

Analyse de scénarios d'événements « laves torrentielles » dans le bassin versant de l'Arbonne (Bourg-Saint- Maurice, Savoie, France)

P. LAUGIER
R. COJEAN

Centre de géologie de
l'ingénieur
EMP/ENPC/UMLV
Université Marne-la-Vallée,
Bâtiment IFI
5, boulevard Descartes,
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée
Cedex 2
laugier@cgi.ensmp.fr,
cojean@cgi.ensmp.fr

Résumé

L'analyse de scénarios réalistes d'événements « laves torrentielles », dans un bassin versant donné, contribue à la prévention des risques. Elle nécessite la reconnaissance des zones sources de matériaux mobilisables et des processus élémentaires à l'origine de la génération des laves torrentielles. Cinq facteurs de prédisposition sont identifiés, liés aux angles de pentes, aux caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations superficielles et du substratum, à l'érodabilité des formations géologiques et aux conditions de mouvements de masse, à la granularité des matériaux des zones sources et aux volumes disponibles dans ces zones. La cartographie des indices correspondant à ces facteurs permet d'établir une carte de synthèse de l'aléa « génération de laves torrentielles ». L'application au bassin versant de l'Arbonne, permet de mettre en évidence les zones sources de matériaux et les processus potentiels de génération de laves torrentielles. Des scénarios d'événements sont construits, prenant appui sur la connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant tirée de données d'archives et sur la mise en œuvre de techniques d'analyse (« arbres d'événements », « arbres de défauts ») inspirées de celles mises en œuvre dans le domaine des risques industriels.

Mots-clés : lave torrentielle, facteur de prédisposition, cartographie d'aléa, processus de génération, scénario d'événement, Arbonne.

Analysis of scenarios of debris flow events in the arbonne catchment (Bourg-Saint-Maurice, Savoie, France)

Abstract

The analysis of scenarios of debris flow events, in a given catchment, contributes to risk prevention. Source area materials have to be identified as well as elementary processes of initiation and mobilization of debris flows. Five predisposition factors are identified, related to slope angle, geological and hydrogeological conditions of superficial deposits and bedrock formations, slope erodibility and mass movement conditions, grain size distribution of source area materials and available volumes in these source areas. The mapping of the corresponding indexes allows to elaborate a synthetic hazard map related to « debris flow initiation ».

Introduction

L'érosion torrentielle, très active dans le domaine alpin, est responsable de crues torrentielles et laves torrentielles (ou *debris flows*) parfois catastrophiques. Peu connues du « grand public » et souvent confondues par les médias avec les coulées boueuses ou les écoulements torrentiels classiques, les laves torrentielles sont des phénomènes spécifiques des régions de montagne, souvent déclenchés par de violentes pluies d'orage. Des volumes importants de roches et de sols gorgés d'eau, en général de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes par événement, peuvent alors être mobilisés sur les pentes et s'écouler dans le chenal du torrent, donnant l'impression que celui-ci vomit une lave, tel un volcan. Un garde forestier décrit une « lave », déclenchée le 13 août 1876 par un violent orage sur les crêtes du bassin versant du Faucon, près de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence), en ces termes :

« A mes pieds, le lit du torrent, profond de huit mètres environ et large de vingt-cinq mètres, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent à cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant le lit du torrent. C'était la lave qui venait de la montagne et qu'il m'était donné d'observer dans toute son intensité [...]. C'est un amalgame de terre et de blocs de grosseurs variées, ayant à peine la fluidité du béton. En avant, à moitié prise dans cette boue très épaisse, une avant-garde de gros blocs cubant parfois jusqu'à cinq et six mètres cubes semble poussée par la lave. Ces rochers, qui sont entraînés pendant quelques minutes, sont engloutis dans le chaos qui les suit dès qu'ils trouvent un obstacle qui les arrête. Ils sont alors remplacés par d'autres, qui sont poussés et bientôt engloutis à leur tour [...]. Cependant cette lave devient de plus en plus liquide et dès lors animée d'une vitesse toujours croissante. L'eau, arrivant avec une grande force, forme des lames qui atteignent jusqu'à 2 mètres de hauteur [...]. Elles entraînent ainsi les blocs assez gros qui souvent paraissent à la surface, s'entrechoquent sans cesse et font un épouvantable fracas [...]. Enfin l'eau devient presque claire, se creuse un passage au milieu des débris. »

Cette description, d'un grand réalisme, rassemble des éléments essentiels sur le phénomène « lave torrentielle », objet de nombreux travaux de recherche quant aux processus d'initiation et de mobilisation, d'écoulement et de dépôt. Une fois formée et chenalisée dans le lit du torrent, la lave torrentielle s'écoule par bouffées successives, avec des vitesses variant de quelques m/s à plus de 20 m/s suivant les cas. Les dommages aux ouvrages de correction torrentielle dans le bassin versant (seuils et barrages), aux zones

The application to the Arbonne catchment highlights source areas and debris flow initiation and mobilization processes. Scenarios of debris flow events are elaborated. They rely on the knowledge of the catchment hydrological behaviour, derived from archives data, and the implementation of analysis techniques (« event tree » and « fault tree ») inspired by industrial risk methods.

Key words : debris flows, predisposition factor, hazard mapping, initiation processes, event scenario, Arbonne.

d'habitat sur le cône de déjection du torrent ou dans la vallée principale, aux infrastructures (routes, voies ferrées, etc.) peuvent être considérables. Un événement « lave torrentielle » peut se développer sur quelques heures ou plusieurs jours consécutifs et représenter des volumes de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de m³. Chaque bassin versant semble avoir un comportement spécifique dans la mesure où la génération de laves torrentielles est contrôlée par le contexte géologique et géomorphologique, par l'héritage des périodes froides du Quaternaire et, dans certains cas, par l'action de l'homme (impact des stations d'altitude sur le milieu naturel, etc.). Tel bassin versant produira chaque année une ou plusieurs laves torrentielles, tel autre ne produira une lave, éventuellement catastrophique, que tous les 5 ans ou tous les 30 ans. Les estimations des probabilités de volumes ou de débits de laves torrentielles, dans un bassin versant donné, sont ainsi difficiles à réaliser ou peu précises.

Dans cet article on s'applique à décrire les facteurs de prédisposition et les processus de génération, ainsi qu'à définir des scénarios réalistes d'événements prenant appui sur une méthodologie d'étude toujours en cours de perfectionnement. La méthode d'analyse est développée sur le bassin versant de l'Arbonne (région de Bourg-Saint-Maurice, Savoie).

Environnements climatique, géologique et hydrologique du bassin versant de l'Arbonne

Données générales

Le climat de la région de Bourg-Saint-Maurice est de type intra-alpin, avec une température moyenne annuelle de 9 °C, un module pluviométrique de 940 mm/an (moyenne sur la période 1946-1999) mesurés à la station de Bourg-Saint-Maurice et une persistance du manteau neigeux de l'ordre de 5 mois au-dessus de la cote 1 500 m.

Ce bassin versant, situé au nord-ouest de Bourg-Saint-Maurice, présente une superficie d'environ 15 km². Il est limité au NW et au nord par une ligne de crête bien marquée, allant du Grand Châtelet au Fort de La Platte, en passant par Le Roignais, le Roc de l'Enfer et les Deux Antoinettes (Figs. 1 et 2). Au SW et au sud, de même qu'à l'est, il est limité par une ligne de crête d'interfluvies peu marquée dans la topographie.

L'axe de drainage principal est orienté NW-SE. Du point culminant (pic du Roignais, cote 2 995 m) à l'apex

