

Analyse d'une lave torrentielle dans le torrent de Faucon  
(bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence).  
Détermination des zones de déclenchement et de contribution  
*Study of a debris flow event in the Faucon stream  
(Barcelonnette basin, Alpes-de-Haute-Provence).*  
*Determination of triggering areas and contribution areas*

Alexandre Remaître\*, Olivier Maquaire\*, Stéphane Pierre\*\*

**Résumé**

La compréhension et la gestion des risques induits par les laves torrentielles nécessitent une approche pluridisciplinaire regroupant les compétences de l'ingénierie géotechnique, de l'hydraulique, de la climatologie, de la géologie et de la géomorphologie. Cette dernière apporte des informations indispensables à la recherche des zones sources des laves torrentielles. Une étude géomorphologique a été menée sur le torrent du Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence), où une importante lave torrentielle s'est produite le 19 août 1996. Cette lave s'est formée à la suite d'un violent orage sur les hauteurs du bassin de réception, provoquant la rupture brutale d'un embâcle naturel dans le chenal. Les analyses granulométriques des dépôts de la lave torrentielle permettent de décrire un écoulement d'abord granulaire dans les premiers hectomètres puis cohésif jusqu'à la zone principale de dépôt, qui traduit l'hétérogénéité géologique observée dans le bassin versant du Faucon. L'analyse morphologique associée aux analyses comparatives des dépôts de laves et des formations superficielles, en laboratoire ont permis de distinguer deux zones sources bien distinctes : une zone de déclenchement *stricto sensu* et plusieurs zones de contribution.

**Mots clés** : laves torrentielles, écoulements granulaires, écoulements cohésifs, zone de déclenchement, zones de contribution.

**Abstract**

*A geomorphic study was carried out for the first time on the Faucon torrent (Barcelonnette basin, Alpes-de-Haute-Provence), where a debris flow occurred on August 19th 1996. This flow was triggered by a severe thunderstorm in the upper part of the catchment. The rupturing of a natural dam in the stream channel caused the debris-flow. Grain-size distribution and petrographic analysis of the debris-flow deposit bring out the granular character of the flow during the first hectometre, and its cohesive character beyond that point and as far as the debris fan. Geomorphic observations and laboratory tests show the existence of two source areas: a triggering area and several contributing areas. These contributing areas seem to have supplied the bulk of the flow material.*

**Key words**: debris flow, granular flow, cohesive flow, triggering areas, contributing areas.

**Abridged English Version**

*Debris flows in mountainous areas are able to transport large quantities of sediment downslope, producing complex distributions of deposits and eroded surfaces along their flow paths. Knowledge of the risk induced by debris flows requires a multidisciplinary approach regrouping such disciplines as geotechnical engineering, hydrology, climatology, geology, and geomorphology. Geomorphology is particularly useful in*

*the investigation of the flow triggering areas. The triggering mechanisms of debris flow are known (Johnson and Sitar, 1990; Iverson et al., 1997; Tognacca and Bezzola, 1997; Wieczorek et al., 1997; Bonnet-Staub, 1998; Sorgi-de-Genaro, 1999), yet it remains difficult to determine the potential triggering areas. This study is the first result arising from two years of geomorphological research since 1998 in the Barcelonnette basin, Alpes-de-Haute-Provence (France). On August 19th 1996 a large debris flow occurred in the Faucon stream.*

\* Institut de Physique du Globe de Strasbourg, IPGS-EOST, UMR 7516 CNRS, 5 rue Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France. E mail : alexandre.remaître@eost.u-strasbg.fr ; olivier.maquaire@eost.u-strasbg.fr

\*\* Université Louis Pasteur, Faculté de Géographie, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex.

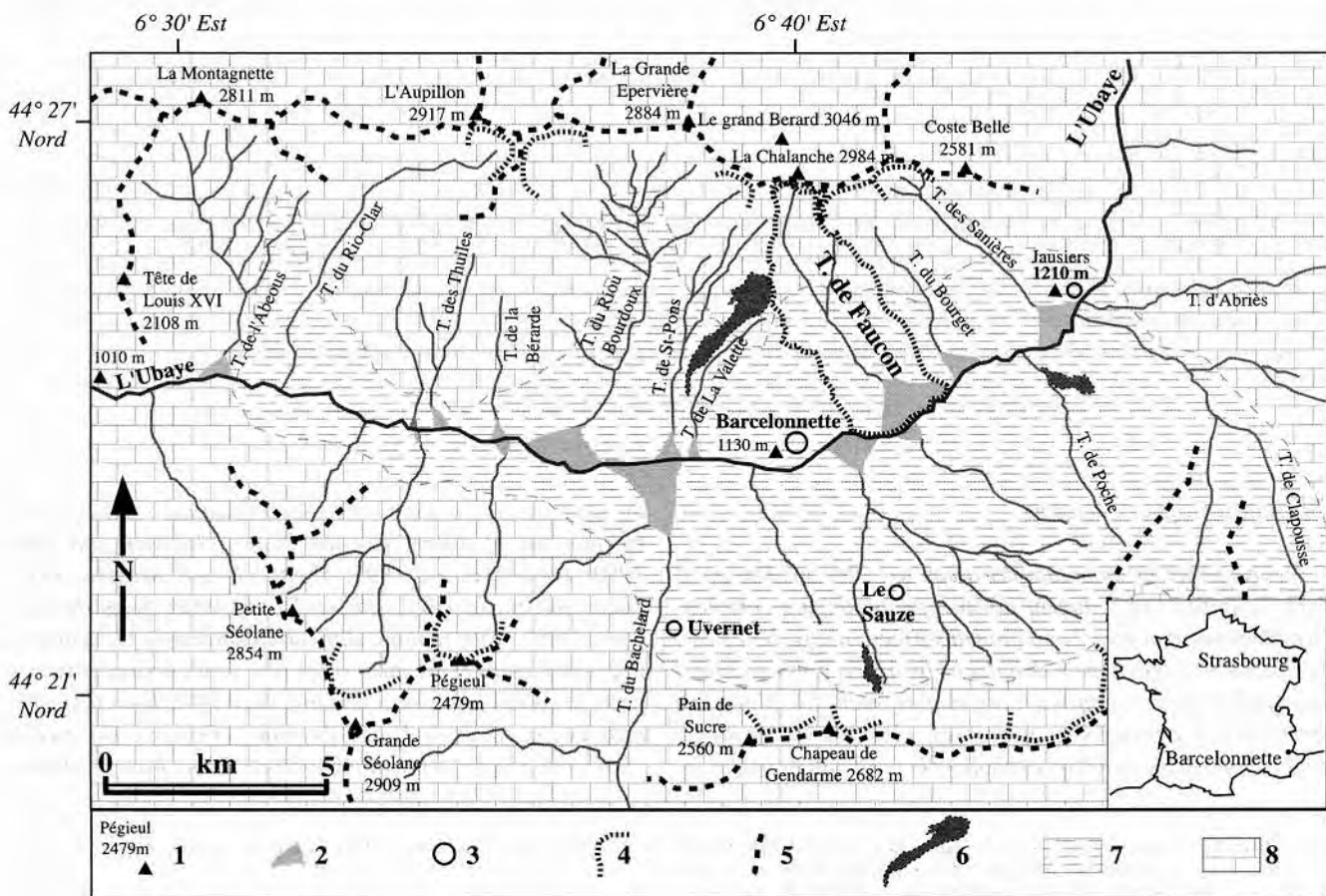
The Faucon stream has been very active since the middle of the 19th century. Deforestation throughout the entire Barcelonnette basin caused an increase in torrential activity. The Faucon catchment (10,5 km<sup>2</sup> in area, 7 km in length) is located on the south-facing slope of the Barcelonnette basin (fig. 1). The watershed crest is capped by a sheet thrust and its lower slopes are underlain by less resistant black marls (fig. 2). The 1996 debris flow was initiated after a severe thunderstorm over the catchment basin and the rupturing of a natural dam in the torrential stream (fig. 3) caused the debris flow. Five deposits were sampled (LTF1 to LTF5) (fig. 4). Our study involved three steps as follows.

1) Grain-size distribution and petrographic analysis were carried out for the five debris-flow deposits (fig. 5). The silt fraction (< 50 mm) was found to increase from the upper part (LTF5) to the lower part (LTF1) (tab. 2). The debris flow was therefore initially granular (LTF5), then cohesive (LTF4-LTF1) (fig. 6). This type of debris flow is common in heterogeneous bedrock. The triggering of the debris flow occurred in the upper part of the basin (flysch, limestones). The other deposits (LTF4-LTF1) were sampled in the middle part of the basin and on the apex of the fan, where the black marl outcrops are covered by morainic and slope debris. The petrographic analysis (tab. 2) shows the upper deposit (LTF5) as being poor in marl (6% only of the >10 mm fraction). The black marl part increases in the other deposits (LTF1 to LTF4), while the flysch fraction decreases (40% in LTF1, 65% in LTF5).

