Document generated on 10/12/2024 3:50 a.m.

Géographie physique et Quaternaire

Le rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris alpines du massif du Dévoluy, Hautes-Alpes (France)

Active role of the apical cone in the triggering off of alpine Debris flows in the Massif du Dévoluy, Hautes-Alpes, France

Die Rolle des Kegelscheitels bei der Auslösung alpiner Schuttflüsse im Massif du Dévoluy, Hautes Alpes (Frankreich)

Pierre Pech and Vincent Jomelli

Volume 55, Number 1, 2001

URI: https://id.erudit.org/iderudit/005661ar
DOI: https://doi.org/10.7202/005661ar

See table of contents

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)
1492-143X (digital)

Explore this journal

Cite this article

Pech, P. & Jomelli, V. (2001). Le rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris alpines du massif du Dévoluy, Hautes-Alpes (France). *Géographie physique et Quaternaire*, *55*(1), 47–61. https://doi.org/10.7202/005661ar

Article abstract

Until now, many studies concerned the patterns of setting off and triggering off alpine debris flows. In particular, it was shown that the most frequent alpine flows occur in relationship with heavy rainfalls. We studied a population of 68 alpine debris flows in the Massif du Dévoluy, situated in French Alps. First, we collected the alpine debris flows events, trying to date with aerial photographs (between 1948 and 1997) and with local records. Then we estimated the statistical relationships between these events and the meteorological data, in particular the heavy rainfalls sequences (> 50 mm/24 h and > 100 mm/24 h) but the results show that the data do not seem to correlate. In several cases, severe rainfalls did not trigger off debris flows, and contrary to the most frequently observed results, debris flows setting off does not coincide systematically with heavy rainy sequences. We paid attention to the supplies of materials, near the rock wall. In order to understand the circumstances of debris flows setting off, we studied the shape of the section between the rock wall and the talus deposit. There is a temporary deposit that we call apical cone. We present here the morphometric and sedimentologic properties of the apical cone which is easily recognisable: a medium slope angle value around 40°, a coarse composition and an anarchic disposition of the block deposit. We suggest that, in many cases, the alpine debris flows movements are triggered by the accumulation of the apical cone and that the rythms of accretion control partly this triggering off.

Tous droits réservés © Les Presses de l'Université de Montréal,2001

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

érudit

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

Géographie physique et Quaternaire, 2001, vol. 55, n° 1, p. 47-61, 15 fig., 4 tabl.

LE RÔLE DU CÔNE APICAL DANS LE DÉCLENCHEMENT DES COULÉES DE DÉBRIS ALPINES DU MASSIF DU DÉVOLUY, HAUTES-ALPES (FRANCE)

Pierre PECH*, Vincent JOMELLI, Université de Paris 1, 191, rue Saint-Jacques, 75005, Paris, France.Laboratoire de Géographie physique CNRS UMR 8591, 1, place Aristide Briand, 92195 Meudon Cedex, France.

RÉSUMÉ Si de nombreuses recherches ont porté sur les conditions de déclenchement des coulées de débris alpines, en particulier les précipitations de forte intensité, et sur les modalités de leur écoulement, plus rares ont été les travaux portant sur les conditions d'approvisionnement en matériaux. Le but de ce travail est de présenter les résultats d'observations et de mesures portant sur une population de 68 modelés de coulées de débris, étudiés autour du plateau de Bure, situé à 2 600 m d'altitude, un secteur du massif du Dévoluy dans les Alpes françaises. On recense chronologiquement tous les modelés (entre 1948 et 1997), on les cartographie et on recherche dans les archives météorologiques les circonstances météorologiques de chaque cas de coulée. Les résultats correspondent à ceux des autres auteurs, mais les relations entre les données météorologiques et le déclenchement des coulées ne sont pas statistiquement significatives. Des observations complémentaires, portant sur les caractères morphosédimentaires de la zone d'alimentation et de la zone amont des modelés de coulées de débris, permettent de mettre en évidence une topographie originale appelée cône apical, situé à la limite entre la paroi et le dépôt de pente, secteur où s'accumule le matériel sédimentaire qui est mobilisé par la coulée de débris. Sans cette accumulation préalable et même si les conditions météorologiques sont favorables, la coulée de débris ne peut se produire. Inversement, certaines coulées peuvent se déclencher même si les conditions météorologiques ne sont pas exceptionnelles lorsque le stock sédimentaire est abondant. Le déclenchement est en grande partie commandé par les rythmes d'accrétion.

ABSTRACT *Active role of the apical cone in the triggering off of alpine Debris flows in the Massif du Dévoluy, Hautes-Alpes, France*. Until now, many studies concerned the patterns of setting off and triggering off alpine debris flows. In particular, it was shown that the most frequent alpine flows occur in relationship with heavy rainfalls. We studied a population of 68 alpine debris flows in the Massif du Dévoluy, situated in French Alps. First, we collected the alpine debris flows events, trying to date with aerial photographs (between 1948 and 1997) and with local records. Then we estimated the statistical relationships between these events and the meteorological data, in particular the heavy rainfalls sequences (> 50 mm/24 h and > 100 mm/24 h) but the results show that the data do not seem to correlate. In several cases, severe rainfalls did not trigger off debris flows, and contrary to the most frequently observed results, debris flows setting off does not coincide systematically with heavy rainy sequences. We paid attention to the supplies of materials, near the rock wall. In order to understand the circumstances of debris flows setting off, we studied the shape of the section between the rock wall and the talus deposit. There is a temporary deposit that we call apical cone. We present here the morphometric and sedimentologic properties of the apical cone which is easily recognisable: a medium slope angle value around 40°, a coarse composition and an anarchic disposition of the block deposit. We suggest that, in many cases, the alpine debris flows movements are triggered by the accumulation of the apical cone and that the rythms of accretion control partly this triggering off.

ZUSAMMENFASSUNG *Die Rolle des Kegelscheitels bei der Auslösung alpiner Schuttflüsse im Massif du Dévoluy, Hautes Alpes (Frankreich).* Zahlreiche Forschungen haben sich mit den Auslösungsbedingungen alpiner Schuttflüsse und ihrer Strömungsform beschäftigt, vor allem in Verbindung mit starkem Regenfall ; seltener sind die Arbeiten, welche die Materialansammlungsbedingungen untersuchen. Diese Arbeit setzt sich zum Ziel die Ergebnisse von Beobachtungen und Messungen an insgesamt 68 Reliefs von Schuttflüssen auf dem Plateau von Bure zu präsentieren, einem Abschnitt des Massif du Dévoluy in den französischen Alpen in 2600 m Höhe. Alle Reliefs (zwischen 1948 und 1997) werden chronologisch aufgelistet und kartographiert und für jeden Schuttfluss werden die Wetterbedingungen in den meteorologischen Archiven gesucht. Die Ergebnisse stimmen mit denen der anderen Autoren überein, aber die Beziehungen zwischen den meteorologischen Daten und der Auslösung der Flüsse sind statistisch nicht signifikant. Zusätzliche Beobachtungen, bezüglich der morphosedimentären Charakteristika des Nährgebiets und des Gebiets oberhalb der Schuttflussreliefs ermöglichen die Hervorhebung einer eigentümlichen Topographie, genannt Kegelscheitel. Dieser befindet sich an der Grenze zwischen der Felswand und der Böschungablagerung, wo sich das Sedimentmaterial anlagert, das durch den Schuttfluss mobilisiert wird. Ohne diese vorhergehende Akkumulation kann der Schuttfluss nicht stattfinden, selbst wenn die meteorologischen Bedingungen günstig sind. Dagegen können bestimmte Schuttflüsse ausgelöst werden, selbst wenn die meteorologischen Bedingungen nicht außergewöhnlich sind, wenn die Sedimentansammlung reichhaltig ist. Die Auslösung wird zum großen Teil durch die Anlagerungsrhythmen bestimmt.

Manuscrit reçu le 7 décembre 1999 ; manuscrit révisé accepté le 5 avril 2001
* Adresse électronique : flapech@club-internet.fr

INTRODUCTION

Dans les régions de montagne, certains versants pentus sont souvent atteints par des processus appelés flots de débris alpins ou coulées de débris (Chamley, 1977 ; Bertran et Texier, 1994 ; Hétu *et al.*, 1995), *alpine debris flows* en anglais ou *hillslope debris flows* (Innes, 1983a). Ces flots de débris alpins ou coulées de débris de versants constituent des modelés associant, en contrebas d'une paroi rocheuse (Krzemien, 1988), un chenal bordé par des levées et, à l'aval, un dépôt résultant de l'accumulation des débris sous forme de langue ou d'éventail (fig. 1).

Le terme général de *debris flow* rassemble des formes variées de mouvements de masse (Meunier, 1991). On distingue usuellement les coulées canalisées, qui surviennent dans des chenaux torrentiels (Coussot, 1993), appelées laves torrentielles, des coulées de débris superficielles qui ne touchent que les versants (Loye-Pilot, 1984). Seules ces dernières, particulièrement actives en haute montagne dans les étages supraforestiers, sont étudiées ici. Pour de nombreux auteurs (Rapp et Nyberg, 1981 ; Innes, 1983a ; Johnson et Rodine, 1984 ; Harris et Gustafson, 1993 ; Kotarba, 1997 ; Blijenberg, 1998), les levées ainsi que le lobe de dépôt constituent le trait morphologique caractéristique des coulées de débris. Les déplacements s'effectuent par saccades ou par bouffées successives selon une vitesse de l'ordre du mètre/seconde. Ces mouvements de terrain limités à quelques centaines de mètres de distance sur une largeur de quelques mètres peuvent mobiliser des matériaux de taille variable, des blocs, des débris fins et de la matrice. Les volumes déplacés, de l'ordre de quelques dizaines de mètres cubes affectent un matériel généralement hétérogène (Gerrard, 1990) et font intervenir la mobilisation par glissement gravitaire plus ou moins assisté par l'eau ou par liquéfaction (Takashi, 1980 ; Blijenberg, 1998). Le mouvement des débris sur la pente correspond à un écoulement plus ou moins visqueux. Les dynamiques variables des déplacements ont été étudiées au moyen d'analyses sédimentologiques et de modèles physiques (Johnson et Rahn, 1970 ; Enos, 1977 ; Van Steijn *et al.*, 1988 ; Nieuwenhuijzen et Van Steijn, 1990 ; Takahashi *et al.*, 1992 ; Zhicheng et Yuzhang, 1992 ; Bertran et Texier, 1994 ; Hunt, 1994 ; Iverson, 1997). La pente, l'instabilité des matériaux déplacés et la mise sous pression de l'eau dans ces matériaux sont les facteurs principaux du déplacement.

Les caractéristiques morphologiques et sédimentologiques du dépôt sont aujourd'hui bien connues grâce à de nombreuses observations de terrain (Nieuwenhuijzen et Van Steijn, 1990 ; Bertran et Texier, 1994 ; Blijenberg, 1998) et à la réalisation de modèles réduits (Van Steijn et Coutard, 1989). Ces caractéristiques ont été mises en relation avec les processus grâce à des modèles physiques (Johnson et Rahn, 1970 ; Takahashi, 1978, 1980, 1981a, 1981b ; Takahashi *et al.*, 1981, 1992 ; Johnson et Rodine, 1984 ; Coussot, 1993 ; Bertran et Texier, 1994 ; Iverson, 1997 ; Blijenberg, 1998).

