

Un modèle d'érosion des torrents en crue (ETC)

Sylvie Brochot et Maurice Meunier

Les phénomènes d'érosion et de transport solide dans les bassins versants torrentiels¹ engendrent des conséquences préjudiciables aux activités humaines : dépôts aggravant les crues, affouillements de berges, divagations des lits, chocs destructeurs, comblement de retenues... La modélisation de ces phénomènes est donc un objectif majeur de la recherche sur les risques naturels en montagne.

Le modèle d'érosion des torrents en crue (ETC) est essentiellement destiné à répondre aux besoins de l'ingénierie des risques résultant des crues torrentielles. Les applications envisagées sont la reconstitution, la prédiction et la simulation (pour une aide à la décision). Le modèle ETC, en conséquence, cherche à représenter l'intégralité des processus hydrologiques et érosifs des bassins versants torrentiels depuis la pluie jusqu'aux débits liquides et solides à l'exutoire.

Compte tenu de la complexité de ces processus qui s'exercent à des échelles de temps et d'espace très variables, le choix d'un modèle global spatialisable a été fait. L'incertitude élevée qui accompagne l'ensemble des mesures susceptibles d'être utilisées pour valider le modèle (caractéristiques physiques utilisées comme paramètres ou débits liquides et solides) conforte ce choix : dans ce contexte, il aurait été peu cohérent d'envisager un modèle d'une grande finesse.

Du fait du positionnement du projet dans l'ingénierie des risques de crues torrentielles, ETC est évidemment un modèle événementiel.

La présente introduction a permis d'énoncer les caractéristiques majeures du modèle : ETC est un

modèle intégrateur à l'échelle des bassins versants torrentiels, global spatialisable, événementiel. Dans la première partie de cet article, la description de la conception du modèle permettra de développer ces caractéristiques et d'en cerner d'autres ; deux exemples d'application seront ensuite présentés et commentés dans la deuxième partie.

La conception du modèle ETC et les réductions dans la représentation du fonctionnement des bassins versants torrentiels

Comme tout modèle, ETC réduit la complexité d'un fonctionnement réel, en l'occurrence celui des crues dans les bassins versants torrentiels. Sa conception (Meunier, 1987 puis Lefranc, 1990) repose sur une analyse détaillée des processus. La distinction d'échelles spatiales, auxquelles correspondent des échelles de temps, facilite cette analyse (encadré 1).

On distingue deux aspects dans la conception d'ETC : la représentation des bassins versants eux-mêmes, et celle des processus s'y déroulant.

■ La représentation des bassins versants

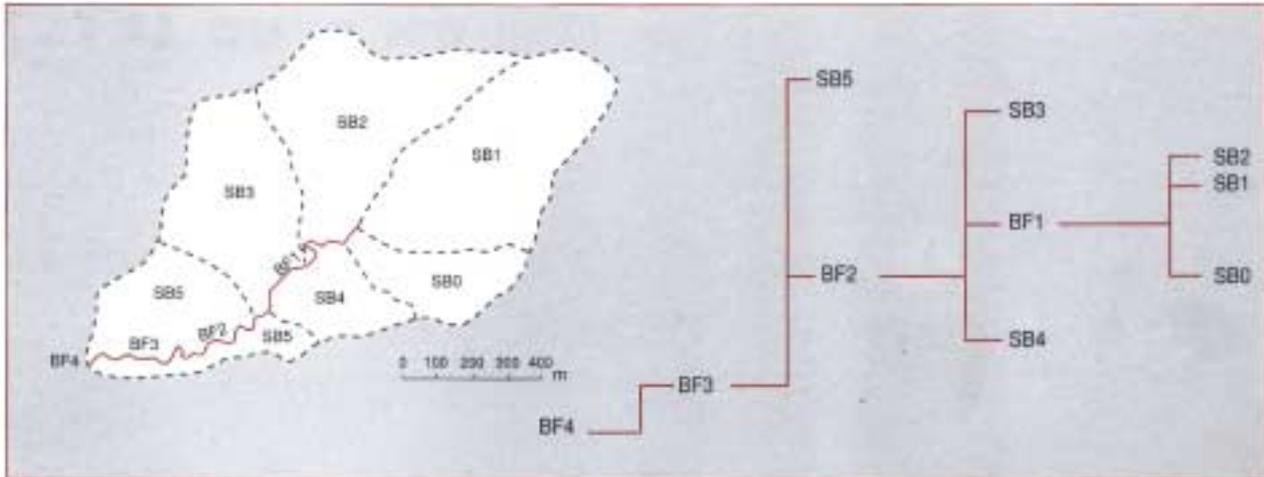
ETC considère le bassin versant comme un assemblage de versants (équivalents à la notion géomorphologique d'interfluves) et de biefs (sections de lits). Une structure arborescente relie les deux types d'entités (figure 1).

Les entités doivent posséder des caractéristiques physiques uniformes (à l'échelle d'analyse considérée), car ce sont leurs valeurs moyennes qui seront utilisées comme paramètres : ETC appartient

1. Les bassins versants torrentiels sont ici ceux dont la pente du lit excède environ 2 %, ce qui inclut les rivières torrentielles et les torrents (pente supérieure à 6 %).

Étude réalisée en collaboration avec Claude Martin (CAGEP - URA 903) et les équipes de gestion du BVRE Real Collobrier et de Draix.