2) Several samples of Quaternary deposits (scree, moraines, weathered black marls) were analysed for the purpose of comparison with the debris-flow deposits (tab. 1). The grain-size distribution shows that grain-size characteristics of weathered black marls are very close to those of the cohesive debris-flow deposit (fig. 7). Grain-size characteristics of the upper debris-flow deposit (LTF5) and the scree deposits are similar. The 1996 debris flow was probably triggered after the (re)mobilisation of scree deposits (flysch, limestones). The passage of the flow through the black marl outcrops increased scouring and erosion (bulking process). Velocities were back-calculated using the forced vortex equation and multiplied by the cross-sectional area to obtain peak discharge estimates, which ranged from 95 to 105 m<sup>3</sup>/s (tab. 3). Approximately 100,000 m<sup>3</sup> of sediment was deposited during this event (tab. 4 and 5). Channel scour is responsible for the difference in sediment accumulation between the breached dam (1000 m<sup>3</sup> at the most) and the depositional

Fig. 1 – Croquis géologique et topographique du bassin de Barcelonnette et localisation du torrent de Faucon. 1 : point coté ; 2 : cône de déjection ; 3 : localité ; 4 : cirque glaciaire ; 5 : ligne de crête ; 6 : glissement-coulée ; 7 : autochtone (marnes noires) ; 8 : allochtone (nappes de charriage).

Fig. 1 – Geological and topographical sketch of the Barcelonnette basin and location of the Faucon stream. 1: spot elevation (m asl); 2: alluvial fan; 3: town; 4: cirque; 5: crest line; 6: earthflow; 7: autochthonous black marl; 8: allochthonous nappe.



*area but cannot be determined directly because no information is available on the channel fill before the event. The debris flow initiation process seems to be controlled by two different areas: the triggering or initiation area, and several contributing (scouring/erosion) areas.*

## Introduction

Depuis une dizaine d'année, si les connaissances sur le déclenchement et le comportement des laves torrentielles ont connu des progrès notables (Martinet, 1993 ; Coussot, 1993 ; Coussot, 1994 ; Laigle et Coussot, 1994 ; Coussot et Meunier, 1996 ; Luo *et al.*, 2000), la prévision temporelle et spatiale de l'événement reste délicate. La protection des biens et des personnes contre l'aléa que représente une lave torrentielle passe par une correction (plages de dépôts, seuils, ouvrages d'art anti-érosif) sur le secteur aval du bassin torrentiel et par la connaissance des mécanismes à l'amont et la recherche des zones sources. Les processus de déclenchement sont aujourd'hui connus et largement étudiés (Johnson et Sitar, 1990 ; Iverson *et al.*, 1997 ; Tognacca et Bezzola, 1997 ; Wiczorek *et al.*, 1997 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999). Les mécanismes de contribution (apport de matériel supplémentaire après départ du mouvement) ont en revanche été peu évoqués (Pierson *et al.*, 1990, Jakob *et al.*, 1997, Berti *et al.*, 1999 ; Jakob *et al.*, 2000 ; Massimo, 2000). Ils constituent pourtant une composante essentielle du fonctionnement et de la propagation d'une lave torrentielle. Une première approche dans la recherche des zones contributives est présentée dans ce travail, en prenant pour exemple la lave torrentielle du 19 août 1996 survenue dans le torrent du Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence).

## Problématique générale

Lors du déclenchement et de la propagation d'une lave torrentielle, deux zones particulières s'individualisent de l'amont à l'aval du bassin versant. Ces zones libèrent l'essentiel des matériaux qui alimentent la lave : la (ou les) zone(s) de départ où le phénomène se déclenche, et la (ou les) zone(s) de contribution qui fournit du matériel supplémentaire pendant la propagation. Il est couramment admis que les laves torrentielles se produisent à la suite de la (re)mobilisation par le torrent de terrains déstabilisés provenant majoritairement des berges, du lit et des versants adjacents (Costa, 1984 ; Meunier, 1991 ; Takahashi, 1991). Selon la constitution granulométrique de la matrice de la lave (éléments inférieurs à 20 mm), il est possible de distinguer clairement deux grands types d'écoulements : les laves à matrice cohésive et les laves à matrice granulaire (Meunier, 1994 ; Bonnet-Staub, 1998). La distribution granulométrique des dépôts de lave permet, par comparaison avec les formations du bassin versant, de donner une première information sur les zones de déclenchement (Cojean et Bonnet-Staub, 1998 ; Sorgi-de-Gennaro, 1999). Les travaux de Johnson et Rodine, 1984 ; Crosta et Marchetti, 1990 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Klubertantz, 1999 ont abouti à la construc-

tion de typologies basées essentiellement sur le mouvement déclenchant (glissement de terrain, écroulement rocheux, déstabilisation du lit, etc.). Les travaux menés depuis septembre 1998 sur le bassin torrentiel de Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence) soulignent l'existence de zones de contribution jouant un rôle fondamental dans la propagation et dans le comportement de ce type d'écoulement (Remaître, 2000). En effet, après son déclenchement, la lave torrentielle incorpore des matériaux supplémentaires par son action érosive directe (érosion des berges et reprise des matériaux du lit essentiellement). Dans certains cas, la lave torrentielle incorpore très peu de matériaux, notamment dans un chenal encaissé dans des roches particulièrement résistantes. À l'inverse, un chenal formé dans des matériaux détritiques meubles est plus sensible à l'action d'arrachement de la lave, contribuant à alimenter la lave torrentielle en cours de propagation. Mais alors quel est le volume de sédiments libéré par ces zones contributives ? À travers l'étude de la lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon, cet article a pour objectif de montrer notamment la complémentarité des analyses morphologiques et granulométriques dans l'étude des zones sources des laves torrentielles.

## Présentation du site

### Le contexte régional : le bassin de Barcelonnette

Dans les Alpes du Sud, le bassin de Barcelonnette est situé entre les massifs cristallins de l'Argentera et du Mercantour au sud, le massif du Pelvoux au nord-ouest et le Queyras au nord-est. Le bassin est drainé par le cours moyen de l'Ubaye à une altitude moyenne de 1130 m (fig. 1). La cuvette d'environ 200 km<sup>2</sup> est longue de 22 km entre Jausiers à l'est (altitude 1200 m) et les Thuiles à l'ouest (altitude 1100 m) où un verrou glaciaire constitue sa terminaison aval. Le bassin, large de 10 km au maximum, est limité par de hautes lignes de crêtes culminant à des altitudes comprises entre 2800 m et 3100 m environ. Les sommets sont façonnés dans les formations très résistantes (calcaires et flyschs dissociés) des nappes de charriage (Parpaillon et Autapie). Les crêtes sont pour la plupart surcreusées par des cirques glaciaires qui forment les bassins de réception des nombreux torrents. Ces formations résistantes se retrouvent jusqu'à des altitudes de 1800-2000 m et imposent des pentes supérieures à 45°. À l'aval, "l'autochtone" est constitué par les épaisses séries callovo-oxfordiennes des marnes noires ou "Terres Noires". Les versants entaillés dans ces marnes possèdent des profils adoucis (pente moyenne de 20-25°) et sont localement soumis à un ravinement intense responsable d'un paysage de badlands (Descroix, 1994). Ce bassin isolé connaît un climat montagnard à cause d'une température moyenne annuelle inférieure à 10°C et d'un enneigement hivernal de 4 à 6 mois. Les précipitations annuelles varient entre 700 et 900 mm, leur répartition suivant un régime méditerranéen avec des maxima au printemps et en automne. La période estivale est sèche, toutefois les orages sont intenses durant cette période.

