

# Définition d'une typologie des dépôts de laves torrentielles et identification de critères granulométriques et géotechniques concernant les zones sources

## Definition of a debris flow deposit typology and identification of granulometric and geotechnical criteria for debris flow source area materials

I. Bonnet-Staub

**Résumé** L'étude détaillée de nombreux dépôts de laves torrentielles, prélevés dans 11 bassins versants des Alpes françaises, nous a permis de définir deux familles de laves, les laves à matrice cohésive et les laves à matrice granulaire (matériau écrêté à 20 mm). Leur typologie est précisée par des critères granulométriques discriminants relatifs aux fractions 20 à 200  $\mu\text{m}$ .

Lorsque les zones sources sont clairement identifiables, l'étude des échantillons prélevés dans ces zones montre que les matériaux mobilisés présentent des caractéristiques granulométriques et géotechniques proches de celles des laves torrentielles qu'ils ont générées. Ainsi, les dépôts de laves torrentielles portent la signature de la zone source principale, tant au niveau granulométrique, que pétrophysique et géotechnique, et rendent compte d'un faible tri granulométrique pendant la propagation de la lave torrentielle.

De plus, ces études mettent en exergue l'importance des caractéristiques des matériaux potentiellement mobilisables, et notamment du critère granulométrique, sur les conditions du déclenchement des laves torrentielles.

**Abstract** The paper discusses viscous and saturated flows which can propagate at high velocity in torrent channels, referred to here as debris flows. Specific morphological, textural and sedimentological criteria have been identified, on which to distinguish debris flows from other torrent deposits.

From a study of numerous debris flows sampled in 11 torrential catchment environments in the French Alps, two types of debris flows have been determined: those with a granular matrix and those with a cohesive matrix. Their typology is based mainly on the fraction of soil smaller than 20 mm although several discriminating particle size criteria have also been considered on the fraction between 20 and 200  $\mu\text{m}$ . The author has selected five criteria for study, that relative to the fractions  $< 50 \mu\text{m}$  being the most convenient.

Geotechnical tests have also been used as a complementary criterion for this typology. The values of the Atterberg limits and blue methylene tests are generally lower for the debris flows with a granular matrix (Fig. 8a and Table 5). In most situations, the plasticity index of debris flow deposits is low.

Received: 20 July 1998 · Accepted: 20 November 1998

I. Bonnet-Staub (✉)  
Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure  
des Mines de Paris/Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,  
60 Bd Saint Michel, F-75272 Paris Cedex 06, France  
Fax: +33-1-4326-3656  
e-mail: [staub\\_bonnet@hotmail.com](mailto:staub_bonnet@hotmail.com)

Both the soils sampled in the source areas and those mobilised as debris flows generally have particle size distributions and geotechnical characteristics similar to those of debris flow deposits reported in the literature.

The paper concludes that source materials with a granular matrix are more likely to result in debris flows (as defined here) while the source materials with a higher fine fraction are more likely to move as mud flows.

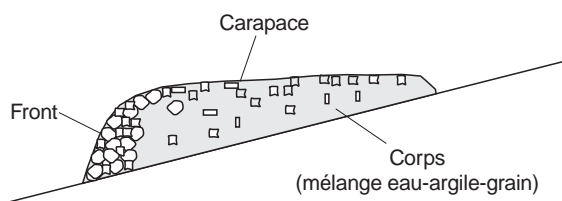
**Mots clés** Laves torrentielles · Zones sources · Paramètres granulométriques · Caractéristiques géotechniques

**Key words** Debris flows · Source areas · Granulometric parameters · Geotechnical characteristics

## Introduction: définition du terme laves torrentielles

Nous avons étudié, sous le terme laves torrentielles, un type particulier d'écoulements chenalés dans les lits des torrents. Les laves torrentielles sont constituées par une masse importante de matériaux solides (argiles, limons, sables et blocs) et fluides intimement mêlés qui s'écoule dans un chenal. Ainsi, les laves torrentielles sont composées de trois unités qui sont de l'aval vers l'amont, le front, le corps et l'écoulement terminal (Fig. 1). Le front est essentiellement constitué de blocs et éléments grossiers, la matrice étant en quantité négligeable. L'écoulement terminal est relativement fluide, et ses caractéristiques le placent dans les écoulements torrentiels hyperconcentrés. La partie la plus abondante à étudier est le corps de lave qui est formé par un dépôt hétérogène riche en matrice (définie dans la suite de l'article comme la fraction granulométrique inférieure à 20 mm). Les essais en laboratoire ont été réalisés sur ces échantillons de corps de laves.

Le pouvoir destructeur de ces laves est en partie lié à la présence du bourrelet frontal riche en blocs et parfois en troncs d'arbres, dont l'agencement peut contribuer à



**Fig. 1**

Schéma d'une bouffée de lave torrentielle

**Fig. 1**

Diagrammatic representation of a debris flow surge

former un véritable mur. D'après différentes mesures réalisées sur le terrain et données rapportées par Pierson (1980) et Meunier (1991), les concentrations volumiques solides de tels fluides ( $C_v = \text{Vol solide} / (\text{Vol solide} + \text{Vol fluide})$ ) sont d'environ 0.5 à 0.8, avec parfois des valeurs allant jusqu'à 0.3 pour des fluides relativement homogènes riches en fines. Pour comparaison, des études citent des valeurs de 0.01 à 0.25 pour les écoulements hyperconcentrés (Meunier 1991). Les laves torrentielles à forte concentration volumique solide sont donc des fluides à faible teneur en eau. Celle-ci peut être inférieure à la teneur en eau de produits de glissement dans des sols argileux.

