis d'adapter le cahier des charges utilisé afin de mieux prendre en compte la ou les précédente(s) acquisition(s) LIDAR et de définir le 1^{er} levé comme référentiel. Enfin, des biais indépendants du prestataire jouent un rôle important et ne sont pas à négliger : la période d'acquisition (la saison voire le mois) et les conditions de vol (visibilité, vent). A titre d'exemple, nous avons pu constater l'impact du couvert végétal entre trois acquisitions : la période d'avril 2018 correspondait à une période de repos végétatif où les feuilles et la végétation arbustive étaient peu développées, permettant d'obtenir une quantité suffisante de points sols ; en juin 2021, la végétation était en pleine explosion rendant difficile la pénétration des laser et de fait la modélisation du terrain, incertaine voire incomplète par endroit ; en novembre 2021, la végétation redevenait moins dense, à l'instar d'avril 2018. En complément, même si les conditions sont optimales et les outils identiques, la reproduction du réel sur un modèle ne peut être totalement conforme. La marge d'erreur qui se crée dès la phase d'acquisition sera par ailleurs complétée par d'autres marges d'erreur ultérieures. Il est donc nécessaire d'en avoir conscience et de les considérer jusqu'au terme de l'étude.

La phase de traitement qui inclue autant les pré-traitements réalisés par le prestataire que les post-traitements par les rédacteurs de l'étude engendre également un certain nombre de biais. Au sein des pré-traitements, les principaux biais sont issus des algorithmes lors de la

classification des points. Les erreurs de classification peuvent générer des décalages notables lors de la modélisation du terrain : la classification en point sol de la végétation et inversement, modifieront localement la topographie représentant le réel. Nous en avons pu faire l'expérience sur un secteur à proximité d'une habitation. Entre 2018 et 2021, une zone a été dégagée de toute végétation arbustive. En avril 2018, les points obtenus ont été classés en sol alors qu'il s'agissait d'une végétation arbustive dense impénétrable par les rayons ; en 2021 la végétation ayant été retirée, les points obtenus ont été classifiés sol. Lors de la comparaison des données LIDAR, une zone d'érosion sur l'emprise de la végétation de 2018 est apparue : c'est un artéfact puisqu'il ne s'agit pas d'une érosion de matériaux mais d'une « érosion de végétaux » du fait d'une erreur de classification des points d'origine. Ce décalage est également visible selon l'exposition de certaines ravines : on a pu constater localement de l'accumulation sur les berges exposées Nord où la présence de la végétation est nettement supérieure que sur les berges exposées Sud. Il est donc possible que le levé de novembre 2021 ait été perturbé par cette végétation encore trop présente par rapport au levé de 2018.

Enfin, des biais peuvent être associés à la précision utilisée par exemple lors des comparaisons des données LIDAR. Le travail de comparaison précédemment développé et réalisé à plusieurs précisions (1m, 0.5m et 0.2m) donne des résultats très variables d'une précision à l'autre, mais aussi d'une rive à l'autre. Ce décalage notable est le reflet de plusieurs facteurs : le degré de dégradation d'un ravin face à l'événement GLORIA, la persistance de la végétation, l'exposition des berges, la proportion de berges très raides, la part de terrain anthropisé qui peut modifier localement la topographie. Le travail à plusieurs précisions et échelles semblent donc nécessaire pour définir les corrélations cause-effet les plus cohérentes.

Une dernière catégorie de biais fait référence aux analyses spatiales et statistiques. Les données produites doivent être analysées en fonction des interrogations et à une échelle adaptée aux phénomènes. C'est ce qui a été mis en pratique après le traitement à la maille 0.2m : la rive gauche de la Baillmarsane était fortement impactée par les pixels d'accumulation isolés qui augmentaient significativement les volumes. Des traitements spécifiques ont été appliqués, comme la variation du curseur de la marge d'erreur ou en se focalisant uniquement sur les zones dites actives renseignées depuis la géomorphologie, afin d'atteindre un éventuel équilibre entre les volumes d'érosion et d'accumulation. On a pu également voir que ce travail ne donnait pas de réponse significative pour les ravins en rive droite de la Baillmarsane qui semblent peu impactés par l'événement GLORIA.

Il est donc nécessaire de porter un œil critique aux diverses analyses qui reflètent des tendances divergentes, d'autant que l'interprétation des données notamment statistiques reste subjective.