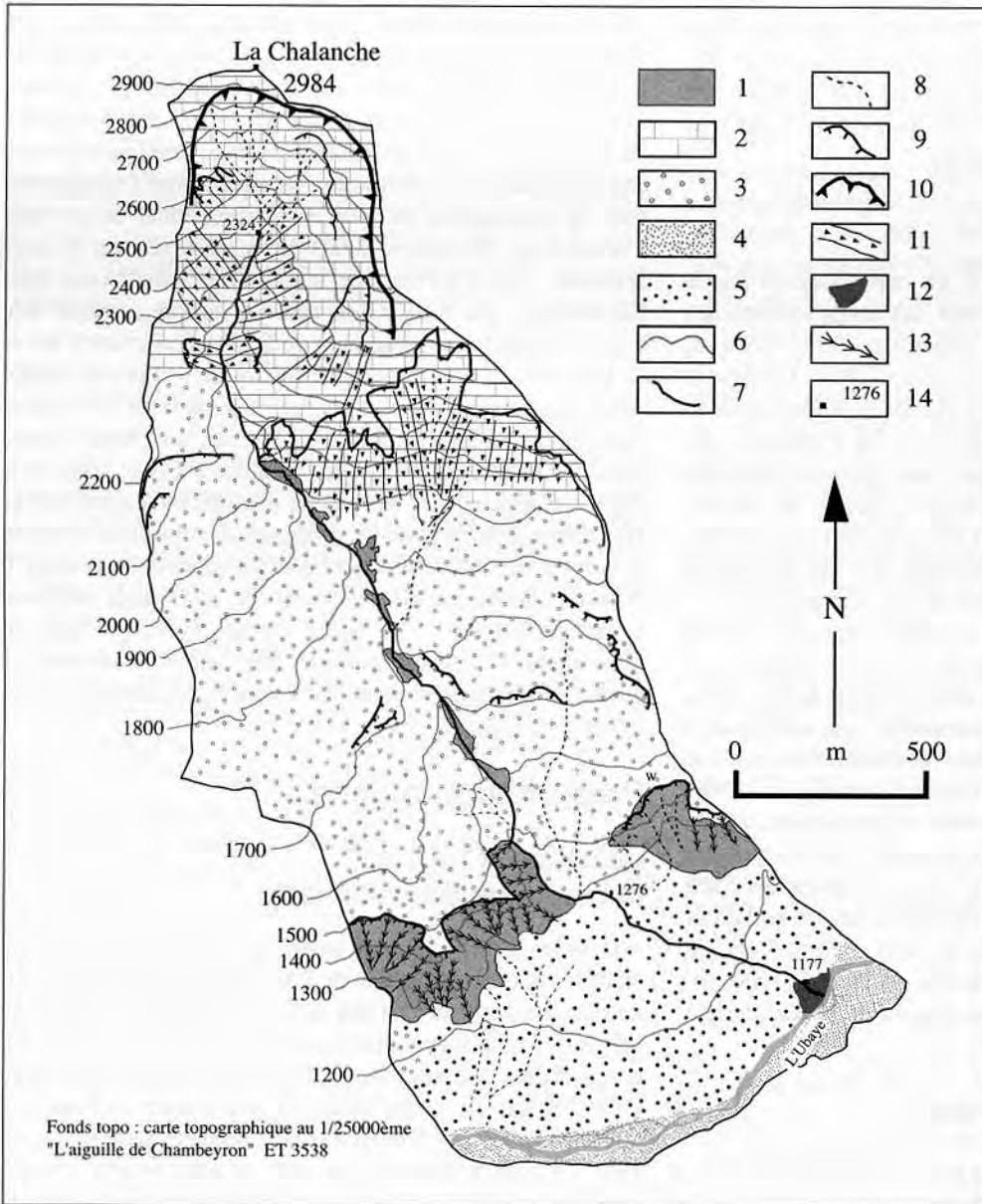


Fig. 2 – Carte morphologique du bassin versant de Faucon (septembre 2000). 1 : marnes noires callovo-oxfordiennes. 2 : flysch dissociés (nappes de charriage). 3 : moraines et formations périglaciaires. 4 : alluvions. 5 : cône de déjection. 6 : courbes de niveaux (m). 7 : écoulements pérennes. 8 : écoulements intermittents. 9 : escarpements > 5 m. 10 : cirque glaciaire. 11 : couloirs d'éboulis. 12 : cône de déjection de la lave d'Août 1996. 13 : ravines. 14 : points cotés.

Fig. 2 – Morphological map of the Faucon catchment (September 2000). 1: Callovo-Oxfordian black marls; 2: flysch (nappe); 3: morainic deposits and periglacial slope deposits; 4: alluvial deposit; 5: alluvial fan; 6: elevation contours; 7: perennial flow; 8: intermittent flow; 9: scarp > 5 m; 10: glacial cirque; 11: screes; 12: debris fan of the 1996 debris flow; 13: gullies. 14: spot elevation (m asl).

## Morphologie du torrent de Faucon

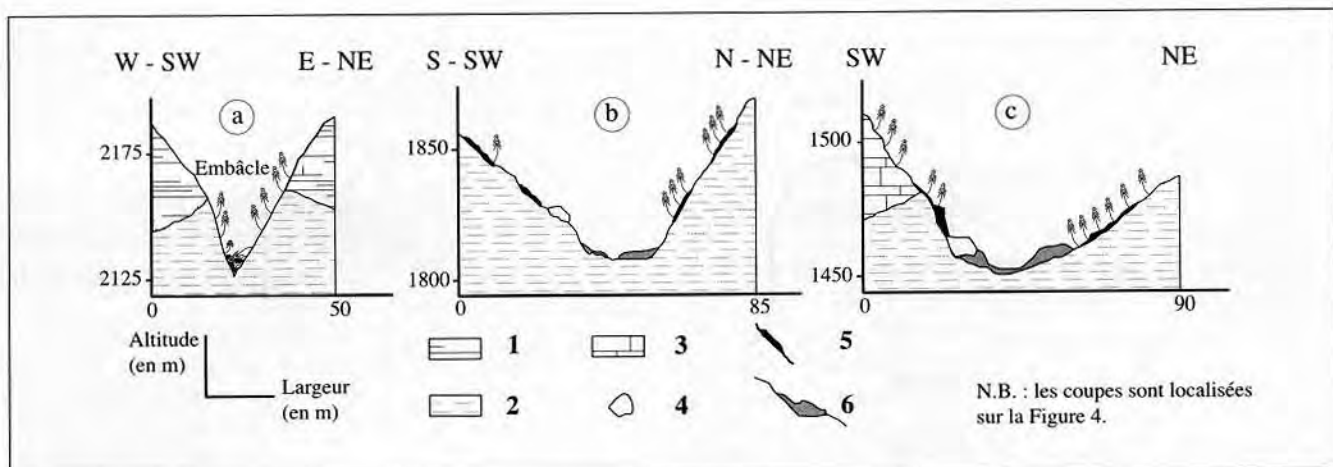
Le torrent du Faucon, situé en rive droite de l'Ubaye, en position d'adret, prend sa source en contrebas de la crête de la Chalanche (fig. 2). D'une longueur de six kilomètres environ, le torrent s'écoule dans une longue et profonde vallée, au tracé et au profil transversal changeant. Il draine une surface de 10,5 km<sup>2</sup>. Son tracé est successivement N-S dans le bassin de réception (2984 m à 2200 m), NNW-SSE dans le chenal d'écoulement (2200 m à 1290 m) puis NW-SE sur le cône de déjection (1290 à 1175 m), avant de rejoindre l'Ubaye. Sa dénivellée importante (1800 m) lui confère une pente moyenne de 30 % avec des maxima de l'ordre de 70 % dans le bassin de réception. Le torrent de Faucon affouille des terrains instables tout le long de son tracé, mettant à jour de vastes affleurements de marnes noires sous les formations glaciaires et périglaciaires. Trois types de profils transversaux peuvent être observés (fig. 3) :

resserrements favorisant la formation d'embâcles. Le lit en pente forte est encaissé dans la roche en place (marnes) ;

– un profil à fond plat (3b) aux versants moins escarpés. Le fond du chenal encombré d'importants dépôts de laves torrentielles occupe une largeur variant entre 20 et 30 m. Les plages de dépôts peuvent atteindre 2 à 3 m d'épaisseur par endroits. Contrairement au profil précédent, les formations superficielles sont nombreuses, recouvrant de façon plus ou moins continue les marnes noires sur des épaisseurs d'environ 2 à 4 m ;

– un profil dissymétrique (3c) associant un versant raide (souvent raviné en partie haute) et un versant aux pentes plus douces. La dissymétrie des versants résulte d'une opposition lithologique : les versants raides sont généralement taillés dans les flyschs dissociés alors que la lithologie marnreuse caractérise les versants de faible pente.

D'une largeur maximale d'un peu plus de deux kilomètres, le vaste cône de déjection débute à 1270 m et rejoint l'Ubaye



à une altitude de 1175 m. De pente faible (5 %) et incisé sur près de deux mètres, il se développe sur une superficie de cent dix hectares, soit 10 % de la surface totale du bassin versant.

La lave torrentielle du 19 août 1996 est la dernière d'une série de douze événements recensés depuis 1850 ; l'occurrence temporelle est d'une dizaine d'années environ sur le torrent de Faucon, soit une fréquence d'apparition deux à trois fois plus élevée que pour l'ensemble des torrents du bassin de Barcelonnette. Le torrent est équipé de 74 barrages, la plupart datant de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et du début du XX<sup>e</sup> siècle.

### La lave torrentielle du 19 août 1996 : description de l'événement

Le 19 août 1996, une lave torrentielle a affecté le torrent de Faucon après un violent orage de grêle sur les hauteurs du bassin versant. Situé au-dessus de la Chalanche, cet orage a été extrêmement localisé puisque le fond de vallée est resté sec. En l'absence de poste climatique sur les hauteurs du bassin, aucune donnée pluviométrique n'est disponible. Toutefois des témoins oculaires ont attesté de la rare violence de l'événement. L'efficacité de l'orage a été renforcée par l'impact des grêlons qui a favorisé le décollement des matériaux sur les versants du bassin de réception. La pluie, qui a alors succédé à l'orage, a ensuite facilement évacué le matériel arraché vers le torrent.

Selon divers témoignages (services R.T.M., riverains), la lave se serait formée aux environs de 16h15. En progressant, elle a alors déposé un volume important de matériaux dans le chenal torrentiel et sur le cône de déjection. Vers 16h30, soit un quart d'heure après le déclenchement, sur une hauteur de 4 à 5 mètres, la lave a atteint le lotissement du Bérard (fig. 4). En quelques endroits, elle a débordé par dessus les digues aménagées le long du chenal torrentiel. Elle est venue frôler l'intrados du tablier du pont n° 2 et quelques projections boueuses ont recouvert le garde fou et la chaussée. En contrebas, la lave a débordé de près de 50 cm au-dessus du pont n° 3 (fig. 4 et fig. 5a). Les conséquences directes ont été la fermeture provisoire de la route départementale reliant Barcelonnette à Jausiers. À la confluence avec l'Ubaye, les matériaux se sont étalés dans le lit majeur en un large cône d'épandage dont les dimensions ont atteint

Fig. 3 – Profils transversaux caractéristiques du torrent de Faucon. 1 : flyschs dissociés ; 2 : marnes noires ; 3 : calcaires marneux ; 4 : blocs morainiques ; 5 : moraines ; 6 : dépôts de laves torrentielles.

