

## **ECSTREM, UNE APPROCHE PRATIQUE POUR PREDIRE LA PRODUCTION SEDIMENTAIRE DES TORRENTS DES ALPES FRANÇAISES**

### **ECSTREM, A PRACTICAL APPROACH FOR PREDICTING THE SEDIMENT YIELD IN TORRENTS OF THE FRENCH ALPS**

**Christophe Peteuil<sup>1</sup>, Frédéric Liébault<sup>2</sup> and Olivier Marco<sup>3</sup>**

#### **RÉSUMÉ**

Dans les études de bassins versants torrentiels, la quantification des apports solides constitue une étape essentielle et incontournable du diagnostic d'un site. Parmi les modèles utilisés en France dans le domaine de l'ingénierie, très peu ont toutefois été calés sur des données observées dans les Alpes françaises. L'objectif de cet article est de présenter une méthode de prédiction qui repose sur une série de modèles statistiques multivariés calés à partir d'un jeu de données original portant sur 72 bassins torrentiels des Alpes françaises. Ces modèles permettent d'estimer la production sédimentaire événementielle de torrents dont la pente est comprise entre 3 et 40% et dont la superficie est inférieure à 50 km<sup>2</sup> environ. La principale originalité des modèles proposés 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, de même que le type de processus de transport solide le plus prépondérant pour le torrent. L'intérêt de ces modèles est aussi d'avoir été calés sur des données représentatives des torrents des Alpes françaises et de présenter un niveau de performance qui s'avère plutôt satisfaisant, comparativement au degré d'incertitude généralement accordé à d'autres approches applicables dans un tel contexte. La mise en œuvre de ces modèles utilise les outils usuels de l'ingénierie et nécessite, sur un bassin donné, la détermination de certains paramètres morphométriques et topographiques, ainsi que le repérage et la délimitation des sources sédimentaires.

**Mots clés :** torrent, charriage, laves torrentielles, apports sédimentaires, Alpes françaises

#### **ABSTRACT**

Quantification of sediment transport volumes in small upland catchments is an essential step for the protection and prevention against flood hazards in mountainous terrains. This contribution presents a method dedicated to the prediction of the sediment yield of small basins of the French Alps. Data on sediment yield from 72 catchments have been collected from sediment retention basins registry, historical documents from archives, scientific papers and technical reports. These data were used to develop and test different predictive models. Multivariate regression techniques were used to correlate sediment yield magnitude to morphometric parameters, topographic characteristics of the basins and spatial frequency of sediment sources in the catchment. The main originality of the proposed statistical models is that they integrate the surface of active erosion terrains connected to the stream network; this parameter is highly correlated to the sediment yield. We also proposed specific models for fluvial and debris-flow dominated catchments. The main interests of these predictive tools are that they are calibrated on French alpine torrents and they satisfy the need of regional tools for predicting sediment

<sup>1</sup> Compagnie Nationale du Rhône, 2, rue André Bonin, 69316 Lyon Cedex 04, France (Tél.: +33 426 108 613; e-mail: c.peteuil@cnr.tm.fr)

<sup>2</sup> Cemagref Grenoble, UR Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches, Domaine Universitaire, 2 rue de la Papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France

<sup>3</sup> Office National des Forêts, Direction Technique du service de Restauration des Terrains en Montagne, 9 quai Créqui, 38000 Grenoble, France

yields. These tools allow for the reduction of uncertainty as compared to similar approaches generally applied in the same context. Their validity domain corresponds to catchment sizes below 50 km<sup>2</sup> and to channel slopes between 3 to 40%.

**Key words:** torrents, bedload, debris-flows, sediment supply, French Alps

## INTRODUCTION

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, de l'étendue de leurs zones en érosion active et de la nature des sollicitations météorologiques, 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. 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.

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 (prises d'eau, barrages de retenue, digues, 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.

Le panel des outils applicables actuellement dans le domaine de l'ingénierie s'avère néanmoins limité et l'incertitude des résultats obtenus dépasse souvent un à plusieurs ordres de grandeur, dans les très rares cas où cette incertitude peut faire l'objet d'une évaluation. Cette situation s'explique par la complexité des phénomènes en jeu mais aussi par le manque et l'imprécision des données de terrain utilisables pour le calage de modèles opérationnels adaptés aux torrents du territoire français. Au sein de la communauté des praticiens et des scientifiques, il existe donc de fortes attentes pour améliorer la qualité de prédiction des outils dédiés à l'estimation des volumes solides susceptibles d'être mobilisés pendant les crues.

Cet article a pour objectif de présenter la méthode ECSTReM, acronyme d'"Estimation de la Charge Sédimentaire des Torrents par Régressions Multivariées". Cette méthode a été élaborée dans le cadre d'un projet qui a consisté (1) à recenser les données de production sédimentaire des torrents des Alpes françaises et (2) à établir une méthode d'estimation robuste et pratique applicable par des praticiens pour estimer la production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel.