Les laves torrentielles peuvent mobiliser plusieurs dizaines de milliers de  $\text{m}^3$  de matériaux en un seul événement et se propagent à des vitesses moyennes de 0.5 à 15 m/s, avec quelques rares événements pouvant atteindre une vitesse supérieure à 20 m/s.

La compréhension du phénomène lave torrentielle et de son déclenchement passe par l'identification des matériaux déposés, et des sols situés dans les zones sources. Dans ce but, nous avons étudié 11 bassins versants torrentiels des Alpes françaises, dont la dispersion géographique nous a permis d'aborder des contextes géologiques, géomorphologiques et climatiques diversifiés (Bonnet-Staub, Cojean et Bechetoille 1998). Nous avons également réalisé un échantillonnage espéré représentatif de laves torrentielles (34 échantillons) et de matériaux provenant des zones sources identifiées (22 échantillons pour 17 zones sources représentant 11 bassins versants). La comparaison des caractéristiques granulométriques, pétrophysiques et géotechniques de ces matériaux d'origines diverses nous a permis de mieux comprendre les changements qui survenaient lors de la transformation du matériau initial en laves torrentielles.

## Identification des matériaux étudiés

### Critères d'identification des dépôts de laves torrentielles sur le terrain

Sur le terrain, des critères morphologiques, sédimentologiques et texturaux permettent de différencier les dépôts de laves torrentielles des autres dépôts torrentiels classiques. Trois formations majeures sont observées dans les lits des torrents qui sont les alluvions torrentielles, les dépôts intermédiaires et les laves torrentielles (Tableau 1).

### Caractéristiques des matériaux des zones sources

La confrontation de différentes cartes thématiques (cartes géomorphologiques et géologiques, cartes hydrogéologiques et cartes des pentes) réalisées à partir des observations de terrain (Bonnet-Staub 1998) nous a permis d'identifier les zones sources potentielles des laves torrentielles. Parmi celles-ci, nous avons pu distinguer des zones sources véritables, reconnues pour avoir initié réellement des laves torrentielles, informations obtenues par des indices de

**Tableau 1**

Principales caractéristiques des différents types de dépôts torrentiels

**Table 1**

Main characteristics of different torrential deposits

Laves torrentielles	Alluvions torrentielles	Dépôts intermédiaires
Dépôt hétérométrique et grossier	Dépôt trié, dominance de graviers et sables	Dépôt assez hétérogène, avec quelques cailloux et petits blocs
Carapace et front de blocs		
Marges raides de hauteur variable, lobe frontal	Dépôts de fond de chenal, peu épais	Pas de marges bien nettes, dépôts en bordure du chenal, ou superposés aux laves torrentielles
Pas de granoclassement ni d'orientation des particules	Granoclassement ascendant	Granoclassement non systématique, mais orientation des particules
Particules fines remplissant les vides intergranulaires	Dépôt propre, texture ouverte ou semi-ouverte	Placage d'argiles autour des particules grossières et remplissage partiel des vides intergranulaires

terrain ou des documents d'archives. Beaucoup de ces zones d'initiation véritables sont des zones identifiées sur le terrain comme zones instables avant l'événement. Par ailleurs, quelques zones instables étudiées ne semblent pas en mesure d'initier des laves torrentielles, mais uniquement des glissements ou coulées boueuses.

Le choix des échantillons prélevés dans ces zones sources potentielles a été dicté par les observations géologiques et morphologiques, ainsi que par les conditions d'accessibilité de certains versants. La nature des échantillons prélevés est assez variable, mais ce sont majoritairement des produits de glissement et des éboulis, aux côtés desquels sont identifiés des altérites, des colluvions de pente et des moraines de nature variée.

## Caractéristiques granulométriques des dépôts de laves torrentielles et des matériaux des zones sources

En raison des contraintes de terrain et des conditions de représentativité de l'échantillon prélevé, il a été nécessaire de tamiser l'échantillon sur place à 20 mm. C'est donc sur

cette fraction inférieure à 20 mm que nous avons établi la typologie des dépôts.

### Les laves torrentielles

#### Critères granulométriques

D'un torrent à l'autre, voire dans un même bassin versant, nous avons identifié des dépôts de laves torrentielles d'aspect varié, dont les distinctions sont basées sur des critères granulométriques et morphométriques (Tableau 2).

En raison des caractéristiques texturales et morphométriques de ces dépôts, nous avons nommé le premier type de dépôts: laves à matrice cohésive, et le second: laves à matrice granulaire<sup>1</sup>. Cette définition ne prend nullement en compte les caractéristiques rhéologiques du matériau "lave torrentielle" chenalisé.

Les fuseaux granulométriques et la forme même des courbes granulométriques confirment la différence entre ces deux catégories de laves (Fig. 2).

Les pentes des courbes granulométriques de différents dépôts de laves à matrice cohésive sont très proches, et les

<sup>1</sup> Par simplification, dans certains graphiques et légendes de figures, nous les nommerons laves cohésives et laves granulaires.

