



**HAL**  
open science

# Quantifier le transport solide dans un petit bassin versant et les évolutions morphologiques d'un bief de rivière

André Paquier, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Didier Richard, N. Mathys, D. Laigle

► **To cite this version:**

André Paquier, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Didier Richard, N. Mathys, et al.. Quantifier le transport solide dans un petit bassin versant et les évolutions morphologiques d'un bief de rivière. 2008, pp.4. hal-02591958

**HAL Id: hal-02591958**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02591958v1>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Quantifier le transport solide dans un petit bassin versant et les évolutions morphologiques d'un bief de rivière

© Cemagref – Avril 2008

Les savoir-faire

►► Fiche accessible en ligne sur le site <http://sinfotech.cemagref.fr>  
Accès réservé aux services déconcentrés de l'État

*Les études de transport de sédiments dans le lit des rivières nécessitent des traitements adaptés aux objectifs poursuivis. Les cours d'eau à forte pente ont des particularités qui leur sont propres.*

*Cette fiche précise les informations nécessaires à ces études et présente les principaux logiciels développés par le Cemagref et les précautions à prendre dans leur emploi.*

Le lit des rivières évolue dans le temps. Ainsi, après des aménagements dans le lit ou le bassin versant, l'évolution naturelle va ramener le lit vers un nouvel équilibre. Les conséquences peuvent être une aggravation des inondations du fait de l'accumulation de dépôts. À l'inverse, on peut avoir un abaissement du lit qui amènerait à :

- une déstabilisation des berges,
- une érosion en pied des ouvrages placés en travers du lit

Ce remodelage peut aussi entraîner une augmentation du transport des sédiments fins et par suite des risques de pollution :

- soit mécanique : colmatage de sédiments grossiers,
- soit chimique : mise en mouvement de polluants adsorbés sur les particules.

## Les données mobilisées dépendent des objectifs de l'étude

Une étude du transport de sédiments peut donc avoir des objectifs très différents qui demandent à être traités de manières différenciées et à partir de données convenables.

Un des éléments de différenciation est le terme auquel on s'intéresse :

- le court terme, pendant ou après une crue : quels seront les niveaux de l'eau, du fond ? Quel volume aura été déplacé ? Quels sédiments (taille, qualité) auront pris part aux processus de transport ?
- le long terme : quelle évolution de la forme du lit ? Quelles variations dans les paramètres des sédiments du lit ?

Si on s'intéresse aux conséquences d'un aménagement, les deux termes seront en général à examiner mais pas forcément avec les mêmes outils.

Un deuxième élément de différenciation est le type de transport des sédiments :

- la charge de fond qui peut être constituée de sédiments en charriage (particules roulant ou effectuant des sauts) ou en suspension (particules maintenues dans l'écoulement et n'heurtenant qu'occasionnellement le fond). Le comportement des rivières à sable

(photo 1) ou à graviers (photo 2) est dans ce domaine différent avec l'importance du tri granulométrique et de la formation d'un pavage pour ces dernières ;

- l'autosuspension où les particules en suspension n'interagissent pas directement avec le fond. Ce type de transport est peu souvent étudié car n'ayant pas d'influence majeure sur l'écoulement. Il dépend fortement des apports à la rivière et l'estimation de ces apports est le point clé de ces études.

Pour la charge de fond, l'estimation des apports est parfois moins critique car la quantité de sédiments transportés est limitée par la capacité maximale de transport de l'écoulement. Cette capacité est déterminée par des formules empiriques où les paramètres clés sont la vitesse de l'écoulement et la taille des particules. La disponibilité en matériaux dans un lit non ou peu érodable est un autre facteur limitant.

À côté de cette connaissance des sédiments du lit et de ceux apportés, les paramètres importants pour comprendre le transport sont ceux qui gouvernent les écoulements : topographie, hauteur d'eau, vitesse, végétation.



Photo : UR Hydrologie Hydraulique, Cemagref.



Photo : UR Hydrologie Hydraulique, Cemagref.