## COLLECTE ET TRAITEMENT PREALABLE DES DONNEES

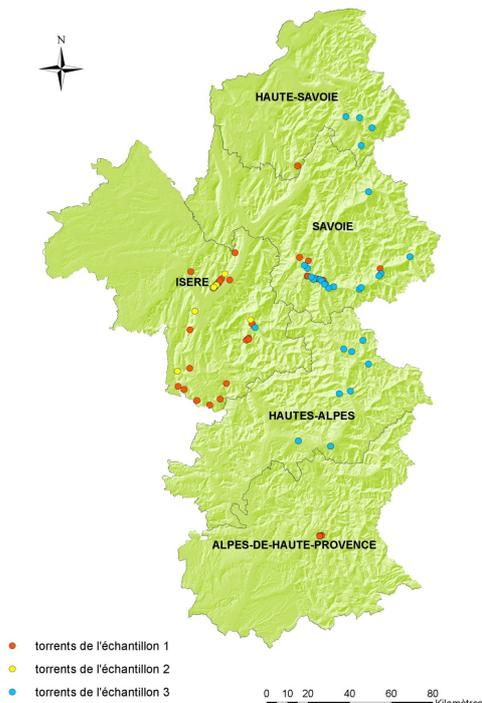
Dans un premier temps, une base de données portant sur la production sédimentaire de 72 bassins versants torrentiels des Alpes françaises a été constituée (figure 1). Ces données sont issues de plusieurs sources :

- publications scientifiques et rapports techniques rédigés par le Cemagref, le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de l'Office National des Forêts (ONF) ou des bureaux d'études lors d'expertises spécifiques à certains sites ;
- base de données « événements » du service RTM donnant accès à des informations relatives aux apports solides de crues torrentielles intervenues entre le XVIII<sup>ème</sup> et le XXI<sup>ème</sup> siècle ;
- registres de suivi des plages de dépôt dont le service RTM assure la gestion, parfois depuis près d'une quarantaine d'années pour les ouvrages les plus anciens (figure 2).

Pour les torrents où des chroniques suffisamment longues étaient disponibles, les quantiles représentant la production sédimentaire pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans ont été estimés à partir d'une analyse fréquentielle (figure 3). 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).

Lorsque les chroniques étaient insuffisantes, seuls les volumes moyens annuels ont été calculés. En revanche, le volume solide maximum connu a pu être déterminé pour tous les torrents répertoriés. Selon l'histoire hydrologique des torrents considérés, les valeurs attribuées à cette variable peuvent correspondre à des situations très hétérogènes qui vont des crues ordinaires aux crues extrêmes. La période couverte va alors du XIX<sup>ème</sup> au XXI<sup>ème</sup> siècle.