Fig. 3 – Typical cross-sections of the Faucon stream. 1: flyschs; 2: black marls; 3: marly limestones; 4: morainic boulders; 5: morainic deposits; 6: debris-flow deposits.

une centaine de mètres de longueur, une largeur maximale de 250 m, et une épaisseur variant de 2 à 4 m.

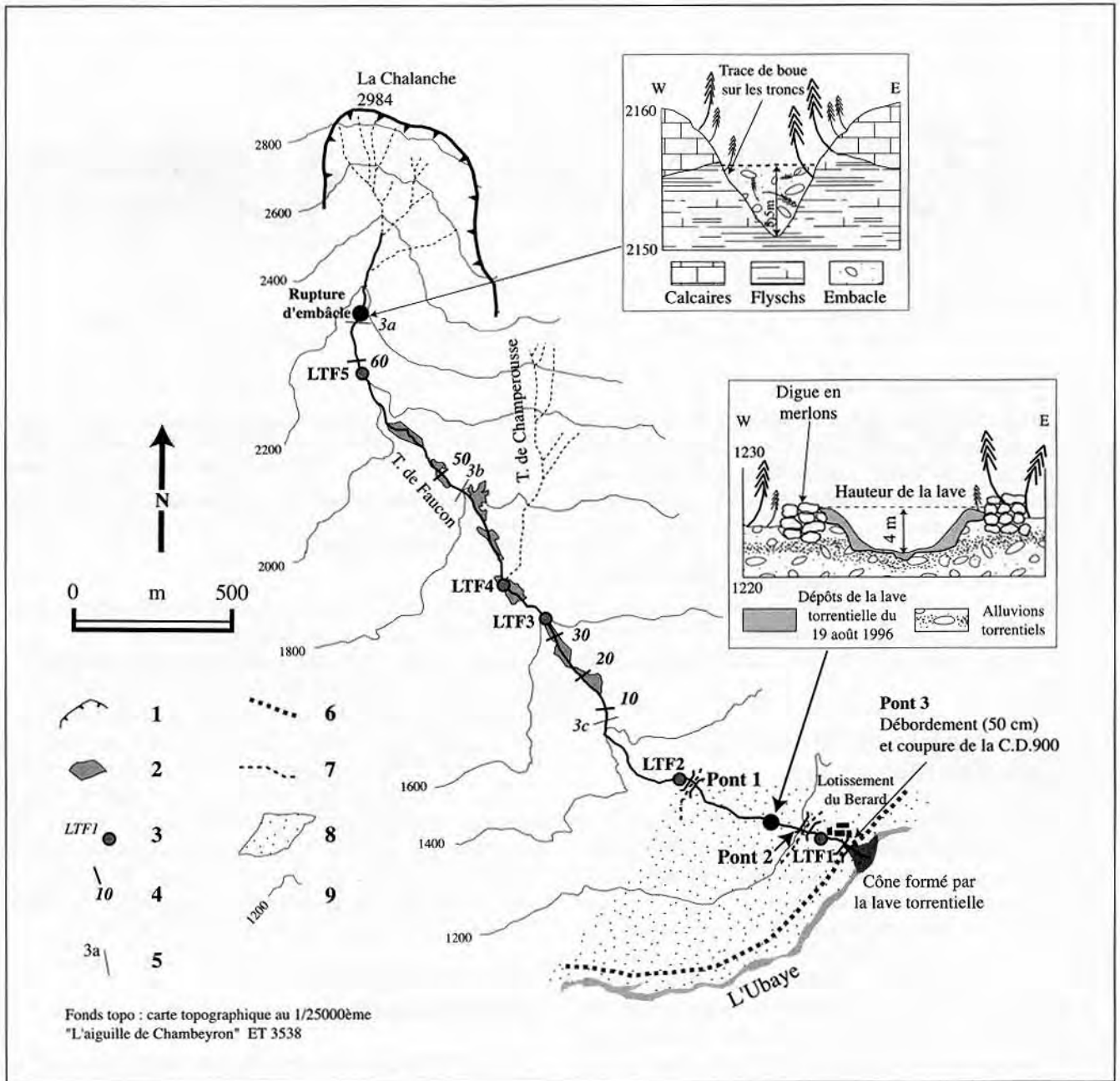
Au lotissement du Bérard, seul le jardin de la maison la plus proche, située seulement à une dizaine de mètres du chenal, a été touché par quelques débordements. Les barrages et les seuils ont été vraisemblablement endommagés par la lave ; toutefois, il n'est pas possible de connaître avec précision l'impact de la lave de 1996 sur ces ouvrages dans la mesure où nous ne connaissons pas leur état avant cet événement. En septembre 1998, sur les 74 ouvrages d'art équipant le chenal, nous avons observé que près de la moitié étaient détruits (48 %), environ un quart était en mauvais état (26 %) et seulement un dernier quart restait en bon état (24 %).

### Les investigations géomorphologiques

La recherche des zones de déclenchement et de contribution des laves torrentielles combine l'étude morphologique du chenal torrentiel et des versants à l'étude sédimentologique des formations et des dépôts de laves torrentielles. Elle consiste d'une part à ausculter le lit torrentiel pour déterminer les zones instables capables de fournir du matériel à une lave et, d'autre part, à comparer ces mêmes matériaux à la nature des dépôts de lave. Les trois grands types de formations superficielles du bassin de Faucon et cinq dépôts de la lave torrentielle du 19 août 1996 seront décrits et analysés.

### Les observations morphologiques du chenal après la lave du 19 août 1996

À l'amont, à une altitude proche de 2150 m et à quelques centaines de mètres de la confluence de plusieurs couloirs d'éboulis résultant de la fragmentation des calcaires de l'Autapie et des flyschs dissociés du Parpaillon, le chenal présente, sur une trentaine de mètres de longueur et une vingtaine de



mètres de largeur, de profondes cicatrices d'arrachement et un aspect chaotique. Ces cicatrices sont observables, ainsi que des traces de boue indurée témoignant de la montée des eaux, jusqu'à une hauteur d'environ 5,5 m au-dessus du chenal. Ces empreintes correspondraient à celles laissées par une rupture d'embâcle. De nombreux glissements superficiels affectent les tabliers d'éboulis présents dans cette zone, l'important stock de matériel graveleux se concentrant dans le chenal torrentiel. Plusieurs échantillons ont été prélevés dans les éboulis qui proviennent essentiellement des affleurements de flyschs et de calcaires des nappes de charriage. À l'aval, glissements superficiels et ruptures de berges sont observables à proximité immédiate du chenal torrentiel. La zone où les instabilités sont les plus fréquentes correspond aux grands affleurements de marnes noires dans la partie centrale du bassin (entre 2000 et 1600 m d'altitude). Le ravinement intensif des marnes et des formations morainiques

Fig. 4 – Carte phénoménologique de la lave torrentielle du 19 Août 1996 du torrent de Faucon. 1 : bassin de réception ; 2 : marnes noires ; 3 : dépôts de la lave torrentielle de 1996 ; 4 : numéro de barrage ; 5 : coupes 3a, 3b et 3c ; 6 : route départementale C.D. 900 ; 7 : chemin forestier ; 8 : cône de déjection ; 9 : courbes de niveaux.

Fig. 4 – Map of the August 19th 1996 debris flow in the Faucon stream. 1: catchment area; 2: black marls; 3: 1996 debris-flow deposits; 4: dam number; 5: cross-sections 3a, 3b and 3c; 6: main road C.D. 900; 7: forest road; 8: alluvial fan; 9: elevation contours.

accentue l'instabilité générale du chenal. Des échantillons ont été prélevés dans le chenal et à proximité immédiate (bas de versants) ; il s'agit de moraines (le plus souvent remaniées) et des marnes noires altérées.

Du fait de la géométrie complexe du chenal et par manque d'outils d'investigation adaptés, les volumes des matériaux mobilisables (manteau d'altération de marnes déstructurées,

moraines recouvrant des versants raides, etc.) n'ont pu encore être déterminés. Les échantillons des zones potentiellement instables ont été soumis à des analyses granulométriques et pétrographiques.