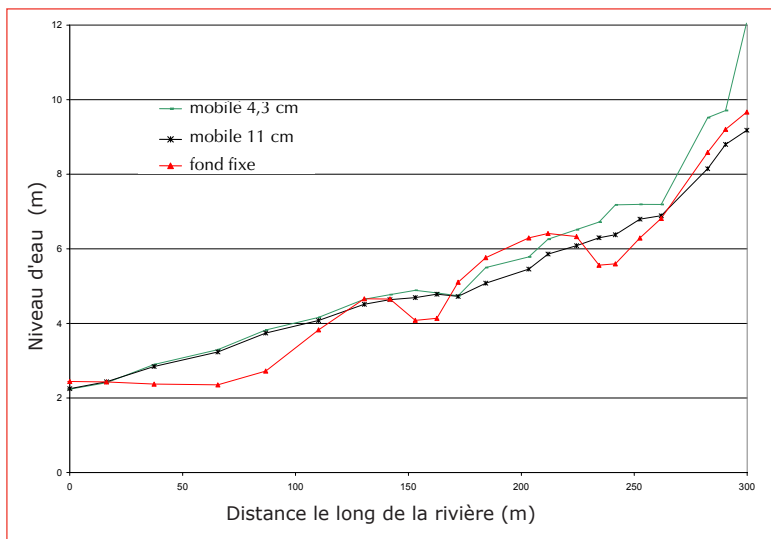
## Contacts ►►

André PAQUIER,  
Benoît CAMENEN  
et Jérôme LE COZ  
Cemagref,  
UR Hydrologie-hydraulique  
3 bis quai Chauveau  
CP 220  
69336 Lyon Cedex 09  
Tél. 04 72 20 87 87  
andre.paquier@cemagref.fr  
benoit.camenen@cemagref.fr  
jerome.lecoz@cemagref.fr

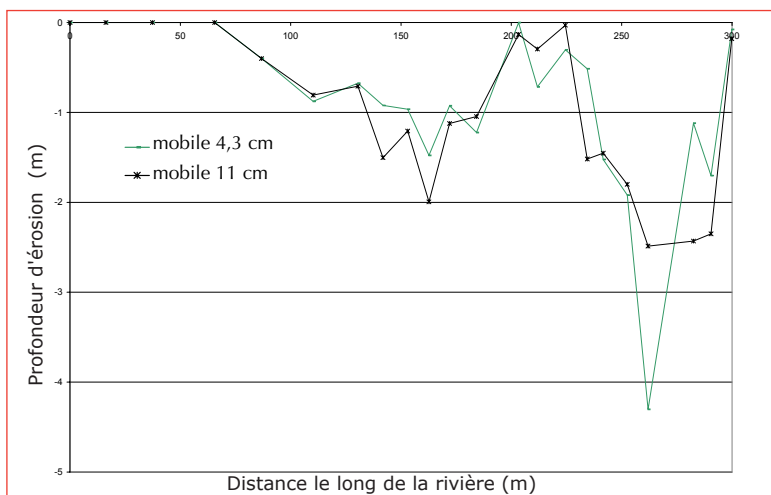
Didier RICHARD, Nicole MATHYS  
et Dominique LAIGLE  
Cemagref, UR Érosion torrentielle,  
neige et avalanches  
2 rue de la Papeterie  
BP 76  
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex  
Tél. 04 76 76 27 27  
didier.richard@cemagref.fr  
nicolle.mathys@cemagref.fr  
dominique.laigle@cemagref.fr

◀ Photo 1 – Exemple de rivière à sable : la Loire.

