HAL
open science

Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle - Apports des versants et production de sédiments

S. Brochot

To cite this version:

S. Brochot. Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle - Apports des versants et production de sédiments. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 1998, 15, p. 61 - p. 78. hal-00461200

HAL Id: hal-00461200

https://hal.science/hal-00461200

Submitted on 3 Mar 2010

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.

Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle
Apports des versants et production de sédiments

Sylvie Brochot

Cet article a été écrit en collaboration avec :
Vincent Koulinski, ETRM, La Grange du Chatelard, 73700 Bourg-Saint-Maurice ;
et Georges Rovera, Institut de Géographie alpine Université Joseph Fourier, 17 rue Maurice Gignoux, 38031 Grenoble Cedex.

Le transport de quantités importantes de matériaux est une caractéristique essentielle des crues des torrents de montagne. Ces matériaux proviennent des phénomènes d'érosion intervenant dans l'ensemble du bassin versant. La connaissance de ces phénomènes et la quantification des flux solides qui en résultent sont un volet important de l'ingénierie des risques torrentiels (par exemple, pour estimer l'efficacité d'une végétalisation ou dimensionner une plage de dépôt pour les sédiments).

L'étude de ce volet peut s'envisager selon différentes échelles spatiales. On se limite dans cette étude à une approche globale, à de petites échelles : celles où les processus sont perceptibles au travers de formes caractéristiques observables à l'œil nu (décamétriques à kilométriques). La discipline correspondante, l'érosion torrentielle, est ainsi complémentaire de l'hydraulique torrentielle, dont l'approche est plus fine, mais restreinte aux écoulements dans les lits, et de l'hydrologie qui traite des flux liquides sur l'ensemble des bassins versants (figure 1). On observe sur cette figure que l'estimation de l'érosion torrentielle se décompose en deux termes : les apports des versants au lit du torrent et la production de sédiments (débit solide) en un point du lit. Les apports de versants peuvent s'intégrer dans des bilans de transport solide dans les lits pour déboucher également sur des estimations de production de sédiments.

Après avoir rappelé les spécificités du fonctionnement général des bassins versants torrentiels, seront exposées les connaissances et les méthodes disponibles et utiles en ingénierie respectivement pour les apports de versants et la production de sédiments.

Concepts et spécificités de l'érosion torrentielle

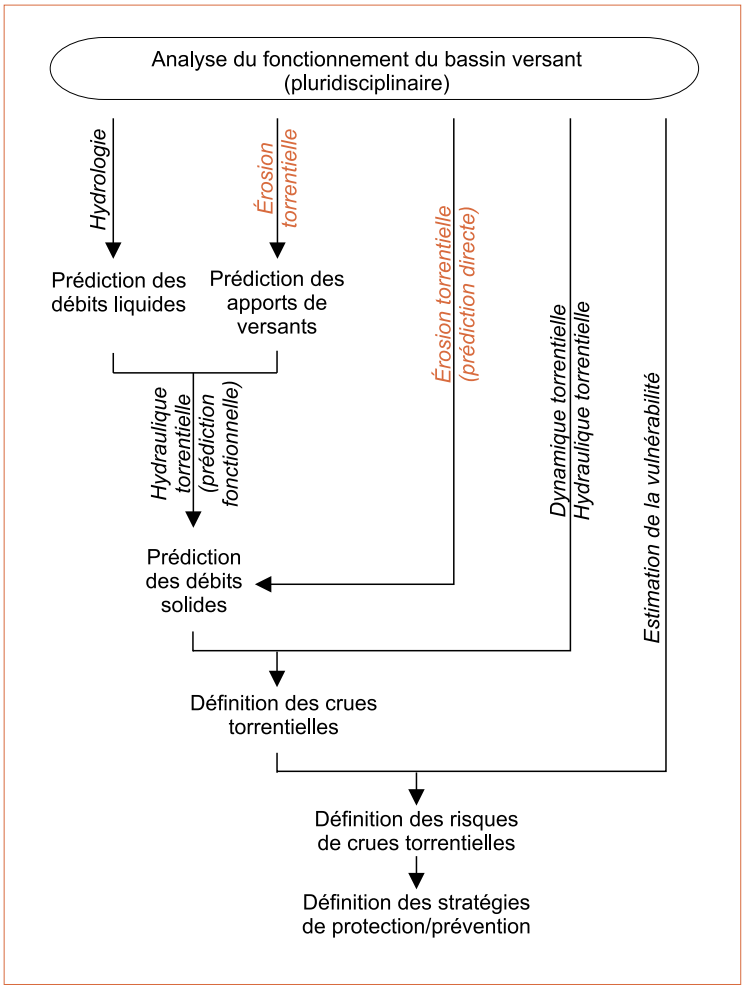
Les phénomènes d'érosion dans les bassins versants torrentiels ; versants et lits ; la crue, phénomène intégrateur

Les matériaux transportés par les crues des torrents de montagne proviennent des phénomènes d'ablation, de transport et de dépôt intervenant dans l'ensemble du bassin versant ; ce sont des phénomènes d'érosion (au sens large géomorphologique), dont la crue elle-même fait partie.

La distinction au sein des bassins versants montagneux des deux types de structures les composant, les versants et les lits, facilite l'analyse de leur fonctionnement érosif :

– sur les versants, correspondant à la notion géomorphologique d'interfluve, les phénomènes sont d'abord aréolaires : il est possible de revenir à un raisonnement par unité de surface. Ils se relaient et fonctionnent chacun selon leur propre échelle de temps, souvent sans commune mesure avec celle de la crue, de telle sorte que des accumulations importantes peuvent se former.

Sylvie Brochot
Cemagref,
2, rue de la Papeterie
BP 76
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex



▲ Figure 1. – Place de l'érosion torrentielle au sein d'une étude de bassin versant torrentiel.

– dans les lits, les phénomènes sont d'abord orientés linéairement ; ils ne se produisent que pendant la brève période de la crue.

La crue est le phénomène intégrateur qui assure la continuité des flux de matériaux (figure 2) : les matériaux produits sur les versants peuvent (ou non) parvenir jusqu'au lit du torrent ; devenus des sédiments, ils sont alors mis à la disposition des écoulements qui vont survenir de façon immédiate ou différée, et qui sont susceptibles (ou non) de les transporter (Peiry, 1989).

En effet, les écoulements possèdent une certaine potentialité à transporter les sédiments. Dans le transport par charriage torrentiel, il existe une capacité maximale de transport et, si cette limite est dépassée, les sédiments en excès se déposent ; si, au contraire, elle n'est pas atteinte, le lit est susceptible de s'éroder : cela va dépendre de sa résistance (notamment de son pavage). Dans certaines circonstances, au demeurant assez mal connues, la concentration en sédiments dépasse très largement celle correspondant à la capacité maximale de transport par charriage torrentiel et l'on a affaire à des laves torrentielles dont les caractéristiques d'écoulement sont très particulières.

Ce fonctionnement peut se lire plus ou moins facilement sur le terrain ; les torrents du Trièves (Isère) en sont une illustration particulièrement riche (d'après Koulinski, 1998) :

– dans la partie supérieure des bassins, les falaises calcaires produisent des matériaux de granulométrie assez uniforme. La production est peu variable d'une année à l'autre, mais elle peut aussi être brusquement augmentée par des éboulements de grande ampleur.

– les matériaux forment des éboulis lorsque la pente est relativement modérée, ou parviennent directement dans le lit, formant un stock de matériaux mobilisables. Son importance dépend essentiellement du temps écoulé depuis la dernière forte crue. Elle est donc très variable. Lors des crues, les matériaux sont transportés, généralement par laves torrentielles.

– en pied de falaise, la pente diminue. Le torrent doit alors ajuster son lit en fonction des apports amont et des modalités du transport solide par charriage. On observe donc au pied des falaises des variations très amples - une dizaine de mètres par endroit - du niveau du fond du lit d'une crue à l'autre. Le tri granulométrique est très important dans cette zone.

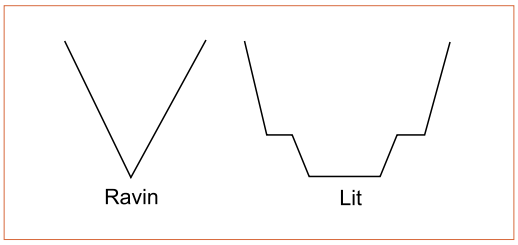
– sur le cône de déjection, le torrent régule le débit solide, les dépôts permettant d'amortir les apports brutaux de matériaux. Leur reprise ultérieure évite les érosions dans la zone aval par des eaux trop peu chargées. Il y a alors des phénomènes très différents entre l'amont et l'aval du cône de déjection : en amont, les torrents transportent rarement des solides, mais lorsque cela survient, les volumes déplacés sont très importants ; en aval, les volumes solides sont relativement faibles lors des épisodes de transport, mais ceux-ci interviennent plus fréquemment.

