

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. Remaître¹, C. Ancey², J. Locat³, M. Meunier² et O. Maquaire¹

1. Cereg, FRE 2399, ULP-CNRS-ENGEEES, 3 rue de l'Argonne, F-67083 Strasbourg Cedex, 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.

Résumé : Des analyses rhéologiques ont été menées sur les dépôts de divers types de mouvements de terrain déclenchés dans les marnes noires du bassin de Barcelonnette (glissements évoluant en coulées, coulées de débris, laves torrentielles) à 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 discriminent clairement les différents types de mouvements de terrain, en particulier pour les glissements évoluant en coulées et les laves torrentielles. Les courbes maîtresses sont données pour tous les matériaux.

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

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.

1. Introduction

Dans les bassins torrentiels constitués de marnes noires dans le sud-est de la France, des mouvements gravitaires de terrain se produisent : glissements évoluant en coulées, coulées de débris, laves torrentielles [1,2]. Ces mouvements chenalisés sont lents ($1-40 \text{ cm.j}^{-1}$) avec des déplacements courts pour les glissements évoluant en coulées alors qu'ils sont rapides (jusqu'à 5 m.s^{-1}) avec des déplacements sur de grandes distances pour les coulées de débris et les laves torrentielles. Tous ces écoulements se déclenchent après une phase de fragmentation et de perte de cohésion des marnes [3]. Si, ces dernières années, la rhéologie des laves torrentielles a connu des progrès [4, 5, 6, 7], le comportement rhéologique des écoulements lents, reste un domaine peu exploré. Une étude a été engagée afin de : (1) vérifier si les différences de vitesse et de mode d'écoulement observées et mesurées sur le terrain (vitesse de propagation, morphologie des dépôts) sont une conséquence des caractéristiques rhéologiques des matériaux ; (2) définir les processus de transformation des matériaux accumulés 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, mélangées dans des proportions diverses à des moraines ou à des flyschs, ont été caractérisés. Cet article présente les résultats préliminaires des essais rhéométriques réalisés sur deux géométries (plan-plan, coaxiale) en insistant notamment sur les problèmes expérimentaux. Les courbes maîtresses de chaque matériau sont présentées et discutées.

2. Caractéristiques des matériaux

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

Les matériaux testés proviennent de coulées issues de glissements (*Super-Sauze*, C1a et IND ; *La Valette*, VAL ; *Poche*, POC), de coulées de débris superficielles déclenchées en 1999 et en 2000 à partir de la couche de surface de la coulée de *Super-Sauze* (COU99, COU00), de 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).

La minéralogie (Tab. 1) distingue deux groupes ;

	Granulométrie							Atterberg					Poids volumique			Minéralogie****
	Sables (%)	Limons (%)	Argiles (%)	Graviers (%)	Q25 (mm)	Q50 (mm)	Q75 (mm)	W _p	W _i *	W _i **	W _r	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 (8), Qu (9)
<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), Cl (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.

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

d'un côté les matériaux essentiellement marneux (C1a, IND, POC, COU99, COU00, MAR) formées 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.

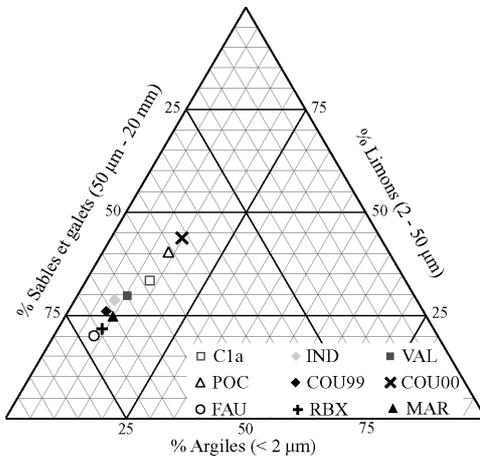


Fig. 1 : Texture des matériaux.

Les matériaux des coulées issues de glissements sont riches en limons et en argiles (C1a, POC) car constitués principalement des marnes noires (Fig. 1, Tab. 1) ; les matériaux (IND, VAL) correspondant aux mélanges marnes/moraine présentent des fractions sableuses plus importantes. Les matériaux des coulées de débris ont des granulométries différentes : COU99 est pauvre en fines alors que COU00 est plus cohésif. Les matériaux FAU et RBX présentent une texture sablo-limoneuse classique de laves torrentielles à matrice cohésive.

Les limites d'Atterberg [8], 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 ($I_p=7-8$). 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.