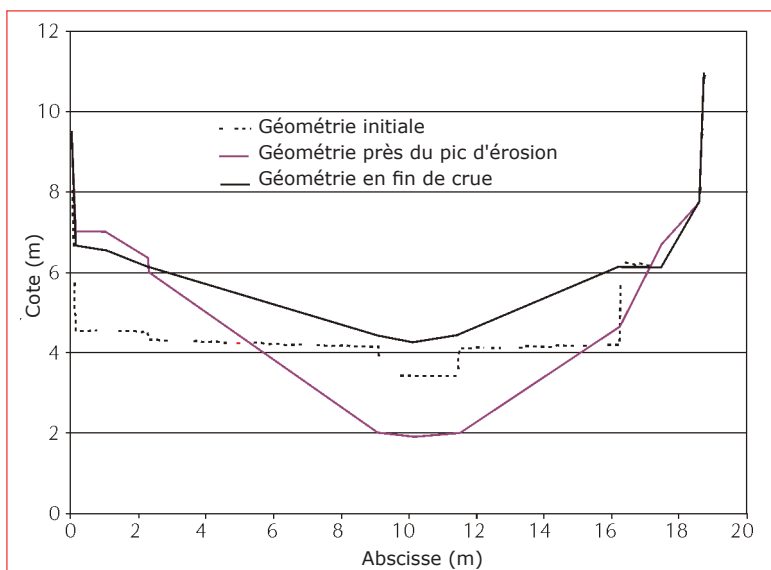
◀ Photo 2 – Exemple de rivière à graviers : l'Arc.



▲ **Figure 1** – Niveaux d'eau maximaux lors d'une crue centennale : comparaison entre un calcul à fond fixe et deux calculs à fond mobile avec un sédiment du diamètre indiqué.



▲ **Figure 2** –profondeurs maximales d'érosion lors d'une crue centennale : comparaison de deux calculs à fond mobile avec un sédiment du diamètre indiqué.



▲ **Figure 3** – Exemple de calcul de l'évolution d'une section lors d'une crue centennale.

De ce fait, une étude hydrosédimentaire qui entend donner des résultats quantitatifs devra en premier se baser sur une bonne connaissance des écoulements, ce qui passe en général par la construction d'un modèle hydraulique.

Les pré-requis au lancement d'une étude sur le transport des sédiments sont donc :

- disposer de données suffisantes pour bâtir et caler un modèle hydraulique ;
- disposer de données sédimentaires et d'observations sur les effets du transport de sédiments dans des conditions similaires à celles qu'on veut étudier. Les observations serviront à caler le modèle. Elles peuvent être constituées : de topographies (pour calculer les volumes déposés ou érodés par exemple), de mesures propres au transport de sédiments telles que les concentrations en MES, les volumes de sédiments transportés par charriage, l'épaisseur de sédiments remaniés, la granulométrie des couches de surface... De nombreuses méthodes de mesures existent et de nouvelles méthodes sont développées ou mises en oeuvre par le Cemagref.

Si l'on dispose d'un ensemble suffisant de données, des modèles hydrosédimentaires peuvent être utilisés pour prendre le relais d'évaluation qualitative ou d'emploi direct de formules aux conclusions souvent trop réductrices.

## Deux logiciels bien adaptés

En rivière, pour des questions opérationnelles, seuls des modèles 1D (dans l'axe de la rivière) ou 2D-H (dans les deux directions du plan) sont utilisés. Deux logiciels développés par le Cemagref sont présentés ci-après.

Le logiciel RubarBE traite de la charge du fond. Les équations résolues sont les équations de Saint-Venant pour l'écoulement et une équation de conservation de la masse de sédiments où le débit solide est évalué à partir d'une équation donnant la capacité maximale de transport. Plusieurs types d'évolution des formes de la section sont proposés et permettent de traiter les effets de crues. Les principales données nécessaires sont les sections en travers de la rivière, les caractéristiques des couches sédimentaires du lit et des apports. Les questions traitées sont : quel niveau d'eau maximal pendant une crue (figure 1) ? Quelle profondeur d'érosion maximale pendant la crue (figure 2) ? Quelle forme de section après la crue (figure 3) ? Peut-on atteindre un équilibre et à quel terme ?

Le logiciel Rubar20TS résout les équations de Saint-Venant 2D pour les écoulements et une équation de convection diffusion avec un terme source de dépôt et érosion pour une concentration (sédiments mais aussi solutés). Les données nécessaires sont les apports en sédiments (quantités et caractéristiques, en particulier, vitesse de chute), la topographie détaillée des fonds et la description associée des caractéristiques des sédiments à la surface du lit ainsi que des observations en niveau et vitesses pour caler le modèle hydraulique.

