



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche
pour la prévention des Risques Naturels



Programme de recherche 2008

Financé par le Conseil général de l'Isère

Rapport scientifique

L'utilisation des plages de dépôts pour la mesure du transport solide torrentiel : applications dans le département de l'Isère

Coordinateur :

Frédéric Liébault
(Cemagref Grenoble, UR ETNA)

Participants :

Christophe Peteuil, Cyril Jousse, Benoît Fragnol
(ONF-RTM38)

Joshua Theule
(Cemagref, UR ETNA)

Frédéric Berger, Jérôme Lopez Saez, Alexandra Gotteland
(Cemagref, UR EM)

Michel Jaboyedoff, Alexandre Loye
(Université de Lausanne, IGAR)

05/02/2010

Table des matières

Résumé	3
1. Approche régionale de l'érosion torrentielle	4
1.1. <i>Introduction</i>	4
1.1.1. Problématique et enjeux	4
1.1.2. Les modèles globaux sommaires de prédiction des apports sédimentaires	4
1.1.3. Le rôle des plages de dépôt et leur intérêt pour la mesure de la production sédimentaire	5
1.2. <i>Recueil de données</i>	6
1.2.1. Constitution de l'échantillon	6
1.2.2. Caractérisation des torrents et de leurs bassins versants	7
1.2.3. Analyse fréquentielle	9
1.3. <i>Résultats</i>	10
1.3.1. Estimation des volumes moyens annuels	10
1.3.2. Estimation de la production sédimentaire des crues rares	11
1.3.3. Estimation des volumes maximaux susceptibles d'être produits en cas de crue extrême	18
1.4. <i>Conclusion</i>	22
1.4.1. Synthèse	22
1.4.2. Perspectives	23
1.4.3. Remerciements	24
2. Suivi morphodynamique et sédimentaire du Manival	25
2.1. <i>Contexte et objectifs</i>	25
2.2. <i>Méthodes et outils</i>	26
2.2.1. Site d'étude	26
2.2.2. Suivis topographiques terrestres	27
2.2.3. Acquisitions LiDAR aéroportées	30
2.2.4. Suivi des précipitations	30
2.3. <i>Résultats et discussion</i>	31
2.4. <i>Conclusion</i>	38
3. Reconstitution dendrogéomorphologique de la chronique des crues du Manival	39
3.1. <i>Contexte général</i>	39
3.2. <i>Matériel et méthode</i>	39
3.2.1. Phase d'échantillonnage	39
3.2.2. Indices du passage d'anciennes laves torrentielles	40
3.2.3. Etude des cernes de croissance	40
3.3. <i>Résultats</i>	41
3.3.1. Analyse des arbres perturbés	41
3.3.2. Structure des âges des arbres échantillonnés	42
3.3.3. Reconstitution spatiotemporelle des laves torrentielles	42
3.4. <i>Discussion</i>	44
4. Bibliographie	46
5. Annexes	49

Résumé

Ce projet a pour objectif principal d'améliorer la connaissance du transport solide des torrents pour une meilleure prise en compte des sédiments dans la gestion des risques liés aux crues torrentielles. Le fil conducteur est de s'appuyer sur les plages de dépôt alpines pour le recueil de données détritiques en contexte torrentiel. Cette démarche a été entreprise selon plusieurs échelles spatiales, avec un premier volet régional destiné à établir des liens statistiques entre les caractéristiques physiques des bassins versants et leur production sédimentaire, et un deuxième volet local dont l'objectif est d'analyser la complexité des transferts sédimentaires internes d'un petit bassin versant très actif (Torrent du Manival). Une étude dendrogéomorphologique est également proposée sur ce site à titre exploratoire.

L'analyse régionale, qui repose sur l'inventaire et le traitement des données de curage de 42 plages de dépôts, a permis d'établir des modèles statistiques globaux d'évaluation de la production sédimentaire événementielle et annuelle des torrents. Des éléments sont également proposés pour la création d'un observatoire de l'érosion torrentielle. Le monitoring des crues de 2009 engagé sur le Torrent du Manival, fondé sur la reconstitution au sol des changements morphologiques du chenal principal combiné au suivi des atterrissements dans la plage de dépôt, a permis d'établir des bilans sédimentaires pour différents types d'écoulements (lave torrentielle et charriage hyperconcentré). Les résultats obtenus ont permis de montrer que l'exportation solide est contrôlée par les déstabilisations en masse dans le chenal principal lors des écoulements de lave et que le charriage contribue essentiellement à reconstituer les réserves sédimentaires mobilisées par les crues antécédentes. La dendrogéomorphologie a permis de compléter la chronique des crues du Manival en gardant la trace d'événements d'intensité modérée qui n'auraient pu être redécouverts par une enquête historique. Elle montre également des résultats encourageants en matière de reconstitution du cheminement des laves torrentielles.

1. Approche régionale de l'érosion torrentielle

1.1. Introduction

1.1.1. Problématique et enjeux

En montagne, la capacité de production sédimentaire des torrents et des rivières torrentielles constitue une question centrale qui se pose à tout gestionnaire, aménageur ou expert s'intéressant à un bassin versant torrentiel. En fonction de la morphologie de ces bassins versants et de l'étendue de leurs zones en érosion active, les apports en matériaux interviennent soit par charriage, soit à la suite de coulées de laves torrentielles, les deux types de phénomènes pouvant aussi « cohabiter » sur un même site (Fig. 1). En outre, l'intensité de ces apports peut être très variable selon que l'on observe le fonctionnement ordinaire du torrent ou les manifestations de phénomènes extrêmes.



Figure 1. Le Manival en Isère, un exemple de torrent caractérisé par des processus de transport solide variés (charriage et laves torrentielles) et exerçant une influence significative sur la morphologie de son chenal d'écoulement d'un événement à un autre (photos : Christophe Peteuil)

Les enjeux liés à cette problématique sont multiples. Ils concernent notamment la gestion des cours d'eau de montagne et des dispositifs hydrauliques qui les équipent éventuellement (digues, prises d'eau, barrages de retenue, franchissements routiers...), l'évaluation des aléas torrentiels au droit des zones où des enjeux humains ou économiques peuvent potentiellement être impactés, de même que la définition des crues de projet pour le dimensionnement d'ouvrages de protection.

1.1.2. Les modèles globaux sommaires de prédiction des apports sédimentaires

Les modèles globaux constituent une des voies utilisables pour l'estimation de la fourniture en matériaux d'un torrent dans les projets d'ingénierie. Ces approches d'usage relativement simple consistent à relier la production sédimentaire des torrents aux caractéristiques de leur bassin versant expliquant le mieux l'intensité de ces apports.

La comparaison des modèles publiés depuis une quarantaine d'années montre de nombreuses similitudes, tant dans le choix des variables représentatives que dans la forme des relations proposées par les différents auteurs (Tab. 1). Pour autant, leur application aux torrents des massifs montagneux français conduit généralement à des résultats assez approximatifs et très dispersés (Brochot et al., 2002). Ce constat tient en particulier au caractère rudimentaire de ces approches, relativement à la complexité des phénomènes en jeu, mais aussi à l'imprécision des données utilisées pour leur calage.

En outre, aucun réseau d'observation du transport solide torrentiel n'étant organisé en France, pratiquement aucun de ces modèles n'a été validé sur des données sédimentaires, à la fois représentatives des massifs montagneux français et de qualité suffisamment homogène.

Relation	Nombre de cas	Origine	Référence
$V_{\text{moy}} = 150.S.(I_c - 3)^{2,3}$	15	Autriche	Hampel (1977)
$V_{\text{max}} = K.S.I_m$	1420	Autriche	Kronfellner-Kraus (1985)
$V_{\text{max}} = L_c.(110 - 2,50.I_c)$	82	Suisse	Rickenmann et Zimmermann (1993)
$V_{\text{moy}} = 39.S.I_m^{1,5}.I_G$	62	Italie	D'Agostino et al. (1996)
$V_{\text{moy}} = 800.D_Z^{2,38}.A_i^{1,15}$	33	Canada	Bovis et Jakob (1999)

Tableau 1. Sélection de quelques méthodes globales sommaires multivariées pour l'estimation du volume des laves torrentielles : V_{max} volume maximum de la lave torrentielle (m^3) ; V_{moy} volume moyen de la lave torrentielle (m^3) ; V_{100} volume d'une lave torrentielle de temps de retour 100 ans (m^3) ; S surface du bassin versant (km^2) ; A_i indice des surfaces en érosion active ; I_m pente moyenne du chenal (%) ; I_c pente moyenne du cône de déjection (%) ; L_c longueur du chenal actif (m) ; K facteur de torrentialité ; I_G indice géologique ; D_Z différence d'altitude entre le point haut et le point bas du bassin versant (km)

Cette lacune explique que leur application est assez incertaine sur notre territoire. Elle peut s'avérer très pénalisante lorsqu'elle amène à sur-dimensionner de manière excessive un dispositif de protection, ou dans le pire des cas, lorsqu'elle conduit à sous-estimer l'intensité des aléas torrentiels prévisibles sur un site donné.

1.1.3. Le rôle des plages de dépôt et leur intérêt pour la mesure de la production sédimentaire

Après les années 1970, plusieurs centaines de plages de dépôt ont été construites en France à l'exutoire de bassins versants torrentiels concernés par de forts enjeux. Leur rôle est de forcer l'arrêt de tout ou partie des matériaux transportés en période de crue, au niveau de sites volontairement choisis. Généralement, ces ouvrages sont implantés en amont de tronçons où le dépôt naturel des sédiments aggraverait les risques de débordement dans les secteurs vulnérables (Fig. 2A). La conservation d'un niveau de protection satisfaisant nécessite de procéder à des curages d'entretien après chaque crue majeure (Fig. 2B). Ces dispositifs constituent donc un point de mesure privilégié de la production sédimentaire des bassins ainsi équipés.

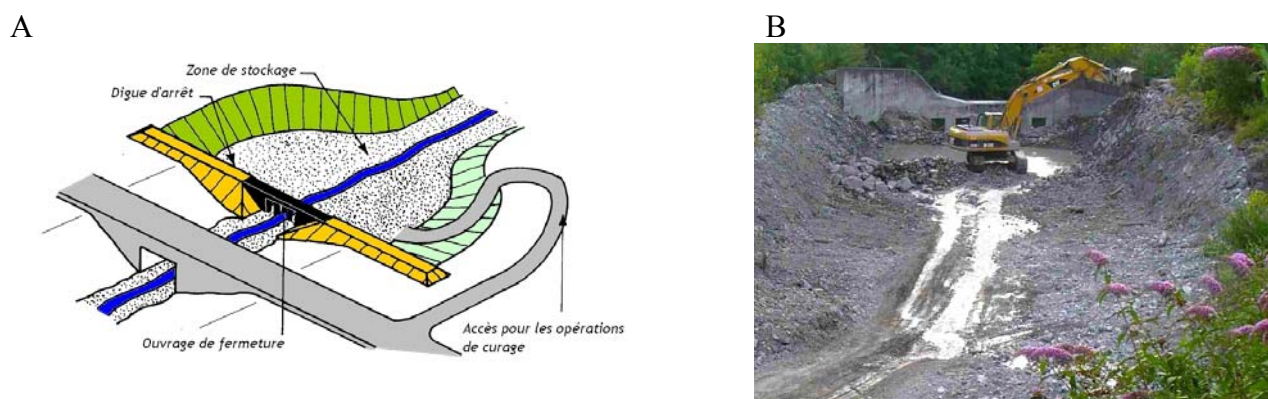


Figure 2. (A) Schéma de principe d'une plage de dépôt (Van Dine, 1996) ; (B) opération de curage mécanique d'une plage de dépôt sur un torrent isérois (photo : Pascal Diot)

L'exploitation des données archivées dans les registres de suivi des ouvrages est donc une voie qui pourrait permettre le développement d'un modèle plus adapté aux torrents français. Elle nécessite au préalable un échantillonnage rigoureux car le niveau de confiance des observations qui ont été faites sur ces dispositifs est très variable d'un site équipé à un autre. La qualité et la fiabilité de ces mesures

dépendent en effet du degré de perméabilité de l'ouvrage, de sa capacité de stockage, de la fréquence des apports et des curages d'entretien, des modalités de quantification des volumes extraits ou du mode de consignation des données recueillies (Fig. 3).



Figure 3. Ouvrages terminaux de plages de dépôts de différents types et de perméabilité faible, moyenne et forte, en allant respectivement de gauche à droite (photos : Christophe Peteuil)

1.2. Recueil de données

1.2.1. Constitution de l'échantillon

Un recensement préliminaire portant uniquement sur les torrents du département de l'Isère a permis de dénombrier près de 130 plages de dépôt. Les ouvrages gérés par le service RTM s'avèrent être pratiquement les seuls pour lesquels la connaissance des données de curage et/ou d'apports solides dus à des événements est à peu près exhaustive sur une durée d'observation minimum de 10 ans. Ces dispositifs domaniaux représentent un peu moins d'un quart de cet effectif.

Pour étoffer ce premier échantillon, le recensement a été étendu aux ouvrages domaniaux réalisés dans les autres départements alpins et dans les Pyrénées. Ceci a permis de porter à 42 le nombre total de torrents constituant l'échantillon de référence. Finalement, la plupart des plages de dépôt se concentre surtout dans les Alpes du Nord, avec 31 sites en Isère, 7 dans la vallée de l'Arc en Savoie, 1 en Haute-Savoie et 3 dans les Alpes-de-Haute-Provence (Fig. 4).

Grâce aux données de production sédimentaire archivées, on dispose alors pour chacun de ces torrents d'une évaluation satisfaisante des apports solides en moyenne annuelle (V_a) et de la connaissance des volumes maximaux (V_{max}) apportés par les événements intervenus depuis la construction de l'ouvrage.

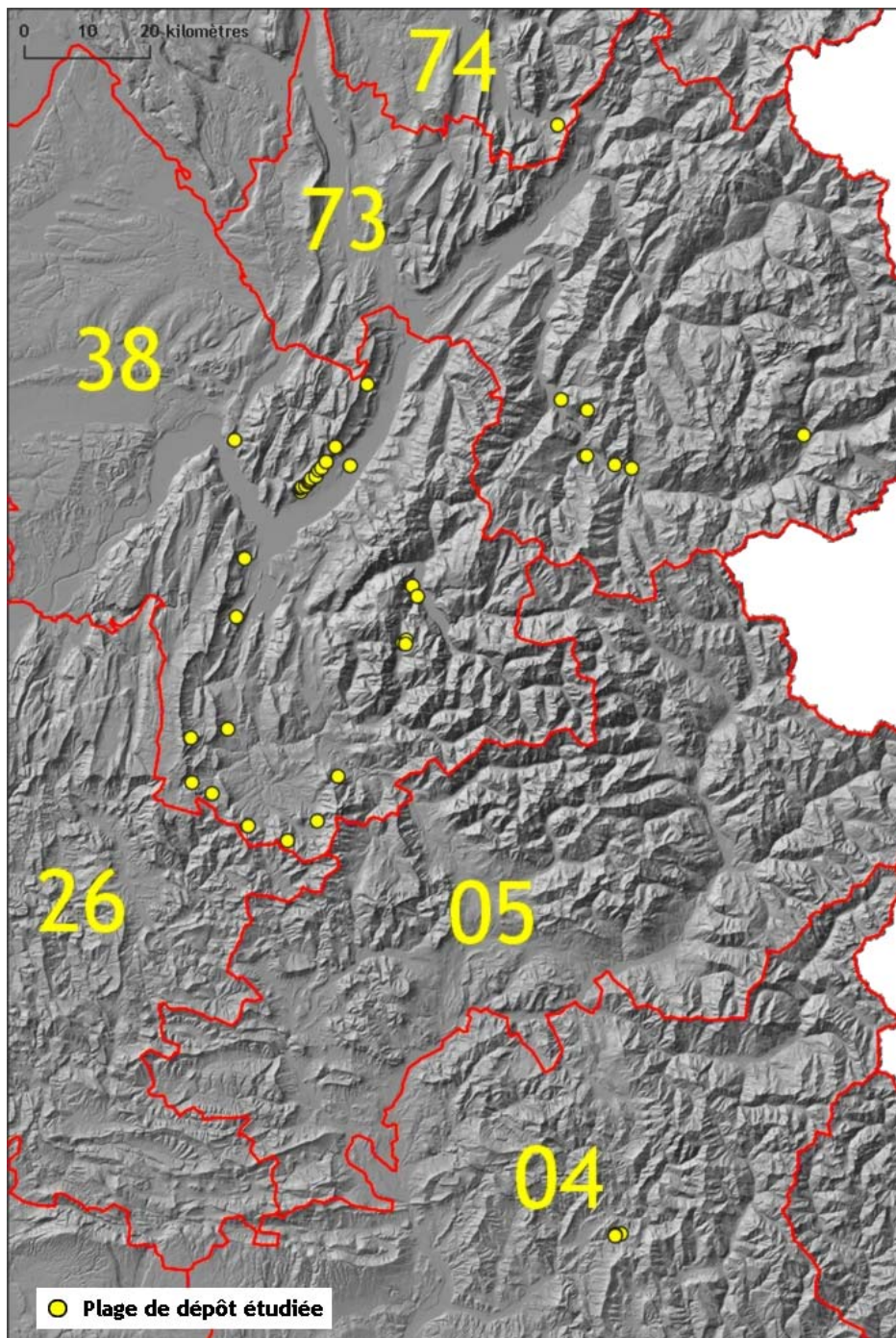


Figure 4. Carte de localisation des plages de dépôt étudiées

1.2.2. Caractérisation des torrents et de leurs bassins versants

Tous les torrents de l'échantillon de référence ont fait l'objet d'une description détaillée portant sur leurs principales caractéristiques géographiques : domaine géologique de rattachement, superficie drainée par le torrent au droit de la plage de dépôt, altitudes caractéristiques, allure générale du profil en long, étendue et dispersion des zones en érosion active, processus érosifs dominants, phénomènes de transport solide prépondérants, historique des événements et des curages... En ce qui concerne les données climatiques, les pluies journalières ont été estimées à partir de cartes synthétiques fournies par Météo France et les précipitations observées sur des pas de temps inférieurs à 24 heures sont tirées de l'atlas expérimental des pluies intenses disponible sur les Alpes franco-italiennes (Djerboua, 2001). Les principales caractéristiques des sites étudiés sont résumées dans le tableau 2.

Variable	Borne basse	Médiane	Borne haute
Surface du bassin versant	0,13 ha	3,2 km ²	46,1 km ²
Surface active connectée au réseau hydrographique	0,11 ha	0,45 km ²	3,5 km ²
Taux de terrains en érosion active connectés au réseau hydrographique ramené à la surface totale	1%	29%	94%
Durée d'observation	10 ans	27 ans	40 ans
Capacité de stockage de la plage de dépôt	300 m ³	9 000 m ³	100 000 m ³
Pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit de la plage de dépôt	2%	17%	28%
Dénivelée entre le point culminant et l'ouvrage	35 m	1075 m	1925 m
Volume solide maximum extrait	5 m ³	7 000 m ³	40 000 m ³
Pluie journalière centennale	85 mm	135 mm	160 mm
Pluie centennale sur 1 heure	25 mm	35 mm	45 mm
Production moyenne annuelle spécifique	30 m ³ /an/km ²	1 200 m ³ /an/km ²	6 800 m ³ /an/km ²
Production maximum spécifique	150 m ³ /km ²	4 400 m ³ /km ²	20 600 m ³ /km ²

Tableau 2. Principales caractéristiques des sites étudiés

Les bassins versants constituant l'échantillon présentent une gamme de superficie relativement étendue, même si un peu moins de 90% d'entre eux ont une taille inférieure à 5 km². Sur un plan géologique, les sites étudiés relèvent essentiellement du domaine sédimentaire. Seuls quelques bassins versants localisés dans la partie iséroise du massif de l'Oisans sont en effet caractérisés par la présence de terrains cristallins.

Le comportement probable des torrents étudiés a été défini selon une démarche « à dire d'expert » qui s'appuie sur l'observation de la morphologie des lits et des dépôts torrentiels. Cette approche se trouve assez bien confortée par la classification établie par Marchi et Brochot (2000) à partir d'indices morphologiques (Fig. 5). Tous les types de phénomènes de transport solide sont ainsi représentés, même si une majorité de torrents semble uniquement produire des laves torrentielles.