**Fig. 1** Localisation des torrents étudiés

**Fig. 1** Location of torrents studied

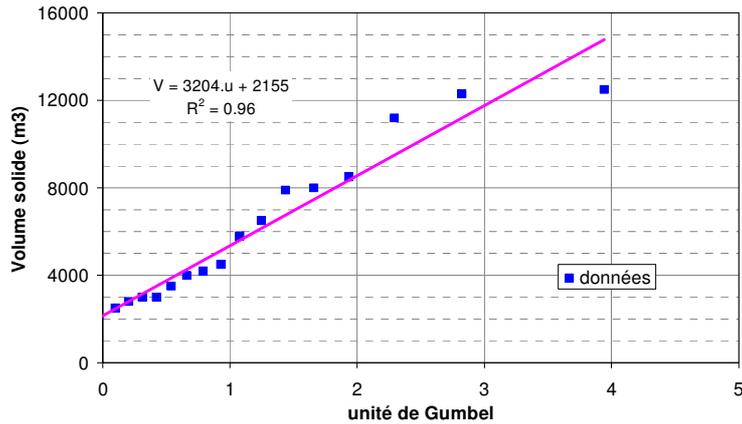


**Fig. 2** Plage de dépôt du torrent du Manival, Isère, (sources : 2A, Christophe Peteuil ; 2B, © S. Gominet, Irma)

**Fig. 2** Sediment trap of the Manival torrent, Isère, (sources : 2A, Christophe Peteuil ; 2B, © S. Gominet, Irma)

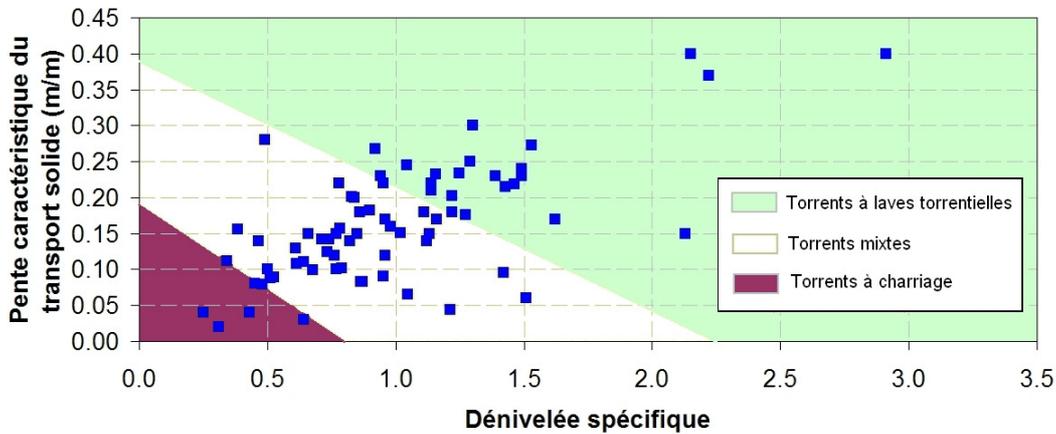
Trois échantillons ont ainsi été constitués en fonction des données et des aménagements disponibles sur chaque site (tableau 1). Tous les bassins recensés ont ensuite fait l'objet d'une description détaillée qui a conduit en particulier à :

- calculer les principaux paramètres morphométriques des bassins versants comme, la surface drainée, l'altitude du point culminant ou l'altitude de l'exutoire ;
- localiser et délimiter les zones en érosion active connectées au réseau hydrographique ;
- tracer et interpréter le profil en long général des torrents ;
- définir le ou les processus de transport solide expliquant de manière prépondérante la dynamique sédimentaire du torrent (figure 4), à partir d'observations de terrain et d'une approche théorique tenant compte de la morphométrie des bassins versants (Marchi et Brochot, 2000) ;
- déterminer certains indicateurs climatiques, comme la pluie journalière décennale, grâce aux données fournies par Météo-France ou aux résultats de travaux universitaires (Djrboua, 2001).



**Fig. 3** Ajustement à une loi de Gumbel des données de production sédimentaire du torrent des Palles, département de l'Isère, France

**Fig. 3** Gumbel adjustment law used for the sediment supply chronicle of the Palles torrent, Isère, France



**Fig. 4** Dispersion des torrents étudiés dans le diagramme pente du lit vs. dénivelé spécifique du bassin, permettant de discriminer le processus de transport solide dominant selon le modèle de Marchi et Brochot (2000)

**Fig. 4** Relationship between stream slope and specific elevation used for the discrimination of solid transport processes according to Marchi and Brochot model (2000)

**Tab. 1** Principales caractéristiques des 3 échantillons constitués

**Tab. 1** Main characteristics of the 3 samples available

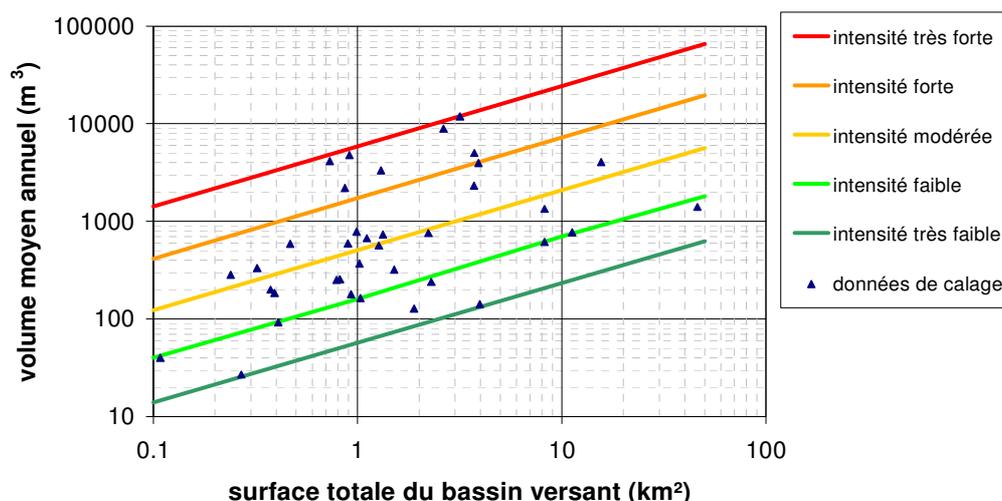
Echantillon		1	2	3
Torrents équipés d'une plage de dépôt		Oui	Oui	Non
Données de production sédimentaire disponibles	Quantiles $V_{10}$ et $V_{100}$	X		
	Apport moyen annuel	X	X	
	Apport maximum connu	X	X	X
Nombre de torrents		33	9	30

## ANALYSE DES DONNEES

### Liens entre production sédimentaire et surface du bassin versant

Dans un premier temps, nous avons analysé l'évolution de la valeur des volumes solides produits par les bassins versants en moyenne annuelle et de manière événementielle en fonction de la surface drainée. Quelle que soit la variable considérée, la dispersion des données s'avère très importante puisqu'elle atteint presque deux ordres de grandeurs dans les trois situations étudiées (figure 5). Ce constat n'est pas surprenant car les bassins versants comparés montrent une hétérogénéité importante,

tant du point de vue des processus de transport solide en jeu que de leur potentiel de production sédimentaire respectif.



