Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises

Note technique

Mai 2010

Office National des Forêts

rtm

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
OFFICE NATIONAL DES FORETS
SERVICE DE RESTAURATION DES TERRAINS EN MONTAGNE

Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises

Note technique

Mai 2010

Christophe PETEUIL

ONF – service RTM de l'Isère
Grenoble

Photo de couverture : bassin versant du torrent des Palles sur la commune de Chantelouve dans le département de l'Isère (Source : Christophe PETEUIL).

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 à saluer la contribution de M. 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.

Il est également certain que ce projet n'aurait 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.

Nous adressons également nos remerciements à Jean-Robert Genin (ONF-RTM38) ainsi qu'à Frédéric Liébault (Cemagref-ETNA) pour leur aide et leurs conseils avisés lors de la rédaction de ce rapport.

Enfin, il est essentiel de préciser que ces travaux ont bénéficié du support financier du Conseil Général de l'Isère par le biais de l'appel à projets de recherche organisé en 2008 par le Pôle Grenoblois Risques Naturels.

Sommaire

RESUME **1**

ABSTRACT **1**

1. INTRODUCTION **3**

1.1. PROBLEMATIQUE ET ENJEUX 3

1.2. LES MODELES GLOBAUX SOMMAIRES POUR LA PREDICTION DES APPORTS SEDIMENTAIRES DES TORRENTS 3

1.3. LE ROLE DES PLAGES DE DEPOT ET LEUR INTERET POUR LA MESURE DE LA PRODUCTION SEDIMENTAIRE DES BASSINS VERSANTS TORRENTIELS 4

2. RECUEIL DE DONNEES **7**

2.1. CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES 7

2.2. CARACTERISATION DES TORRENTS ET DE LEURS BASSINS VERSANTS 9

2.2.1. Morphométrie *9*

2.2.2. Géologie et dynamique torrentielle *10*

3. ANALYSE ET RECOMMANDATIONS **13**

3.1. ESTIMATION DES APPORTS SOLIDES EN MOYENNE ANNUELLE 13

3.2. ESTIMATION DE LA PRODUCTION SEDIMENTAIRE DES CRUES RARES 14

3.2.1. Analyse fréquentielle préalable *15*

3.2.2. Liens entre le volume décennal et les volumes de temps de retour plus rares *15*

3.2.3. Estimation rapide de la production sédimentaire de temps de retour décennal et centennal *17*

3.2.4. Estimation de la production sédimentaire de temps de retour centennal sans distinction du processus de transport solide *20*

3.2.5. Estimation de la production sédimentaire de temps de retour centennal spécifique aux torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles *24*

3.3. ESTIMATION DES VOLUMES MAXIMAUX SUSCEPTIBLES D'ETRE PRODUITS EN CAS DE CRUE EXTREME 27

3.3.1. Analyse des données *27*

3.3.2. Recommandations *28*

3.3.3. Comparaison avec des relations calées en dehors des Alpes françaises *29*

4. CONCLUSION **31**

4.1. SYNTHESE 31

4.2. PERSPECTIVES 32

5. BIBLIOGRAPHIE **33**

ANNEXE 1 ..... **35**

Figures

Figure 1. Le Manival (38) : un exemple de torrent caractérisé par des processus de transport solide variés (charriage et laves torrentielles) et par des phénomènes de respiration intense d'une crue à une autre au niveau de son chenal actif (source : Christophe PETEUIL). 3
Figure 2. Schéma de principe d'une plage de dépôt typique (Van Dine, 1996).....4
Figure 3. Opération de curage mécanique d'une plage de dépôt sur un torrent isérois (source : Pascal DIOT). 5
Figure 4. Ouvrages terminaux de plages de dépôts de différents types et perméabilités (source : Christophe PETEUIL).....5
Figure 5. Carte de localisation des torrents constituant les 3 échantillons. 8
Figure 6. Confrontation des résultats d'une approche experte et d'une approche morphométrique pour la classification des processus de transport solide des torrents des échantillons 1 et 2. 10
Figure 7. Degré de connexion des zones en érosion active du torrent du Manival en Isère (Jousse, 2009)..... 11
Figure 8. Evolution de la production sédimentaire en moyenne annuelle en fonction de la taille du bassin. 13
Figure 9. Evolution de la production sédimentaire en moyenne annuelle en fonction de l'étendue des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique..... 14
Figure 10. Ajustement statistique des données de production sédimentaire du torrent du Laval (04) à une loi de Gumbel. 15
Figure 11. Graphe de corrélation entre la production sédimentaire décennale et centennale. 16
Figure 12. Evolution du volume de temps de retour 10 ans en fonction de la surface totale du bassin. 17
Figure 13. Evolution du volume de temps de retour 100 ans en fonction de la surface totale du bassin. 18
Figure 14. Abaque pour l'estimation du volume de temps de retour 10 ans en fonction de la surface totale du bassin versant et de l'intensité des processus d'érosion et de transport sédimentaire..... 19
Figure 15. Abaque pour l'estimation du volume de temps de retour 100 ans en fonction de la surface totale du bassin versant et de l'intensité des processus d'érosion et de transport sédimentaire..... 19
Figure 16. Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir de la relation (2). .. 22
Figure 17. Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir de la relation (3). ... 25
Figure 18. Illustration des différentes situations conduisant la relation (3) à une 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. 26
Figure 19. Corrélation entre la surface du bassin versant et le volume solide maximum..... 27
Figure 20. Corrélation entre la surface non végétalisée et le volume solide maximum..... 28
Figure 21. Comparaison de la relation V_{max} = 25000.S proposée dans cette étude avec des relations similaires publiées par d'autres auteurs. 29

Tableaux

Tableau 1. Sélection de quelques méthodes globales sommaires multivariées pour l'estimation du volume des laves torrentielles. 4
Tableau 2. Données de production sédimentaire disponibles pour chacun des 3 échantillons constitués.....7
Tableau 3. Répartition des torrents inventoriés par échantillon et par département.....8
Tableau 4. Principales caractéristiques des torrents des échantillons 1, 2 et 3.....9
Tableau 5. Principales caractéristiques des torrents des échantillons 1 et 2.....9
Tableau 6. Répartition des torrents des échantillons 1 et 2 en fonction de l'approche considérée pour évaluer la typologie du processus de transport solide prépondérant..... 10
Tableau 7. valeurs minimum, moyennes et maximum du volume moyen annuel spécifique en fonction de la superficie totale du bassin versant considérée..... 13
Tableau 8. Valeurs typiques prises par le rapport entre le volume solide décennal et les volumes solides correspondants à des temps de retour plus rares 15
Tableau 9. Valeurs du volume spécifique décennal pour différentes surfaces de bassins et classes d'intensité..... 18
Tableau 10. Valeurs du volume spécifique centennal pour différentes surfaces de bassins et classes d'intensité..... 18
Tableau 11. 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. 20
Tableau 12. Performance des différentes relations empiriques testées selon le nombre et le type de variable retenus. 21
Tableau 13. 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..... 24
Tableau 14. 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. 24
Tableau 15. Valeurs typiques du volume solide maximal spécifique en fonction de la superficie totale du bassin versant considérée. 28
Tableau 16. Sélection de quelques méthodes globales sommaires mono-variable 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). 29
Tableau 17. 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... 31

Synthèse des données de production sédimentaire des bassins versants torrentiels des Alpes françaises

Synthesis of data on torrent catchments sediment yields in the Western French Alps

Christophe PETEUIL, Office National des Forêts – service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, Grenoble, France

RESUME

Ce travail repose sur un recensement relativement exhaustif des données de production sédimentaire mesurées au droit de plages de dépôt équipant certains torrents des Alpes françaises et des données de 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. Ces modèles utilisent des paramètres morphométriques relativement simples à évaluer à l'aide d'un SIG.

Les torrents de l'échantillon de calage présentent une gamme de superficie étendue qui va de quelques milliers de m² à plusieurs dizaines de km². Dans une certaine mesure, ces modèles permettent de prendre en compte le type de processus de transport solide prépondérant pour le torrent. Sur le plan géologique, les bassins versants utilisés pour le calage de ces relations relèvent plutôt du domaine sédimentaire.

La performance des modèles proposés s'avère globalement satisfaisante comparativement au niveau de confiance accordé à d'autres approches du même type. En outre, l'intérêt de ces modèles tient au fait qu'ils ont été calés sur des données représentatives des torrents des Alpes françaises. Leur originalité est de prendre en compte la surface en érosion active connectée au réseau hydrographique, qui est une variable fortement corrélée à l'intensité des apports solides.

Compte tenu de la durée assez réduite des chroniques exploitées, il est indispensable de garder un certain recul lors de l'application des relations relatives aux événements rares. Cet avertissement 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 obtenues devront donc toujours être comparées avec les valeurs résultant de l'application d'approches complémentaires adaptées au domaine torrentiel.

Ce travail confirme enfin l'intérêt et la nécessité de mettre en place un observatoire de l'érosion torrentielle en France. Cet observatoire pourrait s'appuyer sur le suivi de certaines plages de dépôt déjà existantes. A terme, et notamment dans la perspective des changements climatiques à venir, il permettrait de disposer de données encore plus fiables et plus précises sur la production sédimentaire des bassins versants torrentiels français.

ABSTRACT

Estimates of torrent catchment sediment yields are routinely required for engineering applications. Empirical models based on debris-flow and bedload transport observations provide useful first approximations of potential sediment responses. These statistical models are usually based on catchment morphometry. Generally, their application to the French alpine torrents leads to very uncertain estimates because these models have been rarely calibrated with data collected on this region.

In order to improve the performance of empirical models in this region, sediment yield data from 72 catchments in the Western French Alps have been collected from RTM service archives, field surveys and scientific papers. Those catchments have been classified according to their dominant sediment response (debris-flows vs. bedload transport). These data were used to develop and test different predictive relations, based on geomorphic surveys, probabilistic analysis of time series and multiple regression equations. The proposed formulas can be used for the assessment of the mean annual yield but also for the 100 yr recurrence interval flood and for extreme floods. The field of application of these relations corresponds to torrent catchments mainly located in the sedimentary French Alps and with drainage areas ranging from thousands of m² to approximately 50 km².

This study confirms also the interest and the necessity for creating an observatory of torrent erosion in France. This observatory could easily be based on the monitoring of the existing sediment traps managed by the RTM service and by other local administrations.

1. INTRODUCTION

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, aménageurs 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 (figure 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 (38) : un exemple de torrent caractérisé par des processus de transport solide variés (charriage et laves torrentielles) et par des phénomènes de respiration intense d'une crue à une autre au niveau de son chenal actif (source : 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.

1.2. Les modèles globaux sommaires pour la prédiction des apports sédimentaires des torrents

Les modèles globaux sommaires constituent une des voies utilisables dans les projets d'ingénierie pour l'estimation de la fourniture en matériaux d'un torrent. Le principe de ces approches d'usage relativement simple est de relier la production sédimentaire des torrents aux caractéristiques de leurs bassins versants expliquant le mieux l'intensité de ces apports. Les modèles publiés depuis une quarantaine d'années montrent de nombreuses similitudes, tant dans le choix des variables représentatives que dans la forme des relations proposées par les différents auteurs (tableau 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
$V_{moy} = 150.S.(I_c - 3)^{2,3}$	15	Autriche	Hampel (1977)
$V_{max} = K.S.I_m$	1420	Autriche	Kronfellner-Kraus (1985)
$V_{max} = L_c.(110 - 2,50.\ I_c)$	82	Suisse	Rickenmann *et al.* (1993)
$V_{moy} = 39.S.I_m^{1,5}.I_G$	62	Italie	D'Agostino *et al.* (1996)
$V_{moy} = 800.D_Z^{2,38}.A_i^{1,15}$	33	Canada	Bovis et Jakob. (1999)
$V_{100} = 8,13.10^{-5}.S.D_s^{1,7}.I_{GM}.P^2.(A_{NV}+2)^{0,2}$	12	France	Brochot (communication personnelle)

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 ; A_{NV} rapport des superficies non végétalisées à la superficie totale (%) ; D_s dénivelée spécifique au sens de Melton (%) ; 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 ; I_{GM} indice d'érodabilité ; P pluie maximale décennale sur 24 heures (mm) ; 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 conduit à sous-estimer l'intensité des aléas torrentiels prévisibles sur un site donné ou lorsqu'elle amène à sur-dimensionner de manière excessive un dispositif de protection.