Sylvie Brochot et Maurice Meunier
Cemagref
domaine Universitaire
2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 Saint-Martin-d'Hères



▲ Figure 1. - Exemple de structure arborescente pour la représentation d'un bassin versant dans le modèle ETC (Laval, bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute-Provence) SB1 à SB5 : versants ; BF1 à BF4 : biefs

Encadré 1

Les échelles en érosion torrentielle

Le volet hydrologique (eau), qui pourrait faire l'objet d'une analyse similaire, a été exclu pour se limiter au volet érosion (matériaux), plus spécifique. On tente de croiser l'échelle d'espace avec une échelle de temps. Pour chacune d'elles, sont cités des exemples de processus et de mesures envisageables, cohérentes avec le niveau d'observation.

L'échelle microscopique

C'est à cette échelle (qualifiée aussi de ponctuelle selon Fournier, et Cheverry, 1992) que se produisent les processus physico-chimiques de l'altération des roches : désagrégation granulaire, dissolution, oxydation... Lorsque l'on a affaire à un sol, cette échelle est celle de mécanismes élémentaires concourant (ou s'opposant) à la mise à disposition des particules qui seront susceptibles d'être ultérieurement détachées puis mises en mouvement : lessivage, battance... Des mesures représentatives de ces processus sont des analyses chimiques ou minéralogiques, des observations au microscope électronique à balayage. Les vitesses d'évolution sont lentes : siècle, saison.

L'échelle de la parcelle (station)

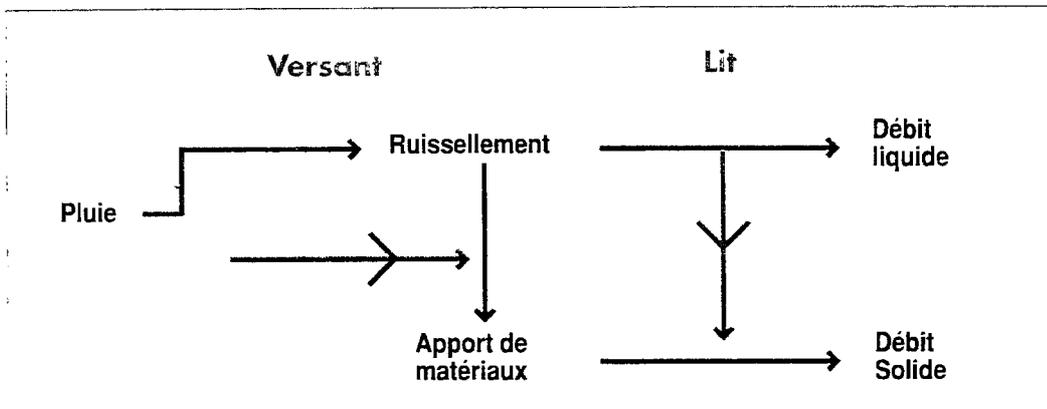
A cette échelle (de quelques quelques mètres carrés à une centaine), c'est le déplacement de la particule de sol prise individuellement qui est au centre des raisonnements sur les processus : reptation (*creeping*), saltation pluviale (*splash*), entraînement par le ruissellement... Les mesures sont des comptages de ces particules après marquage ou piégeage. L'ordre de grandeur de la vitesse d'évolution varie de la crue à la saison, ces processus étant activés par les agents climatiques.

L'échelle du versant

Cette échelle spatiale est extrêmement variable. Les processus sont morphologiques, au sens où ils engendrent les formes du paysage (telles que les étudient les géomorphologues) ou les faciès érosifs (pour les praticiens des risques torrentiels). Ils concernent des flux, le plus souvent discontinus, de matériau solide : érosion aréolaire, ravinement, éboulement, glissement de terrain... Les mesures tentent d'estimer ces flux directement (piégeage, échantillonnage : difficile !) ou, le plus souvent, indirectement au travers de l'évolution des formes par topographie. L'échelle de temps est celle de l'événement (averse, crue ou mouvement de terrain).

L'échelle du bassin versant

Elle est extrêmement variable également (taille du bassin). Par contre, comme elle est totalement intégratrice, les processus sont limités : propagation (discontinue, avec dépôts, reprises) du débit solide en sédiments (ou production) ; c'est ce dernier que l'on cherche à mesurer. L'échelle de temps est celle de la crue. Dans les lits des torrents, l'ensemble des phénomènes de transport solide pourrait s'analyser de façon analogue à des échelles de plus en plus petites (avec le tronç commun final de l'échelle du bassin versant).



◀ Figure 2 – Architecture intégrée du modèle ETC

en effet à la catégorie des modèles globaux (Amboise, 1991) ; en d'autres termes, l'unité spatiale de calcul est l'ensemble du bassin ou des entités supposées homogènes. Toutefois, le recours à la spatialisation permet, par un découpage pertinent de ces entités, de prendre en compte d'éventuelles hétérogénéités à l'échelle du bassin versant : couverture végétale, géologie, pente ou granulométrie des lits... Les pluies peuvent également être spatialisées à la même échelle que les versants.

ETC effectue la somme aux nœuds (somme des flux sortant des entités de même rang avant entrée dans l'entité aval) et respecte l'équation de continuité des flux au travers de l'arborescence (les flux sortant d'une entité sont égaux aux flux y entrant, plus ou moins les variations de stock). Le débit solide peut être scindé en différentes natures, selon la granulométrie ou le mode de transport par exemple. On admet que les écoulements se font toujours en régime torrentiel, ce qui permet de s'affranchir de l'influence de l'aval ; le traitement des biefs s'effectue donc de l'amont vers l'aval. La distinction entre deux types d'entités est confortée par le mode de raisonnement fondamentalement différent s'appliquant sur les processus : prééminence de la notion de surface pour les versants, de celle de linéarité pour les biefs.