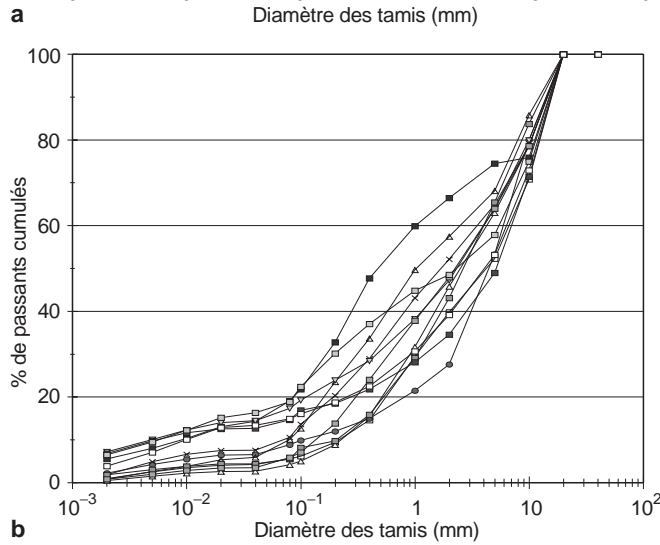
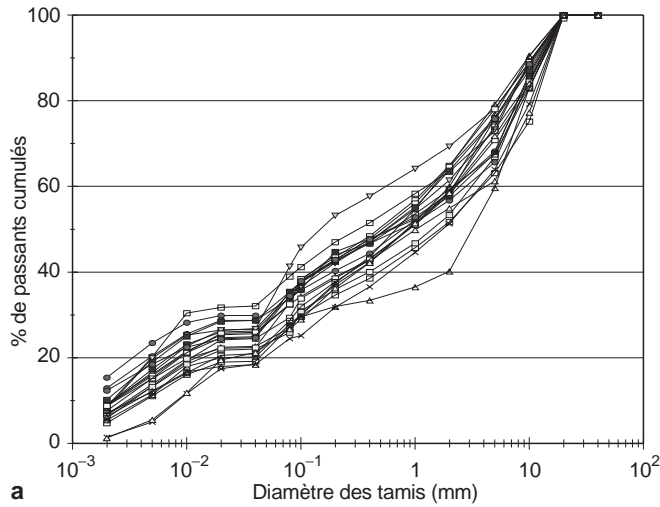
**Tableau 2**

Identification des critères distinctifs de terrain des laves torrentielles

**Table 2**

Field criteria to distinguish the two types of debris flows

Critères distinctifs	
Front relativement homométrique	Front très hétérométrique et grossier
Taille moyenne des blocs: 20–40 cm	Taille moyenne des blocs: 20–80 cm
Front étalé, lobes aplatis	Front plus haut, peu étalé
Matériau peu cohérent après dépôt, facilement lessivé en surface	Matériau très bien cimenté après dépôt
Matrice plutôt sableuse	Matrice sablo-limoneuse à limono-argileuse
Macroporosité	Microporosité
	↓
Laves à matrice granulaire	Laves à matrice cohésive



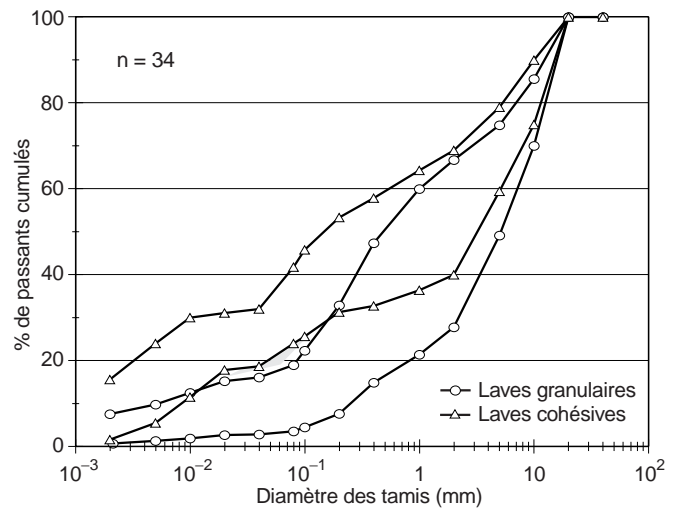
**Fig. 2** Courbes granulométriques (a) de laves à matrice cohésive et (b) de laves à matrice granulaire

**Fig. 2** Granulometric curves for (a) cohesive debris flows and (b) granular debris flows

échantillons définissent un fuseau relativement homogène, notamment dans les petites classes granulométriques (Fig. 2a). A l'inverse, les courbes des différents dépôts de laves à matrice granulaire sont très distinctes et expriment un léger tri granulométrique, qui implique la prédominance de certaines classes, principalement celles des éléments grossiers jusqu'aux sables (Fig. 2b).

La comparaison des fuseaux granulométriques définis par l'ensemble des échantillons de laves torrentielles de chaque famille montre l'existence de critères granulométriques discriminants entre 20 et 200  $\mu\text{m}$  (Fig. 3). Par contre, l'intersection des fuseaux dans les fractions inférieures à 10  $\mu\text{m}$  montre que le pourcentage d'argiles ne constitue pas un critère distinctif des deux familles de laves.

Les deux familles de laves torrentielles peuvent être distinguées par différents critères granulométriques définis sur le corps de lave écrété à 20 mm (Tableau 3). Nous avons



**Fig. 3** Fuseaux granulométriques des deux types de laves torrentielles  
**Fig. 3** Granulometric domains defined by each type of debris flows

retenu 5 critères, le critère moyen relatif à la fraction < 50  $\mu\text{m}$  nous paraissant le plus judicieux.

**Coefficients granulométriques**

L'étendue des courbes granulométriques se retrouve dans les valeurs des coefficients granulométriques qui sont très variables, et relativement élevées. Le coefficient de Trask  $S_0$  ( $D_{75}/D_{25}$ ) semble également être un bon critère pour différencier les deux familles de laves torrentielles, la limite entre les laves à matrice cohésive et à matrice granulaire correspondant à la valeur  $S_0 = 70$  (Tableau 4). A l'inverse, le  $D_{50}$  ne permet pas de différencier les deux familles de laves, même si la moyenne des valeurs apparaît plus élevée pour les échantillons de laves à matrice granulaire (Tableau 4). La variabilité des valeurs au sein d'une même famille de laves rend compte de l'hétérogénéité de la distribution des fractions granulométriques.