**Fig. 5** Abaque utilisable pour estimer la production sédimentaire annuelle d'un torrent en fonction de l'intensité des processus érosifs

**Fig. 5** Relationship between annual sediment supply of a torrent and intensity of erosion processes in its basin

En comparant les caractéristiques des bassins de notre échantillon, les tendances extrêmes suivantes ont néanmoins été mises en lumière :

- les bassins versants les plus productifs sont caractérisés, à la fois, par des zones en érosion active très étendues (au moins 50% de la surface totale du bassin) et par des apports sédimentaires intervenant préférentiellement sous forme de laves torrentielles ;
- les bassins versants les moins actifs montrent, a contrario, une extension des sources sédimentaires assez faible (au mieux 15% de la surface totale du bassin) et des apports solides essentiellement liés à des processus de transport par charriage.

Ces éléments nous ont amené à définir plusieurs classes déterminant le niveau d'intensité des processus érosifs en considérant deux critères : le pourcentage de la surface totale en érosion active et le type de processus de transport solide prépondérant pour la dynamique sédimentaire du torrent (tableau 2).

**Tab. 2** Détermination de l'intensité des processus érosifs en fonction du pourcentage approximatif de la surface totale en érosion active et du processus de transport solide prépondérant

**Tab. 2** Assessment of erosion processes intensity as a function of total eroded area and main sediment transport phenomenon

Intensité des processus érosifs	Pourcentage de la surface totale en érosion active	Processus de transport solide prépondérant	
		Charrriage	Lave torrentielle
Très forte à forte	100 à 50%		x
Forte à modérée	50 à 15%	X	x
Modérée à faible	15 à 5%	X	x
Faible à très faible	Moins de 5%	X	

## Modèles statistiques multivariés

Les modèles statistiques multivariés 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 3). 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.

**Tab. 3** Sélection de quelques modèles statistiques multivariés pour l'estimation du volume des laves torrentielles :  $V_{\max}$  volume maximum de la lave torrentielle ( $m^3$ ) ;  $V_{\text{moy}}$  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).

**Tab. 3** Multivariate statistical models for debris flow volume assessment:  $V_{\max}$  maximum volume of the debris flow ( $m^3$ );  $V_{\text{moy}}$  mean volume of the debris flow ( $m^3$ );  $V_{100}$  100 years return period volume of the debris flow ( $m^3$ ); S basin area ( $km^2$ );  $A_i$  total eroded area index;  $A_{NV}$  area of the basin without vegetation under total basin area (%);  $D_s$  specific elevation or Melton index (%);  $I_m$  mean slope of the channel (%);  $I_c$  mean slope of the torrential fan (%);  $L_c$  active stream length (m); K torrential factor;  $I_G$  geological index;  $I_{GM}$  erosion index; P 10 years return period value for maximal daily rainfall (mm);  $D_Z$  maximum vertical drop of the basin (km).

Relation	Nombre de cas	Origine	Référence
$V_{\text{moy}} = 150.S.(I_c - 3)^{2.3}$	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 Zimmermann (1993)
$V_{\text{moy}} = 39.S.I_m^{1.5}.I_G$	62	Italie	D'Agostino <i>et al.</i> (1996)
$V_{\text{moy}} = 800.D_Z^{2.38}.A_i^{1.15}$	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)

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 représentatives des massifs montagneux français et dont la qualité est suffisamment homogène. Cette lacune explique aussi 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.

L'originalité et la spécificité de la base de données que nous avons constituée ont donc conduit à tester la faisabilité de modèles représentatifs des torrents des Alpes françaises. Trois groupements de données ont ainsi été constitués :

- le premier rassemble la totalité des données issues des 33 torrents équipés d'une plage de dépôt, sans distinction du phénomène de transport solide ;
- le second ne considère que les torrents « à laves » équipés d'une plage de dépôt, soit 28 bassins ;
- le troisième réunit tous les torrents dont la période de retour du volume maximum observé est a minima centennale de manière à pouvoir proposer un modèle capable de prédire l'intensité d'une crue extrême ; ce parti-pris nous a donc conduit à réduire significativement la taille de l'échantillon de calage (16 bassins).

