

Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Premiers résultats.

J.-P. Malet¹, A. Rema tre¹, C. Ancey², J. Locat³, M. Meunier² et O. Maquaire¹

1. Institut de Physique du Globe, UMR 7516 CNRS-ULP, 5 rue Descartes, F-67084 Strasbourg, France.

2. Cemagref, Domaine Universitaire, B.P. 76, F-38042, Saint-Martin d'Hères, France.

3. Département de Géologie et Génie Géologique, Université Laval, Sainte-Foy, G1K7P4, Québec, Canada.

Reçu le 6 novembre 2001 – Version finale acceptée le 25 mars 2002

Résumé : Des analyses rhéologiques ont été menées sur les dépôts de divers mouvements de terrain d eclench es dans les marnes noires du bassin de Barcelonnette (glissements évoluant en coulées, coulées de débris, laves torrentielles)   l'aide d'un rhéomètre plan-plan et d'un rhéomètre coaxial. Les résultats indiquent un comportement, en cisaillement simple, de type Herschel-Bulkley. Les paramètres rhéologiques influent clairement sur le type d'écoulement, en particulier pour les glissements-coulées et les laves torrentielles. Enfin, l'influence de la concentration solide peut être représentée en définissant un rhéogramme sous forme adimensionnelle pour chacun des matériaux.

Mots-clé : Rhéologie, mouvements de terrain, marnes noires, Herschel-Bulkley, courbes maîtresses.

[Abridged English version on last page]

1. Introduction

Dans les bassins torrentiels constitu es de marnes noires dans le sud-est de la France, des mouvements gravitaires de terrain présentant des caractéristiques d'écoulement, sont fréquents [1,2]. En utilisant la classification de la référence [3], on distingue les glissements évoluant en coulées ou glissements-coulées (*earthflow*), les coulées de débris (*debris avalanche*), et les laves torrentielles (*debris-flow*). Ces mouvements se différencient par la morphologie des dépôts, la granulométrie, les paramètres mécaniques, et les vitesses d'écoulement. 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. Ils se déclenchent tous après une phase de fragmentation et de perte de cohésion des marnes [4]. De plus, tout ou partie de glissements-coulées peut soudainement se transformer en coulées de débris ou en laves torrentielles.

Si, ces dernières années, la rhéologie des laves torrentielles a connu des progrès importants [5, 6, 7, 8], le comportement rhéologique des écoulements lents, à l'interface entre le domaine de plasticité et le domaine de liquidité, reste un

domaine peu exploré. Une étude a été engagée afin de : (1) vérifier si les différences de vitesse et de mode d'écoulement observ es et mesur es sur le terrain (vitesse de propagation, morphologie des dépôts) sont une conséquence des caractéristiques rhéologiques des matériaux et donc, de vérifier si les caractéristiques rhéologiques permettent de distinguer quantitativement ces divers écoulements ; (2) définir les processus de transformation des matériaux accumul es en écoulements boueux et les conditions d'acquisition de la mobilité (vitesse, distance de propagation). Pour cela, des matériaux, issus de divers mouvements de terrain et impliquant les marnes noires, m lang es dans des proportions diverses à des moraines ou à des flyschs, ont été caract eris es.

Cet article présente les résultats préliminaires des essais rhéométriques r ealis es sur deux géométries (plan-plan, coaxiale) en insistant notamment sur les problèmes expérimentaux. Les courbes maîtresses de chaque matériau sont pr esent es et discut es.

2. Caractéristiques morphologiques

Dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), les matériaux test es 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 superficielles (COU99, COU00), de deux laves torrentielles à matrice cohésive dans les torrents de *Faucon* (FAU) et du *Riou-Bourdoux* (RBX), et du manteau d'altération des marnes *in situ* (MAR).

Les glissements-coulées présentent un comportement essentiellement plastique, une gamme de vitesse large (1–40 cm.j⁻¹) et variable dans le temps [9]. L'écoulement, chenaliss , 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. 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 [9].

Les coulées de débris sont des écoulements superficiels (1–4 m d'épaisseur), rapides (0.5–1 m.min⁻¹), totalement saturés et non chenaliss s. Sur le glissement-coulée de Super-Sauze, les coulées de débris observ es en 1999 et 2000 ont débuté comme des glissements superficiels, puis ont rapidement acquis des caractéristiques d'écoulement. Aucun granoclassement n'est observé dans le dépôt.

Les laves torrentielles, par rapport aux coulées de débris se localisent dans des chenaux torrentiels et présentent des vitesses plus rapides (5 m.s⁻¹) ; un trait caractéristiques des laves torrentielles est un dépôt marqué par un granoclassement inverse [10].

3. Caractéristiques des matériaux

La granulométrie du matériau, le domaine de plasticité, la minéralogie, et la microstructure sont des facteurs qui influencent la réponse diff renci e des matériaux à la mise en mouvement.

La minéralogie (Tab. 1) distingue deux groupes ; d'un côté les matériaux essentiellement marneux (C1a, IND, POC, COU99, COU00, MAR) formés majoritairement d'illites et de chlorites, de l'autre les matériaux qui correspondent à des mélanges marnes/moraine et/ou flysch (VAL, FAU, et RBX), riches en kaolinite et plus pauvres en illite.

D'une manière générale les matériaux  cr t s à 20 mm sont caractérisés par l'importance des fractions argileuses et limoneuses (Fig. 1, Fig. 2). 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. 3).