Les bassins versants traités peuvent être de taille très variable (de quelques hectares à quelques dizaines de km²).

■ La représentation des processus hydrologiques et érosifs

Les processus hydrologiques et érosifs s'exerçant au sein des bassins versants torrentiels sont nombreux et complexes, notamment du fait de la

multiplicité des échelles de temps et d'espace. Ils se relaient, comportent des effets de seuil, des discontinuités.

ETC représente les processus à l'échelle des bassins versants. Le modèle transforme les flux sortant des versants² en flux à l'exutoire des bassins versants, effectuant un changement d'échelle ; il ne descend pas aux échelles plus fines et ne rentre donc pas dans cette complexité des flux internes aux versants.

Les connaissances sur les processus fonctionnant au sein des bassins versants sont donc synthétisées par l'architecture présentée à la figure 2.

Sur les versants, la pluie se transforme en ruissellement ; les matériaux disponibles peuvent être entraînés jusqu'au lit du torrent (ils deviennent alors des sédiments). Dans le lit, le débit liquide se propage ; il possède une certaine capacité de transport des sédiments. Si cette limite est dépassée, les sédiments en excès se déposent ; si elle n'est pas atteinte, le lit est susceptible de s'éroder : cela va dépendre de sa résistance (notamment de son pavage).

Le caractère intégrateur du modèle apparaît clairement (on part de la pluie pour arriver aux débits liquides et solides). Chacune des principales étapes (symbolisée sur le schéma par une flèche) est un modèle élémentaire, une loi physique ou une formalisation mathématique de nature physique, conceptuelle ou statistique selon le cas. On touche ici une difficulté de vocabulaire, ETC apparaissant comme un « modèle composé » ou un « environnement intégré d'aide à la résolution de problèmes » par rapport aux modèles élémentaires dont il assure la connexion. Dans la suite, on

2. Ces flux sont déterminés, hors ETC au sens strict, actuellement à partir de mesures (cf. exemples dans la 2^e partie) ou d'estimations d'expert ; mais on pourrait imaginer un modèle (un peu utopique dans le cadre montagne ou forte pente), à l'échelle des versants ou des stations, ayant pour sortie ces flux.

3. Par rapport aux pratiques de modélisation du transport solide en hydraulique fluviale (basée en général sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, reliées à des lois de transport), cette approche globale, hydrosédimentologique, peut sembler aggraver le décalage avec la réalité. Mais l'exigence d'une approche intégrée, liée au fait que les pentes d'un bassin versant torrentiel fournissent souvent une part importante des sédiments transportés, jointe à l'extrême complexité de l'hydraulique torrentielle et à l'incertitude sur les mesures, aurait rendu inopérante une approche plus mécanique, à une échelle plus grande.

emploiera les termes « modèle » et « modèle élémentaire » respectivement ; ce dernier terme inclura indifféremment modèles d'une certaine ampleur, lois physiques ou simples formalisations mathématiques.

Nous détaillons ci-après ces modèles élémentaires, les modèles pluie-débit, non spécifiques, ne sont pas repris dans cette énumération).

• **Modèle élémentaire pluie-érosion et ruissellement-érosion** (échelle des versants). Dans le contexte montagnard et fortement pentu des versants concernés, il n'existe pas de modèle de prédiction de ce type d'érosion. En dehors de rares cas où on dispose de résultats expérimentaux (bruts ou modèles statistiques), la production cumulée des versants (ablation) pour la crue considérée doit être déterminée empiriquement au préalable. Cette ablation est alors distribuée dans le temps, proportionnellement au ruissellement du versant, ne prenant pas en compte les phénomènes de seuil (la mobilisation n'intervient qu'au-delà d'une certaine hauteur d'eau, par exemple) et les lois de transfert (relais entre les différents processus avec stockages temporaires, par exemple).

• **Modèle élémentaire de routage des débits liquides et solides**. On considère que la crue est constituée d'une succession de régimes uniformes (conséquence de l'approche globale) et permanents, sans tenir compte, notamment, des variations au cours du temps de pente ou de granulométrie. La propagation de l'hydrogramme liquide dans un bief est une simple translation sans déformation, ce qui est admissible pour les fortes pentes et des

morphologies sans élargissements significatifs du profil en travers. Le débit solide est translaté à la vitesse du débit liquide lorsqu'il s'agit des matériaux fins en suspension, à une vitesse 0,4 fois moindre lorsque des matériaux plus grossiers sont charriés. Ce facteur de réduction n'est évidemment pas constant dans la réalité.

• **Modèle élémentaire de transport solide**. Il fait référence aux notions de capacité maximale de transport, de dépôt ou d'érosion linéaire du lit, de pavage (figure 3). Les formalisations utilisées sont issues d'expérimentations dans des conditions assez différentes de celles régnant dans les torrents. L'approche globale³ du modèle implique que l'on concentre conventionnellement au point aval du bief traité des processus s'étalant en fait sur toute sa longueur.

Pour chaque modèle élémentaire, ETC propose en fait plusieurs variantes, chacune ayant son propre domaine de validité. L'utilisateur doit alors effectuer un choix en fonction de la nature du problème traité : le modèle peut être qualifié de modulaire.