Caractérisation des bassins versants torrentiels

Le tableau 1 définit les types de cours d'eau par un critère de pente du lit. Ce découpage trouve sa justification dans des différences entre les caractéristiques morphologiques, les comportements hydrologiques et surtout entre les modalités du transport solide (Surell, 1870 ; Meunier, 1991). On peut donc s'en inspirer quant à l'opportunité d'étudier l'ensemble du bassin versant : cette étude est nécessaire pour le torrent ainsi défini, son utilité est à déterminer au coup par coup pour les rivières torrentielles.

La détermination des limites des bassins versants à partir des données topographiques est une question classique de l'hydrologie qui ne pose pas de problème spécifique en montagne. Celle de l'origine des lits en amont est beaucoup plus délicate et dépend de l'échelle d'investigation : la végétation peut masquer la réalité, et la transition entre lits torrentiels et ravins est progressive. Cette question se pose pourtant lors de l'utilisation de certains modèles (notamment ceux prenant en considération la densité de drainage) ou lors de la mise au point d'une méthode spécifique à bassin versant donné. À la suite des travaux de Amoros et Petts (1993), on propose ici de retenir un critère de présence d'un plancher ou fond alluvial (adapté au torrent, c'est-à-dire éventuellement restreint et discontinu dans l'espace et le temps, (figure 3).

Figure 3. – Profils en travers d'un ravin et d'un lit de torrent. ▼

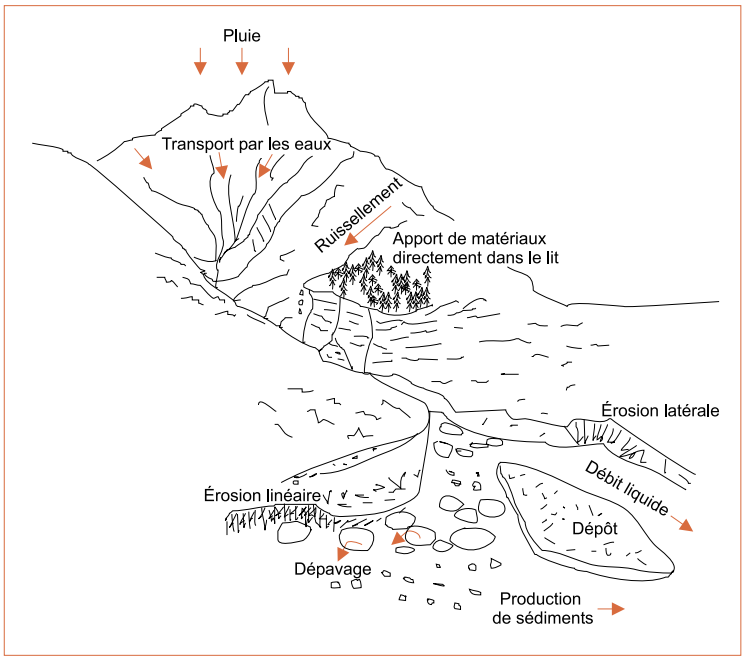


La pente doit également être définie précisément : pente des versants, des lits, des bassins versants, moyenne, locale… Citons un indice de pente facile à mettre en œuvre et robuste, la dénivelée spécifique D_s :

D_s = (Dénivelée entre le point le plus élevé du bassin et l'exutoire)/(Surface totale)$^{1/2}$

Type de cours d'eau	Rivière	Rivière torrentielle	Torrent
Pente du lit	< 1 %	1 à 6 %	> 6 %

▲ Tableau 1. – Définition des cours d'eau par un critère de pente du lit.



▲ Figure 2. – Représentation du fonctionnement des bassins versants torrentiels en crue.

Enfin, la mesure de la granulométrie des lits comme celle des versants, justifierait des développements qui ne font pas l'objet de cette étude. On renverra notamment, pour les fractions grossières des lits, à la note méthodologique de Koulinski (1993). Pour les matériaux fins (versants et fraction fine des lits), la mesure elle-même peut engendrer des variations considérables : sur des marnes noires, Phan (1993) a ainsi relevé des valeurs de D_{50} (diamètre médian des grains) variant de 0,01 à 3 mm selon que le tamisage s'effectuait respectivement par voie humide ou par voie sèche.

Échelles de temps, équilibre morphodynamique, crise climatique

Le système d'érosion (ou système morphogénétique) constitué par le bassin versant torrentiel est soumis à des facteurs (tectoniques et cli-

matiques principalement). « Un équilibre morpho-dynamique est réalisé tant que les facteurs qui le commandent restent dans un rapport constant ou dans un rapport évoluant graduellement toujours dans le même sens » (Tricart, 1965).

Les changements de climat entraînent des crises climatiques conduisant de l'état de biostasie à l'état de rhexistasie :

– beaucoup de plantes ne peuvent pas s'adapter aux nouvelles conditions et la couverture végétale est détruite ; on se trouve momentanément en présence d'une plus grande érosion : l'arrachement et l'entraînement sont rapides ; c'est la rhexistasie.

– le retour à la biostasie se présente comme une lente cicatrisation des plaies d'érosion avec reconstitution d'un manteau d'altérite.

La biostasie prépare les altérites, la rhexistasie les évacue.

Le fonctionnement des systèmes d'érosion au cours des temps géologiques ne peut être reconstitué, mais il nous a laissé des éléments du relief : ainsi, les tracés hydrographiques sont antérieurs au quaternaire ; ils n'ont subi, sauf exception, que des retouches, essentiellement concernant le profil en long, au cours de cette ère.

La période quaternaire a connu des oscillations climatiques d'une exceptionnelle ampleur. Depuis la fin de la dernière glaciation (entre -14000 et -10000 ans, selon les régions), le climat a été assez semblable, globalement, au climat actuel et les bassins versants, entre autres, réajustent leur fonctionnement pour tendre vers la stabilité. Celle-ci semble atteinte sur certains versants : Rovera (1990) cite ainsi des versants forestiers biostasiques au-dessous de 2000 m en Tarentaise (Savoie), alors qu'ils avaient été antérieurement affectés par l'érosion.

À un pas de temps plus fin, on a repéré tout au long de l'Holocène (ou postglaciaire) et de l'époque historique des variations climatiques que l'on peut qualifier de nuances par rapport à la tendance de fond. La plus connue est le « Petit âge glaciaire » de 1750 à 1900. Ces variations ont pu ou peuvent encore générer des instabilités.

L'évolution géomorphologique, et donc l'érosion, est ainsi rythmée par des alternances, à différentes échelles de temps, de périodes d'équilibre et de ruptures : après une rupture, un réajustement permet de tendre vers un nouvel équilibre. On peut étendre encore ce schéma :

– d'une part, en y intégrant des modifications des facteurs autres que climatiques, par exemple des facteurs anthropiques (crise anthropique) ;

– d'autre part, en affinant encore le pas de temps (au pluridécennal environ) et en intégrant l'effet des cataclysmes : « Des événements rares de forte magnitude peuvent être responsables de changements catastrophiques de la morphologie des chenaux mais ceux-ci peuvent quelquefois se réajuster rapidement par retour à la géométrie antérieure à la crue, même si certains caractères géomorphologiques créés par la crue peuvent se maintenir en tant que formes relictuelles. La période nécessaire au retour à un état primitif (…) est qualifiée de période de relaxation ou de récupération. »… La revégétalisation est une des composantes des processus de récupération (Amoros et Petts, 1993). Nous ajouterions volontiers pour les torrents la formation (restauration) du pavage.

Il peut donc être utile de situer à quelle échelle de temps appartient un phénomène érosif et d'en déduire le facteur en cause lorsque l'on souhaite prévenir efficacement un phénomène d'érosion.

Mesures de l'érosion torrentielle

On mesure l'ablation des versants et la production de sédiments en un point donné du lit du torrent. Les conditions climatiques et la puissance destructrice des processus rendent ces mesures difficiles. On peut distinguer :

– les mesures de l'altération des roches in-situ comme celles de Rovera (1990) sur les gypses qui consistent à exposer des plaquettes soigneusement calibrées. En mesurant la variation du poids entre la pose et la récupération, il est possible de calculer la vitesse du processus. En laboratoire sont simulées des séquences gel-dégel sur des éprouvettes de roche afin d'estimer la gélifraction.

– les mesures de l'enlèvement du matériau sur les versants (ablation) par mesures géométriques (morphométrie) : réglettes, piquets, topographie (Cemagref, 1989).

– l'estimation des flux, en général par échantillonnage : marquage de cailloux (à la peinture sur les versants, magnétiques dans les lits), prélèvement de matières en suspension.