Les matériaux des glissements-coulées sont riches en limons et en argiles (C1a, POC) car constitués principalement des marnes noires ; les matériaux (IND, VAL) correspondant aux mélanges marnes/moraine présentent des fractions sableuses plus importantes. Les médianes (Q₅₀) indiquent un diamètre moyen: faible et dispersé (entre 0.02 et 0.6 mm) pour POC, similaire (0.4–0.5mm) pour les 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 [11]. Ce pourcentage atteint 36-51 % pour POC, 32-39 % pour les échantillons de Sauze (COU99, C1A, IND) 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.

	Granulométrie				Atterberg			Poids volumique			Minéralogie****					
	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	Graviers (%)	Q25 (mm)	Q50 (mm)	Q75 (mm)	W _p	W _i *	W _i **		I _p	SS*** (m ² /g)	ρ _d (kg/m ³)	ρ _{sat} (kg/m ³)	
<i>C1a</i>	25	22	15	38	0,0170	2,300	10,0	16	32	35	14	16	33	17,6	21,4	Il (78), Ch (18), Sm (4)
<i>IND</i>	31	29	10	30	0,0023	0,400	2,50	17	33	31	14	16	37	12,2	17,9	Il (63), Ch (14), Sm (4), Ca (8), Qu (11)
<i>VAL</i>	32	20	11	37	0,0016	0,975	4,00	19	31	33	12	12	41	12,1	17,3	Ka (32), Il (23), Ch (20), Ca (13), Qu (12)
<i>POC</i>	20	42	9	29	0,0009	0,019	1,91	20	37	39	15	17	34	13,7	18,3	Il (82), Ch (12), Sm (6)
<i>COU99</i>	35	24	9	32	0,0018	0,422	2,50	15	30	33	13	15	34	12,0	17,3	Il (75), Ch (15), Sm (3), Ca (3), Qu (4)
<i>COU00</i>	26	44	15	15	0,0012	0,011	0,48	19	37	40	13	18	67	19,4	22,0	Il (70), Ch (15), Sm (4), Ca (5), Qu (6)
<i>FAU</i>	30	20	6	44	0,0190	0,800	8,30	19	26	24	13	7	17	10,5	16,3	Il (26), Ka (40), Ch (19), Ca (7), Qu (8)
<i>RBX</i>	36	16	10	38	0,0190	0,455	4,30	21	29	28	17	8	21	10,7	16,5	Il (32), Ka (35), Ch (25), Ca (4), Qu (4)
<i>MAR</i>	39	14	10	37	0,0220	0,400	4,20	21	29	28	17	8	21	11,8	17,1	Il (75), Ch (23), Sm (2)

* : méthode de la coupelle de Casagrande, ** : méthode du cône suédois, *** : SS est la surface spécifique, **** Il désigne l'illite, Ch, la chlorite, Sm, la smectite, Ka, la kaolinite, Qu, le quartz, Ca, la calcite.

Fig. 1 : Caractéristiques mécaniques des dépôts de mouvements de terrain dans les marnes noires.

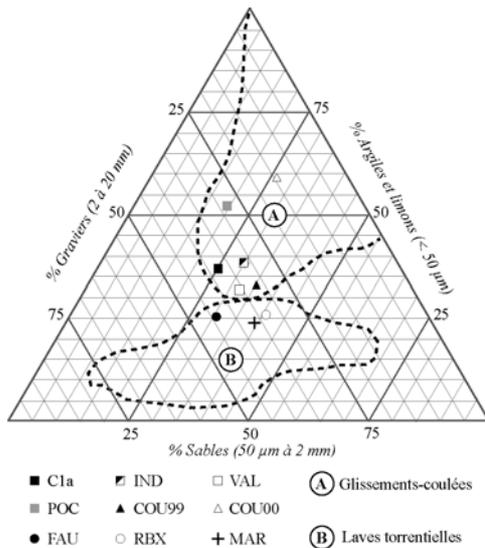


Fig. 2 : Texture des matériaux et classification des mouvements (lignes pointill es) selon la référence [3].

La composition de la matrice permet ainsi de distinguer les types de mouvements. [3]. Ceci démontre qu'un lien net entre composition granulométrique et type d'écoulement existe. Ce résultat est en accord avec la classification des écoulements propos e récemment par la référence [3], fond e sur la texture des matériaux mobilisés. Les laves torrentielles contiennent moins de 30 % de silts et d'argiles. Elles peuvent donc être distingu es des glissement-coul es, beaucoup plus cohésifs. Il est remarquable de noter que les coul es de débris présentent une texture intermédiaire.

Les limites d'Atterberg [12], et notamment l'indice de plasticité (I_p), font apparaître une différenciation nette entre les coul es issues de glissements et les

coul es 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 rhéométriques. 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). La question est maintenant de savoir si ces caractéristiques se retrouvent dans les paramètres rhéologiques.

4. Protocole expérimental

Les fluides soumis aux essais rhéométriques sont des suspensions des 9 matériaux,  cr t s à 400 µm. Les essais ont été réalisés pour six concentrations volumiques solides ϕ . Un volume donné de matériau solide a été ajouté à de l'eau puis mélangé à l'aide d'un malaxeur mécanique à 600 t.min⁻¹ pendant une minute puis à 400 t.min⁻¹ pendant 30 min.

Les fluides ont été testés avec un rhéomètre Rotovisco RV20 (Haake)  quip  de plans parallèles rugueux (diamètre, 5 cm ; épaisseur de l'échantillon cisailé, 2,8 mm ; rugosité à peu près 250 µm) et un rhéomètre Rotovisco RV12 (Haake)   cylindres coaxiaux à large entrefer (capteur MV-I). La procédure expérimentale, par paliers de vitesse impos e, et les précautions prises pour limiter les effets perturbateurs (glissement aux parois, fracturation, creusement, sédimentation) sont décrites en détail dans les références [13, 14].