1.3. Le rôle des plages de dépôt et leur intérêt pour la mesure de la production sédimentaire des bassins versants torrentiels

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 (figure 2).

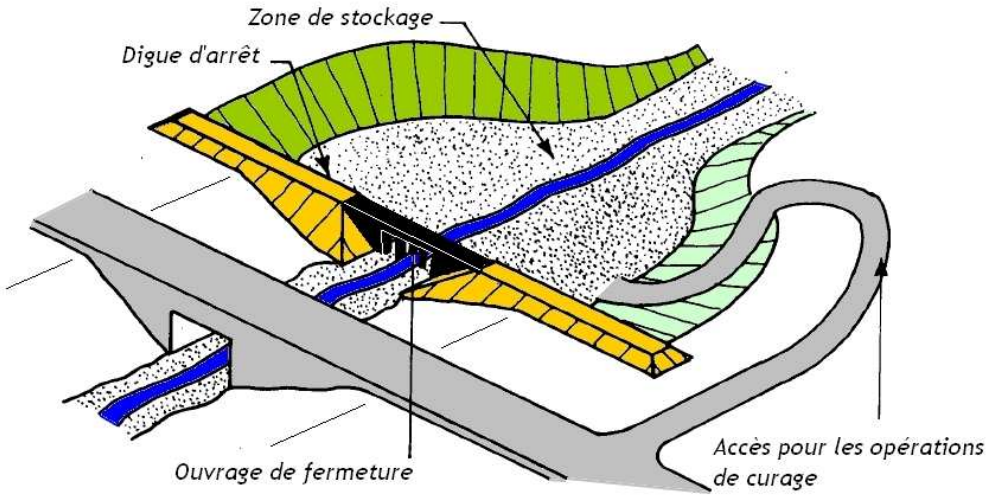


Figure 2. Schéma de principe d'une plage de dépôt typique (Van Dine, 1996).

La conservation d'un niveau de protection satisfaisant nécessite généralement de procéder à des curages d'entretien après chaque crue majeure (figure 3). Ces dispositifs constituent donc un point de mesure privilégié de la production sédimentaire des bassins ainsi équipés.

Figure 3. Opération de curage mécanique d'une plage de dépôt sur un torrent isérois (source : Pascal DIOT).

L'exploitation des données archivées dans les registres de suivi des ouvrages est donc une voie qui pourrait permettre le développement de modèles plus adaptés 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 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 (figure 4).

Figure 4. Ouvrages terminaux de plages de dépôts de différents types et perméabilités (source : Christophe PETEUIL).

2. RECUEIL DE DONNEES

2.1. Constitution de la base de données

Différentes sources ont été exploitées afin d'inventorier les données relatives à la production sédimentaire des torrents :

- étude de Brochot (1998) sur les torrents affluents de l'Arc de Maurienne ;
- note communiquée par Brochot (communication personnelle) portant sur différents torrents des Alpes françaises ;
- registres de suivi des plages de dépôt gérées par les services RTM, et plus marginalement, par certaines collectivités territoriales ;
- base de données « événements » du service RTM, en fonction des besoins.

Cet inventaire a permis de constituer 3 échantillons rassemblant des torrents équipés ou non d'une plage de dépôt, et se distinguant par la nature des données de production sédimentaire disponibles (tableau 2 et annexe 1). Selon les cas, ces informations peuvent porter sur :

- les volumes solides extraits des plages de dépôt à la suite d'événements ;
- la moyenne annuelle des apports solides déposés dans les plages de dépôt ;
- les volumes solides maximum observés historiquement sur les torrents.

L'échantillon 1 est celui pour lequel l'ensemble des informations listées précédemment est connu. Il concerne uniquement des torrents équipés d'une plage de dépôt RTM.

L'échantillon 2 se distingue de l'échantillon 1 par le seul fait que les chroniques disponibles rassemblent moins de 5 observations depuis la construction de l'ouvrage. Une exploitation statistique de ces données s'avère donc difficilement envisageable. Néanmoins, ces éléments permettent de disposer d'un ordre de grandeur correct des apports moyens annuels sur la durée d'observation.

L'échantillon 3 est constitué de torrents qui ne sont pas nécessairement équipés d'une plage de dépôt RTM mais pour lesquels des données historiques sont disponibles, souvent de manière fragmentaire. En général, ces données portent sur des crues suffisamment remarquables pour avoir été consignées dans la base de données « événements » du service RTM. Elles représentent le volume solide maximum connu sur le torrent.

Echantillon		1	2	3
Torrents équipés d'une plage de dépôt		Oui	Oui	Non
Données de production sédimentaire disponibles	Chronique rassemblant au moins 5 données d'apport	X		
	Apport moyen annuel	X	X	
	Apport maximum connu	X	X	X
Nombre de torrents		33	9	30
Total		72		

Tableau 2. Données de production sédimentaire disponibles pour chacun des 3 échantillons constitués.

Au total, cet inventaire rassemble 72 bassins versants torrentiels qui se concentrent surtout dans le nord des Alpes, quel que soit l'échantillon considéré (figure 5). Le tableau 3 précise la répartition géographique de ces torrents.

Département	Echantillon			Total par département
	1	2	3	
Isère	22	9	1	32
Savoie	7	0	17	24
Haute Savoie	1	0	4	5
Alpes-de-Haute-Provence	3	0	0	3
Hautes-Alpes	0	0	8	8

Tableau 3. Répartition des torrents inventoriés par échantillon et par département.

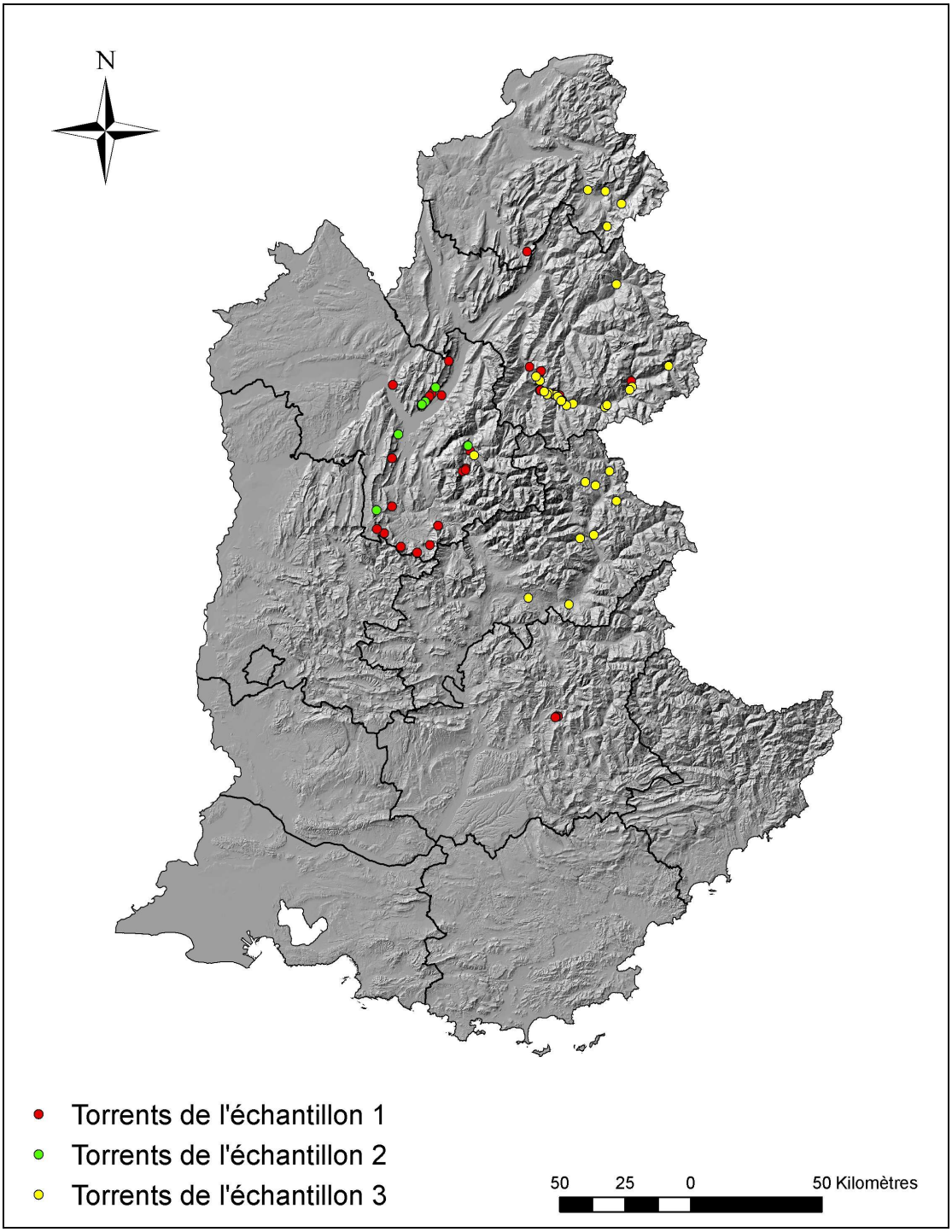


Figure 5. Carte de localisation des torrents constituant les 3 échantillons.

2.2. Caractérisation des torrents et de leurs bassins versants

2.2.1. Morphométrie

Les principales caractéristiques des torrents constituant les 3 échantillons sont résumées dans le tableau 4. Les bassins versants inventoriés présentent ainsi une gamme de superficie relativement étendue, même si un peu moins de 90% d'entre eux ont une taille inférieure à 10 km².

Variable	Borne basse	Médiane	Borne haute
Surface du bassin versant	0,13 ha	1,66 km²	46,1 km²
Surface non végétalisée	1,7 ha	0,44 km²	6,79 km²
Pourcentage de terrains non végétalisés	1%	28%	94%
Production spécifique maximum événementielle	24 m³/km²	3800 m³/km²	20600 m³/km²

Tableau 4. Principales caractéristiques des torrents des échantillons 1, 2 et 3.

Les torrents équipés d'une plage de dépôt (échantillons 1 et 2) ont été caractérisés d'une manière un peu plus complète compte tenu de la plus grande exhaustivité des données disponibles au niveau de ces sites. Cette description a porté en particulier sur la géologie, les altitudes caractéristiques du bassin versant, l'allure générale du profil en long, le degré de connexion des zones en érosion active avec le réseau hydrographique, les processus érosifs dominants, les phénomènes de transport solide prépondérants ou l'historique des événements et des curages. Certains indicateurs climatiques, comme la pluie journalière décennale, ont également été évalués à partir de données fournies par Météo France ou publiées dans le cadre de travaux universitaires (Djerboua, 2001). Une synthèse des principaux éléments descriptifs est présentée dans le tableau 5.

Variable	Borne basse	Médiane	Borne haute
Surface du bassin versant	0,13 ha	1,0 km²	46,1 km²
Surface en érosion connectée au réseau hydrographique	0,10 ha	0,18 km²	3,5 km²
Taux de surfaces actives connectées au réseau hydrographique	1%	26%	94%
Dénivelée maximum	35 m	930 m	2125 m
Pente conditionnant l'intensité des apports au droit de la plage de dépôt	2%	17%	40%
Pluie journalière centennale	85 mm	140 mm	160 mm
Pluie centennale sur 1 heure	25 mm	40 mm	45 mm
Durée du suivi de la plage de dépôt	10 ans	27 ans	40 ans
Capacité de la plage de dépôt	300 m³	5000 m³	100000 m³
Volume solide maximum extrait	5 m³	2500 m³	40000 m³
Production spécifique maximum événementielle	150 m³/km²	3700 m³/km²	20600 m³/km²
Production moyenne annuelle spécifique	30 m³/an/km²	540 m³/an/km²	6800 m³/an/km²

Tableau 5. Principales caractéristiques des torrents des échantillons 1 et 2.

