

# Flow susceptibility of heterogeneous marly formations. Implications for torrent hazard control in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France)

O. Maquaire, J.-P. Malet & A. Remaître

*IPGS, Institut de Physique du Globe, UMR 7516 CNRS-ULP, 5 rue René Descartes, F-67084, Strasbourg Cedex, France.*

C. Ancey & M. Meunier

*Cemagref, "Division Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche", B.P. 76, 2, rue de la Papeterie, F-38042, Saint-Martin d'Hères, France.*

J. Locat

*Environment and Geo-engineering Research Group (GREGI), Department of Geology and Geological Engineering, University Laval, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1YK7P4.*

Keywords: black marls, earthflow, debris avalanches, debris flow, rheology, torrent hazard control

**ABSTRACT:** Rheological response of remoulded mass movement deposits (earthflow, debris-avalanche, debris-flow) have been investigated in the black marls of the Barcelonnette basin using several techniques (parallel-plate rheometry, coaxial rheometry, belt conveyor and slump tests). The aim of this contribution is to show that rheological characteristics can be useful for the definition of the transformation process of the materials into flow-like phenomena and the identification of the natural mixture of basic formations which present the weakest yield stress and viscosity. Results show that behaviour in simple shear of all these natural flows distinguished well the type of movement, in particular for earthflow and debris-flow. Furthermore, some various proportion mixtures present the highest mobility properties, and thus the highest susceptibility to transform into high speed flow-like phenomena.

## 1 INTRODUCTION

Dans les bassins torrentiels constitués de marnes noires dans le sud-est de la France, des mouvements gravitaires présentant des caractéristiques d'écoulement sont fréquents, sur les versants ou dans le chenal (Maquaire et al. 2001). D'après la classification de Hungr et al. (2001), ces types de mouvements très cohésifs peuvent être distingués en glissements évoluant en coulées (*earthflow*), en coulées de débris (*debris avalanche*), et en laves torrentielles (*debris-flow*). D'après la classification rhéologique (Fig. 1) proposée par Coussot & Meunier (1996), les glissements évoluant en coulée présentent un comportement à l'interface solide boueux/solide fluide. Leur comportement peut néanmoins être bien représenté par une loi d'écoulement de type Herschel-Bulkley. Les coulées de débris et les laves torrentielles sont également des écoulements suffisamment concentrés pour que leur comportement puisse être représenté par une loi d'écoulement de type Herschel-Bulkley.

Maquaire et al. (submitted) ont montré qu'un lien génétique existait entre ces divers mouvements : l'évolution post-rupture du matériau par météorisation va modifier ses caractéristiques intrinsèques et sa loi de comportement. Ce changement est contrôlé par la modification progressive de la granulométrie des matériaux. Ce schéma peut être complexifié par l'apport extérieur de matériaux autre que le matériau originel du mouvement de terrain. Selon les caractéristiques granulométriques des zones sources, leur déclenchement et leur évolution post-rupture peuvent dès lors être difficiles à prévoir en terme de vitesse ou d'extension spatiale.

Ces mouvements se différencient par la morphologie des dépôts, la granulométrie, les paramètres mécaniques, et les vitesses d'écoulement (Malet et al. 2002b). Les mouvements sont lents avec des déplacements courts pour les glissements évoluant en coulées alors qu'ils sont rapides avec des déplacements longs pour les coulées de débris et les laves torrentielles. These earthflows represent a significant risk for the neighbouring population due to their enormous volumes and potential initiation of high velocities induced-debris avalanches or debris flows (Malet et al., submitted).

These flow-like phenomena involve essentially black marls, moraine and sandstones deposits. A previous careful geomorphological survey and soil laboratory analysis (grain size distribution, consistency limits, undrained cohesion) has demonstrated that some various proportion mixtures of these basic formations present the highest mobility properties, and thus the highest susceptibility to transform into high speed flow-like phenomena (Malet et al., submitted). To assess this risk, a rheological characterisation on the < 20 mm-

fraction of the material has been carried out (by parallel-plate rheometry and coaxial rheometry, slump tests and inclined plane tests). The main objectives were to: (i) check if the differences in velocity and flowing mode observed and measured in the field are a consequence of the rheological characteristics of the materials; (ii) define the transformation processes of the materials into flow-like phenomena and the conditions of acquisition of the mobility and (iii) identify the mixture (% marls, % moraine, % sandstones) which present the weakest yield stress and viscosity.

Cet article présente les résultats de la caractérisation rhéologique réalisée sur les matériaux naturels des divers mouvements de terrain et sur les mélanges artificiels de marnes, moraine et flysch.

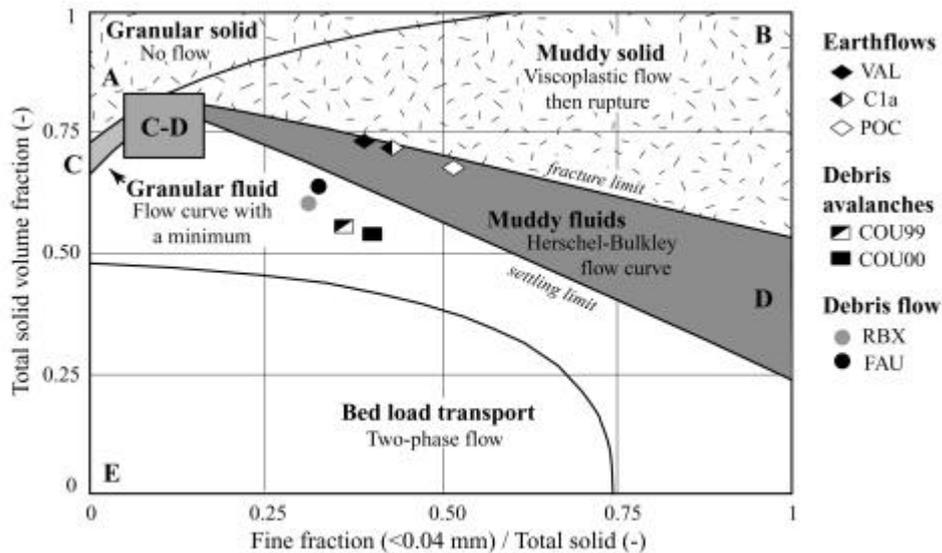


Figure 1. Position of the flow-like landslides of the Barcelonnette basin in the conceptual rheological classification (function of fine content and solid fraction) proposed by Coussot & Meunier (1996).

