

# ECSTREM, UNE APPROCHE PRATIQUE POUR PREDIRE LA PRODUCTION SEDIMENTAIRE ANNUELLE ET EVENEMENTIELLE DES TORRENTS A PARTIR D'OBSERVATIONS ORIGINALES SPECIFIQUES AUX ALPES FRANÇAISES

*ECSTReM, a practical approach based on an original data collection for predicting the sediment yield in torrents of the French Alps*

**Christophe Peteuil**

Office National des Forêts - service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère  
9 quai Créqui, 38000 Grenoble, France  
e-mail: [christophe.peteuil@onf.fr](mailto:christophe.peteuil@onf.fr)

**Frédéric Liébault**

Cemagref Grenoble, UR Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches  
Domaine Universitaire, 2 rue de la Papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France,  
e-mail: [frederic.liebault@cemagref.fr](mailto:frederic.liebault@cemagref.fr)

*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 de terrain observées sur des torrents des 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 annuelle et événementielle de torrents à fortes pentes dont la superficie est inférieure à 50 km<sup>2</sup> environ. 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 la délimitation des zones en érosion active connectées au réseau hydrographique.*

*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 Data on sediment yield from 72 catchments have been collected from sediment retention basins registry, historical documents from archives, scientific papers and technical reports.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.*

## I CONTEXTE ET OBJECTIFS

La prédiction de la production sédimentaire des torrents est un domaine qui, du fait de sa complexité et de la rareté des mesures disponibles, souffre de nombreuses incertitudes. Les enjeux liés à cette problématique sont pourtant multiples : gestion du transport solide dans les cours d'eau de montagne, en particulier au droit des dispositifs hydrauliques qui les équipent, évaluation des aléas torrentiels dans les zones à enjeux, définition des crues de projet pour le dimensionnement d'ouvrages de protection.

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 par le service RTM de l'ONF et le Cemagref de Grenoble 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 annuelle et événementielle d'un bassin versant torrentiel.

## II METHODE

Dans un premier temps, nous avons constitué une base de données portant sur la production sédimentaire de 72 bassins versants torrentiels des Alpes françaises (figure 1). Ces données sont issues de plusieurs sources disponibles au service RTM : la base de données « événements » et les registres de suivi des plages de dépôt dont il assure la gestion (figure 2). Nous avons également pu extraire de nombreuses informations figurant dans des publications scientifiques et des rapports techniques rédigés lors d'expertises spécifiques à certains sites.

Pour les torrents où des chroniques suffisamment longues étaient disponibles, nous avons estimé les quantiles représentant la production sédimentaire pour des périodes de retour décennale et centennale à partir d'un ajustement des données échantillonnées à une loi de Gumbel (figure 3). Lorsque les chroniques étaient insuffisantes, seuls les volumes moyens annuels ont été calculés. Par contre, le volume solide maximum connu a été identifié pour tous les torrents répertoriés. La période couverte va alors du XIX<sup>ème</sup> au XXI<sup>ème</sup> siècle. Trois échantillons ont ainsi pu être constitués en fonction des données disponibles (tableau 1).

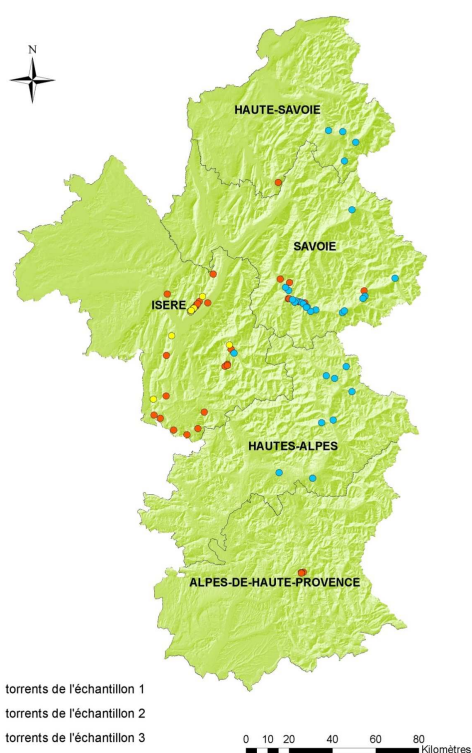


Figure 1. Localisation des torrents étudiés



Figure 2. Bassin d'alimentation et plage de dépôt RTM du torrent du Manival en Isère, France (© S. Gominet, Irma)