3. Protocole expérimental

Les fluides soumis aux essais rhéométriques sont des suspensions des 9 matériaux, écrêtés 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) équipé de plans parallèles rugueux (diamètre, 5 cm ; épaisseur de l'échantillon cisailé, 3 mm ; rugosité à peu près 250 µm) 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 les références [9] et [10]. Introduit dans le rhéomètre, le fluide est cisailé pendant deux minutes à un taux de cisaillement de 1000 s⁻¹, puis pendant 28 min, il est homogénéisé sous l'effet d'un cisaillement à un taux plus faible (100 s⁻¹) afin d'atteindre le régime permanent (sur une échelle de temps courte).

Pour la géométrie plan-plan, le protocole expérimental décrit par la référence [11] a été utilisé. Il implique la succession de diverses rampes de vitesse (Fig. 2). Pour la géométrie à cylindres coaxiaux, trois phases de sollicitation dynamique du fluide (Fig. 2) ont été associées aux rampes de vitesses [12]. L'utilisation des deux géométries a permis d'explorer une plage de taux de cisaillement étendue, de 1,87 s⁻¹ à 18700 s⁻¹ pour le plan-plan, entre 0,02 s⁻¹ et 1200 s⁻¹ pour le coaxial. La plage de taux de cisaillement utilisée dans cette étude est 2 à 3 ordres de grandeur supérieur à celle rencontrée pour ce type d'écoulement [13].

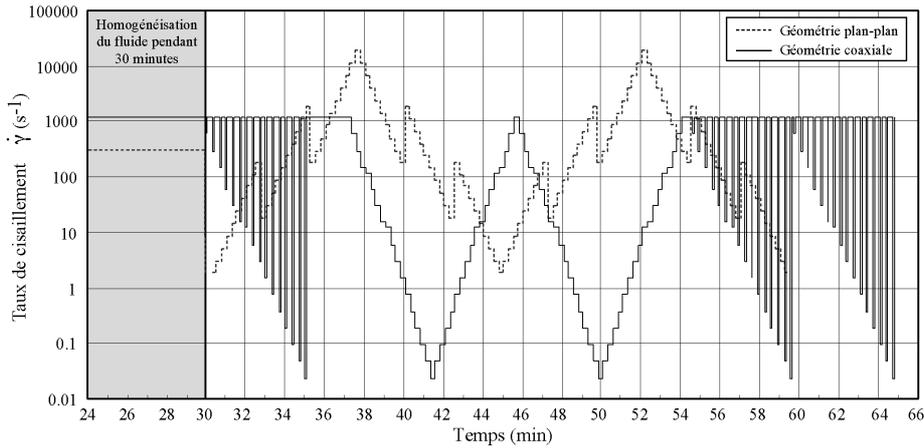


Fig. 2 : Protocole des essais rhéométriques.