2.2.2. Géologie et dynamique torrentielle

Sur le plan géologique, les torrents des échantillons 1 et 2 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 de ces torrents a été défini selon une démarche « à dire d'expert » qui s'appuie sur l'observation de la morphologie des bassins, des lits et des dépôts torrentiels. Un certain nombre de publications donnent des éléments méthodologiques permettant de mener à bien une telle démarche (Rickenmann, 2001 ; Bardou, 2002 ; Richard, 2005).Cette approche se trouve au final assez bien confortée par la classification établie par Marchi et Brochot (2000) à partir d'indices morphologiques (figure 6).

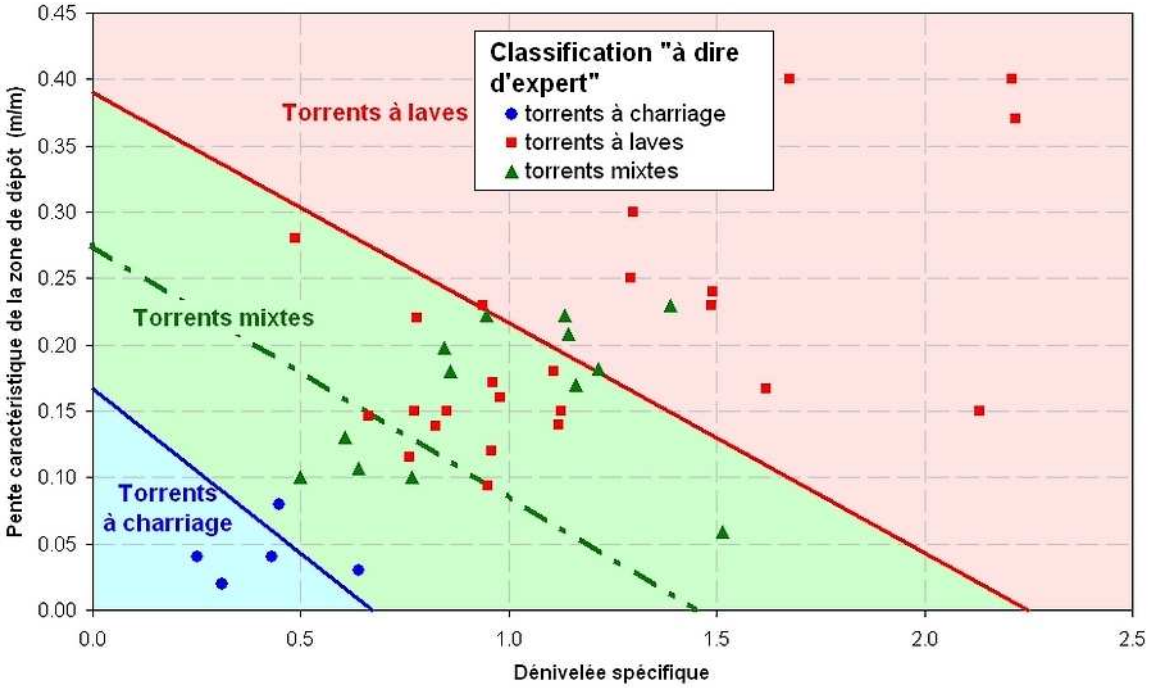


Figure 6. Confrontation des résultats d'une approche experte et d'une approche morphométrique pour la classification des processus de transport solide des torrents des échantillons 1 et 2.

Tous les types de phénomènes de transport solide sont ainsi représentés, même si une majorité de torrents semble produire des laves torrentielles. Le tableau 6 précise le mode de fonctionnement probable des torrents en fonction de l'approche considérée pour évaluer le processus de transport solide prépondérant.

	Processus de transport solide prépondérant		
Approche	Laves torrentielles	Mixte	Charriage
A dire d'expert	24	13	5
Morphométrique	14	25	3

Tableau 6. Répartition des torrents des échantillons 1 et 2 en fonction de l'approche considérée pour évaluer la typologie du processus de transport solide prépondérant.

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 1/2000ème.

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 (figure 7) : 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. De manière arbitraire, il a ainsi été considéré 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 1/25000ème.

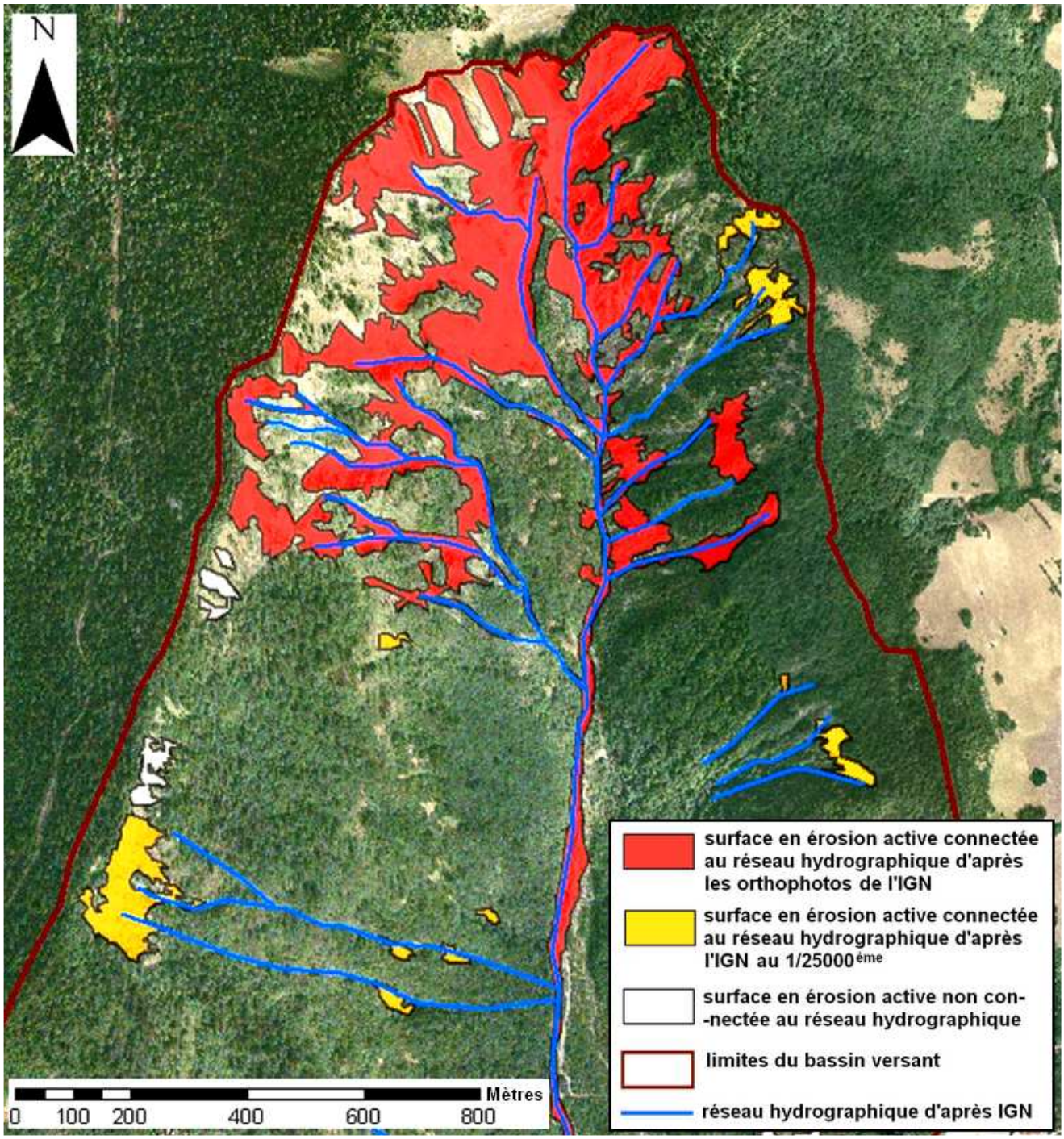


Figure 7. Degré de connexion des zones en érosion active du torrent du Manival en Isère (Jousse, 2009).

3. ANALYSE ET RECOMMANDATIONS

3.1. Estimation des apports solides en moyenne annuelle

Pour les 42 torrents équipés d'une plage de dépôt (échantillons 1 et 2), le volume moyen annuel V_a de production sédimentaire a été mis en relation avec la superficie S du bassin versant (figure 8) et avec la superficie S_A des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique (figure 9). Dans les deux cas on constate une assez grande dispersion des points autour de la droite de régression, avec des écarts allant jusqu'à deux ordres de grandeur.

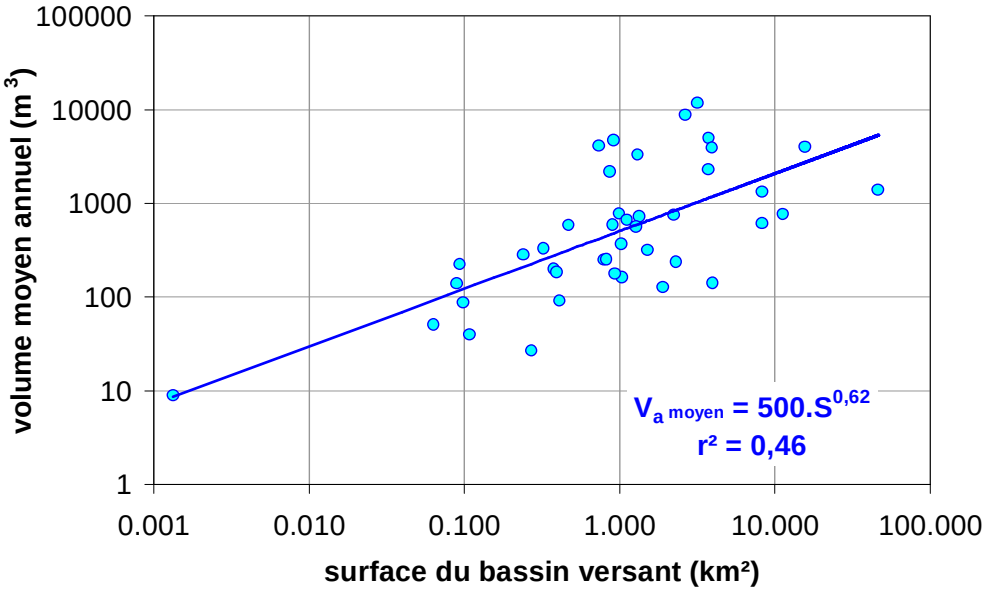


Figure 8. Evolution de la production sédimentaire en moyenne annuelle en fonction de la taille du bassin.

On peut estimer, en première approche, un ordre de grandeur de la production sédimentaire moyenne annuelle en s'appuyant sur les données de la figure 8 rapportées en volume spécifique.

Superficie totale du bassin versant (km²)	Volume moyen annuel spécifique (m³/km²/an)		
	Valeur minimum	Valeur moyenne	Valeur maximum
0,1	150	1200	12000
1,0	65	500	5000
10,0	25	200	2000

Tableau 7. valeurs minimum, moyennes et maximum du volume moyen annuel spécifique en fonction de la superficie totale du bassin versant considérée.

Le volume moyen annuel présente une meilleure relation avec la superficie des zones en érosion active (r^2 = 0,66) et c'est cette relation qui est recommandée lorsque l'on dispose de cette donnée :

$$V_a = 2100.S_A^{0,85} \qquad (1)$$

où V_a volume moyen annuel (m^3) et S_A superficie des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique (km^2).

Il faut cependant garder à l'esprit que le résultat obtenu peut être majoré par un facteur 4 pour les torrents très actifs.