Les coulées de débris élaborent des modelés suffisamment durables dans les différents reliefs de ces versants de haute montagne pour que les avalanches chargées et les chutes de pierres ne permettent pas leur estompage dans la topographie après plusieurs années (Francou, 1988 ; Luckman, 1992 ; Pech, 1993 ; Jomelli, 1997). Le repérage sur le terrain est donc aisé. Pour dater ces modelés, lorsqu'on ne dispose pas d'archives ou de datations historiques, on utilise les datations au radiocarbone pour le long terme (Innes, 1983c ; Mlakar, 1992 ; Kotarba, 1995 ; Blikra et Nemec, 1998), la lichénométrie (Innes, 1983b ; André, 1990, 1995 ; Jonasson *et al.*, 1991 ; Bull *et al.*, 1995 ; Kotarba, 1997 ; Blijenberg, 1998) ou la dendrochronologie (Strunk, 1989, 1992 ; Hüsken, 1994 ; Blijenberg, 1998). La reconstitution de la chronologie des coulées de débris permet d'en évaluer la fréquence.

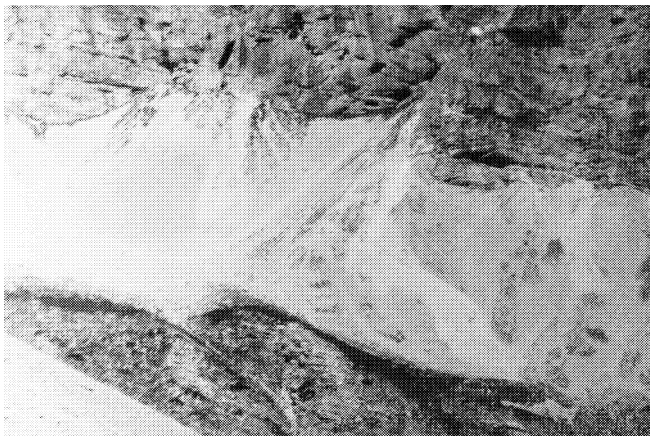


FIGURE 1. Coulées de débris alpines dans la combe Ratin (Dévoluy, Alpes françaises).

Alpine debris flows in the Combe Ratin (Dévoluy, French Alps).

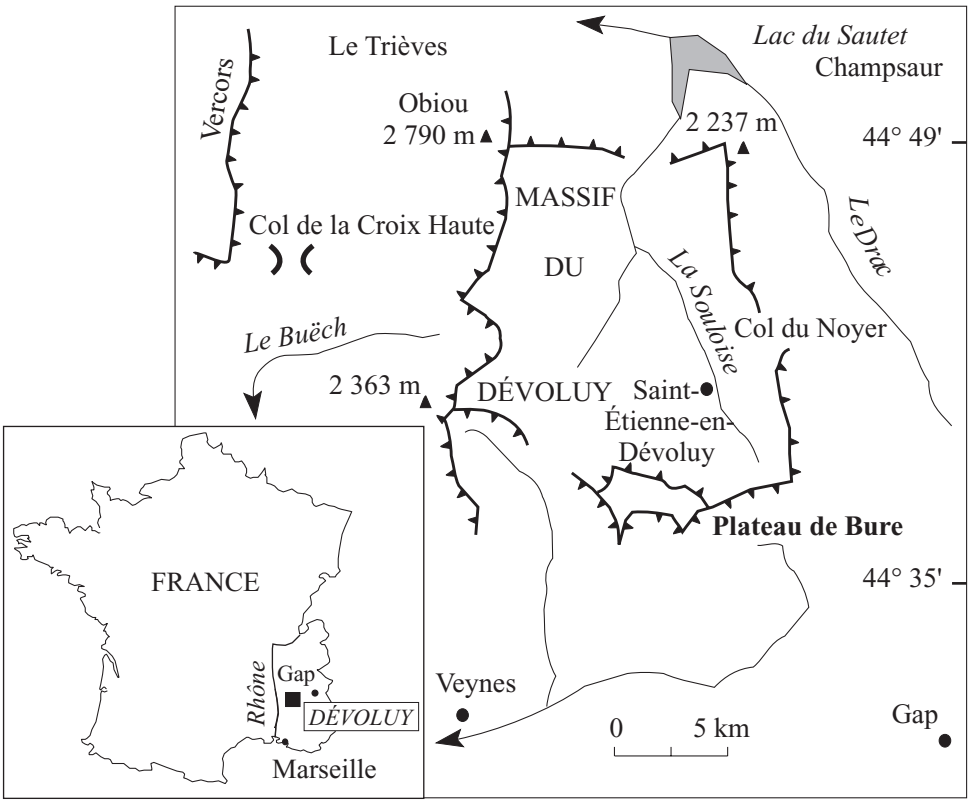
Beaucoup d'études ont été consacrées aux facteurs du déclenchement des coulées de débris. La plupart des auteurs s'accordent pour penser que les précipitations de forte intensité ou de longue durée constituent un facteur déterminant dans le déclenchement des coulées de débris (Caine, 1980 ; Rapp and Nyberg, 1981 ; Innes, 1983a ; Johnson et Rodine, 1984 ; Addison, 1987 ; André, 1990, 1995 ; Van Asch et Van Steijn, 1991 ; Luckman, 1992 ; Van Steijn, 1996 ; Iverson, 1997 ; Blijenberg, 1998). D'autres auteurs évoquent le rôle que peut jouer l'approvisionnement en matériel à partir de la partie apicale du versant (Statham, 1976 ; Johnson et Rodine, 1984 ; Kotarba et Strömquist, 1984 ; Francou, 1988 ; Bertran et Texier, 1994 ; Van Steijn, 1996), sans en effectuer une analyse systématique.

L'objectif de notre travail consiste à démontrer le rôle relatif de ces deux facteurs dans le déclenchement des coulées, en présentant des résultats concernant l'étude de la chronologie des coulées de débris, leur mise en relation avec les événements météorologiques de forte intensité et le rôle que joue le secteur amont fournissant des débris, que l'on se propose d'appeler ici cône apical : il s'agit d'une accumulation de blocs disposés en position très instable à la fois sur l'apex du versant et dans les fissures qui entaillent la paroi.

PRÉSENTATION DE LA RÉGION ÉTUDIÉE

Le plateau de Bure, partie méridionale du massif du Dévoluy, dans les Alpes françaises (fig. 2), a été choisi parce qu'il

FIGURE 2. Carte de localisation.
Location map.



présente un grand nombre de modelés de coulées de débris alpines. Le Dévoluy est un massif sédimentaire formé de roches calcaires compactes du Sénonien, épaisses de plus de 400 m dans certains secteurs, disposées en gros bancs plissés ou sub-horizontaux. Ces dalles calcaires donnent des reliefs structuraux de crêts monoclinaux formant des parois rocheuses qui dominent des versants d'éboulis, plus ou moins actifs, parcourus localement par les coulées de débris de versant. Situé à l'extrémité sud du massif du Dévoluy, le plateau de Bure forme une table de 4 km^2 disposée à plus de 2 500 m d'altitude, bordée par des parois rocheuses et des versants perturbés par de nombreuses coulées de débris. Le plateau de Bure et les versants qui le bordent font l'objet d'un suivi stationnel depuis 1989 (Pech, 1996). Il est échancré de vallons, appelés combes (fig. 3). Les deux versants, qui se font face dans chacune de ces combes, sont constitués de parois rocheuses dominant des dépôts de pente qui présentent une physionomie comparable à de grands tabliers d'éboulis. Les processus dominants sont les chutes de pierres, les avalanches et les coulées de débris (Pech, 1993). Le milieu climatique est périglaciaire (Pech, 1996). Les températures moyennes sont froides avec un isotherme annuel moyen de 0 °C aux alentours de 2 500 m d'altitude. L'altitude et les crêtes favorisent une augmentation de l'humidité, car les totaux pluviométriques atteignent 2 000 mm/an avec un coefficient nivométrique d'environ 70 % (Pech, 1993, 1996). Les coulées de débris sont actives entre 2 600 m, altitude maximale de la partie apicale des talus parcourus par les coulées de débris, et 1 400 m, altitude correspondant à la base de ces mêmes versants.

MÉTHODOLOGIE

LA DÉMARCHE

L'objectif de l'étude a consisté à effectuer l'analyse la plus exhaustive possible de 68 coulées de débris du plateau de Bure, afin de comprendre l'origine de leur déclenchement. Nous avons donc successivement cherché à repérer géographiquement puis chronologiquement les coulées, puis à les mettre en relation avec les phénomènes météorologiques qui existaient lors de leur déclenchement. Ensuite, nous avons cherché à mettre en évidence le rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées. Pour ce faire, nous avons étudié les caractéristiques morphosédimentaires des coulées de débris et comparé ces profils avec ceux, bien connus, des éboulis gravitaires (Francou, 1988, 1991 ; Francou et Manté, 1990).

RENCENSEMENT ET CARTOGRAPHIE DES COULÉES DE DÉBRIS

Dans un premier temps, le travail a consisté à recenser et à cartographier (fig. 3 et 4A) les coulées de débris autour du plateau de Bure. L'observation directe (localisation géographique) est effectuée depuis 1991. Les coulées plus anciennes ont été repérées à l'aide de documents d'archives locales (Office National des Forêts — ONF, Ponts et Chaussées, Restauration des Terrains en Montagne — RTM, Archives Départementales) et grâce à dix missions de prises de photographies aériennes IGN : 1948, 1952, 1956, 1971, 1978, 1980, 1982, 1989, 1993 et 1997. Dans un deuxième

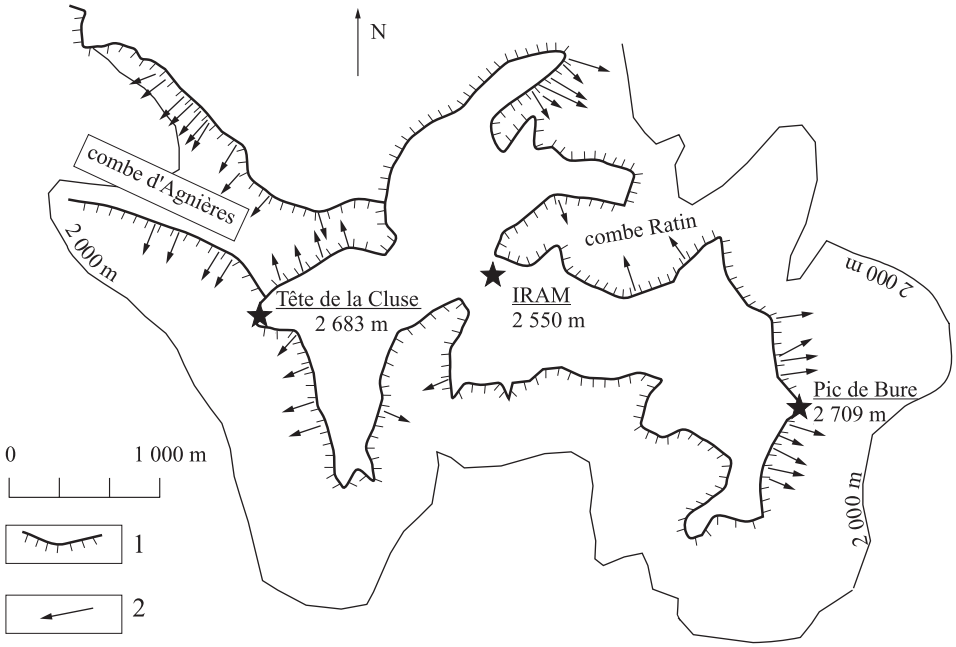


FIGURE 3. Le plateau de Bure, rebord sud du massif du Dévoluy et localisation des coulées de débris de versants (entre 1948 et 1997) : 1) rebord du plateau calcaire ; 2) coulées de débris.