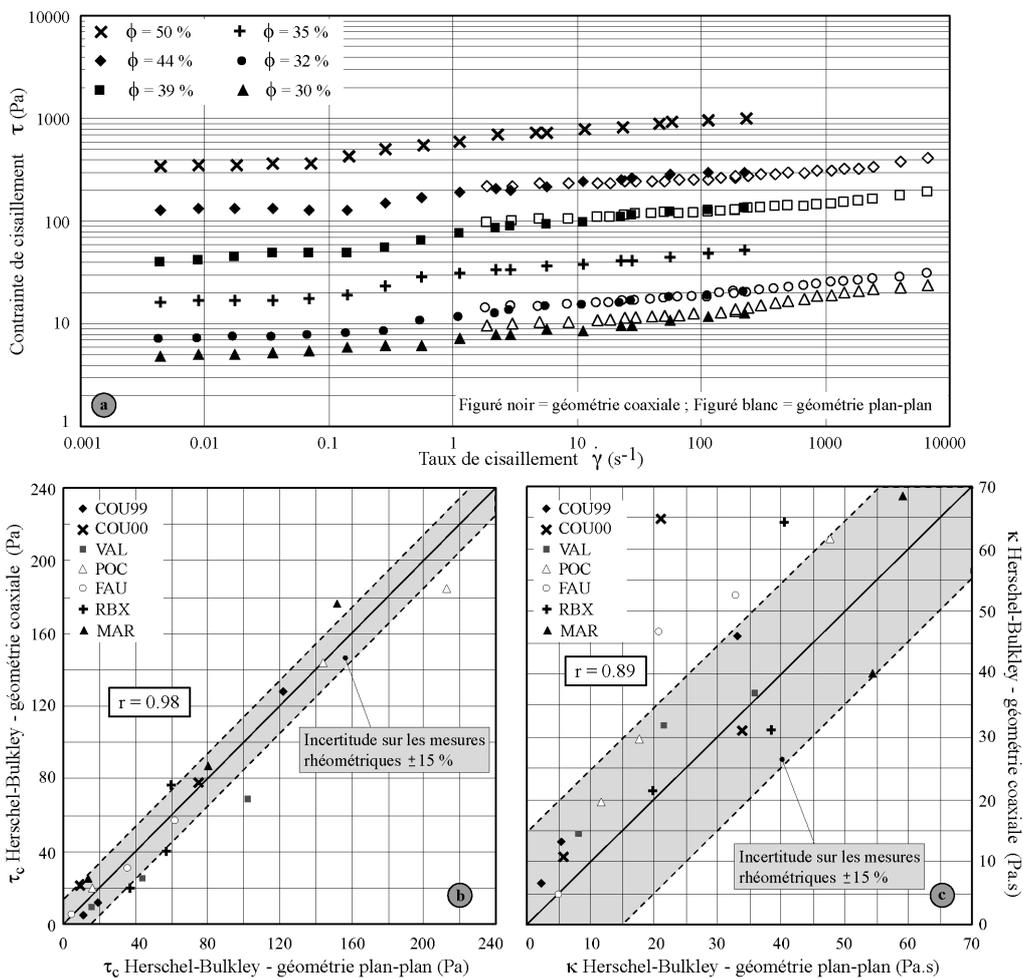


Fig. 3 : Courbes d'écoulement du matériau COU99 pour six ϕ (a), Comparaison τ_c Herschel-Bulkley géométrie plan-plan et coaxiale (b), Comparaison κ Herschel-Bulkley géométrie plan-plan et coaxiale (c).

Il est 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 $0,3 \text{ m}$ [14].

4. Résultats expérimentaux

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

La figure 3a présente les courbes d'écoulement de l'échantillon COU99.