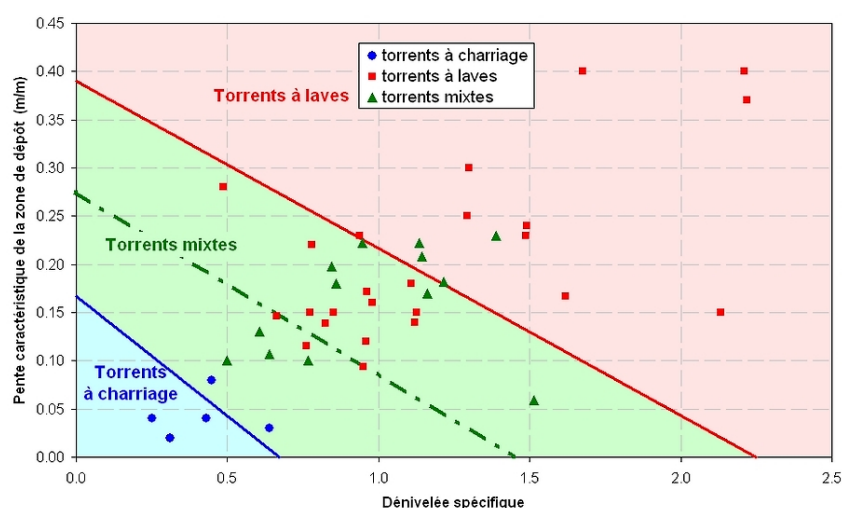


Figure 5. Confrontation des résultats d'une approche experte et d'une approche morphométrique pour la classification des processus de transport solide des torrents étudiés

La définition de l'état de couplage entre les versants et les lits a également fait l'objet d'une attention particulière afin de délimiter les surfaces contribuant effectivement à la recharge sédimentaire des torrents. Certaines zones actives s'avèrent en effet déconnectées du réseau hydrographique et les

sédiments produits restent de ce fait stockés sur les pentes ou sur des terrasses éloignées du chenal d'écoulement.

La démarche suivie consiste, dans un premier temps, à délimiter les zones en érosion active visibles sur les orthophotos de l'Institut Géographique National (IGN). Par souci d'homogénéité et par confort visuel, l'échelle de travail retenue pour ce zonage est le 1/2000^{ème}. La connexion effective des zones en érosion active avec le réseau hydrographique est ensuite appréciée en examinant si l'un ou l'autre des deux critères suivants est vérifié (Fig. 6) : soit le couplage versant-lit est directement visible sur l'orthophoto ; soit il ne l'est pas mais les cartes topographiques attestent de la présence d'un thalweg potentiellement actif reliant la zone en érosion et le chenal d'écoulement principal (on a considéré arbitrairement que les thalwegs potentiellement actifs en cas de crue correspondaient à tous les cours d'eau permanents et temporaires représentés, respectivement, par des lignes bleues continues et tiretées sur les cartes IGN au 1/25000^{ème}). Cet inventaire cartographique a fait l'objet d'une digitalisation manuelle sous ArcGIS.

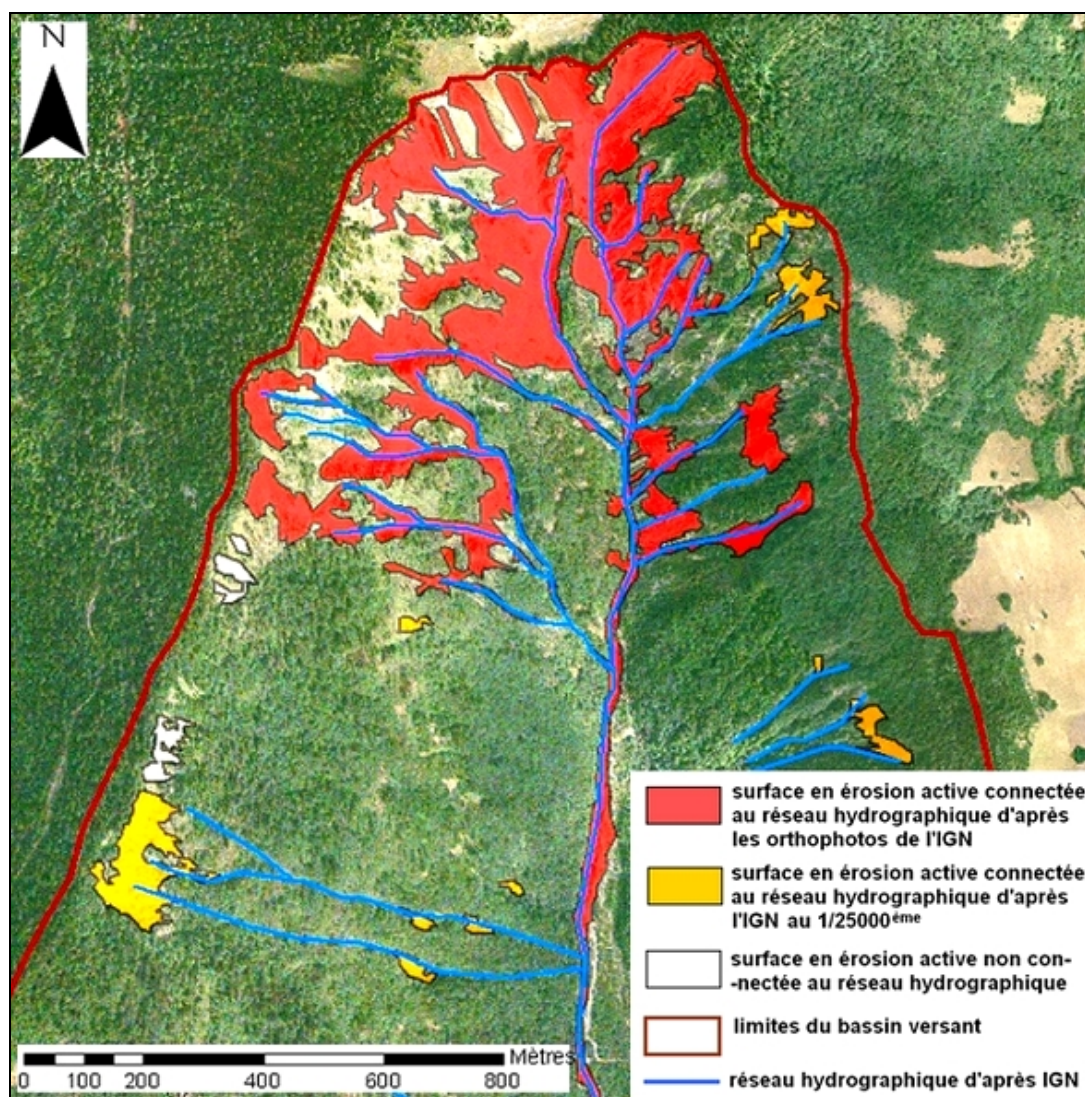


Figure 6. Degré de connexion des zones en érosion active du torrent du Manival en Isère

1.2.3. Analyse fréquentielle

Même si les données recensées sont entourées d'un niveau d'incertitude probablement important, une valorisation de ces informations a été tentée dans la perspective d'une application à un domaine de l'ingénierie où les connaissances sont encore relativement rares.

Cette démarche a consisté à mener une analyse fréquentielle sur les données de production sédimentaire des sites rassemblant un nombre minimal de 5 observations (Fig. 7). Les méthodes classiquement mises en œuvre en hydrologie ont donc été appliquées ici aux volumes solides afin d’estimer les quantiles caractéristiques de la production de sédiments (V10, V20, V50 et V100). Un ajustement à une loi de Gumbel a été retenu car cette loi s’avère finalement assez bien adaptée pour représenter la distribution du volume maximal annuel produit par un torrent (Brochot, 2000).

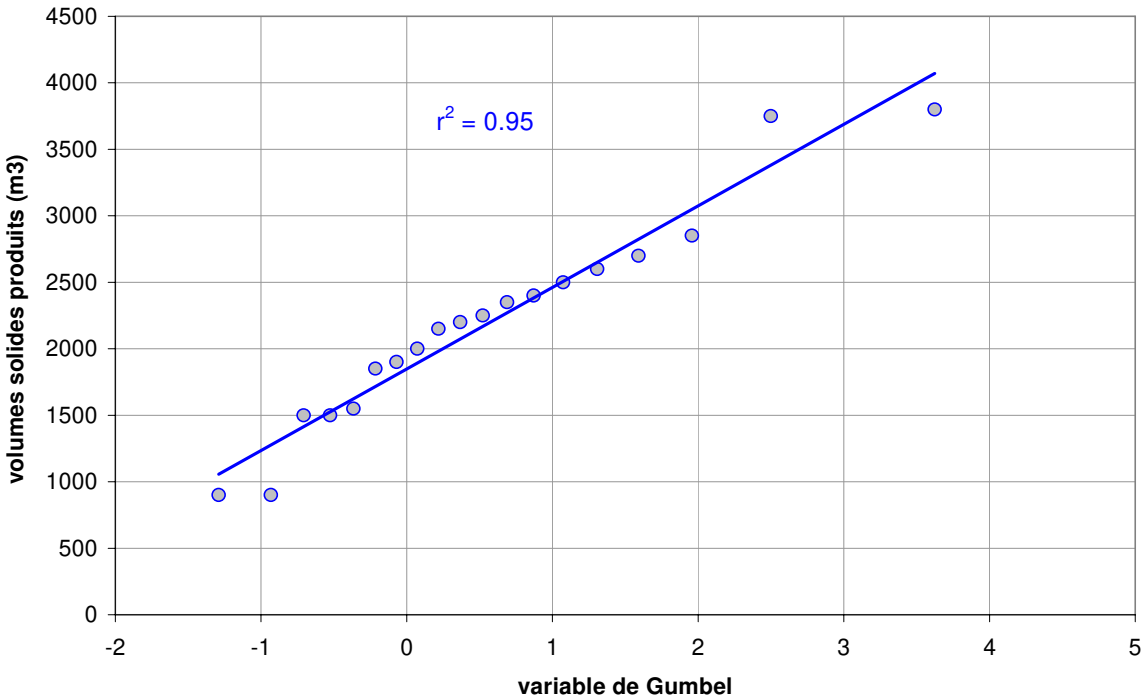


Figure 7. Ajustement statistique des données de production sédimentaire du torrent du Laval (04) à une loi de Gumbel

Cette analyse n’a finalement pu être engagée que sur 33 torrents disposant de chroniques suffisamment étoffées, parmi ceux sélectionnés initialement. Selon qu’une approche « à dire d’expert » ou qu’une approche morphométrique est considérée pour évaluer le processus de transport solide prépondérant, le mode de fonctionnement des torrents issus de cette sélection se répartit de la manière suivante (Tab. 3):

Approche	Processus de transport solide prépondérant		
	Laves torrentielles	Mixte	Charriage
A dire d’expert	22	6	5
Morphométrique	8	22	3

Tableau 3. Répartition du nombre de torrents de l’échantillon de calage selon l’approche considérée pour évaluer la typologie du processus de transport solide prépondérant

1.3. Résultats

1.3.1. Estimation des volumes moyens annuels

Dans un premier temps, on s’est intéressé aux 42 bassins versants pour lesquels des informations relatives aux volumes moyens annuels sont disponibles (Va). L’évolution de la valeur de ce paramètre

a été analysée en fonction de la superficie totale du bassin versant (S) puis de la superficie des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique (SA).

Dans les deux cas, on constate une assez grande dispersion des points considérés autour de la droite de régression (Fig. 8A et B). Pour une valeur de superficie donnée, des écarts allant jusqu'à deux ordres de grandeur sont ainsi observés. Les meilleures corrélations ($r^2 = 0,66$) sont toutefois obtenues en reliant la production sédimentaire en moyenne annuelle à l'étendue des zones actives (SA).

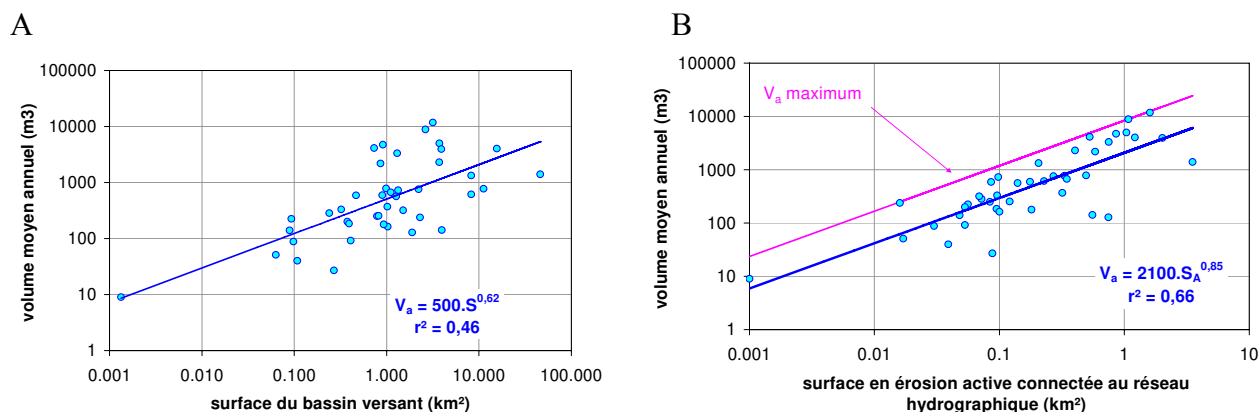


Figure 8. (A) Production sédimentaire en moyenne annuelle en fonction de (A) la taille du bassin versant et (B) de l'étendue des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique

Pour évaluer, en première approche, un ordre de grandeur de la production sédimentaire en moyenne annuelle, l'application de la relation présentée ci-dessous peut être recommandée, en gardant à l'esprit que le résultat obtenu peut éventuellement être majoré par un facteur 4 pour les torrents caractérisés par des processus d'érosion et de transport sédimentaires réguliers et intenses :

$$V_a = 2100.S_A^{0.85} \quad (1)$$

où V_a est le volume moyen annuel (m^3) et S_A représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2).

Pour expliquer plus finement la dispersion de ces données, un travail plus approfondi aurait été nécessaire. Néanmoins, les enjeux relatifs à l'estimation de la fourniture en matériaux des crues correspondant à des temps de retour rares paraissant plus fondamentaux, notre analyse s'est surtout concentrée sur ce dernier point.

1.3.2. Estimation de la production sédimentaire des crues rares

Dans un second temps, on s'est donc intéressé aux bassins versants pour lesquels une estimation des apports sédimentaires correspondants à différents temps de retour a pu être possible grâce au traitement statistique exposé précédemment. Cette démarche a concerné 33 torrents sur les 42 retenus dans l'échantillon de départ. L'analyse s'est essentiellement focalisée sur la prédiction des apports solides correspondant à un temps de retour centennal, qui correspond en France, à la référence couramment prise en compte dans les projets d'ingénierie, comme en matière de prévention des risques liés aux crues des torrents.

En raison de la durée assez réduite des chroniques exploitées (à peine 30 ans en moyenne), l'application des relations exposées dans la suite doit néanmoins inciter à garder un certain recul sur les résultats obtenus. Cette réserve est également renforcée par le fait que les données de calage

utilisées n'intègrent pas nécessairement les événements plus catastrophiques observés historiquement en France. Il va de soi que les estimations fournies par ces relations devront toujours être comparées avec les valeurs obtenues par des approches complémentaires, notamment celles reposant sur des analyses historiques, géomorphologiques ou hydrauliques des sites torrentiels étudiés.

1.3.2.1. Liens entre le volume décennal et les volumes de temps de retour plus rare

Un examen sommaire des relations entre le volume décennal et les volumes correspondant à des temps de retour plus rares a été mené. Les valeurs typiques prises par ces différents ratios sont présentées dans le tableau 4 et la figure 9. Concernant le rapport volume centennal sur volume décennal, en particulier, des valeurs allant de 1,4 à 4,0 sont observées aux extrêmes. La valeur moyenne de ce rapport est de l'ordre de 2,4. Les valeurs les plus basses traduisent une faible aggravation des apports sédimentaires avec la rareté de l'événement. Cette situation est représentative de torrents pour lesquels la production de matériaux est plutôt régulière et relativement peu fluctuante d'une crue à une autre. Les valeurs les plus hautes correspondent au contraire à des bassins versants caractérisés par des apports solides d'une intensité très variable d'une crue à une autre. Ce fonctionnement pourrait éventuellement traduire la nécessité, pour ces torrents, de dépasser une certaine intensité d'écoulement ou un certain seuil de recharge sédimentaire, pour que le transport des matériaux accumulés dans le réseau hydrographique s'intensifie sensiblement.

Ratio	Borne basse	Médiane	Borne haute	Intervalle rassemblant 50% des valeurs observées autour de la valeur médiane
V_{20}/V_{10}	1,1	1,4	1,9	[1,3 ; 1,6]
V_{50}/V_{10}	1,3	2,0	3,1	[1,6 ; 2,5]
V_{100}/V_{10}	1,4	2,4	4,0	[1,9 ; 3,1]

Tableau 4. Valeurs typiques prises par le rapport entre le volume décennal et les volumes correspondants à des temps de retour plus rares

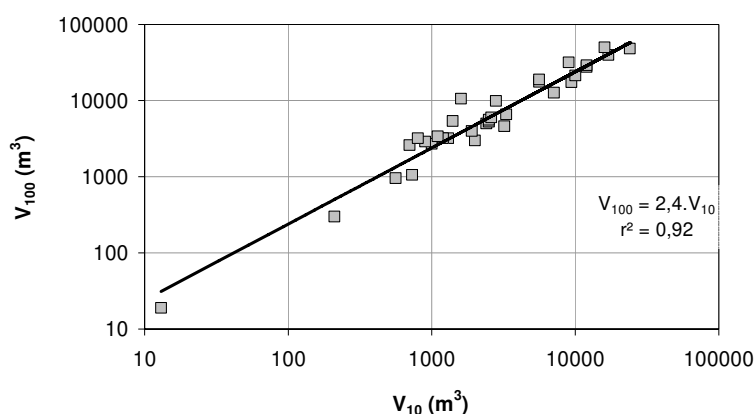


Figure 9. Graphe de corrélation entre le volume solide décennal et centennal

1.3.2.2. Estimation de la production sédimentaire de temps de retour centennal sans distinction du processus de transport solide

Le but de cette analyse est de proposer une approche permettant de prédire, avec le moins d'incertitude possible, la production sédimentaire d'un torrent à partir d'un nombre restreint de variables caractéristiques de son bassin versant. L'examen des relations publiées dans la littérature donne une première idée des paramètres à considérer pour l'établissement d'une relation de ce type. La revue

succincte présentée dans le tableau 1 indique notamment que ces variables concernent essentiellement la morphologie du site et beaucoup plus rarement son environnement climatique.

A partir de ces éléments, une analyse statistique multivariée a été menée afin de tester la pertinence et l'influence d'un grand nombre de paramètres caractérisant le bassin versant. Le tableau 5 présente, à titre d'illustration, la matrice des coefficients de corrélation obtenue pour une sélection de variables expliquant le mieux la production sédimentaire correspondant à un temps de retour centennal.

	log V_{100}	log S_A	log D_Z	log S	log I	log P_{j100}	log P_{h100}
log V_{100}	1.00	0.87	0.82	0.81	0.09	0.05	-0.32
Log S_A	0.87	1.00	0.65	0.77	-0.23	-0.01	-0.18
log D_Z	0.82	0.65	1.00	0.87	0.12	0.12	-0.42
log S	0.81	0.77	0.87	1.00	-0.24	0.16	-0.22
log I	0.09	-0.23	0.12	-0.24	1.00	-0.03	-0.29
log P_{j100}	0.05	-0.01	0.12	0.16	-0.03	1.00	0.71
log P_{h100}	-0.32	-0.18	-0.42	-0.22	-0.29	0.71	1.00

Tableau 5. Matrice des corrélations entre les variables expliquant le mieux la production sédimentaire correspondant à un temps de retour centennal sans distinction du processus de transport sédimentaire, où : V_{100} volume solide correspondant à un temps de retour centennal (m^3) ; S_A surface en érosion active connectée au réseau hydrographique (km^2) ; D_Z dénivelée entre le point culminant et le point bas du bassin versant (m) ; S surface du bassin versant (km^2) ; I pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit de la plage de dépôt (m/m) ; P_{j100} pluie journalière centennale (mm) ; P_{h100} pluie centennale sur 1 heure (mm)

Une série de tests itératifs a ensuite permis d'établir plusieurs relations statistiques. La performance de ces modèles a été évaluée à partir des indicateurs suivants (Tab. 6) : le coefficient directeur de la droite de régression (V_{calc}/V_{est}) et le coefficient de corrélation (r^2) entre les valeurs calculées par le modèle (V_{calc}) et les valeurs estimées selon un ajustement de Gumbel (V_{est}) ; deux intervalles susceptibles d'encadrer les valeurs calculées par le modèle, soit $[2V_{est}/3 ; 3V_{est}/2]$ et $[V_{est}/2 ; 2V_{est}]$; l'écart quadratique moyen ; le critère de Nash.

Variables	$\frac{V_{calc}}{V_{est}}$	r^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen	Critère de Nash
			$[2V_{est}/3 ; 3V_{est}/2]$	$[V_{est}/2 ; 2V_{est}]$		
$S_A, S, I, P_{j100}, P_{h100}$	0,91	0,71	58	79	0,64	0,67
S_A, S, I, P_{h100}	0,92	0,67	58	82	0,71	0,55
S_A, D_Z, S, I	0,82	0,74	58	88	0,58	0,73
S_A, S, I	0,89	0,67	55	79	0,69	0,62
S_A, D_Z, S	0,71	0,48	58	79	0,79	0,50
S_A, I	<u>0,86</u>	<u>0,72</u>	<u>55</u>	<u>82</u>	<u>0,59</u>	<u>0,73</u>
S_A, D_Z	0,71	0,41	58	79	0,86	0,41
S_A	0,76	0,36	39	64	0,96	0,27

Tableau 6. Performance des différentes relations empiriques testées selon le nombre et le type de variable retenu ; les valeurs soulignées figurant en italique concernent la relation (2) recommandée par l'étude. Pour mémoire, une parfaite adéquation entre les valeurs calculées et les valeurs estimées se traduit par : une valeur égale à 1 pour le rapport V_{calc} sur V_{est} , pour le coefficient de corrélation r^2 et pour le critère de Nash ; une valeur nulle pour l'écart quadratique moyen ; un taux de 100% pour la proportion de valeurs calculées comprises dans les intervalles considérés.