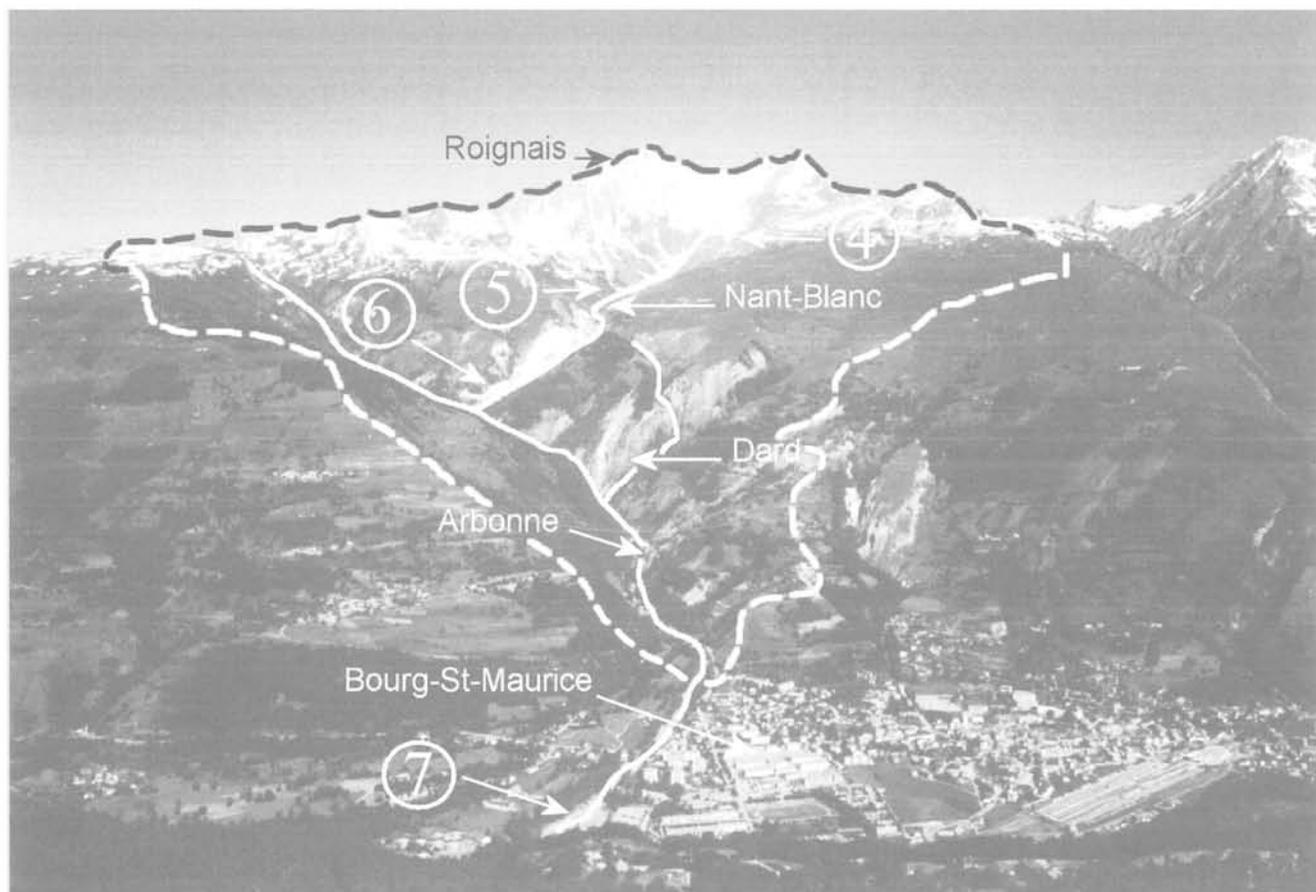


FIG. 1 Vue d'ensemble du bassin versant de l'Arbonne (photos des figures 4, 5, 6 et 7 repérées).
General view of the Arbonne catchment (photos of figures 4, 5, 6 and 7 located).

du cône de déjection (cote 900 m), ou au point de confluence avec l'Isère (cote 800 m), on mesure une pente moyenne respectivement de 20° ou 18°. Des pentes bien plus fortes s'observent évidemment au pied des crêtes du Roignais (ancien cirque glaciaire) et dans les gorges étroites du Nant-Blanc, principal affluent rive gauche de l'Arbonne. Ce torrent est reconnu pour être à l'origine des plus fortes laves torrentielles produites dans le passé.

2.2

Cadre géologique

2.2.1

Les formations du substratum

Le contact chevauchant de la *zone briançonnaise* sur la *zone valaisanne* traverse le bassin versant, le torrent de l'Arbonne suivant ce contact sur une grande partie de son parcours (Fig. 3). Entre ces deux unités tectoniques, la *zone des gypses*, d'une part, et la *zone sub-briançonnaise*, d'autre part, affleurent près de la confluence de l'Arbonne et du Nant-Blanc. Une zone qualifiée d'« origine paléo-géographique incertaine » affleure au nord du bassin versant jusqu'au Roc de l'Enfer.

La *zone briançonnaise* est représentée par des formations du Houiller (Carbonifère), constituées d'alter-

nances de schistes, grès et anthracite. Le versant rive droite de l'Arbonne est modelé dans cette zone.

La *zone des gypses*, siège de différents processus de dissolution très actifs, chevauche la zone d'« origine paléo-géographique incertaine ». Elle est composée de gypses triasiques, ainsi que de cargneules très altérées. Elle englobe l'écaïlle tectonique de la *zone sub-briançonnaise*.

La *zone d'« origine paléo-géographique incertaine »* constitue une grande partie du versant nord. Elle est constituée principalement de formations du Houiller. Cette zone présente de nombreuses failles d'orientation WSW-ENE, principalement entre le Roc de l'Enfer et les Deux Antoinnes.

La *zone valaisanne* est représentée dans le haut bassin versant par le flysch de Tarentaise (Crétacé supérieur).

2.2.2

Les formations superficielles

D'une grande diversité, elles reflètent la complexité géologique du bassin versant. Elles portent la marque d'un héritage glaciaire par la présence de nombreux dépôts morainiques et de nombreuses « masses glissées » anciennes, aujourd'hui reprises par des processus plus récents de glissements et d'érosion particulière. Au pied des hautes pentes rocheuses du Roignais et des crêtes nord, des éboulis caillouteux proviennent de la désagrégation des versants modelés dans les « Flyschs de Tarentaise ». Les formations du Houiller

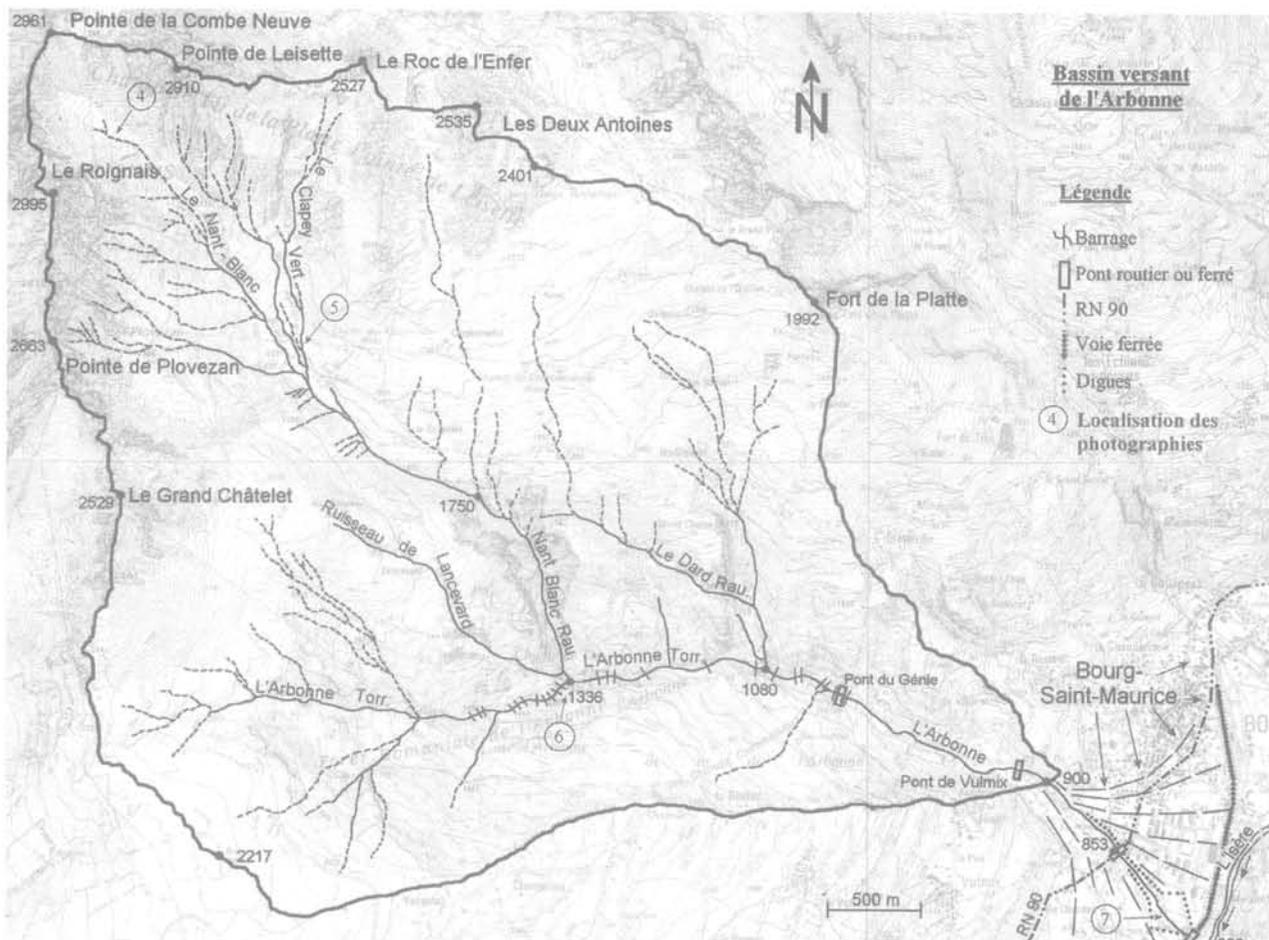


FIG. 2 Réseau de drainage du bassin versant de l'Arbonne, ouvrages de correction torrentielle et zone aval menacée (photos des figures 4, 5, 6 et 7 repérées).
Drainage pattern of the Arbonne catchment, engineering works related to torrent activity control and downstream endangered area (photos of figures 4, 5, 6 and 7 located).

briançonnais, instables en de nombreux endroits, génèrent en rive droite du torrent de l'Arbonne des masses glissées et des colluvions schisteuses et argileuses. Au niveau de la gorge du Nant-Blanc, c'est l'érosion rapide des berges de gypse et de cargneules qui est à l'origine d'ébouillements grossiers hétérométriques.

Les moraines anciennes couvrent une grande partie du bassin versant. Quelques cordons morainiques sont visibles ainsi que d'anciennes formations de « glaciers rocheux » en altitude. Plus souvent il s'agit de dépôts glaciaires repris dans des processus de solifluxion ou de glissement de terrain.

