

Le comportement des alluvions du Rhône dans une grande boîte de cisaillement direct

Y. BOURDEAU

INSA de Lyon,
URGC Géotechnique,
bât. 304
20, avenue Albert-Einstein,
69621 Villeurbanne Cedex

Résumé

Cet article présente une procédure d'exploitation d'essais de cisaillement direct réalisés avec une grosse boîte sur différents sites de la région lyonnaise ainsi qu'en laboratoire. Elle conduit à des lois empiriques de formulation simple pour déterminer les paramètres de cisaillement des alluvions du Rhône. La première partie décrit le mécanisme de l'évolution réciproque de l'angle de frottement interne et de la cohésion avec le déplacement imposé, en précisant l'influence des caractéristiques physiques et granulométriques sur le comportement observé. La deuxième partie décrit l'évolution conjointe de la dilatance avec la mobilisation de la résistance au cisaillement et les deux lois d'écoulement qui en résultent. Parmi les enseignements de cette étude phénoménologique on met en évidence le rôle temporaire de la cohésion capillaire dans les alluvions du Rhône et l'effet du remaniement sur les paramètres de cisaillement. On montre aussi que l'angle de frottement critique des alluvions peut être estimé avec un excès de l'ordre de un degré au point de soulèvement optimal dans un essai de cisaillement direct à disposition symétrique.

The behaviour of Rhône alluvium materials in a large direct shear test

Abstract

This paper presents the approach for exploitation of large direct shear tests carried out in various sites for the Lyon area and also in laboratory. Empirical models for determination of shear parameters are given for Rhône alluvium materials. The first part of the study describes the variations of the internal friction angle and of the cohesion as a function of displacement. The influence of physical properties and particle size on this behaviour is specified. The second part describes the flow rules which may be used to express the relationship between the mobilized shear stress and the rate of dilation. This investigation shows the temporary effect of the cohesion and the effect of disturbance on shear parameters. It also appears that the critical state for alluviums can be estimated with an excess about one degree when zero rate of dilation occurs in a symmetrical test with fixed top platen.

Introduction

Une superficie importante du site de Lyon est recouverte par des dépôts d'alluvions du Rhône, formés de sables et graviers, pouvant atteindre une vingtaine de mètres d'épaisseur. Le niveau de la nappe phréatique affleure le plus souvent le toit des alluvions, à la limite des remblais récents de 4 à 5 m d'épaisseur qui constituent la couverture naturelle en site urbain. Les terrassements ou l'exécution de fondations profondes mettent souvent en évidence des hétérogénéités dans cette couche porteuse, la présence d'horizons sableux alternant avec des dépôts plus grossiers (David, 1967). La figure 1 présente des courbes granulométriques relatives à une fouille de 5 m de profondeur, qui rendent compte de l'hétérogénéité de ces alluvions et de la taille des grains.

Ces sables et graviers sont de composition quartzique et contiennent des éléments calcaires qui leur confèrent une cohésion capillaire naturelle due à une cimentation des grains par des dépôts de carbonate de calcium (Cambefort, 1965). Des talus sablo-graveleux de grande hauteur peuvent ainsi rester stables avec une pente élevée, mais cet équilibre reste cependant fragile.

L'appréciation de cette cohésion en vue du dimensionnement des ouvrages est très délicate et source de nombreux débats. D'une manière plus générale, la détermination des paramètres de cisaillement des sols grossiers au laboratoire est sujette à l'écrêtage ou à la reconstitution du matériau, ce qui rend indispensable l'utilisation de matériels d'essais *in situ* de grandes dimensions pour caractériser ces alluvions.