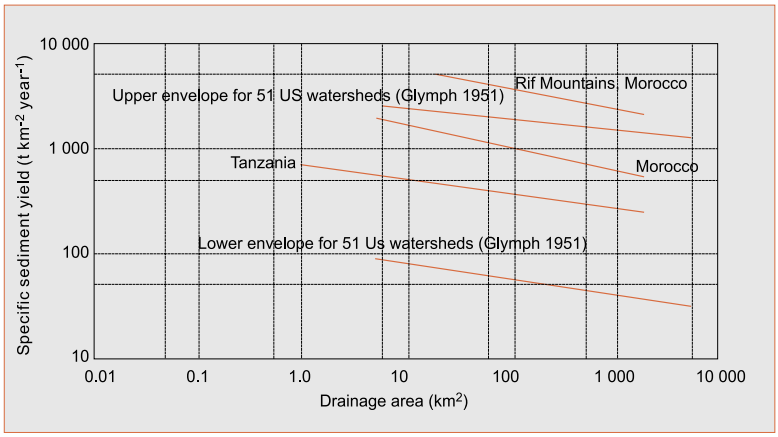
– le recueil des matériaux : gouttières (Rovera, 1990), pièges pour les versants, plages de dépôt pour les lits (Mathys *et al.*, 1996).

La production de sédiments d'un bassin versant donné, rapportée à sa superficie est la production spécifique de sédiments. Elle permet des comparaisons. Elle est réputée décroître, en règle générale, avec la superficie (figure 4, qui inclut quelques bassins de montagne). Toutefois, Owens et Slaymaker (1992) citent le cas de petits bassins alpins en Colombie britannique (Canada) où cette tendance n'est pas respectée du fait de la remobilisation de dépôts quaternaires le long du lit.

Lorsque le stock moyen interannuel de matériaux du lit ne varie pas, et si les versants sont assez homogènes, la production de sédiments peut être rapportée à la surface émettrice pour calculer une ablation équivalente (Mathys *et al.*, 1996, exemple des Terres noires des Alpes du sud de la France). Il s'agit d'une mesure indirecte.

Dans les autres cas, un indice - le taux d'apport solide - rapport de la production de sédiments aux apports de versant, rend compte du déséquilibre entre les deux grandeurs et du stockage ou du prélèvement dans les lits.

La notion de bilan sédimentaire rejoint le même souci : celui de faire la part respective dans la production de sédiments des apports de versant et des variations de stock dans les lits et de vérifier la cohérence des mesures ou estimations.



▲ Figure 4. – Décroissance de la production spécifique de sédiment (d'après Owens et Slaymaker, 1992).

Données d'érosion torrentielle

Un inventaire des données utilisables en ingénierie a été tenté (Brochot, 1997) à partir notamment des articles de Saunders et Young (1983), Pech (1986), Delannoy et Rovera (1996) ; le tableau 2 en propose un extrait. Organisé par substrat, il mentionne le contexte géomorphologique (couvert végétal, environnement du versant, climat ou système morphogénétique, phénomène érosif), le contexte de la mesure (date, lieu, méthode), la référence bibliographique. Il serait à enrichir et à organiser sous forme de base de données.

Tableau 2. – Extrait du tableau de synthèse des données d'érosion torrentielle (Brochot, 1997). ▼

Contexte géomorphologique				Contexte de la mesure				Référence bibliographique	Ablation en mm/an (valeur moyenne mini à maxi)
Substrat	Couvert végétal	Environnement du versant	Climat et/ou système morphogénétique	Phénomènes érosifs	Date	Lieu	Méthode		
Granite	–	Pente raide Pente normale	Climat méditerranéen	Ruissellement	–	Montagnes de Catalogne (Espagne)	Pièges	Sala, M., 1981 dans Saunders, I. et Young, A., 1983	7,5 5
Gneiss	Sans objet	–	Système périglaciaire	Éboulisation	–	Combe de Laurichard 2500 – 2800 m, Hautes-Alpes (France)	Cubage des débris accumulés au pied des parois sur une période de quelques années	Francou, B., 1988	0,05 à 0,25

L'estimation des apports des versants

L'origine des matériaux

Les processus érosifs s'exerçant sur les versants montagneux sont nombreux. Les géomorphologues distinguent les processus de la fragmentation et de l'altération en place, des processus mobilisateurs. Dans ce cas, en plus du transport par les eaux, non spécifique aux versants montagneux, interviennent de nombreux autres mouvements de débris (figure 5). Bunza *et al.* (1982) en a donné une description précise et exhaustive, illustrée par des croquis expressifs.

Ces processus fonctionnent actuellement, mais ils ont également fonctionné, en des lieux différents, dans le passé, et n'ont pas manqué de laisser des traces : les héritages morphogéniques tels que moraines, terrasses fluvio-glaciaires, manteaux d'altération… Parmi eux, les héritages constituant un stock de matériaux mobilisables doivent évidemment retenir l'attention.

Dans le temps, les phénomènes érosifs peuvent être continus (météorisation), saisonniers (avalanches), chroniques (qui reviennent régulièrement, par exemple, l'éboulisation), catastrophiques (glissement de terrain) ; chaque phénomène a en fait son propre rythme et l'on observe des relais entre les processus et des discontinuités dans les flux de matériaux (Peiry, 1989). Il s'y ajoute des effets de seuil : transport d'une particule au delà d'un certain ruissellement par exemple.

La connaissance des processus actuellement actifs aide à quantifier les apports de versant, mais elle est surtout nécessaire pour bien concevoir les mesures de prévention.

Les facteurs de l'érosion des versants

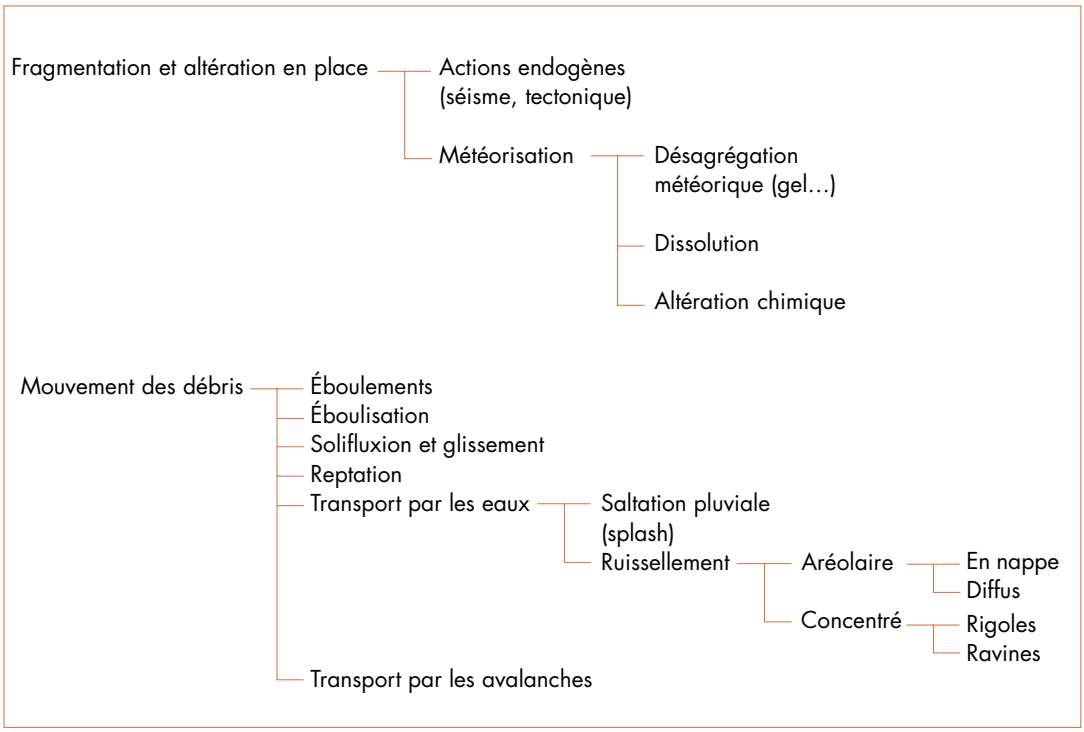
Les processus sont gouvernés par des facteurs favorables ou contraires à l'érosion. Ces facteurs interagissent. L'inventaire des facteurs susceptibles d'intervenir peut être nécessaire dans certaines études. On peut les regrouper en 5 groupes principaux :

– facteurs climatiques : pluies, neige, gel/dégel (alternance, intensité)…

– facteurs géologiques : lithologie, tectonique…

– facteurs géomorphologiques : pente, exposition, altitude, formations superficielles…

Figure 5. – Les processus d'érosion sur les versants montagneux.



– couverture végétale

– facteurs anthropiques

Il faut éventuellement penser aux facteurs intervenus antérieurement dans la formation des héritages ; s'ils doivent être cartographiés, leur distribution spatiale est différente de celle des facteurs actuels comme le montre Bernard-Allee (1984) pour les versants du Haut-Vallespir.

La pertinence des facteurs doit s'apprécier en fonction des échelles spatiales et temporelles de l'étude.

Dans certaines méthodes de quantification, les facteurs sont synthétisés en concepts (voire même en indices pour utilisation comme variables de modèles) : concepts d'érosivité pour qualifier l'action des pluies, d'érodibilité pour les propriétés intrinsèques du substrat (roche, formation superficielle ou sol), et d'érodabilité pour le milieu complexe substrat-couvert végétal-environnement du versant (adapté de Roose, 1990). Bien que ces méthodes ne soient pas applicables en général aux versants de montagne, le cadre suivant, qui en découle, peut guider la réflexion : l'érosion est le produit de l'érosivité des pluies et de l'érodabilité des terrains qui comprend elle-même l'érodibilité du substrat, le couvert végétal, les facteurs d'environnement du versant.