Pour choisir la relation la plus pertinente, trois critères ont finalement été considérés : le niveau de performance du modèle ; le nombre de paramètres explicatifs, limité au maximum à 3, par simplicité d'usage mais aussi pour assurer un ratio approprié entre le nombre de cas et de variables ; la nécessaire indépendance entre les variables explicatives du modèle.

Sur ce dernier point, en particulier, il a pu être vérifié l'existence d'une colinéarité faible mais réelle ($r^2 = 0,65$) entre la surface du bassin versant (S) et la surface en érosion active connectée au réseau hydrographique (SA). En conséquence, les relations mêlant ces deux variables ont systématiquement été éliminées.

Le modèle à deux variables proposé s'exprime finalement de la manière suivante :

$$V_{100} = 112700.SA^{0,93}.I^{0,75} \quad (2)$$

où V_{100} est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m^3), SA représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2) et I est la pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit de la zone étudiée (m/m). Cette notion est précisée dans l'encadré 1.

Le tableau 6 et la figure 10 précisent le niveau de performance de ce modèle. En moyenne, une sous-estimation de l'ordre de 14% est observée sur les volumes calculés, ce qui ne va pas dans le sens de la sécurité. L'intervalle $[2V_{est}/3 ; 3V_{est}/2]$ représente un intervalle rassemblant 58% des valeurs calculées par la relation (2). Pour l'intervalle $[V_{est}/2 ; 2V_{est}]$, cette proportion est de 82%.

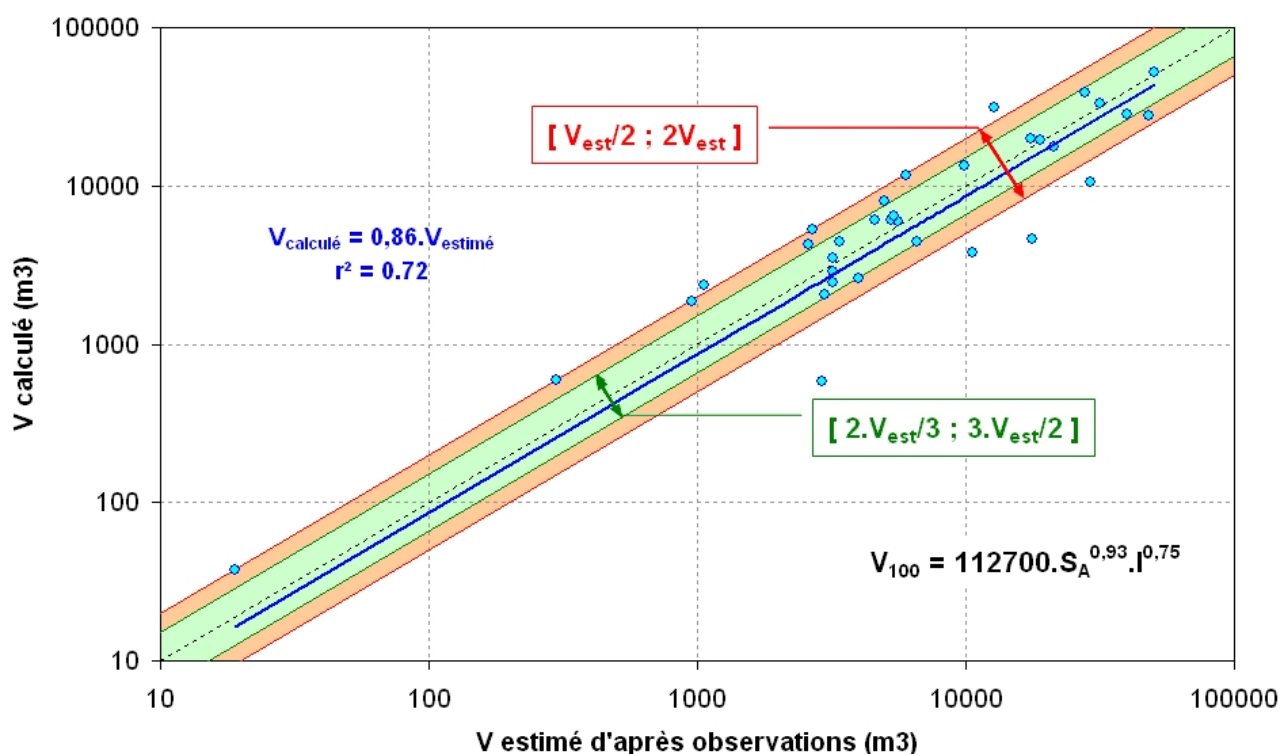


Figure 10. Reconstitution de la production sédimentaire de temps de retour centennal à partir de la relation (2)

La structure de la relation (2) s'avère globalement proche des modèles présentés en introduction, ce qui est plutôt rassurant. Comme la majorité de ces modèles, les données climatiques ne sont pas significatives pour expliquer l'importance de la production sédimentaire. Dans ces conditions, la portée du modèle proposé est plutôt régionale.

Son originalité se trouve toutefois dans la prise en compte de la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique, qui est une variable fortement corrélée à l'intensité des apports solides. D'un point de vue conceptuel, ce paramètre de surface semble représenter le potentiel

de production sédimentaire du bassin versant, alors que la variable de pente peut sans doute être interprétée comme un terme de capacité de transport des sédiments dans le réseau hydrographique.

Même si ce modèle est applicable, a priori, à tous les types de torrents, il faut garder à l'esprit qu'il est calé sur une majorité de torrents « à laves » et de torrents mixtes. La reconstitution des données de production sédimentaire relative aux quelques torrents où le transport solide intervient plutôt par charriage s'est néanmoins avérée satisfaisante en appliquant la relation (2). En considérant ces seules données, on observe en effet une légère surestimation des volumes calculés qui atteint près de 4% en moyenne.

Si des données de nature et de qualité comparables étaient disponibles en abondance sur d'autres torrents, une validation de ce modèle aurait bien sûr été envisageable à partir d'un échantillon indépendant. Cette lacune constitue une limite évidente de l'approche développée et du modèle proposé. Elle ne saurait toutefois être comblée que par la mise en place pérenne d'un véritable observatoire français de l'érosion torrentielle.

1.3.2.3. Estimation de la production sédimentaire de temps de retour centennal spécifique aux torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles

L'échantillon précédent a été raffiné afin d'évaluer si une approche spécifique pouvait être proposée pour les torrents où le déclenchement de laves torrentielles est possible. Cette démarche a conduit à éliminer tous les cours d'eau pour lesquels le transport solide par charriage prédomine. Ce second échantillon est donc constitué de 22 torrents « à laves » et de 6 torrents mixtes.

L'approche exposée dans le paragraphe précédent a été appliquée à ce nouvel échantillon de données. L'analyse statistique multivariée amène dans un premier temps à établir la matrice des coefficients de corrélation entre la production sédimentaire de temps de retour centennal et une sélection de variables explicatives (Tab. 7).

	log V_{100}	log S_A	log S	log D_z	log P_{j100}	log P_{h100}	log I
log V_{100}	1.00	0.84	0.77	0.71	-0.05	-0.07	-0.23
log S_A	0.84	1.00	0.57	0.41	-0.16	-0.05	-0.31
log S	0.77	0.57	1.00	0.83	-0.07	-0.10	-0.26
log D_z	0.71	0.41	0.83	1.00	-0.20	-0.33	-0.08
log P_{j100}	-0.05	-0.16	-0.07	-0.20	1.00	0.87	0.17
log P_{h100}	-0.07	-0.05	-0.10	-0.33	0.87	1.00	0.01
log I	-0.23	-0.31	-0.26	-0.08	0.17	0.01	1.00

Tableau 7. Matrice des corrélations entre les variables expliquant le mieux la production sédimentaire correspondant à un temps de retour centennal pour des torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles, où : V_{100} volume solide correspondant à un temps de retour centennal (m^3) ; S_A surface en érosion active connectée au réseau hydrographique (km^2) ; D_z dénivelée entre le point culminant et le point bas du bassin versant (m) ; S surface du bassin versant (km^2) ; I pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit de la plage de dépôt (m/m) ; P_{j100} pluie journalière centennale (mm) ; P_{h100} pluie centennale sur 1 heure (mm)

Une série de relations statistiques est ensuite établie de manière itérative puis la performance de chaque expression est testée (Tab. 8).

Variables	V_{calc}	r^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen (m^3)	Critère de Nash
	V_{est}		$[2V/3; 3V/2]$	$[V/2; 2V]$		
$S_A, S, P_{j100}, P_{h100}$	0,90	0,78	70	93	0,49	0,78
S_A, S, P_{j100}	0,82	0,75	59	89	0,52	0,75
S_A, D_Z, P_{j100}	0,90	0,78	70	96	0,49	0,78
S_A, D_Z, S	1,00	0,82	67	96	0,48	0,82
S_A, D_Z	<u>0,97</u>	<u>0,82</u>	<u>70</u>	<u>93</u>	<u>0,48</u>	<u>0,82</u>
S_A	0,72	0,59	41	78	0,63	0,66

Tableau 8. Performance des différentes relations empiriques testées selon le nombre et le type de variable retenu ; les valeurs soulignées figurant en italique concernent la relation (3) recommandée par l'étude

Le choix de la relation la plus pertinente repose sur les mêmes critères que ceux qui ont conduits à retenir la relation (2). Cette démarche nous amène à recommander l'utilisation de la relation (3) pour l'estimation de la production sédimentaire de temps de retour centennal spécifique aux torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles :

$$V100 = 0,4.SA^{0,60}.DZ^{1,55} \quad (3)$$

où V100 est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m^3), SA représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2) et DZ est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant (m).

Conceptuellement, la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique détermine le potentiel de production sédimentaire du bassin versant. La dénivelée maximum peut plutôt être considérée comme un terme d'énergie potentielle. Le poids de cette variable est assez significatif compte tenu de la valeur de l'exposant auquel elle est associée.

Contrairement à la relation (2), qui intègre des données de charriage, la pente n'est pas prise en compte dans la relation (3). Ce constat n'est pas choquant car sur les torrents « à laves », la pente est à considérer plus comme un facteur de déclenchement permanent que comme un indicateur expliquant l'intensité de la production sédimentaire. Le mode d'échantillonnage, qui nous a amené à ne choisir que des torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles, intègre donc implicitement ce facteur. En revanche, comme la relation (2), aucune donnée climatique n'est prise en compte dans la relation (3), ce qui donne au modèle proposé une portée essentiellement régionale.

En terme de performance, l'intervalle $[2V_{est}/3 ; 3V_{est}/2]$ rassemble 70% des valeurs calculées par ce modèle. Cette proportion atteint 93% pour l'intervalle $[V_{est}/2 ; 2V_{est}]$. Par ailleurs, la relation (3) sous-estime en moyenne de 3% les volumes calculés (Tab. 8 et Fig. 11).

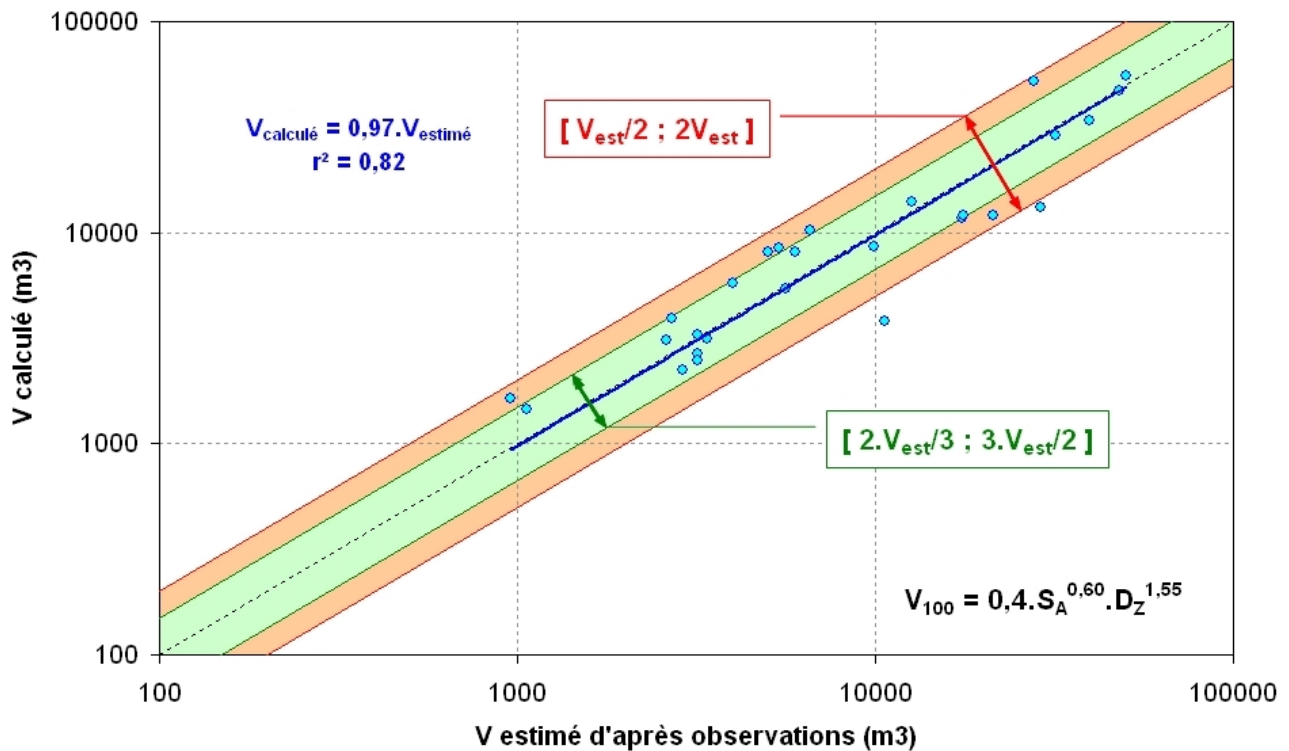


Figure 11. Reconstitution de la production sédimentaire de temps de retour centennal à partir de la relation (3)

Une analyse approfondie des résultats révèle par ailleurs que la relation (3) rend assez bien compte du fonctionnement de sites torrentiels où la production sédimentaire résulte de processus érosifs affectant les versants dégradés du bassin et, dans une moindre mesure, les biefs actifs du réseau hydrographique principal. Cette situation est schématisée par le cas B de la figure 12. La relation (3) semble en revanche surestimer la fourniture en matériaux des torrents dont les apports solides s'expliquent majoritairement par l'érosion des versants actifs du bassin d'alimentation (cas A). De même, les torrents de l'échantillon équipés d'une plage de dépôt relativement perméable relèvent de cette catégorie, ce qui est assez rassurant. Dans ce dernier cas, c'est moins la précision du modèle que la pertinence des mesures qui est à mettre en cause.

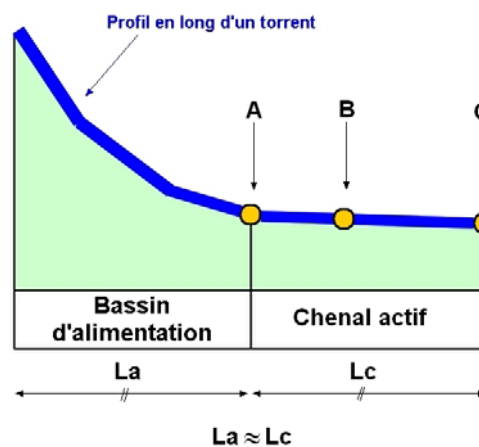


Figure 12. Illustration des différentes situations conduisant la relation (3) à surestimer (cas A) ou à sous-estimer (cas C) la production sédimentaire d'un torrent au droit d'un site donné ; le cas B représente une situation intermédiaire qui conduit à des estimations relativement conformes aux données expérimentales

Lorsque la part de la production sédimentaire due à l'érosion des biefs actifs est comparable, voire supérieure, à celle résultant de l'ablation des versants du bassin d'alimentation, la relation (3) semble au contraire sous-estimer l'importance de la production sédimentaire d'un facteur allant de 2 à 3. Dans de telles situations, l'érosion de volumes solides conséquents peut en effet intervenir au niveau du réseau hydrographique principal par des processus de déstockage affectant des surfaces en plan réduites, mais mobilisant des épaisseurs de dépôts dépassant un à plusieurs mètres (Fig. 1). Ces torrents sont schématiquement représentés par le cas C de la figure 12 et sont plutôt caractérisés par la présence d'un bief actif intermédiaire d'une longueur (L_c) comparable à l'extension longitudinale du bassin d'alimentation (L_a).

Une réflexion sur la définition objective de la longueur des chenaux actifs et sur l'introduction de ce paramètre pour l'établissement d'une relation multivariée mériterait d'être développée afin de vérifier si cette variable s'avère statistiquement significative. Ces éléments ouvrent donc des pistes intéressantes qui pourraient orienter des réflexions complémentaires, notamment si des données d'un meilleur niveau de confiance étaient disponibles sur un nombre plus important de sites.

1.3.3. Estimation des volumes maximaux susceptibles d'être produits en cas de crue extrême

1.3.3.1. Méthode proposée à partir d'une approche régionale

Au-delà des incertitudes liées à la mesure et au traitement statistique des données de production sédimentaire, la complexité des processus d'érosion, d'écoulement et de transport solide qui caractérise les petits bassins versants torrentiels incite généralement à envisager sous quelles conditions un dépassement du scénario centennal peut intervenir, et surtout selon quelle ampleur et avec quelles conséquences. Pour encadrer cette démarche, il est utile de définir une borne supérieure qui rende compte de la production sédimentaire maximale prévisible sur un torrent de taille ou de morphologie donnée. On dispose comme point de départ plusieurs recensements établis à partir de l'exploitation des archives du service RTM, de travaux de recherche universitaire ou d'étude réalisées ponctuellement par des cabinets privés (Brochot, 1998). Ces documents présentent notamment les caractéristiques morphométriques des bassins versants étudiés (surface totale, surface non végétalisée,...) ainsi que les volumes solides observés à l'occasion de différentes crues historiques. Lorsque cela s'est révélé nécessaire, nous avons actualisé ces données à la lumière d'événements intervenus depuis la publication de ces documents. On citera comme exemple le cas du Nant d'Armancette, sur la commune des Contamines Montjoie (74), qui a connu en août 2005 une crue dont les apports solides ont dépassé toutes les observations connues de mémoire d'homme.

Ces données ont ensuite été agrégées avec les observations portant sur les plages de dépôt, ce qui nous permet de connaître, pour 70 bassins versants torrentiels, essentiellement localisés dans la partie nord des Alpes françaises (Fig. 13) : la surface totale drainée par le torrent ; la surface non végétalisée, c'est-à-dire l'enveloppe des surfaces cumulant les zones en érosion active connectées et non connectées au réseau hydrographique ; le volume solide maximum connu sur ce torrent. Pour mémoire, les premières observations disponibles remontent au XIX^{ème} siècle. Cet échantillon intègre donc des événements intervenus à la fin du Petit Age Glaciaire, ce qui pose évidemment la question de la stationnarité de ces données.

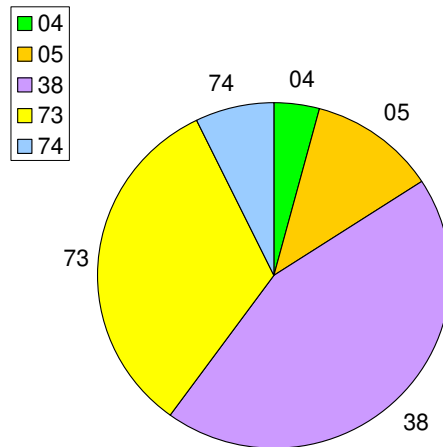


Figure 13. Répartition géographique par département des 70 bassins versants recensés pour l'analyse portant sur les événements extrêmes

Les principales caractéristiques des sites constituant ce nouvel échantillon sont synthétisés dans le tableau 9. Les torrents considérés présentent une gamme de superficie relativement étendue, même si près de 75% des bassins versants drainés ont une taille inférieure à 5 km².

Variable	Borne basse	Médiane	Borne haute
Surface totale du bassin versant	0,13 ha	4,49 km ²	46,1 km ²
Surface non végétalisée	0,105 ha	1,15 km ²	6,79 km ²
Taux de terrains non végétalisés par rapport à la surface totale	1%	31%	94%
Volume solide maximum observé	5 m ³	22 000 m ³	300 000 m ³
Volume solide maximum spécifique	24 m ³ /km ²	6 250 m ³ /km ²	27 300 m ³ /km ²

Tableau 9. Principales caractéristiques des sites pris en compte pour l'analyse des crues extrêmes

A partir de ces données, l'évolution du volume maximum a été analysée en fonction de la superficie drainée par le torrent (Fig. 14). Une telle démarche permet de tracer une courbe enveloppe qui correspond à une valeur spécifique de 25000 m³/km² et dont l'expression est présentée ci-dessous :

$$V_{\max} = 25000.S \quad (4)$$

où $V_{\max}$ est le volume solide maximum (m³) et S est la surface totale du bassin versant (km²).

