



RAPPORT DE SERVICE CIVIL

Suivi topographique et caractérisation des événements torrentiels du dépotoir du Pétérey à Zinal (2019-2025)

Thomas Jordan

Avec la collaboration de Bob de Graffenried

12 février 2026

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Bob de Graffenried pour son encadrement, sa disponibilité et son expertise tout au long de ce projet. Ses conseils avisés et sa patience lors des phases d'apprentissage des différents outils ont été déterminants pour la réussite de ce travail. Je remercie également l'ensemble de l'équipe du Laboratoire d'Hydraulique Environnementale pour leur accueil chaleureux et pour m'avoir offert l'opportunité de contribuer à un projet de recherche aussi intéressant et concret.

Table des matières

1. Introduction	6
2. Logiciels utilisés	10
2.1 GCD : Geomorphic Change Detection Software.....	10
2.2 PIX4D	10
2.3 QGIS.....	11
2.4 GALET.....	11
3. Mise en ordre des données récoltées au dépotoir	14
3.1 Correction de la mesure du 08.08.2019.....	14
3.2 Correction du problème de la différence entre les DSM du 14.07.2022 et du 11.08.2022.....	16
3.3 Masques	19
3.4 Génération des résultats.....	20
4. Bilans sédimentaires	22
4.1 Evolution du dépotoir entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022.....	22
4.2 Evolution du dépotoir entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023.....	25
4.3 Evolution du dépotoir entre le 23.06.2023 et 20.08.2024	28
4.4 Evolution du dépotoir entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025.....	31
4.5 Evolution du dépotoir entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025.....	33
4.6 Bilan sédimentaire sur le total de la période étudiée	36
5. Analyses granulométriques	38
6. Conclusion.....	47
7. Bibliographie	49
8. Annexes	50
Annexe B : Tâche annexe	50

Table des figures

Figure 1 : torrent de Pétérey	7
Figure 2 : Profil du torrent de Pétérey	8
Figure 3 : Marquage manuel, saisie et numérisation des GCP	10
Figure 4 : fonctionnement de GALET	12
Figure 5 : incertitude de la sélection d'entités sur GALET	13
Figure 6 : décalage d'une photo par rapport aux autres	14
Figure 7 : points références pour les nouveaux GCP	15
Figure 8 : différences de hauteurs entre les modèles de juillet et d'août 2022	16
Figure 9 : résultat après un nouveau processing avec le Geometrically Verified Matching.....	17
Figure 10 : résultat après l'ajout de GCP supplémentaires	18
Figure 11 : Structure du dépotoir.....	21
Figure 12 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022	23
Figure 13 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023	26
Figure 14 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024	29
Figure 15 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025	32
Figure 16 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025	34
Figure 17 : exemple de situation et de profil d'une coupe	38
Figure 18 : exemple de placette	39
Figure 19 : Emplacements des deux tranchées	40
Figure 20 : résultats de la V2 de GALET sur les trois échantillons de la zone 1	41
Figure 21 : résultats de la V2 de GALET sur les deux échantillons de la zone 2	42

Figure 22 : zoom sur l'échantillon 1 de la zone 1	43
Figure 23 : zoom important sur l'échantillon 1 de la zone 1	43
Figure 24 : courbes de distribution granulométrique cumulée des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans la zone 1 du dépotoir du Pétérey	46
Figure 25 : courbes de distribution granulométrique cumulée des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans la zone 2 du dépotoir du Pétérey	46

Table des tableaux

Tableau 1 : variations du volume dans le dépotoir entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022	23
Tableau 2 : variations du volume dans le dépotoir entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023	26
Tableau 3 : variations du volume dans le dépotoir entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024	29
Tableau 4 : variations du volume dans le dépotoir entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025	32
Tableau 5 : variations du volume dans le dépotoir entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025	34
Tableau 6 : Bilan des variations volumétriques du dépotoir du torrent du Pétérey entre les différentes campagnes de relevé. Les volumes présentés correspondent aux résultats calculés après application d'un seuil de 0,05 m.....	36
Tableau 7 : résultats des paramètres granulométriques D16, D50 et D84 (bruts) par zone et par échantillon en mm	44

1. Introduction

Au cours de mon service civil au Laboratoire d'Hydraulique Environnementale (LHE), j'ai collaboré avec Bob de Graffenried sur un projet de recherche portant sur le dépotoir du torrent du Pétérey à Zinal (VS). Ce projet s'inscrit dans un contexte de surveillance et d'analyse des phénomènes torrentiels affectant cette région alpine particulièrement vulnérable.

Depuis 2019, le LHE assure un suivi topographique systématique du dépotoir, générant une base de données composée de modèles numériques de surface (DSM) géoréférencés et d'orthophotos. Mon travail s'est articulé autour de deux axes principaux : d'une part, l'analyse approfondie des données existantes visant à caractériser les événements survenus depuis le début du monitoring, et d'autre part, la réalisation de nouveaux relevés terrain. Cette caractérisation englobe plusieurs paramètres essentiels tels que les volumes déposés, la distribution des matériaux et leur granulométrie. Au fil de mon affectation, des missions complémentaires sont venues enrichir le projet initial, permettant ainsi une diversification de mes activités, qui seront toutes détaillées dans ce rapport.

Le contexte géologique et climatique de la vallée justifie pleinement l'importance de ce suivi. En 2017, un ouvrage de protection majeur a été construit dans le cadre du projet de sécurisation du torrent du Pétérey. Ce dépotoir, équipé d'une grille d'acier capable de retenir les plus gros blocs, peut accueillir jusqu'à 60'000 m³ de matériaux (Le chantier des changements climatiques - Le Temps 2017). Cette infrastructure constitue une réponse directe à la situation préoccupante du glacier Bonnard, qui surplombe le village de Zinal. Ce glacier, entièrement recouvert de débris rocheux au fil du temps, présente aujourd'hui un risque élevé de libération de matériaux. L'accélération des mouvements glaciaires, conséquence directe du réchauffement climatique, a intensifié ces dernières années la mobilisation des matériaux, particulièrement lors de la fonte des neiges et des épisodes pluvieux intenses.



Figure 1 : torrent de Pétérey

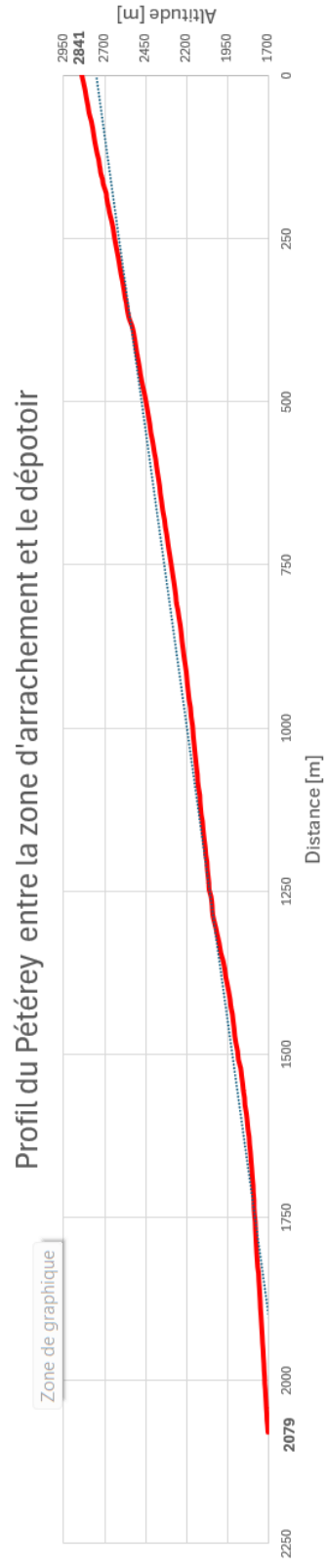


Figure 2 : Profil du torrent de Pétérey

Les changements climatiques amplifient effectivement la fréquence et l'intensité des événements liés à la dégradation des glaciers rocheux et du permafrost. Les observations historiques et les analyses dendrochronologiques effectuées sur les arbres de la zone révèlent qu'une vingtaine de laves torrentielles ont été recensées depuis 1862, dont la moitié s'est produite depuis le début du XXI^e siècle seulement. Cette accélération témoigne de l'évolution rapide des conditions environnementales : en juillet 2006, 8'000 m³ de matériaux se sont déversés dans le lit du Pétérey, tandis qu'en 2013, trois laves torrentielles se sont succédé en l'espace de deux mois (Le chantier des changements climatiques - Le Temps 2017). Ces événements illustrent l'urgence et la pertinence du monitoring continu mis en place par le LHE, auquel ce projet a contribué.

2. Logiciels utilisés

2.1 GCD : Geomorphic Change Detection Software

GCD (Geomorphic Change Detection) permet de calculer les différences topographiques entre deux DSM et d'en extraire des variations volumétriques et surfaciques. Les données d'entrée comprennent deux DSM de périodes distinctes, un masque délimitant la zone d'intérêt, et un seuil de détection minimal (en mètres) qui filtre les variations non significatives. Le fait d'ajouter un seuil va permettre de créer deux résultats distincts : un comprenant les variations inférieures à ce seuil et un comprenant toutes les variations.

2.2 PIX4D

PIX4D mapper est un logiciel de photogrammétrie 3D permettant de transformer des images aériennes en modèles numériques de surface précis. Dans le cadre de ce projet, nous l'avons utilisé pour générer des nuages de points 3D à partir des acquisitions par drone. La qualité et la précision du modèle final reposent sur le placement de Ground Control Points (GCP) au sol, dont les coordonnées doivent être relevées avec la plus grande précision possible. Une précision centimétrique (incertitude d'environ $\pm 0,02$ m) est nécessaire pour garantir que ces points de référence permettent un géoréférencement rigoureux du nuage de points généré.



Figure 3 : Marquage manuel, saisie et numérisation des GCP

Il est important de noter que les GCP peuvent apparaître en dehors du nuage de points final s'ils ne sont pas inclus dans le masque de traitement défini. Cette situation est normale et ne signifie pas que ces points de contrôle sont inutiles : ils servent au géoréférencement global du modèle, même s'ils se situent en périphérie de la zone d'intérêt stricte.

2.3 QGIS

QGIS est un logiciel de système d'information géographique open-source utilisé dans ce projet pour deux applications principales. Premièrement, il permet de superposer et comparer les orthophotos de la zone d'étude à différentes périodes, facilitant ainsi l'identification d'anomalies géométriques ou de décalages. C'est notamment grâce à cette méthode que le décalage spatial de l'orthophoto du 8 août 2019 a pu être détecté par rapport aux autres acquisitions. La superposition des orthophotos s'avère également précieuse pour identifier les modifications géomorphologiques susceptibles d'indiquer le passage d'une lave torrentielle.

Secondement, QGIS est employé pour la définition des masques délimitant les zones d'intérêt. Ces masques permettent de définir avec précision les aires à inclure dans les calculs volumétriques réalisés ultérieurement dans GCD, garantissant ainsi que seules les zones pertinentes sont prises en compte dans les analyses de variations topographiques.

2.4 GALET

GALET est un logiciel basé sur un modèle de segmentation d'images par apprentissage profond, spécifiquement conçu pour l'analyse granulométrique de bancs de graviers à partir d'images aériennes acquises par drone et qui existe également sous forme d'un plugin QGIS. L'algorithme combine deux architectures de réseaux de neurones complémentaires : Faster R-CNN, qui assure la détection et la localisation des objets (les galets), et Feature Pyramid Network (FCN), qui procède à la classification des pixels pour délimiter précisément les contours de chaque particule. Une fois entraîné, ce modèle peut être directement implémenté dans QGIS, permettant ainsi de vectoriser automatiquement les instances détectées.

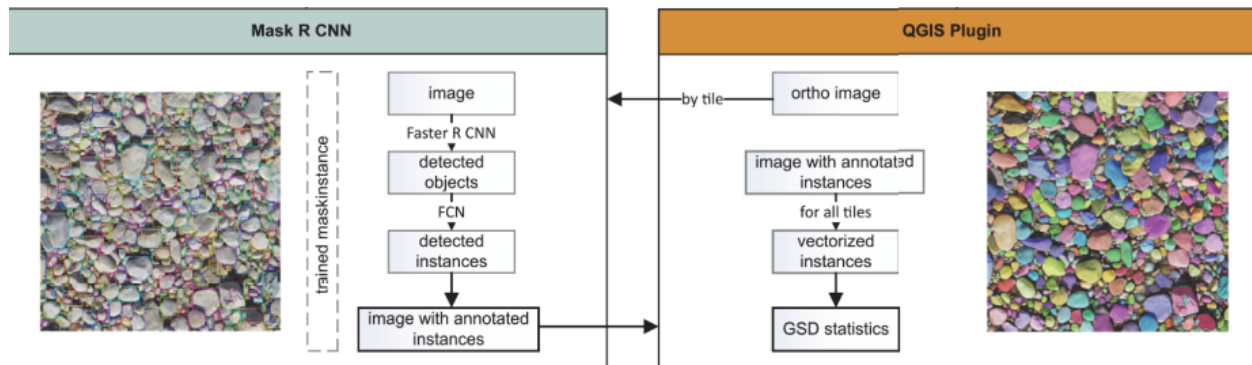


Figure 4 : fonctionnement de GALET

L'analyse des galets individuels révèle que GALET tend à surestimer légèrement les dimensions des grains, avec une erreur absolue relative moyenne de l'ordre de 29% (Mörthl et al. 2022). Cette tendance systématique doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats granulométriques, bien que la méthode demeure particulièrement efficace pour caractériser rapidement de grandes surfaces et identifier les distributions granulométriques des dépôts torrentiels.