## 2 DESCRIPTION DES PHENOMENES ET DES MATERIAUX

Dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France, Fig.2), les matériaux testés proviennent de dépôts issus de trois glissements ayant évolué en coulées (*Super-Sauze*, C1a et IND ; *La Valette*, VAL ; *Poche*, POC), de deux coulées de débris (COU99, COU00) initiées à partir de la coulée de Super-Sauze, de deux laves torrentielles à matrice cohésive dans les torrents de *Faucon* (FAU) et du *Riou-Bourdoux* (RBX), du manteau d'altération des marnes *in situ* (Mar), de moraines (Mor) et de flyschs altérées (Fly).

Les glissements-coulées présentent un comportement essentiellement plastique, une gamme de vitesse large ( $1-40 \text{ cm.j}^{-1}$ ) et variable dans le temps. L'écoulement, chenalisé, fossilise une topographie complexe, en épousant les formes du relief et en créant des lobes d'accumulation sans granoclassement, dont l'épaisseur peut atteindre 20 m (Fig. 3A1). Le mouvement peut être maintenu sur de longues distances et de longues périodes par des déformations plastiques intermittentes en relation avec les fluctuations des pressions interstitielles. Des accélérations soudaines de la partie supérieure des coulées sont fréquentes au-delà d'un seuil de pression interstitielle (Malet et al. 2002a). Les dépôts sont caractérisés par une grande hétérogénéité spatiale en fonction de la micro-topographie. Les lobes d'accumulation sont caractérisés par des fissures parfois profondes de 1m (Fig. 3A2). Des blocs de moraines et de marnes émergent de la coulée, ils atteignent fréquemment plusieurs mètres cubes.

Les coulées de débris sont des écoulements superficiels (1–4 m d'épaisseur), rapides ( $0.5-1 \text{ m.min}^{-1}$ ), totalement saturés et non chenalisés. Les coulées de débris observées en 1999 et 2000 sur le glissement-coulée de Super-Sauze, ont débuté comme des glissements superficiels, puis ont rapidement acquis des caractéristiques d'écoulement (Malet et al., submitted). Les dépôts sont principalement des levées latérales de débordement où de petits cônes d'accumulation où aucun granoclassement n'est observé (Fig. 3B1 et 3B2). Les éléments grossiers se trouvent majoritairement en subsurface.

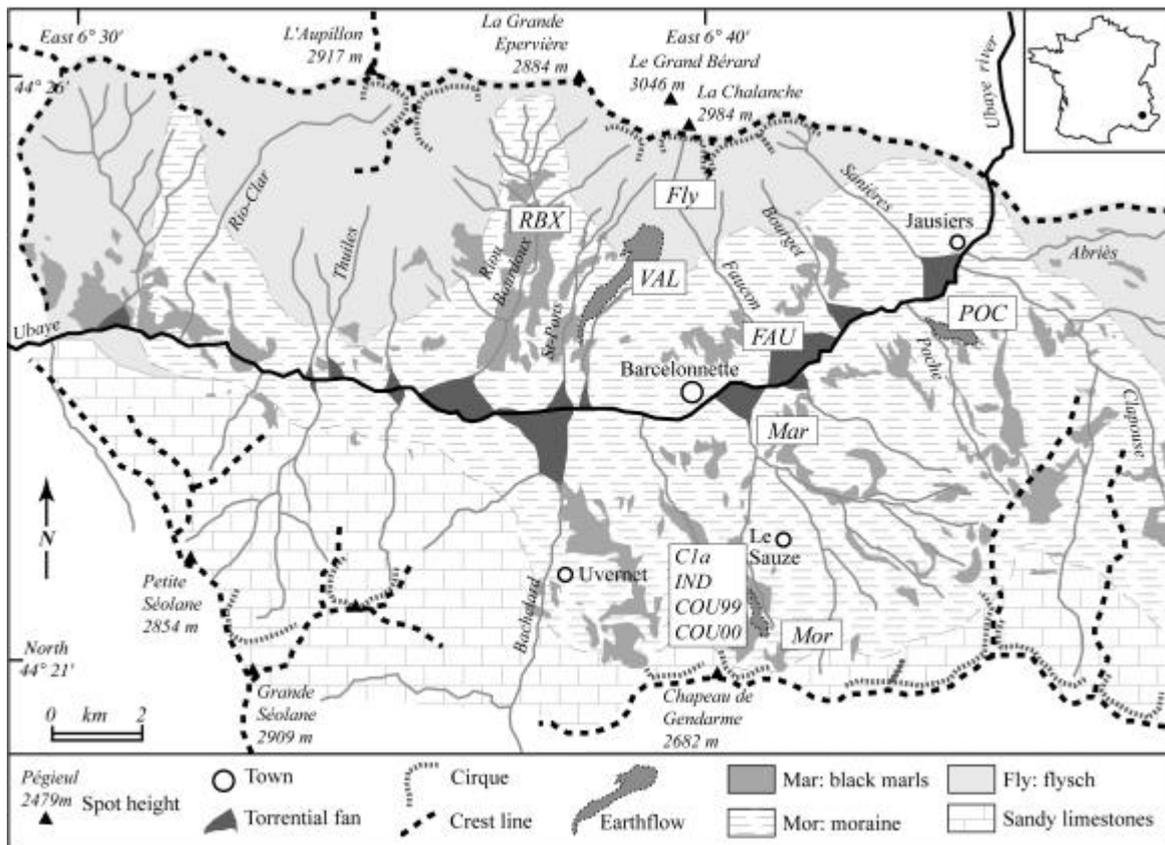


Figure 2. Morphological sketch of the Barcelonnette basin. Localisation of the landslides deposits and extension of the landslides source material.

Les laves torrentielles, par rapport aux coulées de débris se localisent dans des chenaux torrentiels et présentent des vitesses plus rapides ( $5 \text{ m.s}^{-1}$ ) ; un trait caractéristique des laves torrentielles est un dépôt marqué par un granoclassement inverse et des levées latérales (Fig.3C1). Ces lobes, cimentés en surface, ont une forme aplatie et bombée sur les cotés, on y trouve aussi bien des éléments de petite taille (clastes millimétriques à centimétriques) que des galets et des blocs (calcaires, flyschs, marnes noires). Les éléments grossiers se trouvent majoritairement aux extrémités des lobes frontaux. Les coupes stratigraphiques (Fig. 3C2) montrent plusieurs couches successives de granulométrie différentes (carapace indurée, niveau alluvionnaire intermédiaire, dépôt grossier induré) représentant les différents stades de l'écoulement (fin de crue, écoulement hyperconcentré, bouffée de lave).