Des alluvions torrentielles et surtout les dépôts de laves torrentielles, s'observent le long du cours du Nant-Blanc en amont des gorges, au niveau de sa confluence avec l'Arbonne et dans le cours inférieur de l'Arbonne.

2.3

Cadre hydrologique et hydrogéologique

2.3.1

Principaux torrents

L'Arbonne et le Nant-Blanc constituent les deux axes de drainage du bassin versant. L'axe majeur, de 7 km de

longueur, est constitué par le Nant-Blanc et le cours inférieur de l'Arbonne après la confluence Nant-Blanc/Arbonne (cote 1 336 m). Un rôle secondaire est joué par le ruisseau de Lancevard et le ruisseau du Dard.

Le Nant-Blanc prend sa source au niveau du cirque du Roignais (Fig. 4) et draine l'ensemble des plus hautes pentes du bassin versant. Puis la pente s'atténue jusqu'à 10° environ, dans une zone d'épandage naturel de dépôts torrentiels et de laves torrentielles, « en transit » entre les cotes 2 100 m et 1 900 m (Fig. 5). La pente s'accroît plus en aval au passage des impressionnantes gorges du Nant-Blanc, le torrent excavant gypse et cargneules (Fig. 6). Le torrent du Nant-Blanc est connu pour la formation de laves torrentielles dévastatrices, par purges de dépôts torrentiels accumulés dans son lit ou par ruptures de ses berges, accompagnées d'embâcles de dépôts dans le lit du torrent puis rupture de ces barrages naturels et formation de laves. Mougin (1914) relate le comportement capricieux de ce torrent, en particulier sa disparition au milieu du XV^e siècle à la faveur de la formation d'un écoulement karstique ou du décolmatage d'anciennes galeries karstiques, ce qui effraya les populations, puis sa réapparition en surface sept ans plus tard, sans doute par nouveau colmatage ou effondrement du réseau karstique. Il s'en suivit une rupture brutale des berges gypseuses et la formation d'une lave exceptionnelle qui submergea une grande partie de la ville de Bourg-Saint-Maurice (« seule de tous les édifices envahis, la flèche du clocher émergeait

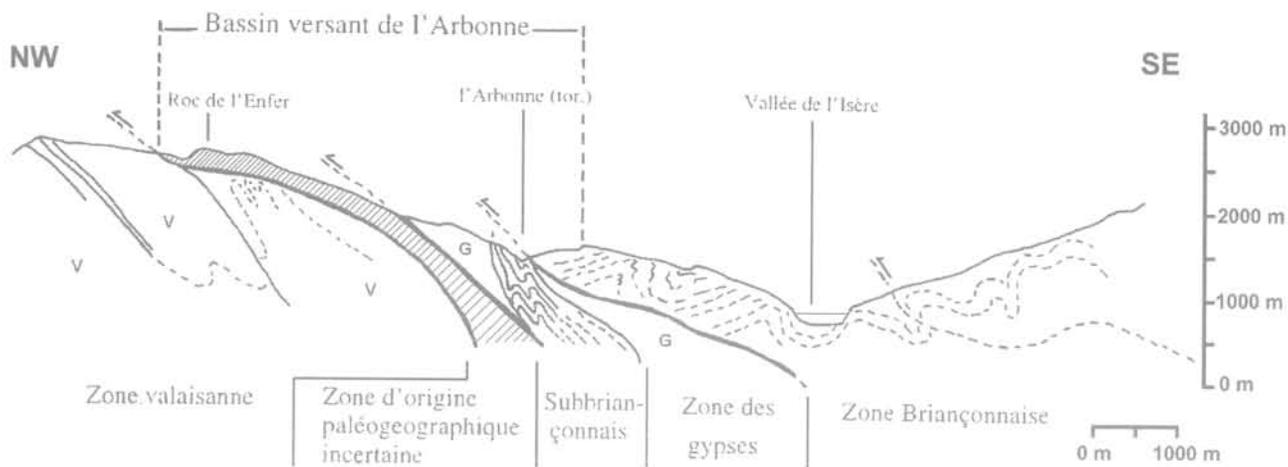


FIG. 3 Coupe géologique simplifiée NW-SE du bassin versant de l'Arbonne (d'après la carte géologique 1/50 000, n° 727, BRGM).
NW-SE simplified geological cross-section of the Arbonne catchment (after geological map 1/50 000, n° 727, BRGM).

du milieu des déjections et des boues ») qui fut reconstruite plus à l'est, quelque peu à l'écart du chenal d'écoulement de l'Arbonne.

L'Arbonne, en aval de sa confluence avec le torrent du Nant-Blanc, présente un lit encaissé, avec des passages en gorges rocheuses, avant d'atteindre le cône de déjection qui se développe sur une superficie d'environ 100 ha. L'activité torrentielle de l'Arbonne, amplifiée par celle du Nant-Blanc, est assez forte pour avoir repoussé le cours de l'Isère sur sa rive gauche, processus régulièrement entretenu, notamment lors de la crue du 24 juillet 1996 (Fig. 7).

2.3.2

La capture du Dard par le Nant-Blanc

Un ensemble d'éléments morphologiques et géologiques concourent à mettre en évidence un phénomène d'érosion très spectaculaire, vraisemblablement d'âge holocène : la capture du ruisseau du Dard par le torrent du Nant-Blanc. Ainsi peut-on observer l'alignement du cours moyen du torrent du Nant-Blanc avec la courte section supérieure du ruisseau actuel du Dard (Fig. 2),

section particulièrement creusée alors que pratiquement aucun écoulement ne s'y observe aujourd'hui et que le bassin d'alimentation de cette section est extrêmement réduit. A ce niveau on observe de plus un coude marqué dans le parcours du Nant-Blanc dont la direction passe de NW-SE à N-S. Enfin, le Nant-Blanc présente une rupture de pente significative juste en amont de ce raccordement. Ce torrent, alors qu'il n'était qu'un court affluent rive gauche de l'Arbonne, a capturé par érosion régressive tout le bassin versant amont d'un ancien Dard. Le Nant-Blanc est aujourd'hui dans une phase d'érosion spectaculaire, de par la nature des matériaux constituant ses berges dans sa partie aval (gypse, cargneules) et de par le processus d'érosion qui se propage au-delà de cette zone de capture vers l'amont, à partir de la rupture de pente indiquée, le torrent n'ayant pas atteint un profil d'équilibre stabilisé dans cette partie de son cours.

L'intensité des phénomènes d'érosion associés à cette morphologie en pleine évolution explique l'importance des zones de versant déstabilisées ou en proie à un ravinement intense et l'importance des zones sources de laves torrentielles dans cette partie du bassin versant.



FIG. 4 Cirque du Roignais (Flyschs de Tarentaise, éboulis instables), cote 2 995-2 150.
Roignais cirque (Tarentaise Flyschs, unstable scree), elevation 2,995-2,150.



FIG. 5 Zone d'épandage naturel des laves torrentielles, en amont de la gorge du Nant-Blanc, cote 2 150-2 000.
Natural debris flows deposition area, upstream from Nant-Blanc gorges, elevation 2,150-2,000.

Méthodologie de cartographie de l'aléa « génération de laves torrentielles »

3.1

Introduction

Les laves torrentielles sont généralement déclenchées par un événement climatique exceptionnel, mais elles s'expliquent par un contexte géomorphologique et climatique donné, l'historique de certains aménagements dus à l'homme pouvant apporter une part d'explication.

Des travaux récents sur la génération de laves torrentielles (Bonnet-Staub, 1998 ; Cojean et Staub, 1998) ont montré que les zones sources de matériaux à l'origine de la génération de laves torrentielles, présentent un ensemble de caractéristiques spécifiques. L'analyse d'un bassin versant fait ainsi apparaître des facteurs de prédisposition au déclenchement des laves torrentielles (cinq catégories de facteurs ou conditions ont été retenues) : conditions de relief, conditions de matériaux et de structures géologiques, conditions d'érodabilité (incluant le degré d'ouverture de la couverture végétale) et de mouvements de versants, conditions géotechniques relatives aux matériaux des zones sources et conditions de volume mobilisable au cours d'un même événement. La cartographie de ces facteurs de prédisposition conduit à l'élaboration de cinq cartes analytiques d'où est dérivée une carte de synthèse relative à l'aléa « génération de laves torrentielles ». Cette carte met en évidence des zones sources particulières à partir desquelles peuvent être identifiés des processus d'initiation et de mobilisation de laves torrentielles (Cojean et Genevois, 1999).

D'un point de vue méthodologique, la démarche est directement inspirée de travaux initiés dans les années 60-70 et poursuivis depuis, traitant de cartographie géotechnique (Sanejouand, 1972 ; Dearman et Fookes, 1974 ; IAEG, 1976), cartographie environnementale (McHarg, 1969), cartographie des aléas et des risques naturels (Antoine et Pachoud, 1976 ; Varnes, 1984 ; Leroi, 1996 ; CFGI, 2000).

3.2

Caractérisation des cinq facteurs de prédisposition à l'initiation de laves torrentielles

3.2.1

Indice I_{SA} (Slope Angle Index)

Cet indice, en rapport avec des conditions d'énergie potentielle, de pente et de dénivelé contrôle l'intensité des forces érosives lors de pluies intenses ou d'orages de grêle ainsi que les gradients hydrauliques des écoulements hypodermiques qui se développent au sein des formations superficielles. Il est directement en



FIG. 6 Gorge du Nant-Blanc. Gypse et éboulis instables en rive droite, cargneules en rive gauche. Masses glissées anciennes à l'arrière-plan, cote 1 750-1 350.
Nant-Blanc gorges. Gypsum and unstable screes on the right bank and cargneule on the left bank. Failed masses in the background, elevation 1,750-1,350.

rapport avec les conditions de stabilité des pentes.