2.4.1 Installation

Les consignes d'installation sont rassemblées sur une page Github. Premièrement, il faut télécharger tous les fichiers nécessaires et y ajouter un dossier pour accueillir le masque RCNN qui permettra de détecter tous les éléments à détourner. Ensuite, nous exécutons plusieurs lignes de code dans le terminal afin de créer deux environnements virtuels, `galet_server` pour faire les calculs et `galet_qgis` pour lancer QGIS avec l'extension activée. Ces deux environnements doivent être ouverts à nouveau avant d'ouvrir QGIS si l'on veut utiliser GALET.

2.4.2 Utilisation

Avant d'obtenir nos résultats des analyses granulométriques du dépotoir à l'aide de la deuxième version de GALET, nous avons effectué quelques tests de performance avec la première version du logiciel.

Les images du dépotoir du Pétérey ont été prises à une hauteur de vol trop importante pour avoir une précision d'image suffisante pour GALET V1. Nous avons donc utilisé les images de la Navisence prises à 10 m de hauteur, le temps de retourner faire des images plus précises du dépotoir et du Pétérey. Vu que notre donnée en entrée est une

orthomosaïque géoréférencée, c'est le script GALET_georef qui doit être utilisé. Grâce au masque R CNN et au plugin QGIS, nous parvenons à obtenir des résultats.

Cependant, malgré la très bonne résolution de notre image, GALET peine à repérer correctement tout les grains. Cela peut être expliqué par une résolution insuffisamment grande mais également par les ombres créées par le soleil. On observe bien sur l'image ci-dessous que les ombrages sur le bloc central empêche GALET de le détecter correctement. De plus, dans le coin gauche supérieur on observe que les petits éléments sont à l'ombre et qu'aucun d'entre eux n'a été détecté.



Figure 5 : incertitude de la sélection d'entités sur GALET

3. Mise en ordre des données récoltées au dépotoir

3.1 Correction de la mesure du 08.08.2019

Dans le cadre de la préparation des données en vue des calculs de volumes par comparaison de modèles numériques de surface (GCD), il est nécessaire de garantir l'homogénéité du système de référence spatial de l'ensemble des images afin d'assurer leur superposition optimale. Toutes les acquisitions disponibles satisfont à cette condition, à l'exception de celle du 08.08.2019 qui, malgré une correction de son système de référence, présente un décalage horizontal significatif par rapport aux autres jeux de données, de l'ordre de 8,74 m (figure 6).

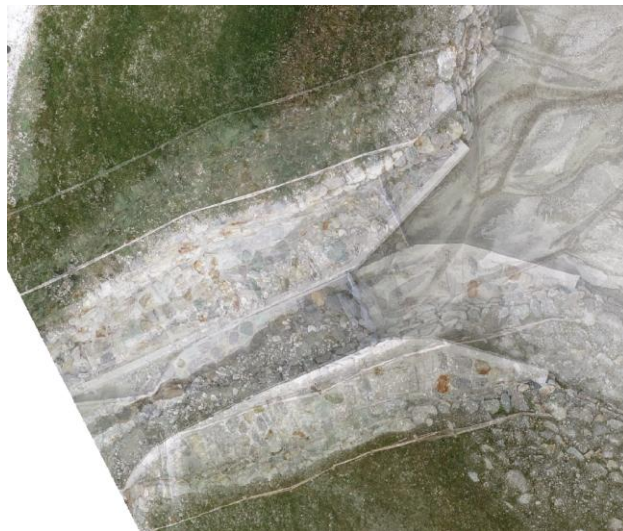


Figure 6 : décalage d'une photo par rapport aux autres

Ce décalage résulte de la procédure de génération du nuage de points sous PIX4D à partir des images acquises par drone, réalisée sans points de contrôle au sol (GCP). En l'absence de tels points de référence, le géoréférencement repose uniquement sur les informations de positionnement embarquées dans les images. Bien que ces coordonnées permettent d'obtenir un nuage de points cohérent d'un point de vue relatif, elles restent entachées d'une incertitude absolue pouvant atteindre plusieurs mètres.

Le modèle du 08.08.2019 présente ainsi un décalage global imputable à l'absence de GCP lors de son traitement initial. Afin de corriger ce biais, des coordonnées de points stables ont été extraites d'un projet PIX4D antérieur, dont le géoréférencement était jugé

fiable. Les éléments situés au centre du dépotoir, susceptibles d'avoir été déplacés entre les deux dates d'acquisition, ont été évités. Cinq points fixes ont ainsi été sélectionnés et leurs coordonnées relevées, puis utilisés pour définir de nouveaux GCP dans le projet du 08.08.2019, permettant de réaligner correctement ce modèle avec les autres relevés.



Figure 7 : points références pour les nouveaux GCP

3.2 Correction du problème de la différence entre les DSM du 14.07.2022 et du 11.08.2022

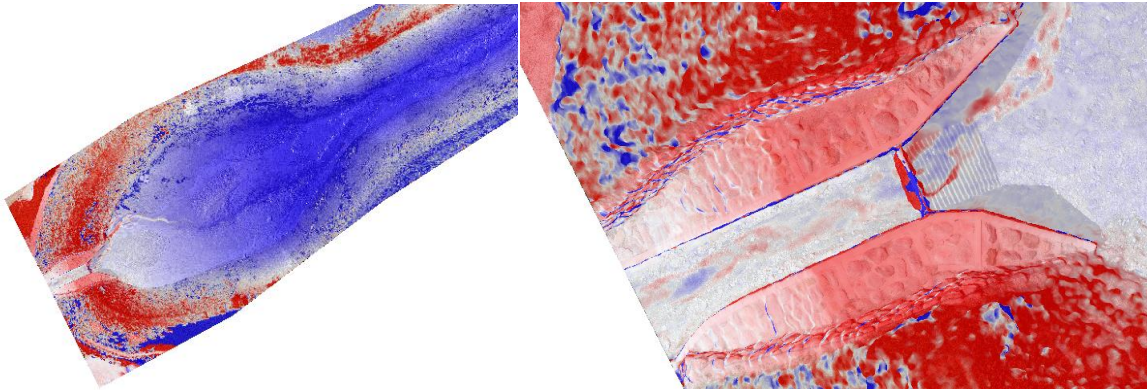


Figure 8 : différences de hauteurs entre les modèles de juillet et d'août 2022

La comparaison des modèles numériques de surface (DSM) du 14.07.2022 et du 11.08.2022 met en évidence des différences de hauteur significatives du terrain entre les deux dates (figure 8). Ces écarts se traduisent par des zones apparentes de dépôt (en bleu) et d'érosion (en rouge). Les anomalies les plus marquées se situent principalement dans le lit du torrent et au niveau de la structure en béton à son exutoire, zones dont l'évolution géomorphologique réelle sur cet intervalle temporel est supposée négligeable.

Un premier essai de correction a consisté à relancer le traitement photogrammétrique en conservant les mêmes points de contrôle au sol (GCP) mais en appliquant l'option de correspondance Geometrically Verified Matching. Cette approche a permis de réduire d'environ moitié les écarts précédemment observés ; toutefois, des différences résiduelles subsistaient localement. En particulier, la structure en béton continuait de présenter des variations altimétriques non réalistes, incompatibles avec son caractère stable dans le temps (figure 9).

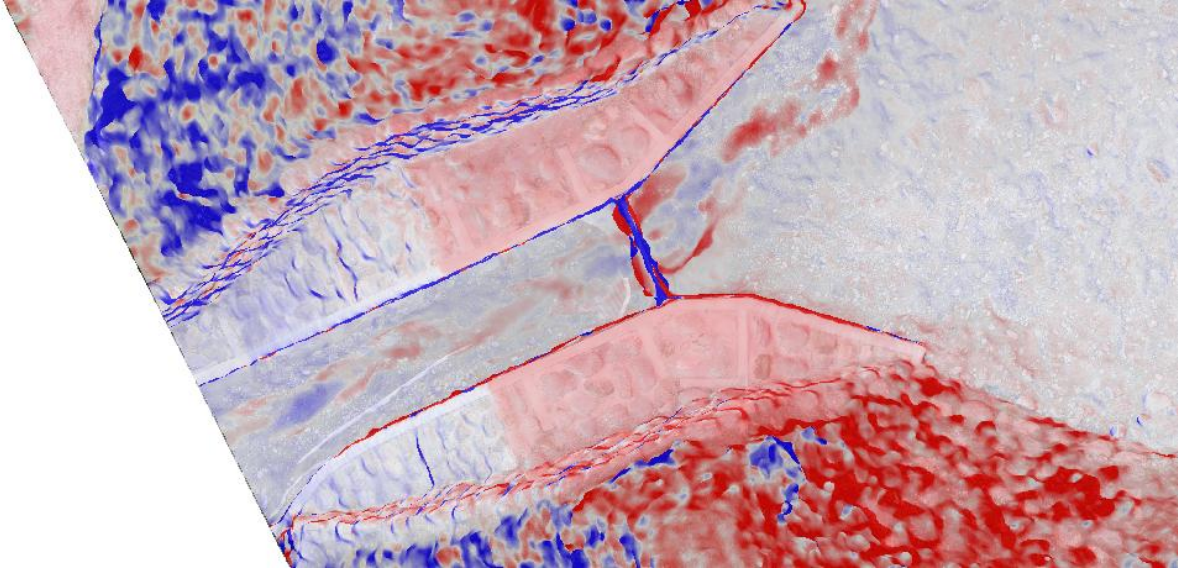


Figure 9 : résultat après un nouveau processing avec le Geometrically Verified Matching

Ces incohérences sont attribuées principalement au nombre insuffisant de GCP initialement utilisés dans le lit et sur les bords du dépotoir. Afin d'améliorer la qualité du géoréférencement, la même méthode de correspondance a été réappliquée après densification du réseau de points de contrôle. Cinq GCP supplémentaires ont été introduits : trois localisés dans le lit et le dépotoir, et deux sur la structure en béton. Cette augmentation du contrôle spatial a permis de réduire significativement les écarts altimétriques et d'obtenir une cohérence géométrique satisfaisante entre les deux DSM (figure 10).

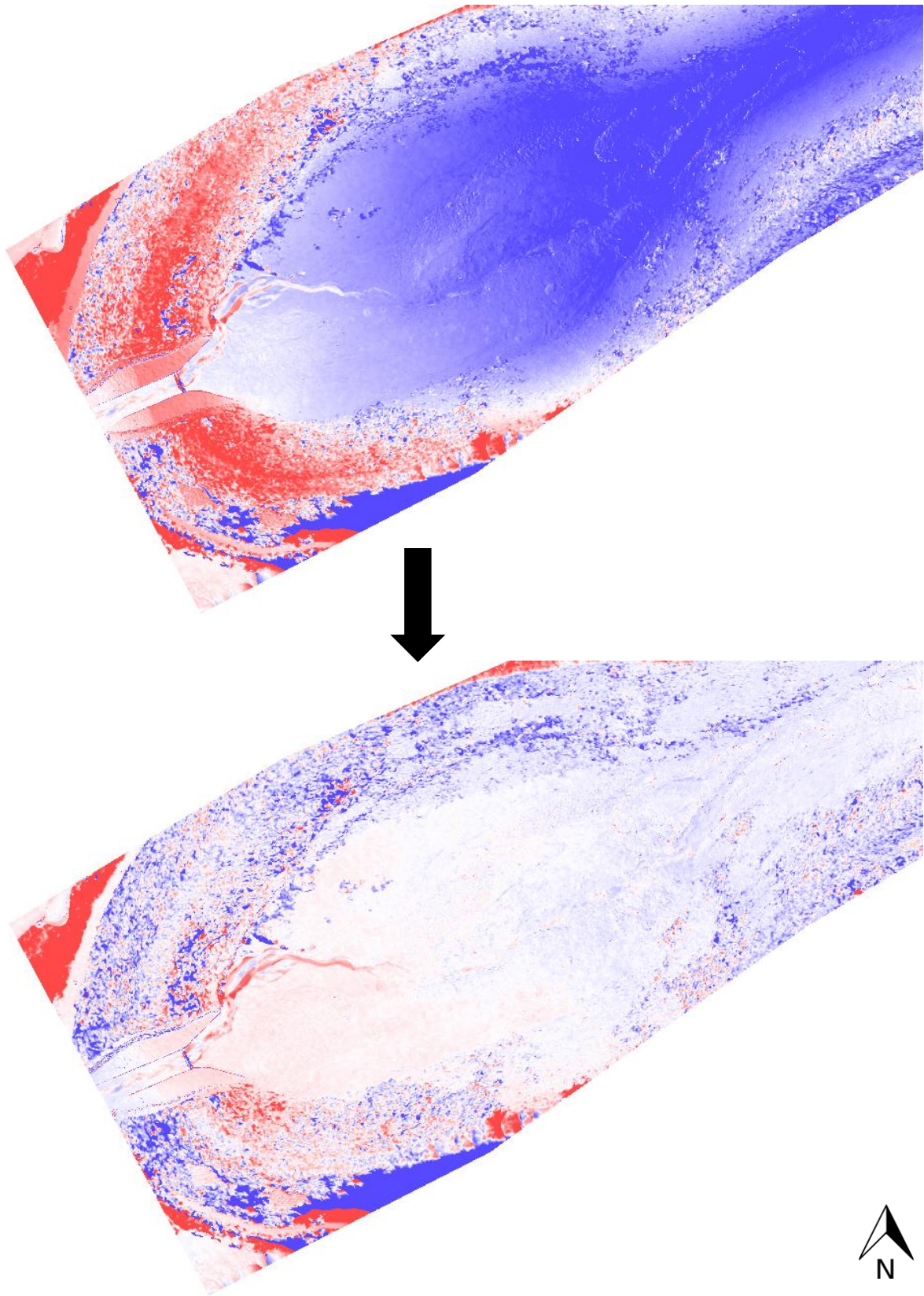


Figure 10 : résultat après l'ajout de GCP supplémentaires

3.3 Masques

La définition des masques a été réalisée sous QGIS sous forme de polygones délimitant les zones atteintes par les événements de lave torrentielle. Ces masques sont utilisés lors des analyses GCD afin de restreindre les calculs de différences d'élévation aux seules surfaces effectivement modifiées.