Les paramètres du modèle (encadré 2) sont soit des caractéristiques physiques directement mesurables, soit des grandeurs conceptuelles (exemple en hydrologie : rétention initiale, volume d'un réservoir sol ; en hydraulique : rugosité) à estimer indirectement à partir d'observations quantitatives ou qualitatives. Les investigations nécessaires demeurent légères.

Le pas de temps de calcul varie de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.

■ La difficulté de la validation

La validation requiert des mesures au niveau des bassins versants ; elle se heurte, en premier lieu, à l'extrême rareté des données de débits solides en montagne, celles de débit liquide étant elles-mêmes rares. Les mesures sont assorties d'une large incertitude.

Un autre problème est celui de la correspondance entre les mesures (fréquemment décomposées en deux termes, charriage et suspension, inhérents à l'instrumentation) et les débits solides issus des formules expérimentales ; notamment, les matériaux très fins fournis par les versants pourraient être transportés sans influencer l'énergie du débit liquide. La validation des résultats obtenus au travers d'ETC passe donc par des transferts cohérents d'une catégorie à l'autre

Encadré 2

Paramètres, conditions initiales et conditions aux limites d'ETC

Le fonctionnement d'ETC requiert la collecte des données suivantes (en gras figurent les caractéristiques physiques utilisées directement comme paramètres ou variables, les autres données étant exploitées indirectement).

Pour les versants : **superficie**, occupation des sols, caractéristiques pédologiques sommaires.

Pour les lits : **longueur, largeur au plat-fond, fruit des berges, pente, courbe granulométrique**, pavage, encombrement.

Conditions aux limites : **pluie, ablation globale pour l'épisode**.

Conditions initiales : pluies antérieures à l'épisode, **dépôts dans les lits**.

(figure 4). On doit alors descendre à un niveau d'analyse relativement fin, en restant toutefois à la même échelle d'espace.

Le domaine de validité du modèle

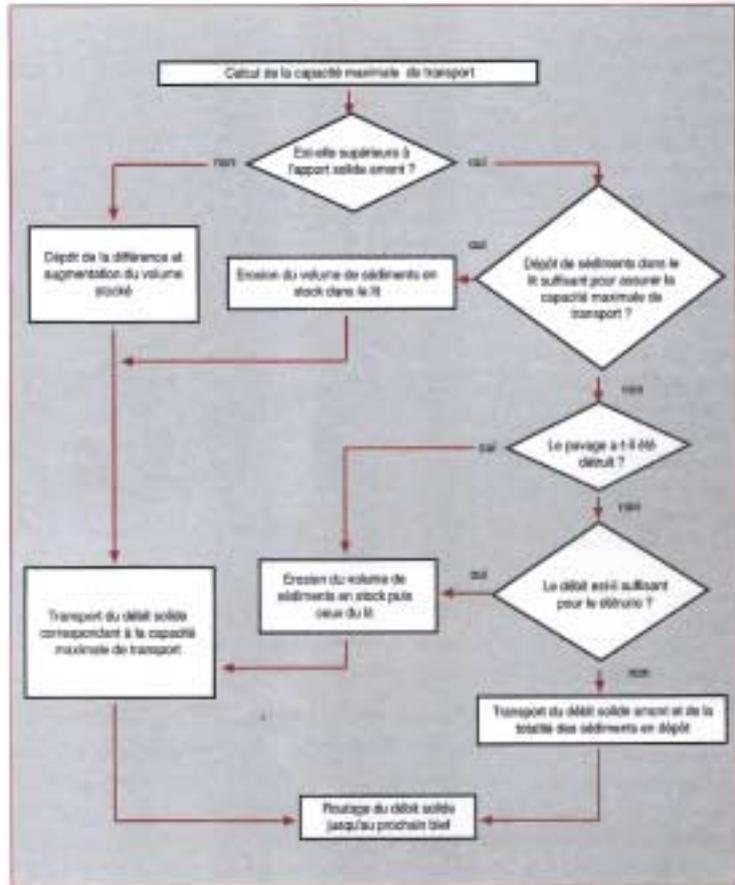
Ce dernier est l'intersection des domaines de validité propres à chaque modèle élémentaire. La conception du modèle élémentaire de routage des débits liquides et solides limite l'utilisation, comme on l'a écrit précédemment, à de fortes pentes et à des morphologies sans élargissements significatifs du profil en travers. La nécessité de rester en régime torrentiel va dans le même sens, en ce qui concerne les pentes. Enfin, les modèles de transport solide actuellement intégrés ne concernent pas les laves torrentielles. Toutefois, si un modèle d'approche hydrologique ou statistique les concernant était mis au point, il pourrait avoir sa place au sein d'ETC.