La granulométrie du matériau et le domaine de plasticité sont des facteurs qui influencent la réponse différenciée des matériaux à la mise en mouvement. La comparaison des caractéristiques géomécaniques et rhéologiques des mélanges naturels (glissements-coulées, coulées de débris, laves torrentielles) à celles des mélanges artificiels composés des trois grandes familles de formations superficielles du bassin de Barcelonnette va permettre (i) d'identifier l'influence de chaque formation superficielle dans le comportement de chaque mouvement de terrain, (ii) de définir les mélanges (marnes noires altérées, flyschs altérés, moraines) susceptibles d'avoir la plus grande mobilité. Deux ensembles de matériaux (Tab. 1) ont été testés, un premier associant uniquement marnes noires et moraines (C1a, IND, COU99, COU00, POC, mélanges artificiels UM) que l'on retrouve essentiellement sur le versant ubac (Fig. 2) et un second, associant marnes noires, moraines et flyschs (FAU, RBX et VAL, mélanges artificiels AM), que l'on retrouve uniquement en adret. Les proportions pondérales des mélanges artificiels sont indiquées dans la figure 4.

L'ensemble des matériaux présentent une minéralogie relativement homogène, formées majoritairement d'illites, de chlorites et de kaolinites. Aucune argile gonflante n'est présente dans ces formations (Malet et al. 2002b).

D'une manière générale les matériaux écrêtés à 20 mm sont caractérisés par l'importance des fractions argileuses et limoneuses. En outre la fraction graveleuse est plus importante que la fraction sableuse. Même

si les caractéristiques granulométriques des échantillons sont proches, les fuseaux définis à partir d'une quarantaine d'analyses permettent de distinguer clairement les trois types d'écoulements (Fig. XX). Les matériaux des glissements-coulées sont riches en limons et en argiles (C1a et POC) car constitués principalement de marnes noires ; les matériaux (IND, VAL) correspondant aux mélanges marnes/moraine ou marnes/flyschs présentent des fractions sableuses plus importantes. Les médianes ( $Q_{50}$ ) indiquent un diamètre moyen faible et dispersé (entre 0.02 et 0.6 mm) pour POC, similaire (0.4–0.5mm) pour COU99, IND et C1a, et plus élevé (0.8–1.5 mm) pour VAL. Ces valeurs sont à mettre en relation avec l'âge des glissement-coulées : plus il est ancien, plus le pourcentage d'argiles et de silts est élevé du fait de la météorisation des marnes. Ce pourcentage atteint 36-51 % pour POC, 32-39 % pour les échantillons de Super-Sauze (C1a, IND COU99) et 26-31 % pour VAL. Les matériaux des coulées de débris ont des granulométries différentes : COU99 est pauvre en fines alors que COU00 est plus cohésif. Enfin, les matériaux FAU et RBX présentent une texture sablo-limoneuse classique de laves torrentielles à matrice cohésive.

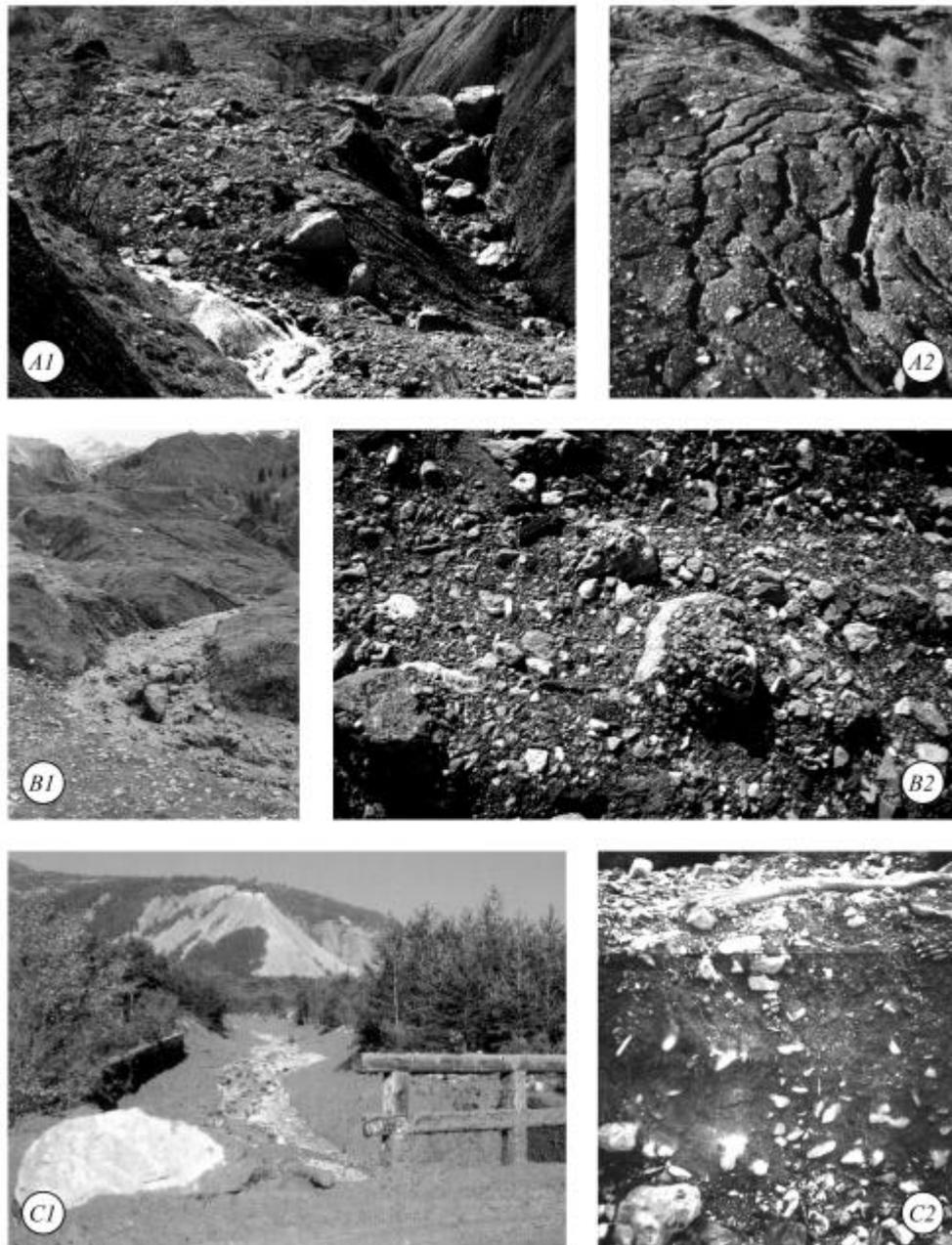


Figure 3. Morphological characteristics of the flow-like landslides deposits. Toe of the Super-Sauze earthflow (A1) and its soil surface characteristics (A2), flowing of the COU99 debris avalanche (B1) and its soil surface characteristics (B2), deposit of the Faucon debris flow (C1) and stratigraphy of the deposits (C2).