Ces logiciels de calcul de transport de sédiments et d'évolution des fonds peuvent répondre quantitativement à des questions variées. Dans l'envasement d'un bras mort de rivière (figure 4), par exemple, l'intérêt de l'utilisation du modèle est la compréhension des relations entre apports et dépôts ainsi que l'effet de la morphologie du bras mort sur la localisation des dépôts. Des précautions d'emploi de ces logiciels doivent être rappelées :

- le transport de sédiments est un phénomène fortement non linéaire. Un calage inadapté des paramètres du modèle peut conduire à des conclusions totalement erronées. L'utilisation d'un modèle doit donc toujours être associé à une étude qualitative (morphologie en particulier) qui permette de discuter des tendances générales que le modèle quantifiera ;
- les conditions initiales et les conditions aux limites doivent être traitées soigneusement pour éviter un biais en particulier au début du calcul qui masquerait l'évolution réelle ;
- les paramètres sont souvent définis sur des mailles de taille supérieure à la variabilité naturelle des paramètres sédimentaires ou géométriques : on doit donc veiller à la représentativité des paramètres utilisés dans le modèle pour l'échelle du modèle (valeurs moyennes, valeurs seuils...) ;
- les données sédimentaires sont difficiles à acquérir. Leurs valeurs mais aussi les moyens utilisés pour les obtenir et leur critique font aussi partie des résultats d'une étude hydro-sédimentaire.

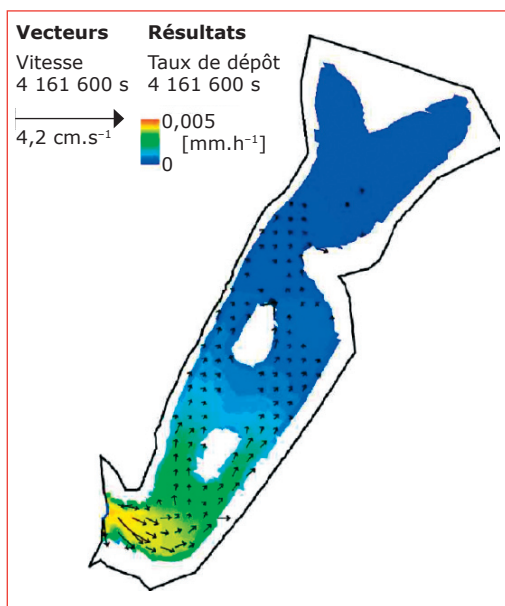
### Particularités du transport de sédiments dans les cours d'eau à forte pente

Particulièrement en zones de montagne, on trouve des cours d'eau à forte pente (torrents ou rivières torrentielles), lieux de crues soudaines et violentes, souvent provoquées par des précipitations elles-mêmes violentes et abondantes. Ce sont des crues à dynamique rapide, c'est-à-dire que seulement quelques heures au plus, et la plupart du temps beaucoup moins, séparent la montée des eaux de la pluie qui l'a provoquée.

La principale particularité des écoulements torrentiels par rapport aux écoulements en rivières réside dans un transport de sédiments en crue beaucoup plus important, y compris de particules solides de grandes dimensions (jusqu'à des blocs rocheux de plusieurs tonnes).

Dans ces conditions les interactions entre la phase liquide et la phase solide (figure 5) sont extrêmement développées et influencent fortement la nature des écoulements correspondants. Contrairement au cas des rivières, des évolutions morphologiques très importantes peuvent résulter d'un seul épisode de crue.

Les conséquences en termes de risque sont notablement aggravées en raison de ces transports solides intenses de matériaux



◀ **Figure 4 –** Exemple de relation entre champ de vitesses et taux de dépôt .