L'examen des relations publiées dans la littérature nous a amené à sélectionner une première série de paramètres à considérer pour l'établissement de ce type de relations. La revue succincte présentée dans le tableau 3 suggère en effet que ces variables concernent essentiellement la morphologie du site. En revanche, les variables climatiques semblent beaucoup plus rarement utilisées.

Une analyse statistique multivariée a ensuite été menée afin de tester la pertinence et l'influence d'un grand nombre de paramètres caractéristiques des bassins versants. Le tableau 4 présente, à titre d'illustration, la matrice des coefficients de corrélation obtenue à partir des données observées au niveau des 33 torrents équipés d'une plage de dépôt, pour une sélection de variables expliquant le mieux la production sédimentaire correspondant à un temps de retour centennal. Cette analyse met notamment en lumière le très bon niveau de corrélation entre d'une part, le volume solide correspondant à un temps de retour centennal ( $V_{100}$ ) et, d'autre part, la surface en érosion active connectée au réseau hydrographique ( $S_A$ ) et la dénivelée entre le point culminant et le point bas du bassin versant ( $D_Z$ ).

**Tab. 4** 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).

**Tab. 4** Correlation matrixes between main regressors and 100 years return period sediment volumes, without sediment transport processes distinction. With:  $V_{100}$  100 years return period volume of the debris flow ( $m^3$ ) ;  $S_A$  eroded area connected with the hydrographic network ( $km^2$ ) ;  $D_Z$  maximum drop of the basin (m) ; S basin area ( $km^2$ ) ; I slope of the regulative section located just upstream of the sediment trap (m/m) ;  $P_{j100}$  100 years return period of the daily rainfall (mm) ;  $P_{h100}$  100 years return period of the hourly rainfall (mm).

	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

Nous avons alors procédé à une série de tests itératifs qui ont permis d'établir plusieurs modèles statistiques. La performance de ces modèles a été évaluée à partir d'indicateurs très classiques en statistique (tableau 5 et figure 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.

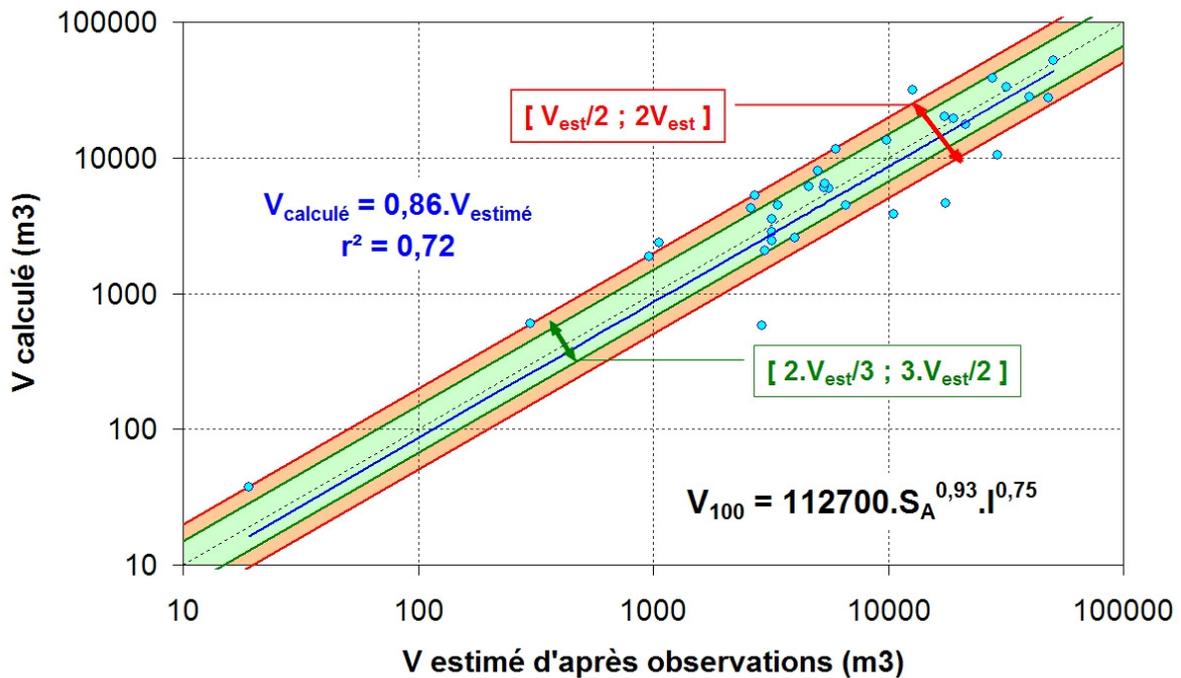
**Tab. 5** Comparaison de la performance des différentes relations empiriques testées selon le nombre et le type de variable retenus. Pour mémoire, une parfaite adéquation entre les valeurs calculées et les valeurs estimées se traduit par : une valeur égale à 1 pour le rapport  $V_{calc}$  sur  $V_{est}$ , 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.