Pour chaque comparaison entre deux DSM encadrant un événement, le masque associé est celui correspondant à l'état post-événement. Cette approche garantit que l'ensemble des zones nouvellement affectées par la lave est inclus dans l'analyse, y compris celles qui n'étaient pas présentes dans la topographie antérieure.

3.4 Génération des résultats

L'évolution géomorphologique du dépotoir a été quantifiée par calcul de DoD (*DSM of Difference*), obtenu par soustraction d'un modèle numérique de surface antérieur à un modèle plus récent. Les différences d'altitude ainsi calculées ont ensuite été converties en volumes de dépôt et d'érosion. Afin de limiter l'influence des incertitudes de mesure et du bruit résiduel présent dans les modèles numériques, un seuil de détection de 0,05 m a été appliqué à l'ensemble des analyses. Cette valeur a été retenue en cohérence avec la résolution spatiale des DSM utilisés, dont la taille de maille est de 0,025 m. Ainsi, seules les variations d'altitude supérieures à deux fois la taille de maille sont prises en compte dans les calculs volumétriques.

Les calculs ont été réalisés sur l'ensemble du dépotoir, comprenant à la fois la zone de dépôt et la « cheminée » située en amont (figure 11). Cette approche permet de prendre en compte l'intégralité des variations topographiques affectant le système entre deux campagnes de relevé. Toutefois, lors de la présentation des résultats, l'accent est mis sur la zone de dépôt, qui concentre la majeure partie des processus d'érosion et d'accumulation observés. Les cartes de différences d'altitude présentées dans la suite de ce rapport sont ainsi centrées sur cette zone afin de faciliter la lecture et l'interprétation des résultats.

Chaque comparaison temporelle a été traitée de manière indépendante afin de garantir la cohérence des volumes estimés entre les différentes dates de suivi.

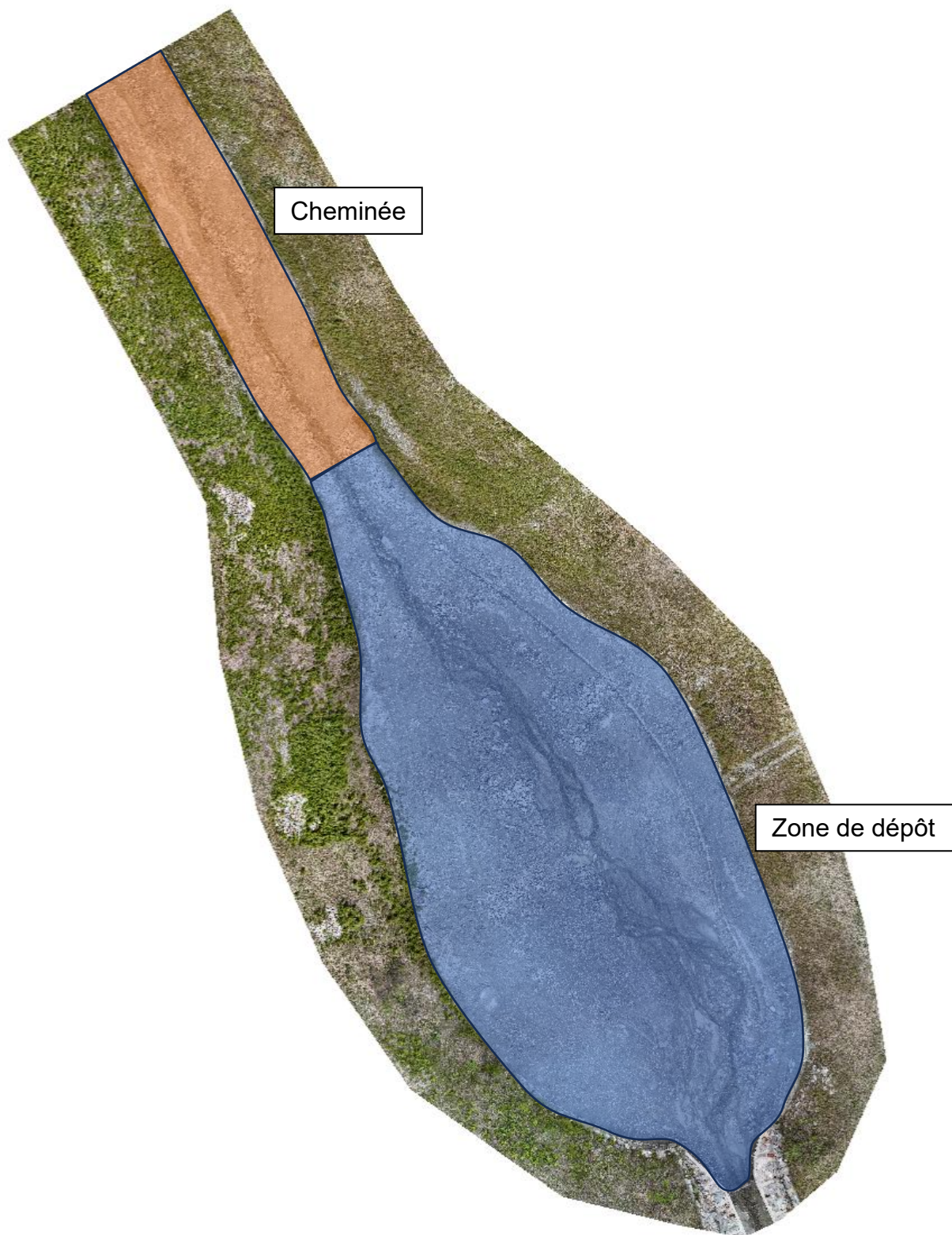


Figure 11 : Structure du dépotoir

4. Bilans sédimentaires

4.1 Evolution du dépotoir entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022

11.09.2019



14.07.2022



La surveillance topographique du dépotoir a bien commencé en 2019 mais elle est devenue active seulement en 2022. Les deux images ci-dessus sont des orthophotos prises à des dates très espacées donc il y a évidemment eu des différences volumétriques pendant cette période.

Attribute	Raw	Thresholded	Error Volume	% Error
Total Volume of Surface Lowering (m ³)	854.33	851.46	±113.73	13.36%
Total Volume of Surface Raising (m ³)	2666.64	2663.75	±143.74	5.40%
Total Volume of Difference (m ³)	3520.97	3515.21	±257.48	7.32%
Total Net Volume Difference (m ³)	1812.32	1812.29	±183.3	10.11%

Note: Threshold applied = 0.05 m for all Thresholded values

Tableau 1 : variations du volume dans le dépotoir entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022

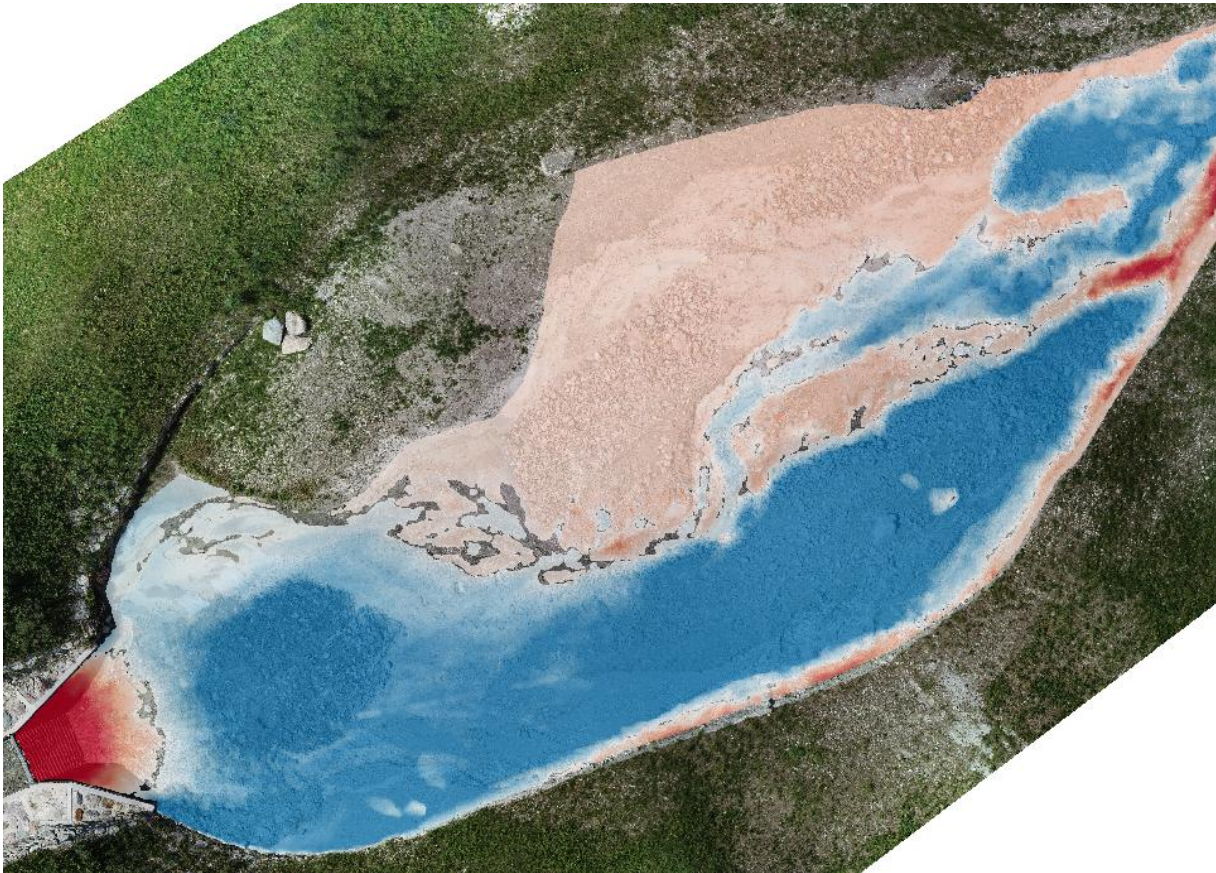
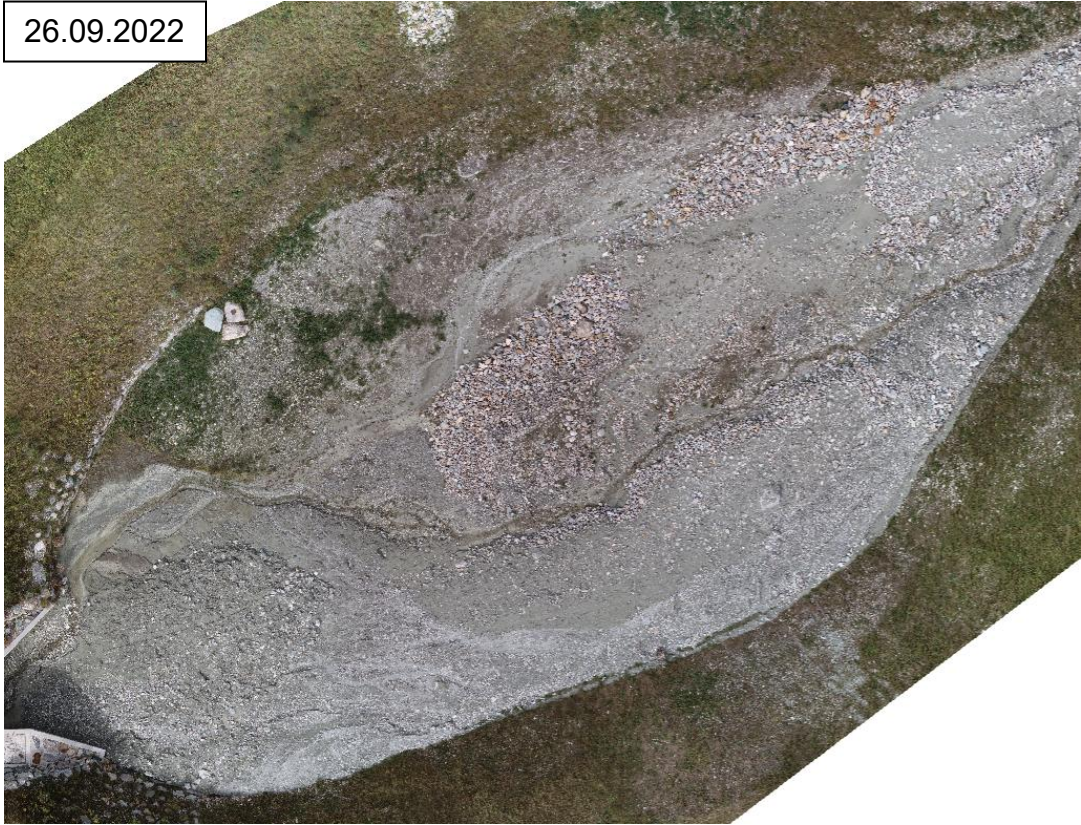


Figure 12 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 11.09.2019 et le 14.07.2022

Une zone en haut de l'image n'a subi ni érosion ni dépôt en raison de sa situation en bordure du dépotoir, de sa faible pente et du faible écoulement du Pétérey à cet endroit. Elle n'a donc pas été incluse dans le masque.