ETC, un modèle évolutif

ETC a pour ambition d'être un vecteur privilégié du transfert des résultats de la recherche en érosion et en hydraulique torrentielle. Ceci implique :

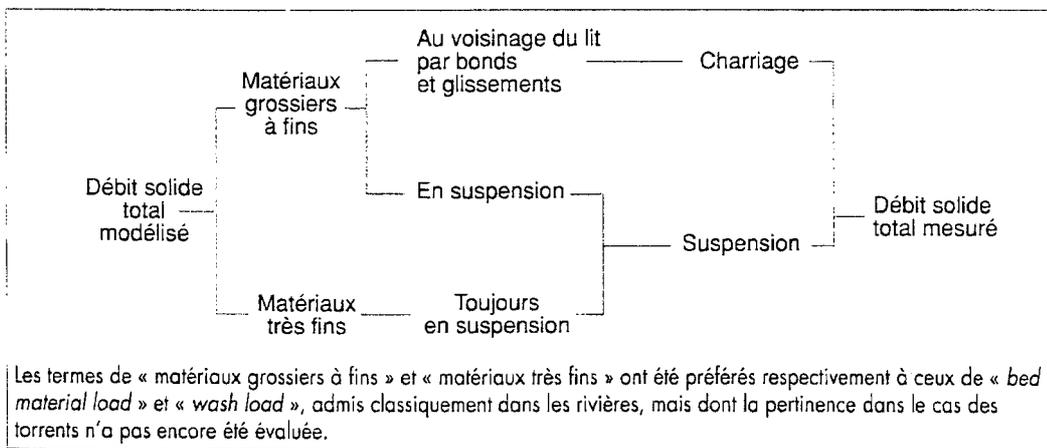
- une capacité d'évolution pour intégrer en continu les progrès réalisés dans le développement des connaissances ; la modularité d'ETC concourt à la satisfaction de cette exigence ;
- une démarche de validation à chaque stade d'évolution.

La capacité d'évolution du modèle est d'autant plus indispensable qu'ETC peut lui-même constituer un outil pour la recherche (utilisation en tant que modèle cognitif).



▲ Figure 3. – Module de calcul du transport solide d'ETC

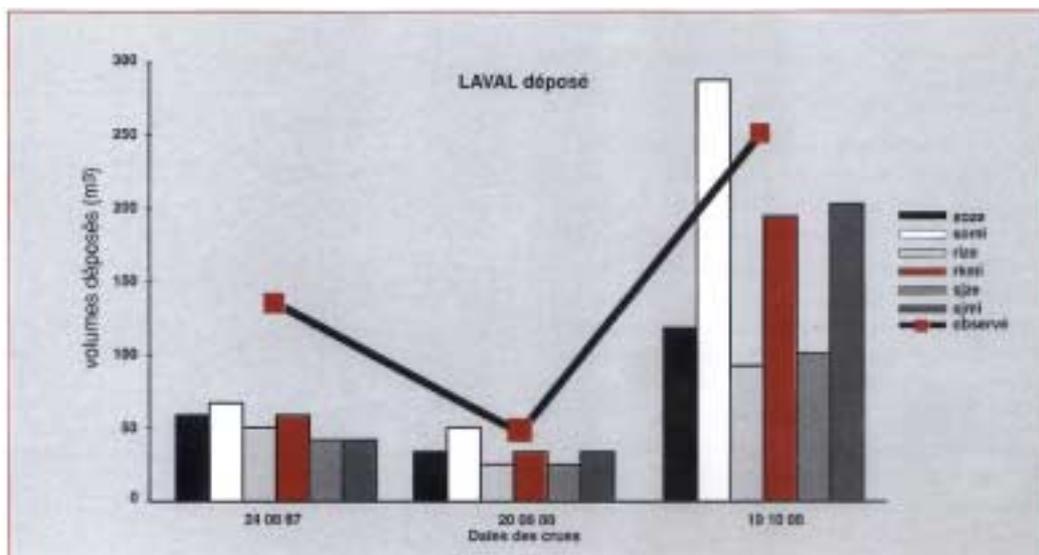
▼ Figure 4. – Schéma de cohérence entre débits solides mesurés et modélisés



Les termes de « matériaux grossiers à fins » et « matériaux très fins » ont été préférés respectivement à ceux de « bed material load » et « wash load », admis classiquement dans les rivières, mais dont la pertinence dans le cas des torrents n'a pas encore été évaluée.

Figure 5. - Dépôts de trois crues au Laval ▶

Comparaison calculé/observé
Les six variantes correspondent à trois formules de transport solide (so = SOGREAH, ri = Rickenmann, sj: Smart et Jaeggi) croisées avec deux scénarios extrêmes de dépôts initiaux dans les lits, ces dépôts étant inconnus (ze = dépôt nul, mi = dépôt non limitant)



Badlands, bassin versant incendié : deux possibilités de validation

Dans le contexte montagnard et fortement pentu des versants concernés, le détachement de particules sous l'action de la pluie (saltation pluviale ou splash) et leur entraînement par le ruissellement aréolaire sont loin de constituer les seuls processus acheminant des matériaux jusqu'au lit du torrent ; éboulements, éboulis, solifluxion et glissements, reptation, ruissellement concentré sont des processus dont la contribution est parfois bien supérieure. ETC, comme on l'a écrit, ne descend pas à cette échelle car il n'existe pas de modèle représentant et quantifiant ce type de processus érosif ; l'échelle de temps en serait de toutes façons très différente de celle de la crue. La détermination de la production cumulée des versants (ablation) pour la crue considérée doit être effectuée préalablement. Elle résulte de la moyenne dans le temps et dans l'espace du résultat des processus analysés. Une solution est d'extrapoler à l'ensemble du versant des résultats expérimentaux (bruts ou modèles statistiques) acquis à l'échelle d'une parcelle, en réalisant ainsi un transfert d'échelle. Les deux exemples qui suivent illustrent cette démarche :

■ Sur badlands

Le bassin du Laval appartient aux bassins versants expérimentaux de Draix. Situés à 15 km au nord-

est de Digne (Alpes du Sud), ils sont consacrés à la progression des connaissances dans les disciplines impliquées par le large thème de l'érosion torrentielle. Ils sont gérés conjointement par la division Protection contre les érosions du Cemagref, groupement de Grenoble, la division Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation du Cemagref, groupement d'Aix-en-Provence et le service de Restauration des terrains en montagne (RTM) des Alpes de Haute-Provence (Cemagref Grenoble, 1987). D'une superficie de 86 ha, le Laval est principalement constitué de badlands (68 %), c'est-à-dire de versants subissant un ravinement généralisé. Les processus d'érosion et de transport solide y sont très intenses.