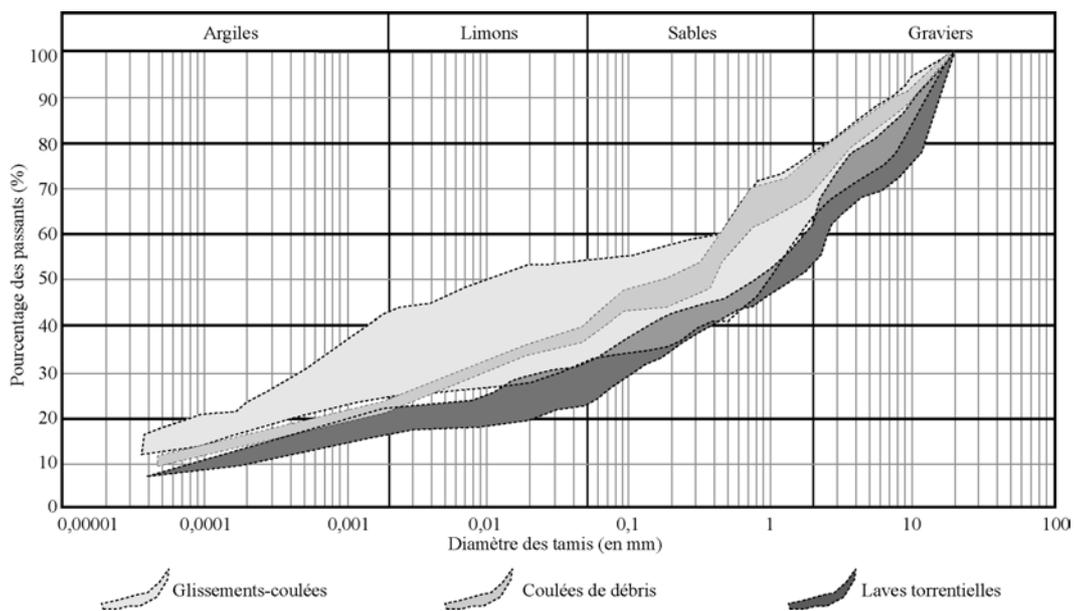


Fig. 3 : Fuseaux granulométriques des divers mouvements de terrain.

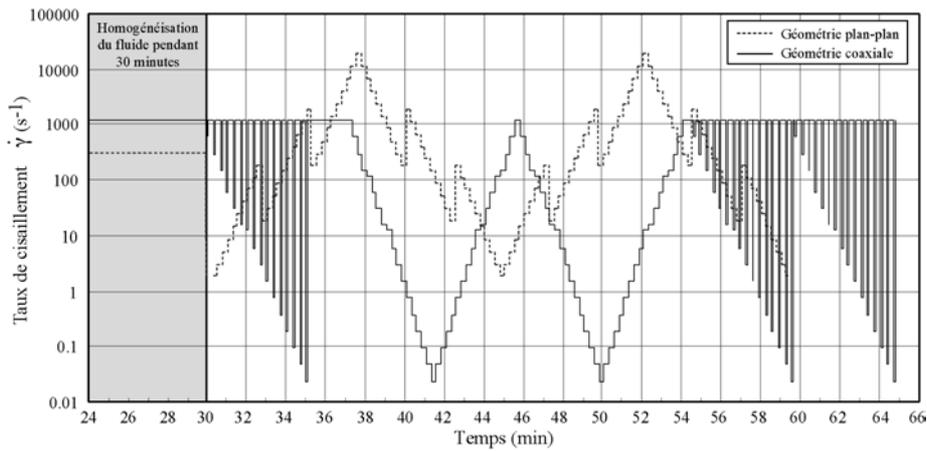


Fig. 4 : Protocole des essais rhéométriques.