### Granulométrie et pétrographie des formations superficielles du bassin de Faucon

Plusieurs prélèvements ont été effectués sur l'ensemble du bassin de Faucon pour les trois grandes familles de formations superficielles évoquées plus haut. Pour chacune de ces familles plusieurs analyses granulométriques et pétrographiques ont été effectuées (tab. 1). Les analyses granulométriques ont été réalisées sur des matériaux de calibre égal ou inférieur à 20 mm. Les pourcentages présentés par la suite seront exprimés sur 100 % de la fraction inférieure à 20 mm, afin de pouvoir comparer nos résultats avec ceux déterminés par d'autres auteurs. La limite de 20 mm peut paraître arbitraire, car elle ne prend pas en compte la charge grossière. Toutefois, les diverses études menées sur la rhéologie des laves torrentielles montrent que le comportement de l'écoulement est majoritairement guidé par la matrice et non par les blocs ou les débris qu'elle transporte (Martinet, 1993 ; Coussot, 1993) sauf dans le cas des écoulements granulaires secs (Iverson, 1997). L'environnement marneux du bassin nous a conduit à établir un protocole spécifique, tenant compte du caractère très altérable des marnes noires. Ainsi, les granulométries par voie humide ont été réalisées en minimisant le nombre de cycles humectation/dessiccation. En effet, les marnes noires sont très sensibles à ces phénomènes ; après seulement quelques cycles la structure de la roche disparaît complètement.

En complément des analyses granulométriques, une étude pétrographique a été effectuée. La méthode consiste à définir la nature pétrographique des matériaux constitutifs des dépôts de laves torrentielles selon les différentes classes granulométriques à partir d'observations visuelles. Ainsi, nous avons choisi de faire cette étude sur la fraction 2 à 100 mm en distinguant cinq grands types de classes pétrographiques : les marnes noires, les flyschs à Helminthoïdes, les calcaires, les calcaires gréseux, les calcaires bulleux.

Les trois types de formations se distinguent bien : la texture des éboulis correspond à des graviers sableux, les alté-

rites de marnes noires à des limons sableux et les moraines à des argiles sableuses. La pétrographie distingue encore plus clairement les trois formations superficielles.

### Description des dépôts de la lave torrentielle et des prélèvements

Le chenal du torrent de Faucon est parsemé de nombreux dépôts de laves torrentielles (notés LTF). Nos observations ont été menées plusieurs mois après les faits, les résultats donnés ci-après doivent donc être analysés avec prudence. Toutefois, les dépôts du torrent de Faucon présentent, comme la plupart des dépôts de laves torrentielles, une très grande cohésion ; ils sont recouverts par une carapace extrêmement indurée qui préserve leur structure. La majorité des dépôts, à l'exception de cinq zones, ont été remaniés par les services de la R.T.M. durant les travaux de remodelage et de curage du lit. Seuls les dépôts non remaniés ont fait l'objet des différentes analyses. La distribution spatiale des dépôts non remaniés sur le torrent s'est avérée satisfaisante (fig. 4), les dépôts échantillonnés recouvrant de manière significative notre zone d'étude.

Les lobes de lave, cimentés en surface, présentent un aspect chaotique (hétérométrie, pas de granoclassement). Longs de plus de cent mètres, ils ont une forme aplatie et bombée sur les côtés. En surface, on trouve aussi bien des éléments de petite taille (clastes millimétriques à centimétriques) que des galets et des blocs (calcaires, flyschs, marnes noires). Les éléments grossiers se trouvent majoritairement en subsurface et aux extrémités des lobes frontaux.

Les coupes stratigraphiques des lobes permettent d'apprécier leur structure verticale ; trois niveaux peuvent être distingués (fig. 5b) :

- une zone de transition où la présence de galets et de blocs est faible ; il s'agit en général de dépôts alluvionnaires, intercalés entre deux niveaux de laves différents. Il pourrait aussi s'agir d'un écoulement de type hyperconcentré entre deux bouffées de laves ;

Tab. 1 - **Granulométrie et pétrographie des formations superficielles prélevées dans le bassin versant du Faucon.**

Tab. 1 - *Grain-size distribution and petrography of surficial deposit samples from the Faucon catchment.*

Ech.	Granulométrie (en %) (1)				Pétrographie (en %) (2)				
	Argiles	Limons	Sables	Graviers	Marnes noires	Flyschs	Calcaires	Calcaires gréseux	Calcaires bulleux
Eboulis	2-4	2-6	33-37	61-70	0-2	53-87	2-19	1-17	0-10
Altérites de marnes noires	12-18	12-14	25-40	30-45	68-86	0-8	2-27	0-3	0-2
Moraines	23-34	14-17	33-41	16-23	14-30	7-31	25-41	8-39	3-8

(1) Sur des échantillons écrêtés à 20 mm

(2) Sur la fraction graveleuse et caillouteuse de 2 à 100 mm



Photographie prise vers l'amont depuis le pont 3 le 20 août 1996.



Photographie de gauche :  
Vue prise vers l'amont depuis le pont 1  
au mois de Septembre 1998.

Fig. 5 – Chenal torrentiel de Faucon a) quelques heures après la lave du 19 août 1996 (photographie de N. Masselot, publiée dans Sivan, 2000) ; b) photographie et coupe du dépôt LTF2.

Fig. 5 – The Faucon stream a) a few hours after the 1996 debris flow (photograph by N. Masselot, published in Sivan, 2000); b) photograph and section of the LTF2 deposit.



Ech.	Granulométrie (en %) (1)				Pétrographie (en %) (2)				
	Argiles	Limons	Sables	Graviers	Marnes noires	Flyschs	Calcaires	Calcaires gréseux	Calcaires bulleux
LTF1	22	9	29	40	46	36	8	8	2
LTF2	18	10	27	45	44	37	8	9	2
LTF3	17	6	33	44	41	38	9	9	3
LTF4	11	11	40	38	34	41	10	11	4
LTF5	3	5	32	60	4	61	12	16	7

(1) Sur des échantillons écrêtés à 20 mm  
(2) Sur la fraction graveleuse et caillouteuse de 2 à 100 mm

– le banc de lave *stricto sensu* se caractérise par une matrice fine, contenant des galets et des blocs de taille pluricentimétrique. Les éléments grossiers ne montrent pas de direction préférentielle ;

– la carapace, d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, contient peu de matériaux fins du fait du lessivage intense. Toutefois, elle peut être recouverte par endroits d'une pellicule de fines résultant du charriage terminal de la lave.

Les deux premiers dépôts de laves ont été échantillonnés dans la partie basse du bassin à proximité de l'apex (LTF2, 1270 m) et sur le cône de déjection (LTF1, 1200 m). Les dépôts LTF3 (1620 m) et LTF4 (1715 m) ont été prélevés dans la partie centrale du bassin. Le cinquième et dernier dépôt, perché à près de 2050 m, est situé dans la zone des nappes de charriage. Des analyses granulométriques et une identification pétrographique ont été menées sur les cinq dépôts de la lave torrentielle (tab. 2).

En faisant abstraction de l'échantillon LTF5, il est remarquable de constater la forte similitude dans la répartition des classes granulométriques de l'ensemble des échantillons. Le faciès logarithmique des courbes granulométriques (Rivière, 1977) caractérise les dépôts non triés (moraines, laves tor-

Tab. 2 – **Granulométrie et pétrographie des dépôts de laves torrentielles de 1996 dans le torrent de Faucon.**

Tab. 2 – **Grain-size distribution and petrography of the 1996 debris flow in the Faucon stream.**

rentielles) (fig. 6). Le type de lave va constituer un premier pas dans la recherche des zones sources, puisque l'appartenance d'une lave torrentielle à l'une des deux familles va nous renseigner sur les propriétés du matériau de départ. À l'aide des fuseaux granulométriques (échantillons écrêtés à 20 mm) établis par I. Bonnet-Staub (1998), on constate que tous les dépôts, sauf LTF5, appartiennent à la famille des laves cohésives (22 à 31 % de limons et d'argile). Le dépôt LTF5 correspond à une lave granulaire (8 % de limons et d'argiles). Les cinq courbes granulométriques décrivent une augmentation des fractions fines dans les dépôts de l'amont vers l'aval. Cet enrichissement est de l'ordre de 30 % à 50 mm (entre LTF1 et LTF5), le dépôt LTF5 étant très pauvre en fines. L'augmentation considérable de la fraction fine dans les dépôts suggère l'incorporation progressive d'éléments limono-argileux à la lave. H. Van Steijn (1988) relève aussi des variations spatiales dans la distribution

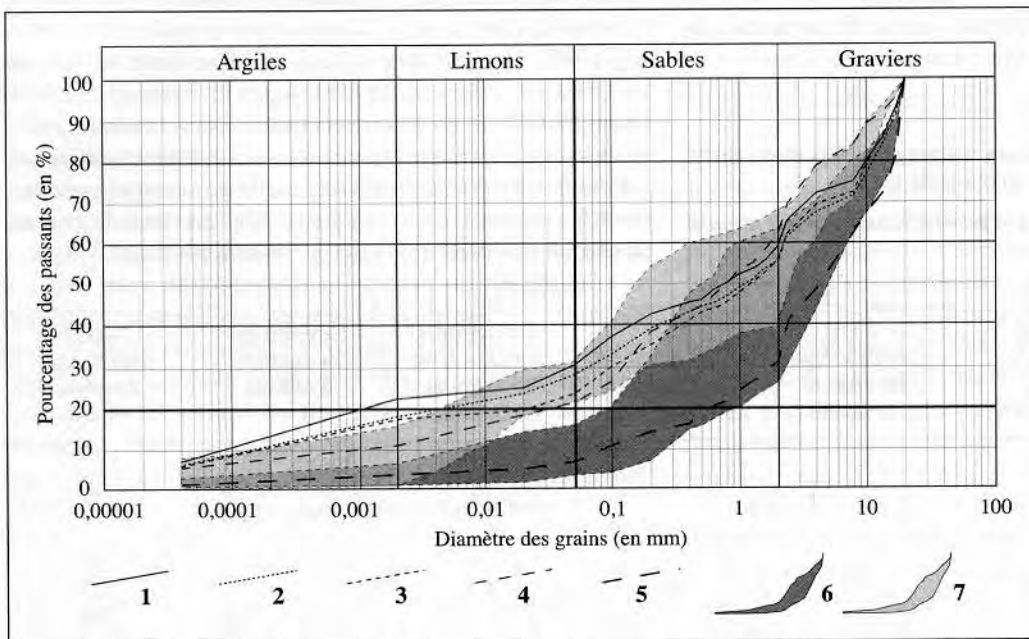


Fig. 6 – **Courbes granulométriques de cinq dépôts de la lave torrentielle du 19 août 1996.** 1 : LTF1 ; 2 : LTF 2 ; 3 : LTF3 ; 4 : LTF4 ; 5 : LTF5 ; 6 : fuseau des laves granulaires (Bonnet-Staub, 1998) ; 7 : Fuseau des laves cohésives (Bonnet-Staub, 1998).