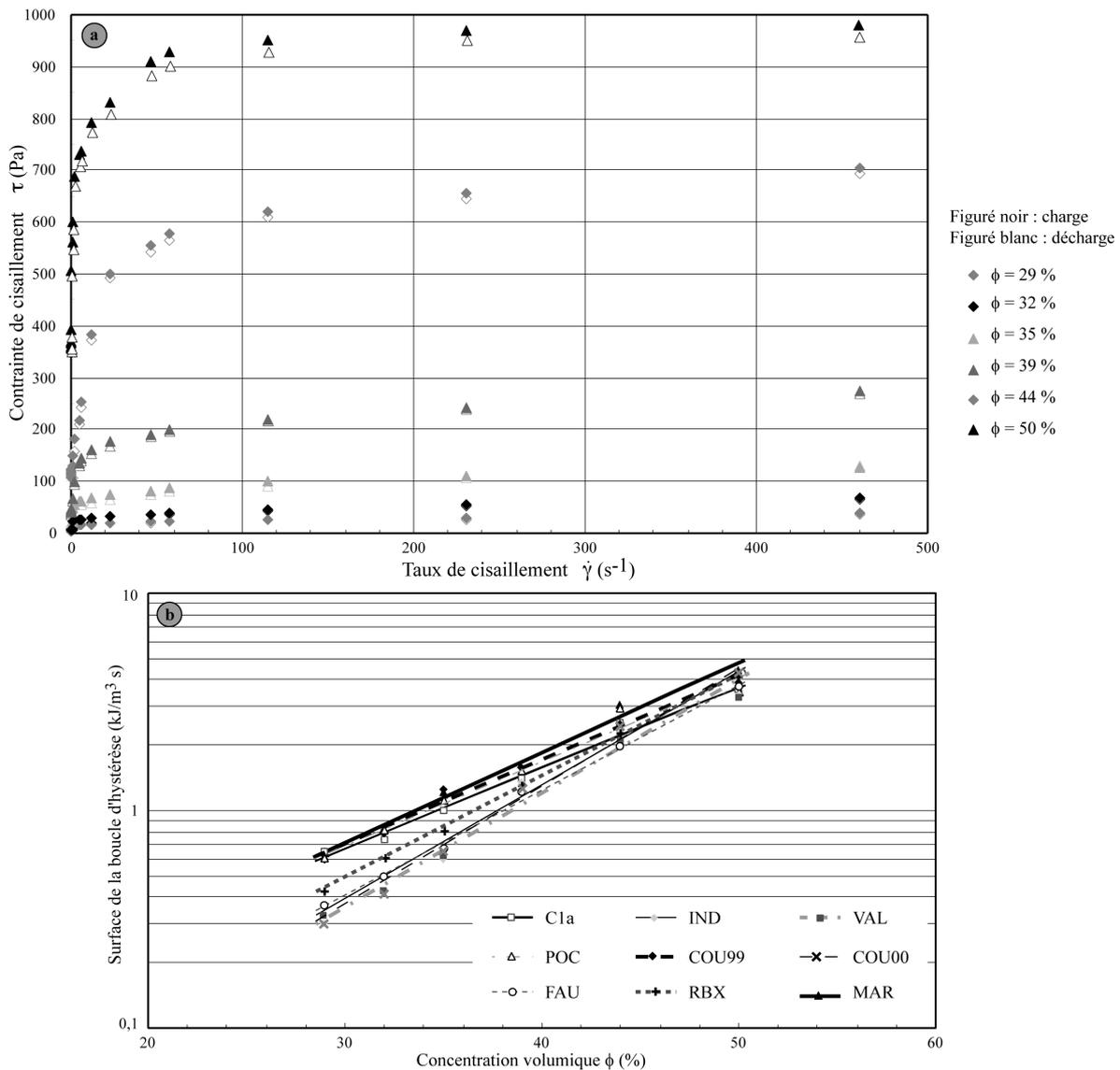


Fig. 4 : Courbes d'écoulement du matériau COU99 pour 6 concentrations volumiques (a), Influence de la concentration volumique sur le comportement thixotropique des matériaux (b).

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. 3b), avec un coefficient de corrélation de 0,98. L'écart est plus important pour l'estimation de la viscosité (Fig. 3c), avec un coefficient de corrélation de 0,89. Les différences entrent dans la marge d'erreur précisée par la référence [15] qui, indique que l'écart de mesures du seuil de contrainte d'un appareil à un autre est généralement dans une fourchette de 0 à 15 %.

4.2. Caractère thixotropique des matériaux

Le caractère thixotropique des matériaux a été examiné en réalisant des mesures spécifiques, dans

la géométrie coaxiale. Le protocole utilisé ([16], [17]) consiste à effectuer une expérience en charge et en décharge avec maintien du palier de vitesse pendant 135 s. La courbe de décharge a débuté 15 min 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 [16] 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 4a 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 4b 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.

4.3. Modèle de comportement des matériaux

Tous les matériaux présentent le même type de comportement rhéofluidifiant vers les taux de cisaillement forts (Fig. 3a). 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, bi-linéaire, 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 [18]. Pour les ajustements, seules les valeurs des derniers cycles ont été utilisées. Comme les fluides sont faiblement thixotropiques 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 [11].

Sur la plage de taux de cisaillement considérée, la totalité des matériaux présente un comportement pseudo-plastique 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 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.

4.4. 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. 5a). 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 :

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

Pour tous les matériaux, λ augmente avec ϕ (Fig. 5b), mais la forme de la relation $\lambda=f(\phi)$ est très différente selon les matériaux. Malgré les différences de granulométrie et de minéralogie, 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 courbes maîtresses des coulées de débris (COU99, COU00) et des laves torrentielles (FAU, RBX) sont encadrées par celle des glissements évoluant en coulées (C1a, IND, VAL et POC). 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 altérites de marnes présentent un comportement bi-linéaire plus marqué.

5. Conclusion

Cette étude préliminaire a mis en évidence que les matériaux issus des glissements évoluant en coulées, des coulées de débris et des laves torrentielles déclenchées 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 augmente 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 maîtresses. La

distinction qui existe en termes d'indice de plasticité entre les matériaux ayant coulé sous forme de glissements évoluant en coulée, 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. La caractérisation rhéologique est actuellement

poursuivie pour définir le comportement des matériaux sous de très faibles contraintes (essais à contrainte imposée) et 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.