Les différentes classes de pente retenues pour ce bassin versant sont les suivantes :



FIG. 7 Plage de dépôt (en partie artificielle) de l'Arbonne. Vue vers l'aval (voie ferrée sur la gauche), cote 850-800.
Deposition area of the Arbonne torrent. Downstream view (railway track on the left), elevation 850-800.

TABLEAU I

Valeurs de l'indice I_{AV} en fonction des volumes et des types de matériaux.
 Values of I_{AV} index as a function of volumes and types of materials.

| Volumes | Matériaux de dépôts torrentiels | Matériaux de berges instables et de zones d'érosion | Matériaux de versants instables et facilement mobilisables par un torrent | Autres (versants) |
|---------------------------------|---------------------------------|---|---|-------------------|
| < 1 000 m ³ | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 1 000 à 5 000 m ³ | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 5 000 à 30 000 m ³ | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 30 000 à 100 000 m ³ | 4 | 3 | 2 | 1 |
| > 100 000 m ³ | 5 | 4 | 3 | 1 |

- $I_{SA} = 5$: pentes supérieures à 40° ;
- $I_{SA} = 4$: pentes comprises entre 40° et 25° ;
- $I_{SA} = 3$: pentes comprises entre 25° et 10° ;
- $I_{SA} = 2$: pentes comprises entre 10° et 5° ;
- $I_{SA} = 1$: pentes inférieures à 5°.

Les valeurs seuils sont choisies en fonction des angles d'équilibre limite de quelques catégories de formations superficielles (éboulis de gravité, etc.) ou en rapport avec les conditions de pentes de mobilisation de matériaux suivant différents processus de glissement de terrain ou de départ de lave torrentielle.

3.2.2

Indice I_{GH} (Geological and Hydrogeological Index)

Cet indice rend compte du contexte lithologique, structural, hydrologique et hydrogéologique concernant les formations superficielles et le substratum. Il s'applique à des zones considérées comme zones sources potentielles, sans méconnaître le rôle de bassin de réception hydrologique et hydrogéologique pouvant être joué par les secteurs en amont de ces zones.

Les différentes classes retenues pour cet indice sont les suivantes :

- $I_{GH} = 5$: dépôts torrentiels, zones d'« embâcles » dans un chenal, gypse altéré, éboulis de gravité actifs ;
- $I_{GH} = 4$: moraines récentes, formations de pente sur gypse ;
- $I_{GH} = 3$: altérites schisto-gréseuses, masses de Houiller glissées, moraines anciennes ;
- $I_{GH} = 2$: éboulis de gravité stabilisés, cargneules, schistes du Houiller, marno-calcaires ;
- $I_{GH} = 1$: calcaires, dolomies, quartzites, flyschs de Tarentaise, schistes et grès du Houiller sain.

3.2.3

Indice I_{EM} (Erodibility and Mass Movement Index)

Cet indice, en rapport avec l'érodabilité des pentes et l'état de stabilité des versants ou des berges du torrent, conditionne la production plus ou moins aisée de matériaux solides. Le degré d'ouverture de la couverture végétale, son absence totale bien souvent et les indices d'érosion active sur certaines pentes permettent de juger de la disponibilité des matériaux qui seraient soumis à des pluies érosives ou des averses de

grêle. Les déformations en cours, visibles sur certains versants, ou l'état de rupture caractérisé permettent de juger de la résistance au cisaillement mobilisable dans les matériaux concernés : résistance de pic ou résistance résiduelle.

Les différentes classes retenues pour cet indice sont les suivantes :

- $I_{EM} = 5$: zones comportant des indices d'instabilité généralisée (berges instables, glissements de terrain actifs) ;
- $I_{EM} = 4$: zones de ravinement, zones d'« embâcles » dans un chenal, avec risque de rupture ;
- $I_{EM} = 3$: zones de solifluxion et de gélifluxion ;
- $I_{EM} = 2$: zones de mouvements de versant anciens stabilisés (éboulis de gravité, masses glissées, anciens glissements) ;
- $I_{EM} = 1$: zones stables.

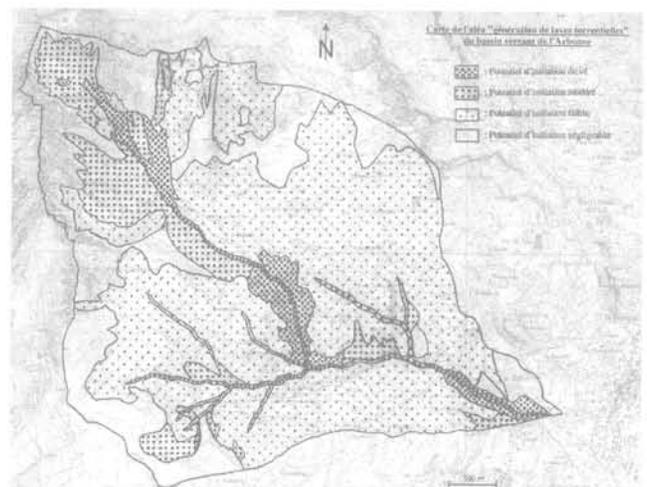


FIG. 8

Carte de l'aléa « génération de laves torrentielles » du bassin versant de l'Arbonne (1/25 000).

« Debris flows initiation » hazard map of the Arbonne catchment (1/25,000).

Indice I_{GS} (Geotechnical or Grain Size Distribution Curve Index)

Cet indice, lié aux caractéristiques pétrophysiques et mécaniques des matériaux constituant les zones sources potentielles, contribue à définir l'érodabilité et la mobilité des matériaux susceptibles de contribuer à la formation d'une lave torrentielle. Le paramètre granularité semble jouer le rôle primordial, suivant les travaux de Bonnet-Staub (1998). Deux fuseaux granulométriques définis à partir de la matrice (fraction inférieure à 20 mm) ont été identifiés pour les matériaux des zones sources de laves torrentielles à matrice granulaire d'une part, à matrice cohésive d'autre part. La coupure 50 μm permet de bien séparer ces deux types de matériaux, de même que d'autres types de matériaux peu susceptibles d'être mobilisés en laves (matériaux trop granulaires ou trop argileux).

Les différentes classes retenues pour cet indice sont les suivantes :

- $I_{GS} = 5$: formations superficielles avec 16 % < ($\% < 50 \mu\text{m}$) < 40 % : dépôts torrentiels, altérites schisteuses du Houiller, dépôts morainiques, colluvions de schistes et de cargneules ;
- $I_{GS} = 4$: formations superficielles avec 3 % < ($\% < 50 \mu\text{m}$) < 16 % : gypse altéré, éboulis sablo-graveleux, colluvions de schistes du Houiller ;
- $I_{GS} = 3$: formations superficielles avec 40 % < ($\% < 50 \mu\text{m}$) < 50 % : matériaux argileux, colluvions ;
- $I_{GS} = 2$: formations superficielles avec ($\% < 50 \mu\text{m}$) < 3 % ou ($\% < 50 \mu\text{m}$) > 50 % : alluvions torrentielles, éboulis caillouteux à blocs ;
- $I_{GS} = 1$: formations du substratum autres que altérites.

3.2.5

Indice I_{AV} (Available Volume Index)

Ce paramètre, dont la quantification est difficile, joue pourtant un rôle essentiel. Il représente le volume de matériau qui serait susceptible d'être mobilisé et rapidement chenalisé par un torrent à l'occasion d'un événement pluviométrique ou hydraulique particulier. Pour le définir « objectivement » il est nécessaire de fixer conventionnellement une unité de surface (1 ha) susceptible d'être concernée par un événement climatique, de prendre en considération l'épaisseur moyenne des matériaux mobilisables sur le secteur considéré et d'analyser (en prenant appui sur une connaissance précise du terrain) les possibilités de chenalisation rapide.

Le tableau I représente les valeurs de l'indice, en fonction du volume mobilisable et du type de matériau considérés dans le cas du bassin versant de l'Arbonne.

3.3

Carte de l'aléa « génération de laves torrentielles »

La carte d'aptitude à la génération de laves torrentielles (Fig. 8) est construite par superposition des cinq cartes analytiques relatives aux facteurs de prédisposition et addition des valeurs d'indices suivant une méthodologie déjà présentée par Bonnet-Staub (1998) et Sorgi-de Gennaro (1999). Il en résulte la définition de

quatre classes de potentiel d'initiation et l'identification des zones correspondantes qui seront considérées dans l'analyse de scénarios d'événements présentés par la suite :

- classe 1 : potentiel d'initiation négligeable (somme des indices : 5 à 10) ;
- classe 2 : potentiel d'initiation faible (somme des indices : 11 à 15) ;
- classe 3 : potentiel d'initiation modéré (somme des indices : 16 à 20) ;
- classe 4 : potentiel d'initiation élevé (somme des indices : 21 à 25).

3.3.1

Zones à potentiel d'initiation négligeable (classe 1)

La classe 1 correspond à des zones où le substratum affleure (crêtes du Roignais par exemple) ou à des zones du SW du bassin versant où les pentes sont très faibles.