**Tab. 5** Comparison of the performance of the empirical relationships tested as a function of the number and type of used variables. A perfect adequacy between calculated and observed values conducts to a value equal to 1 for  $V_{calc}/V_{est}$ ,  $r^2$  and for Nash criterion; a value equal to 1 for the mean square deviation; a 100% rate for the calculated values included in the reference intervals.

Variables	$\frac{V_{\text{calc}}}{V_{\text{est}}}$	$r^2$	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen	Critère de Nash
			$[2V_{\text{est}}/3 ; 3V_{\text{est}}/2]$	$[V_{\text{est}}/2 ; 2V_{\text{est}}]$		
$S_A, S, I, P_{j100}, P_{h100}$	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

Pour choisir la relation la plus pertinente, trois critères ont finalement été considérés : le niveau de performance du modèle mis en lumière par les indicateurs considérés précédemment ; 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.



**Fig. 6** Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir d'un modèle applicable aux processus de laves torrentielles et de charriage

**Fig. 6** Relationship between calculated and observed values for a predictive model dedicated to the assessment of sediment supply due to torrents characterised by bedload and debris flow phenomenon..

Les modèles finalement proposés sont rassemblés dans le tableau 6. Leur structure s'avère globalement proche des relations publiées précédemment (tableau 3). De manière prévisible, les données climatiques ne se révèlent pas significatives pour expliquer l'importance de la production sédimentaire, ce qui donne à ces modèles une portée plutôt régionale.

**Tab. 6** Modèles statistiques multivariés proposés pour prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par un torrent, où  $V_{100}$  est la production sédimentaire de période de retour centennale ( $m^3$ ),  $V_{10}$  est la production sédimentaire de période de retour décennale ( $m^3$ ),  $V_{max}$  est le volume maximum de la lave torrentielle ( $m^3$ ),  $S$  est la surface totale du bassin ( $km^2$ ),  $S_A$  représente la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique ( $km^2$ ),  $I$  est la pente moyenne du tronçon conditionnant l'intensité du transport solide au droit du site étudié ( $m/m$ ) et  $D_Z$  est la dénivelée entre les altitudes extrêmes du bassin versant ( $m$ ).

**Tab. 6** Statistical multivariate models proposed for the assessment of torrent sediment supply. With:  $V_{100}$  100 years return period sediment supply ( $m^3$ );  $V_{10}$  10 years return period sediment supply ( $m^3$ );  $V_{max}$  maximum volume of the debris flow;  $S$  basin area ( $km^2$ );  $S_A$  eroded area connected with the hydrographic network ( $km^2$ );  $I$  slope of the regulative section located just upstream of the studied site and  $D_Z$  maximum drop of the basin ( $m$ ).

Relation	Processus de transport prépondérant	Nombre de cas	$\frac{V_{calc}}{V_{est}}$	R <sup>2</sup>	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Intervalle rassemblant 100% des valeurs estimées
					[2V/3;3V/2]	[V/2;2V]	
$V_{10} = 24000.S_A^{0.82}.I^{0.50}$	Laves torrentielles et charriage	33	0,70	0,57	42	76	[V/3;5V/2]
$V_{100} = 112700.S_A^{0.93}.I^{0.75}$		33	0,86	0,72	55	82	[V/5;5V/2]
$V_{10} = 0,457.S_A^{0.65}.D_Z^{1,40}$	Laves torrentielles	28	0,75	0,91	75	89	[2V/5;5V/2]
$V_{100} = 0,40.S_A^{0.60}.D_Z^{1,55}$		28	0,97	0,82	70	93	[V/3;2V]
$V_{max} = 0,013.S_A^{0,47}.D_Z^{2,11}$		16	1,1	0,47	31	75	[2V/5;3V]

Outre le fait d'avoir été calés sur des données représentatives des torrents des Alpes françaises, le principal intérêt de ces modèles est de présenter un niveau de performance qui s'avère plutôt satisfaisant, comparativement au degré d'incertitude généralement accordé à d'autres approches applicables dans un tel contexte.

Ces modèles apportent aussi une dimension originale par la prise en compte de la surface en érosion active du bassin versant connectée au réseau hydrographique. Il s'agit en effet d'une variable fortement corrélée à l'intensité des apports solides. Conceptuellement, ce paramètre représente le potentiel de production sédimentaire du bassin versant.

Il est intéressant de noter que la pente intervient dans les modèles qui intègrent des données d'apports solides par charriage, ce qui peut sans doute s'interpréter comme la prise en compte d'un terme de capacité de transport des sédiments au sein du réseau hydrographique.