Table 1. Caractéristiques mécaniques des mouvements de terrain et des mélanges artificiels.

	Grain-size							Consistency			Unit weight	
	Sand	Silt	Clay	Gravel	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	W <sub>p</sub>	W <sub>l</sub>	I <sub>p</sub>	ρ <sub>d</sub>	ρ <sub>sat</sub>
	%	%	%	%	mm	mm	mm				kg.m <sup>-3</sup>	kg.m <sup>-3</sup>
<i>Landslides or in situ deposits</i>												
<i>CIa</i>	25	22	15	38	0.0170	0.600	10.0	16	32	16	1760	2140
<i>IND</i>	31	29	10	30	0.0023	0.400	2.50	17	33	16	1220	1790
<i>VAL</i>	32	20	11	37	0.0016	0.975	4.00	19	31	12	1210	1730
<i>POC</i>	20	42	9	29	0.0009	0.019	1.91	20	37	17	1370	1830
<i>COU99</i>	35	24	9	32	0.0018	0.422	2.50	15	30	15	1200	1703
<i>COU00</i>	26	44	15	15	0.0012	0.011	0.48	19	37	18	1940	2200
<i>FAU</i>	30	20	6	44	0.0190	0.800	8.30	19	26	7	1050	1630
<i>RBX</i>	36	16	10	38	0.0190	0.455	4.30	21	29	8	1070	1650
<i>Mor</i>	38	12	9	41	0.0205	0.435	4.40	19	30	11	1060	1590
<i>Fly</i>	37	11	5	47	0.0315	0.550	6.75	17	25	8	/	/
<i>Mar</i>	37	14	12	37	0.0220	0.400	4.20	21	29	8	1180	1710
<i>Artificial mixtures</i>												
<i>UM2</i>	29	35	10	25	0.0015	0.270	2.45	18	31	13	/	/
<i>UM3</i>	30	29	9	32	0.0126	0.312	2.87	17	28	11	/	/
<i>UM4</i>	31	26	8	35	0.0208	0.421	3.19	16	26	10	/	/
<i>AM1</i>	31	17	7	45	0.0218	0.765	7.55	18	27	9	/	/
<i>AM3</i>	38	18	9	35	0.0156	0.603	6.14	21	33	12	/	/
<i>AM5</i>	40	12	7	41	0.0297	0.715	7.16	16	27	11	/	/
<i>AM6</i>	38	11	8	43	0.0302	0.726	7.08	18	28	10	/	/

La composition de la matrice permet de distinguer les types de mouvement. Ceci démontre qu'un lien net existe entre composition granulométrique et type d'écoulement. Ce résultat est en accord avec la classification des écoulements proposée récemment par Hungr et al. (2001), fondée sur la texture des matériaux mobilisés (Fig. 4). Les laves torrentielles contiennent moins de 30 % de silts et d'argiles. Elles peuvent donc être distinguées des glissement-coulées, beaucoup plus cohésifs. Il est remarquable de noter que les coulées de débris présentent une texture intermédiaire. Les mélanges artificiels testés (entre des marnes noires, des moraines et des flyschs) représentent le spectre granulométrique des différents mouvements (Fig.4 et Tab.1). Le pourcentage de fines va augmenter avec la part de marnes noires au sein du mélange.

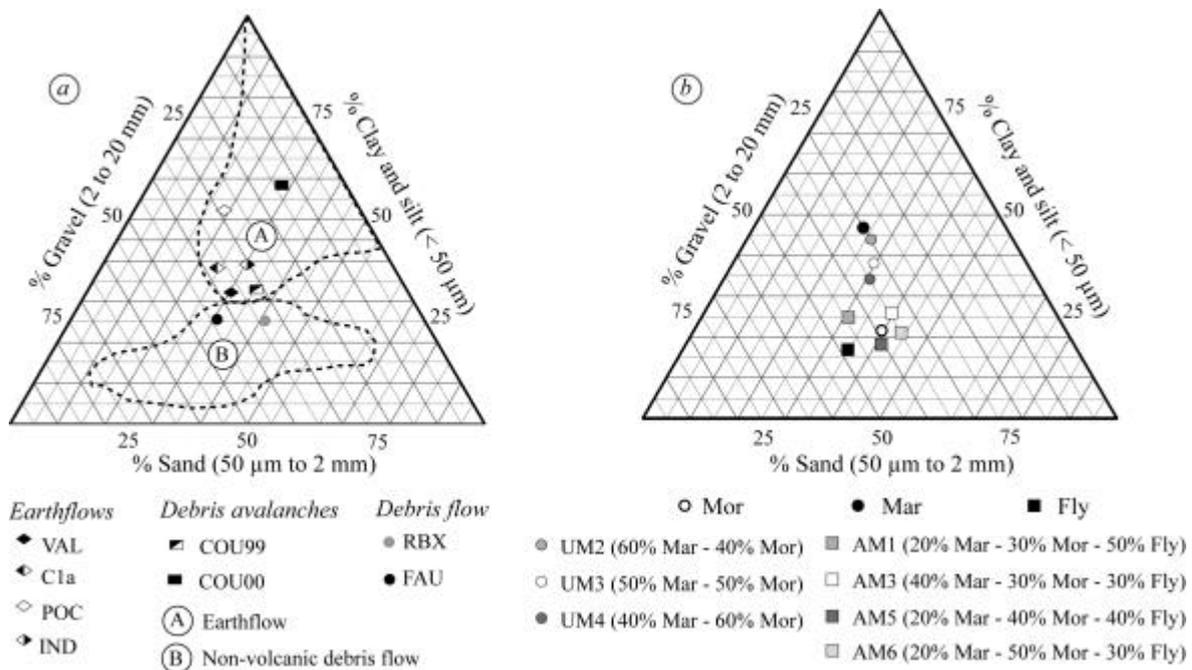


Figure 4. Textural composition of the landslide material (a) and the artificial mixtures (b). Dotted lines represent the classification proposed by Hungr et al. (2001).