3.3.2

Zones à potentiel d'initiation faible (classe 2)

La classe 2 concerne la plus grande superficie du bassin versant : versant sud de l'Arbonne modelé dans les schistes du Houiller instables mais boisés, nappes d'éboulis (au pied des reliefs calcaires et dolomitiques au nord du bassin versant) non susceptibles d'être mobilisés et surtout chenalisés dans le lit des torrents, formations glaciaires anciennes sur faible pente et en prairie.

3.3.3

Zones à potentiel d'initiation modéré (classe 3)

Cette classe concerne des zones à prendre en considération dans les analyses de scénarios d'événements : bassin supérieur du Nant-Blanc aux pentes fortes recouvertes d'éboulis de flysch ou de dépôts morainiques fournissant les premiers matériaux nécessaires au départ d'une lave, zones de schistes du Houiller particulièrement instables et proches du lit d'un torrent.

3.3.4

Zones à potentiel d'initiation élevé (classe 4)

Les zones correspondant à cette classe réunissent l'ensemble des caractéristiques nécessaires à une initiation de laves torrentielles : bassin supérieur du Nant-Blanc où se présentent d'anciens dépôts de laves torrentielles « en transit », lit du Nant-Blanc (encombré de dépôts torrentiels épais avant son entrée dans les gorges), berges et versants des gorges du Nant-Blanc instables et ravinées, avec nombreux risques d'« embâcles » en cas de glissement de terrain obstruant le lit du torrent, lit de l'Arbonne (sur la plus grande partie de son parcours) encombré de nombreux dépôts et aux rives instables.

Les facteurs de prédisposition considérés dans cette analyse ne sont pas immuables à l'échelle des temps

géologiques quaternaires. Certains de ces facteurs peuvent même évoluer quelque peu à l'échelle des temps actuels. Cela signifie que les cartes de facteurs de prédisposition (et la carte de synthèse qui en résulte sur l'aléa « génération de laves torrentielles ») ne doivent pas être définitivement figées. Les aménagements récents (stations d'altitude, aménagements forestiers, correction des torrents, etc.) contribuent aussi à une modification volontaire de l'environnement.

Il faut donc se préoccuper des processus, naturels ou anthropiques, susceptibles de faire évoluer certains de ces facteurs au cours du temps (forte altération de certains matériaux sensibles ou évolutifs au sens de la géotechnique, modification progressive de certains paramètres mécaniques dans des zones de déformation active de versants, lente évolution de niveaux piézométriques dans les versants, modifications du couvert végétal, modifications des bilans hydrologiques en réponse à certaines opérations d'aménagement (imper-méabilisation des sols, etc.).

Remarque : Il faut observer que les valeurs numériques données aux indices des facteurs de prédisposition ont été choisies sachant que la technique d'agrégation de ces valeurs serait additive. Par ailleurs, l'ajustement final des classes a été réalisé en considérant les valeurs obtenues, dans la carte de synthèse, par certaines zones du bassin versant bien connues et servant de zones tests. Pour valider complètement cette méthode, autrement qu'en faisant référence à un « jugement d'expert », ce qui est pratiqué ici, il serait nécessaire de disposer d'un niveau de connaissance des facteurs de prédisposition considérés nettement plus élevé que celui usuellement accessible, sur le plan cartographique, à l'échelle d'un bassin versant montagneux tel que celui de l'Arbonne. Si ces conditions existaient avec les données géoréférencées correspondantes, les outils SIG (systèmes d'information géographique) et ceux de l'analyse statistique permettraient une approche plus pertinente des paramètres de prédisposition (définition et nombre) et de la technique d'agrégation des facteurs (addition, multiplication ou autre technique).

3.4

Processus d'initiation et de mobilisation des laves torrentielles

De nombreux auteurs ont décrit des processus de génération de laves torrentielles reconnus dans les Alpes ou dans d'autres régions (le terme de génération regroupant ici l'initiation et la mobilisation, processus conduisant ensuite à la chenalisation de la lave dans le lit du torrent). Ainsi diverses observations, descriptions ou classifications sont présentes dans Stiny (1910), Mougins (1914), Johnson et Rodine (1984), Takahashi (1991), Meunier (1991, 1994). Reconnaisant les multiples rôles joués par l'eau dans ces processus de génération (Cojean, 1994), nous avons progressivement (Cojean et Staub, 1998 ; Cojean et Genevois, 1999) construit une typologie de génération de laves torrentielles comprenant 12 types :

- *Type 1* : Érosion par impact de gouttes de pluie et de grêlons (avec un effet de *firehose* ou jet d'eau), destruction et mobilisation des particules et agrégats des sols et formations superficielles, ruissellement.
- *Type 2* : Ruissellement intense, avec de fortes

vitesses d'écoulement et une érosivité créant rigoles et ravines. Les roches intensément altérées, les formations de pente (éboulis instables et moraines) sont concernées.

- *Type 3* : Rupture de poches d'eau sous-glaciaires provoquant un brusque apport d'eau mobilisant des dépôts morainiques et des formations de pente.

- *Type 4* : Fonte du permafrost et des lentilles de glace dans les sols gelés, fonte du manteau neigeux, mobilisant des formations de pente, avec le concours d'averses orageuses.

- *Type 5* : Liquéfaction de dépôts de pente granulaires, due à de forts gradients hydrauliques, spécialement dans les parties hautes du bassin versant.

- *Type 6* : Glissements de terrain (premières ruptures ou réactivations selon des surfaces de cisaillement pré-existantes) mobilisés en coulées boueuses ou directement en laves torrentielles.

- *Type 7* : Mobilisation de formations de pente par brusque apport d'eau aux points d'émergence d'écoulements souterrains karstiques et de fissures (souvent dans des formations de gypse et de cargneules) ;

- *Type 8* : Glissements actifs fournissant du matériau solide au torrent et générant une lave, avec parfois un phénomène de liquéfaction des dépôts saturés du torrent par suite de l'impact des masses glissées.

- *Type 9* : Éboulement ou glissement de terrain rapide bloquant le lit du torrent et formant barrage, rapidement suivi d'une rupture avec mobilisation des matériaux en laves torrentielles.

- *Type 10* : Sous-cavages et ruptures de berges hautes et instables du torrent.

- *Type 11* : Mobilisation de dépôts de laves torrentielles en transit dans le chenal, due à l'élévation de la surface piézométrique de l'écoulement hypodermique et/ou aux forces érosives de l'écoulement de surface.

- *Type 12* : Rupture d'« embâcles » de blocs ou de troncs d'arbres dans le lit du torrent, puis impact de la vague sur des dépôts torrentiels saturés et mobilisés en laves torrentielles.

Bien souvent, au cours d'un événement donné, plusieurs de ces processus d'initiation et de mobilisation se réalisent à partir d'une même zone source. Dans le bassin versant de l'Arbonne un grand nombre de ces processus sont justifiables et permettent de construire des scénarios réalistes d'événements.

4

Analyse historique du comportement hydrologique du bassin versant

On ne saurait entreprendre l'analyse de scénarios d'événements qui suit sans se référer aux données d'archives relatant les caractéristiques de certains événements « laves torrentielles » exceptionnels : événement déclenchant, volume de matériaux atteignant le cône de déjection, vitesses d'écoulement, zones recouvertes par les dépôts, dommages observés. Ainsi, Mougins (1914) rapporte des travaux d'historiens mentionnant que sous l'empereur César Lucius Aurélius Verus, en l'an 163 de notre ère, des travaux d'endiguement de l'Arbonne et de relèvement des

ponts étaient déjà entrepris pour se protéger des crues torrentielles du torrent (inscriptions gravées sur une pierre venant de l'ancienne *Bergintrum*, nom latin de Bourg-Saint-Maurice). La ville médiévale fut aussi très largement détruite au XIV^e siècle suite à la crise du Nant-Blanc (évoquée en 2.3.1) et reconstruite quelque peu à l'écart du chenal principal de l'Arbonne (avant que les abords de ce chenal ne soient à nouveau réinvestis dans les temps récents). Des crues ou des laves torrentielles très violentes eurent lieu en 1630 (52 maisons détruites) et en 1732 (Bourg-Saint-Maurice envahi, Isère barrée, débâcle vers l'aval et presque tous les ponts détruits jusqu'à Grenoble) pour ne citer que deux exemples. Le pont sur la RN 90 (Fig. 2) fut emporté à de multiples reprises ou la RN90 endommagée (en 1810, 1824, 1857, 1868, 1878, 1948, 1996).

L'analyse des archives du service ONF-RTM de Savoie, du Cemagref de Grenoble et du bureau Sogreah permet de mettre en évidence certaines données à caractère statistique (Fig. 9) ou d'illustrer certains scénarios récents :

- avec une fréquence biennale à quinquennale, on observe des crues liquides ou de petites laves atteignant ou non l'Isère, sans débordement du lit, avec des volumes de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de m³ ;
- avec une fréquence approximativement décennale, on observe des laves torrentielles importantes débordant localement et susceptibles d'endommager les ouvrages (seuils, protections, ponts), avec des volumes de 50 000 à 100 000 m³ ;

- avec une fréquence cinquantennale à centennale, on observe des laves torrentielles exceptionnelles entraînant un débordement généralisé sur une large partie du cône de déjection et emportant des ouvrages, avec des volumes de 100 000 m³ à plusieurs centaines de milliers de m³.