Fig. 6 – **Grain-size distribution of the August 19th 1996 debris-flow deposits.** 1: LTF1; 2: LTF 2; 3: LTF3; 4: LTF4; 5: LTF5; 6: granular debris flow grain-size curves (Bonnet-Staub, 1998); 7: cohesive debris flow grain-size curves (Bonnet-Staub, 1998).

granulométrique de coulées de débris dans le bassin de Barcelonnette sans toutefois évoquer des processus de contribution.

La diversité pétrographique des fractions granulométriques grossières pour les cinq dépôts traduit la diversité lithologique du bassin versant du Faucon. Les flyschs à Helminthoïdes constituent la majeure partie de cette fraction grossière surtout pour le dépôt LTF5, qui, rappelons-le, est un dépôt granulaire. Les résultats expriment grossièrement la même tendance que précédemment, c'est-à-dire un enrichissement progressif des dépôts en marnes noires (4 % pour LTF5 à 46 % pour LTF1 de la fraction 10-20 mm).

## Estimation des paramètres d'écoulements de la lave torrentielle du 19 août 1996

Les paramètres d'écoulement des laves torrentielles (vitesses, débits, volumes) sont essentiels pour l'aménagement des torrents, notamment dans la construction des seuils, des barrages ou bien encore des ponts. Pour déterminer les volumes d'eau et de sédiments mobilisés par le torrent de Faucon lors de l'événement de 1996, les vitesses puis les débits maximaux ont été estimés.

En l'absence de mesures directes pendant l'événement, les vitesses peuvent être estimées à partir de formules empiriques. Parmi les formules d'estimation de la vitesse, celle proposée par Johnson a été appliquée (Johnson et Rodine, 1984), elle est simple et donne généralement des ordres de grandeur satisfaisants (Hungry *et al.*, 1984 ; Rickenmann, 1999). Elle est basée sur l'observation de la dissymétrie des bourrelets latéraux (surélévation) dans les courbures du chenal :

$$V = (\psi * \cos \delta * \tan \beta * g),$$

avec  $y$  le rayon de courbure (en m),  $d$  la pente locale du chenal (en °),  $b$  l'angle du dépôt par rapport à l'horizontale (en °) et  $g$  l'accélération de la pesanteur. Les calculs d'estimation de la vitesse ont été réalisés sur les bourrelets latéraux des dépôts LTF1 et LTF2 (fig. 4). La vitesse de la lave de 1996 est à peu près de 5 m.s<sup>-1</sup> (18 km/h), ce qui la place dans la fourchette des valeurs communément admises (entre 0,1 et

20 m.s<sup>-1</sup>). Néanmoins, les vitesses n'étant pas uniformes (différences entre le front et la queue d'une bouffée de lave, bouffées différentes à l'intérieur d'un même événement), l'estimation d'une vitesse moyenne comporte de nombreuses approximations (Meunier, 1991).

Le débit maximal de crue peut être appréhendé en multipliant la surface de la section mouillée (m<sup>2</sup>) par la vitesse de propagation (m/s). L'estimation de la surface de la section mouillée peut engendrer trois erreurs dans les résultats (Jakob *et al.*, 2000) : 1) les phénomènes d'érosion et de reprise survenus après l'événement peuvent changer considérablement la morphologie des sections mouillées, 2) la surface de la section mouillée aux sites de mesures des vitesses de propagation peut être erronée du fait des impacts de la vague de lave sur les courbures du chenal, 3) les hauteurs maximales de la lave peuvent être surestimées car les traces de boue sous les ponts peuvent correspondre à des projections et non à la hauteur réelle de la lave. Pour ces raisons, les sections mouillées ont été mesurées au niveau des sites de surélévation mais également une trentaine de mètres à l'amont et à l'aval de ces sites. Le débit maximal de crue obtenu par ces calculs est compris entre 96 m<sup>3</sup>/s et 106 m<sup>3</sup>/s (tab. 3) ; les différences entre les mesures de section mouillée (site de surélévation, amont et aval) sont globalement faibles.

Le volume total maximal de la lave torrentielle a été évalué en confrontant plusieurs méthodes empiriques : une méthode hydraulique (volume des sédiments et de l'eau), une méthode hydrologique (volume de l'eau uniquement) et une méthode géomorphologique (volumes des sédiments uniquement).

1) La méthode hydraulique prend en compte la durée totale de l'épisode de la lave torrentielle (deux heures et demi, soit 9000 secondes) et le débit maximal de crue (100 m<sup>3</sup>/s). En supposant un hydrogramme de forme triangulaire, on obtient un volume total de 450 000 m<sup>3</sup>. Le volume de sédiments peut être calculé à l'aide de la concentration volumique solide. Nous n'avons pas pu mesurer celle-ci pendant l'événement, mais les concentrations volumiques solides des laves torrentielles sont généralement comprises entre 0,45 et 0,8 (Cousot, 1996). On peut donc donner une fourchette du volume maximal de sédiments mobilisés par le Faucon, comprise entre 200 000 m<sup>3</sup> (pour une concentration volumique solide de 0,45) et 360 000 m<sup>3</sup> (pour une concentration volumique solide de 0,8). Néanmoins cette méthode surestime grandement les volumes, car en réalité le débit maximal de crue ne se produit que pendant un laps de temps très court.

Tab. 3 – Estimation de la vitesse de propagation et du débit maximal de la lave torrentielle du 19 août 1996.

Tab. 3 – Evaluation of velocity and peak discharge of the August 19th 1996 debris flow.

Ech.	$\psi$ (m) rayon de courbure	$\delta$ (°) pente locale du chenal torrentiel	$\beta$ (°) angle du dépôt par rapport à l'horizontale	Vitesse (m/s) calculée avec la formule de Johnson	Surface de la section mouillée (m <sup>2</sup> )	Débits maximaux estimés (m <sup>3</sup> /s)
LTF2 (1278 m)	6.8	11	21	5	Amont : 20.3 Pont 1 : 21.3 Aval : 20.9	102 106 105
LTF1 (1200 m)	7.3	13	19	4.9	Amont : 20.3 Pont 1 : 21.3 Aval : 20.9	96 102 99

Méthode utilisée	Volume des sédiments (m <sup>3</sup> )	Volume de l'eau (m <sup>3</sup> )	Concentration volumique solide	Volumes globaux (m <sup>3</sup> )
Hydraulique	200 000	250 000	0,45	450 000
	275 000	175 000	0,6	
	360 000	90 000	0,8	
Hydrologique	33 000	40 000	0,45	73 000
	60 000		0,6	100 000
	140 000		0,8	200 000
Géomorphologique	60 000	73 000	0,45	133 000
		40 000	0,6	100 000
		15 000	0,8	75 000

2) La méthode hydrologique consiste à évaluer la quantité d'eau tombée durant l'épisode pluvieux, puis à extrapoler le volume total de l'événement en utilisant la concentration volumique solide. En considérant que l'intensité de l'orage soit de 80 mm/h (valeurs maximales mesurées dans le bassin de Barcelonnette (Malét *et al.*, soumis)) pendant une demi-heure et que le coefficient de ruissellement soit de l'ordre de 50 %, les volumes d'eau libérés sur une surface de 200 ha (superficie estimée de la zone arrosée) serait de l'ordre de 40 000 m<sup>3</sup>. En reprenant les valeurs de concentrations volumiques solides utilisées précédemment, on obtient des volumes globaux compris entre 73 000 m<sup>3</sup> et 200 000 m<sup>3</sup>.