Nous avons ensuite déterminé les principaux éléments descriptifs des torrents de l'échantillon de calage : paramètres morphométriques des bassins versants, zones en érosion active connectées au réseau hydrographique, profil en long, processus de transport solide (figure 4) et pluviométrie. A partir de cette base de données, une analyse statistique multivariée a été menée afin de déterminer quels étaient les paramètres les mieux corrélés statistiquement aux variables de production sédimentaire des torrents étudiés. Cette démarche a permis de sélectionner les variables les plus pertinentes et de caler ensuite plusieurs modèles statistiques dont la performance a été évaluée (tableau 2 et figure 5). Des abaques simples et rapides d'utilisation ont également été établies (figures 6 à 8 et tableau 3).

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 prépondérant pour le torrent. L'intérêt de ces modèles est surtout 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.

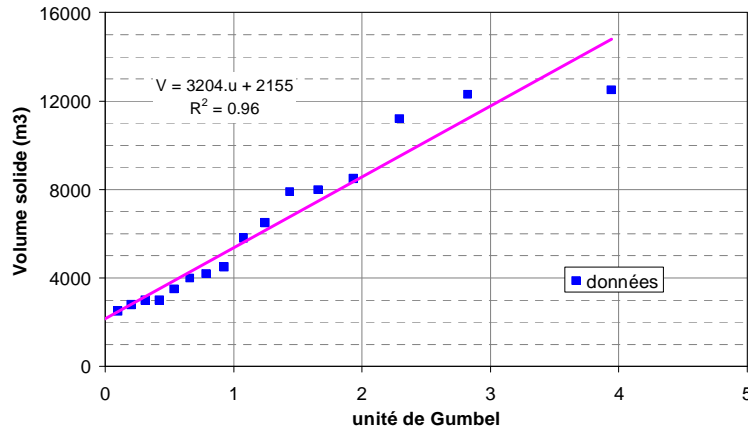


Figure 3. Ajustement à une loi de Gumbel des données de production sédimentaire du torrent des Palles en Isère, France

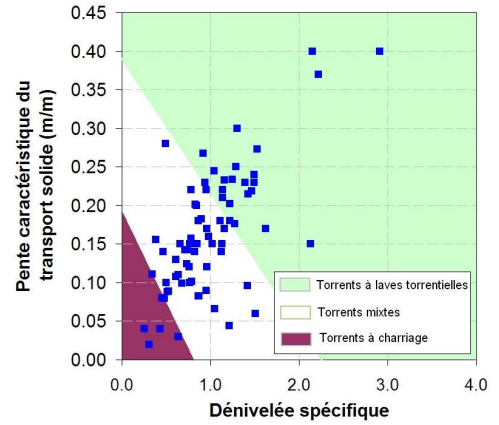


Figure 4. Processus de transport solide prédominants

Tableau 1. Principales caractéristiques des 3 échantillons constitués

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

Tableau 2. Modèles statistiques multivariés proposés pour prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par un torrent, où  $V_a$  est le volume moyen annuel ( $m^3$ ),  $V_{100}$  est la production sédimentaire de 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 ( $m$ )

Relation	Processus de transport prépondérant	Nombre de cas	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Intervalle rassemblant 100% des valeurs estimées
			$[2V/3; 3V/2]$	$[V/2; 2V]$	
$V_a = 506.S^{0,62}$	Laves torrentielles et charriage	42	-	-	-
$V_{10} = 24000.S_A^{0,82}.I^{0,50}$		33	42	76	$[V/3; 5V/2]$
$V_{100} = 112700.S_A^{0,93}.I^{0,75}$		33	55	82	$[V/5; 5V/2]$
$V_{10} = 0,457.S_A^{0,65}.D_Z^{1,40}$	Laves torrentielles	28	75	89	$[2V/5; 5V/2]$
$V_{100} = 0,40.S_A^{0,60}.D_Z^{1,55}$		28	68	89	$[V/3; 2V]$
$V_{max} = 0,013.S_A^{0,47}.D_Z^{2,11}$		16	31	75	$[2V/5; 3V]$