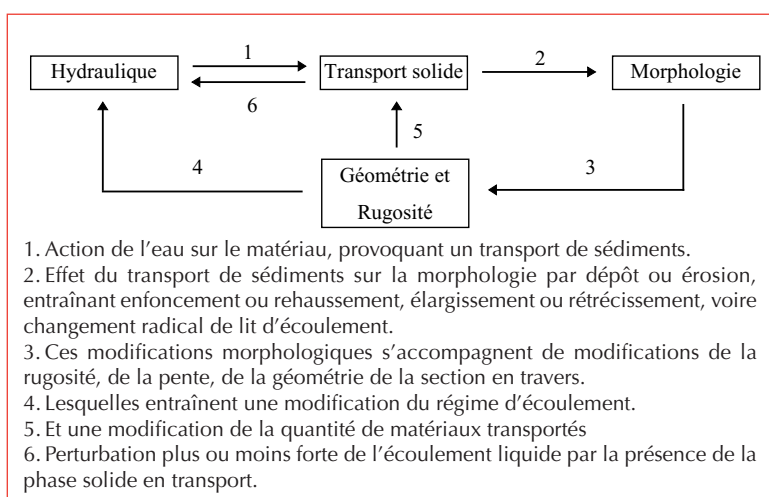
grossiers. Les études du transport solide torrentiel portent très souvent sur l'évaluation de l'aléa (volumes d'apports solides, étendue spatiale des débordements, hauteurs et vitesses d'écoulement). Les désordres observés résultent essentiellement des variations morphologiques liées au transport massif de sédiments (affouillements, dépôts, divagations...), et relativement peu des variations de la hauteur d'eau.

### Le transport solide torrentiel

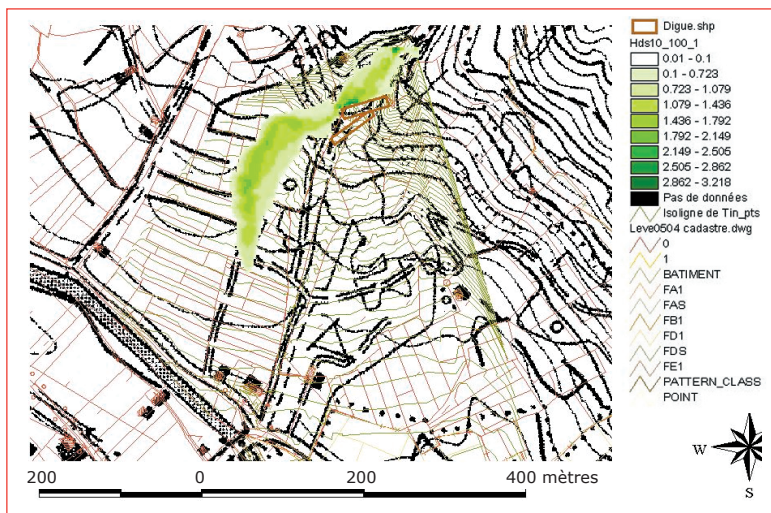
On distingue deux familles principales de transport solide torrentiel :

- le charriage torrentiel, processus assez semblable à ce que l'on observe en rivière, mais à concentration bien plus élevée (on peut atteindre des concentrations volumiques de quelques dizaines de pour-cent, contre en général moins de 1% en rivière) ;
- les laves torrentielles, un type d'écoulement spécifique aux torrents à forte pente, d'un mélange boueux et/ou rocailleux saturé en eau, avec une concentration solide telle que le mélange semble s'écouler comme un fluide pâteux, d'apparence monophasique. Il peut y avoir dans ces mélanges 4 à 5 fois plus de sédiments que d'eau (en volume).

▼ **Figure 5 –** Interactions entre phase liquide et phase solide.







▲ **Figure 6 –** Hauteurs maximales d'écoulement simulées pour un volume de 10 000 m<sup>3</sup>, de lave torrentielle sur le cône de déjection du torrent du Rioulong (Hautes-Pyrénées) dans l'hypothèse de l'implantation d'une digue présentant un angle d'incidence d'environ 45° par rapport au chenal amont du torrent.