L'interdépendance des facteurs rend difficilement prévisible le sens dans lequel ils jouent ; cet aspect de l'érosion torrentielle est riche en pièges et en paradoxes. Les exemples suivants exposent les rares certitudes concernant ce sujet :

Facteurs climatiques

On ne reviendra pas sur l'érosivité des pluies, concept utile surtout pour les études régionales couvrant des centaines ou milliers de km^2 (ensembles de torrents).

En montagne, l'étagement altitudinal fixe pour une grande part les conditions climatiques et ordonne les processus actuels (tiré de Chardon, 1984 valable pour une latitude de 44° N environ, mais modulable selon l'exposition… et les auteurs) :

– au dessus de 3800 m, l'étage glaciaire nous intéresse surtout par la formation des moraines et la production des matériaux fluvio-glaciaires (à une altitude très inférieure d'ailleurs) ; on est approximativement en-dessous d'une température moyenne annuelle de -6° C/-8° C, seuil en dessous duquel on a un pergélisol (ou permafrost) continu

– de 3800 à 3000 m, l'étage supra-périglaciaire connaît une gélifraction intense due à l'alternance gel-dégel et l'action de la neige

– de 3000 à 2300 m (température moyenne annuelle de 0° C), à l'étage périglaciaire, on a en plus la solifluxion ;

– de 2300 m à 1800 m, à l'étage infra-périglaciaire, le ruissellement prend de l'importance par rapport aux processus des étages précédents

L'indispensable prise en compte des héritages complique l'utilisation de ce type de grille.

Les substrats

Les processus érosifs s'exercent sur la roche-mère (qui peut être meuble) et son manteau d'altération, sur les formations superficielles ou sur un sol. Dans ce dernier cas, les apports en matériaux par ruissellement (ravins compris) peuvent être quantifiés par les méthodes de l'érosion agricole ; ils sont en général faibles par rapport aux autres apports et de granulométrie fine, donc de faible impact sur les crues torrentielles ; lorsque le sol surmonte une formation superficielle ou une roche affectée d'un processus érosif (glissement par exemple), ce sont sur celles-ci que doit porter le raisonnement. Le substrat est donc ici la roche-mère ou la formation superficielle.

Marie (1984) a élaboré une classification adaptée à la Maurienne (Savoie) où le critère est l'aptitude à fournir des matériaux (tableau 3) ; D'Agostino (1996) a également travaillé dans cette voie dans le Trentin oriental (Italie). On pourrait poursuivre en l'étendant à d'autres régions et en la perfectionnant.

Pech (1986) montre à partir de mesures dans la région de l'Ossola (Italie du nord) que le volume annuel des matériaux produits dépend surtout des substrats quels que soient les étages morphodynamiques et les processus en action. De nombreux auteurs partagent ce sentiment concernant la prépondérance de l'effet des substrats en érosion torrentielle, mais en apportent rarement la preuve.

Certains manteaux d'altération hérités de roches résistantes ne figurent pas sur les cartes géologiques, alors qu'ils peuvent atteindre des épaisseurs

Tableau 3. – Classification des substrats selon leur l'aptitude à fournir des matériaux (Marie, 1984).

Formations rocheuses cohérentes	Micaschistes, gneiss, calcaires, calcschistes, grès, microdiorites, roches vertes
Formations rocheuses fracturées	Dolomies, conglomérats, quartzites, grès, calcaires marneux, calcschistes et schistes, brèches
Formations rocheuses peu cohérentes	Marnes, schistes et grès en association, gypse et cargneule
Formations meubles cohérentes	Moraines, alluvions, éboulis
Formations meubles peu cohérentes	Éboulements, terrains glissés, coulées boueuses

considérables : clapisses sur granite ou gneiss du Vallespir (Pyrénées-Orientales) décrits par Bernard-Allee (1984).

Une roche intrinsèquement peu productive peut le devenir lorqu'elle surmonte une roche peu cohérente : Marie (1985) décrit dans le bassin de l'Ardon (Alpes-Maritimes) le démantèlement de la barre de calcaires tithoniques qui glissent par paquets sur des marnes noires qui fluent.

La tectonique peut avoir fracturé des roches normalement de bonne réputation : failles, mise en place de massifs de granites par intrusion (Bernard-Allee, 1984, sur le Vallespir).

Dans certaines formations comme les moraines, les glissements anciens n'expriment leur potentiel productif qu'au contact avec le torrent. Leur productivité est faible rapportée à leur superficie, souvent importante.

La couverture végétale

Son action protectrice vis-à-vis de l'érosion par ruissellement de surface est reconnue et démontrée hors des versants de montagne mais une extrapolation les concernant peut être effectuée. Certains travaux en bassins versants expérimentaux le confirment (Mathys *et al.*, 1996).

Son action sur les autres mouvements de débris est moins connue. Elle pourrait même favoriser les glissements par accélération de l'altération.

En aval des zones productives, la végétation a un effet de filtre sur les matériaux : il en résulte que les apports aux torrents sont différents de l'ablation *(cf.* Quantification des apports de versants p. 70).

La pente

Elle est liée à de nombreux autres facteurs, de telle sorte qu'on doit observer ce facteur avec beaucoup de précautions. Seuls seront donnés quelques exemples de paradoxes :

– les versants pentus ont souvent été préservés du défrichement pour usage agricole et sont mieux protégés par la couverture végétale ;

– les versants pentus peuvent être constitués de roches particulièrement résistantes à l'érosion ;

– sur les versants pentus, les produits de l'altération sont évacués au fur et à mesure et ne constituent pas de stock en place.

Quantification des apports de versants en ingénierie

Il résulte de ce qui précède que les phénomènes érosifs affectant les versants de montagne sont complexes. La quantification de la production de matériaux des versants, mis à disposition du torrent est donc extrêmement difficile :

– les mesures sont rares,

– les connaissances sur les mécanismes fondamentaux et la modélisation physique (fonctionnelle) sont peu développées : elles existent, mais se limitent à quelques processus pris isolément (altération chimique, transports par les eaux, glissements de terrains, chutes de blocs…) et sont loin d'intégrer l'ensemble des processus érosifs de versant. Cette intégration paraît d'ailleurs un objectif trop ambitieux à court terme, ce qui conserve tout leur intérêt aux approches globales et naturalistes.

– jusqu'à présent et à notre connaissance, aucune des pratiques d'expert mises en œuvre sur une application donnée n'a été assez robuste pour pouvoir résiter aux différents cas et être identifiée en tant que méthode d'ingénierie.

En montagne, la situation est bien différente de celle prévalant en érosion agricole ou (et) à faible pente. Dans ces domaines, où les processus à quantifier se limitent au transport par les eaux, de nombreux modèles sont opérationnels. En érosion torrentielle, en dehors des rares cas où la quantification doit s'effectuer sur la zone de représentativité d'un site expérimental, une méthode spécifique est à mettre au point et à valider dans chaque cas : modèle empirique, typologie, analyse de données historiques… ; son ambition doit en général se limiter à une évaluation globale de la production de matériaux des versants, tous processus confondus. Deux cas peuvent se présenter :

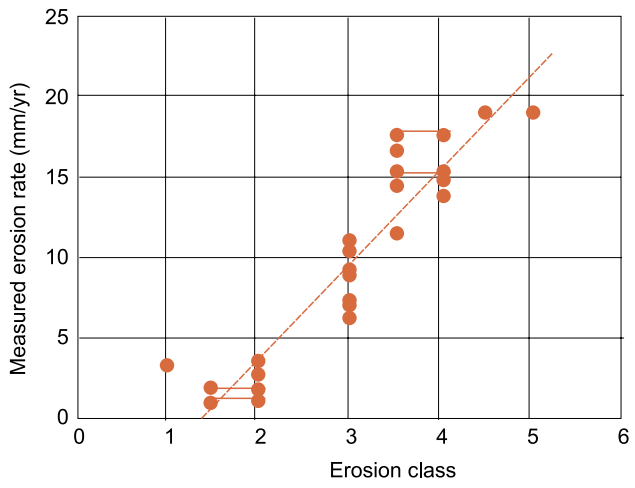
– régionalisation de résultats de mesures de versants expérimentaux au sein de leurs zones de représentativité,

– cas général : aucun résultat expérimental disponible.

Régionalisation de résultats de mesures de versants expérimentaux au sein de leurs zones de représentativité

On a parfois la chance de travailler sur des versants dont les substrats sont d'érodibilité semblable à celle de substrats dont l'ablation a été mesurée expérimentalement. Mais les autres conditions (climatiques, environnement, couverture végétale) sont en général différentes. L'extrapolation des valeurs mesurées au versant étudié doit s'accompagner de modulations afin de tenir compte de ces différences. Cependant, ces modulations sont rarement prédéfinies, et nécessitent une mise au point.