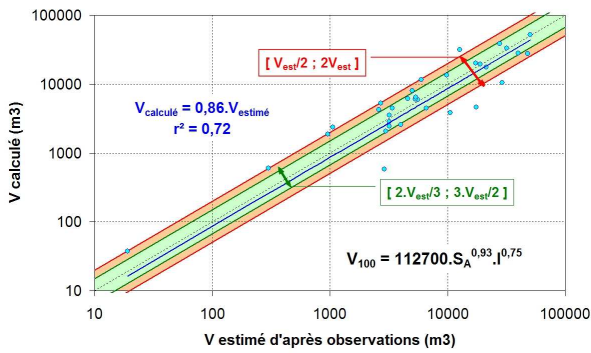


Figure 5. Reconstitution de la production sédimentaire centennale à partir d'un modèle applicable aux processus de laves torrentielles et de charriage

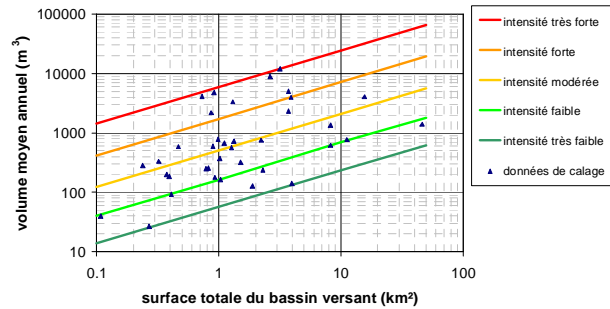


Figure 6. Abaque utilisable pour estimer la production sédimentaire annuelle d'un torrent en fonction de l'intensité des processus érosifs

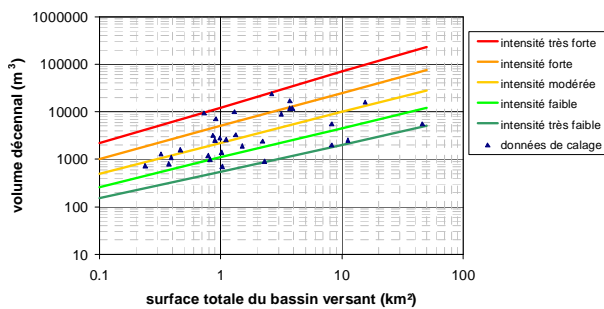


Figure 7. Abaque utilisable pour estimer la production sédimentaire décennale d'un torrent en fonction de l'intensité des processus érosifs

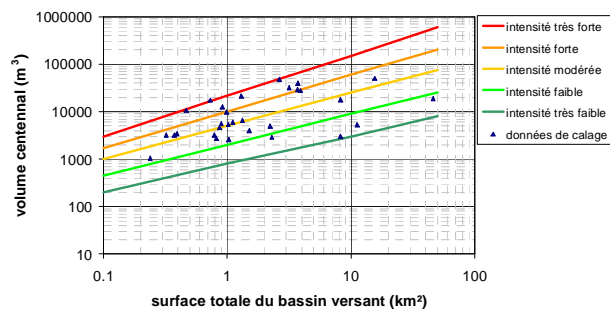


Figure 8. Abaque utilisable pour estimer la production sédimentaire centennale d'un torrent en fonction de l'intensité des processus érosifs

Tableau 3. 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.

Intensité des processus érosifs	Pourcentage de la surface totale en érosion active	Processus de transport solide prépondérant	
		Charriage	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	< 5%	x	

### III 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 à 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 (figure 9). Cette distinction est établie à partir d'une interprétation des photographies aériennes, d'un examen des cartes topographiques et d'une reconnaissance de 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 (figure 10). 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, plusieurs modèles statistiques multivariés sont appliqués afin de prédire l'intensité de la fourniture en matériaux susceptible d'être produite par le torrent en moyenne annuelle, et pour des événements de crue d'occurrence fréquente, rare ou exceptionnelle (tableau 2). Certains de ces modèles sont spécifiquement dédiés aux torrents « à laves ». Le niveau de confiance du résultat est également apprécié en considérant plusieurs intervalles d'incertitude typiques. Pour disposer rapidement d'un premier ordre de grandeur de la production sédimentaire, des abaques tenant compte de la surface du bassin et du niveau d'intensité des processus érosifs peuvent également être utilisés (figures 6 à 8 et tableau 3).