**Analyse de la matrice fine (inférieure à 2 mm)**

La représentation de la matrice fine (inférieure à 2 mm) dans le triangle de Jamagne (Fig. 4) confirme les observations réalisées sur les courbes granulométriques, à savoir

**Tableau 3** Critères distinctifs des types de laves torrentielles

**Table 3** Discriminating criteria for the two types of debris flows

Laves à matrice granulaire	Laves à matrice cohésive
Critères granulométriques relatifs au corps de lave, écrété à 20 mm	
- de 16% $d' < 20\mu\text{m}$	+ de 16% $d' < 20\mu\text{m}$
- de 18% $d' < 40\mu\text{m}$	+ de 20% $d' < 50\mu\text{m}$
- de 20% $d' < 50\mu\text{m}$	+ de 20% $d' < 50\mu\text{m}$
- de 24% $d' < 100\mu\text{m}$	+ de 24% $d' < 100\mu\text{m}$
- de 30% $d' < 200\mu\text{m}$	+ de 30% $d' < 200\mu\text{m}$

**Tableau 4**

Coefficients granulométriques caractéristiques en fonction de la typologie du dépôt torrentiel

**Table 4**

Granulometric coefficients for the two types of debris flows

	Nombre d'échantillons	$S_0^1$		$D_{50}$ (mm)	
		Valeurs	Moyenne	Valeurs	Moyenne
Laves à matrice cohésive	22	70.7–1166.7	265.8	0.3–4.7	1.1
Laves à matrice granulaire	12	5.3–69.2	26.1	0.5–5.3	2.9

<sup>1</sup>  $S_0$ : coefficient de mauvais triage, défini par le rapport ( $D_{75}/D_{25}$ )

que les argiles ( $< 2 \mu\text{m}$ ) ne constituent pas un critère discriminant entre les deux catégories de laves torrentielles: certaines laves à matrice granulaire sont plus argileuses que des laves à matrice cohésive. Par contre, le passage du domaine des laves à matrice granulaire aux laves à matrice cohésive est lié à un enrichissement en limons ( $2\text{--}50 \mu\text{m}$ ). Ainsi, les laves à matrice cohésive présentent une matrice de type sable limoneux ou argileux, ou limon moyen sableux, et les laves à matrice granulaire présentent une matrice de type sable ou sable limoneux, suivant les appellations propres au triangle de Jamagne. Il est intéressant de noter que le domaine des alluvions torrentielles étudiées est contenu dans le domaine des laves à matrice granulaire.

### Les matériaux des zones sources

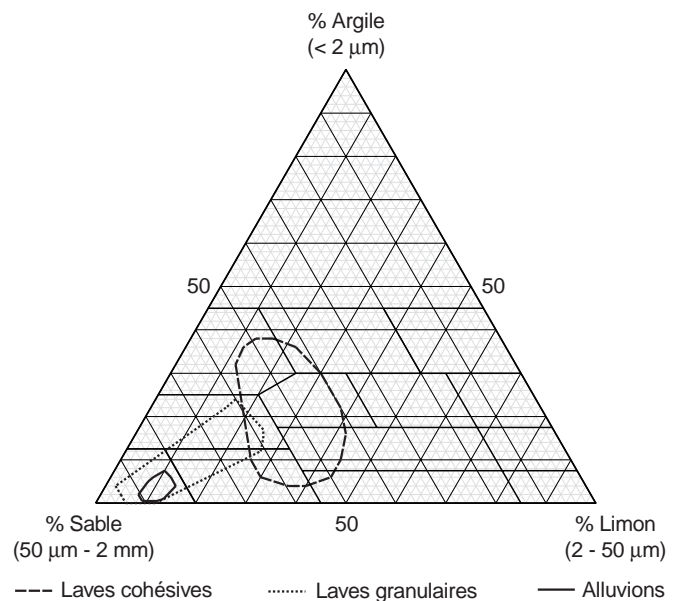
#### Etude au cas par cas

Pour différents bassins versants, nous avons établi des similitudes entre les caractéristiques granulométriques de certaines zones sources bien identifiées et celles de dépôts de laves torrentielles provenant du même bassin versant (Fig. 5). Ces comparaisons reflètent le faible tri granulométrique entre les matériaux des zones sources et des zones de dépôt. Contrairement aux autres écoulements torrentiels pour lesquels une ségrégation des matériaux se fait en fonction de la capacité de charriage et de transport en suspension de l'écoulement, la lave torrentielle mobilise dans son intégralité le matériau. Toutefois, nous avons également remarqué que certaines laves torrentielles, si elles portent la signature de la zone source identifiée, s'enrichissent quelque peu en cours de propagation en fraction grossière ou fine, selon le contexte, par érosion des berges ou du lit du torrent.

#### Comparaison des fuseaux granulométriques

La plupart des échantillons testés présentent des courbes granulométriques étalées et continues qui définissent des matériaux faiblement triés. La proportion de particules de taille inférieure à  $50 \mu\text{m}$  est généralement inférieure à 30%, sauf dans quelques cas où elle peut atteindre 50%.

Nous avons alors cherché à comparer la granulométrie des matériaux des zones sources véritables et des dépôts de laves torrentielles. Le fuseau des laves torrentielles et celui des zones sources véritables se superposent (Fig. 6b).