La limite fixée par la relation (4) exprime, sur la région considérée, une valeur maximum d'apport solide atteinte à la suite de crues affectant des bassins versants caractérisés par un potentiel sédimentaire mobilisable très élevé. Les processus de transport solide à l'origine de ces apports correspondent à des laves torrentielles. Les points excédant cette limite sont associés à des événements caractérisés par des processus d'alimentation particuliers (mouvements de terrain de grande ampleur, déstabilisation de matériaux fraîchement libérés par le recul de glaciers,...) ayant provoqué de nombreuses coulées de laves torrentielles sur un voire plusieurs jours. Ces mécanismes particuliers nous ont amené à les différencier des autres cas de l'échantillon.

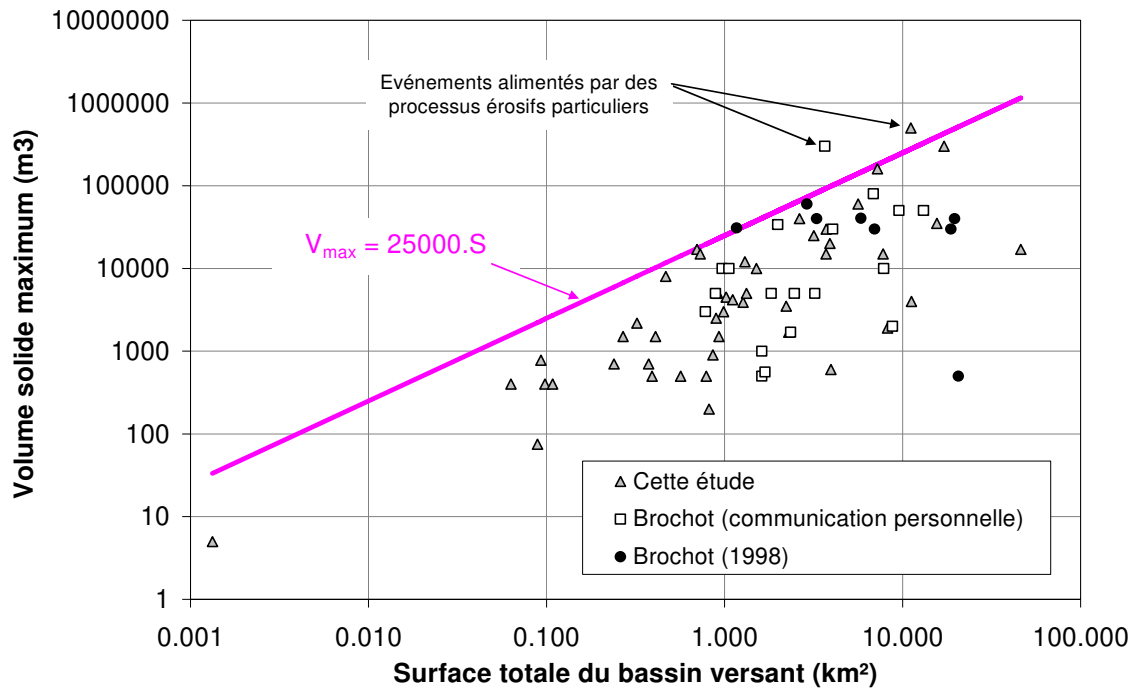


Figure 14. Volume solide maximum en fonction de la surface du bassin versant

Une démarche similaire permet également d’apprécier l’évolution du volume solide maximum avec la surface non végétalisée (Fig. 15). Elle conduit à proposer la relation (5), qui pourra être appliquée préférentiellement aux torrents très dégradés susceptibles d’être affectés par des phénomènes de laves torrentielles :

$$V_{\max} = 120000.S_{NV}^{0,6} \quad (5)$$

où $V_{\max}$ est le volume solide maximum (m^3) et S_{NV} est la surface non végétalisée du bassin versant (km^2).

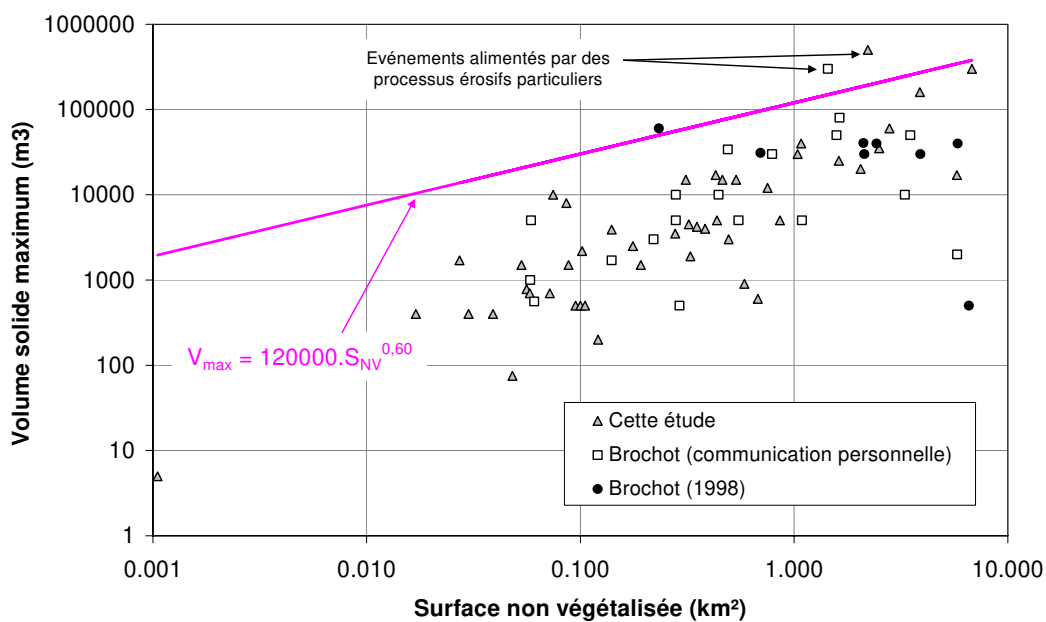


Figure 15. Volume solide maximum en fonction de la surface non végétalisée

1.3.3.2. Comparaison avec des relations calées en dehors des Alpes françaises

Dans la littérature, il existe un nombre important de formules reliant le volume maximum de la lave torrentielle à la surface totale du bassin versant. Le tableau 10 présente une sélection de relations univariées calées à l'étranger, mais néanmoins couramment appliquées en France dans les projets traitant des risques torrentiels :

Référence	Relation	Origine
Takei (1984)	$V_{\max} = 13600.S^{0,61}$	Japon
Van Dine (1985)	$V_{\max} = 10000.S$	Canada
Rickenmann (1995)	$V_{\max} = 17000 \text{ à } 27000.S^{0,78}$	Suisse
D'Agostino (1996)	$V_{\max} = 29100.S^{0,67}$	Italie
Marchi et Tecca (1996)	$V_{\max} = 70000.S$	Italie
Webb et al. (2000)	$V_{\max} = 11808.S^{0,294}$	Etats Unis
Franzi et Bianco (2000)	$V_{\max} = 8959.S^{0,765}$	Alpes occidentales

Tableau 10. Sélection de quelques méthodes globales sommaires univariées pour l'estimation du volume maximum des laves torrentielles : $V_{\max}$ volume maximum de la lave torrentielle (m^3) ; S surface du bassin versant (km^2)

La figure 16 montre une comparaison de la relation (4) avec des différents modèles pour une gamme de surface allant de 1 à 10 km^2 . Il s'agit en effet d'une classe où l'observation de phénomènes de laves torrentielles est la plus fréquente (Bianco et al, 2001). La relation (4) donne finalement des tendances relativement conformes à celles observées pour les relations publiées par Rickenmann (1995) et par D'Agostino (1996).

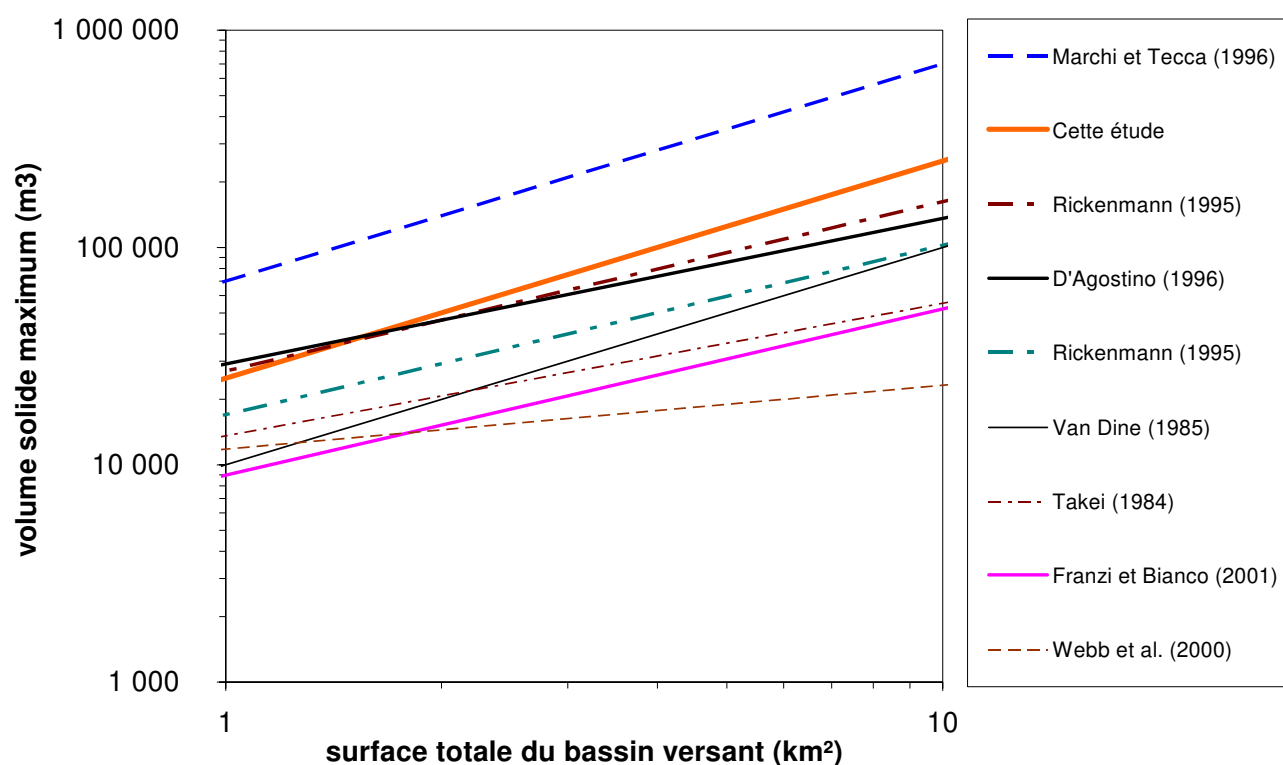


Figure 16. Comparaison de la relation $V_{\max} = 25000.S$ proposée dans cette étude avec des relations similaires publiées par d'autres auteurs

1.4. Conclusion

1.4.1. Synthèse

Ce travail repose sur un recensement relativement exhaustif des données de production sédimentaire mesurées au droit de plages de dépôt équipant des torrents des Alpes françaises et des volumes solides observés à l'occasion de phénomènes historiques d'intensité extrême. Ces données ont permis de caler plusieurs formules globales sommaires permettant de prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par un torrent en moyenne annuelle, mais aussi pour des événements rares et exceptionnels (Tab. 11).

N°	Relation	Processus de transport prépondérant	Nombre de cas	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)	
				[2V/3;3V/2]	[V/2;2V]
(1)	$V_a = 2100.S_A^{0,85}$	Laves torrentielles et charriage	42	-	-
(2)	$V_{100} = 112700.S_A^{0,93}.I^{0,75}$		33	55	82
(3)	$V_{100} = 0,4.S_A^{0,60}.D_Z^{1,55}$	Laves torrentielles	28	70	93
(4)	$V_{max} = 25000.S$		70	-	-
(5)	$V_{max} = 120000.S_{NV}^{0,60}$		70	-	-

Tableau 11. Formules globales sommaires proposées à l'issue de cette étude pour prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par un torrent. Où : V_a est le volume moyen annuel (m^3) ; V_{100} est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m^3) ; V_{max} est le volume maximum de la lave torrentielle (m^3) ; S_A représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2) ; S_{NV} est la surface non végétalisée du bassin versant (km^2) ; S est la surface totale du bassin versant (km^2) ; I est la pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit du site étudié (m/m) ; D_Z est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant (m)

Ces modèles utilisent des paramètres morphométriques relativement simples à mesurer, comme la surface totale du bassin versant, la surface en érosion active connectée ou non au réseau hydrographique, la dénivelée entre le point culminant et le point bas du bassin, la pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit du site étudié.

Les torrents de l'échantillon de calage présentent une gamme de superficie relativement étendue allant de quelques milliers de m^2 à plusieurs dizaines de km^2 . La grande majorité des bassins versants étudiés a néanmoins une taille inférieure à $5 km^2$. Ces modèles offrent aussi la possibilité de prendre en compte le type de processus de transport solide prépondérant pour le torrent, même si les torrents considérés sont pour la plupart susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles. Sur le plan géologique, les bassins versants de l'échantillon de calage relèvent du domaine sédimentaire.

La performance des modèles que nous proposons s'avère globalement satisfaisante comparativement au niveau de confiance accordé à d'autres approches du même type. En outre, l'intérêt et l'originalité de ces modèles tient surtout au fait qu'ils ont été calés sur des données représentatives des torrents des Alpes françaises répondant aux caractéristiques décrites précédemment.

Compte tenu de la durée assez réduite des chroniques exploitées, l'application des relations portant sur les événements de temps de retour centennal doit néanmoins inciter à garder un certain recul sur les résultats obtenus. Cet avertissement nous apparaît d'autant plus justifié que les données de calage utilisées n'intègrent pas nécessairement les événements plus catastrophiques observés historiquement

en France. Les estimations fournies par ces relations devront donc toujours être comparées avec les valeurs obtenues par des approches distinctes reposant, par exemple, sur des analyses historiques, géomorphologiques ou hydrauliques.

1.4.2. Perspectives

Au-delà de ces résultats, ce travail confirme l'intérêt et la nécessité de mettre en place, de manière pérenne, un observatoire de l'érosion torrentielle en France. S'appuyant sur le suivi systématique de certaines plages de dépôt déjà existantes, cet observatoire permettrait de disposer de données fiables relatives à la production sédimentaire des bassins versants torrentiels français.

Cette démarche nécessite (1) de mieux formaliser les protocoles actuels de collecte et d'archivage de ces données et (2) d'étendre le suivi à d'autres sites déjà équipés nous permettant de disposer d'observations relatives à des domaines géographiques peu ou pas représentés dans l'échantillon analysé ici. Pour répondre à ce dernier objectif, il s'avère donc indispensable d'associer étroitement les collectivités territoriales et les maîtres d'ouvrage privés, comme EDF, qui assurent aussi la gestion de ce type de dispositifs.

Une telle démarche permettrait de répondre favorablement aux recommandations formulées dans le retour d'expérience des ingénieurs généraux portant sur les crues torrentielles d'août 2005 en Belledonne (Degoutte et al., 2006) : « Chacun sait que pour se défendre contre un ennemi il faut le connaître. Pour lutter contre les risques des torrents, la première chose à faire, c'est de connaître les pluies et les débits. [...] Le constat n'est pas glorieux. Le dimensionnement de beaucoup d'ouvrages en pied de versant s'appuie sur des hypothèses souvent contestables [...]. Il faut donc développer un réseau hydrométrique et y incorporer les quelques données existantes. [...] On peut considérer que le suivi des volumes prélevés dans les plages de dépôt peut relever aussi de cette connaissance hydrométrique. Rien ne sert d'essayer de mesurer les transports liquides puis de modéliser les transports solides si les bilans annuels sont tronqués de la part la plus importante ».

En Suisse, un réseau de ce type existe déjà depuis au moins une vingtaine d'années (Fig. 17). Sa mise en place a été décidée par l'administration fédérale à la suite d'une série d'événements catastrophiques intervenus à la fin des années 1980. Les données recueillies par ce réseau ont permis d'améliorer significativement le niveau des connaissances relatives au fonctionnement des bassins torrentiels. La conduite d'un retour d'expérience sur ces dizaines d'années de pratique éprouvées pourrait être extrêmement utile pour préparer la mise en place d'un réseau similaire en France.

Souhaitons que les avancées obtenues grâce à ce travail contribuent à convaincre les acteurs impliqués dans la prévention et la protection contre les risques torrentiels de s'engager rapidement dans cette démarche, sans que l'on soit obligé d'attendre la catastrophe de trop...

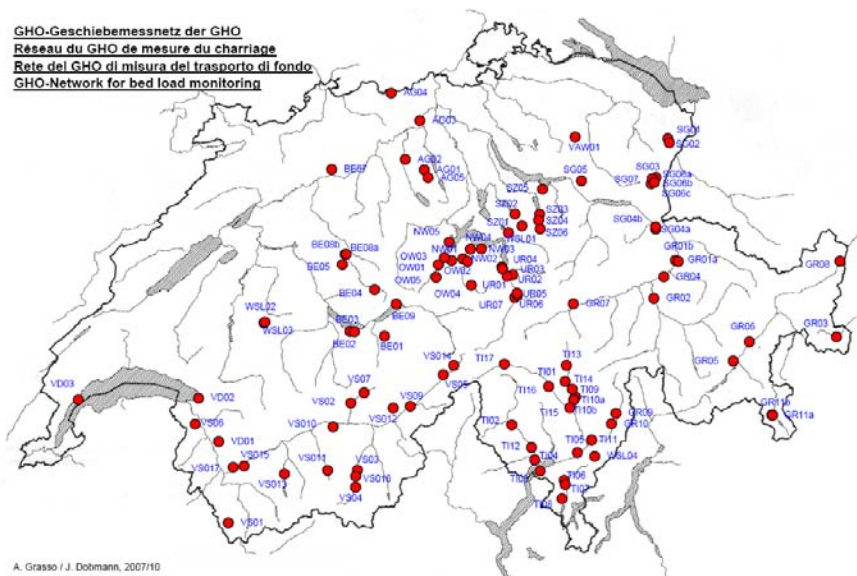


Figure 17. Localisation des torrents rattachés au réseau de suivi du GHO (Source OFEV)

1.4.3. Remerciements

Nous tenons à exprimer notre extrême gratitude aux agents des services RTM en activité et à la retraite qui, grâce à leur dévouement et leur sens du service public, mais aussi grâce à leur attachement à transmettre une certaine mémoire collective, ont permis d'accumuler au fil des décennies une somme d'informations très riche, sans laquelle l'idée initiale de ce travail n'aurait pu finalement aboutir.

Parce qu'elle donne une dimension toute dauphinoise à ce travail, une mention spéciale doit être attribuée à Jean Pierre Requillart et à l'équipe qu'il a dirigée lorsqu'il était à la tête du service RTM de l'Isère. Qu'ils soient ici tous grandement remerciés.

Nous tenons également à saluer la contribution de Mr Gibrat, de l'Association Syndicale de Bresson à Saint-Ismier, qui nous a donné accès à des informations très utiles pour améliorer notre compréhension du fonctionnement de certains torrents de Chartreuse.

Enfin ce projet n'aurait très certainement pas pu aboutir sans l'aide et l'investissement de Benoît Fragnol (2008) puis de Cyril Jousse (2009), dont la qualité des travaux a permis de jeter des bases très solides à cette réflexion. Qu'ils reçoivent ici notre profonde reconnaissance.

2. Suivi morphodynamique et sédimentaire du Manival

2.1. Contexte et objectifs

Le Torrent du Manival (Chartreuse, communes de Saint-Ismier et Saint-Nazaire-les-Eymes) est réputé pour produire des laves torrentielles pratiquement chaque année. Il dispose d'une plage de dépôt de 25 000 m³ qui peut servir de point de contrôle pour la mesure intégrée du transport solide à l'exutoire d'un bassin versant de 3,6 km² (Fig. 18). Ces conditions ont été jugées particulièrement favorables pour réaliser des observations en conditions naturelles sur la dynamique sédimentaire torrentielle. Nous avons donc initié dans le cadre de ce projet un programme de suivi destiné à quantifier les transferts sédimentaires en amont de la plage de dépôt.

La prédiction du transport solide des torrents est particulièrement complexe, comparativement aux rivières de plaine, du fait de l'influence forte des versants et de la multiplicité des processus qui gouvernent le transfert des sédiments dans les lits (Benda et Dunne, 1997). Sa caractérisation implique d'appréhender les zones contributives des versants et d'intégrer la multiplicité des processus qui interviennent dans les transferts sédimentaires internes des systèmes torrentiels. Les approches mécanistes ne parviennent pas à un tel niveau d'intégration, même si quelques tentatives de couplages existent entre les modèles de propagation de laves et de recharge sédimentaire par les glissements de terrain (Bathurst et al., 1997). La géomorphologie propose une autre façon d'aborder le problème en évaluant les transferts sédimentaires à partir de la caractérisation des phénomènes d'érosion et de dépôt et de la construction de bilans sédimentaires (Johnson et Warburton, 2002 ; Gomez et al., 2003 ; Schuerch et al., 2006 ; Miller et Burnett, 2008). Ces approches dites morphologiques, appliquées avec succès en rivières à lits de graviers, n'ont été utilisées qu'à de rares occasions sur les torrents (Remaître et al., 2005 ; Veyrat-Charvillon et Mémier, 2006).