Cet article présente la synthèse de résultats d'essais de cisaillement direct obtenus sur le sol en place, à Lyon et sur des sites voisins de la vallée du Rhône pré-

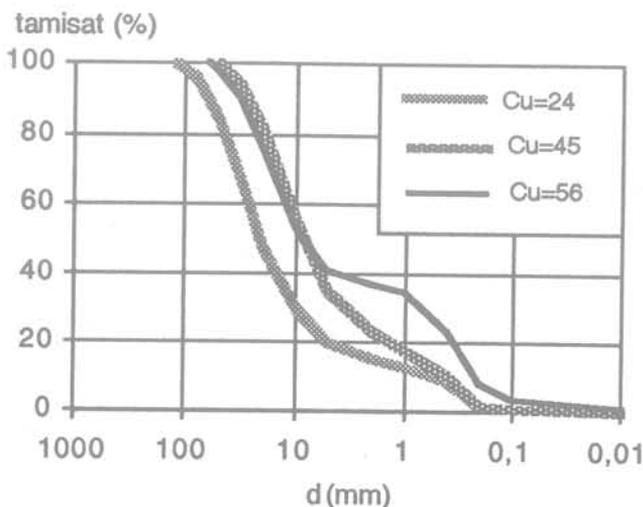


FIG. 1 Exemple de courbes granulométriques des alluvions du Rhône (gare de Vénissieux).
Example of grain size distribution for Rhône alluvium materials (station of Vénissieux).

sentant des alluvions semblables (Laréal *et al.*, 1973, Laréal, 1975, Kastner, 1982, Bourdeau *et al.*, 1989), ainsi qu'au laboratoire sur des échantillons reconstitués (Bacot, 1981, Guichard, 1995, Ogunro, 1996). Cette étude expérimentale, réalisée avec une boîte de section 0,6 m x 0,6 m et de hauteur de 0,4 m, est complétée par la mesure de l'angle de frottement critique ϕ_{cv} à l'appareil triaxial.

Le comportement au cisaillement des alluvions du Rhône est analysé ici à travers l'évolution réciproque de l'angle de frottement interne ϕ et de la cohésion C jusqu'à l'obtention de l'effort résiduel. Ce mécanisme, qui est décrit conjointement au développement de la dilataance, débouche sur des lois d'écoulement.

Une approche par corrélations faisant intervenir les caractéristiques physiques, granulométriques et mécaniques du matériau conduit à des lois de comportement générales, qui sont de formulation simple et complémentaires. Elles englobent les essais *in situ* et les essais de laboratoire et permettent de répondre à l'effet de l'écrêtage et du remaniement sur la résistance au cisaillement des alluvions du Rhône.

2

Les dispositifs expérimentaux

2.1

Les essais *in situ*

Les expérimentations en place ayant été réalisées dans le cadre de grands travaux, parfois à l'intérieur de fouilles étroites en site urbain, le dispositif d'essais a été conçu pour répondre avec souplesse aux impératifs habituels des chantiers : conditions d'accès difficiles, encombrement limité, rapidité d'intervention pour le respect des plannings et de l'organisation du chantier et utilisation d'engins pour les manutentions.

La boîte, qui ne comprend que la partie dite supérieure, est mise en place par havage sur une profondeur de 350 mm. Pour empêcher toute possibilité d'évolution de la charge verticale en cours d'essai et pour autoriser la libre évolution de la dilataance dans l'échantillon, le dispositif de chargement est réduit à un plateau qui vient en appui sur l'échantillon de sol (Fig. 2a). Ce plateau peut recevoir jusqu'à 10 gueuses en fonte de 5 kN, ce qui limite la contrainte normale σ_v à 158 kPa en tenant compte du poids de la boîte et du matériau qu'elle contient.

Le système de traction comprend un capteur d'effort et un vérin actionné par une centrale hydraulique. L'effort de cisaillement est appliqué dans le plan de séparation du boîtier et du massif selon le processus du déplacement contrôlé à charge normale constante, avec une vitesse de 1 mm/mn. Le déplacement horizontal U est mesuré en deux points de la face arrière de la boîte et les mouvements verticaux V du plateau ont pu être suivis sur le site de Saint-Vallier.