Le domaine de validité de la méthode ECSTReM est fixé par les caractéristiques de l'échantillon de calage des modèles (tableau 4), qui est principalement constitué de bassins versants torrentiels à forte pente et de taille inférieure à 50 km<sup>2</sup> environ.

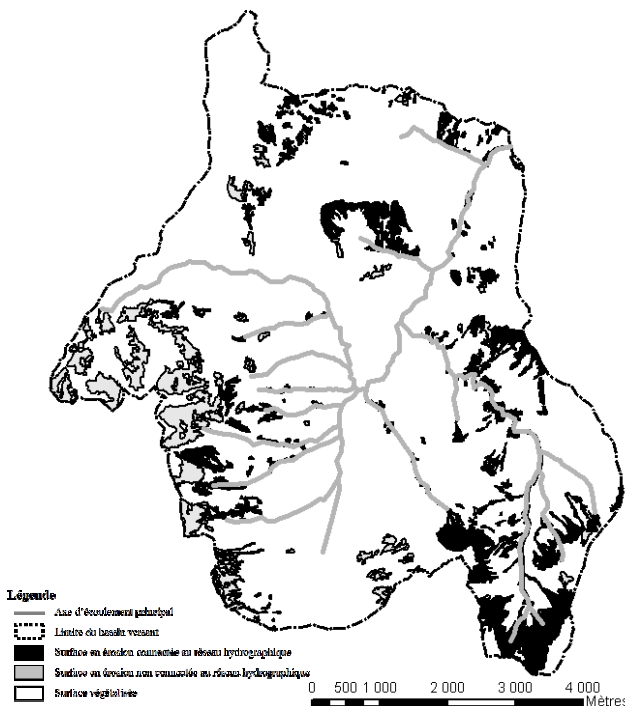


Figure 9. Etat de connexion des zones en érosion active cartographiées sur le torrent de la Lignarre en Isère, France

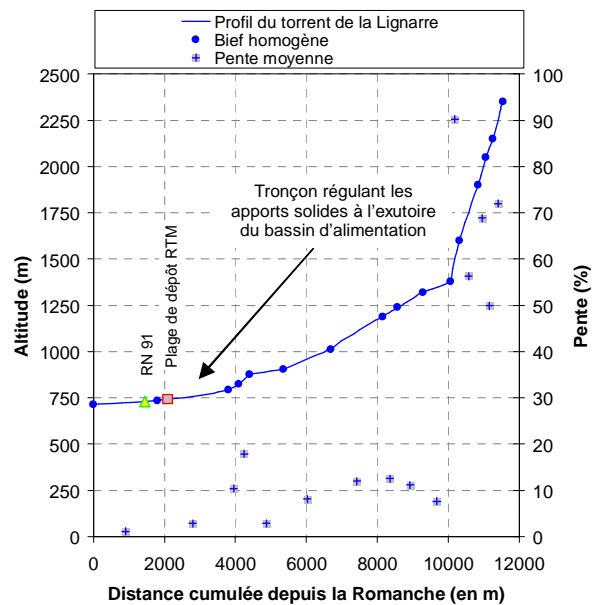


Figure 10. Profil en long du torrent de la Lignarre en Isère, France

**Tableau 4.** Plage de variation des principales variables considérés par les modèles de la méthode ECSTReM

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

#### IV 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 [1], de Cyril Jousse [2] et de Véronique Briguet [3], 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.

#### V REFERENCES

- [1] Fragnol, 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.
- [2] 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.
- [3] 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 2<sup>ème</sup> année d'études de l'ENSE<sup>3</sup> réalisé à l'ONF – service RTM de l'Isère.