Dans les modèles plus spécifiquement dédiés aux bassins « à laves », la pente n'intervient pas. Ce constat n'est pas choquant car sur ce type de torrents, 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. Ces mêmes modèles tiennent toutefois compte de la dénivelée maximum, qui peut alors être considérée comme un terme d'énergie potentielle. Le poids de cette variable est en effet assez significatif compte tenu de la valeur de l'exposant auquel elle est associée.

## MISE EN OEUVRE DE LA METHODE ECSTREM

Pour sa mise en œuvre, la méthode ECSTReM nécessite en premier lieu de délimiter la surface drainée par le torrent étudié et de déterminer les altitudes minimales et maximales du bassin versant.

Les zones en érosion active sont ensuite cartographiées partir de photographies aériennes, en considérant différentes dates de prises de vue si une évolution sensible de l'activité des processus affectant les versants et les chenaux est constatée. Toutes les surfaces visiblement en érosion ne contribuant pas nécessairement à la recharge sédimentaire du torrent, il est primordial de caractériser l'état de couplage entre les versants et les lits. Les sources sédimentaires du torrent sont identifiées en

différenciant les zones en érosion active connectées au réseau hydrographique de celles qui ne le sont pas. Cette distinction est établie à partir d'une interprétation des photographies aériennes, d'un examen des cartes topographiques et d'une reconnaissance de terrain. Dans l'exemple de la figure 7, les zones en érosion active concernent ainsi 13% de la superficie totale du bassin mais seulement 60% d'entre elles contribuent à la recharge sédimentaire du torrent. Sur ce torrent, certains sédiments produits en altitude restent en effet stockés sur les versants en raison de l'agencement du système de pentes ou de l'absence d'exutoires clairement matérialisés sur le terrain.

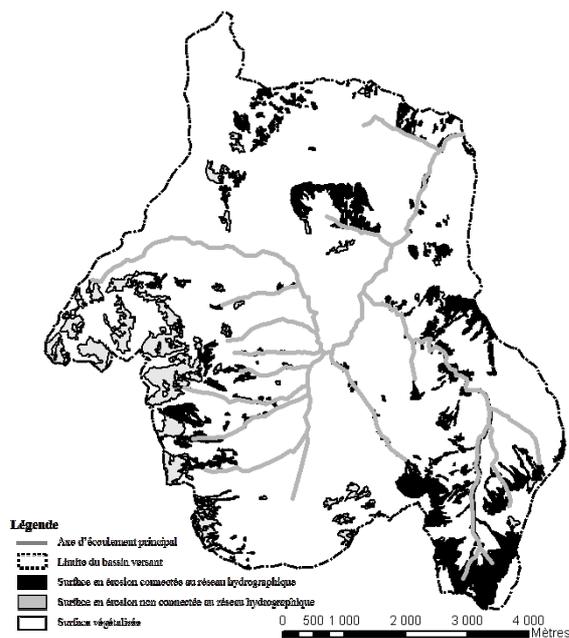
Le processus de transport solide le plus déterminant dans la dynamique sédimentaire du torrent doit ensuite être identifié. Pour savoir si les apports interviennent sous l'effet du charriage et/ou de laves torrentielles, il s'avère alors utile d'analyser les documents relatifs aux événements historiques connus. Une attention particulière doit être portée à la description des écoulements, des dépôts et du type de dégâts. Le risque de déclenchement et de propagation de laves torrentielles peut également être évalué à partir de l'examen du profil en long du torrent. Il s'agit notamment de vérifier si l'évolution spatiale de la pente longitudinale permet, à la fois, la formation des coulées et leur transit jusqu'à la zone étudiée. Un examen in situ de la morphologie des chenaux et des dépôts torrentiels permet en général de valider si le risque de laves torrentielles doit finalement ou non être pris en compte.

L'examen des photographies aériennes et du profil en long est également pratique pour localiser les biefs où un équilibre dynamique s'opère au gré des fluctuations de la fourniture en matériaux. Cette analyse s'avère indispensable pour appréhender correctement le fonctionnement d'un torrent. La démarche consiste d'abord à repérer et à expliquer l'origine des différentes ruptures de pentes : passage de gorges rocheuses, impact d'une recharge sédimentaire latérale (glissement de terrain, affluent)... Dans le cas du profil longitudinal présenté sur la figure 8, une nette diminution de la pente est ainsi visible en partie aval du bassin versant. Dans ce même secteur, le chenal actif a également la possibilité de divaguer largement, permettant au torrent de réguler efficacement ses apports solides. Le torrent y dépose en effet ses matériaux lorsque les apports sont extrêmes et il les reprend lorsqu'ils sont plus modérés, atténuant ainsi l'instabilité des biefs situés en aval.

Des reconnaissances de terrain ciblées permettent ensuite de confirmer les hypothèses de fonctionnement préalablement formulées et de mesurer concrètement la valeur moyenne de la pente d'équilibre du tronçon qui assure éventuellement une régulation des apports solides en amont immédiat du site étudié.