2.2

Les essais de laboratoire

Dans le dispositif de laboratoire (Fig. 2b) la boîte supérieure et les modes d'application de la charge ver-

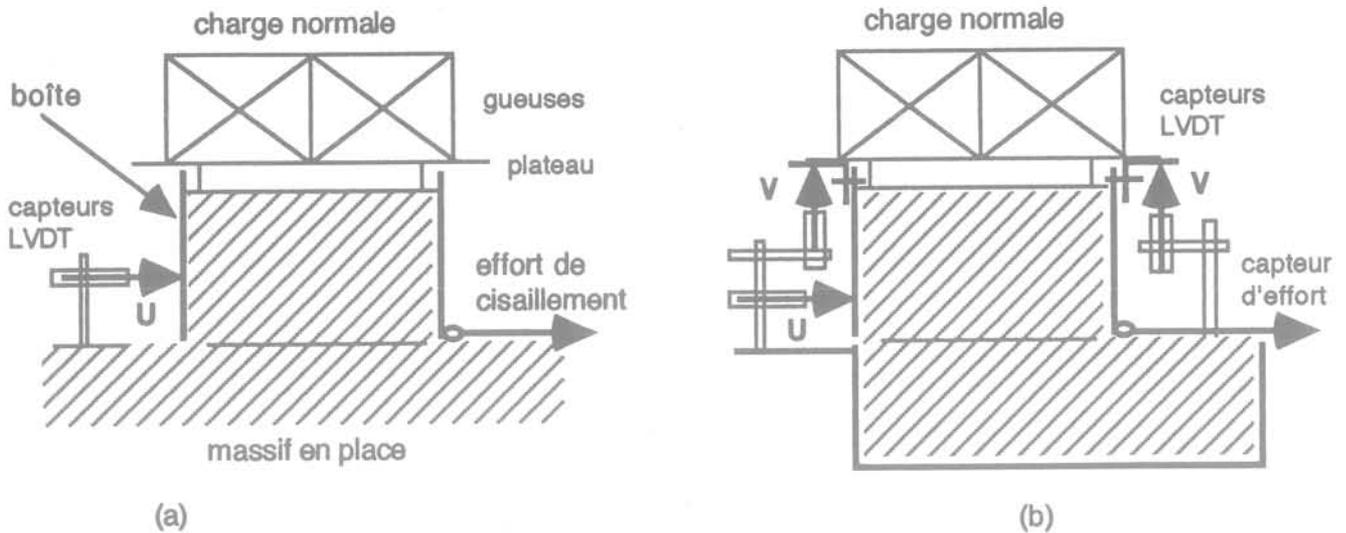


FIG. 2 Principe de l'essai de cisaillement direct: (a) essai *in situ* avec plateau de chargement libre et boîte 0,6 x 0,6 m (section) x 0,4 (hauteur), (b) essai au laboratoire avec piston bloqué (disposition symétrique). Large direct shear test (schematic): (a) *in situ* test with free top platen and box 0,6 m x 0,6 m (area) x 0,4 m (height), (b) laboratory symmetrical test with fixed top platen.

ticale et de l'effort de cisaillement sont identiques à ceux de l'essai en place. La longueur de la boîte inférieure est portée à 1 m pour avoir une section de cisaillement constante et un écartement suffisant est imposé entre les boîtiers afin d'éviter les frottements parasites.

Le mode opératoire s'effectue sans le souci de la reproduction des conditions relevées sur site et il est modifié pour chaque série d'essais afin d'étendre la plage des caractéristiques physiques et granulométriques du sol. Le compactage en plusieurs couches est assuré avec une dame à hauteur de chute contrôlée ou une pilonneuse.

Alors que les mouvements relatifs de la boîte et du plateau de chargement ne sont pas empêchés dans les essais *in situ*, la liberté de rotation de l'échantillon est réduite au laboratoire en appliquant la disposition symétrique recommandée par Jewell (1989) pour accroître l'uniformité des déformations dans le plan de cisaillement. Cette opération consiste à solidariser le plateau au boîtier supérieur, dont les faces intérieures sont lubrifiées, après chargement et consolidation du matériau.

Les mouvements verticaux V sont mesurés aux quatre coins du boîtier supérieur.

3

Le programme expérimental

Le bilan de la campagne expérimentale s'établit à 27 séries d'essais, pour σ_o variant entre 36 et 158 kPa. Les essais *in situ* (Tableau I) ont été réalisés au toit des alluvions, après décapage de la couche superficielle, pour les sites de Saint-Vallier, Vénissieux, Feyzin, Millery, ou à l'intérieur de fouilles pour les sites Lyonnais (Part-Dieu, Saxe-Gambetta et Garibaldi) à des profondeurs pouvant atteindre 11 m par rapport au terrain naturel, ou 7 m par rapport au toit des alluvions. En outre, à Saint-Vallier, des essais complémentaires ont été réalisés sur des remblais reconstitués avec le matériau en place.