L'objectif poursuivi est de caractériser les réponses sédimentaires du torrent aux sollicitations météorologiques à partir de la reconstitution fine du bilan sédimentaire événementiel du bassin contrôlé par la plage de dépôt. Les efforts ont porté sur la capture des dynamiques morphologiques du chenal principal qui assure le transfert des sédiments depuis le bassin de réception jusqu'à l'exutoire. Il s'agit notamment de s'intéresser plus spécifiquement aux phénomènes de dépôt et de reprise générés par les différents types d'écoulements qui se produisent dans les lits à forte pente (laves torrentielles et charriage hyperconcentré). Des observations réalisées sur les têtes de bassin permettent également de caractériser la production des versants et son couplage avec le chenal principal.

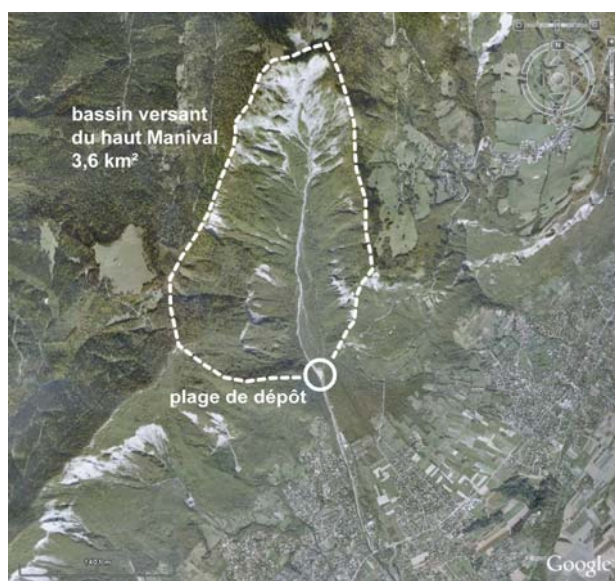


Figure 18. Image Google Earth du haut bassin du Manival contrôlé par la plage de dépôt

2.2. Méthodes et outils

2.2.1. Site d'étude

Le Torrent du Manival entaille la retombée orientale de Chartreuse et a construit dans la vallée du Grésivaudan un cône de déjection souvent présenté comme un des plus vastes des Alpes françaises. La proximité de Grenoble fait que l'emprise urbaine sur le cône atteint un niveau très élevé, d'où la nécessité de protéger les terrains contre l'étalement des laves torrentielles. Dès 1892, des travaux de reboisement et de correction hydraulique ont été entrepris dans le cadre de la politique de Restauration des Terrains en Montagne. Ces interventions pionnières ont été complétées ensuite par l'implantation de nouveaux seuils de correction et d'une plage de dépôt destinée à stopper les écoulements de laves. Le service RTM de l'Isère assure aujourd'hui la gestion des 180 ouvrages de correction implantés dans l'emprise domaniale du bassin (ONF-RTM38, 2008). La plage de dépôt constitue la pièce maîtresse du dispositif de protection. L'ouvrage d'origine, constitué de 2 digues transversales construites en 1926, a été complété en 1991 par un barrage de sortie en béton armé qui a permis d'augmenter la capacité de stockage de la zone de dépôt, estimée à 25 000 m³ (Fig. 19).



Figure 19. Barrage de sortie de la plage de dépôt du Manival (photo : Frédéric Liébault)

Les terrains du Manival s'inscrivent dans les séries sédimentaires jurassiques des chaînes subalpines. Il s'agit d'alternances marno-calcaires très fracturées, qui produisent des quantités importantes de débris stockés sous forme de nappes colluviales de versant. Ces sédiments meubles sont remobilisés par des glissements de terrain superficiels et coulées de débris qui assurent une recharge sédimentaire efficace des têtes de bassin. Dans le bassin de réception, on note également la présence de grands dépôts meubles abandonnés par d'anciens glissements en masse aujourd'hui stabilisés. Ces formations sont remobilisées principalement sous forme de sapements de berges lors des crues.

En amont de la plage de dépôt, le chenal principal du Manival présente une pente moyenne de 16%. On retrouve ici une morphologie typique d'un torrent à laves, avec de nombreuses traces laissées par les coulées (levées latérales, dépôts de fronts, placages de boues, accumulations de blocs...). Les encaissements creusés par les laves sont souvent engravés par d'imposantes nappes de graviers stratifiées qui montrent également l'importance du transport solide par charriage (Fig. 20).



Figure 20. Nappes de graviers progradantes emboîtées dans un dépôt de lave du Manival (photo : Frédéric Liébault)

2.2.2. Suivis topographiques terrestres

L'analyse du bilan sédimentaire en amont de la plage de dépôt repose sur le suivi d'un tronçon de 1,8 km le long duquel nous avons déployé 39 sections en travers matérialisées en berges (Fig. 21). Ce tronçon démarre à l'apex du cône de déjection, qui correspond également à la confluence des 2 principaux ravins amont, et se termine à l'entrée de la plage de dépôt. La pente moyenne est de 16% pour une dénivellation totale de 300 m. Les transects ont été positionnés en prenant soin de densifier la mesure dans les secteurs de forte activité morphodynamique (typiquement les coudes). Une station totale Leica TS02 de longue portée a été utilisée pour le levé topographique des transects (précision angulaire : 1,5 mgon, mesure de distance avec réflecteur : +/-1,5 mm). Les transects ont été levés systématiquement après les épisodes de ruissellement, à condition de disposer d'une interruption de pluie suffisamment longue entre 2 événements. Le levé complet des 39 transects mobilise 2 personnes pendant 2 jours. Un point de mesure est positionné à chaque rupture de pente, ce qui permet une bonne restitution de la topographie. Une ficelle est tendue entre les bornes des transects afin de garantir le bon positionnement des points de mesure qui doivent rester dans l'axe du transect. La reconstitution des volumes érodés et déposés entre les transects est obtenue de la manière suivante :

$$V_e = \frac{S_{eTn} + S_{eTn+1}}{2} D_{Tn,Tn+1} \quad (6)$$

$$V_d = \frac{S_{dTn} + S_{dTn+1}}{2} D_{Tn,Tn+1} \quad (7)$$

Avec V_e et V_d , les volumes apparents érodés et déposés du tronçon compris entre les transects T_n et T_{n+1} , S_e et S_d , les sections érodées et remblayées des transects T_n et T_{n+1} et D , la distance entre les transects T_n et T_{n+1} . Le bilan sédimentaire global entre 2 levés successifs est calculé en faisant le différentiel des volumes érodés et déposés des tronçons. Le principe de conservation de la masse permet d'évaluer le flux solide grossier minimal pour chaque tronçon, selon la formule :

$$V_s = V_e - \Delta_s \quad (8)$$

Avec V_e , le volume solide en entrée, V_s , le volume solide en sortie et Δ_s la variation du stock. Le suivi topographique permet de connaître Δ_s . Comme nous connaissons les sorties grâce au suivi topographique de la plage de dépôt, il est possible de reconstituer un flux sur l'ensemble du chenal principal et d'évaluer les entrées sédimentaires en provenance de la zone de production.

L'opportunité de disposer d'un laser scan Optech dans le cadre d'une collaboration avec UNIL-IGAR nous a conduit à initier un programme de suivi intensif des versants par LiDAR terrestre dans le cadre de ce projet. Une première campagne d'acquisition a été réalisée du 31 mars au 9 avril 2009 et a permis de couvrir près de 80% de la zone de production du bassin. Trois autres campagnes ont ensuite été réalisées en juillet, août et septembre 2009 afin de capturer les changements morphologiques faisant suite aux principaux épisodes pluvieux. Une campagne complète mobilise 2 personnes pendant 2 semaines. La résolution des scans est comprise entre 2 et 10 cm en fonction de la distance de la cible par rapport à l'appareil de mesure dont la portée maximale est de 800 m. Le traitement des données brutes a été réalisée à l'UNIL-IGAR à l'aide du logiciel Polyworks. Après suppression manuelle de la végétation, les scans sont assemblés automatiquement et géoréférencés en utilisant le MNT LiDAR aéroporté comme couche de référence. Les données sont ensuite exportées dans ArcGIS sous forme de MNT afin de procéder au calcul des volumes en érosion et en dépôt.

Un tronçon test de 150 m sur le chenal principal a également été utilisé pour évaluer l'incertitude sur le calcul des volumes par interpolation entre les transects (Fig. 21). Des acquisitions LiDAR terrestres ont été réalisées avant et après les crues afin de disposer d'une évaluation fine de l'érosion et du dépôt par soustraction des MNT de résolution 10 cm dérivés des scans laser. Le volume des atterrissements qui se forment au droit de la plage de dépôt a été calculé de manière identique. Les campagnes de mesure topographique réalisées sur l'ensemble des sites sont synthétisées dans le tableau 12.

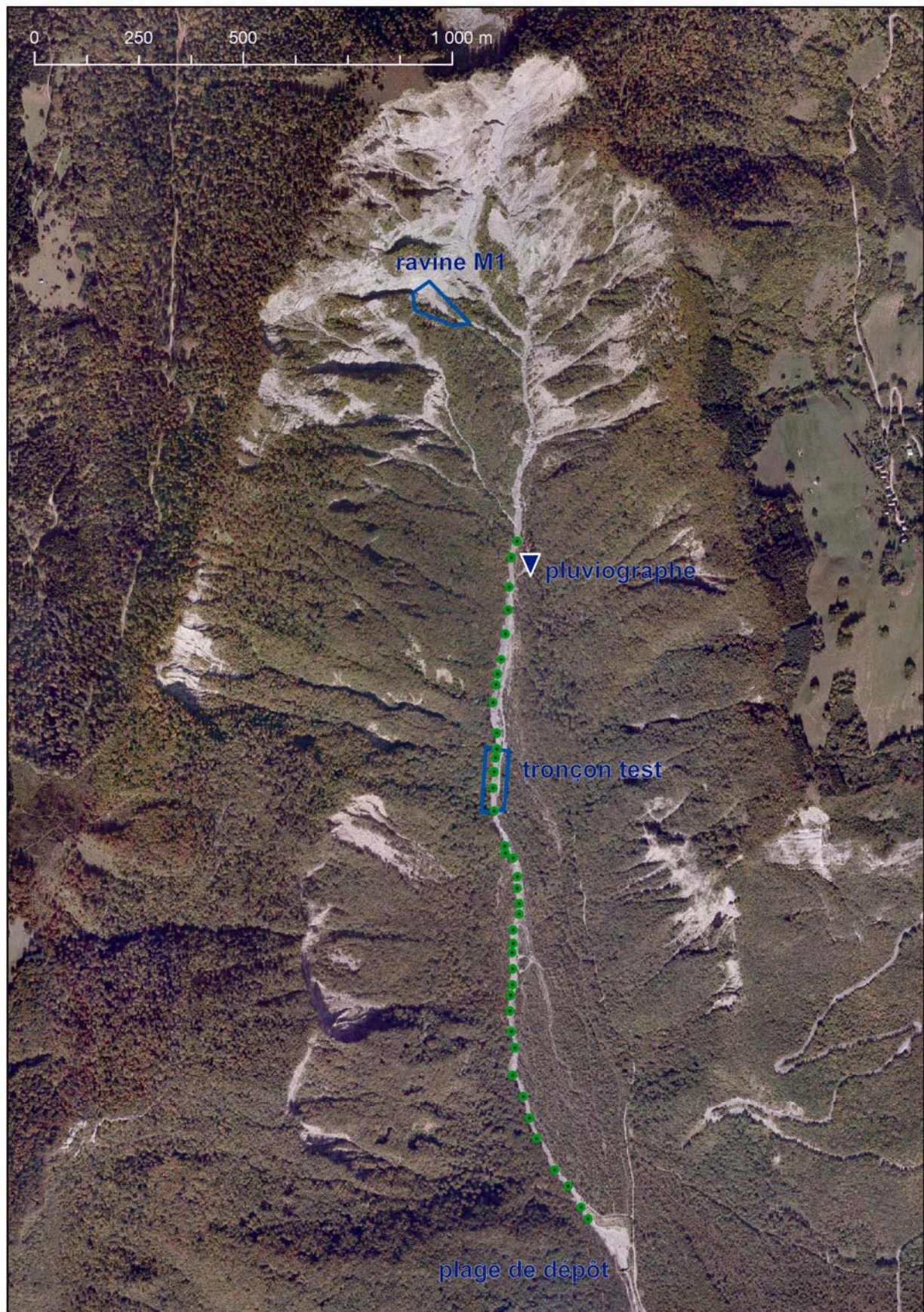


Figure 21. Dispositif de mesure du Manival ; en vert : emplacement des 39 profils en travers pour le suivi topographique du chenal principal ; image © Aerodata International Surveys

Dates	Technique	Cône de déjection	Plage de dépôt	Bassin versant	Chenal principal	Tronçon test	Zones source
27/08/08	lidar aéroporté	x					
06/09/08	lidar aéroporté			x			
31/03-09/04/09	lidar terrestre		x		x	x	x
01/06/09	lidar aéroporté			x			
03/06-06/07/09	station totale				x	x	
29/07-01/08/09	lidar terrestre					x	x
Lave torrentielle du 25/08/2009							
28/08-30/08/09	station totale				x	x	
29/08-30/08/09	lidar terrestre		x			x	x
Crue du 26/09/2009							
07/10-08/10/09	station totale				x	x	
Ruissellements entre le 8 et 24/10/2009							
29/10-16/11/09	lidar terrestre		x		x	x	x
12/11-13/11/09	station totale				x		

Tableau 12. Campagnes d'acquisition topographique réalisées depuis août 2008 sur le site du Manival avec positionnement chronologique des principaux épisodes de ruissellement survenus

2.2.3. Acquisitions LiDAR aéroportées

Des acquisitions LiDAR aéroportées ont été réalisées afin de disposer d'un MNT haute-résolution couvrant la totalité du bassin versant et de son cône de déjection. Trois vols ont été effectués le 27/08/2008, le 06/09/2008 et le 01/06/2009 (Tab. 13). Il était prévu initialement de ne réaliser qu'une seule acquisition sur la totalité du bassin, mais le levé effectué en septembre 2008 n'ayant pas permis d'obtenir une densité de point au sol suffisante pour restituer fidèlement la micromorphologie des versants, un deuxième vol a été effectué en juin 2009, avec un rendu de bien meilleure qualité. Les nuages de point bruts ont été traités par le bureau d'étude Sintegra à qui nous avons confié la prestation (filtrage automatique et manuel des semis de point bruts sous TerraScan et classification des points en sol et sursol). La livraison comprend un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et un MNS (Modèle Numérique de Surface) de résolution métrique.

Dates	27/08/2008	06/09/2008	01/06/2009
Sites	Cône de déjections	Bassin versant	Bassin versant
Vecteur aérien	Hélicoptère Ecureuil AS 350 B3	Avion Cessna 206	Hélicoptère Ecureuil AS 350 B3
Capteur LiDAR	Riegl LMS Q560	ALS 50 MPiA II	Riegl LMS Q560
Hauteur de vol	550 m	1000 m	600 m
Vitesse de vol	20 m/s	45 m/s	15 m/s
Fréquence d'acquisition	133 kHz	97,7 kHz	100 kHz
Précision altimétrique	10 cm	10 cm	10 cm
Précision planimétrique	15 cm	15 cm	15 cm
Densité de points au sol	8,3 points/m ²	4,1 points/m ²	6,9 points/m ²

Tableau 13. Spécifications techniques des acquisitions LiDAR aéroportées réalisées par Sintegra

2.2.4. Suivi des précipitations

Les précipitations sont mesurées depuis octobre 2008 à l'aide d'un pluviographe à auget basculeur de type Rainwise (résolution : 0,14 mm, diamètre du collecteur : 196 mm), connecté à un enregistreur d'événement autonome Hobo d'une capacité maximale de 8000 impulsions. Le pluviographe a été installé dans le haut bassin, à proximité de la cabane forestière, à une altitude de ~850 m (Fig. 22).



Figure 22. Pluviographe installé dans le haut bassin du Manival en octobre 2008

2.3. Résultats et discussion

Trois événements d'intensité modérée ont pu être mesurés dans le cadre du projet : une lave torrentielle survenue le 25 août 2009, une crue à charriage le 26 septembre 2009 et des épisodes de ruissellement entre le 8 et le 24/10/2009 (Fig. 23).

La pluie à l'origine du déclenchement de la lave torrentielle est de nature orageuse, avec un corps d'averse principal dont l'intensité maximale calculée sur un pas de temps de 5 mn a été de 48,9 mm/h (Fig. 24). La soustraction des MNT LiDAR successifs réalisés dans la plage de dépôt nous donne une accumulation sédimentaire de 1837 m³. L'incertitude sur le calcul du volume est estimée à 62 m³ d'après la précision constructeur du laser scan Optech. Le suivi topographique du chenal principal a permis de calculer un déstockage net de 2015 m³ (dépôt : 3200 m³, érosion : 5215 m³). L'incertitude sur le bilan de masse reconstitué à partir des profils en travers est beaucoup plus élevée car la densité de points au sol reste globalement faible. Elle a été caractérisée sur le tronçon test à partir des levés LiDAR terrestres successifs. Nous avons obtenu une différence de 30% entre les estimations déduites des levés LiDAR et des levés par transects (Fig. 25). Malgré l'importance des incertitudes du bilan sédimentaire, il apparaît clairement que l'essentiel de l'exportation solide provient directement de la remobilisation des réserves sédimentaires du chenal principal. Les apports directs en provenance du bassin de réception ont été insignifiants. Ceci est confirmé par l'ampleur des encaissements observés dans la partie supérieure du chenal principal, pourtant équipé de nombreux seuils de correction torrentielle (Fig. 26). Les déstabilisations en masse du lit observées dans ce secteur ont été à l'origine du déclenchement de la lave qui s'est ensuite propagée sans avoir généré des reprises importantes plus en aval.