Le déroulement de deux crues torrentielles récentes, avec formation de laves torrentielles est instructif :

- la crue du 24/07/96 s'est produite à la suite d'averses orageuses (75 mm relevés en 18 h à Bourg-Saint-Maurice). Une lave torrentielle, transportant des blocs de plusieurs m³ et présentant un volume total estimé à environ 250 000 m³ ou 300 000 m³, s'est formée au niveau du Nant-Blanc et a atteint le cône de déjection. La violence de l'événement a été telle que le cours de l'Isère a été repoussé sur sa rive gauche. C'est au niveau du bassin de réception du Nant-Blanc que les précipitations ont été les plus violentes et les plus abondantes, centrées sur la Pointe de Leisette (Fig. 2). Les laves se sont générées dans la gorge du Nant-Blanc, entre les côtes 1 750 m et 1 335 m. Entre les cotes 1 550 m et 1 450 m, des mouvements de terrain (glissements de masses gypseuses et de cargneules, remobilisation de formations de pente instables) ont apporté des volumes de matériaux importants dans le lit du torrent. Des « embâcles » se seraient constitués à plusieurs reprises et, cédant, auraient alimenté des laves successives ;
- la crue du 13/08/97 résulte d'un orage violent, déclenché sur les crêtes du Roignais. A nouveau, le Nant-Blanc a joué un rôle important. Dans le bassin de réception de ce torrent, des laves se sont générées dans des ravines issues de la crête de Leisette et au niveau

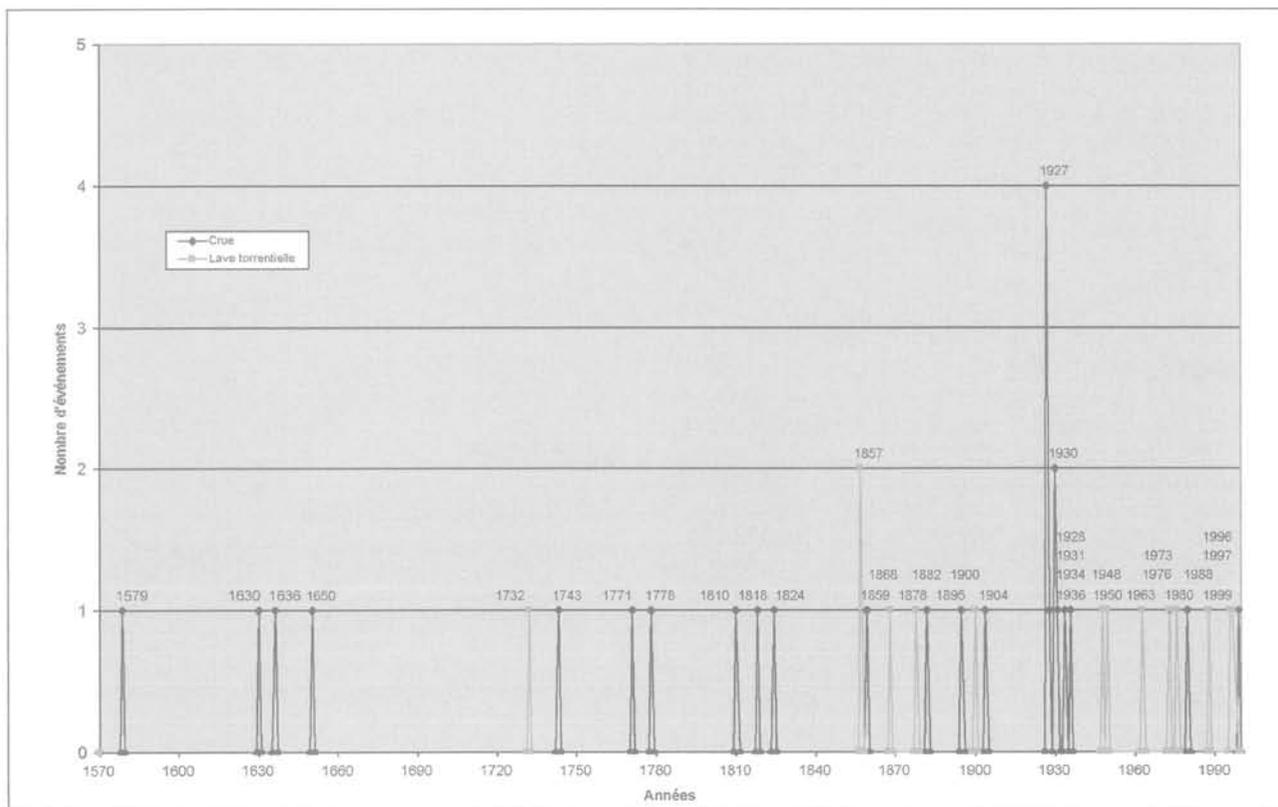


FIG. 9 Crues et laves torrentielles du bassin versant de l'Arbonne depuis 1579 (d'après archives du service ONF-RTM de Savoie).
Torrential floods and debris flows of the Arbonne catchment since 1579 (after ONF-RTM archives).

du torrent affluent du Clapey Vert (Fig. 2). Ces laves se sont propagées jusqu'à la gorge du Nant-Blanc, laissant sur leur trajet une grande partie de leur charge solide, déstabilisant lors de leur passage les berges entre les cotes 1 850 m et 1 750 m. Dans la gorge du Nant-Blanc, les laves ont sous-cavé les berges et bas de pentes, s'alimentant alors à nouveau et formant une nouvelle lave vers la cote 1 550 m dans les gorges. Puis, tout au long du chenal de l'Arbonne, la lave a déposé en partie sa charge solide sur de faibles épaisseurs.

5

Analyse de scénarios d'événements de laves torrentielles

5.1

Introduction

A partir de la carte d'aléa « génération de laves torrentielles », il est possible de construire des scénarios de déclenchement de laves et de propagation de l'écoulement, scénarios inspirés des méthodes d'analyse du risque industriel (Villemeur, 1988), sur le plan méthodologique. On peut observer en effet qu'un bassin versant susceptible de générer des laves torrentielles constitue un « système géomorphologique et hydrologique » présentant un amont et un aval. Cette notion d'amont et d'aval se retrouve aussi dans les systèmes industriels. De plus, il importe d'identifier dans un bassin versant des facteurs déclenchants (et les « arbres d'événements » correspondants), susceptibles d'entraîner des conséquences dommageables pour l'aval. De même, considérant un enjeu particulier (digue de pro-

tection, voie SNCF) dans ce bassin versant, il importe de rechercher alors tous les scénarios réalistes susceptibles de conduire à des effets dommageables sur cet enjeu (construisant ainsi des « arbres de défauts »). La recherche des facteurs déclenchants et des « composants » potentiellement défaillants, les tentatives pour cerner les probabilités de déclenchement et de défaillance des constituants des systèmes et comprendre les enchaînements possibles peuvent inspirer des démarches d'analyse dans le domaine des risques naturels. Une démarche de ce type a été mise en œuvre par Archetti et Lamberti (1999) sur le petit bassin versant d'Acquabona (Alpes dolomitiques, Italie).

Avant d'appliquer ces méthodes, une connaissance approfondie du milieu est évidemment nécessaire et doit s'acquérir par des investigations de terrain et de laboratoire, de nature géologique, géomorphologique, hydrogéologique et géotechnique. L'établissement de fiches-type d'analyse de scénarios, la réalisation d'une cartographie de facteurs de prédisposition et un zonage de l'aléa « génération de laves torrentielles » participent de cette démarche (Laugier et Cojean, 2000). Une recherche d'archives (en particulier aux services de Restauration des Terrains en Montagne de l'ONF) relatant l'activité torrentielle passée est évidemment indispensable afin d'évaluer les intensités et fréquences des phénomènes torrentiels et comprendre le comportement hydrologique du bassin versant.

5.2

Méthode des arbres de défaillance (fault tree method) ou arbres des causes

L'analyse est déductive. Par rapport à un élément de l'ouvrage ou du système (le bâti, la voirie, consi-