Les essais de laboratoire sont effectués sur des échantillons écrêtés à $d_{max} = 80$ mm, 50 mm, 31,5 mm ou 20 mm (Tableau II). Afin de définir la valeur minimale de d_{max} permettant de conserver le comportement en place du matériau, l'écrêtage est réalisé sans compensation.

Le facteur d'amélioration F_a indiqué aux tableaux I et II traduit l'influence conjuguée du poids volumique sec γ_d et du coefficient d'uniformité C_u du matériau sur l'amélioration de la résistance au cisaillement. La relation empirique (2) qui détermine F_a est une généralisation de la formule (1) proposée par Mogami (1969) pour estimer l'angle de frottement au pic ϕ_{pic} des matériaux grossiers perméables à partir de l'indice des vides e et de C_u .

$$(1 + e) \sin \phi_{pic} = k = A + B \cdot \log(C_u) \quad (1)$$

Les constantes A et B dépendent du sol. La solution $A = 2B = 0,432$ retenue dans (2) correspond pour les alluvions du Rhône à la borne supérieure des points de mesure dans le repère $k - \log(C_u)$ (Bourdeau *et al.*, 1989 et Guichard, 1995).

$$F_a = \frac{0,216 \log(100 C_u)}{1 + e} \quad (2)$$

4

Résultats expérimentaux

4.1

Estimation de l'angle de frottement critique

Le bas du tableau II rend compte des essais triaxiaux avec mesure des variations de volume réalisés pour plusieurs densités d'un échantillon de diamètre 200 mm et de hauteur 420 mm. L'angle de frottement critique ϕ_{cv} dépendant essentiellement de la nature minéralogique du matériau, afin de réduire les effets d'échelle d'une part et pour ne pas avoir à tenir compte d'une cohésion capillaire d'autre part, ces essais triaxiaux ont été conduits sur un échantillon sec écrêté à 5 mm et débarassé des fines.

TABEAU I Programme des essais *in situ*.
Set of *in situ* tests.

Site	γ_d kN/m ³	Cu	F _u
Lyon Part-Dieu (4 séries) (TN à NGF 167,6 toit des alluvions à NGF 163,2) fouille à NGF 160,5 (I) ^a fouille à NGF 158,5 (II) ^a fouille à NGF 158,7 (III) ^a fouille à NGF 156,8 (IV) ^a	21,2 ^b	60 ^b	0,653
Lyon Saxe-Gambetta (6 séries) (TN à NGF 167,2 toit à NGF 162,3) fouille à NGF 159,6 (2 séries) fouille à NGF 158 (2 séries) fouille à NGF 156 (2 séries)	17 19,4 21,1	243 37 60	0,608 0,564 0,650
Lyon Garibaldi (TN à NGF 171 toit des alluvions à NGF 166) fouille NGF 164,6 (1 série)			
Vénissieux toit des alluvions (1 série)	18,5	56	0,584
Feyzin toit des alluvions (1 série)			
Millery toit des alluvions (1 série)	22,4	97	0,728
Saint-Vallier (5 séries) toit des alluvions (I) ^c toit des alluvions (II) ^c remblai roulé (III, 2 séries) remblai déversé (IV)	22,1 21,1 22,0 21,1	46 60 48 40	0,660 0,650 0,660 0,620

^a essais stoppés au pic
^b valeur moyenne du site
^c mesure de la dilatance

TABEAU II Programme des essais de laboratoire.
Set of laboratory test.