Plateau de Bure, southern part of the Massif du Dévoluy and the location of the alpine debris flows (from 1948 to 1997): 1) calcareous edge of the plateau de Bure; 2) debris flows.

temps, nous avons cherché à dater ces coulées. Les mesures concernent donc la période de 1948 à 1997 : 68 coulées ont été recensées, à partir de 1948. Les plus anciennes ou les coulées impossibles à dater n'ont pas été considérées. Des coulées de débris ont pu se déclencher dans l'intervalle compris entre deux photographies aériennes et, dans ce cas, les documents d'archives ou les témoignages locaux ont permis de préciser la date de certains événements. La période 1990-1997 a fait l'objet d'un suivi direct ; d'une année sur l'autre, les versants bordant le plateau de Bure ont été cartographiés dans le but de suivre les modifications de leur physionomie. Il a même été possible de dater deux générations de coulées superposées : trois coulées se sont déclenchées après 1991 dans trois sites différents, là où une première génération avait été repérée préalablement grâce aux photographies aériennes. Au total, une véritable chronologie des coulées de débris a pu être reconstituée, grâce aux photographies aériennes, pour l'ensemble du plateau de Bure (fig. 4A) : de 1948 (= année 0 de la chronologie) à 1997.

LES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Le service de la météorologie nationale française (MétéoFrance) publie des séries de données pour les stations de Gap et Saint-Étienne en Dévoluy. On peut donc connaître les totaux annuels (fig. 4B), mensuels et quotidiens des précipitations. Les données météorologiques auxquelles nous avons eu accès ne permettent malheureusement pas de préciser les intensités horaires. La précision ne va pas au delà de 24 heures, et ce sont donc les intensités par 24 heures qui ont été étudiées dans la série chronologique allant de 1948 à 1997 et non pas les intensités horaires, sauf quelques séquences pluvieuses plus récentes, en particulier celle de 1993-1994, pour laquelle nous avons disposé de données plus détaillées aimablement fournies par les stations météorologiques locales (Veynes et Saint-Étienne en Dévoluy). Ont été relevées, pour ce travail, toutes les précipitations quotidiennes supérieures à 50 (fig. 4C) et 100 mm (fig. 4D) par 24 heures, car ces valeurs correspondent à celles qui sont généralement évoquées pour le déclenchement des coulées de débris (Caine, 1980 ; Rapp et Nyberg, 1981 ; Innes, 1983a ; Johnson and Rodine, 1984 ; Addison, 1987 ; André, 1990, 1995 ; Van Asch et Van Steijn, 1991 ; Luckman, 1992 ; Iverson, 1997 ; Blijenberg, 1998). Toutefois, la plupart des auteurs évoquent aussi des intensités ponctuelles parfois de quelques minutes, ramenées à des intensités horaires équivalant à 50 mm et 100 mm/h et nous n'avons évidemment pas pu tenir compte de ces situations météorologiques. Nous avons dû nous limiter à l'étude des totaux quotidiens supérieurs à 50 et 100 mm, mais en haute montagne, dans les Alpes soumises aux flux d'ouest ou à l'advection d'air en provenance de la Méditerranée, les totaux quotidiens correspondant à des précipitations de forte intensité et de faible fréquence atteignent toujours des valeurs importantes, largement supérieures à 50 mm/ 24 h (Francou, 1988 ; Leroux, 1996). L'étude systématique des journées à précipitations abondantes (> 50 mm/24 h : fig. 4C et > 100 mm/24h : fig. 4D) a été complétée par l'examen des bulletins météorologiques, publiés par MétéoFrance, qui ont permis de définir les trajectoires des flux atmosphériques. Les résultats de l'analyse des bulletins météorologiques ont été vérifiés, sur le terrain, par le dépouillement des archives (archives départementales ou de l'ONF). Cette étude a permis de construire le diagramme de la trajectoire des flux de la figure 5 afin de voir s'il y a une relation entre la localisation des coulées de débris et une trajectoire préférentielle de ces flux. Les données météorologiques ont été mises en relation avec la courbe chronologique des coulées de débris (fig. 4) ainsi qu'avec la carte de leur répartition (fig. 5).

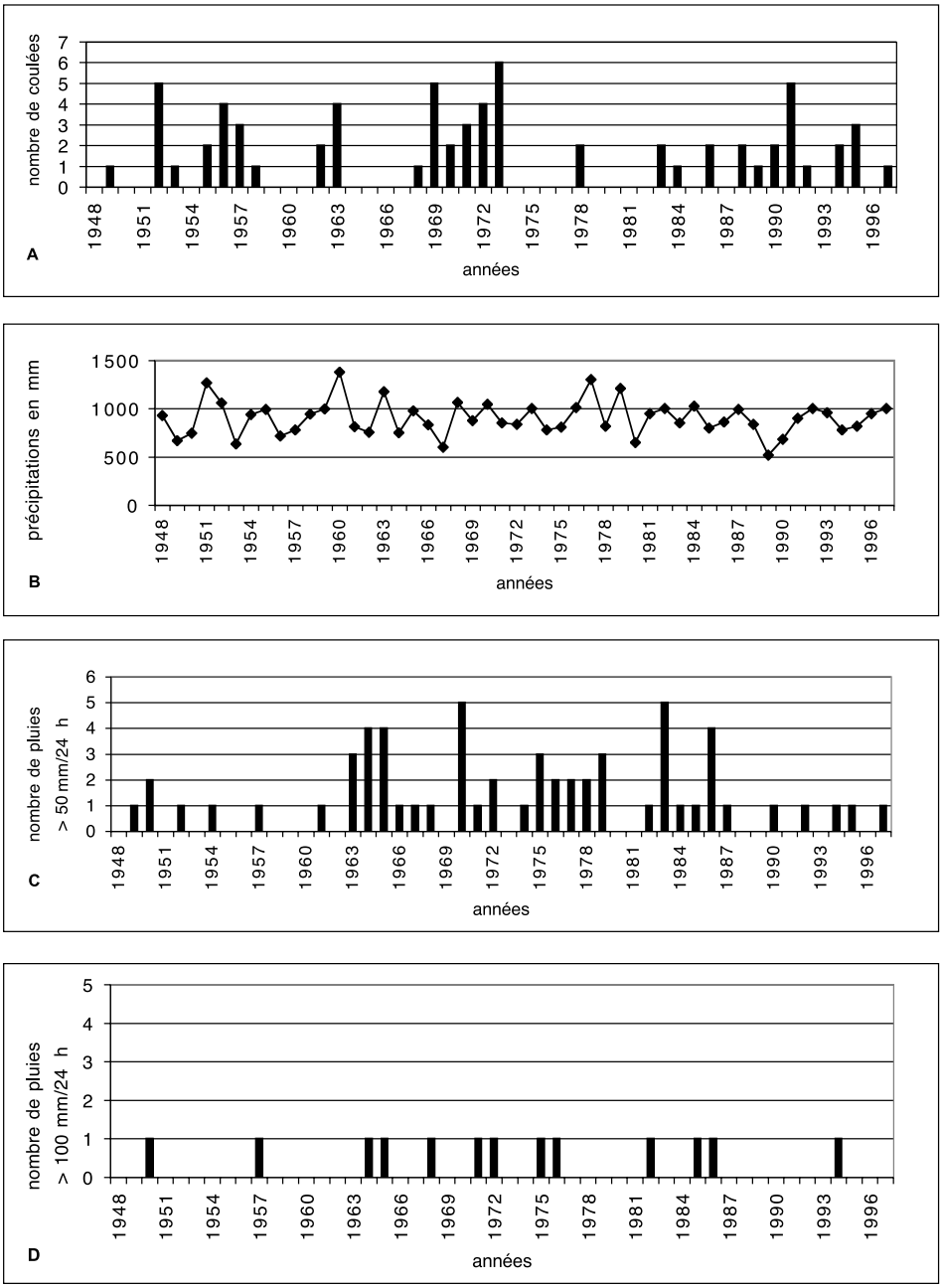


FIGURE 4. Coulées de débris alpines et précipitations : A) répartition chronologique des coulées de débris entre 1948 et 1997 ; B) précipitations annuelles entre 1954 et 1997 ; C) épisodes de précipitations supérieures à 50 mm/ 24 h ; D) épisodes de précipitations supérieures à 100 mm/ 24 h.

Alpine debris flows and precipitation: A) chronological record of alpine debris flows events between 1948 and 1997; B) annual precipitation between 1954 and 1997; C) exceptional precipitation > 50 mm/ 24 h; D) exceptional precipitation > 100 mm/ 24 h.

MORPHOMÉTRIE DES COULÉES DE DÉBRIS DE VERSANTS

Ces mesures consistent à représenter au moyen d'une courbe et à étudier mathématiquement le profil du versant en effectuant des analyses sur les valeurs des angles de pente des versants. Sur le terrain, le profil longitudinal des modelés des 68 coulées de débris de versants, disposés au pied des parois (fig. 6) a été relevé à l'aide d'un cordon long de10 m tendu entre deux piquets de 50 cm de hauteur, depuis la base jusqu'au sommet du versant. La détermination des angles des pentes (calculée en degrés) a été réalisée avec une boussole-clinomètre (Chaix), le long de ces transects de 10 m. Ce mode d'opération est couramment utilisé (Francou, 1991 ; Luckman, 1992 ; Pech, 1993 ; Jomelli, 1997). Comme la longueur totale des dépôts est variable (60 à 500 m), nous avons exprimé les résultats en distance fractionnée depuis l'apex, c'est-à-dire que l'on exprime la longueur du dépôt en

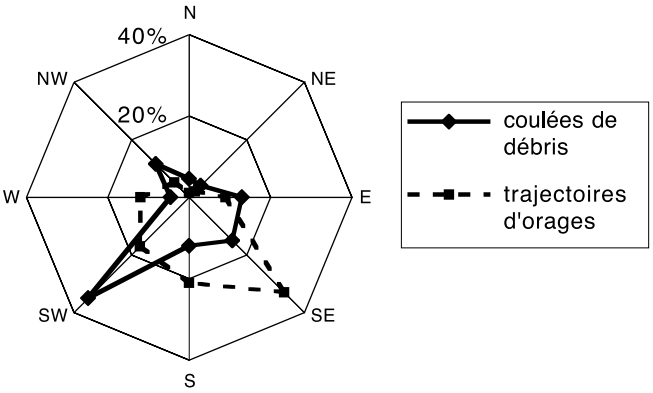


FIGURE 5. Distribution stéréographique des coulées de débris de versants et des trajectoires d'orages au plateau de Bure.

Stereographic distribution of alpine debris flows and of storm trajectories at the Plateau de Bure.

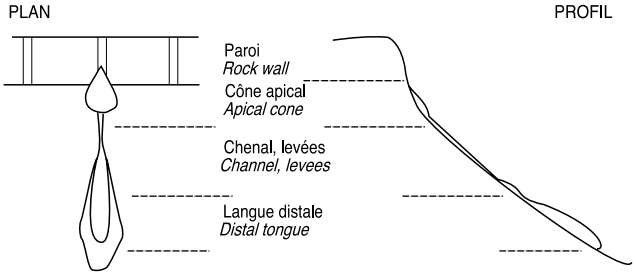


FIGURE 6. Cône apical et modelés édifiés par une coulée de débris.