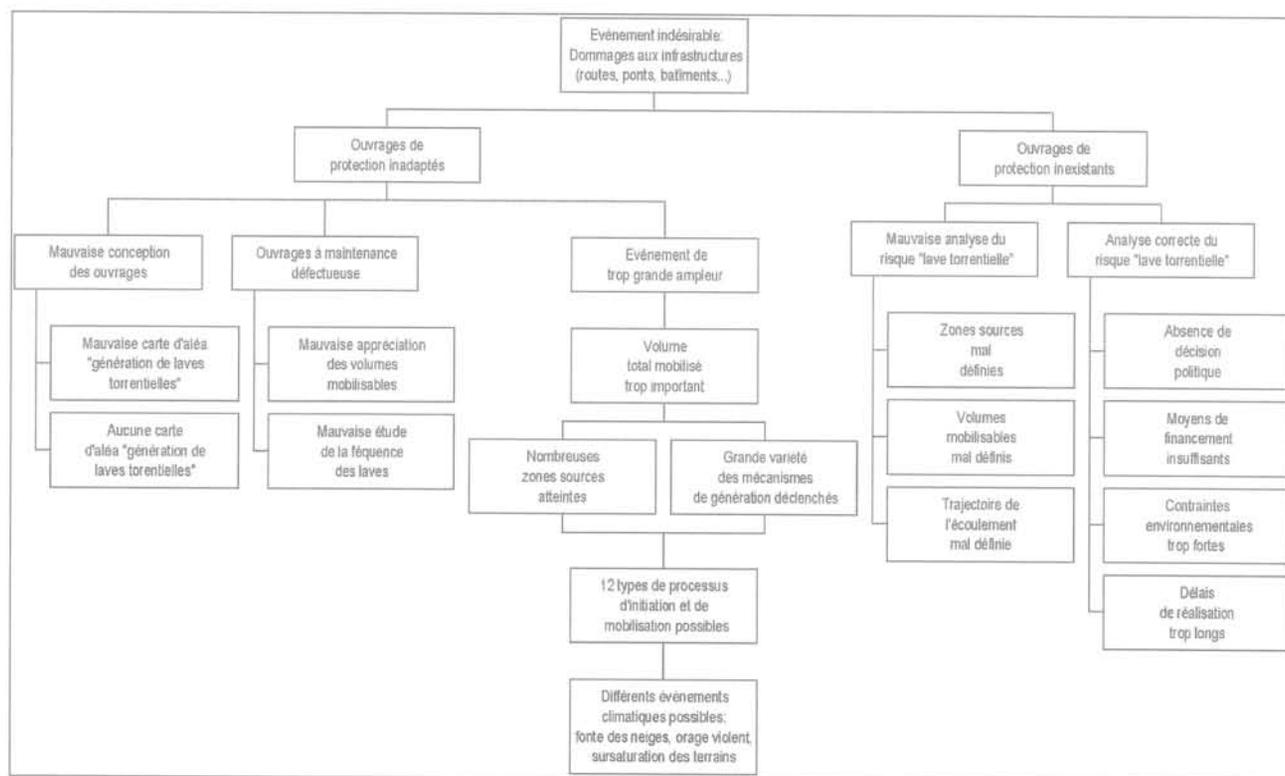


FIG. 10 Arbre des défaillances général relatif à des dommages résultant de l'activité torrentielle. General fault tree related to damage due to torrential activity.

déré comme générateur de conséquences graves en cas de défaillance, on recherche l'événement ou les conjonctions d'événements susceptibles de conduire à cette défaillance. On peut espérer évaluer la probabilité d'occurrence de cette défaillance à partir des probabilités d'occurrence des événements élémentaires. On construit donc une arborescence se développant d'un aval vers un amont (d'un effet vers des causes).

Il faut donc commencer par une étude de vulnérabilité, recenser tous les ouvrages de correction torrentielle, le bâti et la voirie susceptibles d'être concernés par des dommages dus aux laves torrentielles. Envisageant des dommages sur tel ouvrage, les causes à rechercher peuvent être multiples : implantation contestable (zones du cône de déjection menacées d'après des données historiques), mauvais dimensionnement (digues trop basses, résistance insuffisante à des impacts successifs), entretien défectueux (plages de dépôts non curées), etc. (Fig. 10). Progressivement la démarche conduit vers la reconnaissance d'un ou plusieurs événements initiateurs pouvant être à l'origine du ou des dommages considérés.

Dans le cas de l'Arbonne, on doit considérer :

- des dommages aux digues canalisant le lit du torrent dans son parcours à l'entrée du cône de déjection ;
- une obstruction du passage supérieur de la RN90 au-dessus de l'Arbonne ;
- des dommages qui concerneraient des habitations et aménagements divers sur le cône de déjection et qui résulteraient de l'occurrence d'une lave de fort volume comblant l'espace aménagé en plage de dépôt dans la partie inférieure du cône de déjection et débordant de cet espace ;
- des dommages à la voie ferrée en partie aval du cône de déjection.

Cependant cet inventaire des dommages possibles n'étant pas *a priori* exhaustif, il est intéressant de développer une approche complémentaire, celle des arbres d'événements.

5.3

Méthode des arbres d'événements (*event tree method*) ou arbres des conséquences

L'analyse peut être inductive ou déductive. Toutes sortes d'événements initiateurs d'un écart de fonctionnement de l'ouvrage ou du système, par rapport à son fonctionnement « normal », sont considérées. Pour chacun d'eux, l'analyse la plus exhaustive possible des séquences d'effets induits est réalisée, en repérant évidemment toutes les conséquences jugées dommageables. On construit ainsi une arborescence se développant d'un amont vers un aval (d'une cause vers des conséquences).

Un événement climatique, localisé sur un secteur géographique défini (violent orage sur les crêtes du Roignais par exemple), peut constituer le point de départ d'une arborescence (Fig. 11). Le ou les processus d'initiation susceptibles d'affecter les matériaux des zones sources potentielles identifiées par la carte d'aléa « génération de laves torrentielles » sont considérés, puis les processus de mobilisation, de chenalisation

dans le lit torrentiel et de dépôts le long du parcours ou sur le cône de déjection sont considérés, voire simulés numériquement.

A titre d'illustration on considère un événement déclenchant, présumé de forte probabilité, et les conséquences en résultant (prenant appui sur notre connaissance du terrain et des archives) :

- lors d'un violent orage d'été ou d'une pluie intense sur un manteau neigeux en cours de fonte, déclenchement de plusieurs petites laves au pied des crêtes du Roignais dans des formations meubles de nappes d'éboulis (Figs. 2 et 4) ;
- chenalisation de cette lave de faible volume par le Nant-Blanc, apport d'eau par ses affluents (Clapey-Vert, etc.) et remobilisation de dépôts de laves anciennes (Fig. 5) ;
- augmentation de la vitesse avant l'entrée dans les gorges du Nant-Blanc du fait du rétrécissement du lit du torrent ;
- progression rapide dans les gorges, sous-cavage des berges et mobilisation de nouveaux matériaux (Fig. 6) ;
- ralentissement avant la confluence avec l'Arbonne du fait de la diminution de pente, puis accélération à la confluence du fait de l'arrivée d'un débit liquide important ;
- avancée saccadée de la lave dans le lit moyen de l'Arbonne du fait de la succession de seuils et barrages, avec peu de dépôts laissés le long des berges ;
- en dessous de la cote 1 000 m, remobilisation de faibles volumes d'anciennes laves avant l'arrêt par diminution de pente et élargissement du chenal au niveau de la plage de dépôts (Fig. 7).

L'arbre d'événements (Fig. 11) établi comprend huit séquences ou scénarios possibles, chaque séquence résultant d'une succession d'événements élémentaires :

- la séquence S_1 est très simple. Les zones sources n'étant pas atteintes par les pluies ni par le ruissellement qui en découle, l'initiation de laves est inexistante. Un scénario identique se présente pour la séquence S_2 , les chenaux torrentiels se trouvant trop éloignés des zones sources concernées pour canaliser les écoulements ;
- la séquence S_3 met en œuvre la propagation de la lave qui reste bloquée au niveau des gorges du Nant-Blanc. Cette situation n'est possible que si le volume de la lave est relativement faible (par rapport aux volumes disponibles plus en amont), bien inférieur à 5 000 m³. Les embâcles peuvent ne pas arrêter totalement la lave en mouvement, mais diminuent sa vitesse. La lave peut par la suite s'arrêter lors d'une diminution de la pente. De même, pour la séquence S_4 l'arrêt intervient par diminution de la pente et débordement au niveau d'une courbure prononcée. Compte tenu de la grande distance parcourue par des laves générées dans les environs du Roignais, si elles sont de faible volume (de l'ordre de quelques milliers de m³), elles ne peuvent passer tous les obstacles présents sur le lit du Nant-Blanc puis sur celui de l'Arbonne. Elles s'arrêtent avant d'avoir pu provoquer des dégâts en aval ;
- les quatre séquences S_5 , S_6 , S_7 et S_8 correspondent à une lave qui parvient jusqu'à la plage de dépôts avant la confluence avec l'Isère. Les différences entre les séquences sont dues aux volumes mobilisés et à l'efficacité des protections en place. Ces dispositifs de protection et les mesures d'entretien correspondantes (bar-