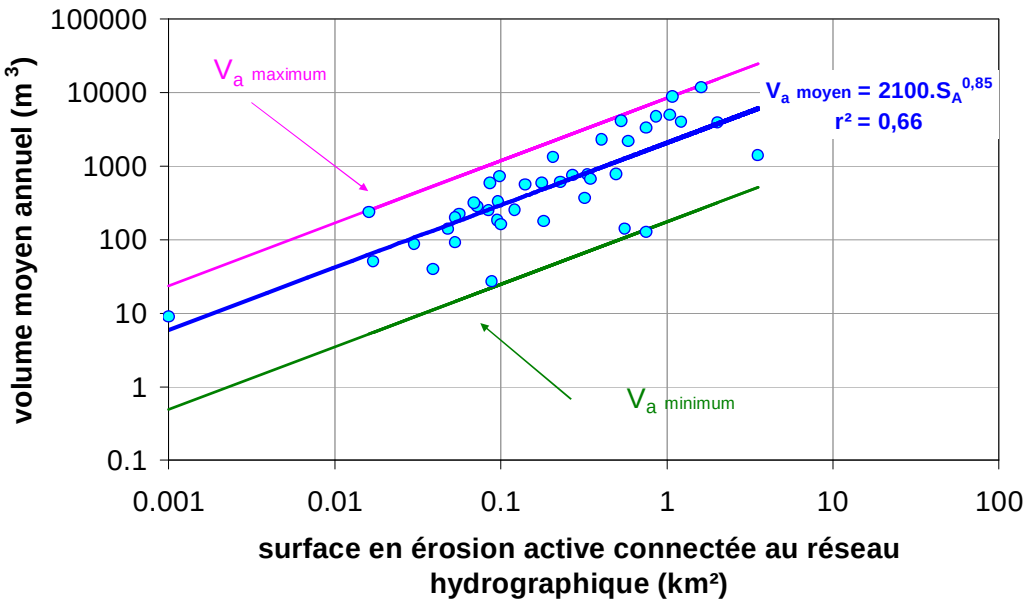


Figure 9. Evolution de la production sédimentaire en moyenne annuelle en fonction de l'étendue des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique.

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.

3.2. Estimation de la production sédimentaire des crues rares

Même si les données recensées sont entourées d'un niveau d'incertitude probablement important, une valorisation des données de production sédimentaire inventoriées sur les 33 torrents de l'échantillon 1 a été tentée dans la perspective d'une application à un domaine de l'ingénierie où les connaissances sont encore relativement rares.

En France, la crue centennale correspond à la référence couramment prise en compte dans les projets d'ingénierie, comme en matière de prévention des risques liés aux crues des torrents. Les éléments qui suivent se focalisent donc essentiellement sur la prédiction des apports solides correspondant à ce type d'événements.

En raison de la durée assez réduite des chroniques exploitées (à peine 30 ans en moyenne), l'application des relations proposées dans la suite devra néanmoins être menée en gardant 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.

Enfin, 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.

3.2.1. Analyse fréquentielle préalable

En premier lieu, les quantiles caractéristiques de la production sédimentaire (V_{10}, V_{20}, V_{50} et V_{100}) de chaque torrent ont été estimés à partir d'une analyse fréquentielle sur les volumes solides. Pour ce traitement, les techniques classiquement mises en œuvre en hydrologie ont été utilisées. Une loi de Gumbel a été retenue pour l'ajustement des données recueillies car cette loi représente de manière satisfaisante la distribution des volumes maximaux annuels produits par un torrent (Brochot, 2000). Un exemple de traitement est présenté sur la figure 10.

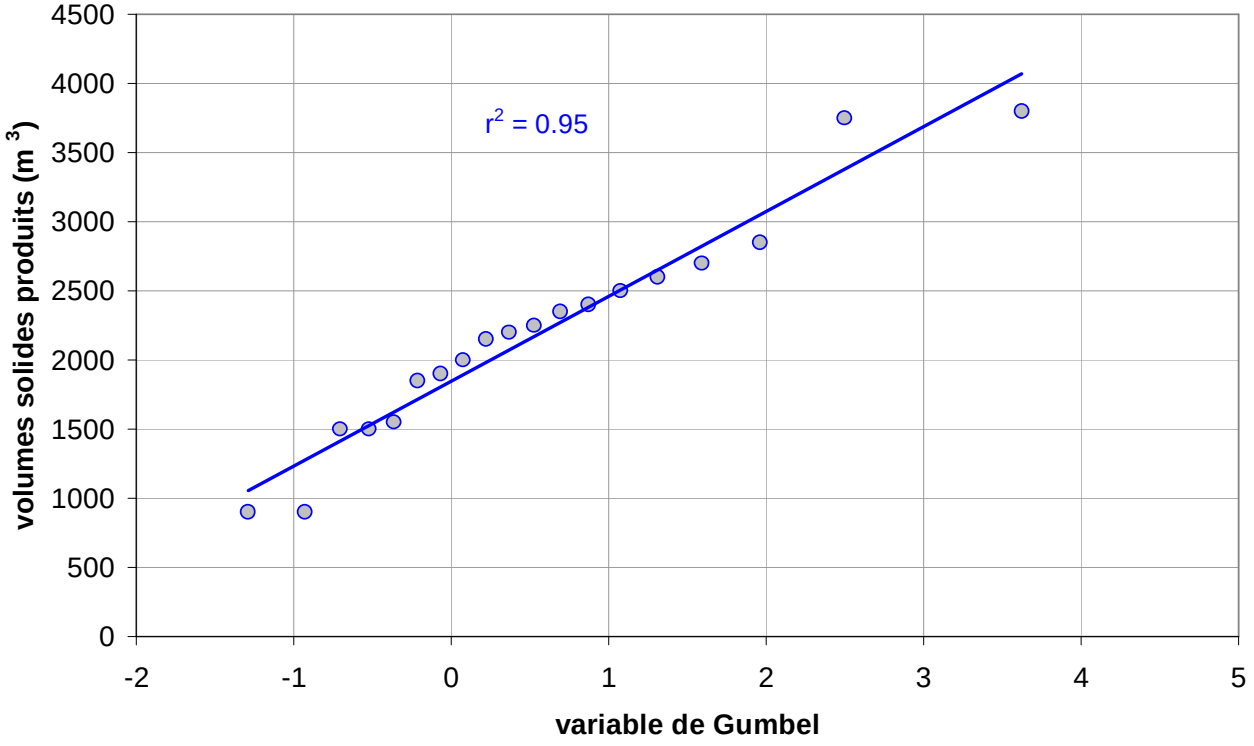


Figure 10. Ajustement statistique des données de production sédimentaire du torrent du Laval (04) à une loi de Gumbel.

3.2.2. Liens entre le volume décennal et les volumes de temps de retour plus rares

Un examen sommaire des relations entre le volume solide décennal et les volumes solides correspondant à des temps de retour plus rares a également été mené. Les valeurs typiques prises par ces différents ratios sont présentées dans le tableau 8 et la figure 11. Pour le rapport entre le volume centennal et le volume décennal, en particulier, des valeurs allant de 1,4 à 4,0 sont observées aux extrêmes. La valeur médiane de ce ratio est de l'ordre de 2,4.

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

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 intense, y compris pour les crues courantes.

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 aussi traduire le fait que pour ces torrents, il est nécessaire 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.

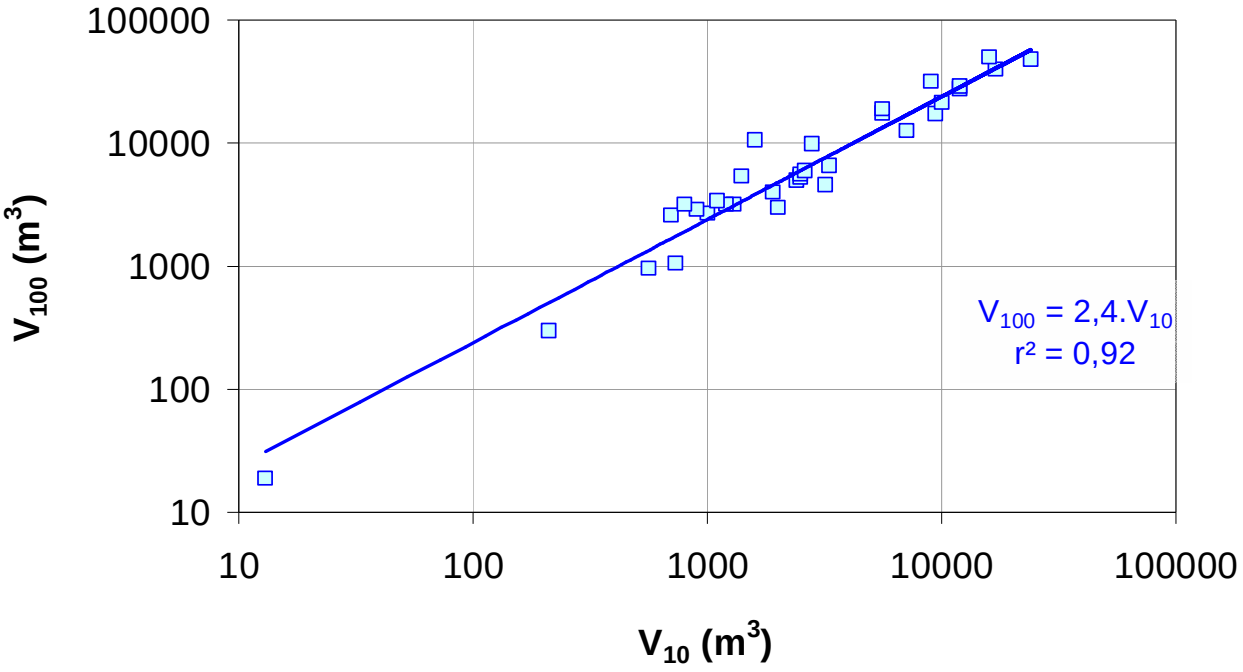


Figure 11. Graphe de corrélation entre la production sédimentaire décennale et centennale.

3.2.3. Estimation rapide de la production sédimentaire de temps de retour décennal et centennal

Il s'agit ici proposer une approche simplifiée permettant d'estimer de manière très rapide un ordre de grandeur des apports solides probables d'une crue centennale d'un torrent en connaissant uniquement la surface de son bassin versant. Une telle démarche peut en effet s'avérer utile dans les rares cas où l'on peut se contenter d'un résultat peu précis. Pour l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques ou la conception d'un ouvrage de protection, en particulier, on ne saurait évidemment utiliser ces seuls résultats sans une analyse complémentaire approfondie du site.

Analyse des données

L'évolution de la fourniture en matériaux correspondant à des temps de retour décennaux et centennaux a été analysée en fonction de la surface totale du bassin versant (figures 12 et 13). Les points considérés montrent ainsi une dispersion importante autour de la droite de régression. Ce constat tient au fait que l'échantillon rassemble des bassins versants très distincts du point de vue de l'intensité des processus d'érosion et de transport sédimentaire.

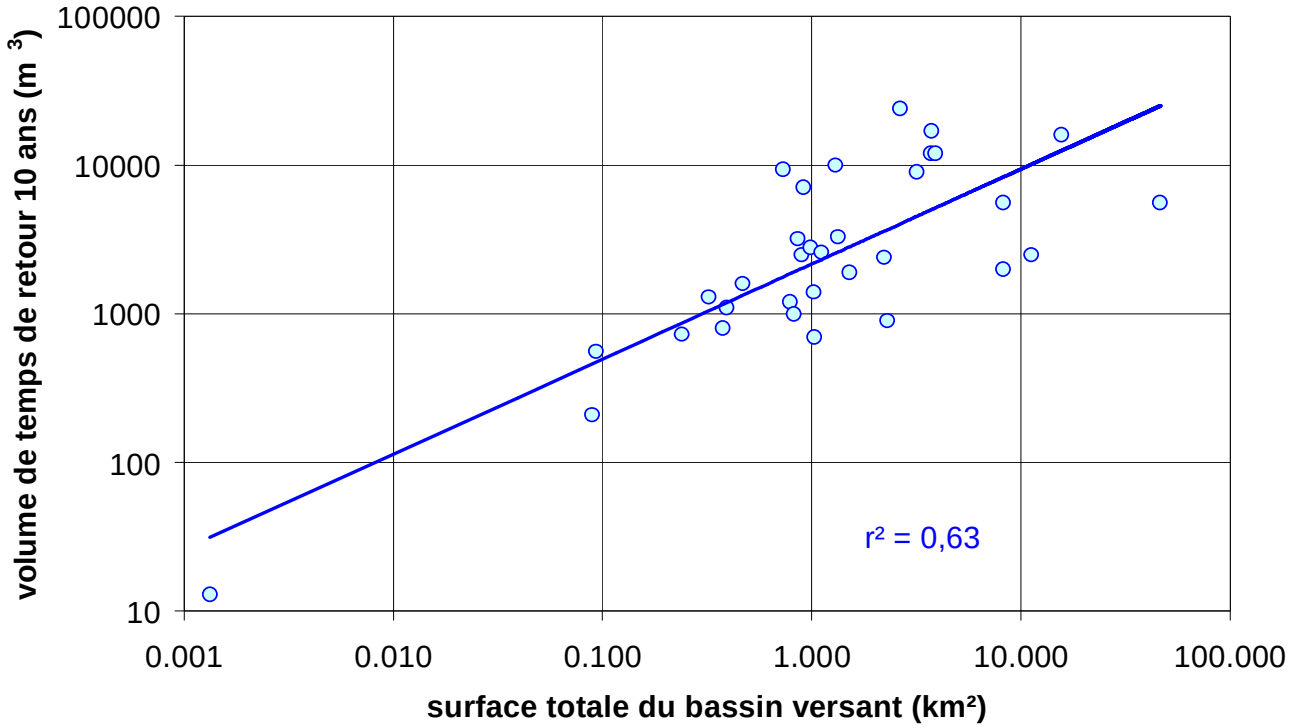


Figure 12. Evolution du volume de temps de retour 10 ans en fonction de la surface totale du bassin.