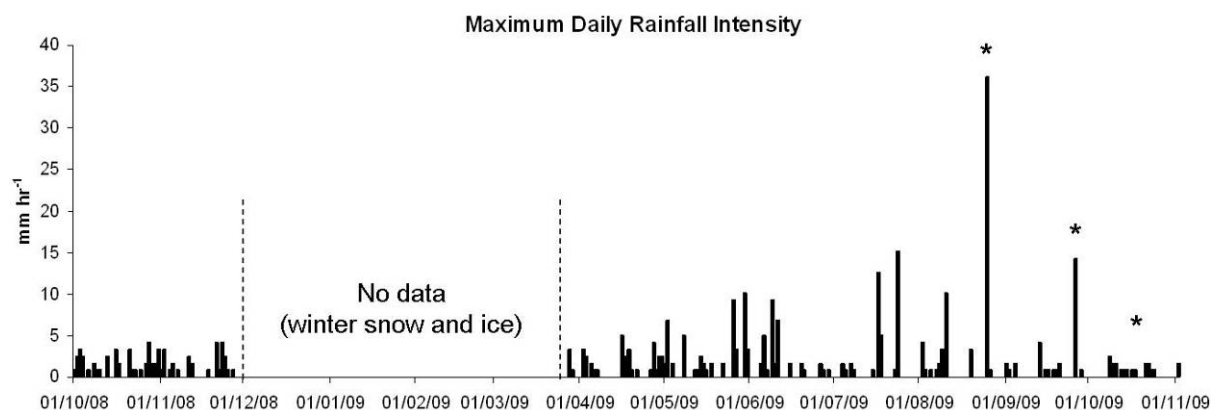


Figure 23. Chronique des intensités journalières maximum selon un pas de temps de 10 mn mesurées depuis octobre 2008 dans le haut bassin du Manival ; les étoiles indiquent les épisodes ayant déclenché une réponse sédimentaire du torrent (transport solide au sein du chenal principal)

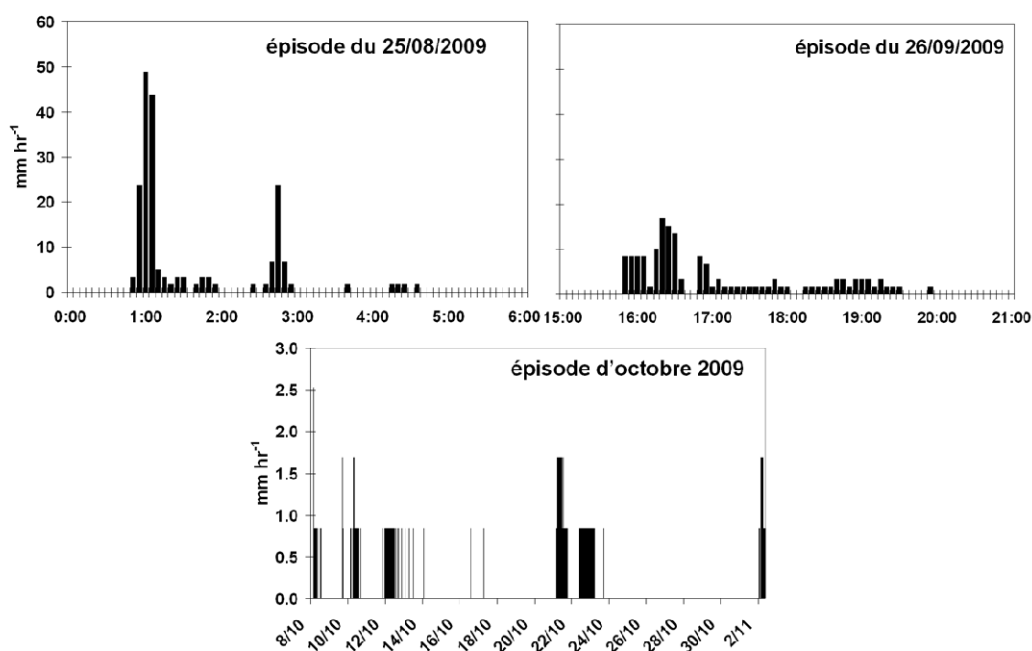


Figure 24. Hyetogrammes des épisodes pluvieux d'août, septembre et octobre 2009 mesurés dans le haut bassin du Manival (intensités mesurées selon un pas de temps de 5 mn)

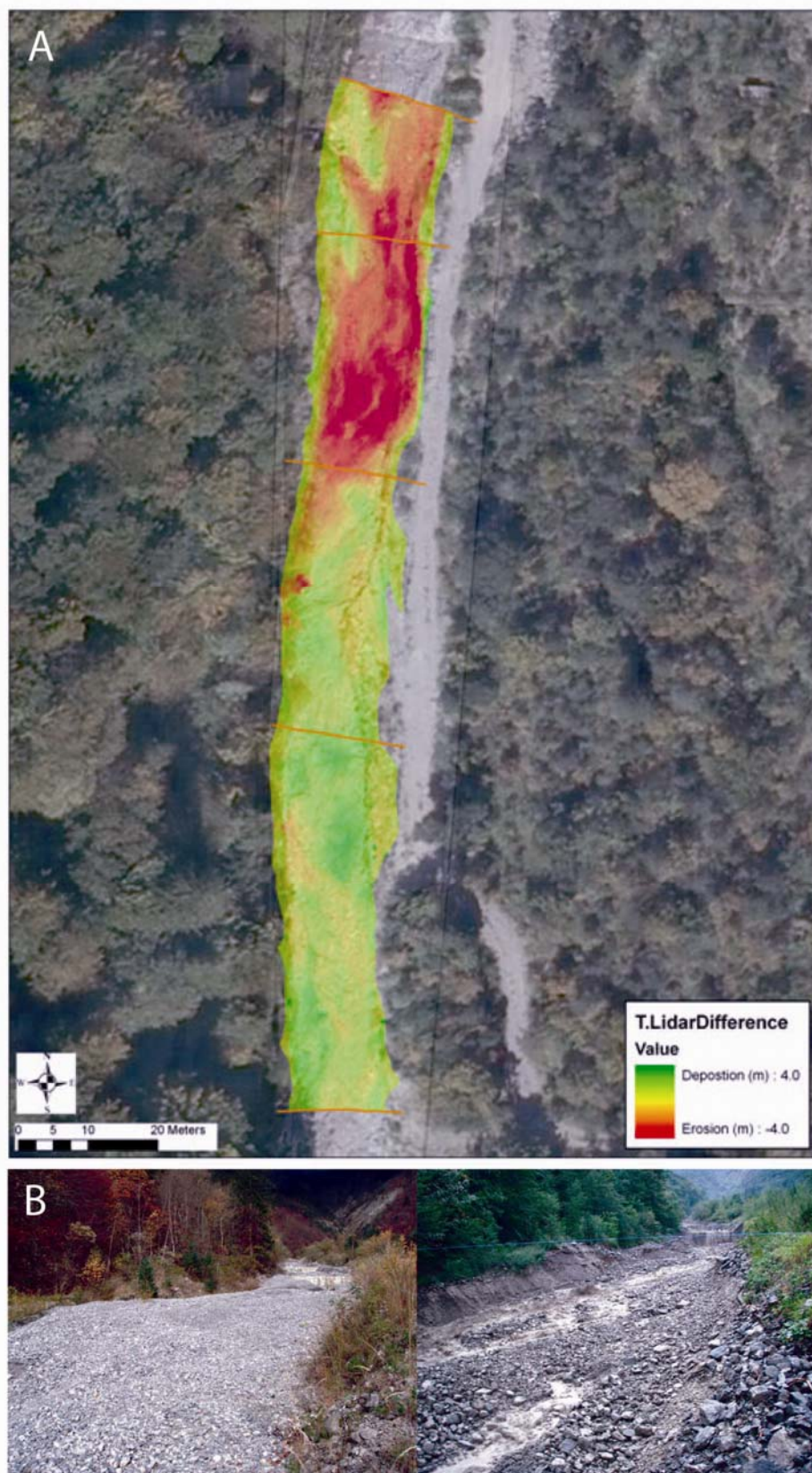


Figure 25. (A) Changements topographiques mesurés au droit du tronçon test à partir des acquisitions LiDAR terrestres réalisées avant et après la lave du 25/08/2009 ; la position des transects apparaît en orange ; le bilan sédimentaire dérivé des données LiDAR donne un déstockage net de 806 m^3 , contre 563 m^3 pour les profils en travers ; les transects sous-estiment de 30% le déstockage car leur position ne permet pas de capturer fidèlement les plus forts encaissements qui se sont produits en amont du tronçon ; (B) séquence de photo illustrant l'érosion du lit sous l'effet du passage de la lave torrentielle (photos : Joshua Theule)

L'événement de septembre s'est produit à la suite d'un épisode pluvieux d'intensité modérée (intensité maximale de 16,9 mm/h) et plus étalé dans le temps (Fig. 24). Aucune trace de lave torrentielle n'a été détectée dans le chenal principal et aucun atterrissement ne s'est formé dans la plage de dépôt. En revanche, le suivi topographique des transects a montré une morphodynamique très active qui témoigne de transferts sédimentaires par charriage intenses, malgré le caractère très modéré des écoulements. Le bilan sédimentaire montre un stockage net de 785 m³ (dépôt : 2195 m³, érosion : 1410 m³). On observe également que les dépôts se sont formés préférentiellement dans les encaissements du mois d'août (Fig. 26). On peut donc estimer que 39% des réserves sédimentaires mobilisées par la lave du 25 août ont été reconstituées par les nappes de charriage de la crue de septembre.

Les pluies du mois d'octobre se sont prolongées sur des journées entières, avec des intensités maximales n'excédant pas 1,6 mm/h (Fig. 24). Elles ont été à l'origine d'épisodes de ruissellement discontinu dans l'espace du fait de l'infiltration des eaux de surface dans les nappes de graviers. Lors des pics d'intensité, nous avons pu observer une morphodynamique active sous l'effet du transport solide par charriage. Le bilan sédimentaire dérivé des transects montre un déstockage net de -89 m³ (dépôt : 1477 m³, érosion : 1566 m³). Les dépôts se sont formés préférentiellement en amont du chenal principal (stockage net de 233 m³), tandis qu'un déstockage est observé plus en aval (déstockage net de -321 m³). La quantification de l'exportation solide n'a pu être réalisée du fait de la présence quasi quotidienne d'engins mécaniques dans la plage de dépôt (opération de curage).

Au final, les événements de septembre et d'octobre ont contribué à recharger près de 50% des remobilisations induites par la lave du mois d'août. On voit également que les dépôts de charriage se sont formés préférentiellement dans les secteurs les plus incisés par la coulée (Fig. 26 et 27).

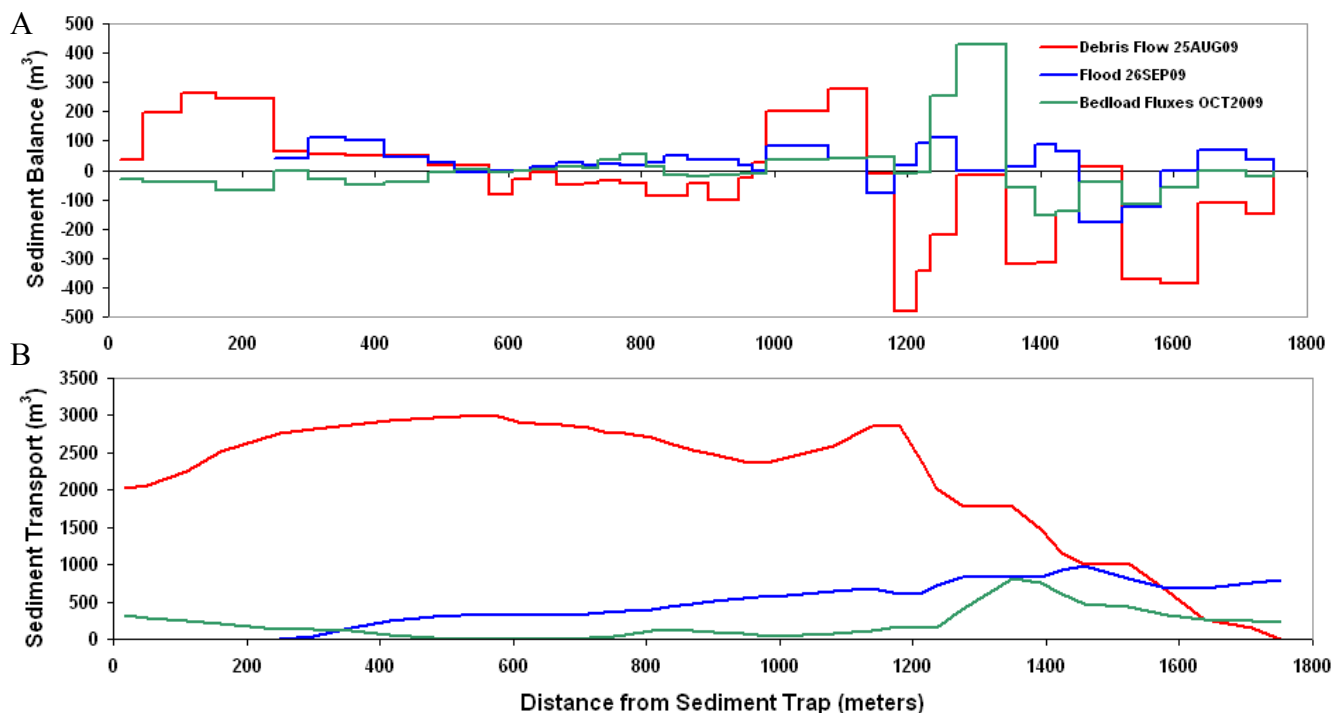


Figure 26. (A) Bilans sédimentaires du chenal principal du Manival dérivés du suivi topographique des transects pour les événements d'août, septembre et octobre 2009 ; (B) flux solides grossiers estimés à partir des bilans sédimentaires

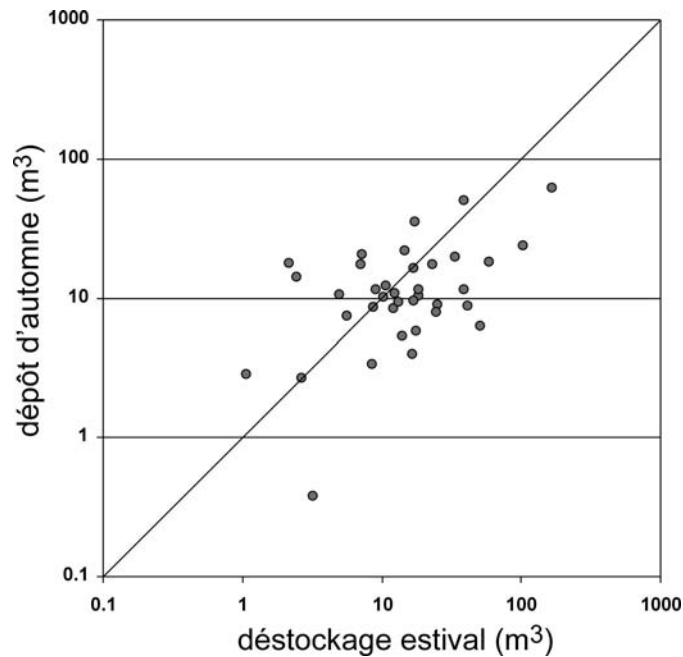


Figure 27. Les dépôts par charriage des crues d'automne se sont formés préférentiellement dans les secteurs fortement incisés suite au passage de la lave du mois d'août

La comparaison des bilans sédimentaires des événements d'août et de septembre est riche d'enseignements vis-à-vis de la cinématique des flux solides du Haut Manival. On s'aperçoit que les exportations solides de la zone source (bassin de réception) de l'événement d'août ont été de 3 ordres de grandeur inférieures à celles de septembre, pour des intensités de pluie pourtant 3 fois supérieures (Fig. 28). Il faut considérer ici le caractère différé dans le temps des réponses sédimentaires aux sollicitations climatiques, qui sont contrôlées par le temps de transit des sédiments dans les chenaux. Les pluies convectives du mois d'août ont été suffisamment fortes pour déclencher des déstabilisations sur les versants, comme l'atteste le suivi LiDAR terrestre de la ravine M1 (Fig. 29). Néanmoins, les volumes mobilisés ont été peu importants, ce qui explique des distances de propagation faibles, ou du moins insuffisante pour obtenir un couplage avec le chenal principal. Les matériaux sont restés stockés dans les têtes de bassin et ce sont ces réserves sédimentaires qui ont été remobilisées lors des ruissellements d'automne. Les LiDAR successifs de la ravine M1 montrent en effet un bilan sédimentaire équilibré, avec 237 m³ d'érosion dans la zone proximale pour 274 m³ de dépôt dans la zone distale. Ces observations montrent que des intensités maximales de 50 mm/h sont insuffisantes pour induire un transfert direct de la recharge sédimentaire des versants vers le chenal principal.

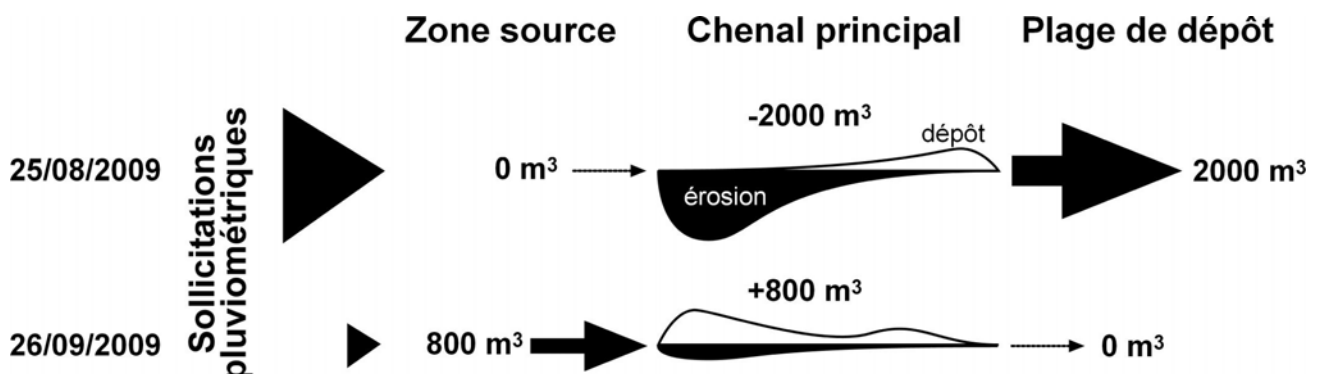


Figure 28. Bilans sédimentaires simplifiés des événements d'août et de septembre 2009

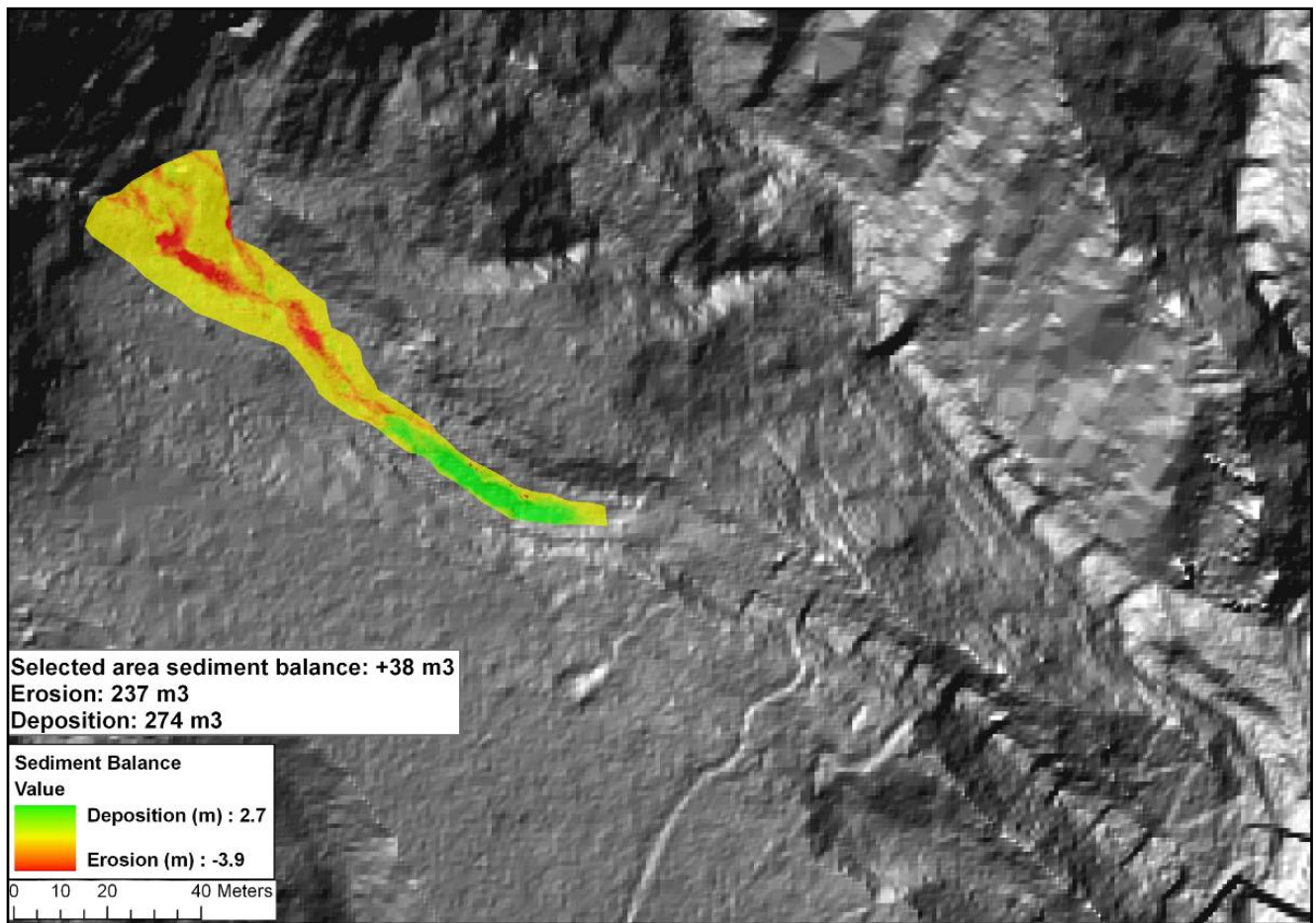
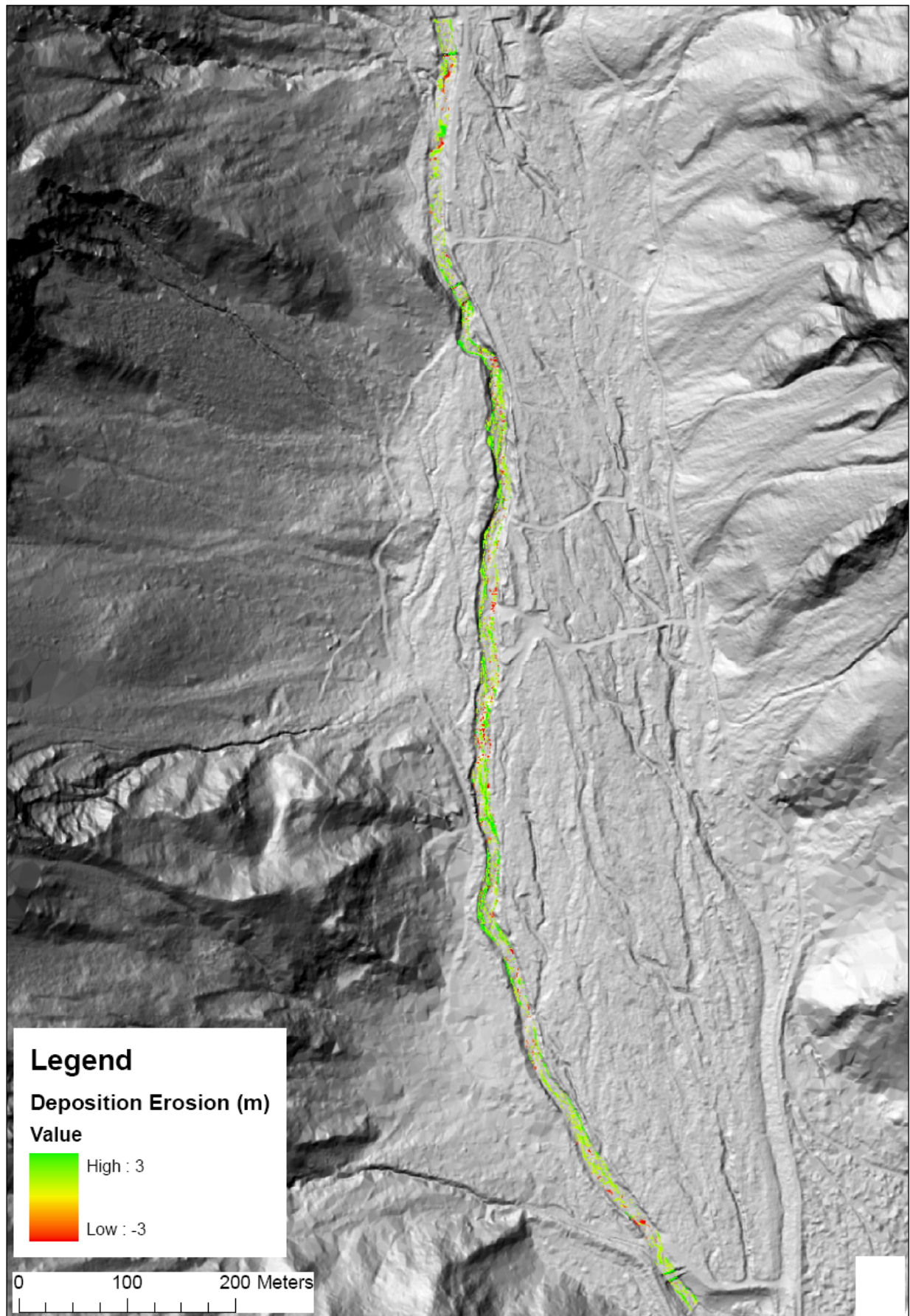