Les limites d'Atterberg, et notamment l'indice de plasticité ( $I_p$ ), font apparaître une différenciation nette entre les coulées issues de glissements et les coulées de débris ( $I_p=12-18$ ) et les laves torrentielles ( $I_p=7-8$ ), très peu plastiques. Les limites de liquidité, comprises entre 26 % (FAU) et 37 % (COU00), ont guidé le choix des concentrations volumiques pour les essais rhéologiques. Ainsi, de ces caractéristiques mécaniques, il ressort que plus le matériau est cohésif et plastique, plus les vitesses d'écoulement apparaissent lentes (pour une pente équivalente). Les limites d'Atterberg des mélanges artificiels possèdent des indices de plasticité globalement faible ( $9 < I_p < 13$ ), toutefois la dispersion est beaucoup moins importante que celle observée pour les mouvements de masse ( $7 < I_p < 18$ ). L'indice de plasticité varie positivement avec l'augmentation de la part des marnes noires, les mélanges les moins plastiques étant UM4, AM1, AM5 et AM6.

### 3 METHODOLOGIE ET VALIDITE DES RESULTATS

Afin de définir le comportement sur un spectre granulométrique large (0-20 mm) et pour tenir compte de la grande variété des concentrations volumiques observées (Fig. 1), la caractérisation rhéologique a été menée en combinant essais rhéométriques (0-400  $\mu\text{m}$ ), slump tests et essais au plan incliné (fraction 0-20 mm).

#### 3.1 Rheometrical tests

Les fluides soumis aux essais rhéométriques sont des suspensions des 9 matériaux, écrêtés à 400  $\mu\text{m}$ . Les essais ont été réalisés pour six concentrations volumiques solides  $f$ . Un volume donné de matériau solide a été ajouté à de l'eau puis mélangé à l'aide d'un malaxeur mécanique à 600  $\text{t}\cdot\text{min}^{-1}$  pendant une minute puis à 400  $\text{t}\cdot\text{min}^{-1}$  pendant 30 min. Les fluides ont été testés avec un rhéomètre Rotovisco RV20 (Haake) équipé de plans parallèles rugueux (diamètre, 5 cm ; épaisseur de l'échantillon cisailé, 2,8 mm ; rugosité à peu près 250  $\mu\text{m}$ ) et un rhéomètre Rotovisco RV12 (Haake) à cylindres coaxiaux à large entrefer (capteur MV-I). La procédure expérimentale, par paliers de vitesse imposée, et les précautions prises pour limiter les effets perturbateurs (glissement aux parois, fracturation, creusement, sédimentation) sont décrites en détail dans Coussot et al. (1993) et Magnin et al. (1990). Après une phase d'homogénéisation de 30 minutes, le fluide est introduit dans le rhéomètre et cisailé pendant deux minutes à un taux de cisaillement de 1000  $\text{s}^{-1}$ , puis pendant 28 min, à un taux de 100  $\text{s}^{-1}$ . Pour la géométrie plan-plan, le protocole expérimental décrit par Coussot & Piau (1994) a été utilisé. Il implique la succession de diverses rampes de vitesse où chaque taux de cisaillement est maintenu pendant un palier de 15 secondes. Pour la géométrie à cylindres coaxiaux, trois phases de sollicitation dynamique du fluide ont été associées aux rampes de vitesses (Locat et al. 1988).

L'utilisation des deux géométries a permis d'explorer une plage de taux de cisaillement étendue, de 1,87  $\text{s}^{-1}$  à 18700  $\text{s}^{-1}$  pour le plan-plan, entre 0,02  $\text{s}^{-1}$  et 1200  $\text{s}^{-1}$  pour le coaxial. Néanmoins, la plage de taux de cisaillement utilisée dans cette étude est 2 à 3 ordres de grandeur supérieure à celle rencontrée pour ce type d'écoulement sur le terrain (O'Brien 1986). Pour chaque matériau et chaque concentration volumique solide, un modèle d'Herschel-Bulkley a été ajusté aux données expérimentales. La profondeur du creux, observé dans la plupart des expériences avec la géométrie plan-plan, a été prise en compte dans l'estimation des paramètres de la loi d'écoulement (Coussot & Boyer 1995). Pour les ajustements, seules les valeurs des derniers cycles ont été utilisées. Comme les fluides sont faiblement thixotropes et que les essais ont été réalisés à des taux de cisaillement suffisamment faibles, les seuils d'écoulement  $t_c$  ajustés par les modèles sont supposés proches des seuils d'écoulement réels (Coussot & Piau 1994).

Dans la plage de taux de cisaillement commune aux deux rhéomètres, la forme et l'amplitude des courbes d'écoulement sont similaires. Les paramètres de Herschel-Bulkley estimés à partir des deux géométries sont identiques, notamment pour le seuil d'écoulement (Malet et al. 2002b). Les différences entrent dans la marge d'erreur précisée par Coussot & Ancey (1999) qui indiquent que l'écart de mesures du seuil de contrainte d'une géométrie à une autre est compris dans une fourchette de 5 à 15 unités.

#### 3.2 Slump tests

L'essai consiste à remplir un cylindre (diamètre : 42 mm, hauteur : 82.5 mm) avec le fluide (0-20 mm), de soulever rapidement le cylindre et de laisser le matériau s'affaisser sous son propre poids. La différence entre la hauteur initiale et la hauteur finale du matériau ainsi que l'épaisseur de la zone non-cisailée permettent d'estimer le seuil d'écoulement  $t_c$  à partir de la formule élaborée par Pashias et al. (1996).

Outre sa reproductibilité, ce test permet de caractériser le matériau à des concentrations volumiques plus élevées. With allowance to uncertainties on rheometrical and slump test measurements, the agreement between rheometrical data and slump tests results is very good. The relative error fluctuates around a mean value which is close to 0.15, whatever the solid fraction (Fig. 5a).

### 3.3 Inclined plane tests

As an inclined plane, we used a 4 m-long rectangular channel whose width reaches 0.25 m and whose slope could be varied between 4 and 40°. The bottom surface was plywood. It has been shown by Coussot (1994) that wall slip is negligible for mudflows on this surface type. The channel was equipped with a damming system located upstream. The system was initially filled with 0.002 m<sup>3</sup> of material (fraction 0-20 mm) and then a bottom gate was rapidly opened so that the fluid could flow downstream. In general the fluid appeared to flow slowly during a time comprised between 10 and 30 min. The asymptotic depth was measured, far enough from the channel tips downstream and upstream, for fluid depth to correspond to the uniform depth. Yield stress was determined using the relation proposed by Coussot et al. (1996) taking into account the asymptotic flow depth and the shape of the lateral levee. Total solid volume ranging between 0.35 and 0.50 were tested for each material.