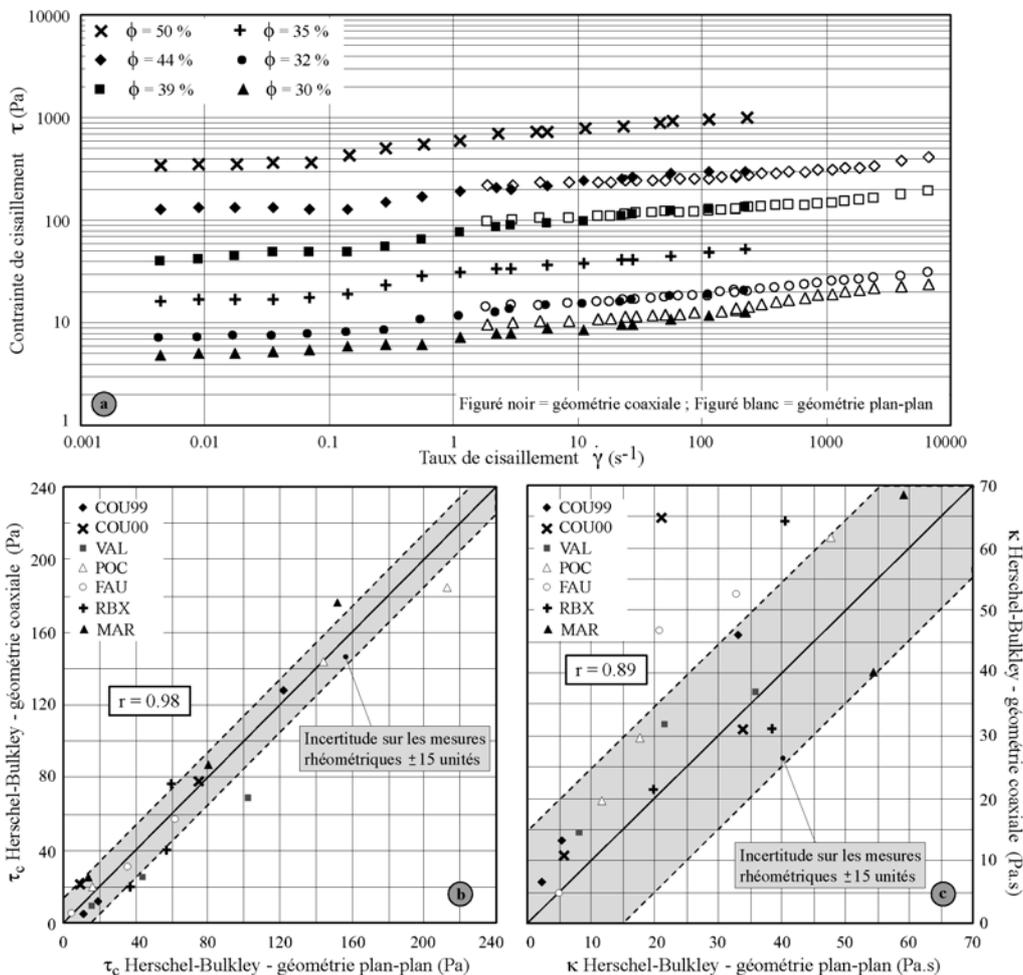


Fig. 5 : Courbes d'écoulement du matériau COU99 pour six ϕ (a), Comparaison τ_c Herschel-Bulkley géométrie plan-plan et coaxiale (b), Comparaison κ Herschel-Bulkley géométrie plan-plan et coaxiale (c).

Avant chaque essai, le matériau est amené en régime cisailé pendant deux minutes à un taux de cisaillement de 1000 s^{-1} , puis pendant 28 min, à un taux de 100 s^{-1} . Pour la géométrie plan-plan, le protocole expérimental décrit par la référence [15] a été utilisé. Il implique la succession de diverses rampes de vitesse (Fig.3) où chaque taux de cisaillement est maintenu pendant un palier de 15

Avant chaque essai, le matériau est amené en régime cisailé pendant deux minutes à un taux de cisaillement de 1000 s^{-1} , puis pendant 28 min, à un taux de 100 s^{-1} . Pour la géométrie plan-plan, le protocole expérimental décrit par la référence [15] a été utilisé. Il implique la succession de diverses rampes de vitesse (Fig.3) où chaque taux de cisaillement est maintenu pendant un palier de 15

secondes (paliers largement supérieurs au temps caractéristique de ce type de matériau). Pour la géométrie à cylindres coaxiaux, trois phases de sollicitation dynamique du fluide (Fig. 4) ont été associées aux rampes de vitesses [16].

L'utilisation des deux géométries a permis d'explorer une plage de taux de cisaillement étendue, de $1,87 \text{ s}^{-1}$ à 18700 s^{-1} pour le plan-plan, entre $0,02 \text{ s}^{-1}$ et 1200 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 [17] sur le terrain.

Il est toutefois intéressant de noter que pour les appareils utilisés, un taux de cisaillement de 300 s^{-1} est similaire à une vitesse d'écoulement *in situ* de 10 m.s^{-1} pour une épaisseur de zone cisailée de $0,03 \text{ m}$ [18].

5. Résultats expérimentaux

5.1. Influence de la géométrie sur la courbe d'écoulement

La figure 5a présente les courbes d'écoulement de l'échantillon COU99. Dans la plage de taux de cisaillement commune aux deux rhéomètres, la forme et l'amplitude des courbes sont similaires. Les paramètres de Herschel-Bulkley estimés à partir des deux géométries sont identiques, notamment pour le seuil d'écoulement (Fig. 5b), avec un coefficient de corrélation de 0,98. L'écart est plus important pour l'estimation de la viscosité (Fig. 5c), avec un coefficient de corrélation de 0,89. Les différences entrent dans la marge d'erreur précisée par la référence [19] qui, indique que l'écart de mesures du seuil de contrainte d'un appareil à un autre est généralement dans une fourchette de 5 à 15 unités

5.2. Caractère thixotrope des matériaux

Le caractère thixotrope des matériaux a été examiné en réalisant des mesures spécifiques, dans la géométrie coaxiale. Le protocole utilisé comprend 17 paliers de vitesses de $0,02 \text{ s}^{-1}$ à 1200 s^{-1} pour la courbe de charge et de 1200 s^{-1} à $0,02 \text{ s}^{-1}$ pour la courbe de décharge ([20, 21]). Les paliers de vitesses sont de 15 s à l'exception du palier au taux de cisaillement maximal qui est de 135 s. La courbe de décharge a débuté 390 s après la fin de la courbe de charge. Avec les deux rhéogrammes tracés sur un même graphique, la thixotropie est estimée en mesurant, par planimétrie, la surface de la boucle

d'hystérésis. La référence [20] montre que celle-ci a la dimension d'une énergie rapporté au volume de l'échantillon cisailé pour une unité de temps. Comme le montre la figure 6a pour l'échantillon COU99, l'effet de la thixotropie est faible (à notre échelle d'observation, l'écart maximal observé est de l'ordre de 20 Pa). La figure 6b montre l'influence de la concentration volumique solide sur l'amplitude de la surface d'hystérésis. Pour tous les matériaux, les relations sont bien définies et la surface de la boucle diminue avec la concentration volumique. Deux types de matériaux peuvent être identifiés selon la pente de la relation.