Figure 29. Distribution spatiale de l'érosion et du dépôt obtenue par LiDAR terrestre sur la ravine M1 après l'événement du 25/08/2009 ; on voit que les déstabilisations linéaires proximales se sont déposées à proximité des zones de départ et que les matériaux n'ont pas transité jusqu'au chenal principal

Les levés LiDAR aéroportés de 2008 et 2009 ont été utilisés pour évaluer l'évolution des stocks sédimentaires du chenal principal à partir d'une comparaison des MNT. Les résultats obtenus montrent une tendance au stockage sédimentaire, avec un bilan net de 1855 m³ (érosion : 139 m³, dépôt : 2004 m³). Le référentiel 2008 est constitué du MNT à pas métrique issu du vol effectué le 06/09/2008. L'état du chenal torrentiel à cette date correspond à un lit encaissé après le passage d'une lave torrentielle qui s'est produite le 06/07/2008 et dont le volume a été estimé à 7000 m³ par le service RTM (ONF-RTM38, 2008). Les nuages de points bruts n'étant pas disponibles, nous n'avons pu effectuer notre propre filtrage afin d'améliorer la restitution topographique du chenal. En revanche, le filtrage manuel sous Pif Edit du nuage des derniers échos de l'acquisition réalisée le 01/06/2009 a permis de produire un MNT à pas de 10 cm qui a servi de base pour le calcul du bilan sédimentaire (Fig. 30B).

A



B

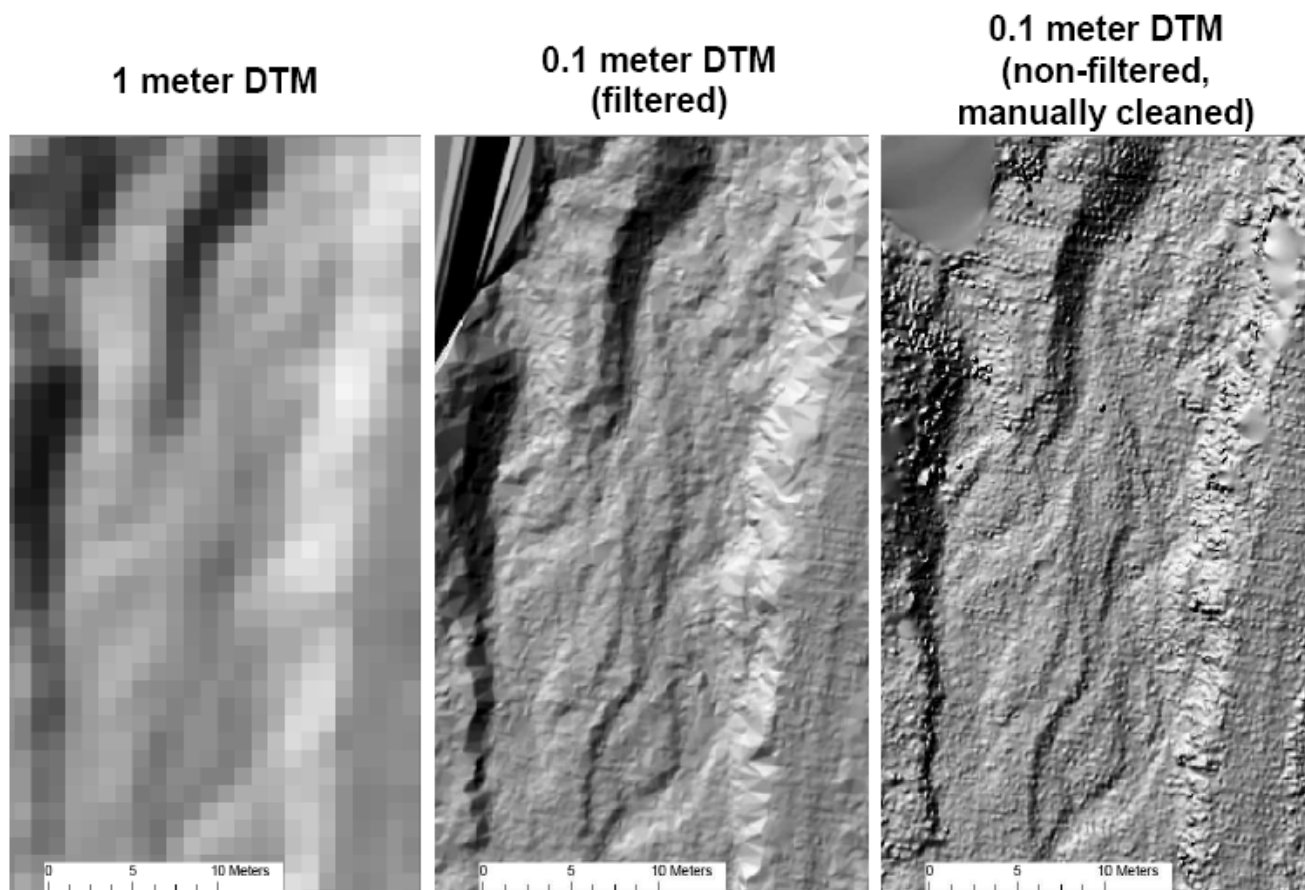


Figure 30. (A) Distribution spatiale de l'érosion et du dépôt dans le chenal principal du Manival dérivée des acquisitions LiDAR aéroportées du 06/09/2008 et du 01/06/2009 ; (B) amélioration du MNT à pas métrique livré par Sintegra à partir du filtrage manuel du semis de point brut des derniers échos

2.4. Conclusion

Ces premiers résultats sont très encourageants et nous incitent à poursuivre le suivi initié dans le cadre de ce projet. Il s'agit également de le compléter en portant les efforts sur (1) la quantification des apports de versant par LiDAR terrestre (collaboration en cours avec IGAR-UNIL) et sur (2) l'instrumentation des écoulements dans le chenal principal (projet PARAMount, Alpine Space Program 2007-2013). Ces éléments nous permettront d'obtenir des données indispensables pour l'interprétation et la prédiction des réponses morphosédimentaires dans les lits à forte pente et la constitution de bilans sédimentaires complets permettant d'étudier les couplages versants-chenaux. Il s'agit également de renforcer l'exploitation des données LiDAR aéroportées à partir du traitement des semis de points bruts, qui permettent d'améliorer de façon substantielle la qualité des MNT dans les secteurs dépourvus de végétation.

3. Reconstitution dendrogéomorphologique de la chronique des crues du Manival

3.1. Contexte général

La dendrogéomorphologie est de plus en plus utilisée pour reconstituer d'anciens passages de laves torrentielles en les datant à l'aide des stress enregistrés par les arbres impactés (Bollschweiler, 2005 ; Stoffel, 2007 ; Santilli et Pelfini, 2002). Il s'agit d'un moyen efficace pour compléter les archives et écrits recensant les événements passés.

L'étude suivante a pour objectif de reconstituer et de dater d'anciennes laves torrentielles au sein du bassin versant du Manival, par le biais d'une étude des cernes de croissance de pin sylvestre. En effet, le cône de déjections du Manival est fortement urbanisé et un nombre important d'archives a donc été répertorié concernant le risque torrentiel du secteur. Le site constitue donc un bon terrain d'expérimentation pour évaluer en quoi la dendrogéomorphologie peut permettre de compléter l'information historique.

Ainsi, cette étude a pour objectif, de démontrer l'efficacité de l'utilisation de la dendrogéomorphologie pour la reconstruction et la datation d'événements passés, d'analyser l'évolution de la végétation au sein du bassin versant et d'étudier la fréquence des laves torrentielles.

3.2. Matériel et méthode

3.2.1. Phase d'échantillonnage

Dans le cadre d'une étude dendrogéomorphologique, un nombre suffisant d'échantillons d'arbres doit être prélevé afin de recouvrir les sites étudiés dans leur intégralité. Ainsi, dans le cadre de cette étude, 312 échantillons ont été prélevés à l'aide d'une tarière de Pressler, sur 156 *Pinus Sylvestris* (Fig. 31). Les arbres échantillonnés, sont porteurs de signes de perturbations, visibles de l'extérieur, tels que des cicatrices, des troncs penchés ou en forme en crosse. Toutefois, certains ne présentent pas ces traumatismes extérieurs (notamment des traumatismes liés à l'asphyxie). La lecture et la datation de ce type de perturbation seront alors réalisables lors de l'analyse dendrochronologique.

Lors de la campagne de carottage, deux carottes par arbre ont été prélevées, une dans le sens de l'impact, l'autre à l'opposé. Dans le même temps, une quinzaine d'arbres, ne présentant aucune perturbation de croissance ont également été échantillonnés (prélèvements de rondelles) dans un secteur reproduisant les mêmes conditions météorologiques et climatiques que la zone d'étude initiale et étant constituée des mêmes populations d'arbres que ceux étudiés. Ceci, dans l'optique d'établir une population de référence. Cette zone est alors qualifiée de zone stable (ici « zone stable » signifie que la zone n'est pas influencée par des phénomènes géomorphologiques et/ou anthropiques). La courbe de croissance des arbres échantillonnés dans la zone saine a alors été établie, afin de la comparer avec la courbe de croissance obtenue après étude des arbres perturbés, en amont de la plage de dépôt. Cette comparaison, assimilée aux données météorologiques, permet d'éliminer tous signes de perturbations provoqués par un phénomène climatique ou par une attaque d'insectes. De plus, l'utilisation de la méthode de standardisation, permettant l'élimination du phénomène naturel de croissance de l'arbre, induisant souvent des pics de croissance, a été utilisée. Pour cela, le choix du logiciel Arstan, proposant plusieurs types de standardisations a été fait, en préférant le type de standardisation «negative curve» (Cook et Holmes, 1986).

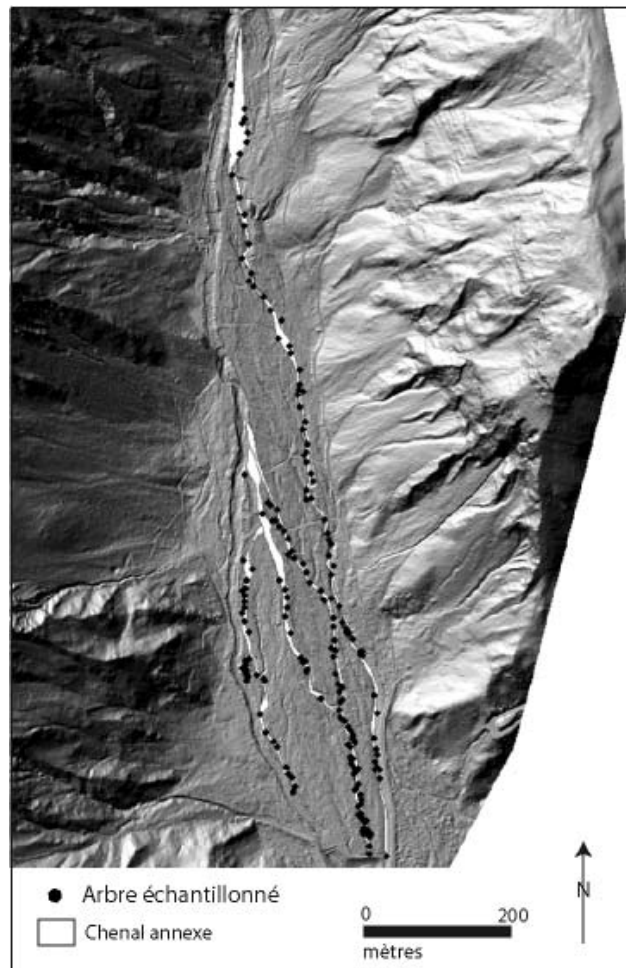


Figure 31. Localisation des arbres échantillonnés dans l'espace de divagation du Manival

3.2.2. Indices du passage d'anciennes laves torrentielles

Différents indices de laves torrentielles peuvent être relevés dans le paysage. La quantité de gros éléments, l'existence de bourrelets latéraux ou de fronts de laves, de lobes peuvent représenter des indices antérieurs de transports de matériaux (Rickenmann, 1995). Relever ce type d'indice peut être nécessaire à l'interprétation de certaines perturbations enregistrées par les cernes de croissance. En effet, si l'arbre sondé présente des signes de perturbations et qu'il se trouve à proximité d'un ancien lobe et dans un chenal aménagé par des seuils, cette perturbation peut-être liée à une activité torrentielle. Ainsi, au cours de la campagne de carottage, les anciennes formes géomorphologiques ainsi que les divers aménagements ont été relevés à l'aide d'un GPS différentiel.

3.2.3. Etude des cernes de croissance

Lorsque la campagne de carottage est terminée, chaque carotte et rondelle prélevée est séchée puis poncée, pour ensuite, pouvoir être analysée. Chaque échantillon est ensuite analysé et les cernes de croissance sont comptés, à l'aide du logiciel de comptage CooRecorder, afin de dater précisément l'arbre dont a été extrait l'échantillon, ainsi que le traumatisme. Les largeurs de cerne sont ensuite mesurées à l'aide d'un logiciel spécialisé, appelé Cdendro, permettant d'effectuer des mesures de cernes précises, sans avoir à utiliser une loupe binoculaire. Enfin, l'ensemble des échantillons sont interdatés, c'est-à-dire que l'on attribue à chaque cerne, l'année exacte de sa formation en utilisant les cernes caractéristiques.

3.3. Résultats

3.3.1. Analyse des arbres perturbés

Le tableau 14 représente le nombre total d'échantillons prélevés par chenal, ainsi que leur répartition en pourcentage. Les chenaux 1, 2 et 3 étant plus conséquents que les autres, le nombre d'échantillons prélevés au sein de ces chenaux est plus important.

Chenaux	Nombre d'arbres échantillonnés par chenal	Total
Chenal 1	36	23%
Chenal 2	79	51%
Chenal 3	13	8%
Chenal 4	21	14%
Chenal 5	7	4%
Nombre total d'échantillons	156	100%

Tableau 14. Répartition des échantillons prélevés par chenaux

L'analyse des arbres perturbés tente dans un premier temps d'évaluer le nombre d'arbres perturbés ayant pu subir un traumatisme induit par une lave torrentielle. Cette analyse se fait par observations de terrain et consiste à relever tout arbre penché ou blessé. Ainsi, sur les 156 arbres échantillonnés, seuls 36% d'entre eux présentaient des signes extérieurs de traumatismes, liés à un phénomène torrentiel (Tab. 15).

Arbres échantillonnés	Nombre d'arbres	Total
Arbre blessé	35	22%
Arbre penché	21	14%
Arbres sans traumatismes extérieurs	100	64%
Total	156	100%

Tableau 15. Résultats d'analyses des arbres échantillonnés dans les anciens chenaux

Or, après analyse des cernes de croissance, il apparaît qu'un nombre plus important d'arbres ont subi des traumatismes. Les réactions anatomiques retenues sont la réduction de croissance ainsi que la formation de bois de réaction, car ce sont les traumatismes les plus représentatifs de l'impact d'un événement géomorphologique (Tab. 16). Ainsi, cette analyse révèle que 49% des arbres prélevés montrent une réduction de croissance au niveau de leurs cernes, 55% d'entre eux, ont formé du bois de réaction et dans 38% des cas, les deux traumatismes sont visibles.

Echantillon présentant	Nombre d'échantillons (sur le total prélevé)	Total
une réduction de croissance	77	49%
une formation de bois de réaction	86	55%
les deux dommages	60	38%

Tableau 16. Résultats d'analyses des arbres ayant subi un traumatisme torrentiel, après étude des cernes de croissance

3.3.2. Structure des âges des arbres échantillonnés

L'âge des arbres échantillonnés peut être révélateur du passage d'anciennes laves torrentielles. En effet, plus une zone est marquée par la prolifération d'arbres jeunes (de quelques années) et de broussailles, plus il est évident que cette zone a été soumise à une activité torrentielle récente, les arbres n'ayant pas eu le temps de se développer.

La moyenne d'âge de tous les arbres prélevés permet aussi d'évaluer la torrentialité du site d'étude. La moyenne d'âge des arbres échantillonnés en amont de la plage de dépôt du torrent du Manival est de 62 ans. Cet âge rend compte d'une torrentialité régulière et effective.

Ainsi, il est intéressant de constater, que la grande majorité des chenaux est composée d'arbres jeunes (ayant moins de 70 ans). Peu d'arbres, parmi ceux échantillonnés pour cette étude, ont un âge supérieur à 80 ans. Cette constatation peut s'expliquer par une certaine torrentialité s'exerçant au sein du bassin versant du torrent du Manival.

Néanmoins, il convient d'être vigilant quant à l'interprétation de cette constatation. Ces arbres, à la moyenne d'âge plutôt basse, peuvent être victimes de coupes ou d'activités anthropiques, réduisant ainsi l'âge des arbres présents dans le secteur du bassin versant étudié.

3.3.3. Reconstitution spatiotemporelle des laves torrentielles

L'analyse dendrogéomorphologique terminée, à savoir : échantillons analysés, traumatismes datés, la reconstitution des événements torrentiels est possible. Pour cela, il est intéressant de réaliser un graphique de recouvrement de l'ensemble des arbres échantillonnés. Ce type de graphique permet de distinguer facilement les différentes laves découvertes après analyse dendrogéomorphologique, en fonction des traumatismes perçus sur chacun des arbres. Ainsi, chaque bois de réaction, blessure et réduction de croissance, est relevé et daté.

Dans le même temps, la figure 32, représentant le pourcentage d'arbres ayant enregistré une réponse aux traumatismes perçus durant les séquences de laves recensées, a été réalisé. Il montre, que trois années ont enregistré un fort taux de réponses : 1974, avec 24 % des arbres échantillonnés, 1990, avec 40% des arbres échantillonnés et 2000 avec 24% de ces derniers.

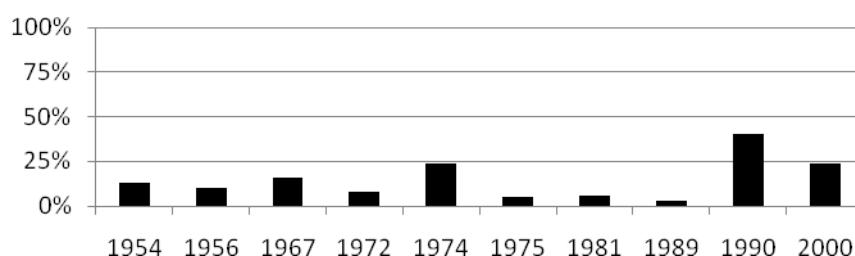


Figure 32. Pourcentage des arbres échantillonnés ayant enregistré une réponse aux laves recensées

La Figure 33 représentent les passages de laves torrentielles recensées par le biais de l'analyse dendrogéomorphologique. Il est intéressant de constater que le profil des laves n'est pas le même pour toutes. Ainsi, certaines laves, à l'instar de celle de 1974, n'ont emprunté qu'un seul chenal, en le sillonnant jusqu'à la plage de dépôt, d'autres à l'inverse se sont arrêtées au milieu d'un chenal, comme la lave de 1975. Enfin, pour d'autres laves, comme celles de 1990 et 2000, des réponses ont été enregistrées dans des chenaux annexes.

Ces profils de laves peuvent être influencés par plusieurs caractéristiques. La présence d'anciens dépôts torrentiels comblant entièrement le chenal et contribuant à des débordements dans les chenaux avoisinants, le volume plus ou moins important de la lave s'écoulant. Ces paramètres peuvent expliquer la présence de traumatismes sur les arbres, dans différents chenaux, pour une même lave. Enfin, la présence d'aménagements, au sein des chenaux annexes, (gabions, seuils) visant à freiner les laves torrentielles, peut expliquer l'arrêt brutal de certaines laves.