**Fig. 4**

Domaines des matrices des laves torrentielles et des alluvions (triangle de Jamagne)

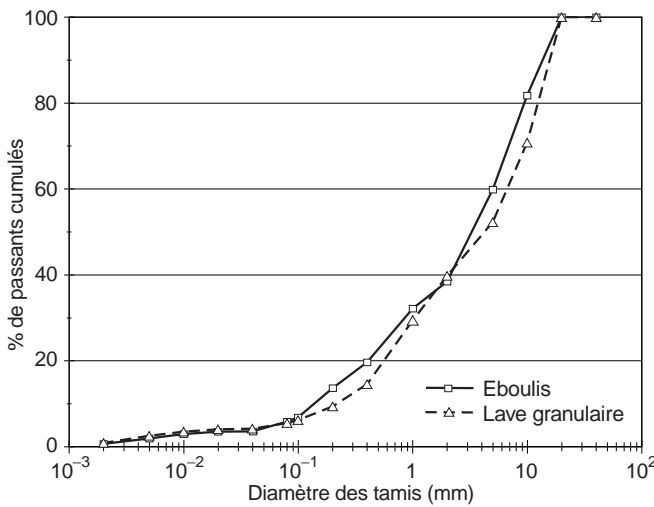
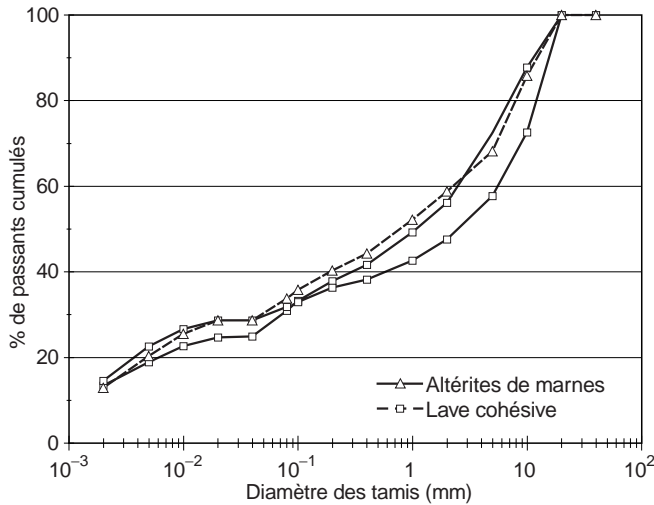
**Fig. 4**

Domains defined by the matrix composition of debris flows and alluvium

Cette similitude entre les fuseaux des laves torrentielles et des zones sources véritables signifie que les matériaux des zones sources doivent avoir des caractéristiques granulométriques particulières, pour être mobilisés en laves torrentielles. Ainsi, des zones instables trop riches en limons ou argiles ne pourront que difficilement générer des laves torrentielles. Par contre, des zones instables dont les courbes granulométriques recoupent le domaine des zones sources véritables (Fig. 6a) pourront générer des laves torrentielles à l'occasion d'un contexte climatique particulier.

#### Nature de la matrice fine (inférieure à 2 mm)

Pour les zones sources, comme pour les laves torrentielles, la matrice fine ( $< 2 \text{ mm}$ ) représente globalement des limons sableux ou sablo-argileux (Fig. 7). Le domaine défini par les zones sources véritables est relativement

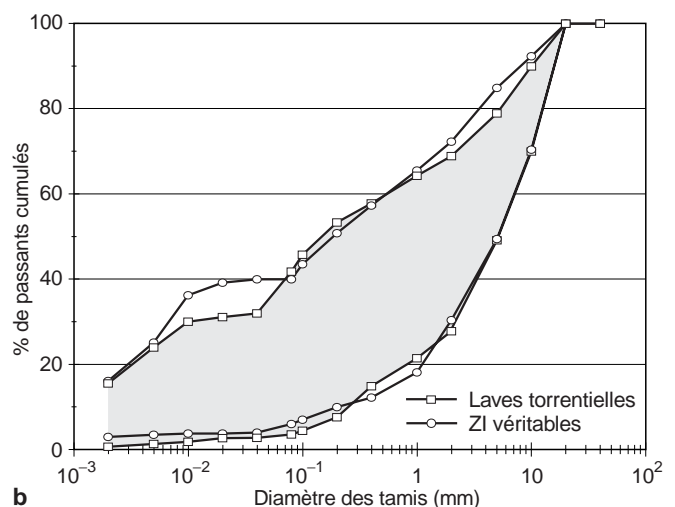
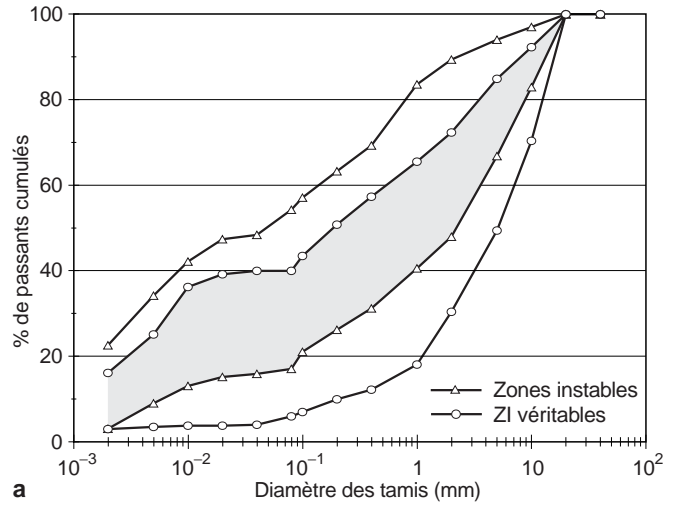


**Fig. 5**

Comparaison de la granulométrie de zones sources véritables et de lave torrentielle associée

**Fig. 5**

Comparison of granulometric curves for real initiation zone samples and associated debris flow deposits



**Fig. 6**

(a) Fuseau granulométrique des zones sources véritables et des zones instables, (b) comparaison des fuseaux granulométriques des zones sources véritables et des laves torrentielles

**Fig. 6**

(a) Granulometric domains for the two types of initiation zones, (b) comparison between granulometric domains for real initiation zones and debris flows

étendu, et il englobe les deux domaines particuliers de chaque famille de laves.