5.3. Modèle de comportement des matériaux

Tous les matériaux présentent le même type de comportement rhéofluidifiant vers les taux de cisaillement forts (Fig. 5a). Vers les faibles taux de cisaillement (typiquement entre $0,05$ et 1 s^{-1}), 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 le matériau non mobilisé (MAR) présente un comportement plus classique. Des essais à contrainte imposée devraient permettre de vérifier si cette inflexion correspond à un comportement particulier des matériaux ayant coulé, à des effets géométriques ou à des biais expérimentaux.

Pour chaque matériau et chaque concentration volumique solide, plusieurs modèles (Bingham, bilinéaire, Herschel-Bulkley) ont été ajustés 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 [22]. 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 τ_c ajustés par les modèles sont supposés proches des seuils d'écoulement réels [15].

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 (τ_c , κ) 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

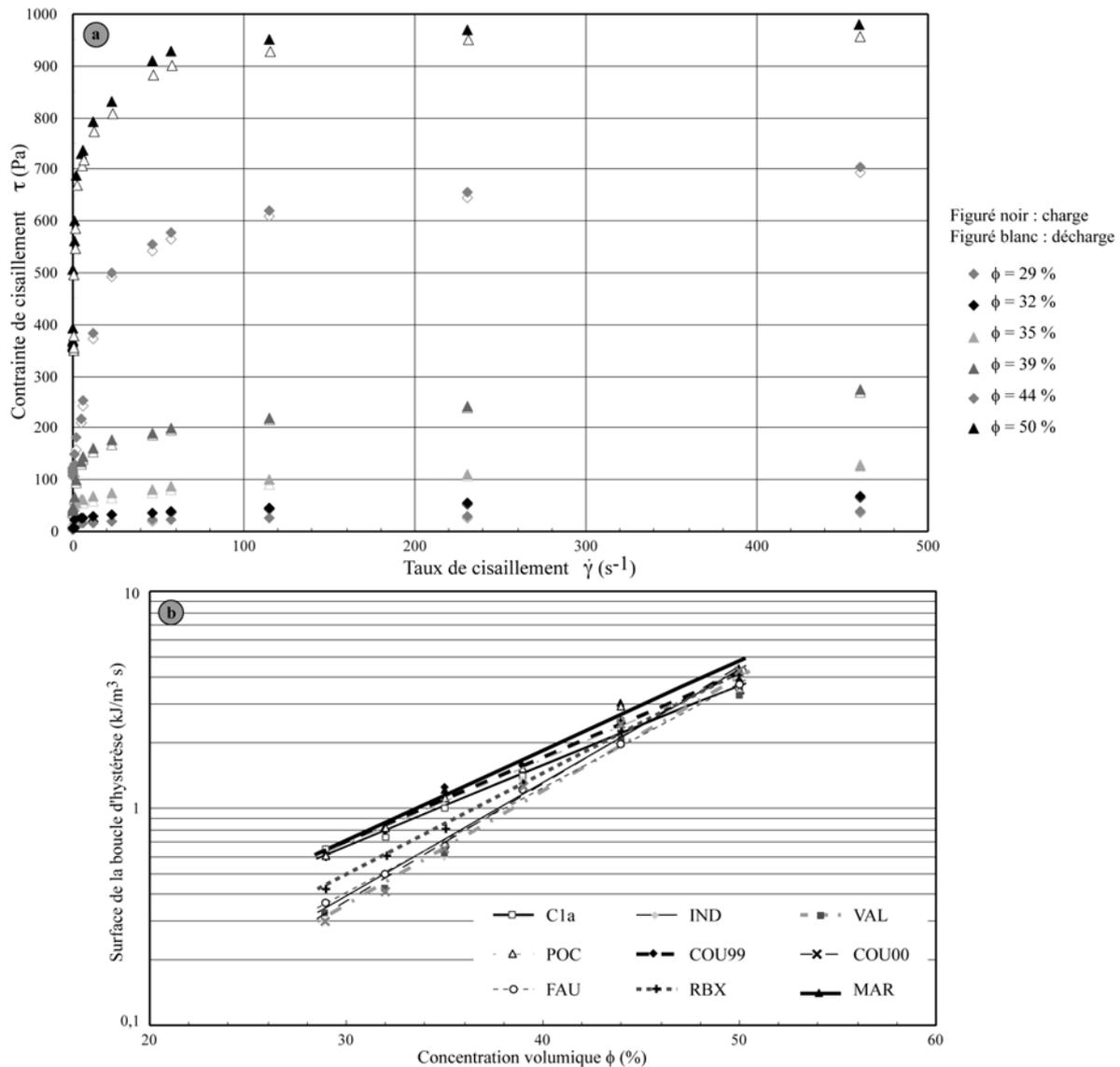


Fig. 6 : Courbes d'écoulement du matériau COU99 pour 6 concentrations volumiques (a), Influence de la concentration volumique sur le comportement thixotropique des matériaux (b).

0,1 à 150 Pa.s. Une différenciation importante des matériaux dans la gamme des concentrations volumiques ϕ de 35 à 50 % est observée, alors que pour les fortes teneurs en eau, les matériaux présentent les mêmes paramètres rhéologiques.