The inclined plane tests results were quite reproducible: differences as low as 5% were recorded from one test to another identical. As for the slump tests results, the relative error fluctuates around a mean value close to 0.15 (Fig. 5b).

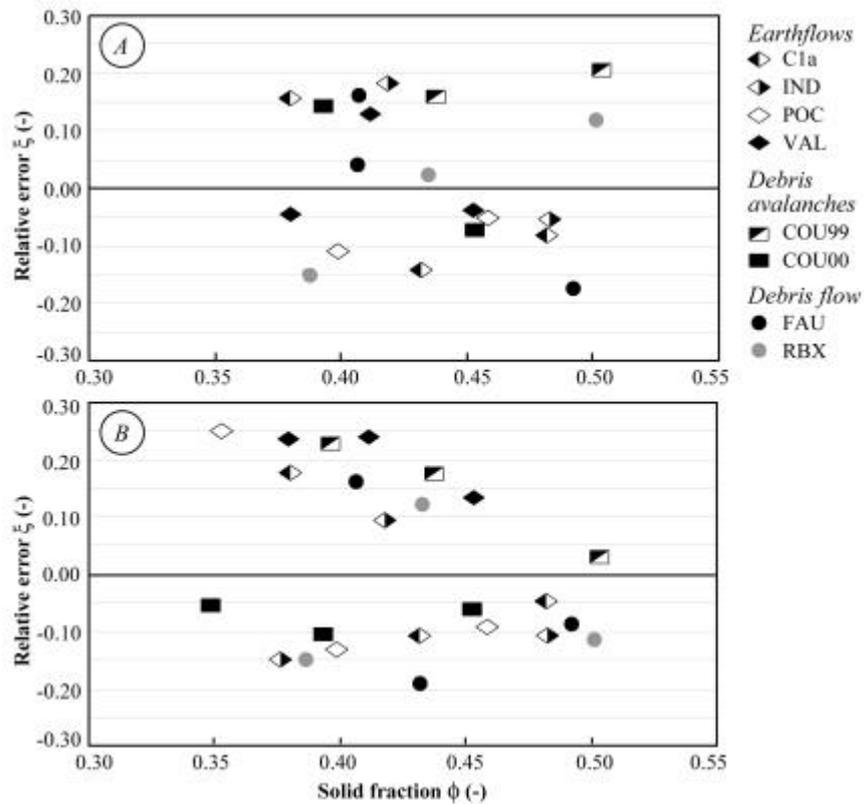


Fig. 5. Error on yield stress determination using slump tests (A) and inclined plane test (B) as a function of solid fraction  $\phi$  for each landslide deposits. The yield stress determined by the parallel-plate rheometry is taken as reference.

## 4 RESULTATS

### 4.1 Comportement des matériaux issus des mouvements de terrain (mélanges naturels)

Tous les matériaux présentent le même type de comportement rhéofluidifiant vers les taux de cisaillement forts. Vers les faibles taux de cisaillement (typiquement entre 0.05 et 1 s<sup>-1</sup>), quelle que soit la concentration volumique solide, une inflexion de la courbe est observée pour tous les matériaux issus de mouvements de terrain, alors que les matériaux non mobilisés (Mar, Mor, Fly) présentent un comportement plus classique (Malet et al. 2002b). La thixotropie de l'ensemble des matériaux est faible (Malet et al. 2002b).

Sur la plage de taux de cisaillement considérée, la totalité des matériaux présente un comportement viscoplastique marqué, bien représenté par un modèle d'Herschel-Bulkley (coefficients de détermination supérieurs à 0.85). L'ensemble des matériaux présente des paramètres de Herschel-Bulkley ( $t_c$ ,  $k$ ) qui diminuent avec la concentration volumique solide, avec un exposant  $n$  compris entre 0.25 et 0.4. Le seuil d'écoulement et la viscosité plastique varient respectivement de 1 à 480 Pa et de 0.1 à 150 Pa.s. Une différenciation importante des matériaux dans la gamme des concentrations volumiques  $f$  de 0.35 à 0.50 est

observée, alors que pour les fortes teneurs en eau, les matériaux présentent les mêmes paramètres rhéologiques.

Afin de déterminer les caractéristiques rhéologiques à partir d'expériences simples de terrain, les courbes maîtresses des différents matériaux ont été calculées. Les taux de cisaillement et les seuils de contraintes ont été réduits par  $t_c$ . Ainsi, dans un graphique  $(\dot{\gamma}/t_c, t/t_c)$ , les courbes d'écoulement pour un même matériau à différentes concentrations volumiques solides suivent toutes une courbe maîtresse, qui tend vers une droite de pente  $m$  aux taux de cisaillement élevés et qui tend vers 1 aux taux de cisaillement faibles. Malgré les différences de granulométrie, il est possible de matérialiser le comportement en écoulement par une courbe maîtresse unique dont les paramètres ne dépendent que du seuil de contrainte et des concentrations volumiques. Les équations des courbes maîtresses sont données à la figure 6.

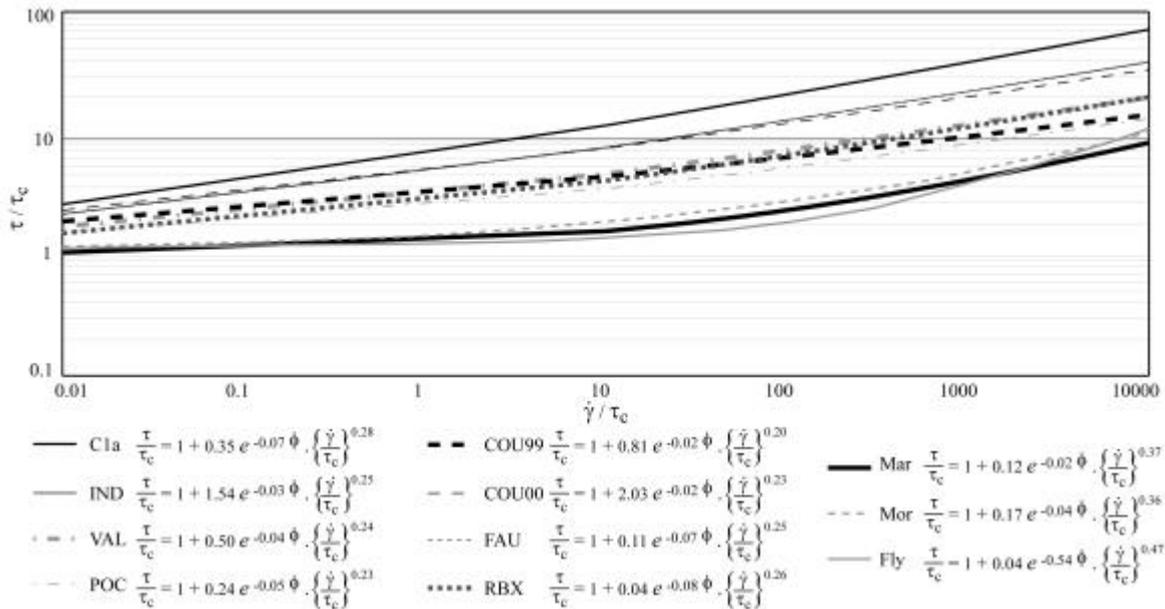


Figure 6. Master curves of the landslides and *in situ* deposits.