Apical cone and landforms built by a debris flow.

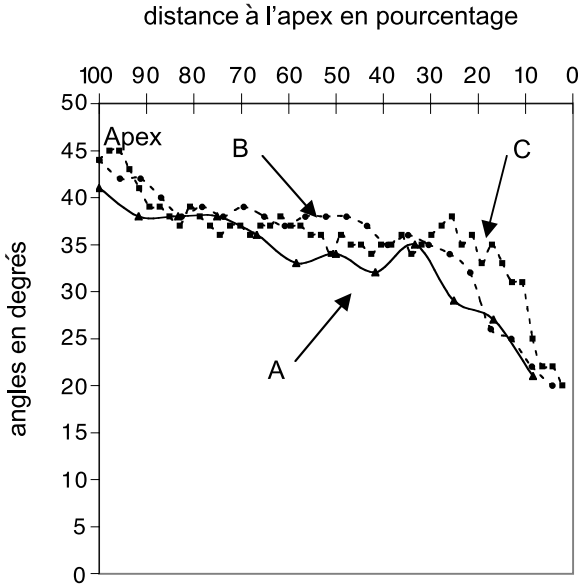


FIGURE 7. Exemples représentatifs de types de pentes en fonction de la distance fractionnée depuis l'apex sur trois dépôts. A, un éboulis ; B et C, deux coulées de débris alpines (respectivement EbRatUb2 et EbRatAd3).

Representative examples of types of slopes according to the fractionated distance from the apex on three slope deposits. A, a rockfall scree; B and C, two alpine debris flows. X) fractionated distance from apex; Y) slope in degrees.

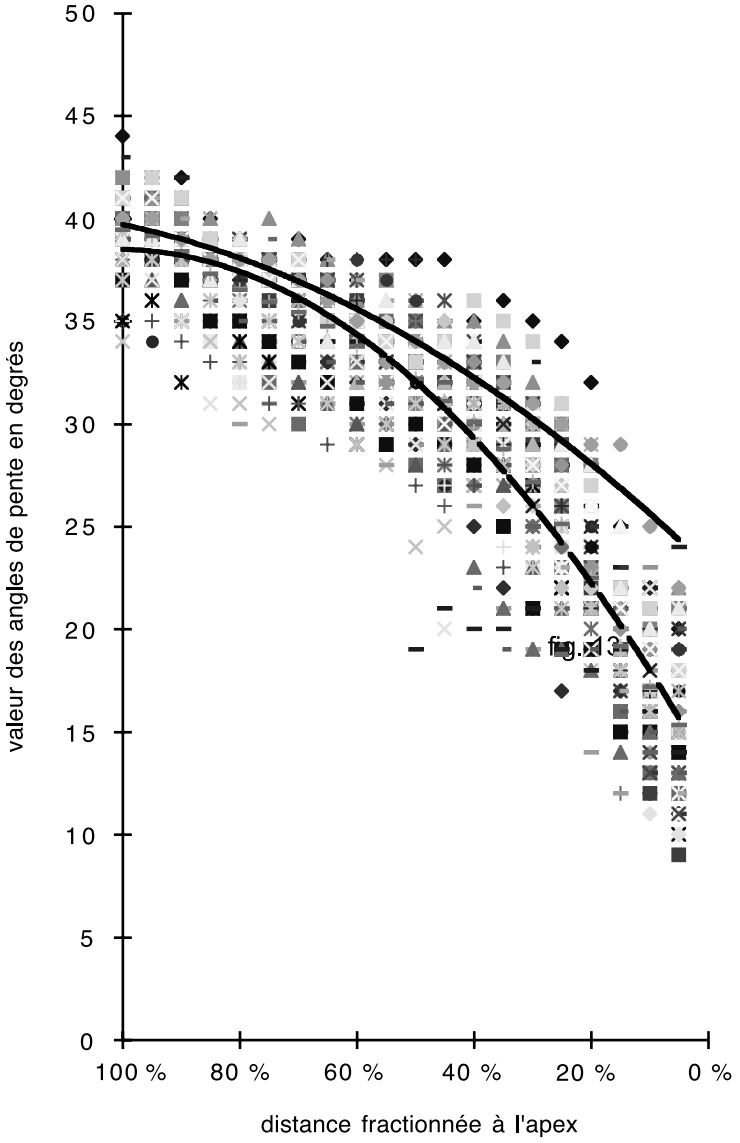
pourcentage (fig. 7) : sur toutes les figures, l'apex se trouve à gauche. À titre d'exemple, pour plus de clarté, nous n'avons représenté que trois courbes sur la figure 7 : un éboulis gravitaire pur (en A) et deux modelés mis en place par des coulées de débris en B et C. Les valeurs des angles de pente sont ensuite interprétées mathématiquement. Sur la figure 8 est représentée la totalité des valeurs des angles de pente mesurés sur les 68 coulées de débris. La courbe en trait discontinu correspond à la moyenne des 68 courbes des profils des coulées de débris et, à titre de comparaison, nous avons fait figurer une courbe (en trait plein) correspondant à la moyenne de 15 profils d'éboulis gravitaires dont l'alimentation s'est faite par des chutes de pierres, plus rarement par les avalanches : ces profils d'éboulis sont déjà parfaitement identifiés par ailleurs (Francou et Manté, 1990 ; Francou, 1991). Les courbes des modelés de coulées de débris ont fait l'objet d'interprétation au moyen d'équations de courbes de tendance permettant une comparaison : la fonction polynomiale a été systématiquement calculée avec le logiciel Excel. En outre, comme d'un point de vue graphique les profils sont assimilables géométriquement à des tangentes, ils peuvent faire l'objet, numériquement, d'une approximation au moyen d'une fonction affine, que nous avons donc calculée à l'aide de la fonction Spline Cubique (Wegman et Wright, 1983 ; Francou et Manté, 1990), fonction mathématique qui permet d'interpréter les profils en déterminant les dérivées première et seconde. À l'aide de la dérivée première, on identifie la succession des concavités et des convexités, une convexité sur le terrain étant représentée par une concavité sur la figure. Avec la dérivée seconde, on détermine les points de rupture dans le profil, c'est-à-dire les convexités disposées entre deux concavités. Ces points de rupture sont déterminés en abscisse (pourcentage de la distance à l'apex) et en ordonnée (valeur des angles des pentes). L'existence de concavités successives séparées par des points de rupture a une signification morphodynamique qui a été clairement démontrée pour les éboulis (Francou et Manté, 1990) et pour les avalanches (Jomelli, 1997). Pour les éboulis, le point de rupture est disposé à 50 %, comme l'ont montré Francou et Manté (1990), définissant un secteur apical d'accumulation-transit et un secteur distal d'accumulation absolue. Sur les figures 9 et 10, la courbe en trait discontinu correspond à l'approximation Spline cubique ; la limite supérieure de la surface grisée correspond à la dérivée première. À gauche, le 0 % correspond à l'apex et à droite, la partie distale à 100 %.

MESURE DES FABRIQUES ET DE LA GRANULOMÉTRIE

Sur le terrain, nous avons effectué des analyses des fabriques des blocs disposés à la surface des coulées de débris de versants, le long des transects morphométriques, définis précédemment (Giardino et Vitek, 1985). À tous les 20 m, sur les transects, nous avons appliqué une grille de 1 m^2, sur laquelle nous avons prélevé 50 blocs au hasard, pour lesquels on

FIGURE 8. Nuage de points représentant les valeurs de pente sur les profils des 68 coulées de débris du plateau de Bure. La courbe en traits discontinus représente la courbe de tendance pour la moyenne des valeurs des angles de pente des coulées de débris ; courbe en trait plein, la courbe de tendance des valeurs des angles de pente d'un éboulis.

Plot of angle values of the 68 debris flows profils around the Plateau de Bure (Massif du Dévoluy); the broken line curve is the tendency curve of the mean slope angles of the debris flows; the soilid line curve is the tendency curve of the values of slope angles for a typical rockfall deposit.



mesure la pente du bloc (en degré), l'orientation et l'inclinaison du grand axe des blocs (N 360°) ainsi que les trois axes a, b, c (en cm) de la notation de Krumbein (1941). À partir de ces données, nous avons réalisé des analyses de fabriques. Les trois dimensions des blocs permettent de déterminer l'indice d'aplatissement (a + b / 2c) (Cailleux, 1947) et l'indice de sphéricité de Krumbein (1941) obtenu selon la formule : $I_s = (b.c/a^2)^{1/3}$. nous avons aussi utilisé l'indice d'imbrication mis au point par Hétu *et al.* (1994) : $I_{imb} = P - V$;

où I_{imb} est l'indice d'imbrication ,

P est la pente locale du site étudié en degré,

V est l'inclinaison du vecteur moyen.

Les traitements statistiques de ces données ont été effectués avec le logiciel Excel. Les mesures de l'orientation et de l'inclinaison du grand axe des blocs (a) ont été reportés sur des stéréogrammes de Schmidt et les indices suivants ont été calculés avec Stereo (McEachren, 1986) :

— le *vector magnitude L* % (Curray, 1956) qui exprime l'intensité de l'orientation préférentielle des débris. D'après Curray (1956), ce paramètre *L* % peut être combiné au test de Rayleigh afin de calculer la probabilité *p* pour que l'orientation préférentielle puisse être attribuée au hasard.

— les valeurs propres normalisées *E1, E2, E3*, traduisant la distribution tridimensionnelle des orientations ;

— le paramètre *Svar* ou variance sphérique, pour la dispersion des orientations ;

— ainsi que l'indice k selon la méthode de Woodcock (1977).

Afin de proposer une interprétation claire de nos propres valeurs, nous avons présenté, à titre comparatif, dans le tableau I, les valeurs obtenues par Bertran *et al.* (1997) sur des talus d'éboulis et sur des dépôts de coulées de débris. Les valeurs des tableaux II, III et IV correspondent aux résultats

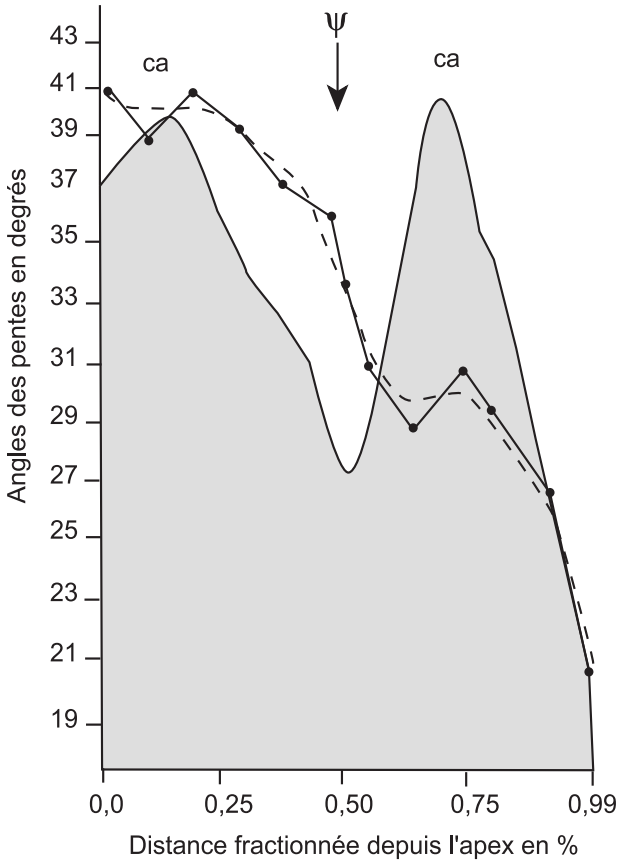


FIGURE 9. Exemple de profil d'éboulis. Abscisse : distance fractionnée depuis l'apex ; ordonnée : valeur des angles ; ligne pleine et point : segment et interpolation linéaire ; trait continu : pente ; trait discontinu : approximation Spline cubique ; grisé : dérivée seconde de l'approximation de la Spline cubique ; flèche et ψ : point de rupture ; ca : concavité.