5.4. Courbes maîtresses

Pour déterminer à terme les caractéristiques rhéologiques à partir d'expériences simples de terrain (slump test, plan incliné), les courbes maîtresses des différents matériaux ont été déterminées. Les taux de cisaillement et les seuils de contraintes ont été réduits par τ_c . Ainsi, dans un graphique ($\dot{\gamma}/\tau_c$, τ/τ_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 μ aux taux de cisaillement

élevés et qui tend vers 1 aux taux de cisaillement faibles (Fig. 6a). La courbe maîtresse calée sur les points expérimentaux est de la forme :

$$\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right) = 1 + \lambda \cdot \left(\frac{\dot{\gamma}}{\tau_c}\right)^m \quad (1)$$

En faisant l'hypothèse que les effets hydrodynamiques sont prédominants aux taux de cisaillement élevés, le comportement est essentiellement influencé par la concentration volumique solide. Une relation exponentielle est définie entre le paramètre λ et ϕ , avec :

$$\lambda = a \cdot e^{-b \cdot \phi} \quad (2)$$

Pour tous les matériaux, λ augmente avec ϕ (Fig. 6b), mais la forme de la relation $\lambda=f(\phi)$ est très

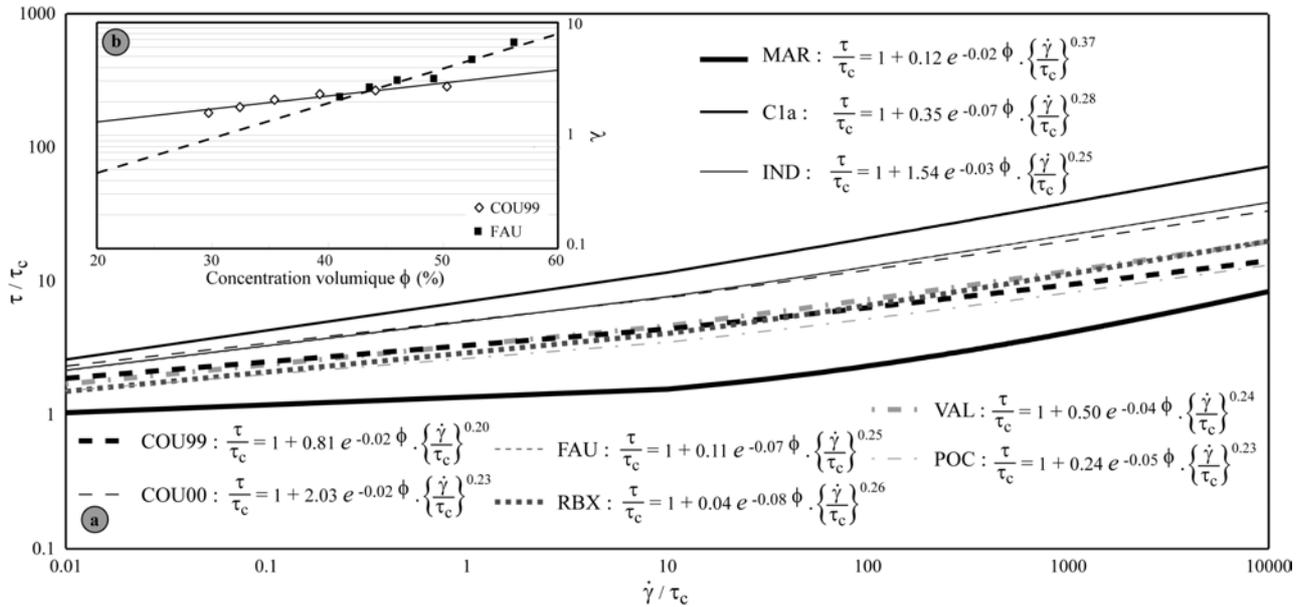


Fig. 6 : Courbes d'écoulement sous forme adimensionnelle (a), Relation exponentielle $\lambda=f(\phi)$ pour deux matériaux (b).

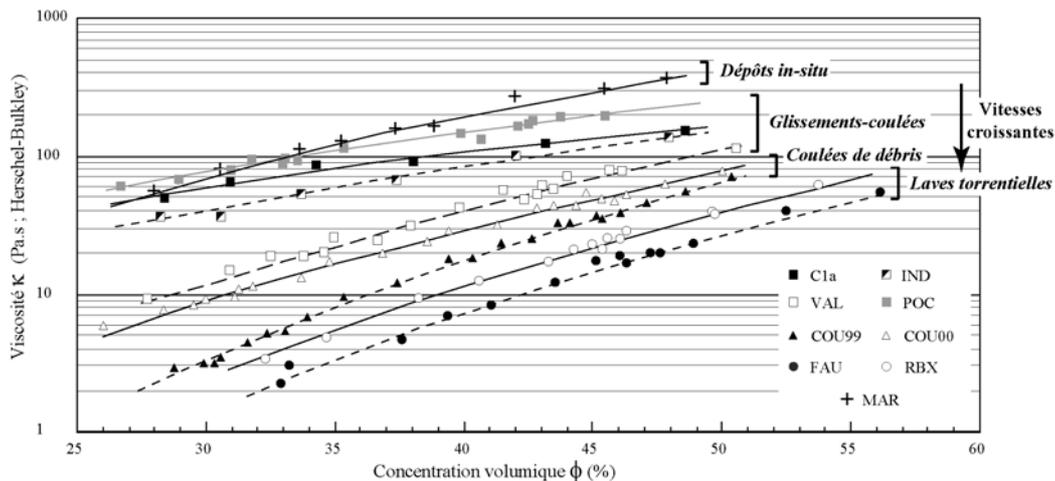


Fig. 7 : Relation Viscosité (Herschel-Bulkley) – Concentration volumique pour tous les matériaux.

différente selon les matériaux. Malgré les différences de granulométrie et de minéralogie, il est possible de matérialiser le comportement en écoulement par une courbe maîtrise unique dont les paramètres ne dépendent que du seuil de contrainte et des concentrations volumiques.