Dunne *et al.* (1981) ont ainsi développé pour l'érosion par ruissellement en montagne au Kenya, une classification empirique à partir du faciès érosif ; des techniciens peuvent ainsi extrapoler des résultats de mesures expérimentales (figure 6).



Classe 0 : pas de signe d'érosion.
Classe 1 : quelques signes de faible érosion, comme des traces à la surface du sol et des tumulus ou des dénudations de racines.
Classe 2 : identique à la classe 1, avec en supplément des dépôts en amont de pierres et de barrages végétaux comportant des rides de quelques mm.
Classe 3 : dénudation des racines, développée même sur des plantes annuelles, couches de sable formant pavage.
Classe 4 : sillons.
Classe 5 : rigoles et petits ravins.
Classe 6 : badlands.

▲ Figure 6. – Corrélation entre classes d'érosion et mesures au Kenya (Dunne *et al.*, 1981).

Cas général : aucun résultat expérimental disponible

Les trois grandes étapes :
– cartographie d'unités homogènes concernant les processus érosifs,

– quantification : attribuer à chaque unité un apport de matériaux pour l'événement considéré,

– validation des estimations des apports de versants.

Cartographie d'unités homogènes concernant les processus érosifs :

• la cartographie directe des faciès érosifs. On entend par faciès érosif l'ensemble des caractéristiques des formes d'érosion résultant des processus sur les versants. Cette cartographie est possible si le bassin versant n'est pas trop étendu (elle demande une photointerprétation systématique et beaucoup de terrain pour la valider) et s'il n'y a pas masquage des faciès ; ce masquage peut provenir d'une végétation dense qui fait un écran visuel par rapport au repérage des faciès ou du caractère aléatoire du climat qui, dans certains systèmes morphogénétiques *(cf. Échelles de temps,*

équilibre morphodynamique, crise climatique p. 63 et encadré 1), peut conduire à une inhibition du fonctionnement des processus érosifs sur une longue période (exemple de plusieurs décennies sans pluviométrie intense, dans une région où la dynamique de la végétation est forte, donc la récupération biostatique aisée). Chaque faciès constitue dans ce cas une unité homogène et on peut directement passer à la quantification.

• la cartographie indirecte à partir des facteurs. En montagne, suivant le développement du paragraphe *Les facteurs de l'érosion des versants* p. 66, il n'y a pas d'idée a priori (contrairement à l'érosion agricole) sur la façon dont jouent les facteurs.

Il faut établir pour chaque cas leurs liaisons avec les processus érosifs, c'est-à-dire inventorier les processus érosifs et inventorier les facteurs susceptibles d'être explicatifs (encadré 1). En résumé, les facteurs susceptibles d'être explicatifs sont à rechercher parmi les substrats et les facteurs de la mobilisation (climatiques, couvert végétal et d'environnement). Il faudra ensuite, à partir d'un échantillon de stations, constituer une base de données des facteurs susceptibles d'être explicatifs et des faciès érosifs observés correspondants. Puis, par analyse de ces données, établir des typologies à partir des facteurs sélectionnés (figure 7 et aussi Vogt, 1991 ou Guigo, 1978). Enfin, appliquer ces typologies (croisement de cartes des facteurs sélectionnés) pour obtenir la cartographie des unités homogènes vis-à-vis des processus érosifs de versant.

Encadré 1

Deux grandes catégories de facteurs

Il convient de distinguer :

– ceux qui interviennent actuellement dans la constitution d'un stock ou qui sont intervenus antérieurement (cas des héritages), par fragmentation/altération,

– ceux qui interviennent dans la mobilisation.

Si cette dernière catégorie est facile à inventorier, il n'en est pas de même de la première pour des raisons notamment d'échelles de temps et d'espace extrêmement différentes de celle de l'événement crue que l'on étudie. On peut tourner la difficulté en remplaçant les facteurs concernés par un facteur « existence d'un stock hérité ou en formation », dont la connaissance s'acquiert à partir d'une cartographie des formations superficielles pour les héritages et à partir d'une cartographie des lithologies à forte dynamique d'altération-fragmentation pour les processus actuels (on rejoint la notion de substrat évoquée précédemment).

Figure 7. – Exemple de typologie de versants en érosion torrentielle sur des gneiss (Vallespir, Pyrénées-Orientales ; Brochot, 1990) ; remarquer comme l'explication apportée par certains facteurs (pente, exposition) ne peut être généralisée à la zone. ▼

1000 < altitude < 1800 m	Versants en ubac	→ Gn2
	Autres expositions	→ Gn1
	Mylonite de Can Calet	→ Gn5
1800 < altitude < 2300 m	Pente < 25°	→ Gn3
	Pente > 25°	→ Gn4
Altitude > 2300 m		→ Gn6

Gn1 : Processus érosifs peu productifs, glissements de terrain possibles.
Gn2 : Processus érosifs productifs, pas de glissements de terrain.
Gn3 : Processus érosifs peu productifs, pas de glissements de terrain.
Gn4 : Processus érosifs très productifs, glissements de terrain possibles.
Gn5 : Processus érosifs productifs, glissements de terrain possibles.
Gn6 : Processus érosifs très productifs, pas de glissements de terrain.

Quantification : attribuer à chaque unité un apport de matériaux pour l'événement considéré. La quantification consiste à estimer les apports de versant qui seront mis à disposition du torrent pour l'événement considéré. Elle peut, en fonction de la méthode utilisée, aboutir directement au résultat recherché ou s'attacher à estimer l'ablation du versant ; dans ce dernier cas, il restera à s'interroger sur le piégeage des matériaux au cours de leur cheminement : effet filtre de la végétation en aval, effet tampon de replats retenant définitivement les matériaux ; Dalla-Fontana (1995) le met en évidence dans son travail sur le Rio Cordon (Alpes, Italie). Les formations glaciaires de remplissage à l'amont d'un verrou sont souvent dans cette position de tampon. Cette tâche peut être exécutée processus par processus ou peut être envisagée d'emblée pour la production totale de chaque type de versant, tous processus confondus, selon la façon dont a été menée la phase précédente de cartographie des unités homogènes et les opportunités de quantifier. En effet, dans cette démarche, il faut tirer parti du moindre indice, tant les données sont rares. On peut proposer l'exploitation de la bibliographie, l'utilisation des caractéristiques morphologiques et géomé-

Encadré 2

L'utilisation des caractéristiques morphologiques et géométriques

L'utilisation des caractéristiques morphologiques et géométriques des figures d'érosion résultant de l'action des processus donne une estimation des matériaux enlevés par l'érosion (Spreafico, 1996).

La photogrammétrie peut permettre d'accéder aux fortes variations altitudinales : dans leur étude, Thee *et al.* (1990) concluent qu'avec des photos aériennes au 1/25 000e, on ne peut qu'exceptionnellement enregistrer des dénivellations inférieures à 0,5 m.

L'estimation du recul en plan des figures d'érosion assez régulières peut aboutir, en la combinant avec la connaissance d'une pente, à un volume exporté. Brochot (1990) a ainsi exploité un relevé de l'évolution de la bordure des Conques de Vernet-les-Bains (Pyrénées-Orientales) pour donner un ordre de grandeur d'une ablation de terrain glaciaire : un recul de 10 m entre 1942 et 1969 a ainsi conduit à proposer une valeur de 1,4 m pour la partie la plus raide et pour une crue dont le temps de retour est compris entre 10 et 20 ans. Cette interprétation a requis en outre la connaissance de l'occurrence des épisodes de crue dans la période considérée.

En l'absence de relevés, ce qui est le cas le plus général, on peut utiliser des éléments remarquables du terrain comme des sentiers disparus, des gros blocs de rochers… Les photographies anciennes peuvent être exploitées.

Certaines figures d'érosion ont des caractéristiques géométriques constantes. C'est le cas des « chalades » (arrachements linéaires) caractéristiques des Pyrénées-Orientales, de surcroît très faciles à repérer sur les photos aériennes : à partir d'un profil en travers type mesuré sur le terrain, la longueur estimée sur les photos aériennes permet de passer aux volumes (Brochot, 1990).

Encadré 3

La mesure des dépots

Cette mesure donne une estimation indirecte de l'ablation sous certaines conditions :

– Francou (1993) estime ainsi le recul d'une paroi de gneiss par éboulisation à partir du cubage des débris accumulés au pied des parois ou sur un glacier rocheux (0,05 à 0,25 mm/an actuellement). Son travail est un travail de recherche mais une adaptation au contexte de l'ingénierie doit pouvoir s'envisager.

– Les volumes piégés par des seuils dans des ravines peuvent donner une estimation de la fraction grossière de l'ablation ; la méthode peut être étendue à des petits bassins versants où l'on a vérifié que le stock éventuel dans le lit est constant en moyenne interannuelle ; le dépôt est alors équivalent à la fraction grossière de l'ablation des versants productifs.

triques des figures d'érosion résultant de l'action des processus (encadré 2) et la mesure des dépôts (encadré 3).