Example of scree profile. Abscissa: fractioned distance from the apex; ordinate: slope; dots and solid line: segment slope and linear interpolation; broken line: cubic smoothing Spline; grey area: second derivative of cubic smoothing Spline; arrow and ψ: breaking point; ca: concavity.

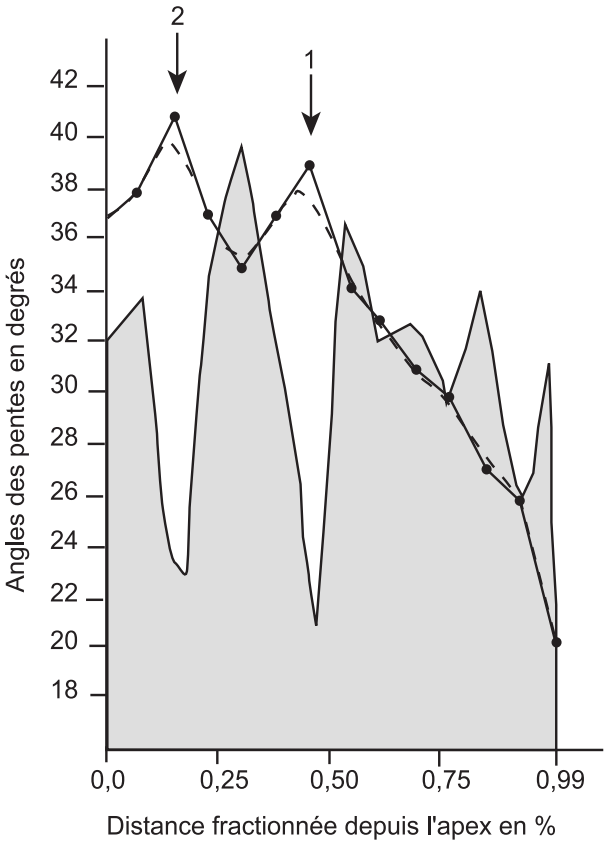


FIGURE 10. Exemple de profil de dépôt de coulées de débris au profil apical concave. Abscisse : distance fractionnée depuis l'apex ; ordonnée : valeur des angles ; ligne pleine et point : segment et interpolation linéaire ; trait discontinu : approximation Spine cubique ; grisé : dérivée seconde de l'approximation Spline cubique ; flèche n° 1 : point de rupture principal ; flèche n° 2 : point de rupture secondaire.

Example of alpine debris flow profile with a concave apical cone. Abscissa: fractionated distance from the apex; ordinate: slope; dots and solid line: segment slope and linear interpolation; broken line: cubic smoothing Spline; grey area: second derivative of cubic smoothing Spline; arrow no. 1: main breaking point; arrow no. 2: secondary breaking point.

de la présente recherche. Ces tableaux rassemblent les mesures de la granulométrie des blocs de surface, mesures faites sur des populations d'une cinquantaine de blocs par relevé, ce qui constiue des populations statistiquement significatives de l'ensemble.

RÉSULTATS

RELATIONS ENTRE LES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES ET LES COULÉES DE DÉBRIS : CHRONOLOGIE ET RÉPARTITION

La carte de la figure 3 et le diagramme radial de la figure 5, qui présentent la répartition des coulées de débris par familles d'orientation, démontrent qu'il existe une répartition préférentielle des phénomènes étudiés, car environ 35 % se sont produits sur des versants orientés vers le sud-ouest. La disposition morphologique des versants est assez variée, mais elle peut expliquer en partie la répartition des coulées de débris : les versants des combes (Agnières, Mai, Ratin) font face au sud-ouest ou au nord-est. Le pendage des couches et la fracturation des roches, plus ou moins importante selon les secteurs des parois rocheuses, constituent un facteur expliquant la variabilité spatiale de la répartition des coulées. En effet, les versants conformes ou dominés par une paroi très fracturée fournissent des débris plus abondants que les autres. La position des joints de stratification et des plans de fracture horizontaux favorise les chutes de pierres et l'alimentation hydrique. Le sud, le sud-ouest et plus secondairement le sud-est constituent les secteurs d'orientation préférentielle où se déclenchent les coulées de débris. Ces orientations concordent avec celles des trajectoires d'orage (fig. 5). Cependant, le coefficient de corrélation de 0,44 n'est pas statistiquement significatif, même si les orientations des coulées de débris et celles des trajectoires des orages ne sont pas complètement indépendantes. En effet, les orages proviennent en majorité du sud-sud-est.

TABLEAU I

Fabrique des talus d'éboulis gravitaires et des coulées de débris alpines d'après Bertran et al. *(1997)*

	L %	P	E1	E2	E3	r1	r2	k	Svar	*n*
Éboulis gravitaire :										
zone apicale	27,83	0,021	0,651	0,307	0,041	0,75	2,02	0,37	0,26	50
	21,84	0,239	0,621	0,344	0,035	0,59	2,30	0,25	0,29	30
zone médiane	26,21	0,032	0,607	0,316	0,076	0,65	1,42	0,46	0,36	50
	27,56	0,111	0,573	0,372	0,056	0,44	1,89	0,23	0,58	30
zone distale	19,44	0,321	0,522	0,335	0,142	0,45	0,86	0,52	0,61	30
	06,71	0,798	0,417	0,509	0,073	0,19	1,75	0,11	0,55	50
Coulée de débris :										
levée	27,46	0,097	0,623	0,333	0,430	0,63	2,04	0,31	0,49	31
	27,02	0,054	0,531	0,325	0,144	0,49	0,82	0,61	0,56	40
chenal	04,56	0,939	0,475	0,424	0,101	0,11	1,44	0,08	0,72	30
lobe	36,42	0,005	0,607	0,283	0,111	0,76	0,94	0,82	0,68	40
	16,84	0,322	0,549	0,392	0,059	0,34	1,90	0,18	0,72	40

TABLEAU II

Fabrique des talus d'éboulis et coulées de débris alpines du Dévoluy

	L %	P	E1	E2	E3	r1	r2	k	Svar	*n*
Apex éboulis	18,78	0,247	0,829	0,151	0,020	1,7	2,05	0,83	0,093	100
Apex EbRatAd2	25,40	0,070	0,712	0,244	0,044	1,07	1,71	0,63	0,165	50
EbRatUb2										
Cône apical	09,49	0,693	0,810	0,176	0,014	1,53	2,51	0,61	0,126	100
Secteur médian	05,92	0,860	0,776	0,202	0,023	1,35	2,18	0,62	0,126	100
Secteur distal	05,37	0,897	0,745	0,239	0,016	1,14	2,71	0,42	0,154	100
Chenal flot débris	39,20	0,002	0,732	0,252	0,016	1,07	2,75	0,39	0,150	100
Levée flot débris	32,30	0,015	0,797	0,170	0,032	1,54	1,66	0,93	0,112	100
Langue de dépôt	08,42	0,750	0,631	0,331	0,038	0,65	2,16	0,30	0,338	100

TABLEAU III

Granulométrie des blocs sur les éboulis gravitaires du Dévoluy

	apex			secteur médian				secteur distal			
	valeurs		**moyenne**	valeurs			**moyenne**	valeurs			**moyenne**
Pente (en degrés)	38,00	41,00	**39,50**	36	33	35	**34,67**	25	20	21	**22**
Granulométrie											
Moyenne du grand axe (en cm)	05,44	11,24	**08,34**	10,50	05,38	13,38	**09,75**	10,90	30,25	50,30	**30,48**
Maxi-mini			**3 à 45**				**2 à 12**				**5 à 130**
Tri (écart type)	03,65	10,50	**07,07**	04,14	02,32	04,63	**03,70**	03,80	11,20	31,75	**15,58**
sphéricité	00,56	00,63	**00,59**	00,64	00,62	00,63	**00,63**	00,55	00,52	00,65	**00,57**
Aplatissement	02,92	02,26	**02,59**	02,2	02,32	02,31	**02,28**	03,15	03,56	02,00	**02,90**
Orientation : % d'obliques	50,00	70,00	**60,00**	60,00	62,00	60,00	**60,67**	62,00	80,00	75,00	**72,33**
Inclinaison : % de relevants	79,00	83,00	**81,00**	66,00	71,00	75,00	**70,67**	37,00	49,00	53,00	**46,33**
Imbrication (en degrés)	09,60	14,00	**11,80**	09,55	14,00	14,00	**12,52**	00,25	06,20	08,40	**04,95**
Nombre total de blocs	50,00	50,00	**50,00**	50,00	50,00	50,00	**50,00**	50,00	50,00	50,00	**50,00**

Il a pourtant été établi à de nombreuses reprises que des relations étroites existent entre les précipitations abondantes et intenses et le déclenchement des coulées de débris (Caine, 1980 ; Rapp et Nyberg, 1981 ; Innes, 1983a ; Francou, 1988 ; Blijenberg, 1998). Nous avons donc étudié les relations entre les séquences de précipitations intenses et le déclenchement des coulées de débris de versants. Sur la figure 4A, apparaissent les années pendant lesquelles se sont produites des coulées de débris autour du plateau de Bure et ces données ont été comparées aux précipitations annuelles (fig. 4B). La relation entre les précipitations annuelles et les coulées de débris est insignifiante. Elle n'est pas beaucoup plus significative (0,12) lorsque sont comparées les années à événements de précipitations intenses (> 100 mm/24 h, fig. 4D) et celles pendant lesquelles des coulées de débris sont déclenchées. Des pluies peu intenses mais de longue durée peuvent conduire à la saturation des débris, lorsque la vitesse d'infiltration est faible, et donner naissance à des coulées de débris (Caine, 1980). Toutefois, surtout dans les Alpes du Sud, Blijenberg (1998) a démontré que ce sont des précipitations ponctuelles d'intensité équivalant à plus de 50 mm/h qui provoquent les coulées de débris.

Nous ne disposons pas de données concernant les pluies de forte intensité qui tombent en quelques minutes, voire en une ou deux heures, mais celles-ci sont inévitablement incluses dans les données quotidiennes (fig. 4C). Ainsi, s'il tombe 50 mm en une heure, un certain jour, cette pluie est comprise dans la valeur 50 mm, en 24 h, du jour que nous avons à notre disposition ; nous avons déjà vu que les pluies brèves (moins d'une heure) mais intenses correspondent assez souvent à des totaux quotidiens égaux ou supérieurs à 50 mm. La relation entre les données météorologiques de la figure 4C et la fréquence des coulées est encore plus faible (0,09), même s'il y a tout de même (fig. 4A et C) 14 événements (une ou plusieurs coulées) qui coïncident avec des années pendant lesquelles se produisent des pluies supérieures à 50 mm en 24 h. Ainsi, par exemple, les années 1990 et 1991 constituent des années pendant lesquelles le nombre des coulées de débris a été relativement important (fig. 4C), bien que les précipitations aient été peu intenses. Inversement, au cours de l'automne 1993-1994 et surtout le 6 janvier 1994 (plus 150 mm en 24 heures à Veynes), ainsi que le 1er août 1994, il y a eu des précipitations très intenses. Pourtant, l'année 1994 ne se caractérise pas par une recrudescence de l'activité des coulées de débris autour du plateau de Bure. À l'inverse, en 1991, où aucune pluie de forte intensité n'a été signalée, sept coulées de débris ont été déclenchées.