Cependant, on observe ci-dessus plusieurs changements dans le dépotoir. Un léger dépôt est présent le long du canal car l'eau fonctionne comme un collecteur de sédiments érodés en amont qui se déposent le long du chenal actif. La grande zone de dépôt en bas de l'image est une zone d'accumulation de matériaux. Il est intéressant de regarder la sortie du dépotoir qui a baissé d'environ 1 m depuis 2019. Cette érosion très localisée peut être expliquée de plusieurs manières : la grille présente à la sortie devenait trop remplie et a été vidée artificiellement pour faciliter l'écoulement de l'eau ou alors la zone a été touchée par de fortes précipitations qui ont permis l'écoulement des matériaux fins par la grille.

4.2 Evolution du dépotoir entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023



Entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023, il n'y a pas eu d'événements majeurs mais on observe quand même une lave torrentielle survenue le 19.06.2023 qui crée donc une différence du volume total de 2'707 m³. Quand on se penche sur le tableau ci-dessous, on remarque que sur les 2'707 m³, 2'407 m³ sont du dépôt. Cela signifie qu'il y a eu au minimum une lave torrentielle mineure pendant cette période. Si on regarde les orthophotos, on remarque bien que des matériaux se sont rajoutés depuis 2022 et que cet ajout a créé un chenal supplémentaire.

Attribute	Raw	Thresholded	Error Volume	% Error
Total Volume of Surface Lowering (m ³)	303.6	300.78	±31.76	10.56%
Total Volume of Surface Raising (m ³)	2419.98	2407.11	±226.23	9.40%
Total Volume of Difference (m ³)	2723.58	2707.89	±257.99	9.53%
Total Net Volume Difference (m ³)	2116.38	2106.33	±228.45	10.85%

Note: Threshold applied = 0.05 m for all Thresholded values

Tableau 2 : variations du volume dans le dépotoir entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023

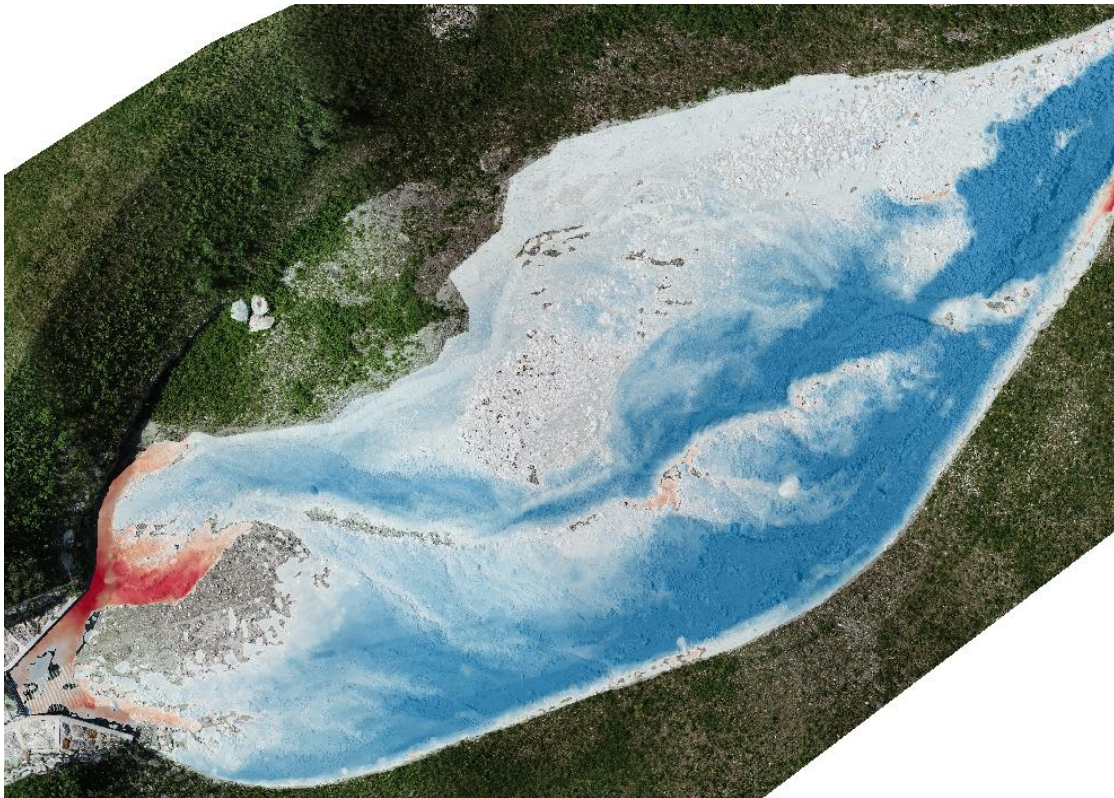


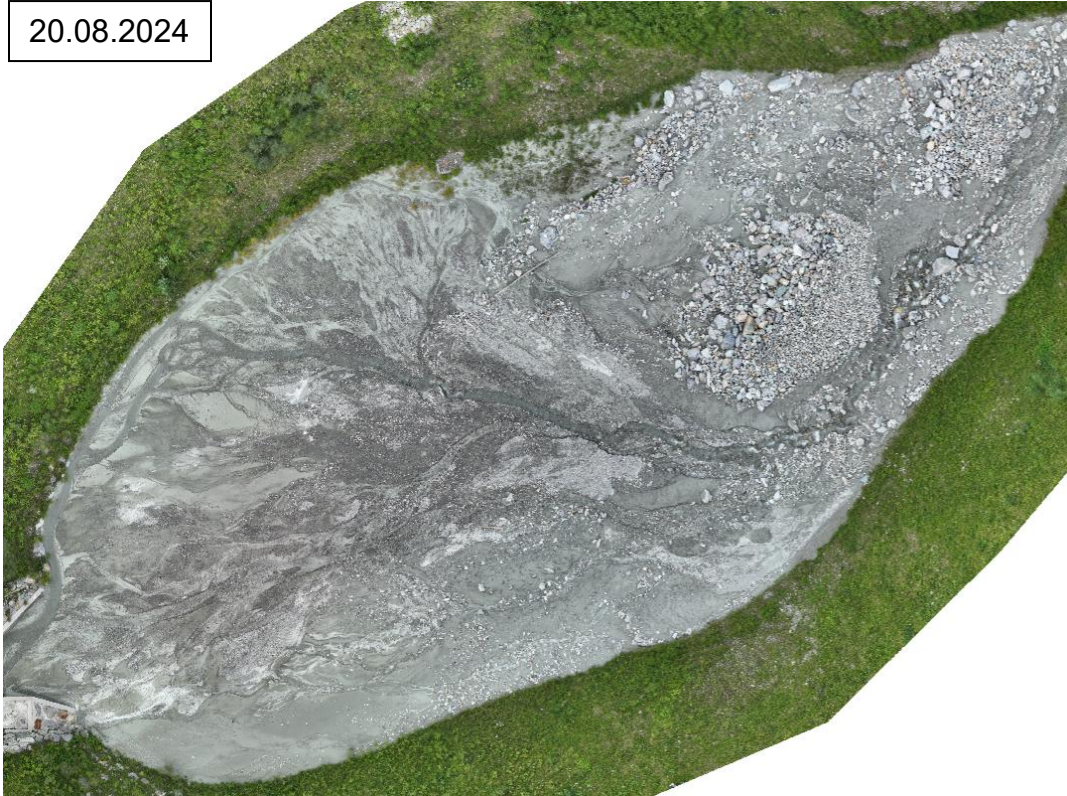
Figure 13 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 26.09.2022 et le 23.06.2023

On observe sur ce modèle une évolution importante de la topographie du dépotoir, avec un ajout notable de matériaux. Les chenaux du Pétérey jouent un rôle de vecteur de transport des sédiments fins qui se déposent progressivement lorsque la vitesse d'écoulement diminue dans le dépotoir. Le chenal s'est divisé en deux depuis 2022 à cause d'un apport important de matériaux à l'amont du dépotoir, forçant un changement de direction de l'écoulement.

Il est intéressant de remarquer la distribution non homogène des matériaux déposés par les laves torrentielles pendant cette période. En effet, les zones de dépôts se trouvent majoritairement du même côté du dépotoir (en bas sur l'image). Cette répartition particulière peut être justifiée par la position du canal. Ce canal oriente les laves torrentielles trop petites pour en sortir qui finissent par déposer les matériaux lorsque la vitesse d'écoulement diminue au sein du dépotoir. Donc les laves qui ont eu lieu pendant cette période ne devaient pas être très volumineuses et se sont écoulées du côté du chenal, créant alors la zone de dépôt relativement localisée observée sur le bas de l'image.

L'ensemble traduit un système actuellement dominé par le dépôt plutôt que par l'érosion, avec une circulation de l'eau bien canalisée.

4.3 Evolution du dépotoir entre le 23.06.2023 et 20.08.2024



Entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024, on observe que beaucoup de matériaux se sont déposés dans le dépotoir. En effet, le 21 juin 2024, une grosse lave torrentielle s'est déclenchée et s'est arrêtée dans le dépotoir. Dans le tableau ci-dessous on voit bien qu'il y a 6'195 m³ de dépôt observable sur les orthophotos car on voit que le dépotoir a été entièrement recouvert par cette lave torrentielle, y compris la zone végétalisée restée intacte depuis des années.

Attribute	Raw	Thresholded	Error Volume	% Error
Total Volume of Surface Lowering (m ³)	1363.41	1359.92	±80.28	5.90%
Total Volume of Surface Raising (m ³)	6200.85	6195.75	±252.29	4.07%
Total Volume of Difference (m ³)	7564.26	7555.66	±332.57	4.40%
Total Net Volume Difference (m ³)	4837.44	4835.83	±264.75	5.47%

Note: Threshold applied = 0.05 m for all Thresholded values

Tableau 3 : variations du volume dans le dépotoir entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024