Les versants fournissent des matériaux principalement au travers de deux types de processus (à l'échelle des versants) :

- ruissellement concentré dans des rigoles et des ravins au printemps et à l'automne ;
- solifluxion superficielle due à l'alternance gel / dégel en hiver.

Le débit liquide transporte les sédiments disponibles en produisant des dépôts ou des affouillements dans les lits.

Le dispositif de mesure (Cambon, *et al.*, 1990) inclut, en ce qui concerne le débit solide :

- un piège fermé à l'aval par un barrage perméable qui retient les sédiments les plus grossiers à

l'amont de la station limnigraphique ;

– un préleveur automatique d'échantillons implanté au sein de cette station pour les sédiments fins.

Le bassin versant a été divisé en six versants et quatre biefs, en fonction du réseau hydrographique dans ce cas (figure 1).

L'ablation (production en matériaux des versants) relative à chaque crue est extrapolée à l'ensemble du Laval à partir des mesures pratiquées sur la ravine élémentaire de la Roubine (1 300 m²), voisine et représentative des versants du Laval (transfert d'échelle). Une correction empirique a été appliquée pour tenir compte de la taille et de la pente des versants.

Trois crues ont été modélisées avec ETC (Brochot, *et al.*, 1995). La comparaison entre débits solides calculés et observés peut être appréciée pour les sédiments grossiers déposés dans le piège (figure 5) et pour les sédiments fins transitant par la station limnigraphique (figure 6).

■ Sur bassin versant incendié

Le bassin du Rimbaud appartient aux bassins versants expérimentaux du Real Collobrier. Situés dans le massif des Maures (Var), ils sont gérés par la division Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation du Cemagref, groupement d'Aix-en-Provence (Lavabre, 1990). D'une superficie de 146 ha, le Rimbaud a été dévasté en août 1990 par un incendie (à 84 %). Les processus hydrologiques ont été fortement perturbés et un préleveur d'échantillons est venu compléter le dispositif expérimental préexistant afin de mesurer le transport solide en suspension. Les dépôts dans le lit et à l'amont immédiat de la station ont été estimés sommairement par topographie (Martin *et al.*, 1993).

Les versants fournissent des matériaux principalement au travers de deux types de processus (à l'échelle des versants) :

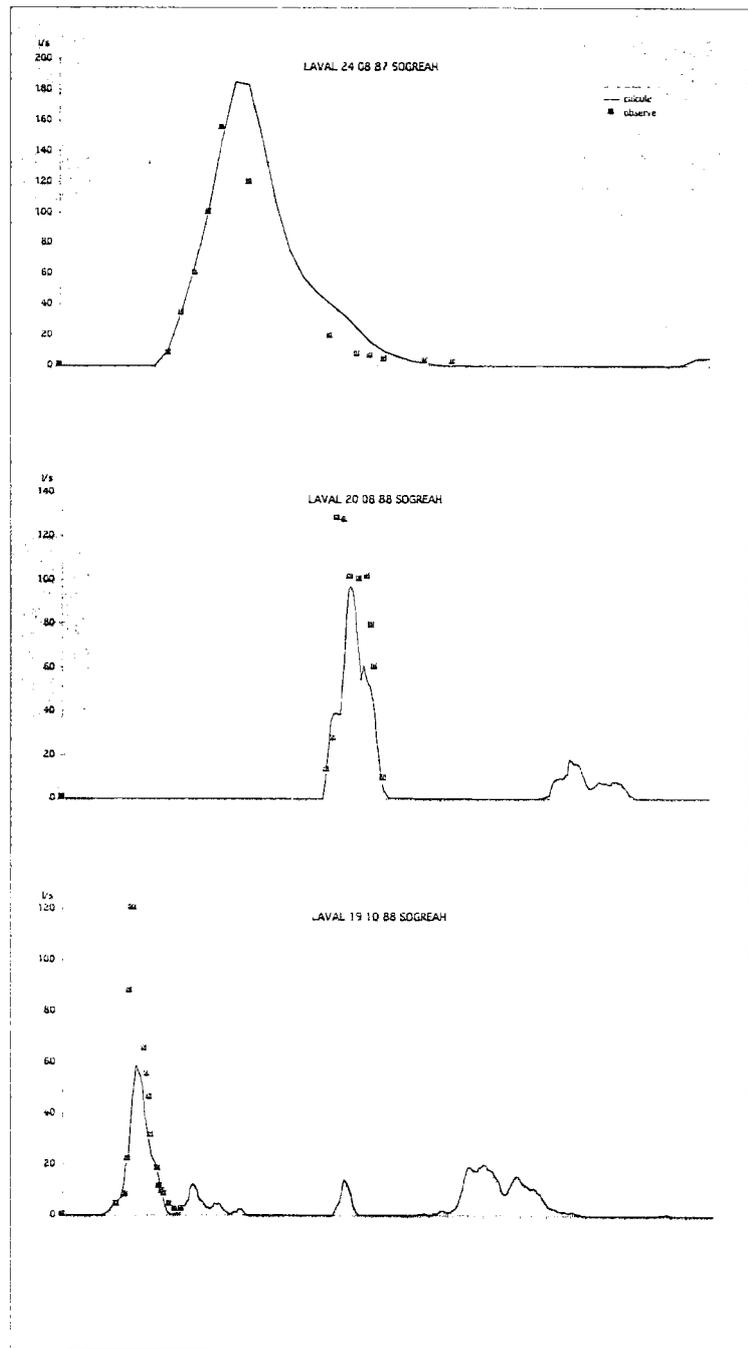
- ruissellement concentré dans des rigoles (Martin, *et al.*, 1992) ;
- érosion aréolaire.