Notre étude des coulées de débris, autour du plateau de Bure, ne permet donc pas de confirmer ce qu'ailleurs la plupart des auteurs ont montré, les liens étroits existant entre les pluies de faible fréquence mais de forte intensité et le déclenchement des coulées de débris. Certes, l'approche est sans doute incomplète. Nous ne possédons pas de données météorologiques indiquant les intensités instantanées mais seulement les totaux quotidiens ; la datation des coulées de débris n'est généralement pas plus précise que l'année. Toutefois, nous avons voulu nous intéresser à un autre paramètre influençant le déclenchement des coulées de débris, l'alimentation. Pour cela, il a fallu étudier les profils des modelés de coulées de débris ainsi que les fabriques des blocs disposés en surface afin de comprendre s'il existe une relation entre la morphologie du secteur apical, la disposition des blocs et la constitution d'un secteur d'alimentation.

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE LA MORPHOMÉTRIE DES PROFILS DES COULÉES DE DÉBRIS : MISE EN ÉVIDENCE DU CÔNE APICAL

Sur la figure 7, le profil A correspond à un éboulis gravitaire pur car il est constitué d'une double concavité séparée par une convexité. Cet éboulis gravitaire présente un profil bi-modal bien marqué, conformément à ce qui a été mis en évidence par Francou et Manté (1990). La pente s'élève graduellement, dans le cas des éboulis, et, à l'inverse, elle est plus chaotique dans le cas des coulées de débris de versants (profils B et C).

La partie distale des dépôts de coulées de débris (profils B et C) correspond à des modelés dont les pentes sont globalement moins accusées que celles des éboulis. En revanche, dans la partie apicale, on distingue nettement des secteurs en pente très forte, avec un angle supérieur à 40°. Ces parties apicales constituent des sections très instables, en forme de cône qui pénètre à l'intérieur des couloirs de la paroi, ceux-ci étant souvent établis sur des fissures. On identifie bien sur ces versants ce que nous proposons de nommer le « cône apical », lequel sert de zone d'alimentation aux coulées de débris. L'augmentation des pentes des courbes des profils des coulées de débris, dans leur partie apicale, est visible aussi sur la figure 8, où la courbe de la moyenne des coulées de débris paraît plus inclinée que celle des éboulis de référence. Selon la figure 8, les points correspondant aux valeurs des angles de pente des coulées de débris présentent une dispersion importante : l'équation de la courbe de tendance de la moyenne des profils des 68 coulées est :

$$y = -24{,}824x^2 + 50{,}073x + 13{,}245 \quad (r^2 = 0{,}9899)$$

Par comparaison, la courbe des éboulis gravitaires (en trait plein) est beaucoup plus rectiligne. L'équation de la courbe de tendance, dont le coefficient de corrélation est $r^2 = 0{,}9613$, s'écrit :

$$y = -10{,}686x^2 + 27{,}386x + 23{,}006$$

Les courbes de tendance permettent d'ajuster une droite, au moyen des moindres carrés, à partir des tableaux de données. Plus la courbe de tendance s'approche d'une droite, plus le profil est régulier. Or, le profil d'un versant ou d'un modelé est rarement rectiligne ou uniquement concave ou convexe. Francou et Manté (1990) ont montré qu'un éboulis gravitaire est formé de deux concavités séparées par un point de rupture appelé point ψ. La figure 9 présente la courbe en Spline cubique d'un éboulis gravitaire pur. D'après la dérive première, on identifie deux concavités (ca sur la figure) : la première est située vers 15 % de la distance à l'apex (à 40°),

l'autre, vers 70 % (vers 31°). D'après la dérivée seconde, ces deux concavités sont séparées par un point de rupture situé vers 50 % qui correspond au point ψ, sur une pente d'à peu près 35° (Francou et Manté, 1990).

Le profil des coulées de débris de versants montre un tout autre aspect (fig. 10 et 11). Il y a une multiplication des concavités et des points de rupture principaux. Sur la figure 10, la dérivée seconde permet de mettre en évidence deux points de rupture, vers 10 % et 50 % (vers 41° et 39°). Le point de rupture situé vers 10 % limite une concavité géométrique. Le profil est plus chaotique que celui d'un éboulis.

Certains versants sur lesquels ont été repérés des coulées de débris ont des profils morphométriques et des courbes Spline très variés. Trois cas ont pu être répertoriés sur la figure 11 :

— la figure 11a présente la dérivée première du profil de la coulée de la figure 10. La concavité très nette au sommet correspond au cône apical. Le point de rupture entre les deux concavités délimite la transition entre cette zone apicale, là où l'accumulation est susceptible de se produire, et la partie médiane du versant. La concavité aux alentours de 30 % correspond à l'accumulation (levées puis amorce de la langue de dépôt). La partie inférieure est complexe car elle représente une topographie accidentée correspondant aux différents bourrelets constituant le lobe de dépôt distal.

— en figure 11b, la dérivée première permet d'isoler une partie du profil apical à pente rectiligne ;

— sur la figure 11c, grâce à la dérivée première, on remarque que la forme du profil présente une vaste concavité (ca) vers 50 % précédée d'une convexité sommitale identifiée comme étant le cône apical.

Les trois profils correspondent à des coulées de débris qui ont pu être datées approximativement (dans l'intervalle d'une ou plusieurs années) : en a, il s'agit d'une coulée ancienne, antérieure à 1948 ; en b, la coulée a pu être repérée sur la photographie aérienne de 1956 ; et en c, il y a une coulée récente datant de 1993. En 11a, le cône présente un profil bombé caractéristique d'une accumulation instable. En 11b et 11c, le cône est absent car il a été purgé récemment.

L'utilisation des courbes Spline permet donc d'apporter un argument à la définition de la place du cône apical dans la morphodynamique des coulées de débris de versants du Dévoluy : il est repérable dans la morphologie de certains profils (fig. 12), mais il disparaît après le déclenchement des coulées.

LES FABRIQUES ET LA GRANULOMÉTRIE DES BLOCS DE SURFACE

L'objectif de cette recherche complémentaire consiste à trouver d'autres arguments morphosédimentaires permettant de caractériser le cône apical. D'après les tableaux I et II, on peut comparer les données des fabriques de surface. Pour les éboulis gravitaires (tabl. III), la taille des blocs croît logiquement de l'amont vers l'aval. La répartition n'est pas si simple pour les coulées de débris (tabl. IV). La taille des éléments est élevée sur les cônes apicaux, puis diminue le long

TABLEAU IV

Granulométrie des blocs dans les coulées des débris alpines du Dévoluy

	cône apical			chenal					levées					dépôt				
	valeurs		**moyenne**			valeurs		**moyenne**			valeurs		**moyenne**			valeurs		**moyenne**
Pente (en degrés)	45	42	**43,5**	34	34	36	35	**34,8**	34	34	35	38	**35,3**	23	17	22		**20,7**
Granulométrie																		
Moyenne du grand axe (en cm)	23,00	24,60	**23,80**	5	4,34	4,8	5,52	**4,92**	10	12	16	19,75	**14,4**	19	6,5	13,6		**13**
Maxi-mini			**2 à 49**					**1,5 à 13**					**8 à 32**					**5 à 130**
Tri (écart type)	17,70	17,12	**17,41**	02,50	02,00	03,20	01,30	**02,25**	04,00	05,00	07,00	08,20	**06,05**	07,90	09,40	08,7,		**08,67**
Sphéricité	00,47	00,45	**00,46**	00,57	00,56	00,58	00,57	**00,57**	00,62	00,56	00,61	00,54	**00,58**	00,56	00,63	00,51		**00,57**
Aplatissement	04,30	04,36	**04,33**	02,84	03,00	02,60	03,35	**02,95**	02,43	03,00	02,60	03,27	**02,83**	02,60	03,32	03,56		**03,16**
Orientation : % d'obliques	75,00	50,00	**62,50**	90,00	55,00	0450	75,00	**66,30**	85,00	70,00	72,50	70,00	**74,40**	68,00	56,00	70,00		**64,70**
Inclinaison : % de relevants	48,00	45,00	**46,50**	38,00	27,00	19,00	31,00	**28,80**	41,00	48,00	39,00	45,00	**43,30**	37,00	42,00	40,00		**39,70**
Imbrication (en degrés)	08,00	07,90	**07,95**	07,20	05,70	05,80	07,50	**06,55**	09,95	08,50	07,50	10,50	**09,11**	11,70	12,00	15,30		**13,00**
Nombre total de blocs	40,00	40,00	**40,00**	50,00	50,00	50,00	50,00	**50,00**	50,00	50,00	50,00	50,00	**50,00**	50,00	50,00	50,00		**50,00**

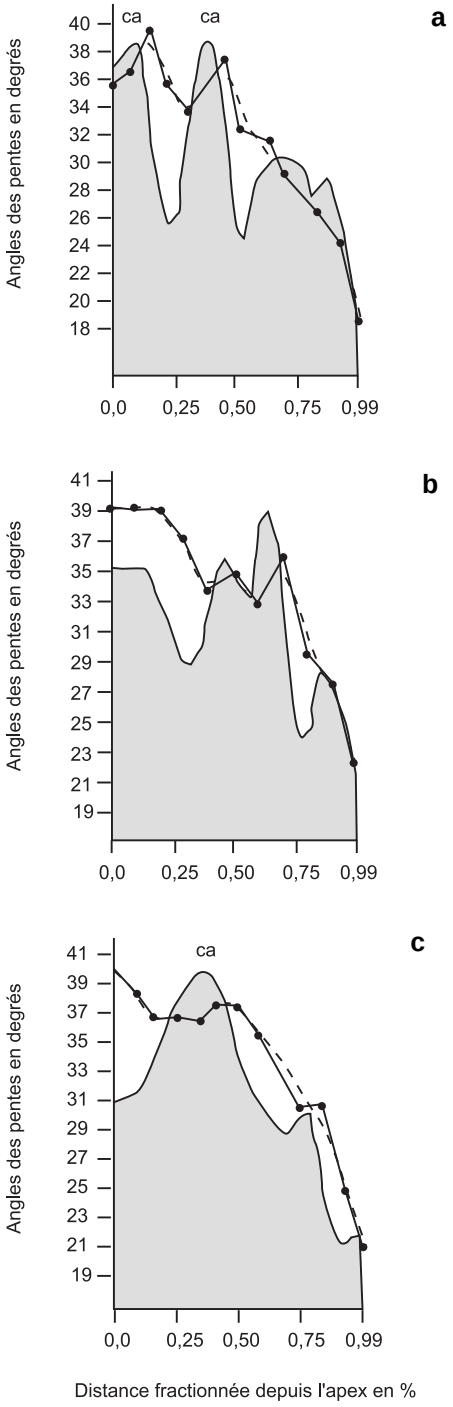


FIGURE 11. Séquence de mise en place d'un cône apical. Abscisse : distance fractionnée depuis l'apex ; ordonnée : valeur des angles ; ligne pleine et point : segment et interpolation linéaire ; trait discontinu : approximation Spline cubique ; grisé : dérivée seconde de l'approximation de la Spline cubique ; ca : concavité ; a) profil apical concave ; b) profil apical subrectiligne ; c) profil apical convexe.