Les courbes maîtrises des coul es de débris (COU99, COU00) et des laves torrentielles (FAU, RBX) sont encadr es par celle des glissement-coul es (C1a, IND, VAL et POC). Notons la similitude des courbes maîtrises IND et COU00, qui montre que le matériau IND correspond à la zone source de la coul e de débris COU00. Seules les altérites de marnes présentent un comportement bilinéaire plus marqué.

6. Conclusion

Cette étude préliminaire a mis en évidence que les matériaux issus des glissements évoluant en coul es, des coul es de débris et des laves torrentielles déclenchés dans les marnes noires, possèdent, dans la gamme de taux de cisaillement explor e, 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 sur les deux rhéomètres sont satisfaisants, puisque les écarts relevés pour le seuil de contrainte et la viscosité sont faibles. Les matériaux sont faiblement thixotropes. Les similitudes dans le comportement des matériaux permettent de tracer des courbes maîtrises. La distinction qui existe en termes d'indice de plasticité

entre les matériaux ayant coul e sous forme de glissements-coulées, de coulées de débris ou de laves torrentielles est moins évidente dans les paramètres rhéologiques. Ces derniers discriminent plutôt deux groupes de matériaux selon le pourcentage de marnes et de moraine et/ou flysch.

Néanmoins, sur le seul paramètre viscosité, une classification des matériaux selon leur mode d'écoulement peut être observée (Fig. 7). Quelle que soit la concentration volumique, les matériaux ayant coul e 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.

La caractérisation rhéologique est actuellement poursuivie pour : (1) définir le comportement des matériaux sous de très faibles contraintes (essais à contrainte imposée), (2) analyser le rôle des « constituants » des matériaux (granulométrie, minéralogie) pour comprendre l'évolution du comportement à partir d'essais rhéologiques sur des mélanges artificiels marnes/moraine et l'influence de l'historique des écoulements (vitesses) sur les différences de comportement.

Remerciements : Ce programme a été financ e par le Ministère de la Recherche dans le cadre de l'Action Concertée Incitative CatNat – Projet MOTE (*MOd elisation, Transformation, Ecoulement des coulées boueuses dans les marnes*). Contribution EOST N o 2002.005-UMR7516. Contribution INSU N o 313.

Références :

- [1] Malet, J.-P., Maquaire, O., Klotz, S. *The Super-Sauze flowslide. Triggering mechanism and behaviour*. Proc. VIIIth Int. Symp. Landslides, Cardiff, 999-1005 (2000).
- [2] Maquaire, O., Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz, S., Guérin, R., Desclo tres, M., Schott, J.-J., Albouy, Y. Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires. *Rev. Fr. Géotech.*, 95-96, 15-31 (2001).
- [3] Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. A review of the classification of landslides of the flow type. *Envir. & Eng. Geosc.*, 7, 221-238 (2001).
- [4] Maquaire, O., Malet, J.-P., Rema tre, A., Klotz, S. Debris-flow and earthflow occurrence in black marls (South Alps, France). *Geomor.*, 15 p (soumis).
- [5] Phillips, C.J., Davies, T.R.H., Determining rheological parameters of debris flows. *Geomor.*, 4, 101-110 (1991).
- [6] Major, J.J., Pierson, T.C. Debris flow rheology : experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.*, 28, 3, 841-857 (1992).
- [7] Coussot, P., Piau, J.-M. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta*, 33, 175-184 (1994).
- [8] Iverson, R.M., Physics of debris flow. *Rev. Geophys.*, 35, 245-296 (1997).
- [9] Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow.(Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomor.*, 43, 33-54 (2002).
- [10] Costa, J.E. *Physical geomorphology of debris flows*. Developments and Applications in Geomorphology, Springer-Verlag, 268-317 (1984).
- [11] Maquaire, J.-P., Malet, J.-P., Rema tre, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J. Geomechanical behaviour of Callovo-Oxfordian black marls and its implication for landslide phenomena: application to the Barcelonnette basin, *Catena.*, 21 p. (soumis).
- [12] Ayadat, T., Ouali, S., Identification des sols affaissables bas ee sur les limites d'Atterberg. *Rev. Fr. G eotech.*, 53-55 (1999).
- [13] Coussot, P., Leonov, A.I., Piau, J.M. Rheology of concentrated dispersed systems in a low molecular weight matrix. *J. Non-Newtonian. Fluid Mech.*, 46, 179-217 (1993).
- [14] Magnin, A., Piau, J.M. Cone-and-plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel. *J. Non-Newtonian. Fluid Mech.*, 36, 85-108 (1990).
- [15] Coussot, P., Piau, J.M. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta.*, 33, 175-184 (1994).
- [16] Locat, J., Demers, D. Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.*, 25, 799-806 (1988).
- [17] O'Brien, J.S. *Physical processes, rheology and modelling of mudflows*. (PhD, Colorado Univ., 1986).
- [18] Locat, J. *Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime*. Proc. Ist Int. Conf. Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, 260-269 (1997).
- [19] Coussot, P., Ancey, C. *Rh eophysique des p ates et des suspensions*.(EDP Sciences, Paris, 1999).
- [20] Couarraze, G., Grossiord, J.-L. Initiation à la rh eologie. (Lavoisier, Paris, 1983).
- [21] Perret, D., Locat, J., Martignoni, P. Thixotropic behaviour during shear of a fine grained mud from Eastern Canada. *Eng. Geol*, 43, 31-44 (1996).
- [22] Coussot, P., Boyer, S. Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheol. Acta.*, 34, 534-543 (1995).