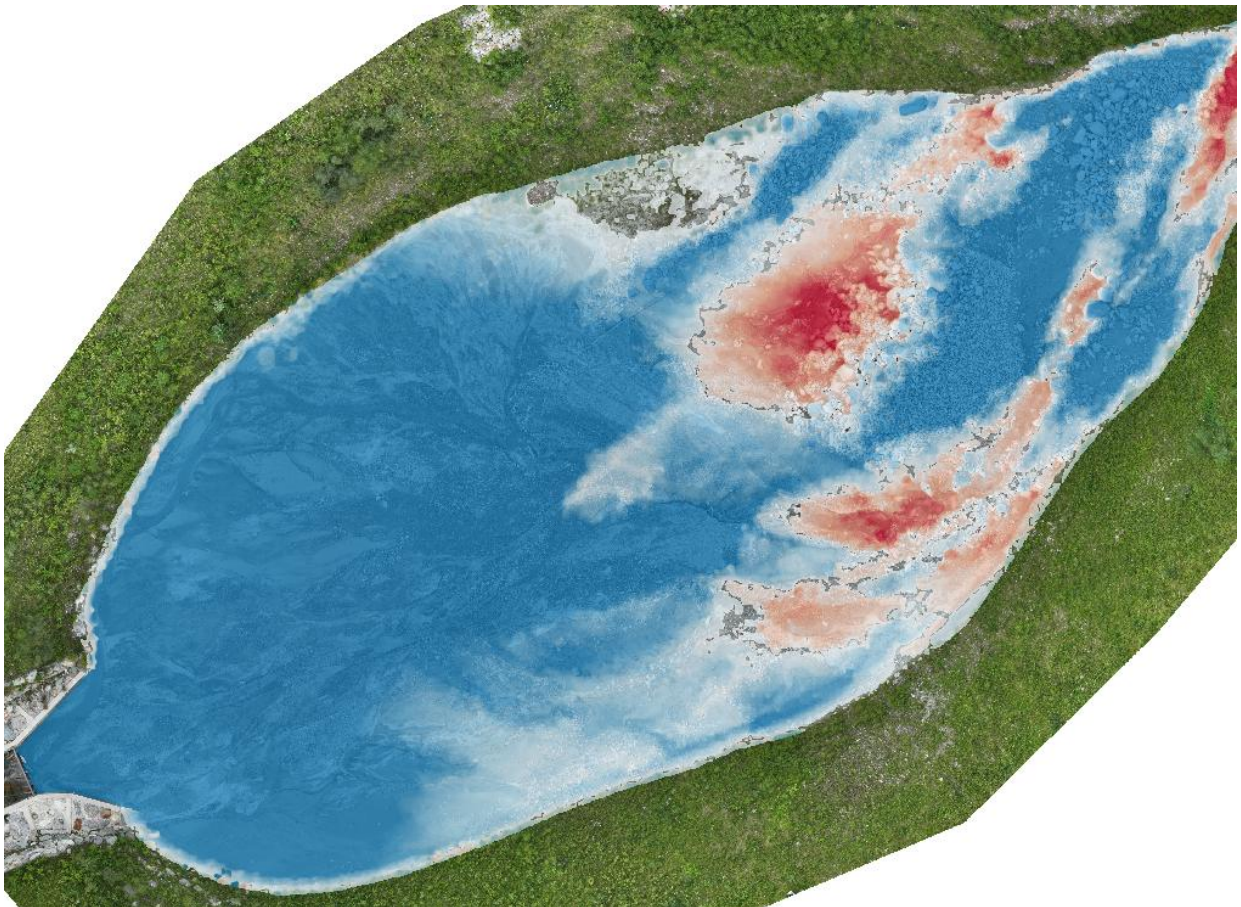
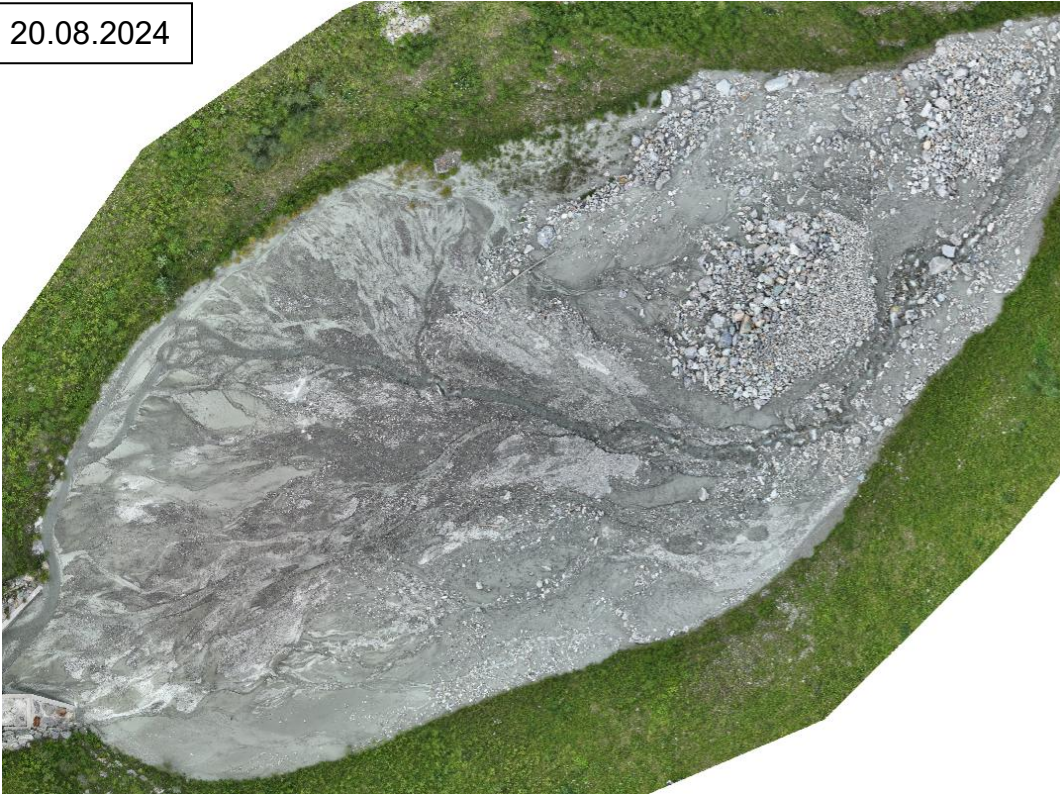


Figure 14 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024

Sur ce modèle, on observe la surface impressionnante qu'a recouvert la lave torrentielle du 21 juin 2024. Il y a du dépôt sur la grande majorité du dépotoir, en dehors des quelques zones d'érosion au sommet du dépotoir qui correspondent seulement à des amas de matériaux qui ont été entraînés par la lave. Dans ce genre de scénario, la lave a un volume si important qu'elle ne suit pas le chenal d'écoulement du Pétérey. La lave a facilement atteint la sortie du dépotoir et déposé environ 5 m de matériaux au pied de la grille qui mesure près de 7 m. Ceci montre bien que la construction d'un dépotoir à Zinal a été d'une utilité majeure et qu'il représente un outil de protection pour les infrastructures et les habitants du village.

4.4 Evolution du dépotoir entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025

20.08.2024



27.05.2025



Entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025, le dépôt a été entièrement vidé, pour qu'il puisse à nouveau bénéficier de sa pleine capacité de retenue, et ainsi éviter tout risque de débordement. Cette action a eu comme résultats de modifier le tressage du Pétérey et de laisser des traces du passage des machines dans le dépôt, que l'on peut observer sur l'orthophoto.

Attribute	Raw	Thresholded	Error Volume	% Error
Total Volume of Surface Lowering (m ³)	14677.65	14674.6	±309.97	2.11%
Total Volume of Surface Raising (m ³)	610.49	608.07	±28.41	4.67%
Total Volume of Difference (m ³)	15288.13	15282.67	±338.38	2.21%
Total Net Volume Difference (m ³)	-14067.2	-14066.53	±311.27	-2.21%

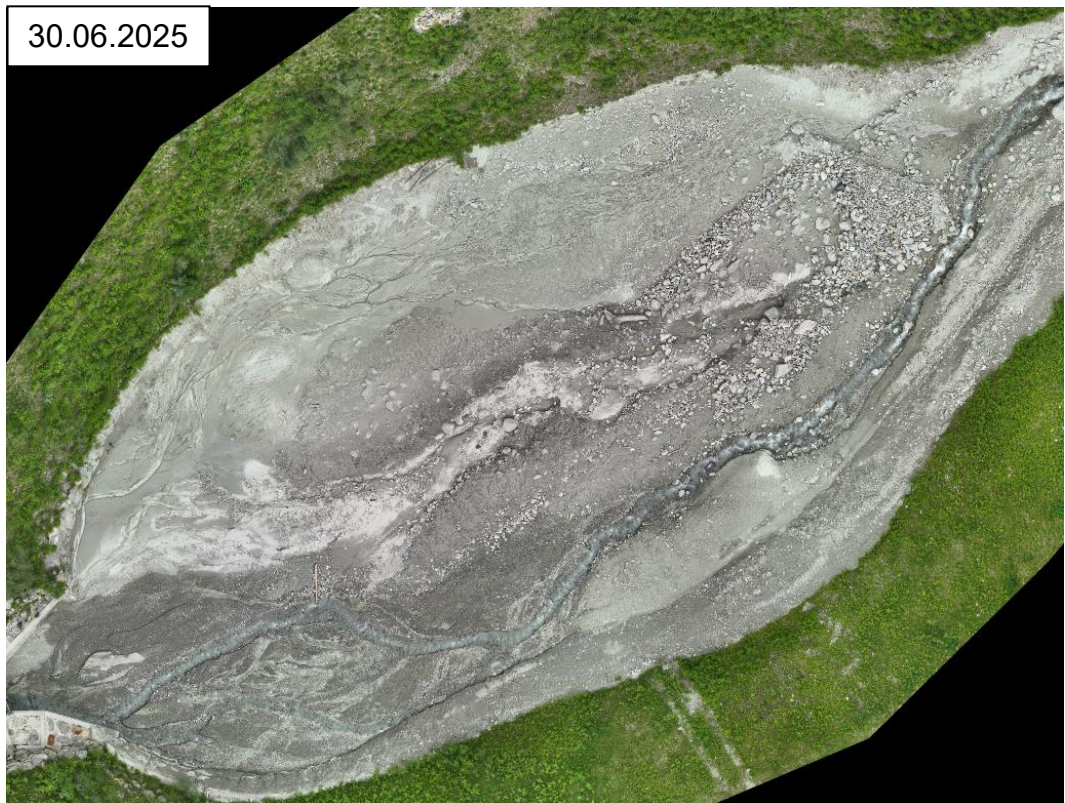
Note: Threshold applied = 0.05 m for all Thresholded values

Tableau 4 : variations du volume dans le dépôt entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025



Figure 15 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025

4.5 Evolution du dépotoir entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025



Entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025, une lave torrentielle de taille moyenne a fini sa course dans le dépotoir, engendrant un dépôt de matériaux avoisinant les 3'000 m³. Puisque le dépotoir était vide avant cette lave torrentielle, il est possible d'observer la répartition des matériaux dans le dépotoir. On remarque que les plus gros matériaux sont déposés au sommet du dépotoir tandis que les matériaux plus fins progressent plus loin avant de se déposer.

Attribute	Raw	Thresholded	Error Volume	% Error
Total Volume of Surface Lowering (m ³)	94.72	81.91	±24.71	30.17%
Total Volume of Surface Raising (m ³)	2936.2	2926.32	±204.95	7.00%
Total Volume of Difference (m ³)	3030.92	3008.23	±229.66	7.63%
Total Net Volume Difference (m ³)	2841.48	2844.41	±206.44	7.26%

Note: Threshold applied = 0.05 m for all Thresholded values

Tableau 5 : variations du volume dans le dépotoir entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025

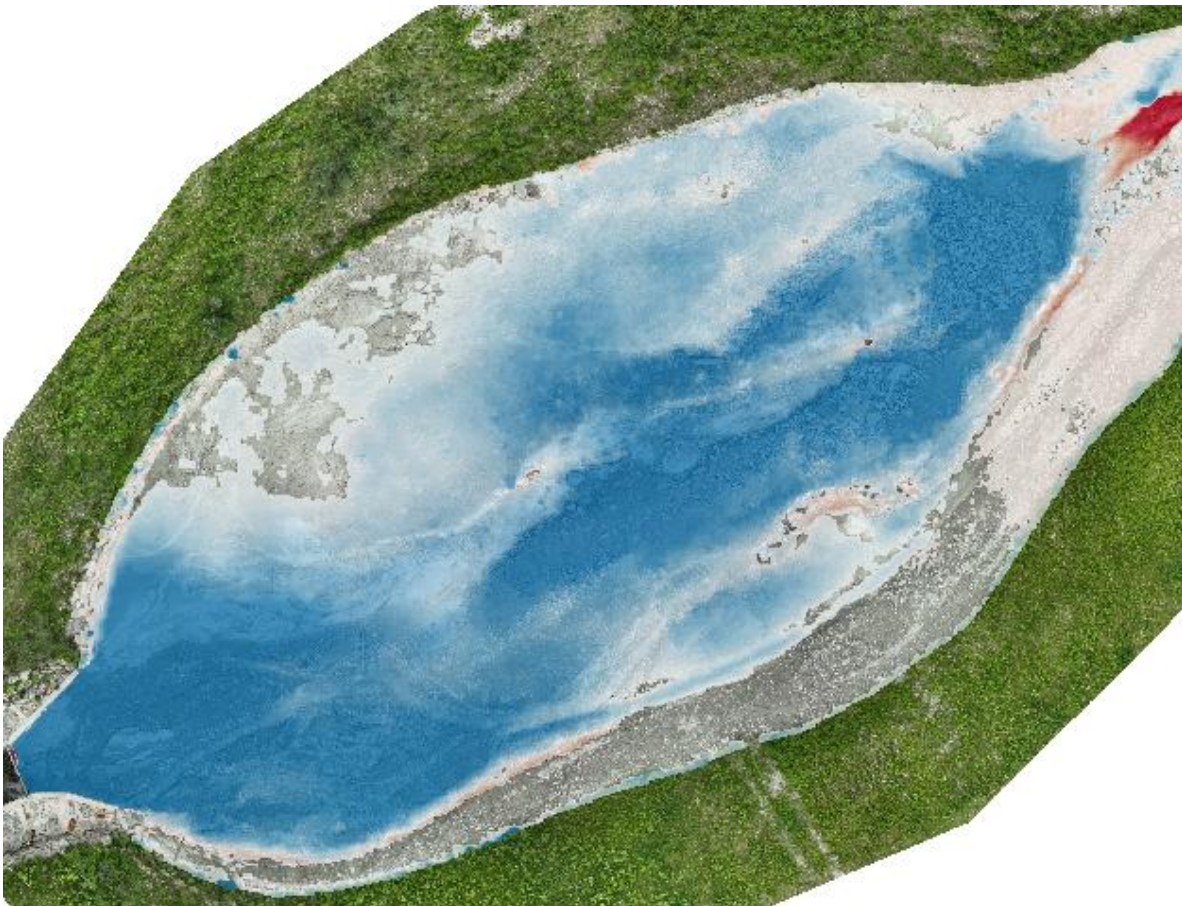


Figure 16 : dépôt (bleu) et érosion (rouge) entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025

Le DSM confirme que la lave a progressé jusqu'à la sortie du dépotoir puisque nous observons du dépôt d'une hauteur d'environ 80 cm au pied de la grille. De plus, il est intéressant de relever qu'une longue bande sur la rive gauche n'a pas subi de variation topographique. Cela s'explique par le fait que cette zone est légèrement surélevée et que l'ampleur de la lave n'était pas suffisante pour l'atteindre.