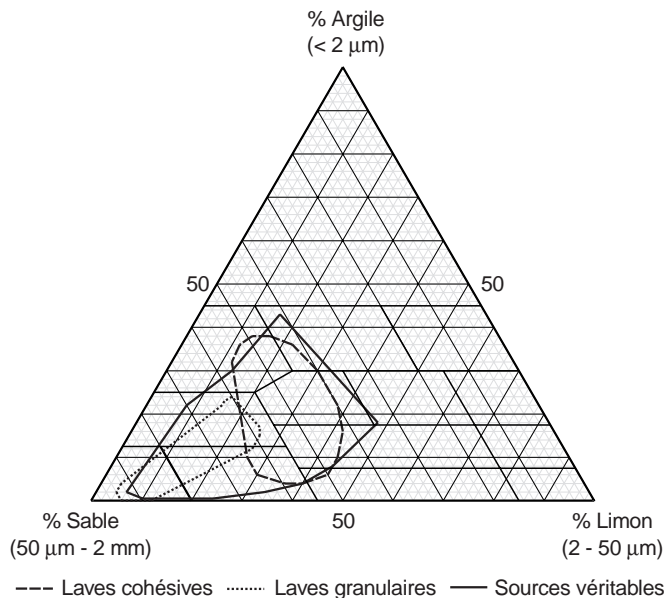
## Identification géotechnique des dépôts de laves torrentielles et des matériaux des zones sources

Les essais géotechniques ont été réalisés en complément de l'identification granulométrique de façon à préciser les critères discriminants des deux catégories de laves, et les caractéristiques des zones sources véritables.

### Les limites d'Atterberg

Les valeurs obtenues sur tous les échantillons de laves torrentielles, préalablement écrêtés à 400  $\mu\text{m}$ , sont relativement homogènes et représentent des limons ou des limons argileux faiblement plastiques (suivant les appellations du diagramme de Casagrande), pour lesquels le domaine de plasticité est relativement restreint, en moyenne 5 à 7% (Fig. 8a).

La moyenne calculée des teneurs en eau de liquidité  $W_L$  et de plasticité  $W_P$  est plus faible pour les échantillons de laves à matrice granulaire ( $W_P$  moy=17.3%,  $W_L$  moy=22.4%) que pour ceux de laves à matrice cohésive ( $W_P$  moy=19.8%,  $W_L$  moy=26.8%), mais il n'y a pas de valeurs discriminantes.


**Fig. 7**

Identification de la matrice fine des dépôts de laves torrentielles et des matériaux des zones sources dans le triangle de Jamagne

**Fig. 7**

Matrix composition for debris flows and initiation zone samples

Les valeurs obtenues sur les matériaux des zones sources se situent dans la même zone du diagramme de Casagrande, et les matériaux représentent également des limons ou limons argileux peu plastiques. Toutefois, les valeurs sont en moyenne un peu plus élevées que pour les laves torrentielles. Mais, même pour les échantillons à forte teneur en eau de liquidité  $W_L$ , l'indice de plasticité IP dépasse rarement 10% (Fig. 8b).

Les moyennes des valeurs calculées sont légèrement plus élevées pour les échantillons des zones instables ( $W_P$  moy = 23.9%,  $W_L$  moy = 31.6%) que pour les matériaux des zones sources véritables ( $W_P$  moy = 21.7%,  $W_L$  moy = 30.2%), mais les différences ne sont pas significatives.

### La caractérisation de la fraction argileuse

Elle s'obtient conjointement par la réalisation d'essais d'adsorption de bleu de méthylène (réalisés sur la fraction inférieure à 80 µm) et par la détermination par diffraction X de la nature minéralogique des argiles.

La moyenne calculée des valeurs de bleu VB est plus élevée pour les échantillons de laves à matrice granulaire que pour ceux de laves à matrice cohésive (Tableau 5). Or, même si le pourcentage d'argiles n'est pas un critère discriminant des deux familles de laves, les laves à matrice cohésive sont dans l'ensemble plus riches en argiles.

Nous avons donc cherché à caractériser spécifiquement la fraction argileuse (< 2 µm). Pour ce faire, nous avons défini la valeur de bleu équivalente VBe qui rapporte la valeur de bleu mesurée à 100% de la fraction inférieure à 2 µm, en considérant que seules les particules argileuses adsorbent le bleu de méthylène (Tran 1980). La valeur de