Validation des estimations des apports de versants. Compte tenu de l'incertitude importante qui entoure toute la démarche, il faut absolument chercher à valider les estimations réalisées à partir d'événements bien connus. Il est cependant assez rare de pouvoir valider les apports de versant indépendamment du transport solide, car les volumes de dépôts, principales données disponibles, sont connus au niveau des lits des torrents. Un exemple de validation toutes estimations confondues (apports de versants et transport solide) est donné dans *Méthodes d'estimation de la production de sédiments en ingénierie* p. 72.

L'estimation de la production de sédiments

Des apports de versant à la production de sédiments

Il a été déjà remarqué que les apports de versant ne sont pas forcément équivalents à l'ablation totale en raison d'une possible rétention sur ces versants. De même, la production de sédiments est rarement équivalente (en quantité et encore moins en qualité) à la totalité des apports de versant : les modalités du transport des matériaux, (que celui-ci intervienne par suspension, charriage ou lave), conduisent à des dépôts ou des reprises de matériaux dans les lits et à des variations qualitatives ; parmi cel-

les-ci les variations de la granulométrie et du mode de transport sont essentiellement intéressantes.

Dans les cours d'eau, la taille des sédiments diminue plutôt vers l'aval sous l'effet combiné de l'usure et du fractionnement des grains ainsi que du tri sélectif, mais cette tendance est moins évidente dans les torrents principalement à cause des apports d'affluents ou de versants directement dans le lit : c'est l'observation et la mesure qui apporteront les informations les plus pertinentes.

En tout état de cause, il n'y a pas toujours relation entre la taille d'un grain et son mode de transport. Dans les laves torrentielles, toutes les tailles de grains sont transportées conjointement, sans ségrégation. Quant aux autres modes de transport (charriage, suspension), un même grain peut les alterner selon les caractéristiques de l'écoulement. Il n'est pas même évident de conserver la distinction entre ces deux modes lorsque les concentrations en sédiments deviennent très fortes. Toutefois, une interrogation subsiste sur la fraction très fine des sédiments fournis par les versants, maintenue toujours en suspension, qui ne se déposera plus avant d'arriver jusqu'à la mer (figure 8). Sa connaissance est souvent nécessaire, bien qu'elle n'ait aucun rôle dans la morphologie des lits, car elle peut représenter des flux considérables qui doivent être soustraits des apports de versants dans la plupart des raisonnements d'ingénierie. À défaut de critère spécifique aux torrents, l'utilisation du critère empirique granulométrique de 65 microns (Simons et Sentürk, 1992) a été validée dans un cas particulier (Brochot *et al.*, 1995) et peut être proposée.

Méthodes d'estimation de la production de sédiments en ingénierie

Modèles globaux de production de sédiments

Ces modèles statistiques ou conceptuels, relient la production de sédiments à des caractéristiques du bassin versant, sans passer par l'étape intermédiaire de l'estimation des apports des versants. Ils ont été établis à partir de données de volumes recueillies sur le terrain après des événements.

Kronfellner-Kraus (1981) a proposé le modèle suivant pour des événements catastrophiques et des bassins versants de moins de 80 km² :

$$V = K\,S\,J$$

K varie de 500 à 1500 (selon des modalités précisées par l'auteur et approfondies dans des travaux postérieurs) ; S surface en km² ; J pente moyenne de l'ensemble du lit en % ; V volume de matériaux produit en m³.

Un abaque a été établi pour le canton suisse d'Uri dans le même esprit (repris notamment dans la référence VWHG-ETH ZÜRICH, 1988) ; le volume moyen annuel produit est estimé par :

$$V = 755\,S^{0,8}$$

(V en m³, S en km² de 1 ha à 10 000 km²)

La production d'un événement est de 2 à 50 fois plus élevée (selon son intensité).

D'Agostino *et al.* (1996) s'appuient sur le modèle de Kronfellner-Kraus et affinent la détermination du cœfficient K à partir de 62 événements extrêmes dans le Trentin oriental ; ils introduisent des

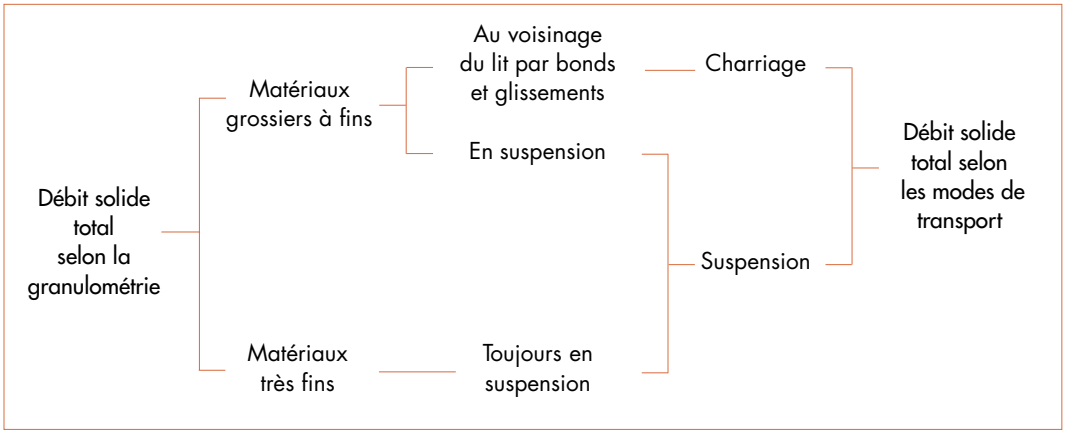


Figure 8.– Schéma de cohérence entre débits solides (nous employons volontairement les termes de « matériaux grossiers à fins » et « matériaux très fins » de préférence respectivement à ceux de « bed material load » et « wash load », admis classiquement dans les rivières, mais dont la pertinence dans le cas des torrents n'a pas encore été évaluée).

Zone géologique	Molasse	Flysch	Domaine alpin sédimentaire	Domaine alpin cristallin
Volume spécifique en m^3/km^2				
Très faible	20–100	150	200–800	400–3000
Faible	50–200	1500	500–1000	800–5000
Moyen	150–500	5000	1000–5000	1500–15000
Important	500–1500	10000	2000–10000	3000–30000
Très important	800–3000	20000	3000–30000	8000–80000

Tableau 4. – Productions spécifiques de sédiments d'événements importants en fonction du domaine géologique et de la taille du bassin versant. Le premier chiffre s'applique à un bassin de 10 km², le second à un bassin de 1 km² ; les classes de *très faible* à *très important* s'obtiennent à partir de critères morphologiques décrits précisément dans le manuel d'ingénierie (Spreafico *et al.*, 1996), les deux premières classes s'appliquent à des torrents sans laves.

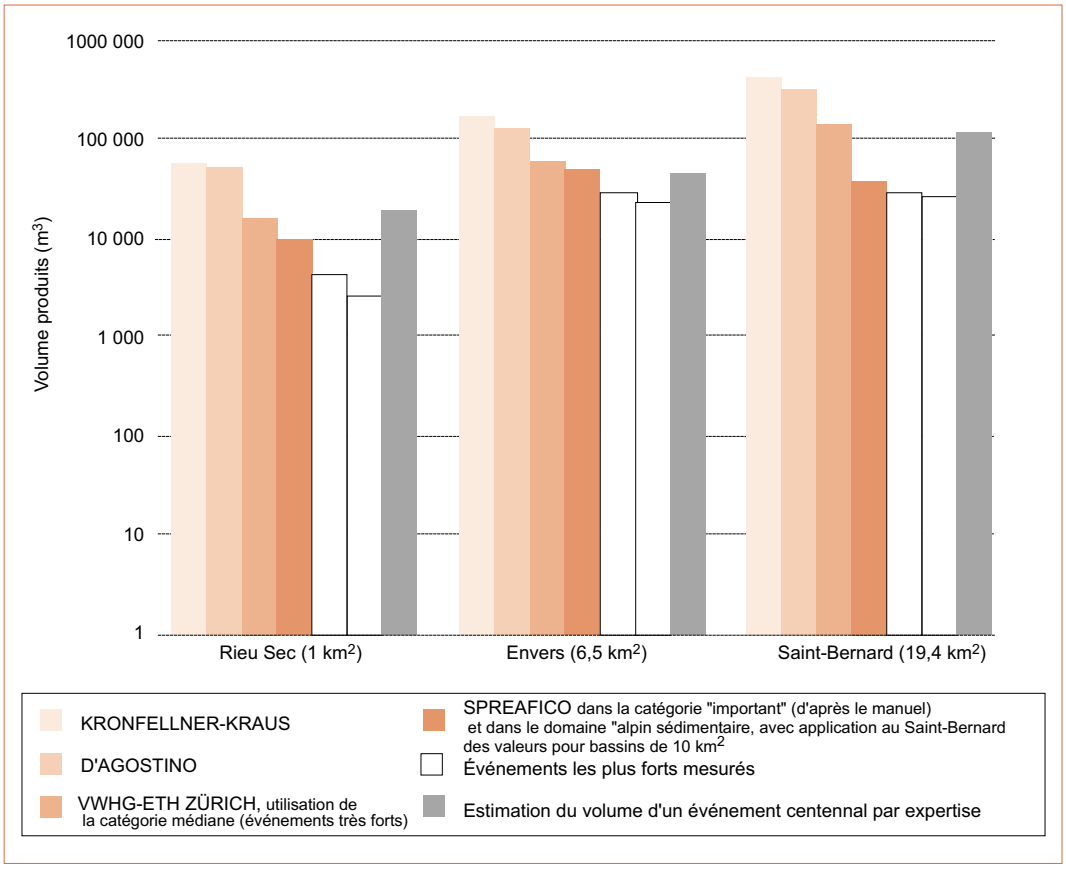


Figure 9. – Comparaison de modèles globaux de production de sédiments dans les torrents.

indices géologiques (IG variant de 0 à 5) et de transport (IT variant de 1 à 3) et obtiennent :

$$V = 39\ S\ J^{1,5}\ IG\ IT^{-0,3}$$

(mêmes notations que précédemment).