4.6 Bilan sédimentaire sur le total de la période étudiée

Les analyses présentées dans les sections précédentes ont permis de caractériser individuellement les variations géomorphologiques observées entre les différentes campagnes de relevé. Afin d'obtenir une vision d'ensemble de l'évolution du dépotoir, les résultats des calculs volumétriques ont été regroupés dans le tableau ci-dessous. Pour chaque période étudiée, celui-ci présente les volumes de dépôt, les volumes d'érosion ainsi que le bilan sédimentaire net obtenus à partir des comparaisons de modèles numériques de surface. Cette synthèse permet de retracer l'évolution du dépotoir sur l'ensemble de la période de suivi et de mettre en évidence les phases d'accumulation et d'évacuation des matériaux qui ont marqué son fonctionnement.

Tableau	Période	Volume d'érosion (m ³)	Volume de dépôt (m ³)	Bilan sédimentaire net (m ³)
Tableau 1	11.09.2019 → 14.07.2022	851.46	2663.75	1812.29
Tableau 2	26.09.2022 → 23.06.2023	300.78	2407.11	2106.33
Tableau 3	23.06.2023 → 20.08.2024	1359.92	6195.75	4835.83
Tableau 4	20.08.2024 → 27.05.2025	14674.6	608.07	-14066.53
Tableau 5	27.05.2025 → 30.06.2025	81.91	2926.32	2844.41
			Bilan total :	-2467.67

Tableau 6 : Bilan des variations volumétriques du dépotoir du torrent du Pétérey entre les différentes campagnes de relevé. Les volumes présentés correspondent aux résultats calculés après application d'un seuil de 0,05 m.

L'analyse du bilan sédimentaire met en évidence une dynamique globalement dominée par l'accumulation de matériaux au sein du dépotoir. Sur les cinq périodes étudiées, quatre présentent un bilan sédimentaire net positif, indiquant que les volumes déposés par les laves torrentielles excèdent les volumes remobilisés ou érodés. Les gains de matériaux les plus importants sont observés entre le 23.06.2023 et le 20.08.2024, avec un bilan net supérieur à 4'800 m³, témoignant d'une activité torrentielle particulièrement marquée durant cette période.

La seule exception correspond à l'intervalle compris entre le 20.08.2024 et le 27.05.2025, caractérisé par un bilan fortement négatif de plus de 14'000 m³. Cette valeur résulte directement de l'opération de vidange du dépotoir réalisée durant cette période, dont l'ampleur dépasse largement les volumes déposés par les événements naturels observés au cours du suivi. Cet épisode constitue ainsi une rupture nette dans l'évolution du

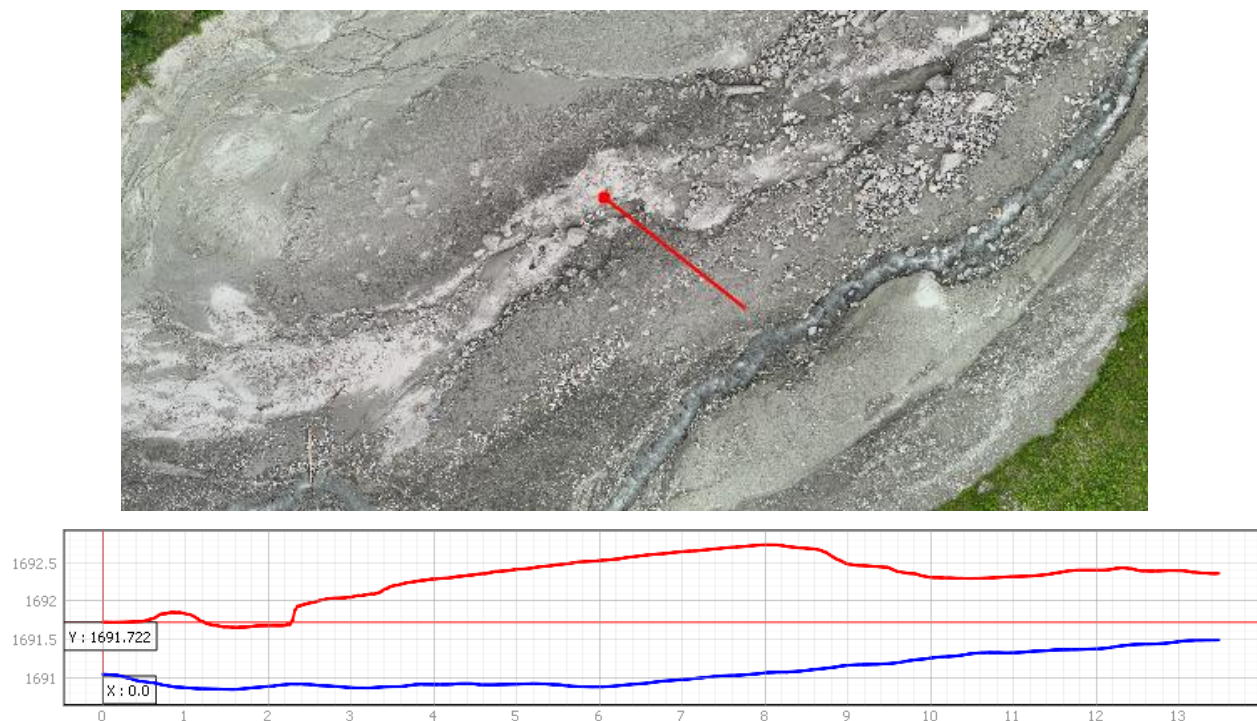
système, ramenant le volume de matériaux stockés à un niveau significativement plus faible.

Les résultats montrent également que le remplissage du dépotoir reprend rapidement après cette intervention. Entre le 27.05.2025 et le 30.06.2025, près de 2'900 m³ de matériaux ont déjà été déposés, alors que les événements observés durant cette période étaient de faible intensité. Cette évolution illustre la capacité du torrent du Pétérey à alimenter rapidement le dépotoir en sédiments, même en l'absence de laves torrentielles majeures.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment le rôle essentiel du dépotoir dans le stockage temporaire des matériaux transportés par le torrent. Ils mettent également en évidence la nécessité d'un suivi régulier de son état de remplissage, afin d'anticiper les besoins de vidange et de maintenir sa capacité de rétention face aux futurs événements torrentiels.

5. Analyses granulométriques

Une campagne de mesures granulométriques a été réalisée dans le dépotoir du torrent du Pétérey à Zinal, dans le but de caractériser la variation verticale de la granulométrie au sein des dépôts torrentiels. Des coupes ont été préalablement sélectionnées dans différentes zones du dépotoir afin d'identifier des emplacements représentatifs et affectés par la dernière lave torrentielle. Le choix des sites a été vérifié par comparaison entre le niveau actuel du dépôt (en rouge) et celui d'un relevé antérieur (en bleu) réalisé avant le dernier événement, permettant d'établir le profil vertical des zones étudiées.



Deux tranchées ont été réalisées dans le dépôt à l'aide d'outils manuels afin d'étudier l'évolution de la granulométrie avec la profondeur. Dans la première tranchée, trois échantillons ont été prélevés successivement entre 0 et 20 cm, 20 et 40 cm, puis 40 et 60 cm de profondeur. Dans la seconde, deux échantillons ont été collectés entre 0 et 30 cm et entre 30 et 60 cm. Pour chaque niveau, les matériaux extraits ont été disposés dans une zone délimitée de dimensions connues, en veillant à écarter les éléments afin

de faciliter leur individualisation lors du traitement d'image. Ces placettes constituent les surfaces d'analyse granulométrique destinées au traitement par GALET.



Figure 18 : exemple de placette

Les placettes ont ensuite été documentées par acquisition d'images rapprochées selon deux configurations complémentaires : des prises de vue nadirales réalisées par drone à environ 2,5 m du sol et des prises de vue obliques à environ 1,5 m. Des images obliques supplémentaires ont également été acquises à l'aide d'un téléphone. Les données ont ensuite été traitées dans PIX4D afin de générer un modèle tridimensionnel et une orthomosaïque des placettes.

Chaque placette d'analyse présente une emprise spatiale réduite, de l'ordre de 2,5 m de côté. Bien que cette surface demeure limitée au regard de l'hétérogénéité potentielle des dépôts torrentiels, elle constitue néanmoins un premier jeu de données granulométriques exploitable. L'ensemble des relevés a été effectué à l'automne 2025 ; durant cette période, aucun événement de lave torrentielle n'a été observé, garantissant que les matériaux analysés correspondent à l'état du dépôt en place à cette date.

Le traitement granulométrique des images acquises sur ces placettes a été réalisé à l'aide de la version 2 de GALET, permettant d'extraire automatiquement la distribution granulométrique des éléments détectés au sein de chaque échantillon.

Les analyses granulométriques ont été réalisées à partir d'échantillons récoltés au sein de deux zones d'étude distinctes.

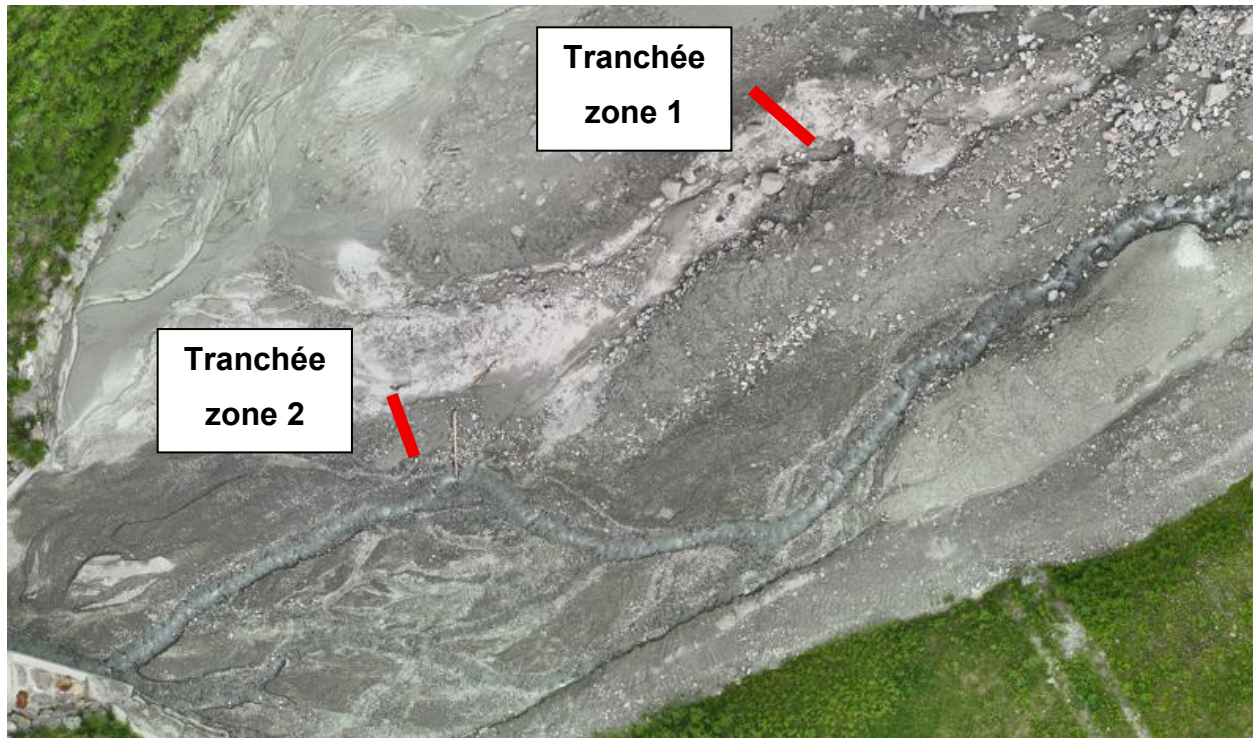


Figure 19 : Emplacements des deux tranchées

La zone 1, illustrée à la figure 20, comprend trois échantillons matérialisés par des placettes carrées. Ces échantillons ont été prélevés à des profondeurs progressives au sein d'une tranchée creusée spécifiquement à cet effet, afin de caractériser l'évolution verticale de la granulométrie. La zone 2 comporte quant à elle deux échantillons de dimensions identiques à ceux de la première zone, acquis selon le même protocole d'échantillonnage mais prélevés dans une autre partie du dépotoir.