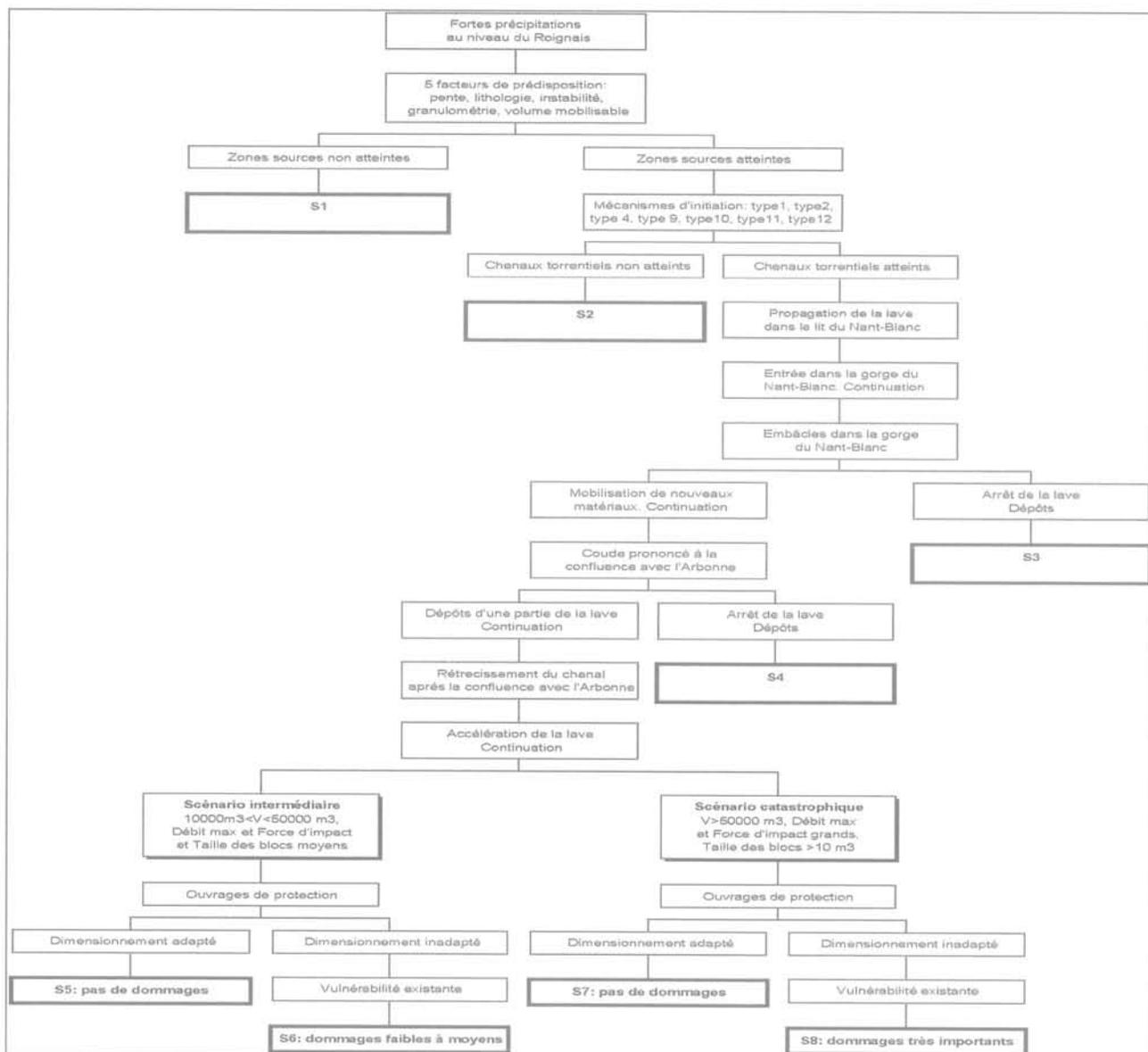


FIG. 11 Arbre d'événements correspondant à l'un des scénarios principaux sur le bassin versant de l'Arbonne. Event tree related to a major debris flow scenario in the Arbonne catchment.

rages, digues situées en amont immédiat de la route nationale pour canaliser un grand volume de lave et de crue torrentielle, lit du torrent dégagé de tout dépôt dès le sommet du cône de déjection, vers la cote 900 m environ) jouent un rôle fondamental dans le déroulement des séquences. De même, le dimensionnement de certains ouvrages de franchissement du lit de l'Arbonne (route nationale, voie ferrée), par leur gabarit, interfère avec le déroulement de l'événement. Enfin le mode de remplissage de la plage de dépôts, lors des arrivées des laves successives, contrôlera d'éventuels processus de débordement sur le cône de déjection.

5.4

Quelle quantification de ces méthodes d'analyse ?

Pour ces deux méthodes, la succession des événements considérés peut être analysée dans le cadre de

la théorie des graphes, prenant en compte des probabilités d'occurrence pour chacun des événements considérés, analysant l'indépendance ou non de ces événements.

Dans notre cas il faudrait être en mesure d'attribuer des probabilités d'occurrence à chaque événement élémentaire et aux séquences en résultant. Dans le cas des systèmes industriels une analyse des fréquences des pannes des composants permet de déterminer un taux de panne pour chacun d'entre eux et de développer une telle approche probabiliste. Mais les systèmes naturels sont fort complexes, et nos données d'archives, très précieuses, sont cependant insuffisantes pour tirer des conclusions de nature statistique sur des événements initiateurs qui nous semblent par ailleurs fortement non stationnaires. On pourrait espérer avoir des éléments plus concrets sur les taux de défaillance partielle ou totale des ouvrages de correction torrentielle, du bâti, de la voirie. La connaissance des types de dépendance entre ces défaillances possibles et la prise en compte de probabilités condition-

nelles permettraient de définir la probabilité d'occurrence de telle ou telle séquence identifiée comme réaliste.

Nous sommes encore loin de cet objectif, peut-être d'ailleurs bien théorique. Cependant, le seul développement de la démarche d'analyse des arbres de défauts et des arbres d'événements a le mérite de forcer la recherche de scénarios réalistes et de les « révéler » en quelque sorte, ce qui permet alors de concevoir les dispositifs ou ouvrages permettant de limiter les dommages qui pourraient résulter de tels scénarios et de mettre en œuvre les méthodes de surveillance adaptées.

6

Conclusion

Le développement des vallées de montagne, des infrastructures de transport et des stations d'altitude rend de plus en plus vulnérable le milieu montagnard. Les risques liés à l'activité torrentielle et spécialement aux laves torrentielles doivent faire l'objet d'analyses approfondies. Les données d'archives apportent une connaissance précieuse sur le comportement hydro-

gique d'un bassin versant. Elles doivent être complétées par des investigations de terrain détaillées visant à comprendre les processus de génération de laves torrentielles pour ensuite envisager des modélisations d'initiation et de mobilisation d'une lave, de chenalisation et d'écoulement, d'arrêt enfin. Dans cet article, les efforts ont été concentrés sur l'identification des zones sources potentielles dans le cas du bassin versant de l'Arbonne, avec la réalisation d'une carte d'aléa « génération de laves torrentielles », ainsi que sur l'analyse de scénarios d'événements complets utilisant les techniques d'arbres d'événements et d'arbres de défauts. Ces méthodes, inspirées de l'analyse des risques industriels, permettent d'établir une hiérarchisation des séquences menant aux dommages et de « révéler » des scénarios réalistes jusque-là peut-être non perçus. La définition des méthodes de prévention qui s'imposent alors ne peut que s'en trouver facilitée.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée avec le soutien financier de la Fondation MAIF dans le cadre d'un programme Risques naturels et Prévention, le service de Restauration des terrains en montagne (Savoie) de l'ONF ayant permis l'accès à ses archives.

Bibliographie

- Antoine P., Pachoud A. – « Enseignements tirés de deux essais de cartographie systématique de glissements de terrain ». *Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, vol. 1, n° spécial 2, 1976, p. 31-39.
- Archetti R., Lamberti A. – « Assessment of risk due to debris flow events. in Debris flow management and risk assessment in the Alpine region (Debris Flow Risk) ». Final Scientific Report, vol. 2, 1999. EC Research Programme, contract ENV4-CT96-0253.
- Bonnet-Staub I. – « Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. Contribution à la maîtrise du risque ». Thèse de doctorat (Géologie de l'ingénieur) de l'École des mines de Paris, 1998.
- Cojean R. – « Roles of water as a triggering factor for landslides and debris flows ». IAHR International Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements, Trent, Italy, 1994, p. A-13-1/A-13-19.
- Cojean R., Staub I. – Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. *Comptes rendus du 8^e Congrès de l'AGI*, Vancouver, Canada, Balkema, vol. 3, 1998, p. 2075-2082.
- Cojean R., Gènévois R. – « Debris flow triggering, in Debris flow management and risk assessment in the Alpine region ». Final Scientific Report, volume 1, EU contract ENV4 CT96 0253, 1999.
- Comité français de géologie de l'ingénieur – *Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*. Paris, publication LCPC, Coll. « Environnement », 2000.
- Dearman W.R., Fookes P.G. – « Engineering geological mapping for civil engineering practice in the United Kingdom ». *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 7, 1974, p. 223-256.
- International Association of Engineering Geology – *Engineering geological maps. A guide to their preparation*. Paris, Unesco, 1976.
- Johnson A.M., Rodine J.R. – « Debris flows ». In : Brunson D., Prior D.B. Eds. *Slope Instability*. John Wiley & Sons, 1984.
- Laugier P., Cojean R. – « Analysis of scenarios of debris flow events based on initiation hazard mapping. Application to the Arbonne catchment (Bourg-Saint-Maurice, France) ». Communication à EGS2000, Nice, France. Résumé 1 p., 2000.
- Leroi E. – « Landslide hazard. Risk maps at different scales: objectives, tools and developments ». *Comptes rendus du VII^e Symposium international sur les glissements de terrain*. Trondheim, vol.1, 1996, p. 35-51.
- McHarg I.L. – *Design with Nature*. New York, NHP, 1969.
- Meunier M. – *Éléments d'hydraulique torrentielle*. Études du Cemagref, série Montagne n° 1, 1991.
- Meunier M. – « Les progrès de la connaissance et les méthodes d'études des phénomènes torrentiels ». *La Houille Blanche*, n° 3, 1994, p. 25-31.
- Mougin P. – *Les torrents de la Savoie*. Grenoble, Grands Établissements de l'Imprimerie générale, 1914.
- Sanejouand R. – *La cartographie géotechnique en France*. Paris, ministère de l'Équipement et du Logement (DAFU), ARMINES, LCPC, 1972.
- Sorgi-de Gennaro C. – « 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 (Géologie de l'ingénieur) de l'École des mines de Paris, 1999.
- Stiny J. – « Debris flows Die Muren. Wagner'sche Universitätsbuchhandlung ». Translated from the German by Jakob M. & Skermer N. EBA Engineering Consultants Ltd, 1910.
- Takahashi T. – *Debris flows*. IAHR/AIRH Monograph, Balkema, 1991.
- Varnes D.J. – *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. IAEG Publication. Paris, Unesco, 1984.
- Villemeur A. – *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité. Facteurs humains*. Informatisation. Coll. de la Direction des études et recherches d'Électricité de France, Eyrolles, 1988.