3) La méthode "géomorphologique" peut s'appliquer de deux manières par l'estimation, soit des volumes de sédiments érodés puis incorporés à la lave (érosion et/ou reprise du chenal, volumes arrachés dans la zone de déclenchement), soit du volume des dépôts dans le chenal et sur le cône de déjection. En l'absence d'informations fiables sur l'état du bassin et du chenal torrentiel avant l'événement, la première méthode n'a pu être utilisée. Les volumes des bourrelets de laves torrentielles dans le chenal ont été estimés à 10 000 m<sup>3</sup>. Le volume des sédiments formant le cône de la lave de 1996 (base de 250 m, hauteur de 125 m pour une épaisseur moyenne des dépôts de 3 m) représente approximativement 50 000 m<sup>3</sup>. Ce chiffre est à prendre avec précaution car le calcul ne prend pas en compte les sédiments qui ont été emportés par l'Ubaye pendant et après l'événement (les investigations ont débuté en Septembre 1998).

Les résultats des méthodes hydrologique et géomorphologique sont tout à fait comparables (tab. 4), puisqu'on obtient les mêmes valeurs pour une concentration volumique de 0,6. Il est également vraisemblable que le volume total de la lave torrentielle de 1996 soit plus proche des 100 000 m<sup>3</sup> obtenus avec ces deux méthodes que des 450 000 m<sup>3</sup> déterminés par la méthode hydraulique, notamment parce que le débit utilisé pour ce calcul est un débit de pic qui n'est certainement pas représentatif sur toute la durée de l'événement. Les volumes estimés par les trois méthodes peuvent être comparés aux résultats obtenus par les formules mises au point par Rickenmann (1999). Elles permettent d'estimer le volume maximal d'une lave torrentielle pour un bassin versant donné :

$$(1) V = (110 - 2.5Pc \%) * L,$$

$$(2) V = (17000 \text{ à } 27000) * Bv^{0.78},$$

avec V, l'ordre de grandeur du volume maximal de la lave en m<sup>3</sup>, Pc % la pente du cône de déjection en % et L, la lon-

Tab. 4 – Comparaison des différentes méthodes pour l'estimation des volumes écoulés durant la lave torrentielle de 1996.

Tab. 4 – Comparison between several methods for estimating debris flow magnitude during the 1996 debris flow event.

gueur en mètres du lit entre le point de départ potentiel et le point le plus bas dans la zone de dépôt ; Bv est la superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>. Pour le bassin versant de Faucon, on obtient avec la formule (1) des valeurs comprises entre 250 000 m<sup>3</sup> et 400 000 m<sup>3</sup>, ce qui paraît cohérent avec les valeurs déterminées par la méthode hydraulique. Les valeurs obtenues avec la formule (2) sont comprises entre 105 000 m<sup>3</sup> et 170 000 m<sup>3</sup>, valeurs proches des volumes estimés à partir des méthodes hydrologiques et géomorphologiques. Il faut néanmoins rester prudent car ces formules ont été établies à partir de 82 laves torrentielles survenues au cours de l'été 1987 dans les Alpes suisses. Or les facteurs environnementaux et les caractéristiques morphométriques des bassins étudiés sont différents de ceux qui sont observés sur le torrent de Faucon. Les nombreuses approximations liées à l'estimation des différents paramètres (le débit maximal, la surface de la section mouillée, etc.) conduit à rester prudent. Toutefois, cette lave aurait mobilisé près d'une centaine de milliers de m<sup>3</sup>, ce qui représente un événement considérable à l'échelle des Alpes françaises (tab. 5).

## Synthèse des résultats et interprétation

Les zones de déclenchement et de contribution ont été déterminées en comparant les courbes granulométriques des dépôts de laves torrentielles avec celles des formations superficielles issues de zones instables (fig. 7). Le matériau des formations superficielles a été également écrêté à 20 mm. Pour faciliter la comparaison, les fuseaux granulométriques des laves du Faucon et les courbes granulométriques des formations superficielles ont été placés sur un même graphique. Cette technique, utilisée par I. Bonnet-Staub (1998), est fondée sur le fait que les matériaux sont mobilisés dans leur intégralité par la lave torrentielle. Ils ne subissent que de légères modifications (les clastes de matériel fragile sont broyés), augmentant le pourcentage de matériaux fins par rapport au matériel originel. Toutefois les similitudes subsistent et permettent ainsi de donner un premier indice sur les zones de départ et de contribution.

Auteur	Lieu-Année	Volume total (m <sup>3</sup> )
Lahousse et Salvador (1998)	Le Bez, Hautes-Alpes, 1995	100 000
Meunier (1987)	St-Antoine, Savoie, 1987	60 000
SOGREAH (1993)	St-Bernard, Savoie, 1993	40 000
Valla <i>et al.</i> (1981)	La Ravoire, Bourg-St.-Maurice, 1981	300 000

Tab. 5 – Exemples de volumes écoulés pendant un épisode de lave torrentielle dans les Alpes françaises.

Tab. 5 – *Magnitudes of debris flows in the French Alps: a few examples.*

Les dépôts de laves torrentielles cohésives (de 22 à 30 % de limons et d'argiles pour LTF1 à LTF4) se rapprochent essentiellement des altérites de marnes noires (25 à 32 %), alors que le dépôt granulaire (7 %) présente une courbe proche des éboulis (3 à 6 %). La pétrographie confirme ces résultats (tab. 1 et tab. 2) en montrant clairement une augmentation des marnes noires et des moraines dans les dépôts de laves torrentielles au détriment des calcaires et des flyschs. Ainsi la lave torrentielle était composée au moment de son déclenchement de flyschs et de calcaires, puis elle s'est enrichie au fur et à mesure de marnes noires et de moraines. Les fuseaux granulométriques des matériaux d'origine (marnes noires et moraines) et de la lave torrentielle cohésive sont quasiment confondus, ce qui laisse penser que le volume de la lave granulaire à l'amont était très faible, sinon celui-ci aurait influencé la granulométrie du mélange final. Ceci est d'ailleurs confirmé par le volume de l'embâcle à l'amont qui ne dépassait guère quelques centaines de m<sup>3</sup>, alors que le volume de cette lave torrentielle est proche probablement de 100 000 m<sup>3</sup>. Dans ce cas précis, il

semble donc que les volumes de sédiments apportés par les zones contributives aient constitué l'essentiel des matériaux de la lave torrentielle du 19 août 1996.

## Conclusion

Les analyses morphologiques ont permis de caractériser la lave torrentielle survenue en 1996 dans le torrent de Faucon. La lave torrentielle se serait formée vers 2150 mètres à la suite d'une rupture d'embâcle. La lave a d'autant mieux progressé qu'elle n'a pas été efficacement freinée par les nombreux barrages de correction déjà endommagés ou détruits. Les comparaisons granulométriques et pétrographiques, entre cinq dépôts de laves non remaniés et les matériaux des zones sources potentielles, ont permis de caractériser la nature de la lave, qui aurait été granulaire dans la partie haute du chenal, puis serait devenue cohésive par suite de l'incorporation principalement des marnes noires. De tels événements sont probablement courants dans ce type de bassin où la géologie est contrastée. Le matériel libéré par les zones de contribution provient de l'érosion des berges et du lit du torrent (sapements, reprise des dépôts dans le chenal) et des mouvements de terrains affectant les versants contigus au chenal (ravinelements, glissements superficiels, éboulements, etc.). De nombreux points restent

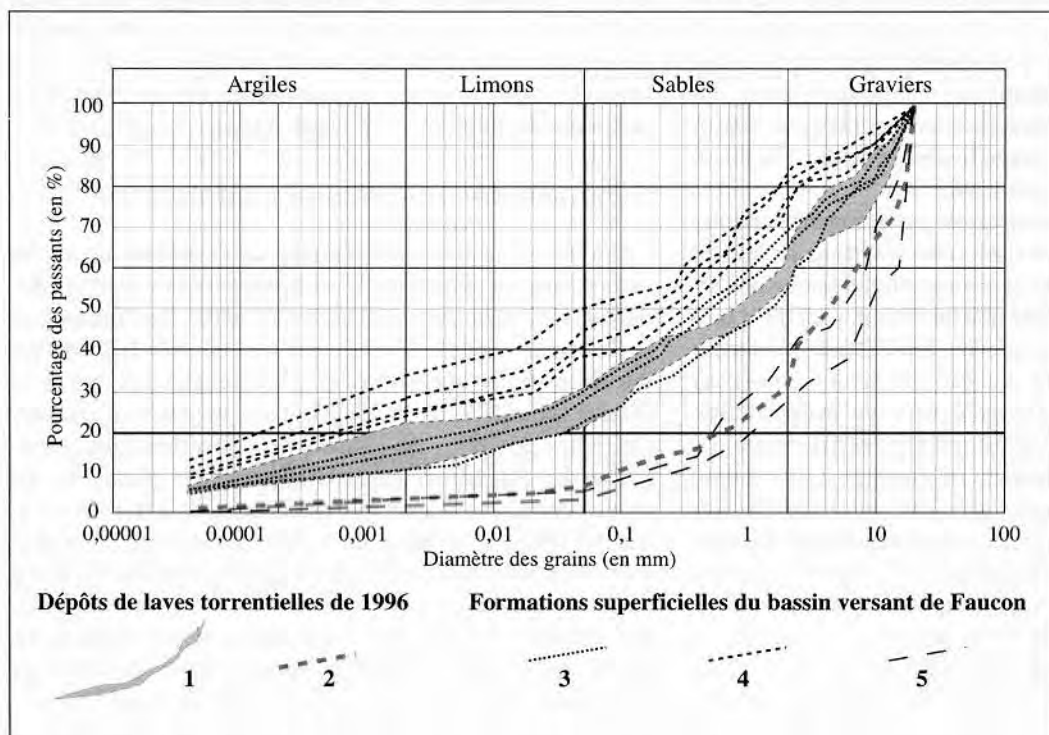


Fig. 7 – Comparisons entre les granulométries des dépôts de la lave torrentielle du 19 août 1996 et les formations superficielles du bassin versant de Faucon. 1 : fuseau des laves cohésives (LTF1 à LTF4) ; 2 : LTF5. 3 : marnes noires ; 4 : moraines ; 5 : flyschs.