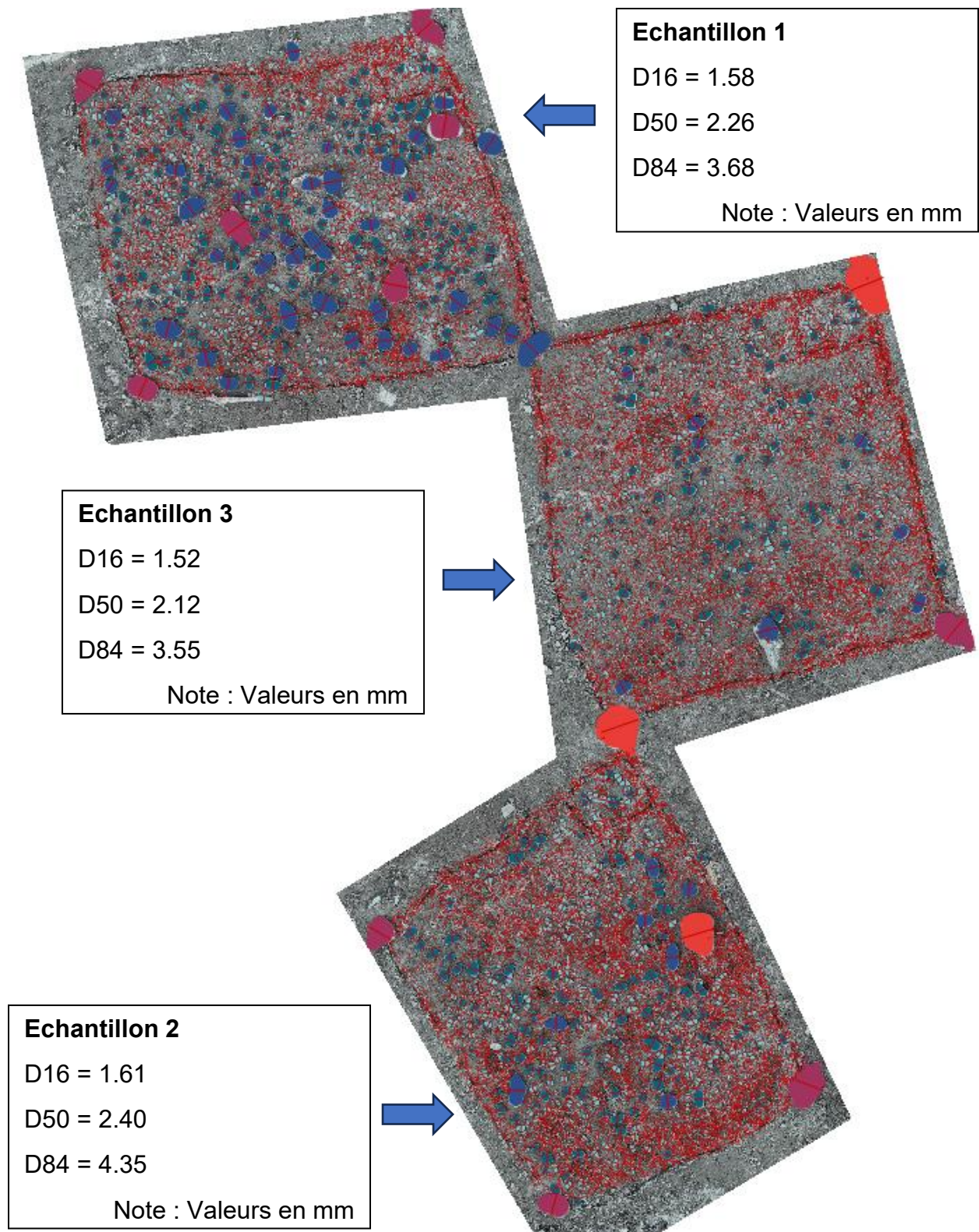


Figure 20 : résultats de la V2 de GALET sur les trois échantillons de la zone 1

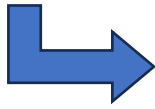
Echantillon 2

D16 = 2.30

D50 = 3.58

D84 = 7.40

Note : Valeurs en mm



Echantillon 1

D16 = 1.88

D50 = 2.89

D84 = 5.53

Note : Valeurs en mm

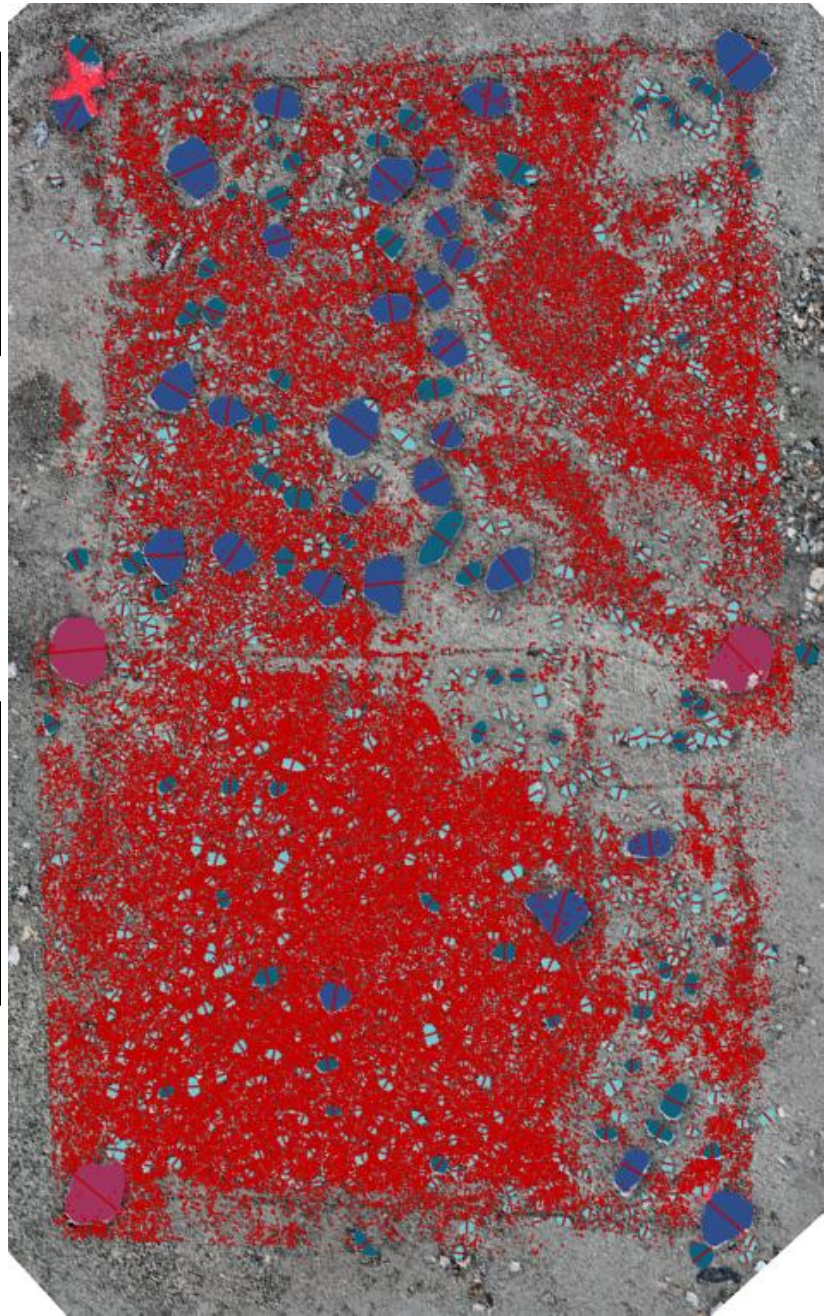
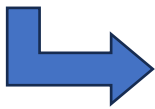


Figure 21 : résultats de la V2 de GALET sur les deux échantillons de la zone 2

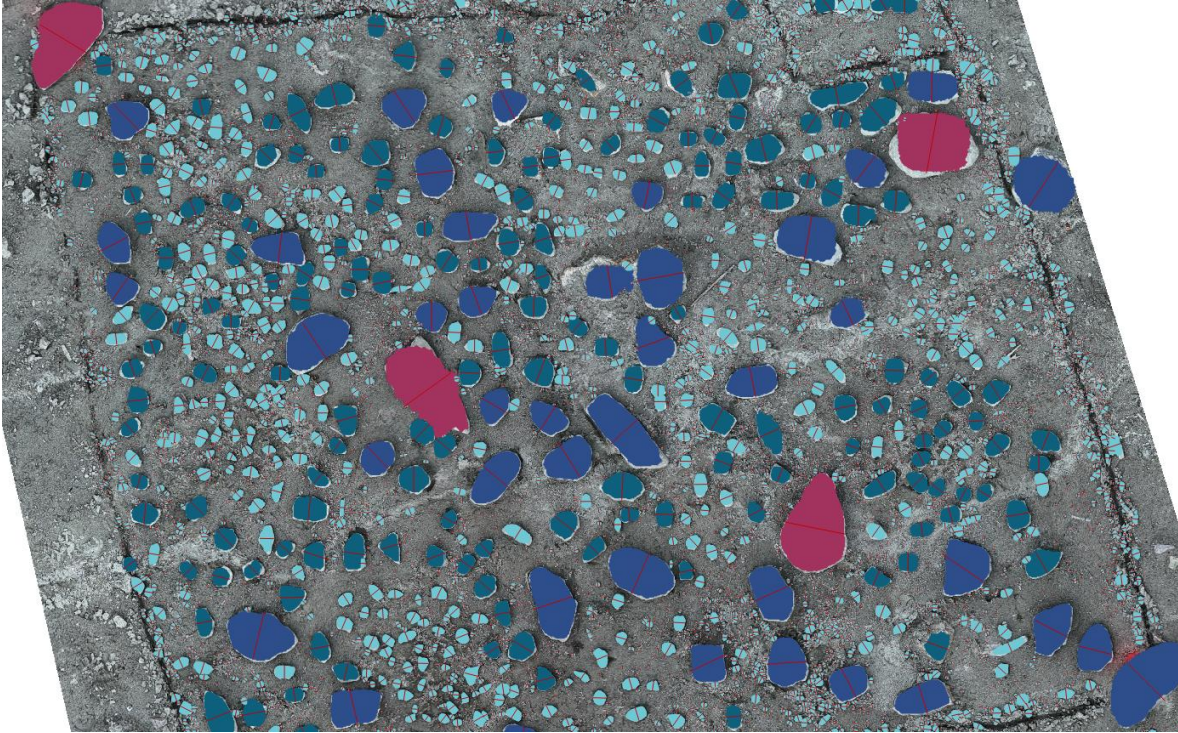


Figure 22 : zoom sur l'échantillon 1 de la zone 1

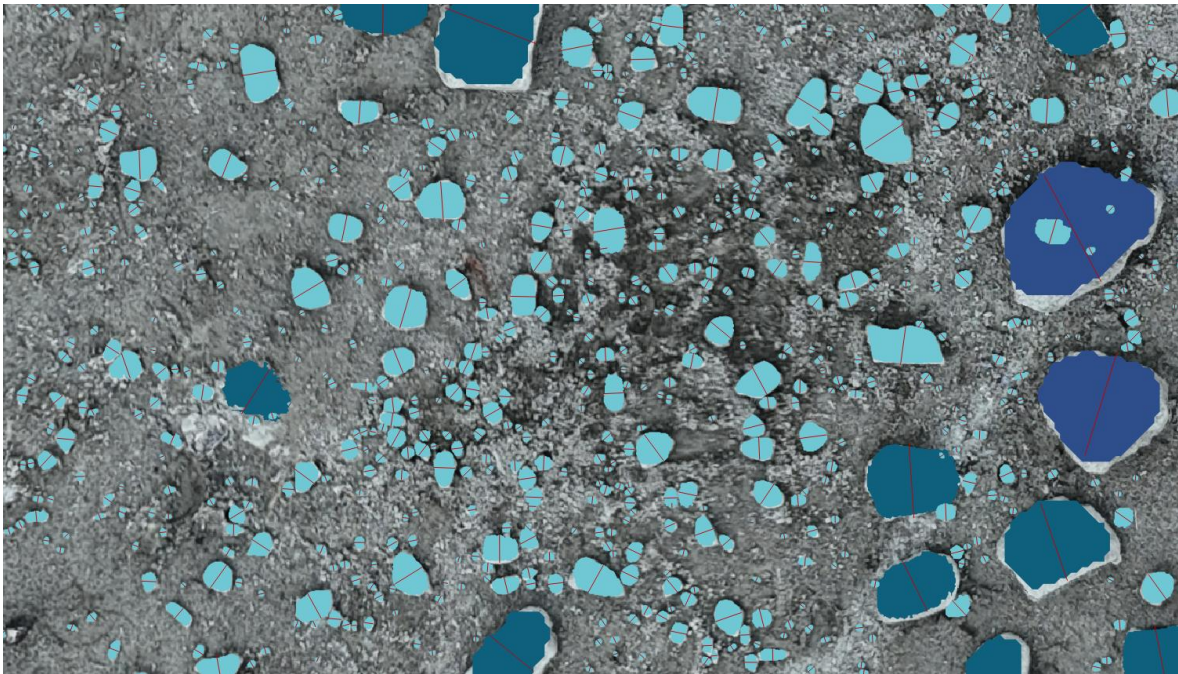


Figure 23 : zoom important sur l'échantillon 1 de la zone 1

Les axes rouges représentent les axes intermédiaires des matériaux, utilisés pour déterminer leur taille. Ces résultats dépassent nos attentes et la V2 de GALET est bien plus performante que la V1. Les plus petites entités détectées mesurent légèrement plus que 3 mm.