La connaissance du fonctionnement des bassins versants à notre disposition a permis de définir 5 classes d'intensité allant d'un niveau très faible à très fort. La gamme d'intensité très faible à faible rassemble surtout des torrents assez peu dégradés pour lesquels le transport solide intervient par charriage. Les gammes d'intensité faible à forte intègrent essentiellement des torrents mixtes et des torrents « à laves ». La gamme d'intensité forte à très forte est représentative de torrents « à laves » affectés par de très importants phénomènes érosifs.

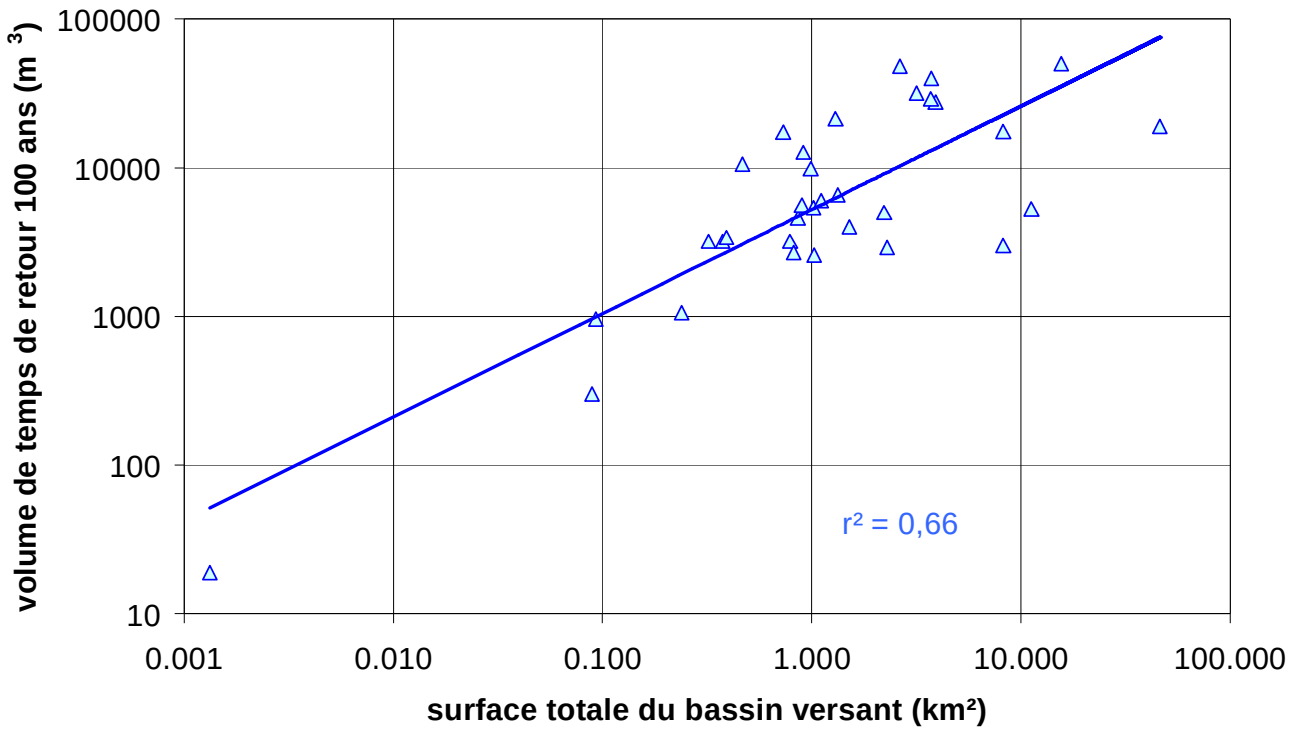


Figure 13. Evolution du volume de temps de retour 100 ans en fonction de la surface totale du bassin.

Recommandations

Les volumes spécifiques correspondant aux différentes gammes résultant de cette classification ont été définis. L'application de ces ratios permet d'estimer un premier ordre de grandeur de la production sédimentaire d'un torrent pour lequel aucune information quantifiée n'est a priori disponible. Les valeurs retenues sont présentées dans les tableaux 9 et 10, respectivement pour un temps de retour décennal et centennal.

Surface (km²)	Volume spécifique décennal (m^3/km^2)				
	Intensité très faible	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte	Intensité très forte
0,1	1500	2600	5000	10000	22000
1,0	550	1100	2200	5000	12000
10,0	200	450	1000	2500	7000

Tableau 9. Valeurs du volume spécifique décennal pour différentes surfaces de bassins et classes d'intensité.

Surface (km²)	Volume spécifique centennal (m^3/km^2)				
	Intensité très faible	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte	Intensité très forte
0,1	2000	4500	10000	17000	30000
1,0	800	2000	5000	10000	22000
10,0	300	900	2500	6000	15000

Tableau 10. Valeurs du volume spécifique centennal pour différentes surfaces de bassins et classes d'intensité.

Ces éléments ont également permis la construction d'abaques fournissant une estimation directe de la fourniture en matériaux pour des temps de retour de 10 ans (figure 14) et de 100 ans (figure 15). Cette synthèse s'est limitée aux bassins versants dont la superficie est comprise entre 0,1 et 10 km². Une extrapolation des données très en dehors de ces gammes nous est en effet apparue délicate compte tenu du nombre limité de points de calage.

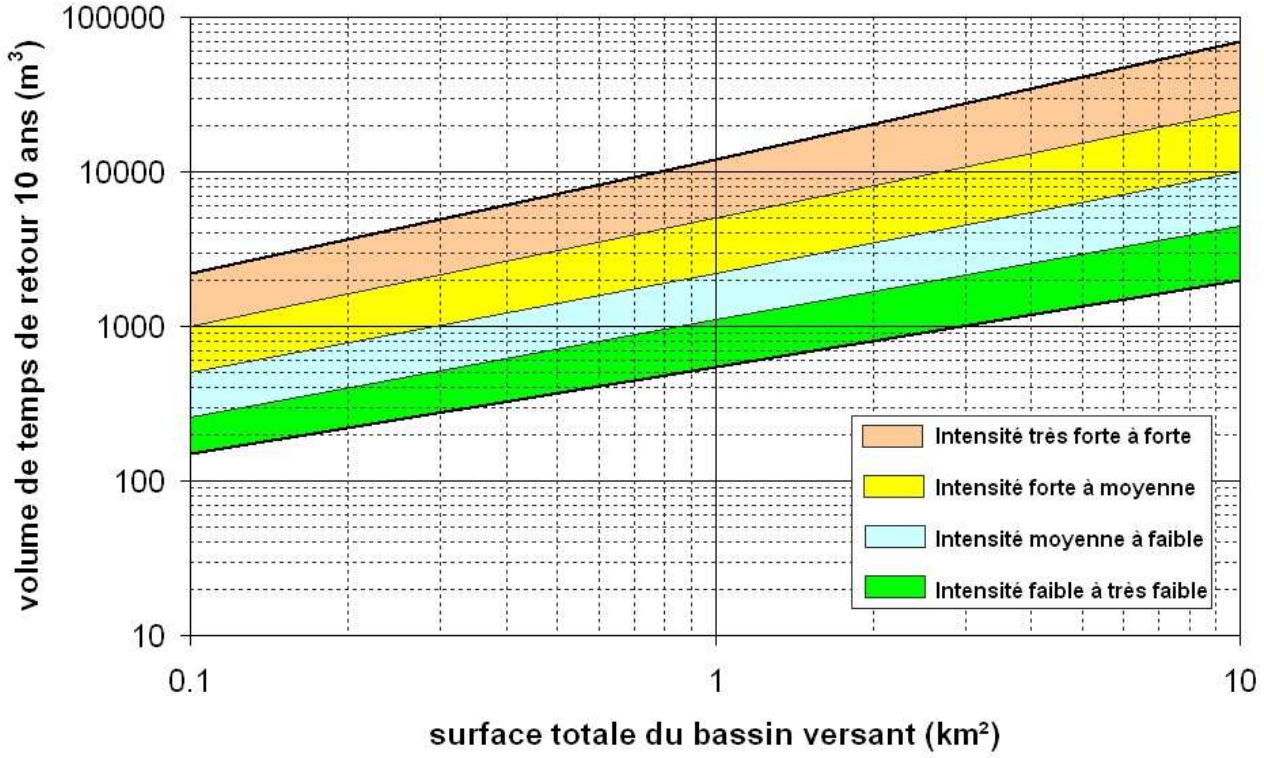


Figure 14. Abaque pour l'estimation du volume de temps de retour 10 ans en fonction de la surface totale du bassin versant et de l'intensité des processus d'érosion et de transport sédimentaire.

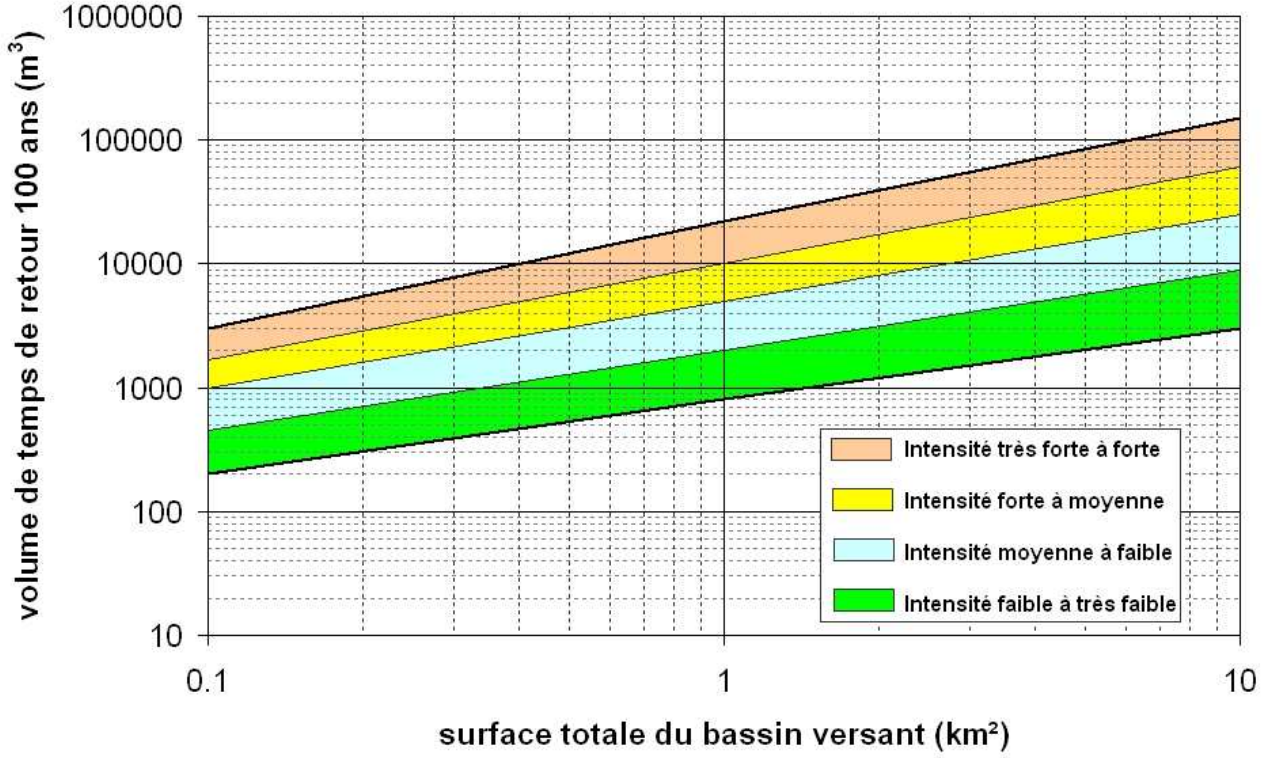


Figure 15. Abaque pour l'estimation du volume de temps de retour 100 ans en fonction de la surface totale du bassin versant et de l'intensité des processus d'érosion et de transport sédimentaire.