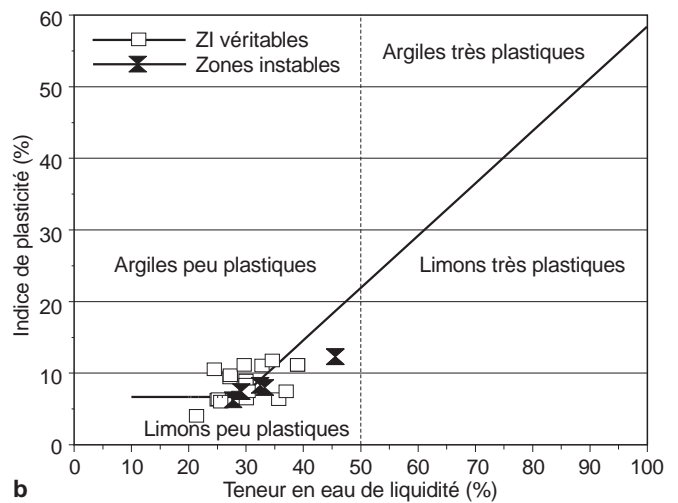
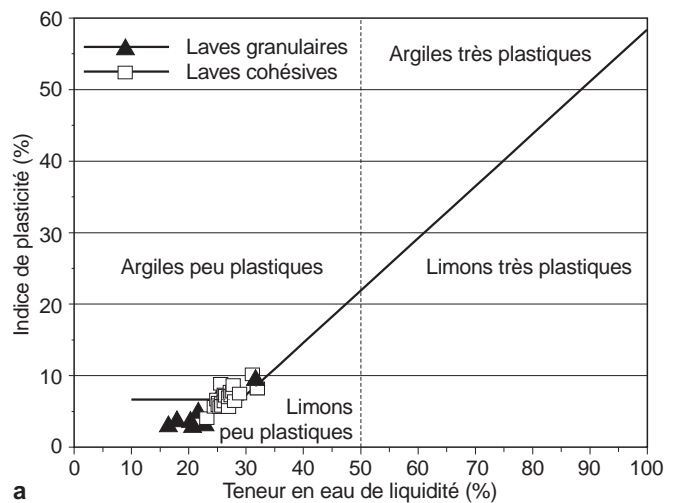

**Fig. 8**

Diagramme de Casagrande (a) des échantillons de laves torrentielles et (b) des matériaux des zones sources

**Fig. 8**

Casagrande's diagram for (a) debris flow samples and (b) source area materials

bleu équivalente se calcule de la manière suivante:

$$VBe = \frac{VB}{\%relatif < 2 \mu m} \times 100$$

avec

$$\%relatif < 2 \mu m = \frac{\%absolu < 2 \mu m}{\%absolu < 80 \mu m} \times 100$$

La moyenne calculée des valeurs de bleu équivalentes est également plus élevée pour les laves à matrice granulaire que pour les laves à matrice cohésive. Nous pouvons avancer deux hypothèses:

- l'activité des argiles de certains échantillons est très élevée, plus particulièrement pour certains échantillons de laves à matrice granulaire. Ceci doit être mis en relation avec la nature minéralogique de ces argiles;

**Tableau 5**

Moyenne des valeurs de bleu des dépôts torrentiels, et relation avec l'activité

**Table 5**

Mean blue values for debris flow samples, in relation with Skempton activity

	Nombre d'échantillons	VB (g/100 g) <sup>1</sup>		VBe (g/100 g) <sup>2</sup>		Activité <sup>3</sup>	
		Valeurs	Moyenne	Valeurs	Moyenne	Valeurs	Moyenne
Laves à matrice cohésive	22	0.33–1.97	0.6	1.05–10.73	2.5	0.5–1.8	1
Laves à matrice granulaire	13	0.26–2.66	0.9	1.65–7.68	3.4	0.5–4.2	1.8

<sup>1</sup>VB: valeur de bleu<sup>2</sup>VBe: valeur de bleu équivalente<sup>3</sup>Activité: indice de plasticité IP/% < 2 µm

– il ne faut pas, de plus, négliger l'adsorption potentielle des oxydes et carbonates présents dans le sol, qui ont fréquemment été identifiés dans les dépôts de laves à matrice granulaire.

L'étude minéralogique des argiles a permis de mettre en évidence la présence d'argiles gonflantes (chlorite gonflante, interstratifiés chlorite-illite ou chlorite-smectite) dans de nombreux échantillons à valeur de bleu élevée, ce qui explique l'activité plus forte de la fraction argileuse. Les argiles gonflantes sont surtout présentes dans les dépôts de laves à matrice granulaire.

Il apparaît donc que, dans les échantillons de laves à matrice granulaire, la fraction argileuse est plus active que dans les échantillons de laves à matrice cohésive (tout au moins pour les 34 échantillons que nous avons analysés). Pour les matériaux des zones sources, les valeurs de bleu sont très variables quelque soit la nature de la zone source, de 0.3 à 3.6 g/100 g (Tableau 6). De plus, les valeurs de bleu équivalentes sont en général plus élevées pour les zones instables, ce qui doit être mis en rapport avec l'argilosité plus forte (pour une activité plus faible), en relation avec une teneur en argiles en moyenne plus élevée.

Les valeurs de bleu sont donc fortement influencées par le contexte géologique du bassin versant, et sont comparables entre les zones sources véritables et les dépôts de laves torrentielles correspondantes.

### La teneur en carbonates

Elle est très variable et reflète la nature pétrographique des bassins versants (Tableau 7). Si certaines laves à matrice granulaire sont très riches en carbonates, la plupart des échantillons granulaires possèdent des pourcentages inférieurs à 30%. A l'inverse, un seul échantillon de laves à matrice cohésive renferme moins de 5% de carbonates, et 2 moins de 30%.

Les teneurs en carbonates sont d'un même ordre de grandeur entre les dépôts de laves torrentielles et les matériaux des zones sources véritables correspondantes. Ainsi, la teneur en carbonates des laves torrentielles reflète celle de la zone source véritable contributive, ce qui semble un bon moyen pour identifier, à partir des matériaux prélevés, la zone source majeure des matériaux de la lave torrentielle. Au vu de ces résultats et des observations de terrain, la géologie du bassin versant semble constituer le facteur primordial conditionnant le type de lave torrentielle générée. Ainsi, nous avons essentiellement observé les dépôts de laves à matrice cohésive dans les bassins versants formés d'importantes épaisseurs de marno-calcaires. L'alternance de niveaux pétrographiques de caractéristiques diverses (texture, résistance, granulométrie) fournit des éléments de taille variée, des blocs aux argiles.