Lieu de prélèvement	γ_d kN/m ³	Cu	F _u
Miribel (6 séries) d _{max} = 80 mm ^d d _{max} = 50 mm ^d d _{max} = 31,5 mm (I) ^d d _{max} = 31,5 mm (II) d _{max} = 20 mm (I) ^d d _{max} = 20 mm (II) ^d	20,9 22,0 24,4 21,0 21,4 21,4	64 51 37 33 22 31	0,648 0,665 0,710 0,602 0,583 0,606
Vénissieux (1 série) d _{max} = 31,5 mm	20,2	36	0,566
Satolas (1 série) d _{max} = 20 mm	20,9	18	0,555
Miribel (3 séries de 4 essais triaxiaux ^e) d _{max} = 5 mm d _{max} = 5 mm d _{max} = 5 mm	15,6 16,4 17,0		

^d mesure de la dilatance
^e 0,2 MPa ≤ σ_3 ≤ 0,5 MPa

Les études comparatives de Negusse *et al.* (1988) sur un sable d'Ottawa et Oyenuga et Tisot (1989) sur un sable de Moselle ont par ailleurs montré un bon accord entre ϕ_{cv} et l'angle ϕ_{mc} mesuré au point de contraction maximale dans un essai triaxial. L'utilisation de cette méthode indirecte conduit ici à $\phi_{cv} = 33^\circ$, soit $\tan \phi_{cv} = 0,65$. Cette valeur s'inscrit bien dans la plage des valeurs généralement admises pour des grains siliceux.

4.2

Mise en évidence du rôle temporaire de la cohésion

Les figures 3 et 4 illustrent l'évolution de la résistance au cisaillement exprimée sous la forme τ/σ_0 (en ordonnée à gauche) et du soulèvement moyen du boîtier supérieur (en ordonnée à droite) avec le déplacement U. La figure 3 est donnée pour une série d'essais en place à Saint-Vallier et la figure 4 pour les essais conduits en laboratoire avec d_{max} = 50 mm. Pour alléger la représentation, la relation V-U est donnée uniquement pour les plus faibles et plus fortes valeurs de σ_0 .

Les positions U_{pic} de la contrainte maximale et U_r de la contrainte résiduelle, ainsi que les valeurs V_{max} du soulèvement maximal et dV/dU_{max} du gradient de soulèvement maximal sont précisées pour l'un des essais.

La comparaison des figures 3 et 4 indique que le remaniement et l'écrêtage simple à 50 mm n'altèrent pas le comportement pic-palier et le caractère dilatant des alluvions du Rhône en place.

La diminution du rapport τ/σ_0 quand σ_0 augmente, qui est sensible dès le début de l'essai et très nette au voisinage du pic, prouve la manifestation d'une cohésion tant pour le sol en place que pour le sol reconstitué. Au-delà du pic, pour un déplacement qui peut varier entre 20 et 30 mm selon les conditions d'essai, les relations τ/σ_0 - U se confondent, ce qui démontre que la cohésion est détruite bien avant l'obtention de V_{max} et du palier.

4.3

Effet de la dilatance

L'analyse globale des résultats indique que la phase initiale de la contractance est d'autant plus accentuée que σ_0 est fort, que la position du gradient maximal dV/dU_{max} coïncide avec celle du pic τ_{max}/σ_0 et que dV/dU_{max} et V_{max} diminuent quand σ_0 augmente. Ces constatations sont en accord avec les connaissances sur la dilatance.

Le soulèvement optimal n'excède pas 6 mm et semble peu influencé par la taille des grains. Par ailleurs l'obtention de V_{max} est parfois concomitante à l'apparition du palier résiduel (voir Fig. 4), mais il arrive qu'elle le précède (voir Fig. 3).

Pour des déplacements excédant 50 mm des aléas expérimentaux peuvent conduire à une altération du comportement du matériau: non planéité du sol support, rencontre de gros éléments dans le plan de cisaillement et désalignement du système de traction. Cette difficulté à maintenir le bon guidage du boîtier supérieur, surtout pour les essais en place, conduit à un basculement par l'avant du dispositif et à une diminution du soulèvement moyen. La relation V - U se radou-