Abridged English Version

Rheological characteristics of debris flows and mudflows of the Barcelonnette marnous catchment – First results -

Abstract : Rheological response of remoulded landslide deposits (earthflow, debris-flow, channelized debris-flow) have been investigated in the black marls of the Barcelonnette basin using a parallel-plate rheometer and a coaxial rheometer. Results show that the behaviour in simple shear of all these natural flows can be fitted by an Herschel-Bulkley model. The rheological parameters distinguish well the type of movement, in particular for earthflow and channelized debris flow. Master curves are given for all the materials.

Key-words : Rheology, landslides, black marls, Herschel-Bulkley, master curves.

In torrential black marls basins, several types of mass movements can be observed. They are characterized by different morphology, deposits, flowing modes and velocities: earthflows ($1\text{-}40\text{ cm.day}^{-1}$), debris-avalanches and debris-flows (until 5 m.s^{-1}). The rheological behaviour of these slow flows remains little explored. In this context, a study was undertaken in order to: (1) 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; (2) define the transformation processes of the accumulated materials into muddy flows and the conditions of acquisition of the mobility (velocity, run-out). Several materials, resulting from various mass movements and implying the black marls, mixed in various proportions with moraines or flyschs, were characterised. This article shows the preliminary results of the rheological tests carried out on two geometries (parallel-plate and coaxial). The master curves obtained for each material are presented and discussed.

The tested materials come from earthflows (*Super-Sauze*, C1a and IND; *La Valette*, VAL; *Poche*, POC), debris-avalanches initiated from the Super-Sauze earthflow (COU99, COU00), debris-flows with a cohesive matrix in the Faucon (FAU) and Riou-Bourdoux (RBX) torrents, and from *in situ* black marls (MAR). These materials, mainly composed of illites and chlorites (Fig. 1), present little granulometric contrasts (Fig. 2; 3) and plasticity index ranging between 7 and 18.

Fluids subject to rheometric tests were suspensions of the 9 materials, cut at $400\ \mu\text{m}$. Tests have been carried out for six solid concentrations and in isothermal conditions with a Rotovisco RV20 rheometer (Haake) equipped with rough parallel-plates and a Rotovisco RV12 rheometer (Haake) equipped with coaxial cylinders (MV-I sensor). The use of the two geometries

allows to explore an extended range of shearing rate, 1.87 s^{-1} to 18700 s^{-1} for the parallel-plate, 0.02 s^{-1} and 1200 s^{-1} for the coaxial. The range of shearing rates is nevertheless faster (2 to 3 orders) than measured velocities for this type of flow.

In the range of shearing rates commune to the two rheometers, the shape and extent of the flow curves are similar. The Herschel-Bulkley parameters estimated from the two geometries are identical (Fig. 5b, 5c). Figure 6 shows that thixotropy is weak (on our observation scale, the maximum variation observed is 20 Pa) and diminishes with the solid concentration (Fig. 6b). All the materials present a strong pseudo-plastic behavior, that is well represented by a Herschel-Bulkley model. All the Herschel-Bulkley parameters (τ_c , κ) decrease with the solid concentration, with an exponent n ranging between 0.25 and 0.4. Yield stress and plastic viscosity vary respectively from 1 to 480 Pa and from 0.1 to 150 Pa.s. A significant differentiation of materials in the range of the solid concentrations from 35 to 50 % is observed, whereas the materials characterized by high water contents have the same rheological parameters. To determine the rheological characteristics from simple field experiments (slump test, belt conveyor), the master curves of the various materials were construct. The shearing rate and the yield stress have been reduced by τ_c . In spite of granulometry and mineralogy differences, it is possible to materialize the behavior of each material by a master curve of which parameters depend only of the yield stress and of the solid concentration (Fig. 7). Thus, the master curve of the debris-flows (COU99, COU00) and channelized debris-flows (FAU, RBX) are framed by the earthflows (C1a, IND, VAL and POC). We can notice the similarity of the master curves IND and COU00, which shows that the material IND corresponds to the source area of the debris-flow COU00. Only the *in situ* black marls present a marked bi-linear behavior.

This paper has demonstrated that the materials resulting from earthflows, debris-avalanches and channelized debris-flows behave, in the range of shearing rates explored, as a Herschel-Bulkley fluid where all the mechanical parameters increase with the solid concentration. Results obtained on the two rheometers are satisfactory, since the variations raised for the yield stress and viscosity are weak. The materials are slightly thixotropic. The similarities in the behavior of the materials allow to plot master curves. The differences which exist in the plasticity index for each material appear less obvious in the rheological parameters. The latter rather discriminate two groups of materials according to the percentage of marls and moraines and/or flysch. Nevertheless, a strict relation exists between the viscosity of the material and the velocity of the flow (Fig. 8); the viscosity decreases for the material which flowed with the highest velocities. Thus the flowing history has to be taken into account.