Fig. 7 – Comparison between the grain-size distribution of the 1996 debris-flow deposits and several superficial deposits of the Faucon catchment. 1: grain-size curves of the Faucon cohesive debris flow (LTF1 to LTF4); 2: LTF5; 3: black marls; 4: morainic deposits; 5: flyschs.

cependant à éclaircir, en particulier, les relations existant entre l'occurrence d'une lave torrentielle et les volumes libérés par les zones de contribution. Pour appréhender les volumes mobilisables, une étude morphologique du chenal torrentiel doit être combinée avec des méthodes plus lourdes à mettre en œuvre, notamment dans des terrains accidentés : prospections géophysiques (électriques essentiellement) et investigations géotechniques (pénétrométrie, forages). La morphologie et les études sédimentologiques (granulométrie, pétrographie) fournissent une première indication sur le déroulement de l'évènement, mais elles restent néanmoins insuffisantes pour localiser précisément la (les) zone(s) source(s). Des analyses minéralogiques et morphoscopiques des dépôts de laves et des formations superficielles peuvent sensiblement améliorer cette précision.

### Remerciements

Cette recherche a été financée par l'Institut National des Sciences de l'Univers dans le cadre des contrats P.N.R.N. (Programme National de recherche sur les Risques Naturels) : 99-34MT et 2001-PR60 (ECLAT : Écoulement, initiation et Contribution des Laves Torrentielles dans les bassins marneux). Contribution INSU n° 303. Nous tenons à remercier les services de la R.T.M. de Barcelonnette pour leur aide précieuse. Les remarques pertinentes des correcteurs anonymes ont contribué à l'amélioration de la version initiale de l'article, nous les en remercions vivement.

### Références

- Berti M., Genevois R., Simoni A., Rosella Tecca P. (1999)** – Field observations of a debris-flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, 29, 265-274.
- Bonnet-Staub I. (1998)** – Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises, contribution à la maîtrise du risque. Thèse de doctorat, École des mines de Paris, 237 p.
- Cojean R., Bonnet-Staub I. (1998)** – Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. In Proc. of 8th International Congress of International Association for Engineering Geology and the Environment. Balkema Rotterdam, 2075-2082.
- Costa J.E. (1984)** – Physical geomorphology of debris-flow. In Costa J.E. and Fleisher P.J. (Eds.) *Developments and Applications of Geomorphology*, 268-317.
- Coussot P. (1993)** – Rhéologie des boues et laves torrentielles. Étude de dispersions et suspensions concentrées. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Laboratoire de rhéologie, C.E.M.A.G.R.E.F., série Études montagnées, 416 p.
- Coussot P. (1994)** – Rhéologie des laves torrentielles. *La Houille Blanche*, 49 (3), 32-37.
- Coussot P. (1996)** – Les laves torrentielles, connaissances de base à l'usage de l'ingénieur. C.E.M.A.G.R.E.F., coll. Montagne, 178 p.
- Coussot P., Meunier, M. (1996)** – Recognition, classification and mechanical description of debris-flows. *Earth Science Reviews*, 40 (3-4), 209-227.
- Crosta G., Marchetti M. (1990)** – Morphological classification of debris-flow processes in South-Central Alps (Italy). In Proc. of 6th International Congress of Association of Engineering Geology. Rotterdam, 1565-1572.
- Descroix L. (1994)** – L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud. Thèse de doctorat, Université Lumière (Lyon 2), 260 p.
- Hung O., Morgan G.C., Kellerhals R. (1984)** – Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Can. Geotech. J.*, 21, 663-677.
- Iverson R.M., Reid M.E., Lahusen R.G. (1997)** – Debris-flow mobilization from landslides. *Earth Planetary Science*, 25, 85-138.
- Iverson R.M. (1997)** – The physics of debris-flows. *Reviews of Geophysics*, 35, 245-296.
- Jakob M., Hung O., Thomson B. (1997)** – Two debris-flows with anomalously high magnitude. In Proc of 1st International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment. San Francisco, 382-394.
- Jakob M., Anderson D., Fuller T., Hung O., Ayotte D. (2000)** – An unusually large debris-flow at Hummingbird Creek, Mara Lake, British Columbia. *Can. Geotech. J.*, 37, 1109-1125.
- Johnson K.A., Rodine J.R. (1984)** – Debris-flow. In Brundsen D., Prior D.B. (Eds.) *Slope instability*. John Wiley and sons, Chichester, 257-361.
- Johnson K.A., Sitar N. (1990)** – Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Can. Geotech. J.*, 27, 789-801.
- Klubertantz G. (1999)** – Zur hydromechanischen kopplung in dreiphasigen porösen medien, modellbildung und anwendung auf die auslösung von murgängen. Thèse de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 210 p.
- Lahousse P., Salvador P.G. (1998)** – La crue torrentielle du Bez (Hautes-Alpes, Briançonnais), 24 Juillet 1995. *Geodinamica Acta*, 11 (4), 163-170.
- Laigle D., Coussot P. (1994)** – Modélisation numérique des écoulements de laves torrentielles. *La Houille Blanche*, 49 (3), 50-56.
- Luo Y., Chen C., Zhou P. (2000)** – Numerical Simulation for process of debris-flow and effectiveness - evaluation methods of disaster-prevention. In Proc of 8th International Symposium on Landslides. Cardiff, 961-968.
- Malet J.-P., Auzet A.-V., Maquaire O., Ambroise B., Descroix L., Estèves M., Vandervaere J.-P., et Truchet E.** – Investigating the influence of soil surface features on infiltration on marly hillslopes. Application to callovo-oxfordian black marls slopes in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 23 p. (soumis).
- Martinet G. (1993)** – Contribution à la modélisation numérique des avalanches de neige dense et des laves torrentielles. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, Laboratoire de Rhéologie, 274 p.
- Massimo A. (2000)** – On debris-flow front evolution along a torrent. *Phys. Chem. Earth (B)*, 25, 733-740.
- Meunier M. (1987)** – La lave torrentielle du 24-8-87 à Modane. Note d'Information Technique ONF-RTM, C.E.M.A.G.R.E.F., 20 p.
- Meunier M. (1991)** – Éléments d'hydraulique torrentielle. C.E.M.A.G.R.E.F., coll. Montagne, 278 p.
- Meunier M. (1994)** – Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *La Houille Blanche*, 49 (3), 25-31.
- Pierson T.C., Janda R.J., Thouret J.C., Borrero C.A. (1990)** – Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, glow and deposition of lahars. *J. of Volcanol. and Geotherm Res*, 41, 17-66.

- Remaître A. (2000)** – *Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux : applications au bassin de Barcelonnette*. Mémoire de D.E.A., Université Louis Pasteur, Strasbourg, 153 p.
- Rickenmann D. (1999)** – Empirical Relationships for Debris-Flows. *Natural Hazards*, 19, 47-77.
- Rivière A. (1977)** – *Méthodes granulométriques, techniques et interprétations*. Masson, 175 p.
- Sivan O. (2000)** – *Torrents de l'Ubaye*. Sabença de la Valeia ("Connaissance de la Vallée"), 46 p.
- SOGREAH Ingénierie (1983)** – *Autoroute A43 – Franchissement du torrent du St-Bernard*. Note préliminaire. SFTRF-HYDRA-TEC.
- Sorgi-de-Gennaro L. (1999)** – *Contribution à l'étude des facteurs climatiques, géologiques et géotechniques contrôlant la génération de laves torrentielles. Application au secteur de Saint-Martin-de-la-Porte (Savoie, France)*. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, 172 p.
- Takahashi T. (1991)** – *Debris-flow*. I.A.H.S. publications, Balkema, Rotterdam, 165 p.
- Tognacca C., Bezzola G.R. (1997)** – Debris-flow initiation by channel-bed failure. *In Proc of 1st International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. San Francisco, 44-53.
- Valla F., Perinet F., van Effenterre C. (1981)** – *La lave torrentielle de la Ravoire de Bourg-Saint-Maurice, Avril 1981*. (video-tape), C.E.M.A.G.R.E.F., Grenoble.
- Van Steijn H. (1988)** – Étude de "Debris-Flow" à partir de quelques exemples pris dans les Alpes françaises. *Travaux de l'institut de Géographie de Reims*, 69/70/71/72, 55-67.
- Wieczorek G.F., Mandrone G., De Cola L. (1997)** – Influence of hillslope shape on debris-flow initiation. *In Proc of 1st International Conference on Debris-flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. San Francisco, 21-31.

Article reçu le 15 février 2001, accepté le 29 décembre 2001