Sequence of apical cone setting up. Abscissa: fractionated distance from the apex; ordinate: slope; dots and solid line: segment slope and linear interpolation; broken line: cubic smoothing Spline; grey area: second derivative of cubic smoothing Spline; ca: concavity; a) concave apical cone profile; b) subrectilinear apical cone profile; c) convex apical cone profile.

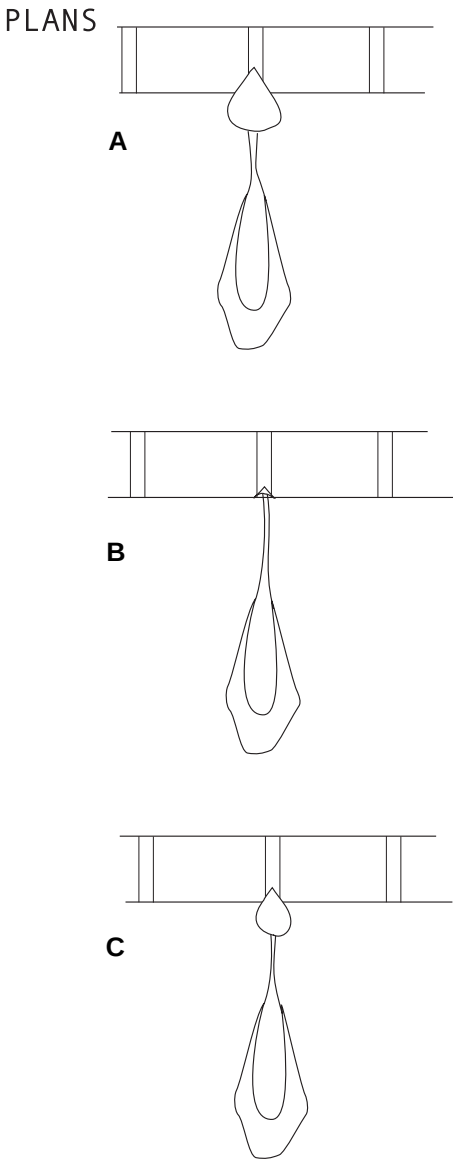


FIGURE 12. Évolution des profils des modelés de coulées de débris : A) cône apical constitué ; B) cône apical purgé ; C) cône apical en cours de constitution.

Landform evolution of a debris flow: A) formed apical cone; B) empty apical cone; C) formation of an apical cone.

des levées ainsi que dans les chenaux pour enfin augmenter sur les langues de dépôt. L'écart type traduit l'hétérométrie et donc le tri. Pour l'éboulis, ce tri est globalement mauvais, quel que soit le secteur. Les coulées de débris ont un tri variable. Les cônes apicaux ont un mauvais tri. Le faciès désordonné traduit une accumulation en vrac. Les chenaux, les levées et les lobes de dépôts distaux sont mieux triés (Bertan et Texier, 1994 ; Van Stein *et al.*, 1988). D'une manière générale, les fabriques gravitaires des éboulis sont caractérisées par de faibles orientations préférentielles comme l'indiquent les faibles valeurs du paramètre des *vector magnitudes* et des variances sphériques élevées (tabl. I) (Bertran *et al.*, 1997). Toutefois, on peut observer, dans certains

cas, une orientation spécifique parallèle à la pente dans les zones proximale et médiane, et perpendiculaire dans la zone distale (Caine, 1967 ; Francou, 1991). Compte tenu des valeurs de *p*, les fabriques sont considérées comme aléatoires dans la plupart des cas. Bertran *et al.* (1997) rapportent néanmoins l'existence de fabriques possédant une certaine anisotropie dans la zone apicale de certains éboulis qui est attribuée au *creep*, au cycle gel-dégel ou encore à des perturbations d'origine animale. Dans notre étude, cette orientation préférentielle s'accompagne de la présence d'un certain nombre de fragments plongeants qui peut être supérieur à 70 % ne permettant pas d'envisager le *creep* ou l'action des coulées sèches, généralement facteurs d'un redressement des blocs (Francou, 1988).

Les fabriques relevées sur les dépôts des coulées de débris sont conformes à celles que l'on trouve dans la littérature (Innes, 1983a ; Bertran et Texier, 1994) : il y a une orientation préférentielle, accompagnée d'un tri sédimentologique, en particulier sur les levées et dans les chenaux. On observe en revanche, une forte variance sphérique accompagnée d'une faible valeur du *vector magnitude* dans la zone distale. Les stéréogrammes de Schmidt (fig. 13) permettent de montrer l'hétérogénéité des orientations et le relèvement des blocs. On distingue donc facilement les caractères des sédiments des zones de dépôt (levées, lobes distaux), généralement assez bien structurés, de ceux du cône apical très instable, au faciès chaotique.

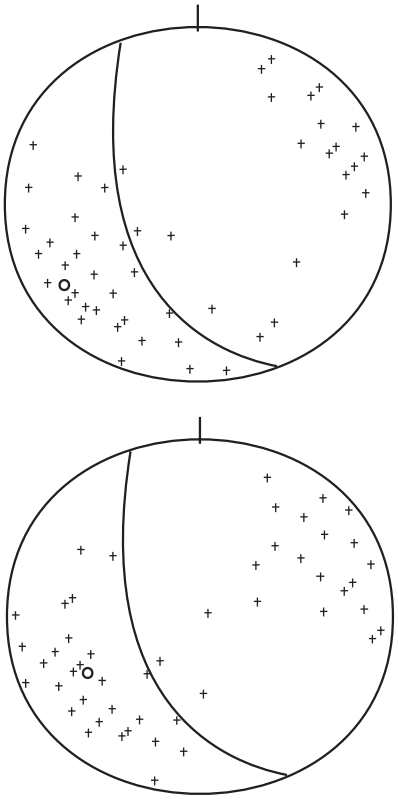


FIGURE 13. Deux stéréogrammes de Schmidt représentant l'orientation et l'inclinaison du grand axe des éléments de deux cônes apicaux (hémisphère inférieur). L'arc de cercle représente la surface du cône apical (1 : pente : 42°; 2 : pente : 45°). VLM : vecteur linéaire moyen.

Two schmidt-net (equal area, lower hemisphere) diagrams showing fabrics of the sedimentary units of two apical cones. Great circles indicate local slope direction and dip. MLV: mean lineation vector.

INTERPRÉTATION ET CONCLUSION

Les coulées de débris se déclenchent à l'amont des versants dans des secteurs d'alimentation qui peuvent être variés (Blijenberg, 1998) : un couloir étroit dans la paroi ou la partie supérieure du versant. Dans le Dévoluy, elles proviennent de la base de la paroi des calcaires sénoniens dominant les versants. La paroi et les couloirs qui l'accidentent permettent de concentrer facilement l'eau qui peut être d'origine diverse. On sait que de nombreux auteurs ont insisté sur le rôle des averses pluvieuses fortement concentrées en établissant des seuils de déclenchement de coulées de débris en relation avec certaines intensités de précipitations (Caine,1980; Rapp et Nyberg, 1981 ; Kotarba et Strömquist, 1984 ; Loye-Pilot, 1984 ; Francou, 1988 ; Van Steijn *et al*., 1988 ; Luckman, 1992 ; Coussot, 1993 ; Blijenberg, 1998). L'accumulation de la neige au pied des couloirs ainsi que l'effet d'entonnoir joué par la forme en amphithéâtre de la paroi dominant l'axe de ces couloirs (Francou, 1988) peut favoriser le déclenchement de coulées, même avec des précipitations dont l'intensité est inférieure à 50 mm/h.

La paroi et les couloirs fournissent une grande quantité de débris alimentant les coulées. Ces débris s'accumulent à la base des parois (Blijenberg, 1998) en un cône de dépôt, que nous proposons d'appeler « cône apical » en référence à sa forme de cône édifié à l'amont des versants et pénétrant à l'intérieur de la paroi par le biais de fissures (fig. 14). La mise en évidence des caractéristiques morphosédimentaires de cette zone d'alimentation n'a jamais été présentée avant aujourd'hui. Nous nous sommes donc intéressés à ce « cône

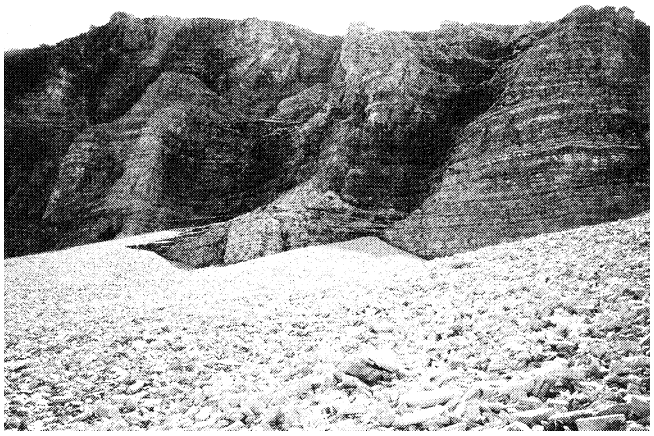


FIGURE 14. Cônes apicaux de coulées de débris alpines dans la combe Ratin.

Apical cones of alpine debris flows in the Combe Ratin.

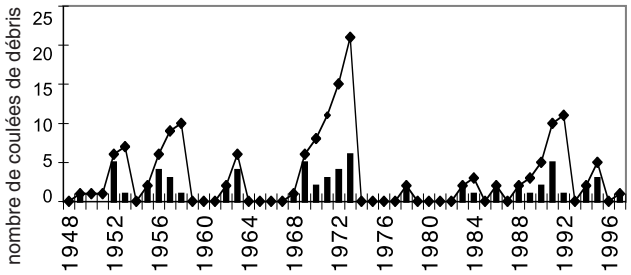


FIGURE 15. Chronologie des coulées de débris de versants du plateau de Bure entre 1948 et 1997. La courbe met en évidence la succession de cycles de déclenchement des coulées ; elle représente des événements cumulés entre des phases de repos.

Chronological distribution of alpine debris flows at Plateau de Bure between 1948 and 1997. The curve indicates that the alpine debris flows are triggered regularly and occur in cycles; it shows a succession of cumulative events between periods of non activity.

apical » qui ne représente sans doute qu'un type parmi d'autres formes d'accumulation dans les zones de départ des coulées de débris alpines (Blijenberg, 1998). Dans le Dévoluy, il existe alternativement des secteurs où se produisent des éboulis de gravité et d'autres commandés par les coulées de débris. D'après l'analyse détaillée des exemples choisis dans le Dévoluy, il paraît évident que se met en place, dans certains secteurs, un cône apical, accumulant des blocs et des débris de toute taille en provenance de la paroi en train de subir les effets de la météorisation. Les coulées de débris se forment parce que se met en place un cône apical, résultant de l'accumulation temporaire de blocs qui encombrent la base de la fracture de la paroi et s'entassent progressivement en un amas. Lorsque l'accumulation de débris reste inférieure à l'angle de frottement interne, situé vers 40-42° et qui a été déterminé pour les calcaires du Dévoluy expérimentalement sur le terrain (Francou, 1988), les débris ne peuvent être mis en mouvement que si la pression d'eau interstitielle devient très forte lors de grandes pluies, donnant lieu à un phénomène dit *fire hose effect* (Johnson et Rodine, 1984) : un jet d'eau très puissant mobilise et en même temps sature le matériel du cône apical, le transformant en coulée de débris. La pente du cône apical n'est pas toujours suffisante localement pour provoquer des *grain flows* réguliers, comme c'est le cas pour les éboulis (Young, 1972 ; Carson, 1977), estompant l'accumulation apicale, mais suffisante pour provoquer des coulées de débris alpines. Les débris s'entassent, grâce aux apports annuels en provenance de la paroi, en un cône dont la mise en déséquilibre s'effectue selon des rythmes qui sont plus espacés que les apports (fig. 15).