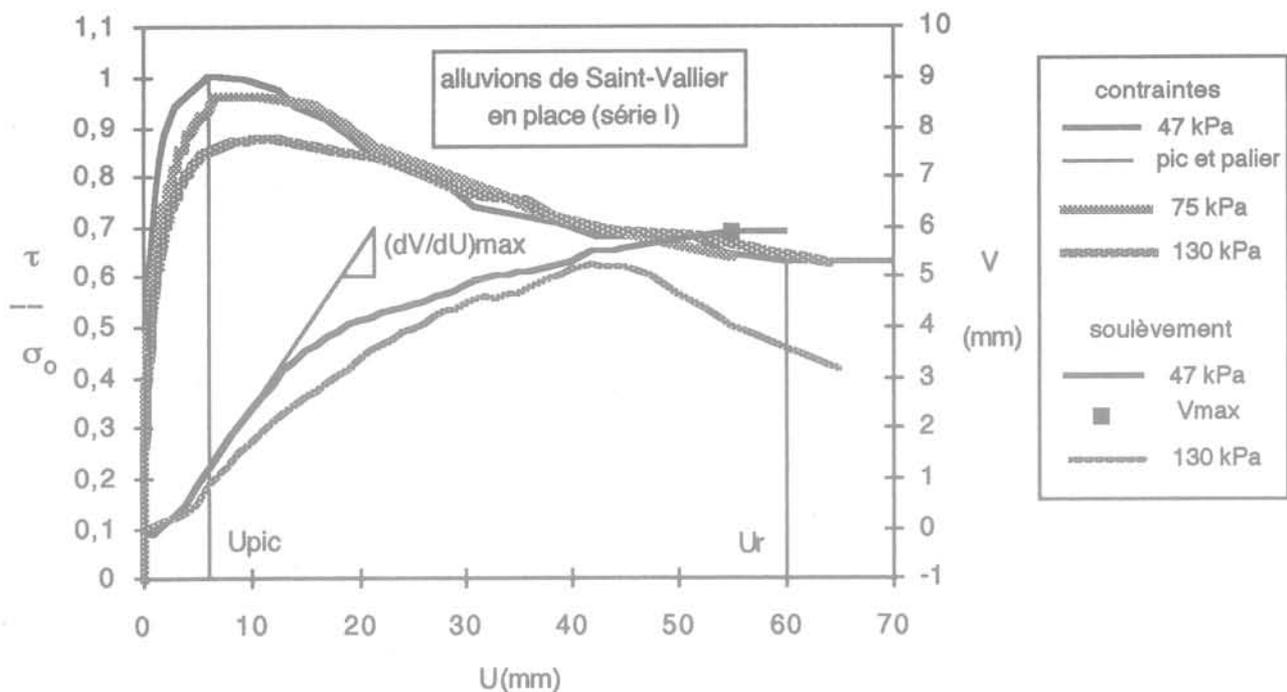


FIG. 3 Exemple de relations contraintes - déplacement et soulèvement - déplacement dans un essai de cisaillement direct en place avec les alluvions du Rhône (Saint-Vallier, essai 1).
 Example for shear stress versus displacement and vertical displacement versus displacement relationships in *in situ* direct shear test on Rhône alluvium materials (Saint-Vallier, test 1).