### La modélisation des transports solides torrentiels

La modélisation de ces écoulements est rendue extrêmement difficile pour plusieurs raisons :

- les transports de sédiments en cours d'eau torrentiels résultent de processus aussi divers que complexes, sur les versants et dans les lits de cours d'eau. En particulier en raison de la granulométrie très étendue, de nombreux processus de tri granulométrique interagissent ;
- les volumes de sédiments mobilisés par les laves torrentielles sont la plupart du temps très peu déterminés par les laves d'eau précipitée ou écoulee, mais dépendent bien plus des stocks de sédiments mobilisables présents dans le bassin versant ;

- les lois classiques de l'hydraulique fluviale ne sont plus adaptées à ces écoulements fortement chargés, dès lors que la pente dépasse 7-8 % pour le transport solide par charriage, et en toutes circonstances pour les laves torrentielles ;

- les formules de transport solides par charriage restent très empiriques, et extrêmement difficiles à valider compte tenu de l'énorme déficit de données de terrain.

Il en résulte une énorme variabilité naturelle de ces phénomènes, se traduisant par des scénarios de crues très diversifiés.

L'utilisation des modèles présentés ci-après ne peut, en l'état des connaissances, se dispenser d'une analyse experte approfondie permettant l'analyse et la critique des résultats de modélisation.

Pour les transports solides par charriage torrentiel, le Cemagref a développé le modèle ETC (érosion des torrents en crue), qui permet à l'utilisateur de représenter un bassin versant torrentiel complet, décomposé en entités « versants » et en entités « biefs ». L'utilisateur peut choisir, pour chaque entité, entre diverses fonctions de production et de transfert (ruissellement, érosion).

Les principales données nécessaires sont la géométrie des versants et des biefs, les stocks solides et la composition granulométrique des lits, une pluie ou un hydrogramme d'entrée. Les calculs donnent pour chaque bief les débits liquides et solides et les volumes érodés ou déposés. En l'état, ETC ne permet cependant pas de représenter les évolutions morphologiques des tronçons de torrent étudiés.

Concernant l'écoulement des laves torrentielles, le modèle Lave2D aux volumes finis a été développé. Ce modèle résout les équations de Saint-Venant, et intègre un modèle de comportement adapté aux laves torrentielles boueuses. Il est adapté à la simulation de l'étalement d'une lave torrentielle sur son cône de déjection. Il peut également être utilisé pour estimer l'effet de certains ouvrages de protection tels que des digues, par exemple (figure 6). □

**Liens utiles ▶▶▶**

- Description des logiciels Rubar 3 avec sa version BE et Rubar 20 avec sa version 20TS : <http://www.lyon.cemagref.fr/hh/panorama/index.shtml#logiciels/>
- Description du logiciel ETC : [http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/resultats/modeles\\_numeriques/etc.htm](http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/resultats/modeles_numeriques/etc.htm)
- Description du logiciel Lave2D : [http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/resultats/modeles\\_numeriques/lave.htm](http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/resultats/modeles_numeriques/lave.htm)

**Bibliographie**

RAMEZ, P., 1995, Érosion et transport solide en rivière, tome 1 : guide pour la compréhension des phénomènes, Cemagref Éditions, Antony, Coll. Études du Cemagref, série Gestion des milieux aquatiques, n° 8, 130 p.

GALEA, G., RAMEZ, P., 1995, Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en coteau de vignoble : guide à l'usage des aménageurs, Cemagref Éditions, Antony, Coll. Études du Cemagref, série Gestion des milieux aquatiques, n° 10, 128 p.

MONTUELLE, B., 2003, Qualité et gestion des sédiments d'eau douce. Éléments physico-chimiques et biologiques, Cemagref Éditions, Antony, Coll. Études du Cemagref, série Gestion des milieux aquatiques, n° 17, 332 p.

ANCEY, C., RICHARD, D., MEUNIER, M., 2001, Éléments d'hydraulique pour l'ingénieur, in « Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine », SCHREFLER, B. et DELAGE, P., éd. Hermès, p.22-44.

BROCHOT, S., MEUNIER, M., 1996, Un modèle d'érosion des torrents en crue (ETC), Ingénieries-EAT, n° 6, p. 9-18.

COUSSOT, P., 1996, Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien, Cemagref, Série Études Équipements pour l'eau et l'environnement, n° 23, 177 p.

RICHARD, D., 1997, Transport solide par charriage torrentiel, in « Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable ; introduction aux suspensions en géologie et en physique » (chap. 6), ILDEFONSE, B., ALLAIN, C., COUSSOT, P., Cemagref Éditions, p. 105-121.