Les déclenchements de coulées sont répartis sur l'ensemble de la période d'étude, mais des pics d'activité plus ou moins cycliques apparaissent clairement (fig. 15). Les rythmes temporels sont commandés non seulement par les précipitations intenses mais aussi et peut-être surtout selon les rythmes de constitution de ces cônes apicaux. Les types de conditions climatiques, en particulier les données thermiques qui déterminent l'alimentation en débris, et les données pluviométriques, qui conditionnent le déclenchement des flots de débris, sont des paramètres essentiels (Van Steijn, 1996). Les recherches en cours devraient permettre de définir quels sont les rythmes de l'activité cryoclastique agissant actuellement dans cette partie du Dévoluy, vers 2 500 m d'altitude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier messieurs P. Bertran, B. Hétu et H. Van Steijn pour leur précieux travail de relecture.

RÉFÉRENCES

Addison, K., 1987. Debris flow during intense rainfall in Snowdonia, North Wales : A preliminary survey. Earth Surface Processes and Landforms, 12 : 561-566.

André, M.-F., 1990. Frequency of debris flows and slush avalanches in Spitsbergen : a tentative evaluation from lichenometry. Polish Polar Research, 11 (3-4) : 345-363.

____ 1995. Holocene climate fluctuations and geomorphic impact of extreme events in Svalbard. Geografiska Annaler, 77A : 241-250.

Bertran, P., Hétu, B., Texier, J.-P. et Van Steijn, H., 1997. Fabric characteristics of slope deposits. Sedimentology, 44 : 1-16.

Bertran, P. et Texier, J.-P., 1994. Structures sédimentaires d'un cône de flots de débris (Vars, Alpes françaises méridionales). Permafrost and Periglacial Processes, 5 (3) : 155-170.

Blijenberg, H., 1998. Rolling stones ? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard Valley, southern French Alps. Thèse de doctorat, Faculteit Ruimteljke Wetenschappen, Universiteit Utrecht, 223 p.

Blikra, L. H. et Nemec, W., 1998. Post-glacial colluvium in western Norway : Depositional processes facies and paleoclimatic records. Sedimentology, 45 : 909-959.

Bull, W. B., Schlyter, P. et Brogaard, S., 1995. Lichenometric analysis of the Kärkerieppe slush-avalanche fan, Kärkevagge, Sweden. Geografiska Annaler, 77A : 231-240.

Cailleux, A., 1947. L'indice d'émoussé des grains de sable et grès. Revue de Géomorphologie dynamique, 3 : 78-87.

Caine, N., 1967. The texture of talus in Tasmania. Journal of Sedimentary Petrology, 35 : 796-803.

____ 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, 62A : 23-27.

Carson, M. A., 1977. Angle of repose, angles of shearing resistance and angles of talus slopes. Earth Surface Processes and Landforms, 2 : 363-380.

Chamley, H., 1977. Sédimentologie. Dunod, Paris, 327 p.

Coussot, P., 1993. Rhéologie des boues et laves torrentielles – Étude de dispersions et suspensions concentrées. Centre d'Étude du Machinisme Agricole des Eaux et Forêts, Laboratoire de rhéologie, Grenoble, 415 p.

Curray, J. R., 1956. The analysis of two-dimensional orientation data. Journal of Geology, 64 : 117-131.

Enos, P., 1977. Flow regimes in debris flow. Sedimentology, 24 : 133-142.

Francou, B., 1988. L'éboulisation en haute montagne. Andes et Alpes. 2 tomes. Éditec, Caen, 696 p.

____ 1991. Pentes, granulométrie et mobilité des matériaux le long d'un talus d'éboulis en milieu alpin. Permafrost and Periglacial Processes, 2 : 175-186.

Francou, B. et Manté, C., 1990. Analysis of the segmentation in the profile of alpine talus slope. Permafrost and Periglacial Processes, 1 : 53-60.

Gerrard, A. J., 1990. Mountain Environments. Belhaven Press, London, 317 p.

Giardino, J. R. et Vitek, J. D., 1985. A statistical interpretation of the fabric of a rock glacier. Arctic and Alpine Research, 17 : 165-177.

Harris, S. A. et Gustafson, C. A., 1993. Debris flow characteristics in an area of continuous permafrost, St. Elias Range, Yukon Territory. Zeitschrift für Geomorphologie, 37 : 41-56.

Hétu, B., Van Steijn, H. et Bertran, P., 1995. Le rôle des coulées de pierres sèches dans la genèse d'un certain type d'éboulis stratifiés. Permafrost and Periglacial Processes, 6 : 173-194.

Hétu, B., Van Steijn, H. et Vandelac, P., 1994. Les coulées de pierres glacées : un nouveau type de coulées de pierraille sur les talus d'éboulis. Géographie physique et Quaternaire, 48 : 3-22.

Hunt, B., 1994. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Hydraulic Division, 120 : 1350-1363.

Hüsken, W., 1994. Dendroklimatologische und ökologische Studien an Nadelhölzern im Gebiet der Pragser Dolomiten (Südtirol/Italien). Dissertatio Botanica 215, 183 p.

Innes, J. L., 1983a. Debris flows. Progress in Physical Geography, 7 : 469-501.

____ 1983b. Lichenometric dating of debris-flow deposits in the scottish Highlands. Earth Surface Processes and Landforms, 8 : 579-588.

____ 1983c. Stratigraphic evidence of episodic talus accumulation on the Isle of Skye, Scotland. Earth Surface Processes and Landforms, 8 : 399-403.

Iverson, R. M., 1997. Physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 35 : 245-296.

Jomelli, V., 1997. Géodynamique des dépôts d'avalanche : analyses morphométriques et sédimentologiques. Thèse de Doctorat, Université de Paris VII, 252 p.

Johnson, A. M. et Rahn, P. H., 1970. Mobilization of debris flows. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band 9 : 168-186.

Johnson, A. M. et Rodine, J. R., 1984. Debris flows, p. 255-360. *In* D. Brunsden et D.B. Prior, édit., Slope Instability. John Wiley, London, 625 p.

Jonasson, C., Kot, M. et Kotarba, A., 1991. Lichenometrical studies and dating of debris flow deposits in the High Tatra Mountains, Poland. Geografiska Annaler, 73A : 141-146.

Kotarba, A., 1995. Rapid mass wasting over the last 500 years in the high Tatra mountains. Quaestiones Geographicae, Special issue 4 : 177-183 .

____ 1997. Formation of high-mountain talus slopes related to debris-flow activity in the high Tatra mountains. Permafrost and Periglacial Processes, 8 : 191-204.

Kotarba, A. et Strömquist, L., 1984. Transport, sorting and deposition processes of alpine debris slope deposits in the Polish Tatra Mountains. Geografiska Annaler, 66A, 4 : 25-37.

Krumbein, W. C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology, 29 : 575-587.

Krzemien, K., 1988. The dynamics of debris flows in the upper part of the Starorobocianska Valley. Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 22 : 123-143.

Leroux, M., 1996. La dynamique du temps et du climat. Masson, Paris, 310 p.

Loye-Pilot, M. D., 1984. Coulées boueuses et laves torrentielles en Corse : exemple de mouvements de terrain en pays méditerranéen montagnard. *In* Mouvements de Terrain, Série Documents du Bureau de Recherche Géologique et Minière, Orléans, 83 : 23-28.

Luckman, B. H., 1992. Debris flow and snow avalanche landforms in the Lairig Ghru, Cairngorn Mountains, Scotland. Geografiska Annaler, 74A (2-3) : 109-121.

Meunier, M., 1991. Éléments d'hydrologie torrentielle. Centre d'Étude du Machinisme Agricole, Série Études Montagnes 1, 176 p.

Mlakar, J. M., 1992. Les tufs et travertins du Col du Lautaret : paléoenvironnements et anthropisation des milieux alpins d'altitude. Mémoire de DEA, Université d'Aix Marseille II, Aix-en-Provence, 125 p.

Nieuwenhuijzen, M. E. et Van Steijn, H., 1990. Alpine debris flows and their sedimentary properties. A case study from French Alps. Permafrost and Periglacial Processes, 1 : 111-128.

Pech, P., 1993. Méthode d'analyses pour la modélisation de dépôts de pente en haute montagne. Premières rencontres Théo Quant. Besançon, CNRS, p. 107-111.

____ 1996. Mesures de la cryoreptation sur le plateau de Bure (2600 m) dans le massif du Dévoluy (Hautes Alpes, France). Géomorphologie : Relief, processus, environnement, 4 : 37-60.

Rapp, A. et Nyberg, R., 1981. Alpine debris flows in northern Scandinavia. Geografiska Annaler, 63A (3-4) : 183-196.

Statham, I., 1976. Debris flows on vegetated screes in the Black Moutain, Scarmarthenshire. Earth Surface Processes and Landforms, 1 : 173-180.

Strunk, H., 1989. Dendrogeomorphology of debris flows. Dendrochronologia, 7 : 13-23.

____ 1992. Frequency distributions of debris flows in the Alps since the " Little Ice Age ". Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl., 83 : 71-81.

Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow. Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers 104, Proceedings Paper 13971 : 1153-1169.

____ 1980. Debris flow on prismatic open channel. Journal of the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers 106, Proceedings Paper0 15245 : 381-396.

____ 1981a. Debris flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 13 : 57-77.

____ 1981b. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones : Soft countermeasures for a disaster. Journal of Natural Disaster Science, 3 : 57-89.

Takahashi, T., Ashida, K. et Sawai, K., 1981. Delineation of debris flow hazard areas, p. 589-603. *In* Erosion and Sedimentation in Pacific Rim Steeplands, Proceedings of Christchurch Symposium, January 1981, International Association of Hydrological Survey, Publications 132.

Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. et Yamashiki, Y., 1992. Routing debris flows with particle segregation. Journal of Hydraulic Engineering, 118 : 1490-1507.

Van, Asch T. W. J. et Van Steijn, H., 1991. Temporal patterns of mass movements in the French Alps. Catena, 18 : 515-527.

Van Steijn, H., 1996. Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. Geomorphology, 15 : 259-273.

Van Steijn, H. et Coutard, J. P., 1989. Laboratory experiments with small debris flows : Physical properties related to sedimentary characteristics. Earth Surface Processes and Landforms, 14 : 587-596.

Van Steijn, H., De Ruig, J. et Hoozemans, F, 1988. Morphological aspects of debris flows in parts of the French Alps. Zeitschrift für Geomorpholgie, 32 : 143-161.

Wegman, E. J. et Wright, I. W., 1983. Splines in statistics. Journal of the American Statistical Association, 78 : 351-365.

Woodcock, N. H., 1977. Specification of fabric shapes using an eingenvalue method. Geological Society of America Bulletin, 88 : 1231-1236.

Young, A., 1972 . Slopes. Oliver Boyd, Edinburgh, 290 p.

Zhicheng, K. et Yuzhang, W., 1992. A study of the relationship between deposit density and debris flow type, p. 247-252. *In* Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. Proceedings of the Chengdu Symposium, 1992. International Association of Hydrological Survey, Publication 209.