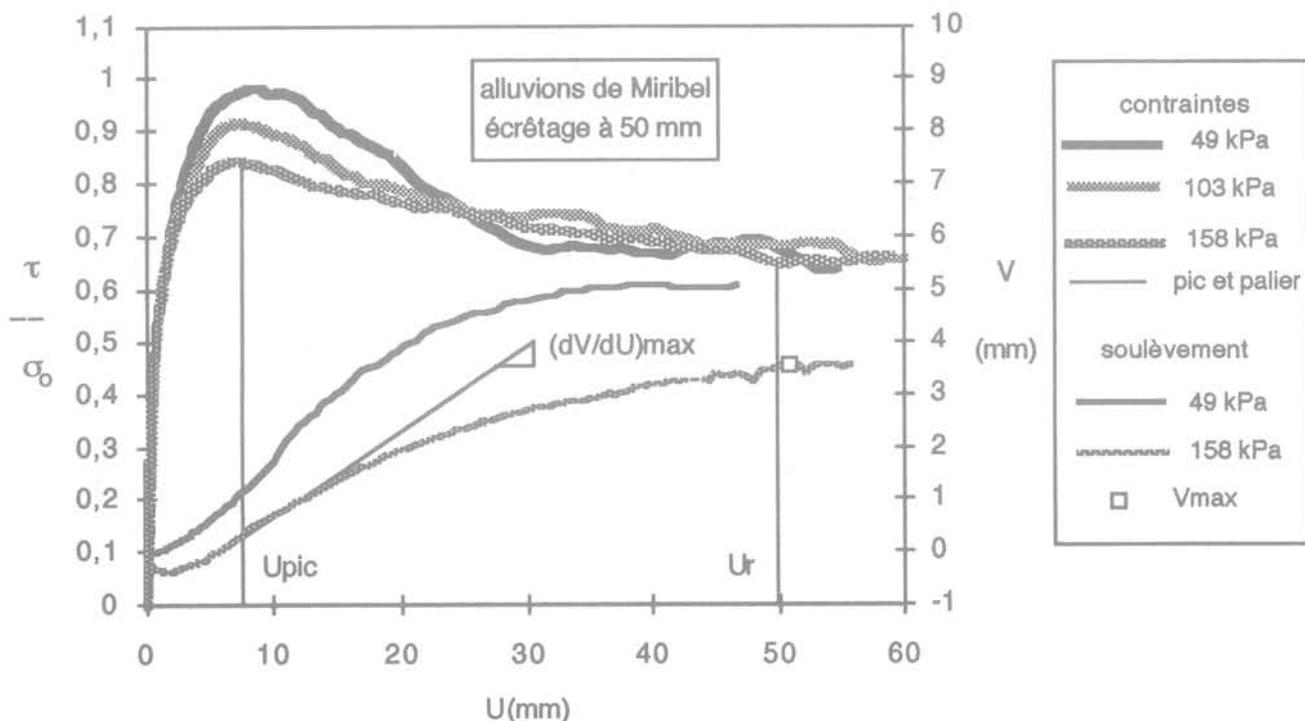


FIG. 4 Exemple de relations contraintes - déplacement et soulèvement - déplacement dans un essai de cisaillement direct au laboratoire avec les alluvions du Rhône ($d_{max} = 50$ mm).
 Example of shear stress versus displacement and vertical displacement versus displacement relationships in laboratory direct shear test on Rhône alluvium materials ($d_{max} = 50$ mm).