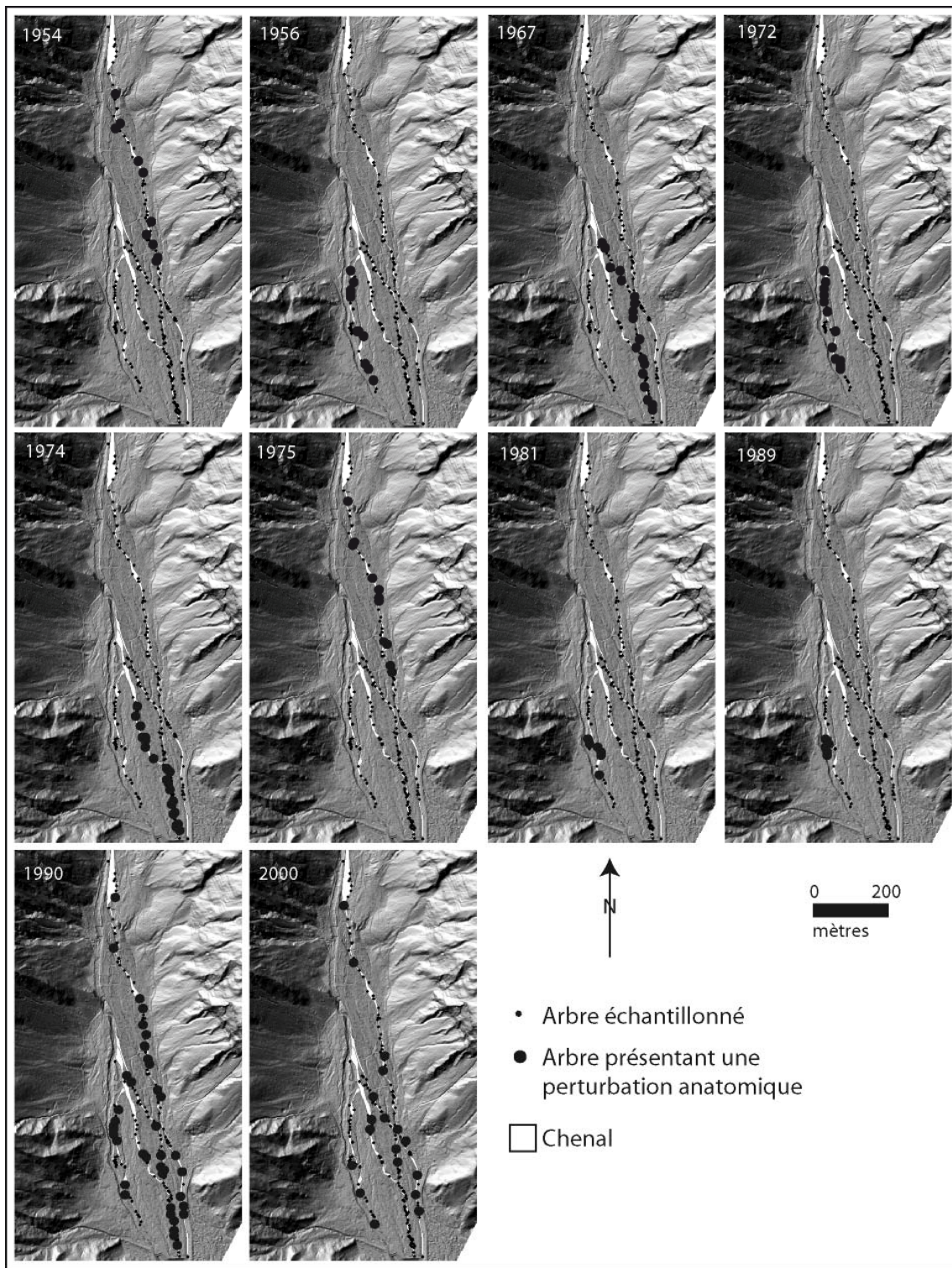


Figure 33. Spatialisation des événements passés des laves torrentielles de 1954, 1956, 1967, 1972, 1974, 1975, 1981, 1989, 1990 et 2000 à partir des arbres présentant une perturbation anatomique

La cartographie de ces laves torrentielles a donc été possible après analyse des réponses aux traumatismes subis par les arbres. Il est désormais intéressant de comparer les résultats obtenus par analyse dendrogéomorphologique, aux archives recensant les précédents événements torrentiels observés au torrent du Manival. C'est à partir d'archives regroupées par les services RTM locaux ou par le biais d'écrits et de mémoires d'Homme (Lang et al, 2000), que 19 laves torrentielles ont été dénombrées. (Fig. 34). Suite à l'analyse dendrogéomorphologique en amont de la plage de dépôt du torrent, 10 laves torrentielles ont été recensées. Parmi ces dernières, 3 étaient présentes dans les événements torrentiels recensés par les archives. La lave torrentielle de 1990 est à ce jour, celle qui constitua l'une des plus importantes recensées. Le total des matériaux qui fut mobilisé en 1990 s'élève à 12000 m³. Cette lave torrentielle a donc bien empruntée le chenal d'écoulement, mais la masse de matériaux mobilisés fut telle, que les autres chenaux ont eux aussi été atteints par débordements. Deux autres phénomènes torrentiels ont eux aussi été recensés par des archives mais le volume de matériaux mobilisés n'a pas été relevé. Au total, ce sont donc 8 laves torrentielles, absentes des données historiques disponibles, qui ont été dénombrées.

La découverte de ces événements torrentiels vient élargir l'éventail des archives officielles et légitime par ailleurs l'usage de la dendrogéomorphologie dans la reconstitution et la datation de l'activité torrentielle d'anciens chenaux. Le recensement de ces « nouvelles » laves, en comblant les périodes durant lesquelles aucune lave n'avait été recensée par les archives, permet d'accentuer d'avantage l'occurrence de phénomènes torrentiels au Manival, ainsi que la régularité de ceux-ci.

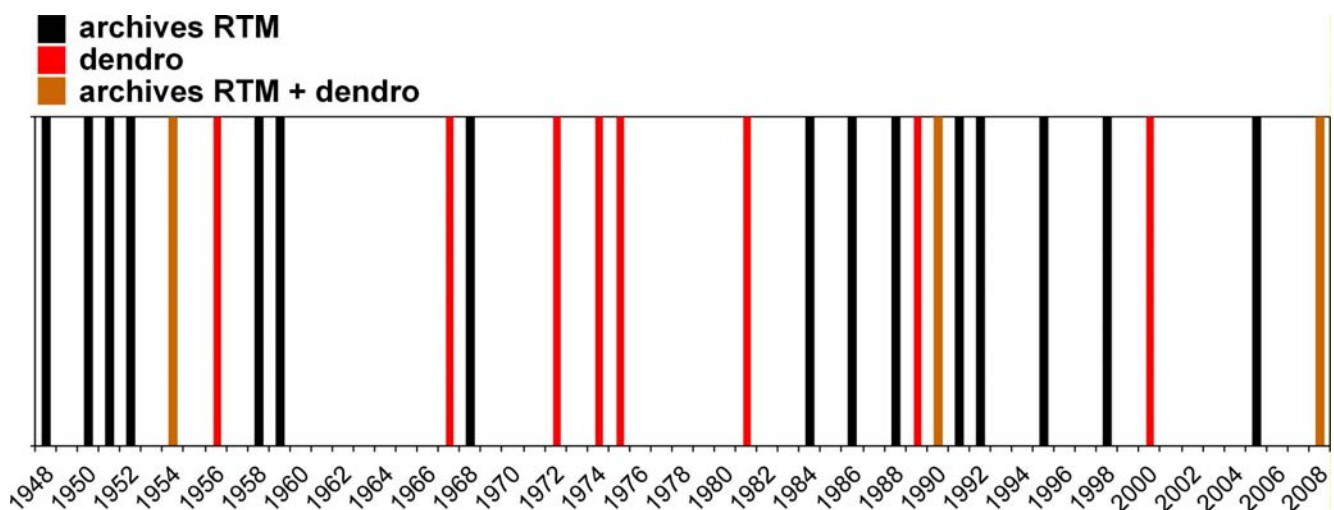


Figure 34. L'enquête dendrogéomorphologique a permis d'inventorier des événements non connus des archives RTM

3.4. Discussion

L'étude menée conjointement entre l'utilisation de la dendrogéomorphologie, une analyse diachronique et l'observation d'anciennes traces géomorphologiques ont été source de résultats intéressants permettant la datation et la reconstitution de laves torrentielles du Manival.

L'analyse dendrogéomorphologique a montré sa fiabilité, en plusieurs points. L'étude des cernes de croissance a, dans un premier temps, permis de discerner des années caractéristiques, à l'instar de l'année 2003. La formation d'un cerne plus étroit durant cette année a été le résultat d'un stress hydrique lié aux facteurs limitant, à savoir le manque de précipitations. Ce cerne présent sur l'ensemble de l'échantillon en fait un cerne caractéristique et témoignent de l'aptitude des arbres à enregistrer les variations climatiques dans leurs cernes de croissance, ainsi que de la capacité de l'analyse dendrogéomorphologique à diagnostiquer ces variations.

De plus, l'analyse des anneaux de croissance, a permis d'enrichir les observations sur le nombre d'arbres ayant subi un dommage par l'impact d'une lave torrentielle. Après étude dendrogéomorphologique, le nombre d'arbres impactés est ainsi supérieur à celui déduit de l'analyse morphologique des arbres (arbres penchés, crossés ou blessés). L'analyse dendrogéomorphologique permet donc de discerner des traumatismes, qui n'auraient pas pu être visibles avec une simple observation de la physionomie de l'arbre.

A la suite de cette analyse, menée à partir de 312 échantillons prélevés sur 156 pins sylvestres, 10 événements torrentiels ont pu être recensés, entre 1954 et 2000. Trois de ces événements sont connus des recensements (événements s'étant produit en 1954, 1990 et 2000) et les sept autres n'ont jamais été recensés. Ces événements torrentiels se sont écoulés dans les cinq chenaux étudiés et ont été détectés par lecture des cernes de croissance en interprétant la présence de bois de réaction, la réduction de cernes ou des stigmates de blessures. L'activité torrentielle de ces anciens chenaux a ainsi pu être complétée par le biais de traumatismes laissés sur les arbres et/ou ayant affectés les cernes de croissance de ce derniers.

Ces résultats confirment la fiabilité de l'utilisation de la dendrogéomorphologie pour dater et reconstituer des phénomènes torrentiels passés et témoignent de l'activité torrentielle du torrent du Manival. D'autres indices témoignent aussi de cette activité torrentielle. Il s'agit d'anciennes formes géomorphologiques qui attestent du passage d'anciennes laves torrentielles au sein de ces chenaux secondaires.

Néanmoins, l'analyse diachronique a montré une colonisation des chenaux et des abords, par des essences forestières et une évolution des strates arbustives. Toutefois, cette colonisation de la forêt ne peut pas être traduite comme étant synonyme d'une diminution de la fréquence de laves torrentielles. En effet, l'analyse des résultats obtenus couplée aux archives a montré que les événements torrentiels étaient fréquents et s'effectuaient en moyenne tous les 2 ans. Cette colonisation des essences forestières est probablement liée à un aménagement du torrent (gabions, barrages, seuils et construction d'une plage de dépôt) pour sécuriser la zone urbanisée en aval. L'efficacité de ces aménagements contraint les laves torrentielles à s'écouler dans le chenal principal du torrent et non plus dans les chenaux secondaires. Ainsi, les chenaux secondaires sont moins sollicités, excepté lors de laves torrentielles de grande ampleur, lorsque que le chenal principal est obstrué et que cela engendre des débordements dans les chenaux annexes.

La dendrogéomorphologie est donc un outil permettant d'aider le praticien à comprendre la récurrence des phénomènes torrentiels et leur mode de fonctionnement (contournement du lit principal du torrent, délaissement de chenaux annexes). L'arbre, témoin silencieux des aléas, devient par la lecture de ses cernes de croissance, un outil de suivi et de diagnostic efficace pour juger de la fréquence d'événements torrentiels se produisant sur un site d'étude.

4. Bibliographie

- Bathurst, J.C., Burton, A. et Ward, T.J., 1997. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(5): 410-419.
- Benda, L. et Dunne, T., 1997. Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow. *Water Resources Research*, 33(12): 2849-2863.
- Bianco, G., Brochot, S., Laigle, D., Ruberto, G., 2001. Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles pour la protection des zones habitées. Dans : Zanolini F., Alzate L., Turrone E, Connexion des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondations en région alpine: projet Interreg II France Italie, coédition région Piémont/région Rhône-Alpes, p.133-172.
- Bollschiweiler, M., Stoffel, D., et Schneuwly, 2006. Assessing the spatio-temporal debris-flow activity on a forested cone using tree-ring data, in *Disaster Mitigation of Debris Flow, Slope failure and Landslides*, pp 597-604.
- Bovis, M.J. et Jakob, M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1039-1054.
- Brochot, S., 1998. Etude hydraulique de l'Arc de Maurienne de Modane à l'Isère – Estimation des apports sédimentaires des torrents affluents. Rapport du Cemagref pour l'association des maires de Maurienne, 52 p + annexes.
- Brochot, S., 2000. Estimation de la production de sédiments des torrents : application aux affluents de l'Arc de Maurienne (Savoie, France). *International Symposium Interpraevent 2000*, Villach, Autriche, 57-68.
- Brochot, S., Marchi, L. et Lang, M., 2002. L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et applications au torrent du Poucet (Savoie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61: 389-402.
- Cook, E.R. et Holmes, R., 1986. Guide for computer program ARSTAN, adapted from Users Manual for Program ARSTAN, in *Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and Northern Great Basin with procedures used in chronology development work including user manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN*, by R.L. Holmes, R.K Adams and H.C. Fritts, pp50-65, *Chronology Series VI*, Laboratory of Tree Rings Researches, 1986, University of Arizona, Tucson.
- D'Agostino, V., 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino orientale, A.I.I.A. - A.I.I. - Scritti dedicati a Giovanni Tournon - Novara, 6-7 giugno 1996, 111-123.
- D'Agostino, V., Cerato, M., et Coali, R., 1996. Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale, In: *Internationales symposium Interpraevent 1996*, Garmisch Partenkirchen, Tagungspublikation Band 1: 377-386.
- Degoutte, G., Pierron, P., et Gallot, M., 2006. Retour d'expérience sur les crues torrentielles d'août 2005 en Belledonne, rapport des ingénieurs généraux du CGAAER, du CGPC et de l'IGE.
- Djrboua, A., 2001. Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes : prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 240 p.
- Fragnot, B., 2009. Utilisation des plages de dépôt dans l'estimation des apports solides des bassins versants torrentiels. Mémoire de stage réalisé à l'ONF – service RTM de l'Isère dans le cadre du Master 1 Géologie Sciences de la Terre et de l'Environnement de l'Université Joseph Fourier, Grenoble.

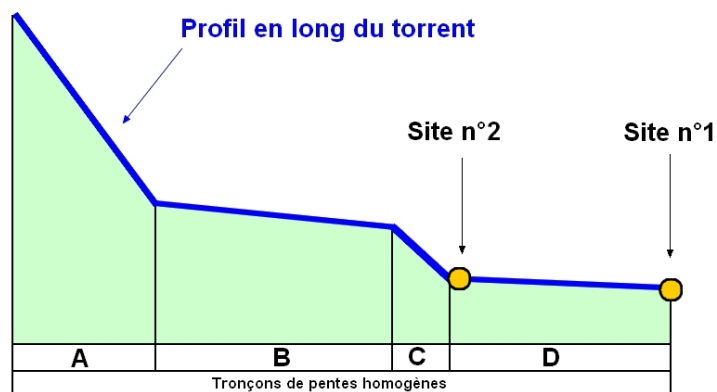
- Franzi, L., et Bianco, G., 2000. A statistical method to predict debris flow deposited volumes on debris fan, Proceedings, EGS XXV General Assembly, Nice, France, 25-29 avril.
- Gomez, B., Banbury, K., Marden, M., Trustrum, N.A., Peacock, D.H. et Hoskin, P.J., 2003. Gully erosion and sediment production: Te Weraroa Stream, New Zealand. *Water Resources Research*, 39(7): 1187-1194.
- Hampel, R., 1977, Geschiebewirtschaft in Widbachen. *Wildbach und Lawinenverbau*, 41: 3-34.
- Johnson, R.M. et Warburton, J., 2002. Annual sediment budget of a UK mountain torrent. *Geografiska Annaler*, 84A(2): 73-88.
- Jousse, C., 2009, Utilisation des plages de dépôts pour l'observation et la prédiction du transport solide torrentiel. Mémoire de fin d'études de l'ENGEEES réalisé à l'ONF, service RTM de l'Isère, 62 p + annexes.
- Kronfellner-Kraus, G., 1985. Quantitative estimation of torrent erosion. International Symposium on erosion, debris flow and disaster prevention, September 3-5, Tsukuba, Japan, 107-110.
- Lang, M., Naulet, R., Brochot, S. et Cœur, D., 2000. Historique-Isère et torrents affluents. Utilisation de l'information historique pour une meilleure définition du risque d'inondation, Rapport final, Cemagref : thème mobilisateur Risques Naturels, 203p, rapport non publié.
- Marchi, L., et Tecca, P.R., 1996. Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane. *GEAM*, 33(2-3) : 79-86.
- Marchi, L. et Brochot, S., 2000. Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, morphométrie et processus de transport solide torrentiel. *Revue de Géographie Alpine* (3): 23-38.
- Meunier, M., 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et en hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche* (5).
- Miller, D.J. et Burnett, K.M., 2008. A probabilistic model of debris-flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, USA. *Geomorphology*, 94(1-2): 184-205.
- ONF-RTM38, 2008. Torrent du Manival: schéma d'aménagement et de gestion du bassin versant contre les crues. Rapport technique non publié, Office National des Forêts, Service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, Grenoble, 107 p.
- Remaître, A., Malet, J.-P. et Maquaire, O., 2005. Morphology and sedimentology of a complex debris flow in a clay-shale basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 339-348.
- Rickenmann D., Zimmermann M., 1993. The 1987 debris-flow in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8, 175-189.
- Rickenmann, D. et Zimmermann, M., 1993. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8: 175-189.
- Santilli, M. et Pelfini, M., 2002. Dendrogeomorphology and dating of debris flows in the Valle del Gallo, Central Alps, Italy. *Dendrochronologia*, 20(3): 269-284.
- Schuerch, P., Densmore, A.L., McArdeell, B.W. et Molnar, P., 2006. The influence of landsliding on sediment supply and channel change in a steep mountain catchment. *Geomorphology*, 78: 222-235.
- Stoffel, M., 2007. Debris flows on forested cones: reconstitution and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7: 207-218.
- Takei, A., 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. International symposium Interpraevent, Villach, Autriche: 35-48.
- Van Dine, D.F., 1985. Debris flows and debris torrents in the southern Canadian Cordillera. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 44-68.

- VanDine, D.F., 1996. Debris flow control structures for forest engineering. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996.
- Veyrat-Charvillon, S. et Mémier, M., 2006. Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 201-219.
- Webb, R.H., Griffiths, P.G., Melis, T.S. et Hartley, D.R., 2000. Sediment delivery by ungaged tributaries of the Colorado River in Grand Canyon. United States Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 004055, 78 pp.

5. Annexes

Annexe 1 : Notion de pente conditionnant l'intensité du transport solide sur un tronçon donné

D'une manière très simplifiée, on peut admettre que lorsque l'on se place suffisamment loin du seuil de début de transport et que l'on raisonne à débit constant, la capacité de transport solide par charriage d'un torrent est principalement régie par la valeur de la pente (Meunier, 1989). Le schéma ci-dessous permet alors d'illustrer comment la pente d'un tronçon de torrent peut déterminer l'intensité des apports solides au droit d'un site donné.



Dans cet exemple, le tronçon D étant moins raide que les tronçons supérieurs, une régulation naturelle des apports issus de l'amont s'opère dans ce bief par le biais d'un stockage des matériaux amenés par excès depuis les biefs amont. L'intensité des apports sédimentaires au droit du site n°1 est donc déterminée par la capacité de transport solide du tronçon D. La pente du tronçon D conditionne de ce fait les apports solides du torrent au droit du site n°1.

L'évaluation de la quantité de matériaux susceptible de transiter jusqu'au site n°2 est en revanche plus délicate car elle dépend d'autres facteurs :

- si le risque d'érosion du tronçon C est négligeable (par exemple, du fait de la présence de gorges rocheuses ou de la présence d'un pavage de lit très résistant) et qu'aucun apport de versant intermédiaire n'est possible, l'intensité des apports sédimentaires est déterminée par la capacité de transport du tronçon B. La pente qui conditionne les apports solides du torrent au droit du site n°2 est donc la pente du tronçon B.
- si le risque d'érosion du tronçon C ne peut être négligé ou que des apports de versant intermédiaires sont possibles, les apports solides du torrent au droit du site n°2 peuvent en revanche être conditionnés par la pente du tronçon C.