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

Analyse des données

Il s'agit ici 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. En revanche, les variables climatiques semblent beaucoup plus rarement utilisées. Il est donc intéressant de vérifier si les modèles auxquels nous aboutissons suivent ou non la même tendance.

Une analyse statistique multivariée a donc été menée afin de tester la pertinence et l'influence d'un grand nombre de paramètres caractérisant le bassin versant. Le tableau 11 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 11. 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 (tableau 12) : 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.

Pour choisir la relation la plus pertinente, trois critères ont finalement été considérés : le niveau de performance du modèle ; le nombre de paramètres de terrain 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 (S_A). En conséquence, les relations mêlant ces deux variables ont systématiquement été éliminées.

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	*0,86*	*0,72*	*55*	*82*	*0,59*	*0,73*
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 12. Performance des différentes relations empiriques testées selon le nombre et le type de variable retenus. Les valeurs figurant en italique souligné 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 Vcalc sur Vest , 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.

Recommandations

Cette démarche nous amène finalement à proposer un modèle à deux variables qui s'exprime de la manière suivante :

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

où V_{100} est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m^3), S_A 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 figurant page 22.

Le niveau de performance du modèle est précisé dans le tableau 12 (valeurs soulignées en italique) et la figure 16. En moyenne, une sous-estimation de l'ordre de 14% est observée sur les volumes calculés, ce qui ne va pas totalement dans le sens de la sécurité. L'intervalle $[2V_{est}/3 ; 3V_{est}/2]$ représente un intervalle rassemblant 55% des valeurs calculées par la relation (2). Pour l'intervalle $[V_{est}/2 ; 2V_{est}]$, cette proportion est de 82%.

La structure de la relation (2) s'avère globalement proche des modèles présentés en introduction (tableau 1), ce qui est plutôt rassurant. Comme la majorité de ces modèles, les données climatiques ne sont pas non plus significatives pour expliquer l'importance de la production sédimentaire. Dans ces conditions, la portée du modèle proposé est plutôt régionale.

Ce modèle apporte une dimension originale par 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.

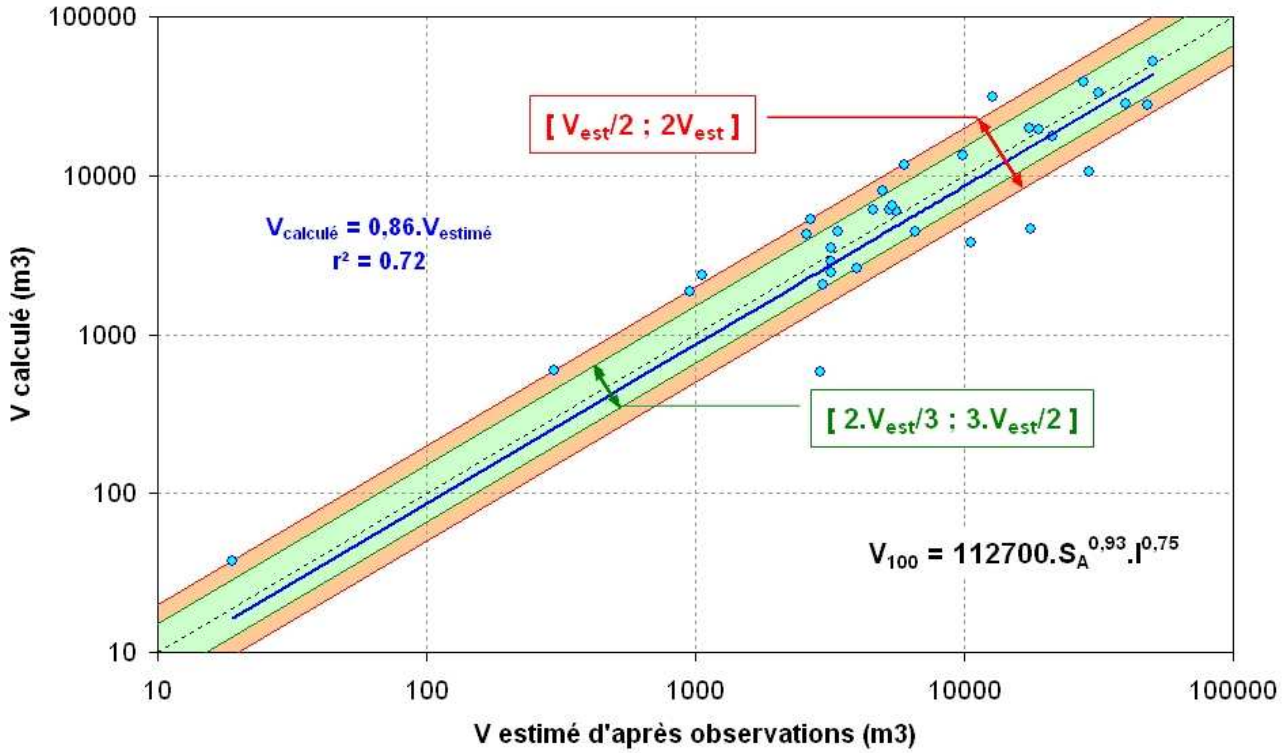


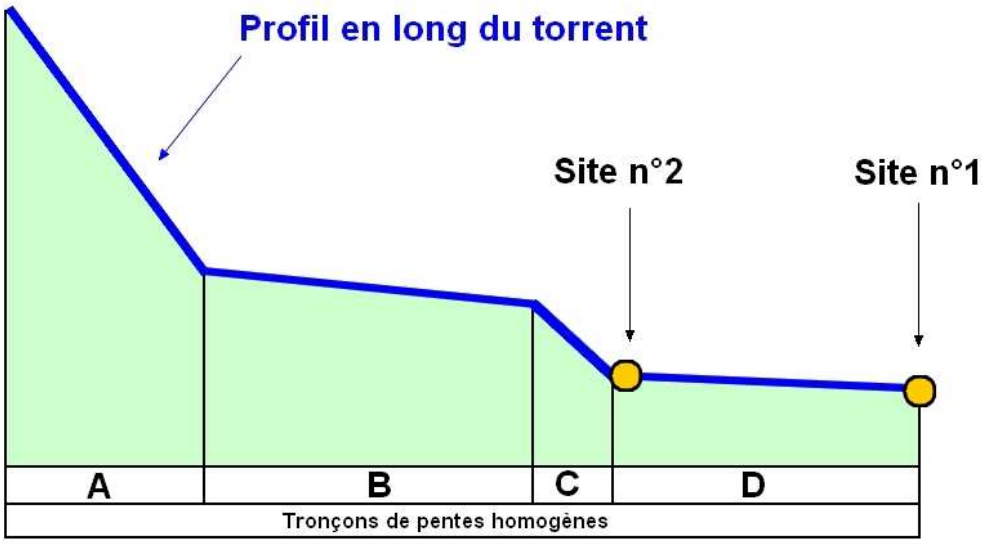
Figure 16. Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir de la relation (2).

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 ayant un fonctionnement mixte. La reconstitution des données de production sédimentaire relative aux quelques torrents où le transport solide intervient uniquement par charriage s'est néanmoins avérée satisfaisante en appliquant la relation (2). En considérant ces seules données, on observe en effet une légère sur-estimation 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 qui ne saurait être comblée que par l'observation d'un nombre plus important de torrents.

Encadré. Notion de pente conditionnant l'intensité du transport solide sur un bief 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 temporaire des matériaux amenés par excès depuis les biefs amonts. 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.*

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

Analyse des données

L'échantillon 1 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 conduit à éliminer tous les cours d'eau pour lesquels le transport solide par charriage prédomine. Ce second échantillon est 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 (tableau 13).

	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 13. 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 a ensuite été établie de manière itérative puis la performance de chaque expression a été testée (tableau 14). Le choix de la meilleure relation s'est ensuite appuyé sur les mêmes critères que ceux qui ont conduits à retenir la relation (2).

Variables	$\frac{V_{calc}}{V_{est}}$	r^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen (m^3)	Critère de Nash
			[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	*0,97*	*0,82*	*70*	*93*	*0,48*	*0,82*
S_A	0,72	0,59	41	78	0,63	0,66

Tableau 14. 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.

Recommandations

Cette démarche conduit à privilégier la relation (3) car elle s'est finalement avérée la plus pertinente. Son utilisation sera réservée aux torrents susceptibles d'être affectés par des laves torrentielles.

$$V_{100} = 0{,}4.S_A^{0{,}60}.D_Z^{1{,}55} \qquad (3)$$

où V_{100} est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m^3), S_A représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km^2) et D_Z 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 très probablement 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 le 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) ne sous-estime en moyenne que de 3% les volumes calculés (tableau 14 et figure 17).

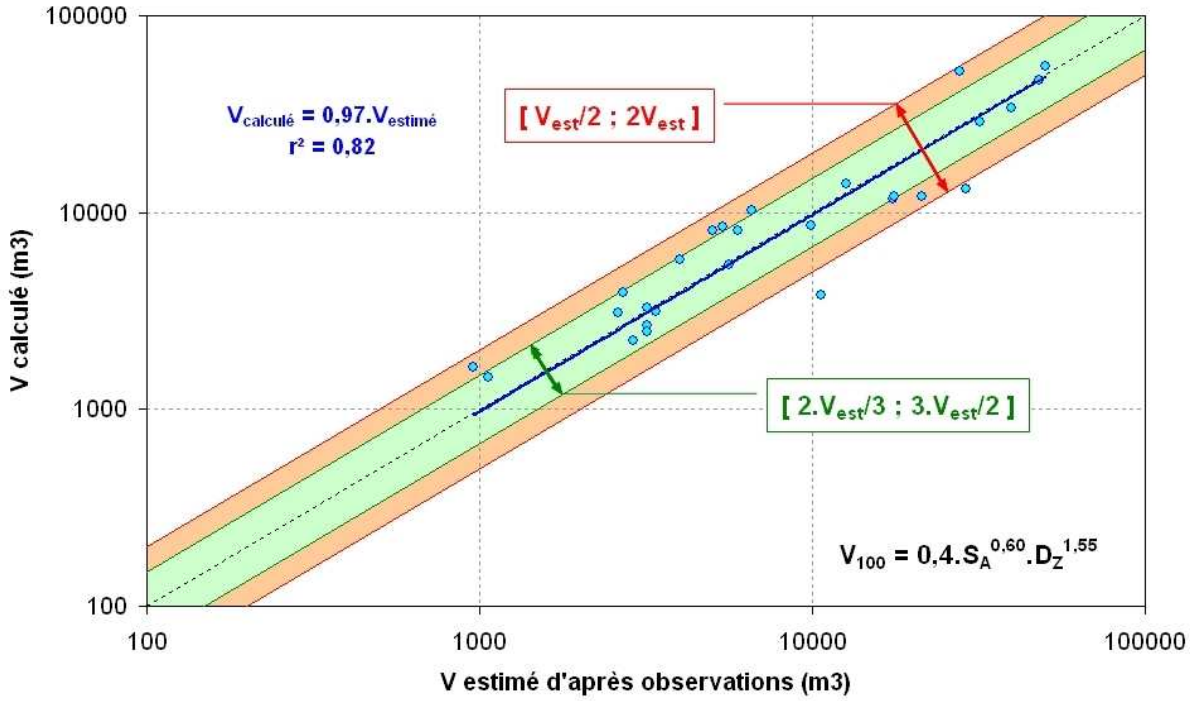


Figure 17. Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir de la relation (3).