Spreafico *et al.* (1996) proposent, dans un manuel d'ingénierie, les valeurs du tableau 4 pour des bassin versants de 1 à 10 km² ; la notion de zone géologique fait référence à des critères structuraux et non à une lithologie en particulier.

Nous avons appliqué rapidement ces méthodes à trois torrents assez bien connus de la vallée de la Maurienne (Savoie) ; puis nous avons comparé les résultats avec les deux plus forts volumes mesurés sur chaque torrent et une estimation par expertise du volume d'un événement centennal (bu-

reau d'étude SOGREAH). Les résultats présentés en figure 9 montrent que les ordres de grandeur sont conservés pour deux méthodes. Mais cette comparaison est limitée car il n'y a ni dans les méthodes, ni dans les mesures, une appréciation quantitative du temps de retour et que nous les appliquons en dehors de leur zone géographique de validité (en particulier, nous avons retenu le domaine « alpin sédimentaire » pour nos trois torrents).

Ce type de modèles peut être utile pour des études régionales et des dégrossissages, et on peut espérer améliorer leur robustesse et leur précision, notamment en intégrant mieux des critères géomorphologiques.

Modèles globaux spatialisés
Avec ces modèles, on adopte un niveau de représentation un peu plus fin qu'au paragraphe précédent en découpant le bassin en versants et lits.

Les plus simples consistent à effectuer des bilans de flux de sédiments en provenance respectivement de ces deux types d'entités :

Production de sédiments = Apports des versants
+ Variation des stocks du lit

Il n'y a pas alors besoin de code de calcul élaboré ; par exemple :

– à l'échelle de temps moyenne interannuelle, pour un bassin versant en équilibre, la variation des stocks de matériaux dans les lits est nulle : la production de sédiments est égale à la somme des apports de versants ; cela peut aussi se concevoir pour des événements particuliers.

– pour certains torrents à laves où les hypothèses sur le mode de déclenchement et les volumes mobilisables sont bien circonscrites, on peut ainsi estimer différents scénarios de volumes de matériaux à l'entrée sur le cône de déjection ; ceux-ci seront validés ultérieurement par confrontation aux observations sur des événements passés (assez nombreuses dans le cas de laves), après utilisation éventuelle d'un modèle d'écoulement.

Mais en général, des modèles de transport par charriage sont nécessaires pour estimer les variations de stock. À ce niveau de représentation des phénomènes, des modèles globaux sont suffisants : les lits sont découpés en quelques biefs homogènes.

Le modèle ETC (Brochot, Meunier, 1996) assure l'ensemble de ces calculs. Événementiel, il a pour ambition de représenter l'intégralité des processus hydrologiques et érosifs des bassins versants torrentiels depuis la pluie jusqu'aux débits liquides et solides à l'exutoire. Il considère les bassins comme un assemblage de versants et de lits, découpés de façon à ce qu'ils soient homogènes et que puissent s'y s'appliquer des modèles élémentaires globaux. Il peut notamment être utilisé pour reconstituer des crues et valider les hypothèses de quantification.

Autres raisonnements
L'utilisation de la morphologie du lit torrentiel (section en travers, pente locale, granulométrie) est une voie fructueuse pour l'estimation des volumes charriés. Elle peut être exploitée pour des torrents sans laves au point considéré, en équilibre morphodynamique, et dont le substrat est assez meuble pour offrir toute latitude aux écoulements dans le façonnement du lit (pas de roc, ni de pavage exogène ou hérité) : la morphologie est alors bien le résultat des écoulements liquides et solides charriés actuels. Ces conditions sont souvent remplies à l'entrée des cônes de déjection.

Lorsque les hydrogrammes liquides sont connus, les volumes solides peuvent être estimés par application des formules de capacité maximale de transport, les paramètres nécessaires étant déduits de l'observation du terrain. La prédiction des apports en matériaux des versants est alors inutile si l'on ne s'intéresse qu'aux volumes charriés.

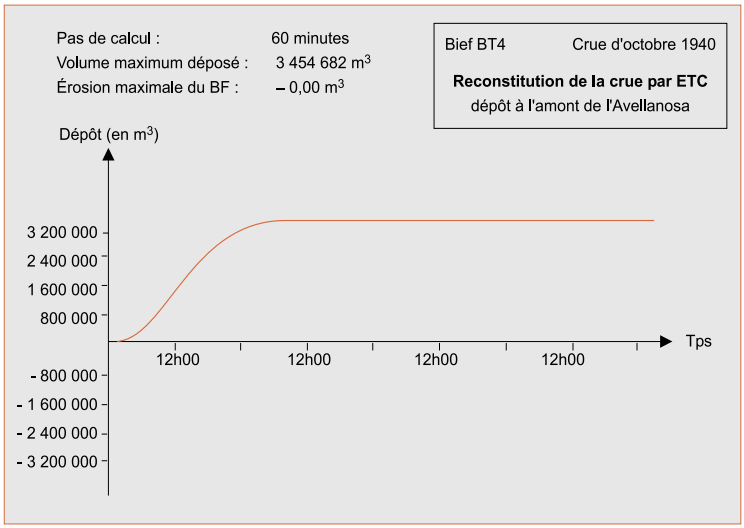
Dans les autres cas, la morphologie peut servir à l'élaboration d'indices permettant des estimations en valeur relative de la production de sédiments. Cela peut constituer une voie pour d'extrapoler les données d'un bassin à d'autres. Brochot (1993) a utilisé cette approche pour régionaliser des résultats de mesures de bassins versants expérimentaux.

Validation
Comme pour les apports de versants, il est indispensable de valider les estimations de la production de sédiments réalisées, notamment en vérifiant la cohérence du budget sédimentaire complet. On s'appuiera :

– sur des données historiques mentionnant principalement des dommages, pour des événements pris isolément ;

– sur des observations morphologiques comme les volumes des cônes de déjection (VWHG-ETH ZÜRICH, 1988) ou les datations de strates déposées (à partir de charbons de bois, de troncs fossiles, de vestiges archéologiques…) : on confronte alors des productions de sédiments cumulées sur une période avec les volumes observés sur le terrain.

Brochot et Lefranc (1990), ont utilisé les dépôts de la formidable crue de 1940 dans le Haut-Vallespir (Pyrénées-Orientales) pour vérifier la cohérence des différentes estimations de l'érosion torrentielle au sein du bassin du Tech : les photos aériennes de 1942 ont fourni les surfaces, tandis que les hauteurs étaient mesurées sur le terrain (terrasses aisément repérables, en raison de l'ampleur des phénomènes). Le modèle ETC a été utilisé (figure 10).



▲ Figure 10. – Validation à partir d'un événement historique (crue de 1940 dans le Haut-Vallespir, Pyrénées-Orientales) : reconstitution d'un dépôt à l'aide du modèle ETC. Ce dépôt a été très important dans cette partie du lit, étant situé en amont du barrage formé par un glissement de terrain.