A l'inverse, les dépôts de laves à matrice granulaire sont identifiés dans des bassins versants formés d'importants

**Tableau 6**

Valeurs de bleu et valeurs de bleu équivalentes des zones sources

**Table 6**

Blue values for initiation zone samples

Zones sources	Nombre d'échantillon	VB (g/100 g) <sup>1</sup>		VBe (g/100 g) <sup>2</sup>		Activité <sup>3</sup>	
		Valeurs	Moyenne	Valeurs	Moyenne	Valeurs	Moyenne
potentielles	19	0.34–3.57	1.09	1.57–8.11	3.31	0.47–3.31	1.28
véritables	14	0.39–3.57	0.99	1.57–6.72	2.93	0.47–3.31	1.25
Zones instables	5	0.34–2.36	1.37	1.79–8.11	4.36	0.51–1.39	0.94

<sup>1</sup>VB: valeur de bleu<sup>2</sup>VBe: valeur de bleu équivalente<sup>3</sup>Activité: indice de plasticité IP/% < 2 µm



**Tableau 7**  
Teneurs en carbonates des dépôts torrentiels  
**Table 7**  
Mean values of calcium carbonate content

	Nombre d'échantillons	% CaCO <sub>3</sub>	
		Valeurs	Moyenne
Laves à matrice cohésive	22	0.7–76.5	52
Laves à matrice granulaire	11	0.3–70.5	30

volumes de roches détritiques (grès, conglomérats, quartzites) dont l'altération fournit essentiellement des sables fins, mais peu d'argiles et de limons. Toutefois, si des schistes siliceux fins sont associés aux grès et conglomérats, leur altération peut fournir des fines en quantité suffisante pour former une lave torrentielle cohésive.

## Conclusion

Par l'observation sur le terrain de nombreux dépôts de laves torrentielles, nous avons pu définir deux familles de dépôts de laves torrentielles, d'après des caractéristiques morphologiques et texturales. Suivant ces critères, nous les avons nommées laves à matrice cohésive et laves à matrice granulaire.

Les essais réalisés par la suite au laboratoire sur les échantillons de chaque famille de laves nous ont permis de compléter cette distinction, en déterminant notamment l'existence de critères granulométriques discriminants dans la plage granulométrique 20–200 µm. Cette typologie a été définie sur le matériau écrêté à 20 mm, mais il est à noter que si on analysait le matériau global avec les gros blocs, la lacune granulométrique dans le domaine des silts, observée sur les laves à matrice granulaire, subsisterait évidemment.

Des caractéristiques géotechniques complémentaires peuvent constituer un outil de caractérisation secondaire des laves torrentielles, mais elles ne sont pas identifiées comme des critères aussi discriminants. Toutefois, le comportement des laves pourrait être influencé par les caractéristiques de la fraction argileuse, en particulier la nature minéralogique de cette fraction.

Les courbes granulométriques des laves torrentielles et des zones sources bien identifiées d'un même bassin versant présentent de grandes similitudes, qui reflètent la mobilisation dans leur intégralité des matériaux des zones sources et le faible tri granulométrique entre les zones sources et les zones de dépôt. Les caractéristiques géotechniques des échantillons des zones sources véritables permettent également d'établir des similitudes avec les dépôts de laves torrentielles. En effet, les valeurs de limites d'Atterberg et d'essais au bleu sont proches de celles des dépôts de laves torrentielles associées.

Ceci conduit à mettre l'accent sur l'importance des caractéristiques des matériaux potentiellement mobilisables, en particulier du facteur granulométrique comme condition nécessaire au déclenchement d'une lave torrentielle. Ainsi, les zones sources véritables ont des caractéristiques granulométriques très proches de celles des laves torrentielles, et renferment généralement moins de 40% de particules de taille inférieure à 50 µm. Ces sols sont également peu plastiques, avec des indices de liquidité et de plasticité relativement faibles. A l'inverse, une zone de versant instable dans des sols argileux pourra très difficilement générer une lave torrentielle. On peut dire que dans les zones sources le matériau doit par avance présenter des caractéristiques des laves torrentielles qui lui permettront d'être mobilisé et de s'écouler avec le comportement rhéologique spécifique aux laves torrentielles.

Les critères granulométriques précédemment définis pour les zones sources, combinés à d'autres facteurs (pente topographique, caractéristiques lithologiques et hydrologiques des matériaux, état de stabilité actuel du versant et volumes potentiellement mobilisables), peuvent servir de base à l'élaboration d'une cartographie de l'aléa "aptitude à la génération de laves torrentielles". Nous avons mis en œuvre cette démarche cartographique dans un travail précédent (Bonnet-Staub 1998).

## Références

- BONNET-STAU B I (1998) Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises – Contribution à la maîtrise du risque. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris
- BONNET-STAU B I, COJEAN R, BECHETOILLE A (1998) Les laves torrentielles dans les Alpes françaises – analyse du risque. Article soumis à la Revue de Géographie Alpine
- MEUNIER M (1991) Eléments d'hydraulique torrentielle. Série montagne n°1, études du Cemagref
- PIERSON T.C (1980) Erosion and deposition by debris flow at Mount Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes* V5, pp 227–247
- TRAN N.L (1980) L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. *Bull liaison Labo P et Ch* 159:79–92