Une analyse au cas par cas des résultats obtenus pour chaque torrent de l'échantillon de calage conduit par ailleurs aux constats suivants (figure 18) :

- situation A : dans ce cas, la fourniture en matériaux est majoritairement issue de l'érosion des versants actifs du bassin d'alimentation. Il est fréquent que la relation (3) surestime les apports effectifs au niveau de ces sites. Logiquement, ce constat concerne aussi les torrents de l'échantillon équipés d'une plage de dépôt relativement perméable. Dans ces situations particulières, c'est toutefois moins la précision du modèle que la pertinence des mesures qui est à mettre en cause.
- situation B : elle regroupe les 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. On observe généralement dans ce cas que les écarts entre les valeurs calculées et les valeurs estimées par un ajustement de gumbel sont les plus faibles.
- situation C : dans ce cas, 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. L'érosion de volumes solides conséquents peut alors 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 (figure 1). Ces sites sont caractérisés par la présence d'un bief actif intermédiaire d'une longueur (Lc) comparable à l'extension longitudinale du bassin d'alimentation (La). La relation (3) tend alors à sous-estimer les apports effectifs de tels torrents d'un facteur allant de 2 à 3.

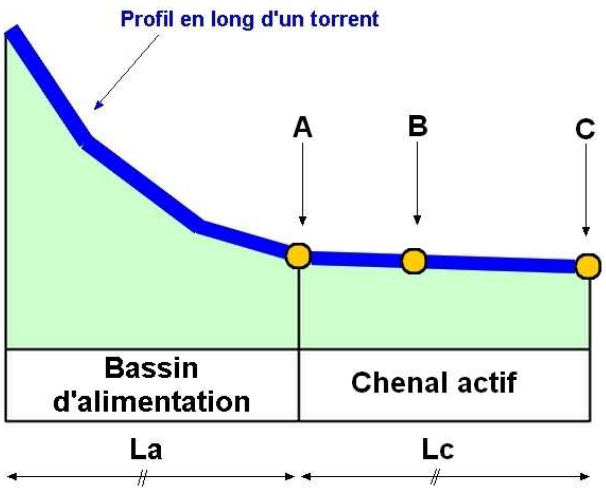


Figure 18. Illustration des différentes situations conduisant la relation (3) à une surestimer (cas A) ou à sous-estimer (cas C) la production sédimentaire d'un torrent au droit d'un site donné. Le cas B représente une situation intermédiaire qui conduit à des estimations relativement conformes aux données expérimentales.

Une réflexion sur la définition de la longueur des chenaux actifs et sur l'introduction de ce paramètre pour l'établissement d'une relation multivariée mériterait donc 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.

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

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 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.

3.3.1. Analyse des données

Cette réflexion a été menée à partir de l'agrégation des données communes aux 3 échantillons à notre disposition. Ceci nous permet de connaître pour 72 bassins versants torrentiels essentiellement localisés dans la partie nord des Alpes françaises : le volume solide maximum connu sur chaque torrent, la surface totale de son bassin versant et la surface non végétalisée.

Au stade d'avancement actuel du projet, seule la surface non végétalisée est en effet connue pour les torrents de l'échantillon 3, contrairement aux torrents des deux autres échantillons pour lesquels on dispose d'informations plus détaillées. Une analyse tenant compte des surfaces en érosion active connectées au réseau hydrographique aurait probablement été plus rigoureuse mais n'a pas encore pu être envisagée faute de temps. Il faut également souligner que cette démarche amène à mêler des mesures récentes à des observations datant du XIXème siècle. Les données les plus anciennes portent donc sur des événements intervenus à la fin du Petit Age Glaciaire, ce qui pose évidemment la question de leur stationnarité. Pour mémoire, il paraît également utile de préciser que les données collectées par Brochot (1998, communication personnelle) ont été actualisées afin de tenir compte d'éventuels événements intervenus depuis la communication de ces documents. C'est par exemple le cas sur le Nant d'Armancette aux 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.

L'évolution du volume maximum a ensuite été analysée en fonction de la superficie drainée par le torrent (figure 19). Cette démarche permet de tracer une courbe enveloppe qui correspond à une valeur spécifique de 25000 m³/km².

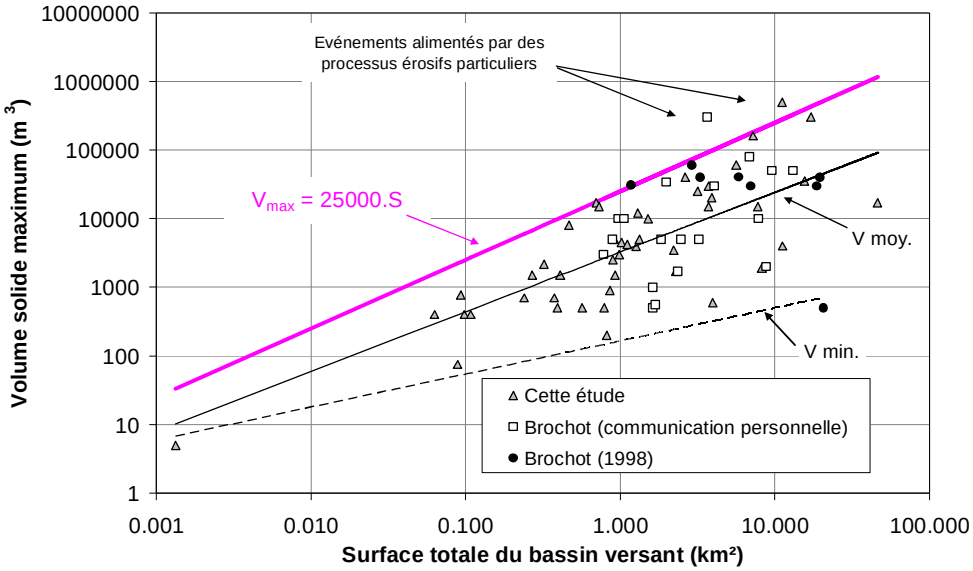


Figure 19. Corrélation entre la surface du bassin versant et le volume solide maximum.

Cette limite 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 très grande ampleur, déstabilisation de matériaux fraîchement libérés par le recul de glaciers,…) ayant provoqué des coulées de laves torrentielles successives sur un voire plusieurs jours. Ces mécanismes particuliers nous ont amené à les différencier des autres cas de l'échantillon.

Une démarche similaire a été menée pour apprécier l'évolution du volume solide maximum avec la surface non végétalisée (figure 20). Elle conduit également à définir une courbe enveloppe qui représente le potentiel d'apport sédimentaire maximal de torrents très dégradés susceptibles d'être affectés par des phénomènes de laves torrentielles.

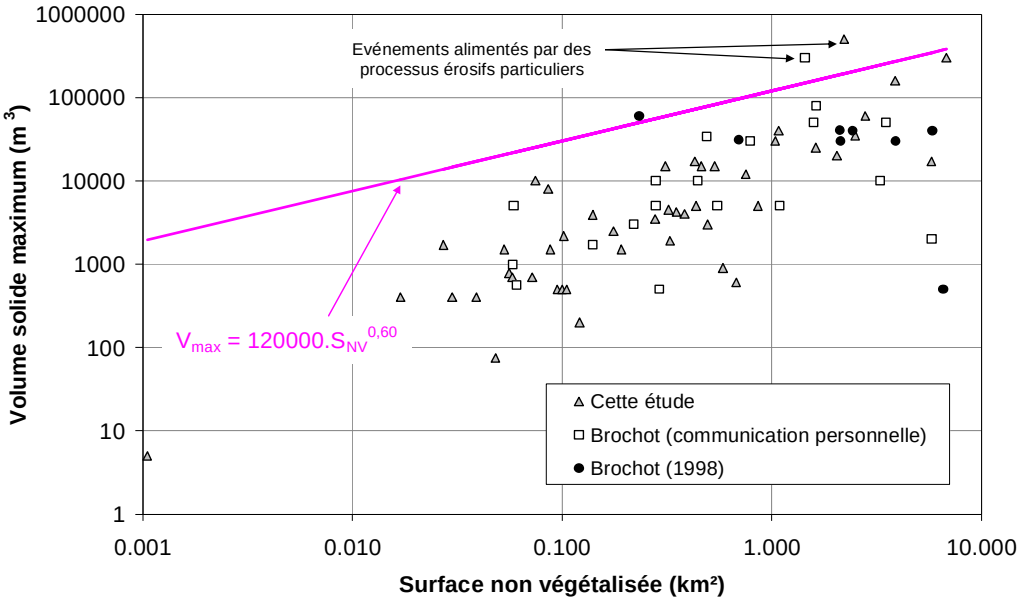


Figure 20. Corrélation entre la surface non végétalisée et le volume solide maximum.

3.3.2. Recommandations

A partir de ces éléments, il est possible de définir des valeurs typiques du volume maximum spécifique pour différentes gammes de superficie totale du bassin. Les ratios retenus sont présentés dans le tableau 15 et permettent d'évaluer rapidement un ordre de grandeur de la production sédimentaire maximale d'un bassin torrentiel de superficie donnée.

Superficie totale du bassin versant (km²)	Volume maximal spécifique (m³/km²)		
	Valeur minimum	Valeur moyenne	Valeur maximum
0,1	500	4500	25000
1,0	150	3000	25000
10,0	50	2000	25000

Tableau 15. Valeurs typiques du volume solide maximal spécifique en fonction de la superficie totale du bassin versant considérée.

On peut aussi utiliser la relation (4) correspondant à la courbe enveloppe de la figure 19 qui s'exprime de la manière suivante :

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

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

De même, dans le cas de torrents « à laves » très dégradés, on peut appliquer la relation (5) lorsque la surface non végétalisée du bassin est connue :

$$V_{max} = 120000.S_{NV}^{0,60} \qquad (5)$$

où V_{max} est le volume solide maximum (m³) et S_{NV} est la surface non végétalisée du bassin (km²).

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

Dans la littérature, il existe déjà un nombre important de formules reliant le volume maximum de la lave torrentielle à la surface totale du bassin versant. Le tableau 16 présente une sélection de relations mono-variable 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)	$V_{max} = 17000$ 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 16. Sélection de quelques méthodes globales sommaires mono-variable 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 21 montre une comparaison de la relation (4) avec des différents modèles pour une gamme de surface allant de 1 à 10 km². 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).