Les courbes maîtresses des coulées de débris (COU99, COU00) et des laves torrentielles (FAU, RBX) sont encadrées par celle des glissement-coulées (C1a, IND, VAL et POC). Les résultats des analyses rhéologiques reflètent les variations de vitesse observées sur le terrain. Notons la similitude des courbes maîtresses IND et COU00, qui montre que le matériau IND correspond à la zone source de la coulée de débris COU00. Seules les formations superficielles, altérites de marnes, flyschs altérées et moraines, présentent un comportement bi-linéaire plus marqué, qui peut s'expliquer par le fait que ces formations n'ont pas d'histoire d'écoulement.

#### 4.2 Comportements des mélanges artificiels et comparaisons avec les matériaux naturels

Le comportement de l'ensemble des mélanges artificiels est également très bien représenté par un modèle de Herschel-Bulkley (pour la gamme de taux de cisaillement testé). Afin de comparer les matériaux naturels et le comportement des mélanges théoriques, l'évolution des caractéristiques rhéologiques (seuil d'écoulement et viscosité au sens Herschel-Bulkley) en fonction de la concentration volumique solide a été placée sur un même graphique (Fig. 7).

Rappelons que deux types de mélanges ont été testés, un premier groupe de mélanges (marnes noires et moraines) associé aux mouvements localisés sur le versant ubac (POC, IND, C1a, COU99 et COU00) et un deuxième groupe (marnes noires, moraines et flyschs) associé aux mouvements du versant adret (FAU, VAL, RBX).

Pour les deux groupes, les mélanges naturels et les mélanges artificiels présentent le même type de relation. Pour des concentrations volumiques comprises entre 0.30 et 0.60, le seuil d'écoulement peut varier de trois ordres de grandeur, alors que la viscosité ne varie que de deux ordres de grandeur. Pour les deux ensembles, le seuil d'écoulement et la viscosité augmentent avec le pourcentage de marnes noires au sein du mélange, un seuil est observable dès que la part de marnes noires au sein du mélange artificiel est au moins égale à 50%. Par contre il n'existe pas de différences significatives dans le comportement des mélanges artificiels

comprenant des moraines ou des flyschs. Les moraines et les flyschs présentent des seuils d'écoulement similaires pour les mêmes concentrations volumiques, alors que la viscosité augmente plus rapidement avec la concentration volumique pour les moraines.

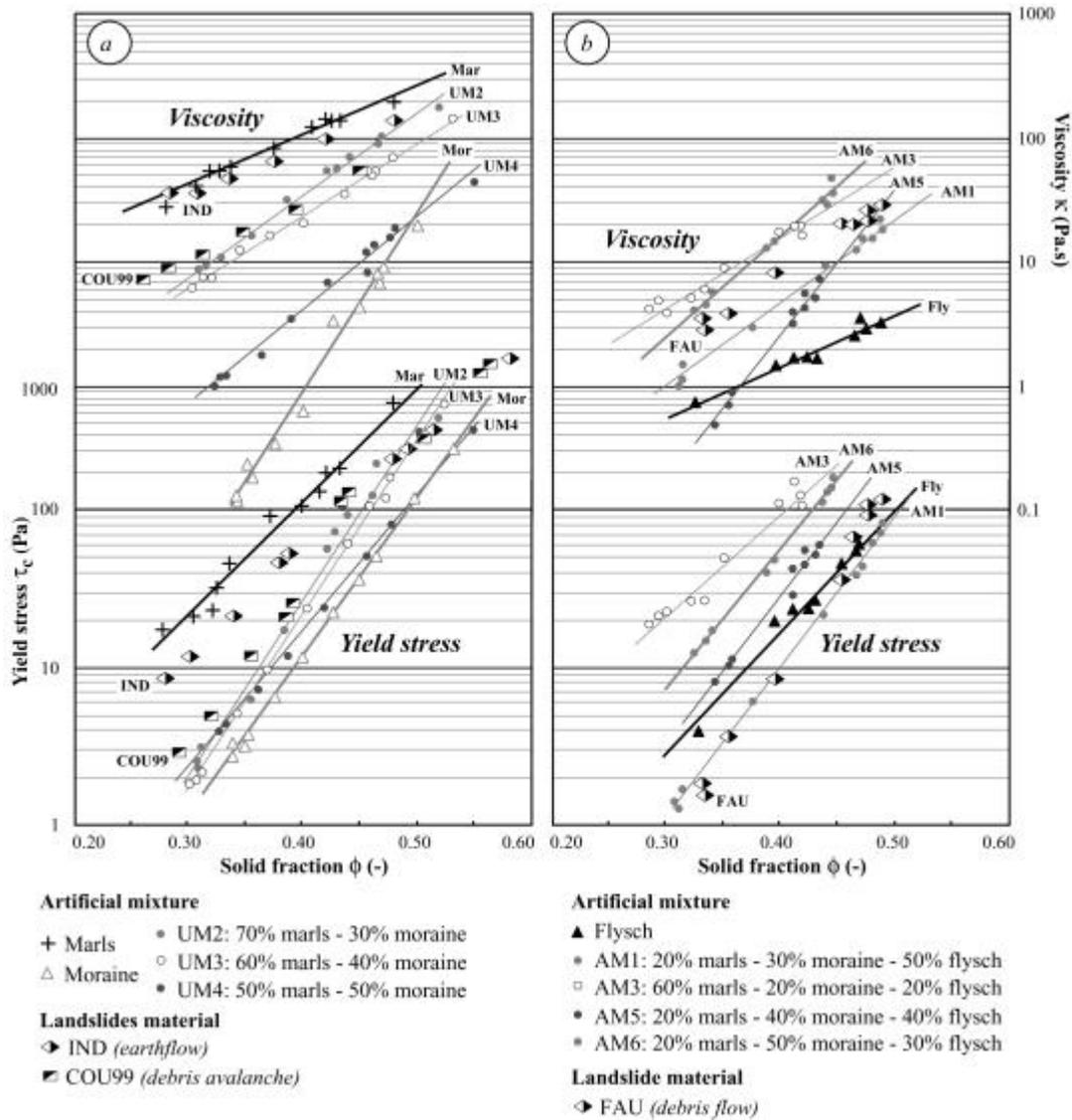


Figure 7. Variation of the rheological properties (yield stress and viscosity) as a function of the total solid volume, using the rheometrical tests, the slump tests and the inclined plane tests. Figure XXa represent the landslide material and artificial mixtures involving black marl and moraine, Figure XXb represent the landslide material and artificial mixtures composed of black marls, moraine and flysch.