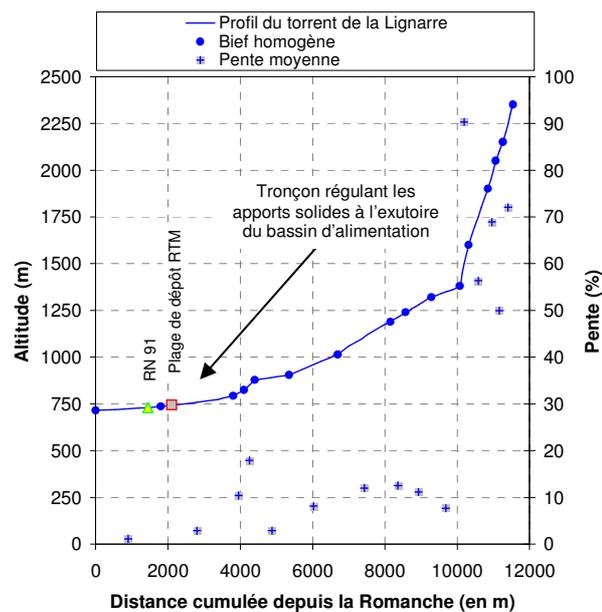
A l'issue de cette phase de diagnostic, les modèles statistiques multivariés proposés peuvent être appliqués afin de prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par le torrent pour des événements de crue d'occurrence fréquente, rare ou exceptionnelle. Si nécessaire, la mise en œuvre de modèles spécifiquement dédiés aux torrents « à laves » est également possible. Le niveau de confiance du résultat peut enfin être apprécié en considérant plusieurs intervalles d'incertitude typiques.

Le domaine de validité de la méthode ECSTReM est fixé par les caractéristiques de l'échantillon de calage des modèles (tableau 7), qui est principalement constitué de bassins versants torrentiels de pente allant de 3% à 40%, et de taille inférieure à 50 km<sup>2</sup> environ.



**Fig. 7** Etat de connexion des zones en érosion active cartographiées sur le torrent de la Lignarre en Isère, France

**Fig. 7** State of connexion of the eroded areas on the Lignarre basin, Isère, France



**Fig. 8** Profil en long du torrent de la Lignarre en Isère, France

**Fig. 8** Long profile of the Lignarre torrent, Isère, France

**Tab. 7** Plage de variation des principales variables considérés par les modèles de la méthode ECSTReM

**Tab. 7** Variation range of the main variables considered by the models of the ECSTReM method

Variable	Borne basse	Médiane	Borne haute
Surface du bassin versant	0,13 ha	1,66 km <sup>2</sup>	46,1 km <sup>2</sup>
Surface en érosion active connectée au réseau hydrographique	0,1 ha	34 ha	5,18 km <sup>2</sup>
Pente conditionnant l'intensité des apports solides au droit du site étudié	2%	15%	40%
Dénivelée maximum	35 m	1289 m	2576 m
Durée des chroniques (échantillons 1 et 2)	10 ans	27 ans	40 ans

## 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.

Ce projet n'aurait certainement pas pu aboutir sans l'aide et l'investissement de Benoît Fragnol (2008), de Cyril Jousse (2009) et de Véronique Briguet (2010), dont la qualité des travaux a permis de jeter des bases très solides à cette réflexion. Qu'ils reçoivent ici notre profonde reconnaissance.

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.

## RÉFÉRENCES

- Bovis M.J., Jakob M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth surf. process. landforms* 24, 1039-1054.
- Briguet V. (2010). Contribution à l'élaboration d'une méthode d'estimation de la production sédimentaire annuelle et événementielle des bassins versants des Alpes françaises. Mémoire stage de 2ème année d'études de l'ENSE3 réalisé à l'ONF – service RTM de l'Isère.
- 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 / Österreich, Band 3, Seite 57-68.*
- 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.
- Brochot S. (communication personnelle). La prédiction des volumes de laves torrentielles : vers un modèle global sommaire pour les Alpes occidentales françaises ?
- D'Agostino V., Cerato M., 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.*
- Djrboua 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.
- Fragnot B. (2008). 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 à Grenoble.
- Hampel R. (1977). *Geschiebewirtschaft in Widbachen, Wildbach und Lawinenverbau*, 41: 3-34.
- 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.
- Kronföllner Kraus G. (1985). Quantitative estimation of torrent erosion. *International Symposium on erosion, debris flow and disaster prevention - September 3-5, Tsukuba, Japan*, 107-110.
- Marchi L., Brochot S. (2000). Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, Morphométrie et processus de transport solide torrential. *Revue de Géographie Alpine*, n°3, t. 88.
- Rickenmann D., Zimmermann M. (1993). The 1987 debris-flow in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8, 175-189.