Unité : [mm]	D16*	D50*	D84*	Profondeur
Zone_1-Echantillon_1	1.58	2.26	3.68	0-400
Zone_1-Echantillon_2	1.61	2.40	4.35	200-400
Zone_1-Echantillon_3	1.52	2.12	3.55	400-600
Zone_2-Echantillon_1	1.88	2.89	5.53	0-300
Zone_2-Echantillon_2	2.30	3.58	7.40	300-600

*Incertitude
de
10 %

Tableau 7 : résultats des paramètres granulométriques D16, D50 et D84 (bruts) par zone et par échantillon en mm

Le tableau présente les principaux paramètres granulométriques D16, D50 et D84, couramment utilisés en géologie sédimentaire pour caractériser la distribution des tailles de grains au sein d'un dépôt. Ces diamètres percentiles correspondent respectivement aux tailles pour lesquelles 16 %, 50 % et 84 % des éléments mesurés sont plus fins. Les valeurs obtenues indiquent que les matériaux constituant le dépotoir correspondent globalement à des sédiments fins à moyennement grossiers, avec des diamètres médians (D50) compris entre environ 2 et 3,6 mm. Les valeurs de D16, systématiquement proches de 1,5 à 2,3 mm, attestent de la présence d'une fraction fine non négligeable, traduisant un apport de matériaux facilement mobilisables par les écoulements. À l'inverse, les valeurs de D84, plus élevées et plus dispersées selon les échantillons, reflètent une hétérogénéité granulométrique marquée et la présence ponctuelle d'éléments plus grossiers.

L'écart observé entre D16, D50 et D84 met en évidence un tri sédimentaire globalement faible à modéré, caractéristique de dépôts torrentiels faiblement triés. Par ailleurs, la comparaison des échantillons prélevés à différentes profondeurs montre une tendance à l'augmentation relative de la fraction fine vers la base du dépôt, ce qui est cohérent avec un processus de ségrégation granulaire au sein des laves torrentielles. Dans ce type d'écoulement, les particules fines tendent à s'infiltrer dans les interstices des éléments grossiers, tandis que les blocs de plus grande taille se concentrent préférentiellement

vers la surface. L'ensemble des résultats granulométriques obtenus apparaît ainsi en accord avec la structuration verticale attendue pour des dépôts issus de laves torrentielles.

Les courbes de distribution granulométrique cumulée associées à chaque échantillon (figures 24 et 25) mettent en évidence une organisation verticale des matériaux au sein des dépôts étudiés. Dans les deux zones, les échantillons les plus profonds présentent globalement des diamètres caractéristiques plus faibles que les échantillons superficiels, traduisant un enrichissement progressif en fraction fine avec la profondeur. Cette tendance est cohérente avec les mécanismes de ségrégation granulaire et de sédimentation observés dans les dépôts de laves torrentielles, où les éléments les plus fins tendent à migrer vers les niveaux inférieurs tandis que les blocs plus grossiers se concentrent davantage en surface.

Dans la zone 1, cette diminution granulométrique avec la profondeur est toutefois perturbée au niveau de l'échantillon superficiel. En effet, l'échantillon 1 présente des tailles de particules plus faibles que l'échantillon 2, alors qu'il est situé plus près de la surface. Cette anomalie peut s'expliquer par l'apport récent de matériaux fins lors d'une lave torrentielle plus récente, venus se déposer au-dessus d'un dépôt antérieur constitué d'éléments légèrement plus grossiers. Le même comportement est observé dans la zone 2, où l'échantillon superficiel présente également des diamètres caractéristiques plus faibles que ceux attendus dans une organisation granulométrique strictement décroissante avec la profondeur.

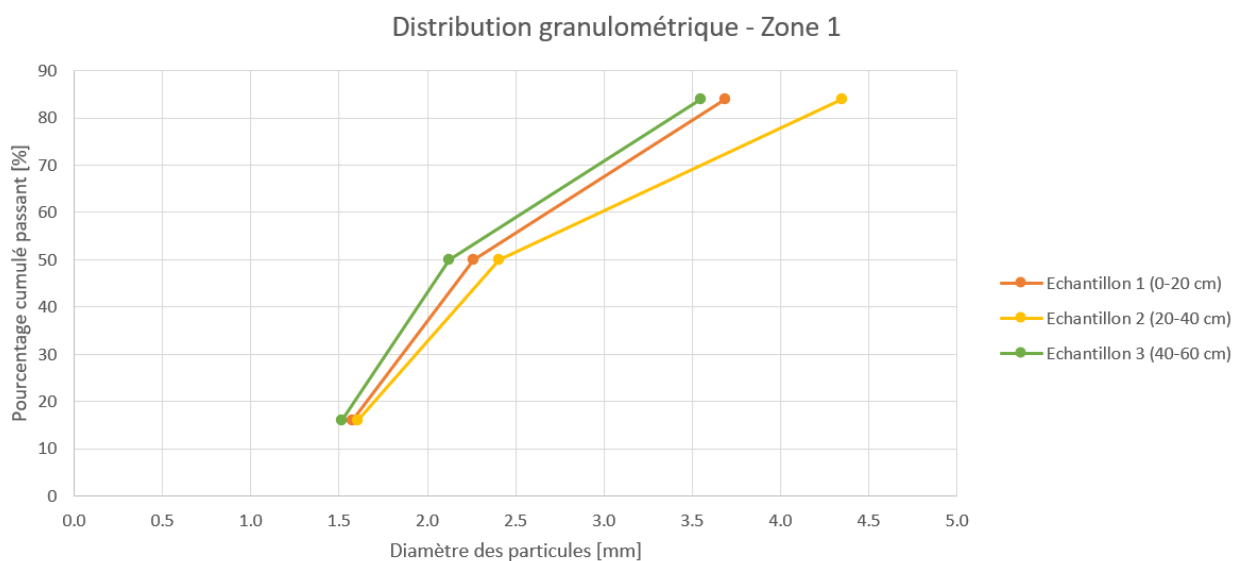


Figure 24 : courbes de distribution granulométrique cumulée des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans la zone 1 du dépôt du Pétérey

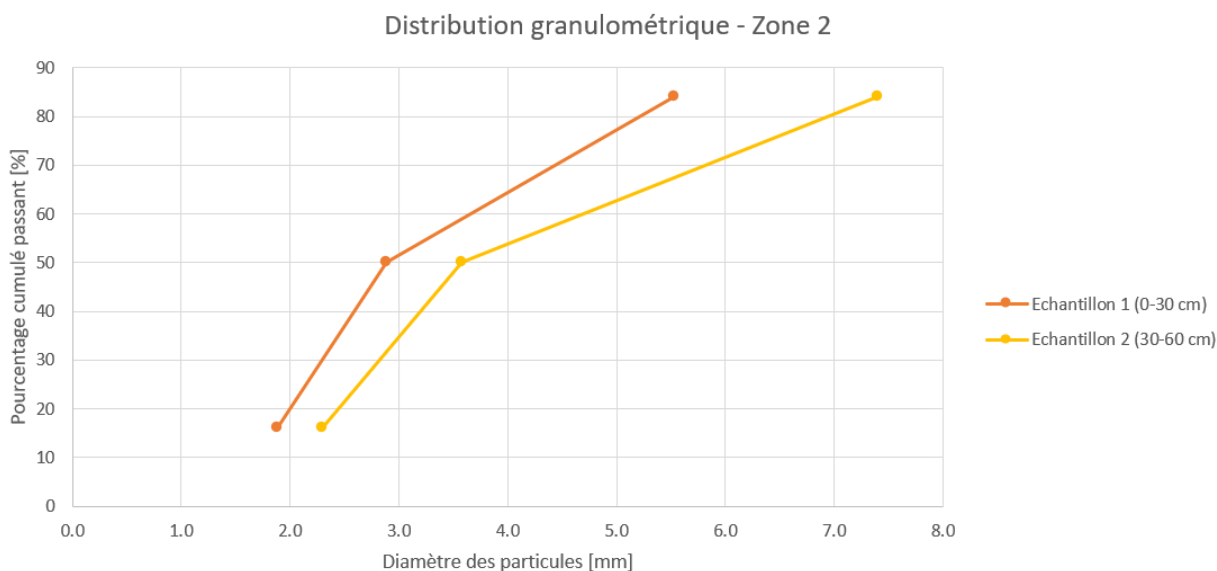


Figure 25 : courbes de distribution granulométrique cumulée des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans la zone 2 du dépôt du Pétérey

6. Conclusion

Ce travail de suivi topographique a permis de caractériser avec précision l'évolution géomorphologique du dépotoir du Pétérey à Zinal sur la période 2019-2025, grâce à l'utilisation combinée de plusieurs outils d'analyse : GCD, PIX4D et QGIS. L'objectif était double : d'une part, documenter les variations topographiques au sein de l'ouvrage de protection, et d'autre part, étudier la fréquence et l'ampleur des laves torrentielles affectant le torrent du Pétérey.

Les campagnes de terrain ont constitué une part essentielle de ce projet. Plusieurs sorties ont été organisées dans le dépotoir, principalement dédiées au prélèvement d'échantillons de matériaux destinés à l'analyse granulométrique. Ces relevés ont été complétés par des acquisitions d'images aériennes par drone, permettant la génération d'orthophotos et de modèles de surface actualisés pouvant servir de référence pour la saison 2026. Un important travail d'optimisation des paramètres d'acquisition et de traitement a été réalisé pour garantir la qualité des données produites et la fiabilité des analyses subséquentes.

Les analyses confirment qu'au minimum une lave torrentielle atteint annuellement le dépotoir, témoignant de la dynamique du système glaciaire et torrentiel du Pétérey. Toutefois, la période 2019-2022 demeure moins bien documentée en raison de l'absence d'orthophotos annuelles, ce qui introduit une incertitude quant au nombre précis d'événements survenus durant cet intervalle. L'événement du 21 juin 2024 illustre parfaitement l'ampleur des phénomènes en jeu : cette lave torrentielle majeure a déposé plus de 6'000 m³ de matériaux jusqu'au dépotoir.

Les analyses granulométriques réalisées à l'aide du logiciel GALET ont montré des résultats prometteurs, révélant une évolution granulométrique verticale marquée au sein des dépôts. Malheureusement, l'obtention de ces résultats en fin de service civil n'a pas permis de mener une exploitation complète de ces données. Cette piste d'analyse mériterait d'être approfondie lors de travaux futurs, notamment pour mieux comprendre les dynamiques de transport et de sédimentation propres aux différents types d'événements torrentiels.

Ce service civil au sein du Laboratoire d'Hydraulique Environnementale m'a permis de développer des compétences techniques en topographie, traitement de données géospatiales et analyse de risques naturels, tout en contribuant concrètement à un projet de recherche appliquée aux enjeux sociétaux importants. La poursuite de ce monitoring reste essentielle dans un contexte de changements climatiques où la fréquence et l'intensité des événements torrentiels tendent à s'accroître.

7. Bibliographie

Cartes de la Suisse - Confédération suisse - map.geo.admin.ch. s. d. Consulté 12 février 2026. <https://map.geo.admin.ch>.

Le chantier des changements climatiques - Le Temps. 2017.

Mörtl, Christian, Alexandre Baratier, Johan Berthet, Pierre-Allain Duvillard, et Giovanni De Cesare. 2022. « GALET : A deep learning image segmentation model for drone-based grain size analysis of gravel bars ». Grenade, Espagne.

8. Annexes

Annexe B : Tâche annexe

B.1 Précision verticale et module RTK

Le drone utilisé pour l'acquisition des images photogrammétriques peut être équipé d'un module GNSS RTK (Real-Time Kinematic), permettant un positionnement absolu de précision centimétrique grâce à des corrections différentielles transmises en temps réel par une station de référence. Ce dispositif améliore significativement la précision planimétrique et altimétrique des centres de prise de vue, et peut dans certains contextes réduire le besoin en points de contrôle au sol (GCP).

Le vol du 30 juin 2025 a été réalisé avec le module RTK activé afin d'évaluer si la précision obtenue était suffisante pour les analyses géomorphologiques du dépotoir. Toutefois, la précision verticale fournie par le RTK reste exprimée dans le système ellipsoïdal GNSS, alors que les modèles topographiques utilisés dans l'étude sont référencés à l'altitude orthométrique (géodésique locale). L'écart entre l'ellipsoïde de référence et le géoïde local dans la zone de Zinal est de l'ordre de 2,3 m. En l'absence d'un modèle de géoïde appliqué correctement dans la chaîne de traitement, cette différence se traduit par un biais systématique sur l'axe vertical.

Dans notre cas, comme le DSM de référence n'a pas été capturé avec le module RTK, il reste ainsi nécessaire d'utiliser des GCP pour contraindre l'altitude des modèles photogrammétriques au référentiel altimétrique local. Afin d'éviter que PIX4D ne privilégie la précision verticale issue du RTK par rapport à celle des GCP, l'incertitude en Z associée aux centres de prise de vue a été volontairement augmentée à 2 m lors du traitement. Cette pondération conduit le logiciel à accorder un poids prépondérant aux GCP pour l'ajustement altimétrique, garantissant la cohérence verticale des DSM produits avec le système de référence de l'étude.