Dans l'ensemble marnes-moraine-flysch, les mélanges théoriques qui possèdent la plus grande susceptibilité à l'écoulement sont tous caractérisés par une part modérée de marnes noires au sein du mélange (<50%). Pour l'ensemble marne-moraine, le mélange UM4 (40% de moraines et 60% de marnes noires) est celui qui présente la plus grande susceptibilité à couler. Ce mélange se rapproche fortement du comportement du matériau IND (matériau source de la coulée de débris COU99) (Malet et al., submitted).

Le changement de comportement des mélanges en fonction des matériaux constituants concerne surtout la viscosité. Une discrimination des mélanges peut être observée selon la concentration volumique. C'est par exemple le cas du mélange AM5 qui présente une viscosité très faible pour  $\phi = 0.35$ , mais beaucoup plus importante (supérieure aux autres mélanges) pour des concentrations volumiques supérieures à 0.45.

## 5 CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence que les matériaux issus des glissements évoluant en coulées, des coulées de débris et des laves torrentielles déclenchés dans les marnes noires, possèdent, dans la gamme de taux de cisaillement explorée, un comportement rhéologique en cisaillement simple qui peut être ajusté par un modèle de Herschel-Bulkley où tous les paramètres mécaniques augmentent avec la concentration volumique solide. Les résultats obtenus par différentes méthodes (rheometrical tests, slump tests, inclined plane tests) sont satisfaisants, puisque les écarts relevés pour le seuil de contrainte et la viscosité sont faibles (<20%). Les similitudes dans le comportement des matériaux permettent de tracer des courbes maîtresses. The differences which exist in the plasticity index for each material appear less obvious in the rheological parameters which discriminate two groups of materials according to the percentage of marls and moraines and/or flysch. Néanmoins, sur le seul paramètre viscosité, une classification des matériaux selon leur mode d'écoulement peut être observée. Quelle que soit la concentration volumique, les matériaux ayant coulé avec les vitesses de déplacement les plus fortes présentent les viscosités les plus faibles ; les matériaux en place (Mar) présentent les viscosités les plus importantes.

A mixture of 40 % of moraine (or flysch) and 60 % of marls present the weakest yield stress and viscosity for field measured solid concentrations. La présence de flysch ou de moraine dans les mélanges, associés aux marnes, ne changent pas le comportement du mélange total.

These relations between yield-stress, viscosity and textural properties of the material are useful for torrent hazard management, notamment pour l'identification des zones sources potentielles de mouvements gravitaires rapides, pour construire des cartes de susceptibilité à l'écoulement en fonction de la granulométrie des formations superficielles. Des simulations numériques d'écoulements déclenchés dans des zones sources préalablement déterminées permettront de définir précisément l'extension de la zone à risque pour diverses rhéologies.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by grants from the French Ministry of Research in the framework of the ACI-CatNat contract *MOTE (MOdélisation, Transformation, Ecoulement des coulées boueuses dans les marnes)* and from the CNRS within the framework of the INSU-PNRN contract *ECLAT (Ecoulement, Contribution de Laves Torrentielles dans les bassins versants marneux)*. Contribution INSU N° XX. Contribution EOST N° XX.

## REFERENCES

- Coussot, P. 1994. Steady, laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research* 32: 535-559.
- Coussot, P. & Ancey, C. 1999. *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. Paris, EDP Sciences.
- Coussot, P. & Boyer, S. 1995. Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheologica Acta* 34: 534-543.
- Coussot, P., Leonov, A.I. & Piau, J.-M. 1993. Rheology of concentrated dispersed systems in a low molecular weight matrix. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 46: 179-217.
- Coussot, P. & Piau, J.-M. 1994. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheologica Acta*. 33: 175-184.
- Coussot, P., Proust, S. & Ancey, C. 1996. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 66: 55-70.
- Coussot, P. & Meunier, M. 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews* 40: 209-227.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J. & Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7: 221-238.
- Locat, J. & Demers, D. 1988. Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal* 25: 799-806.
- Magnin, A. & Piau, J.-M. 1990. Cone-and-plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 36: 85-108.
- Malet, J.-P., Maquaire, O. & Calais, E. 2002a. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology* 43: 33-54.
- Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J. Meunier, M. & Maquaire, O. 2002b. Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Premiers résultats. *Rhéologie* (in press).

- Malet J.-P., Locat, J., Remaître, A., Maquaire, O. Triggering conditions and dynamics of distal debris flows associated to marly earthflows. The case of the Super-Sauze earthflow (South Alps, France). *Geomorphology*, 21 p. (submitted).
- Malet, J.-P., Laloui, L., Bonnard, C. & Maquaire, O. Process transformation of earthflow to debris flow in the Sauze torrential catchment (Alpes-de-Haute-Provence, France). In D. Rickenmann (ed), *Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Davos, September 10-12, 2003, 12 p. (submitted).
- Maquaire, O., Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz, S., Guérin, R., Descloîtres, M., Schott, J.-J. & Albouy, Y. 2001. Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires. *Revue Française de Géotechnique* 95-96: 15-31.
- Maquaire, J.-P., Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S. & Guillon, J. Instability conditions of marly hillslopes. Towards landsliding or gullyng? *Engineering Geology*, 21 p. (submitted).
- O'Brien, J.S. 1986. *Physical processes, rheology and modelling of mudflows*. PhD Thesis, Colorado University.
- Pashias, N., Boger, D.V., Summers, J. & Glenister, D.J. 1996. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. *Journal of Rheology* 40: 1179-1189.
- Remaître, A., Maquaire, O. & Pierre, S. 2002. Zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Exemple du torrent de Faucon (Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement* 2002-1: 71-84.