Conclusion

Le thème de l'érosion torrentielle est d'une grande complexité en raison de la multiplicité des phénomènes, de la variété des échelles de temps et d'espace, des discontinuités et des interactions au sein du système constitué par le bassin versant. Les mesures sont rares. Les connaissances sur les mécanismes fondamentaux et la modélisation physique (fonctionnelle) sont peu développées : elles existent, mais se limitent à quelques processus pris isolément et la perspective d'une intégration sur l'ensemble du bassin versant paraît lointaine. Cet article a montré que des approches globales avaient en conséquence leur place en ingénierie des risques torrentiels en complément d'autres disciplines. Sur un plan qualitatif, elles constituent un cadre indispensable à des approches plus fines en situant les phénomènes dans la dynamique sédimentaire du bassin. Sur un plan quantitatif, il a été constaté que les méthodes d'ingénierie sont rares. Pour les apports de versants, il n'a pu être proposé que des orientations méthodologiques, une méthode spécifique étant à mettre au point dans chaque cas. Pour la production de sédiments dans les lits, quelques modèles ont été présentés, mais leurs résultats sont assortis d'une forte incertitude. Dans ce contexte, on ne peut en préconiser aucun en général. Il est préférable de confronter les résultats de plusieurs d'entre eux et de rechercher une cohérence d'ensemble. La validation dans tous les cas d'application doit faire l'objet de beaucoup d'attention, le moindre indice étant à exploiter. □

Résumé

Le transport de quantités importantes de matériaux est une caractéristique essentielle des crues des torrents de montagne. Ces matériaux proviennent des phénomènes d'érosion intervenant dans l'ensemble du bassin versant. Pour l'ingénierie des risques torrentiels, la connaissance de ces phénomènes et la quantification des flux solides qui en résultent est un volet important. Ceci est envisagé ici selon une approche globale, à de petites échelles, et intégratrice : sont traités les apports des versants au lit du torrent et la production de sédiments (débit solide) en un point du lit. Sont rappellées en premier lieu les connaissances de base. La crue est le phénomène intégrateur qui assure la continuité des flux de matériaux : les apports des versants parvenus au lit sont disponibles pour un transport immédiat ou différé, sous forme essentiellement de charriage ou de lave. La géomorphologie permet de situer l'érosion du bassin par rapport à une échelle de temps et à l'équilibre morphodynamique. Elle facilite le repérage des processus pertinents et les facteurs. Les données d'érosion torrentielle sont rares. En second lieu, sont présentées des méthodes d'ingénierie. Sur les versants, chaque processus a son propre rythme et les flux sont discontinus. On observe des relais entre les processus. La quantification est donc extrêmement difficile, cependant quelques orientations méthodologiques sont proposées. La production de sédiments n'est pas la somme des apports de versants, pour des raisons qui sont exposées dans cette étude. Des modèles empiriques et conceptuels peuvent contribuer à la prédiction. La validation est un point critique.

Abstract

The mountain streams are characterized by an important solid transport during floods. The materials are provided by the erosion processes occurring within the whole catchment. The knowledge of these processes and their quantification is an important point for engeneers studying torrential risks. This paper is restrained to the field of low spatial scales, where someone can observe processes with naked eye; they are considered in a global and integrating way. The disciplinary field of torrential erosion is complementary for torrential hydraulics and hydrology. It may be shared in 2 sections: slope sediment supplies and sediment yield. This paper would aim at presenting basic knowledge and engeneering methods. Flood is the integrating phenomenon connecting material fluxes: sediment supplies provided by slopes may reach the channel and are available for transportation by immediate or differred flows. Solid transport may be carried out as bedload transport or debris-flow. Geomorphology allows to situate actual erosion on a time scale and to assess if the considered catchment knows equilibrium or crisis. It helps when listing relevant processes and factors in a given study. The data on torrential erosion are rare. On slopes, each erosion process have his own rythm and fluxes are intermittent. Processes take turns to carry materials. Quantify slope sediment supply is very difficult. Some methods are suggested. Sediment yield is not the sum of slope sediment supplies : the reason are explicited. Some empirical and conceptual models may help prediction. Validation is a critical point.

Bibliographie

AMOROS, C., PETTS, G. E., (sous la direction de), 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*, Ed. Masson, Paris.

BERNARD-ALLEE, P., 1984. *La dynamique des versants dans le Haut-Vallespir : processus, héritages, actions anthropiques*, Thèse de 3ème cycle, Université de Paris I.

BROCHOT, S., 1990. *Définition et prévention des crues torrentielles en Haut-Vallespir (Haut-Tech et affluents)* pour le compte du service de Restauration des terrains en montagne des Pyrénées-Orientales, 236 p. + cartes.

BROCHOT, S., 1993. *Érosion de badlands dans le système Durance Étang de Berre,* Cemagref/Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse , 267 p. + cartes.

BROCHOT, S., 1997. *Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle (apports des versants et production de sédiments),* Cours à l'Université européenne d'été sur les risques naturels, session 1997 risques torrentiels : érosion et crues, Saint-Niklaus, Valais, Suisse, édité par le Pôle grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des risques naturels, Grenoble, 26 p.

BROCHOT, S. *et al.*, 1995. *Desertification in mediterranean area. DM2E project: final report,* Cemagref, 48 p. + annexes.

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

BUNZA, G., KARL, J., MANGELSDORF, J., 1982. *Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde,* Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, H. 17, München.

CEMAGREF, 1989. *Bassins versants expérimentaux de Draix, Compte-rendu de recherche n° 2 en érosion et hydraulique torrentielle.*

CHARDON, M., 1984. Montagne et haute montagne alpine, critère et limites morphologiques remarquables en haute montagne*, Revue de géographie alpine*, t. LXXII, 2-3, pp. 213-224.

D'AGOSTINO, V., CERATO, M., COALI, R., 1996. *Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino orientale,* Internationales symposion Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Tagungspublikation, Band 1, pp. 377-386.

DALLA-FONTANA, G. (coord.), 1995. *Instability, erosion and solid transport on steep mountain slopes, combined laboratory and field investigation (Eroslope). Final report,* European programme, contract number EV5V-CT92-0179.

DELANNOY, J.-J., ROVERA, G., 1996. *L'érosion dans les Alpes occidentales : contribution à un bilan des mesures et des méthodes, Revue de géographie alpine* 1996 n° 2, pp. 87-101.

DUNNE, T., *et al.*, 1981. *Effect of woodfuel harvest on soil erosion in Kenya,* Report to the ministry of energy, Nairobi, Kenya.

FRANCOU, B., 1993. *Hautes montagnes, passion d'explorations,* Pratiques de la géographie, Masson.

GUIGO, M., 1978. Le Val Parma : essai de cartographie des potentialités d'érosion sur un bassin de l'Apennin septentrional*, Méditerranée,* n° 3.

KOULINSKI, V., 1993. *Granulométrie,* Note technique RTM / Cemagref, 15 p.

KOULINSKI, V., 1998. *Étude hydraulique du bassin versant de l'Ebron,* Bureau d'étude ETRM, pour le compte du service RTM de l'Isère.

KRONFELLNER-KRAUS, G., 1981. *Über die Einschätzung der wildbacherosion unter berücksichtigung forstlicher und technischer massnahmen,* Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchanstalt, Wien, 138 Heft, 1981, Beiträge zur wildbacherosions- und Lawinenforschung, ODC 116 :423.5.

MARIE, R., CEMAGREF, 1984. *Méthodologie de programmation des actions de Restauration des terrains en montagne. Phase d'élaboration des éléments techniques d'aide à la décision. Le cas de la Maurienne,* CERREP.

MATHYS, N., BROCHOT, S., MEUNIER, M., 1996. *L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute-Provence), Revue de géographie alpine,* tome 1984, n° 2, 1996, pp. 17-27.

MEUNIER, M., 1991. Éléments d'hydraulique torrentielle, Cemagref, coll. Études, série *Montagne n° 1,* 278 p.

OWENS, P., SLAYMAKER, O., 1992. *Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia,* IAHS publ. n° 209.

PECH, P., 1986. Essais de quantification de l'ablation en moyenne et haute montagne à partir d'analyses volumétriques : l'exemple de l'Ossola (Alpes centrales, Italie du Nord, 46° lat. N), *Revue de géomorphologie dynamique,* tome XXXV, pp. 11-20.

PEIRY, J.-L., 1989. Les sédiments dans les torrents du bassin de l'Arve : discontinuités fonctionnelles et impact de l'aménagement des bassins versants, *La Houille Blanche,* n° 3-4 1989, pp. 205-211.

PHAN, S. H., 1993. *Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres noires du sud-est de la France,* Thèse de doctorat de l'UJF Grenoble I, spécialité Sciences de la terre.

ROOSE, E., 1990. *Spécial érosion : avant propos,* Cahier ORSTOM, série Pédologie, vol. XXV, n° 1-2.

ROVERA, G., 1990. *Géomorphologie dynamique et aménagement des versants en moyenne Tarentaise,* Thèse de géographie de l'UJF Grenoble I.

SAUNDERS, I., YOUNG, A., 1983. *Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation,* Earth surface processes and landforms, vol. 8, 473-501.

SIMONS, D. B., SENTÜRK, F., 1992. *Sediment transport technology, water and sediment dynamics,* Water resources publications, Littleton.

SPREAFICO, M., LEHMANN, Ch., NAEF, O., 1996. *Empfehlung zur Abschätzung von Festofffrachten in Wildbächen,* Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle ; communication n° 4 ; service hydrologique et géologique national, Bern.

SURELL, A., 1870. *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes,* Ed. Dunod.

THEE, P., ZELLER, J., HÄGELI, M., 1990. *Widbachverbau : photogrammetrische Gelände auswertungen,* Institut fédéral de recherches forestières, CH 8903 Birmensdorf, rapports 324, ISSN 0259-3092.

TRICART, J., 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie,* Ed. Masson.

VOGT, H., 1991. *Quelques problèmes concernant les méthodes de recherche en érosion de sols,* Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, Alger, 1-3 décembre 1991, p. 10-15.

VWHG-ETH ZÜRICH, 1988. *Folgen der Waldschäden auf die Gebirgsgewässer in der Schweiz,* Workshop 1987 VWHG-ETH ZÜRICH / EAV BIRMENSDORF.