Le transport solide par charriage reste limité.

Le bassin versant a été divisé en cinq versants et cinq biefs, également en fonction du réseau hydrographique dans ce cas.

Une parcelle de 75 m² a fait l'objet de mesures d'érosion de 1976 à 1980, qui ont été reprises après incendie. Cette parcelle paraît représentative de l'intensité moyenne de l'érosion sur le bassin (pente forte, mais pas de rigoles). Son ablation (production en matériaux des versants) de chaque crue a

Figure 6. – Sédimentogrammes transités de trois crues au Laval
Comparaison calculé/observé ▼



| CRUES | OBSERVÉ | LEFORT/SOGREAH | RICKENMANN |
|----------|---------|----------------|------------|
| 01/10/90 | - | 1-1 | 3-5 |
| 03/10/90 | - | 1-4 | 2-4 |
| 25/10/90 | - | 1-2 | 3-3 |
| 25/11/90 | - | 3-3 | 9-14 |
| 27/11/90 | - | 0-0 | 1-2 |
| 09/12/90 | - | 3-2 | 12-19 |
| TOTAL | 8 | 9-12 | 30-47 |

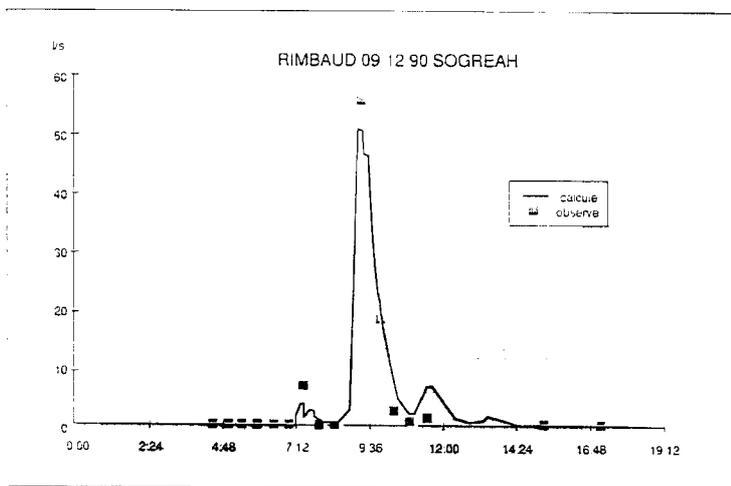
LEFORT/SOGREAH et RICKENMANN correspondent à deux formules de capacité maximale de transport par charriage ; les valeurs extrêmes de l'intervalle indiqué correspondent à deux campagnes de mesures granulométriques

▲ Tableau 1. – Rimbaud, crues de l'automne 1990. Sédiments déposés à l'amont de la station (m³). Comparaison calculé/observé

été extrapolée à l'ensemble du Rimbaud (transfert d'échelle).

La série des crues suivant l'incendie a été modélisée avec ETC (Brochot *et al.*, 1995), après sélection des événements entraînant des changements morphologiques du lit. La comparaison entre débits solides calculés et observés peut être appréciée dans le tableau 1 pour les sédiments grossiers déposés à la station (toutes crues) et à la figure 7 pour les sédiments fins transitant par la station limnigraphique (crue du 09.12.90, la plus forte et la seule échantillonnée au voisinage du pic de crue).

Figure 7. – Rimbaud, crue du 9 décembre 1990 ; sédimentogramme transité. Comparaison calculé/observé



▼ ■ **Des résultats encourageants**

Pour ces deux applications, on constate en con-

clusion que les débits solides calculés par ETC sont, dans l'ensemble, proches des débits observés ; c'est un résultat satisfaisant pour ce domaine complexe de l'érosion torrentielle. Mais on peut regretter que la validation concerne indistinctement dans ces deux cas la démarche de transfert d'échelle et l'ensemble des hypothèses et modèles élémentaires contenus dans ETC.

Des perspectives de développement

En regard de la complexité des processus de l'érosion et des transports solides dans les bassins versants de montagne, notamment de l'emboîtement des échelles de temps et d'espace, un modèle global traitant les processus à l'échelle du bassin versant comme ETC peut paraître fruste. Les applications présentées illustrent cependant l'intérêt de cette approche.

L'intérêt d'ETC réside dans les options suivantes :

- la spatialisation (découpage en versants) permet de tenir compte des principales hétérogénéités spatiales sans rentrer dans la complexité des processus internes au versant fonctionnant à des échelles spatiales plus grandes et des échelles de temps très variables ;
- la détermination des flux en matériaux issus de ces versants est très souple et pragmatique, d'où un maximum de sécurité ; mesures, extrapolées éventuellement par transfert d'échelle, régionalisation de résultats acquis sur d'autres versants, expertise ;
- la combinaison de modèles physiques, conceptuels ou statistiques validés expérimentalement confère au modèle l'aptitude à se rapprocher de la réalité.