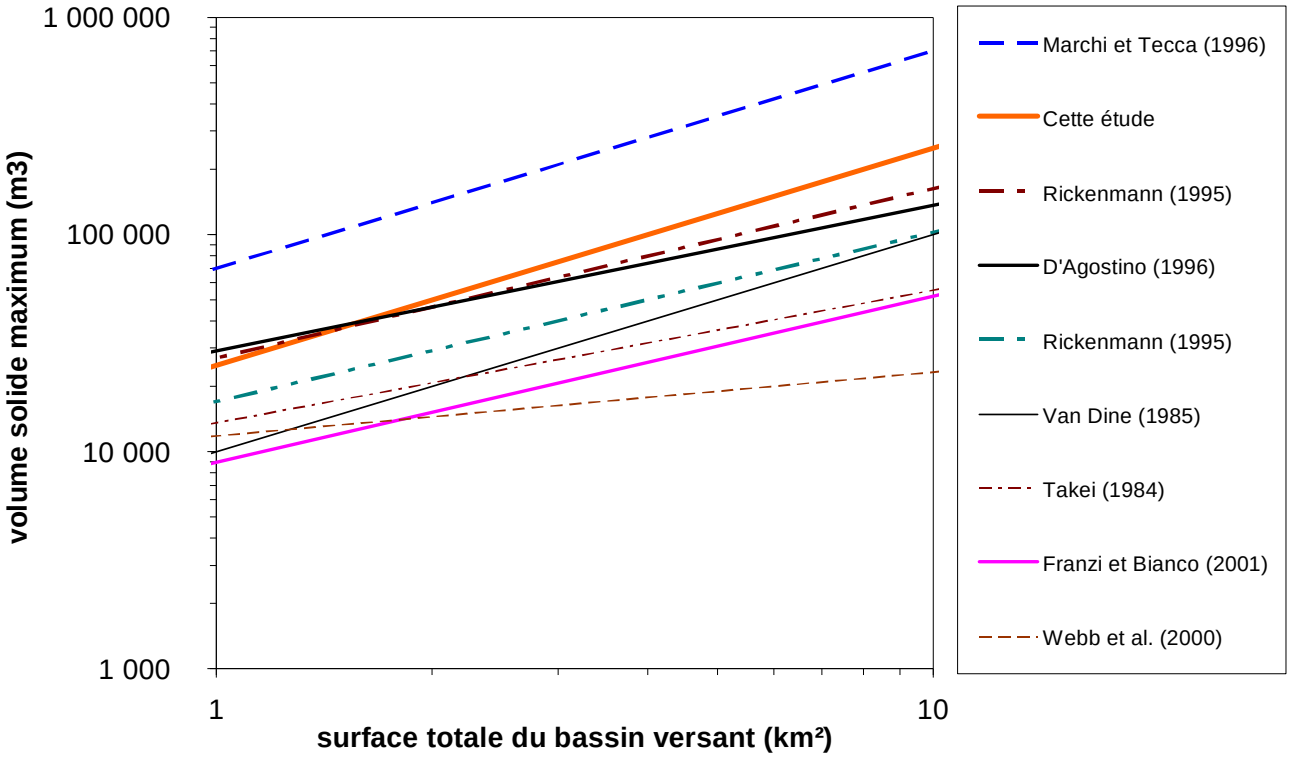


Figure 21. Comparaison de la relation $V_{max} = 25000.S$ proposée dans cette étude avec des relations similaires publiées par d'autres auteurs.

4. CONCLUSION

4.1. Synthèse

Ce travail repose sur un recensement relativement exhaustif des données de production sédimentaire mesurées au droit de plages de dépôt équipant certains 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 (tableau 17). 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. En première approche, une estimation directe de la fourniture en matériaux correspondant à des événements de temps de retour décennal et centennal est également possible à partir d'abaques très simples d'utilisation.

Les torrents de l'échantillon de calage présentent une gamme de superficie relativement étendue allant de quelques milliers de m² à plusieurs dizaines de km². La grande majorité des bassins versants étudiés a néanmoins une taille inférieure à 10 km². 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 majoritairement du domaine sédimentaire.

La performance des modèles proposés 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 tiennent surtout au fait qu'ils ont été calés sur des données représentatives des torrents des Alpes françaises répondant aux caractéristiques décrites précédemment.

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)	$V_{max} = 25000.S$		72	-	-
(5)	$V_{max} = 120000.S_{NV}^{0,60}$		72	-	-

Tableau 17. 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 (m³) ; V_{100} est la production sédimentaire de temps de retour centennal (m³) ; V_{max} est le volume maximum de la lave torrentielle (m³) ; S_A représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique (km²) ; S_{NV} est la surface non végétalisée du bassin versant (km²) ; S est la surface totale du bassin versant (km²) ; 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).

Compte tenu de la durée assez réduite des chroniques exploitées, il est nécessaire de garder un certain recul lors de l'application des relations relatives aux événements de temps de retour centennal. 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.

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 relatives à la production sédimentaire des bassins versants torrentiels français encore plus fiables. Il s'agit d'un enjeu majeur compte tenu de l'état actuel de la connaissance scientifique, en particulier dans la perspective des changements climatiques à venir.

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 réalisé à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, postérieurement aux crues torrentielles d'août 2005 sur le massif de Belledonne (Degoute *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. 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 une fois de plus d'attendre la catastrophe de trop…

5. BIBLIOGRAPHIE

(1) Bardou E., 2002, Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin, Thèse de l'EPFL, no 2479

(2) 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., Turroni 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, 2001, p.133-172

(3) Bovis M. J., Jakob M. 1999, The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity, Earth surf. process. landforms 24, 1039-1054.

(4) 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

(5) Brochot S., 2000, Estimation de la production de sédiments des torrents – application aux affluents de l'Arc de Maurienne (Savoie, France), Internationales Syposion Interpraevent 2000 - Villach / Osterreich, Band 3, Seite 57-68

(6) Brochot S., Marchi L., Lang M., 2002, L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie), Bull. Eng. Geol. Env. 61, pp389-402

(7) Brochot S., communication personnelle, La prédiction des volumes de laves torrentielles : vers un modèle global sommaire pour les Alpes occidentales françaises ?

(8) 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, pp. 111-123.

(9) D'Agostino V., Cerato M., Coali R., 1996, Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale, In: Internationales symposion Interpraevent 1996, Garmisch Partenkirchen, Tagungspublikation Band 1: 377-386.

(10) Degoute G, Pierron P., 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 pour le Ministère de l'écologie et du développement durable, à la demande du Préfet de l'Isère.

(11) Djerboua A., 2001, Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes - Prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des Analogues, Ecole Doctorale Terre Univers Environnement, Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 240 p.

(12) Fragnol 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 Fourrier à Grenoble

(13) Franzi L., Bianco G., 2000, A statistical method to predict debris flow deposited volumes on debris fan, Proceedings, E.G.S. XXV General Assembly, Nice, France, 25-29 Aprile.

(14) Hampel R., 1977, Geschiebewirtschaft in Widbachen, Wildbach und Lawinenverbau, 41: 3-34

(15) 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'ENGEES réalisé à l'ONF – service RTM de l'Isère, 62 p + annexes.

(16) 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

(17) Marchi L., Tecca P. R., 1996, Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane, GEAM, 33, 2–3, 79–86

(18) Marchi L., Brochot S., 2000, Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, Morphométrie et et processus de transport solide torrentiel, Revue de Géographie Alpine, n°3, t. 88

(19) Meunier M., 1989, Essai de synthèse des connaissances en érosion et en hydraulique torrentielle, La Houille Blanche, n°5

(20) Richard, D., 2005, Typologie des bassins versants torrentiels générateurs de laves torrentielles, Université Européenne d'été sur les risques naturels organisée par le Pôle Grenoblois Risques Naturels

(21) Rickenmann D., Zimmermann M., 1993, The 1987 debris-flow in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology, 8, 175-189.

(22) Rickenmann, D., 1995, Beurteilung von Murgängen. Schweiz. Ing. Archit. 113, 48: 1104-1108

(23) Rickenmann, D., 2001, Méthodes empiriques pour l'estimation des laves torrentielles, Université Européenne d'été sur les risques naturels organisée par le Pôle Grenoblois Risques Naturels

(24) Takei, A., 1984, Interdipendence of sediment budget between individual torrents and a river-system. International symposium - Interpraevent, Villach, Austria: 35-48.

(25) Van Dine D. F., 1985, Debris flows and debris torrents in the southern Canadian Cordillera, Can. Geotech. J. 22, 44–68

(26) VanDine D. F., 1996, Debris flow control structures for forest engineering. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996

(27) Webb R. H., Griffiths P. G., Melis T. S., Hartley D. R., 2000, Sediment Delivery by Ungaged Tributaries of the Colorado River in Grand Canyon, Arizona, U.S.D.I., U.S.G.S., Water-Resources Investigations Report 00–4055

ANNEXE 1

		Département	Commune	Torrent	Source des données
Echantillon 1	1	04	Draix	La Roubine	(1)
	2	04	Draix	Le Laval	(1)
	3	04	Draix	Le Moulin	(1)
	4	38	Bernin	Le Craponoz	(1)
	5	38	Biviers	L'Aiguille	(1)
	6	38	Biviers	Le Gamont (St Hugues)	(1)
	7	38	Biviers	Les Guichards	(1)
	8	38	Chantelouve	Le Merdaret 1310	(1)
	9	38	Chantelouve	Le Merdaret 1530	(1)
	10	38	Chantelouve	Les Palles	(1)
	11	38	Chichilianne	Les Arches	(1)
	12	38	Chichilianne	Les Fraches	(1)
	13	38	Cordeac	Le Chalanne	(1)
	14	38	Oulles	La Lignarre	(1)
	15	38	Roissard	Le Riffol	(1)
	16	38	Saint Ismier	Le Corbonne	(1)
	17	38	Saint Ismier	Le Darguil	(1)
	18	38	Saint Ismier	Le Manival	(1)
	19	38	Saint Ismier	Les Ecorchiers	(1)
	20	38	Saint Paul-de-Varces	Le Lavanchon	(1)
	21	38	Saint. Maurice-en-Trièves	L'Archat	(1)
	22	38	Sainte Marie-du-Mont	Le Bresson	(1)
	23	38	Tréminis	L'Ebron	(1)
	24	38	Tréminis	Les Sagnes	(1)
	25	38	Voreppe	La Roize	(1)
	26	73	Pontamafrey	La Ravoire	(1)
	27	73	Saint Avre	Le Nantuel	(1)
	28	73	Saint Jean de Maurienne	Le torrent de Combe Paillarde	(1)
	29	73	Saint Jean de Maurienne	Le torrent de Combe Varcin	(1)
	30	73	Saint Julien Montdenis	Le Claret	(1)
	31	73	Saint Martin de la Porte	Le Saint Bernard	(1)
	32	73	Termignon	Le Bey	(1)
	33	74	Cons Sainte Colombe	Le Piézan	(1)

		Département	Commune	Torrent	Source des données
Echantillon 2	34	38	Biviers	Le Crépon	(1)
	35	38	Claix	Le Rif Talon	(1)
	36	38	Gresse-en-Vercors	La Gresse	(1)
	37	38	Le Bourg d'Oisans	Le Treuil	(1)
	38	38	Meylan	La Ruine	(1)
	39	38	Meylan	Le Gamont (B1)	(1)
	40	38	Meylan	Le Gamont (B2)	(1)
	41	38	Meylan	Le Gamont (B3)	(1)
	42	38	Saint Pancrasse	La Gorgette	(1)
Echantillon 3	43	05	Cervières	L'Aiguebelle	(2)
	44	05	Chorges	Le Dévezet	(2)
	45	05	Freissinières	Le torrent des Tronches	(2)
	46	05	La Roche de Rame	Le ravin de la Ruine	(2)
	47	05	La Salle les Alpes	Le Bez	(2)
	48	05	Les Crots	Le Boscodon	(2)
	49	05	Saint Chaffrey	Le Verdarel	(2)
	50	05	Val les Prés	Le ravin des Sables	(2)
	51	38	Le Bourg d'Oisans	Le Saint Antoine	(1)
	52	73	Bessans	Le Claret	(2)
	53	73	Bourg Saint Maurice	L'Arbonne	(1)
	54	73	Hermillon	L'Hermillon	(3)
	55	73	Modane	Le Rieu Roux	(2)
	56	73	Modane	Le Saint Antoine	(1)
	57	73	Orelle	Le Pousset	(3)
	58	73	Pontamafrey	La Ravoire	(1)
	59	73	Saint Julien Montdenis	Le Rieu Sec	(3)
	60	73	Saint Julien Montdenis	Le Saint Julien	(3)
	61	73	Saint Martin la Porte	Le Saint Bernard	(3)
	62	73	Saint Martin la Porte	Le Vigny	(2)
	63	73	Saint Michel de Maurienne	La Grollaz	(2)
	64	73	Saint Michel de Maurienne	Le Merderel	(2)
	65	73	Sollières-Sardières	Le torrent de l'Envers	(3)
	66	73	Sollières-Sardières	Le Villeneuve	(2)
	67	73	Villargondran	La combe de l'Avalanche	(2)
	68	73	Villargondran	Le Rieubel	(3)
	69	74	Les Contamines Montjoie	Le Nant d'Armancette	(1)
	70	74	Les Houches	La Griaz	(2)
	71	74	Passy	Le Nant Bourdon	(2)
	72	74	Sallanches	Le torrent de Reninges	(2)

Source des données :
(1) : cette étude (2010)
(2) : Brochot (communication personnelle)
(3) : Brochot (1998)

Service RTM de l'Isère
9, quai Créqui
38000 GRENOBLE
www.onf.fr

Certifié ISO 9001 et ISO 14001