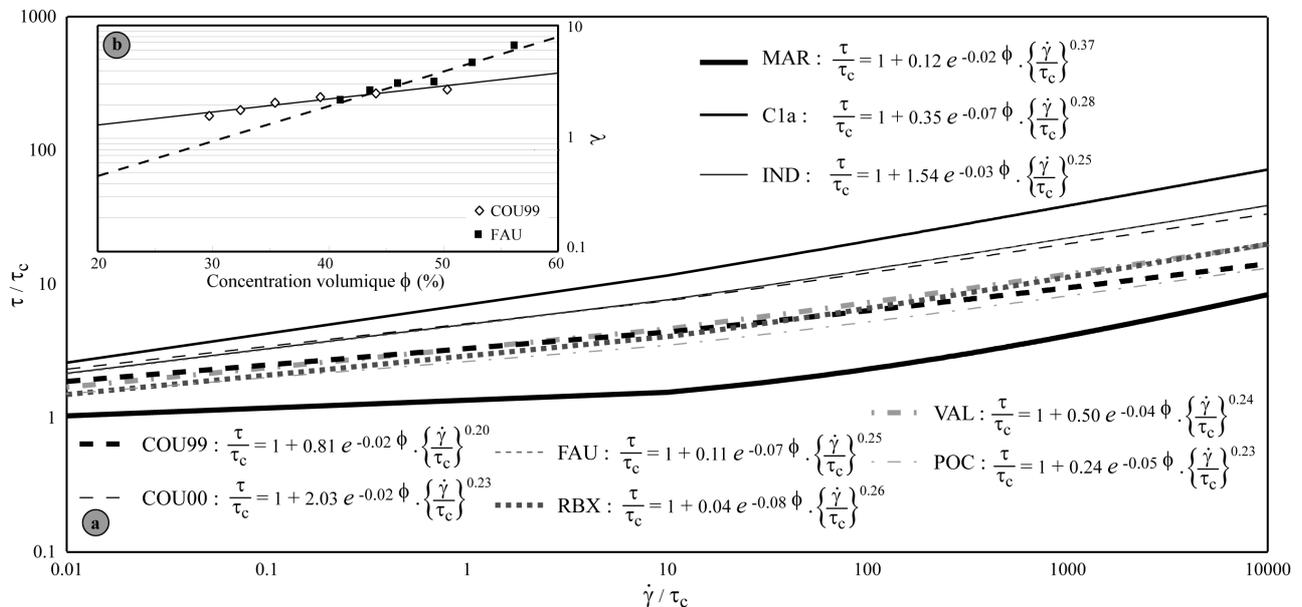


Fig. 6 : Courbes d'écoulement sous forme adimensionnelle (a), Relation exponentielle $\lambda=f(\phi)$ pour deux matériaux (b).

Remerciements : Ce programme a été financé par le Ministère de la Recherche dans le cadre de l'Action Concertée Incitative CatNat – Projet MOTE (MOfélisation, Transformation, Ecoulement des coulées boueuses dans les marnes).

Références bibliographiques :

[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., Desclôitres, M., Schott, J.-J., Albouy, Y. Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires. *Rev. Fr. Géotech.*, 16 p (2001)
 [3] Maquaire, O., Malet, J.-P., Remaître, A., Klotz. Debris-flow and earthflow occurrence in black marls (South Alps, France). *Geomor.* 15 p (soumis).
 [4] Phillips, C.J., Davies, T.R.H., Determining rheological parameters of debris flows. *Geomor.*, 4, 101-110 (1991).
 [5] Major, J.J., Pierson, T.C. Debris flow rheology : experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.*, 28, 3, 841-857 (1992).
 [6] Coussot, P., Rhéologie des laves torrentielles. *Houille Blanche*, 3, 32-37 (1994).
 [7] Iverson, R.M., Physics of debris flow. *Rev. Geophys.*, 35, 245-296 (1997).
 [8] Ayadat, T., Ouali, S., Identification des sols affaissables basée sur les limites d'Atterberg. *Rev. Fr. Géotech.*, 53-55 (1999).

[9] 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).
 [10] 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).
 [11] Coussot, P., Piau, J.M. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta.*, 33, 175-184 (1994).
 [12] Locat, J., Demers, D. Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Can. Geotech. J.*, 25, 799-806 (1988).
 [13] O'Brien, J.S. *Physical processes, rheology and modelling of mudflows*. (PhD, Colorado Univ., 1986).
 [14] 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).
 [15] Coussot, P., Ancey, C. *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*. (EDP Sciences, Paris, 1999).
 [16] Couarraze, G., Grossiord, J.-L. Initiation à la rhéologie. (Lavoisier, Paris, 1983).
 [17] Perret, D., Locat, J., Martignoni, P. Thixotropic behaviour during shear of a fine grained mud from Eastern Canada. *Eng. Geol.*, 43, 31-44 (1996).
 [18] Coussot, P., Boyer, S. Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheol. Acta.*, 34, 534-543 (1995).