Les résultats des validations effectuées (qui ne se sont pas limitées, naturellement, aux deux applications qui viennent d'être présentées) sont encourageants ; des perspectives importantes d'utilisation en ingénierie des risques résultant des crues torrentielles existent et se sont déjà concrétisées par des applications (Brochot, 1990 ou Meunier, 1990 ou encore Laigle, 1992). Aussi, le développement du modèle se poursuit-il et devrait entrer prochainement dans une nouvelle phase avec une modification de l'environnement matériel et logiciel. Une diffusion du modèle pourra alors avoir lieu auprès des ingénieurs chargés de caractériser les crues torrentielles, de les prévenir ou de définir des protections.

Remerciements

Ce travail a bénéficié, pour sa partie validation, d'une participation financière de la Communauté européenne (contrat EV5V-CT91-0039).

J.-P. Cambon, N. Mathys, J.-E. Olivier, A. Narbonne, N. Folton ont assuré la maintenance des instruments, le recueil des données ou leur gestion dans le cadre des bassins versants expérimentaux de Draix et du Real Collobrier. C. Marrin

(CAGEP - URA 903 du CNRS, Aix-en-Provence) a aimablement mis à notre disposition les données d'érosion acquises par ses soins sur le bassin du Rimbaud. □

Cet article a fait l'objet d'une communication écrite au séminaire interne inter-chercheurs « les modèles au Cemagref. Formulation, validation, pertinence ». 12/13 octobre 1995.

Résumé

La modélisation des phénomènes d'érosion et de transport solide dans les bassins versants est un objectif majeur de la recherche sur les risques résultant des crues torrentielles. Le modèle ETC global, spatialisable et événementiel, cherche à représenter l'intégralité des processus hydrologiques et érosifs des bassins versants torrentiels depuis la pluie jusqu'aux débits liquides et solides à l'exutoire. Sa conception est décrite et deux applications présentées. Son développement en cours permettra sa diffusion auprès des ingénieurs chargés de caractériser et de prévenir les crues torrentielles, ou de définir des protections.

Abstract

Modelling erosion and the solid transport into catchment areas is a major objective of research into the risks resulting from torrential flooding. The general spatial and event ETC model attempts to represent all hydrological and erosion processes in catchment areas subject to torrential flooding, from rainfall through to liquid and solid outflows. Its design and two applications are described. It is currently being developed to allow it to be distributed to engineers responsible for characterising and preventing floods warnings or to define protective devices.

Bibliographie

- AMBROISE, B., 1991. Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - Processus et modèles, Séminaire du Conseil scientifique du département « Science du sol » de l'INRA, Dijon, 26-27 mars 1991, 34 p.
- BROCHOT, S., LEFRANC, P., 1990. Prévention des crues torrentielles en Haut-Vallespir : validation des hypothèses de travail à partir de l'aiguat d'octobre 1940, Actes du colloque *l'aiguat del 40*, Vernet-les-Bains, 18- 20 octobre 1990. CREC, Perpignan, 16 p.
- BROCHOT, S., *et al.*, 1995. Desertification in mediterranean area. DM2E project : final report, Cemagref Grenoble. 48 p. + annexes.
- CAMBON, J.-P., MATHYS, N., MEUNIER, M.-M., OLIVIER, J.-E., 1990. Mesure des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne, IAHS publ. n°193, pp 231-238.
- Cemagref Grenoble, 1987. Les bassins versants expérimentaux de Draix, étude et mesure de l'érosion, 38 p.

- FOURNIER, F., CHEVERRY, C., 1992. Les échelles spatiales d'étude du rôle du sol dans l'environnement, dans *Hierarchies et échelles en écologie*, pp. 21-41. Naturalia publications.
- LAIGLE, D., 1992. Etude du torrent du Bresson. Le Touvet - St-Vincent de Mercuze (38), *Cemagref Grenoble/Service de Restauration des terrains en montagne de l'Isère*, 48 p.
- LAVABRE, J., 1990. Les bassins versants du Real Collobrier, *Cemagref Aix en Provence*, 23 p.
- LEFRANC, P., 1990. Le modèle ETC : un modèle d'érosion des torrents en crue, *Cemagref Grenoble / ENITRTS. Mémoire de 3^{ème} année*. 76 p.
- MARTIN, C., BEGUIN E. et BERNARD-ALLÉE P., 1992. Premières observations sur les phénomènes d'érosion mécanique dans le bassin versant du Rimbaud après l'incendie d'août 1990. *Et. géogr. phys.*, n° XXI, p.29-33.
- MARTIN, C., BERNARD-ALLÉE P., BEGUIN E., LEVANT M. et QUILLARD J., 1993. Conséquences de l'incendie de forêt de l'été 1990 sur l'érosion mécanique des sols dans le massif des maures. *Bull. assoc. géogr. franç.*, n°5, pp. 438-447.
- MEUNIER, M., 1987. Note sur le cadre *a priori* permettant la mise au point d'un modèle déterministe de simulation de l'érosion et du transport solide sur les petits bassins de montagne, *Cemagref Grenoble. Note interne*, 17 p.
- MEUNIER, M., 1990. Commission de réhabilitation de la région de Thio, Etude des transports solides torrentiels, Creek Jeanne et Marie, creek Kouangoué, rivière Nakale, *Cemagref Grenoble*, 90 p.