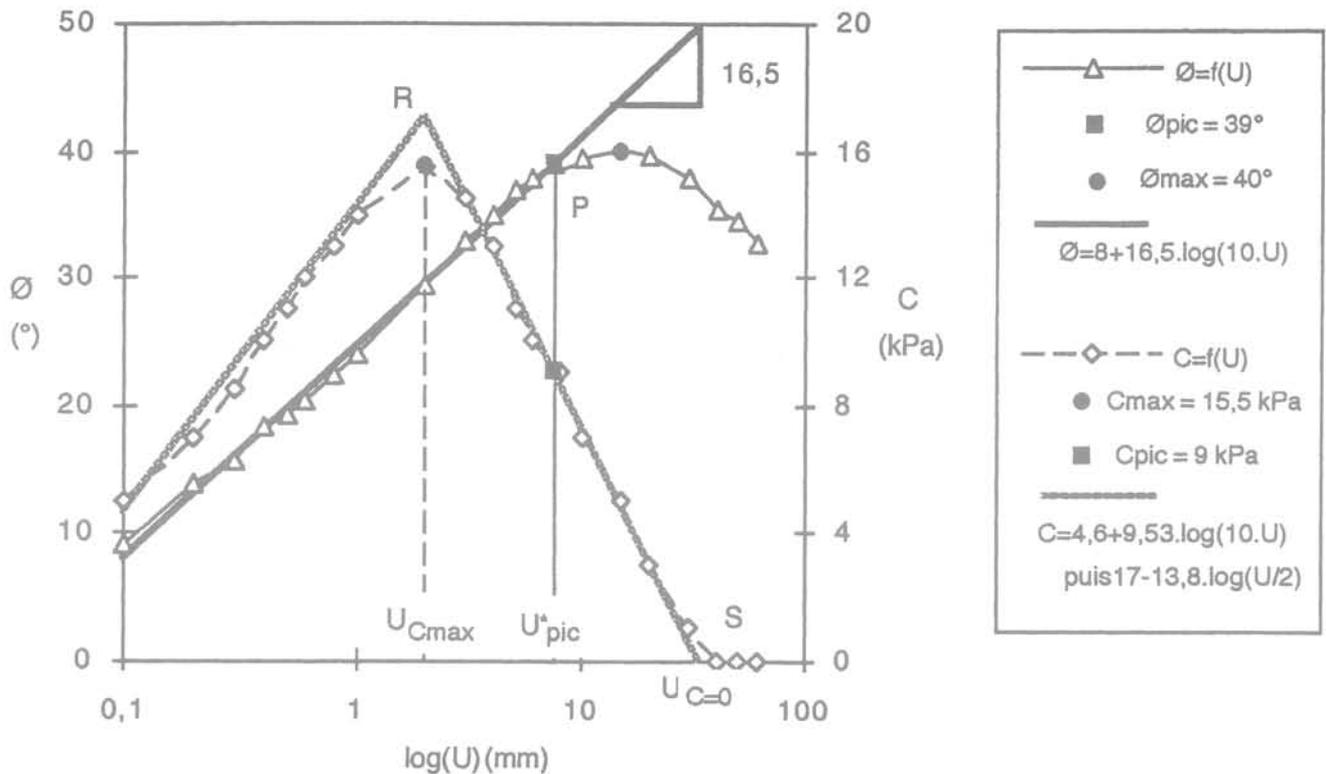


FIG.5 Exemple de relations angle de frottement interne – déplacement et cohésion – déplacement (Saint-Vallier, essai 1).
Example of mobilized internal friction angle versus displacement and cohesion versus displacement relationships (Saint-Vallier, test 1).

cit alors au-delà de la valeur optimale V_{max} (voir Fig. 3, pour $\sigma_o = 130$ kPa).

5

Mécanisme de la mobilisation de la résistance au cisaillement

5.1

Évolution de ϕ et C avec le déplacement

La description du mécanisme de progression de l'angle de frottement ϕ et de la cohésion C avec le déplacement oblige à distinguer les valeurs optimales ϕ_{max} et C_{max} qui peuvent être atteintes séparément par le tracé à U égal des relations $\tau - \sigma_o$ et les valeurs ϕ_{pic} et C_{pic} déterminées conventionnellement avec les efforts au pic, dans le repère $\tau_{max} - \sigma_o$.

Pour l'exemple du site de Saint-Vallier (Fig. 5), les évolutions de ϕ (en ordonnée à gauche) et de C (ordonnée à droite) sont schématisées par des relations linéaires dans un repère semi-logarithmique. Le positionnement de ϕ_{pic} et C_{pic} sur ce schéma correspond à un déplacement apparent U^*_{pic} qui marque la fin de la progression linéaire de ϕ . Pour cet exemple, la valeur $\phi_{max} = 40^\circ$ est supérieure à la valeur conventionnelle $\phi_{pic} = 39^\circ$.

$$\phi = (1,08 \phi_{pic} - 32) + 16,5 \log(10 U) \quad (3)$$

avec U (mm) et ϕ (degrés).

Pour $\phi = \phi_{pic}$, l'application de la formule (3) permet de préciser son domaine de validité.

$$U \text{ (mm)} \leq U^*_{pic} = 8,7 \exp(-0,011 \phi_{pic}) \quad (4)$$

soit $U \text{ (mm)} \leq 5,6$ mm pour $\phi_{pic} = 40^\circ$

$$U \text{ (mm)} \leq 6,3$$
 mm pour $\phi_{pic} = 30^\circ$

Pour une gamme de valeurs courantes de ϕ_{pic} , l'application numérique montre que le déplacement apparent au pic augmente modérément quand ϕ_{pic} diminue.

L'évolution de la cohésion avec $\log(U)$ est approchée par une relation bilinéaire dont la première partie conduit peu après la fin de la phase de contractance à une valeur optimale C_{max} pour un déplacement U_{Cmax} inférieur à U^*_{pic} . Au-delà de U_{Cmax} , la décroissance de C est très rapide, et le matériau devient purement frottant alors que la dégradation de ϕ est juste amorcée. L'observation d'une valeur optimale de la cohésion précédant le pic pour des matériaux grossiers est également citée par Ortigosa (1989).

La difficulté à obtenir, comme pour ϕ , une loi explicite $C = f(U)$ oblige à procéder par corrélations (voir 5-2 et 5-3).

5.2

Lois empiriques pour l'évolution conjointe de C et ϕ

La figure 6 traduit l'évolution conjointe de la cohésion et de l'angle de frottement pour quelques séries

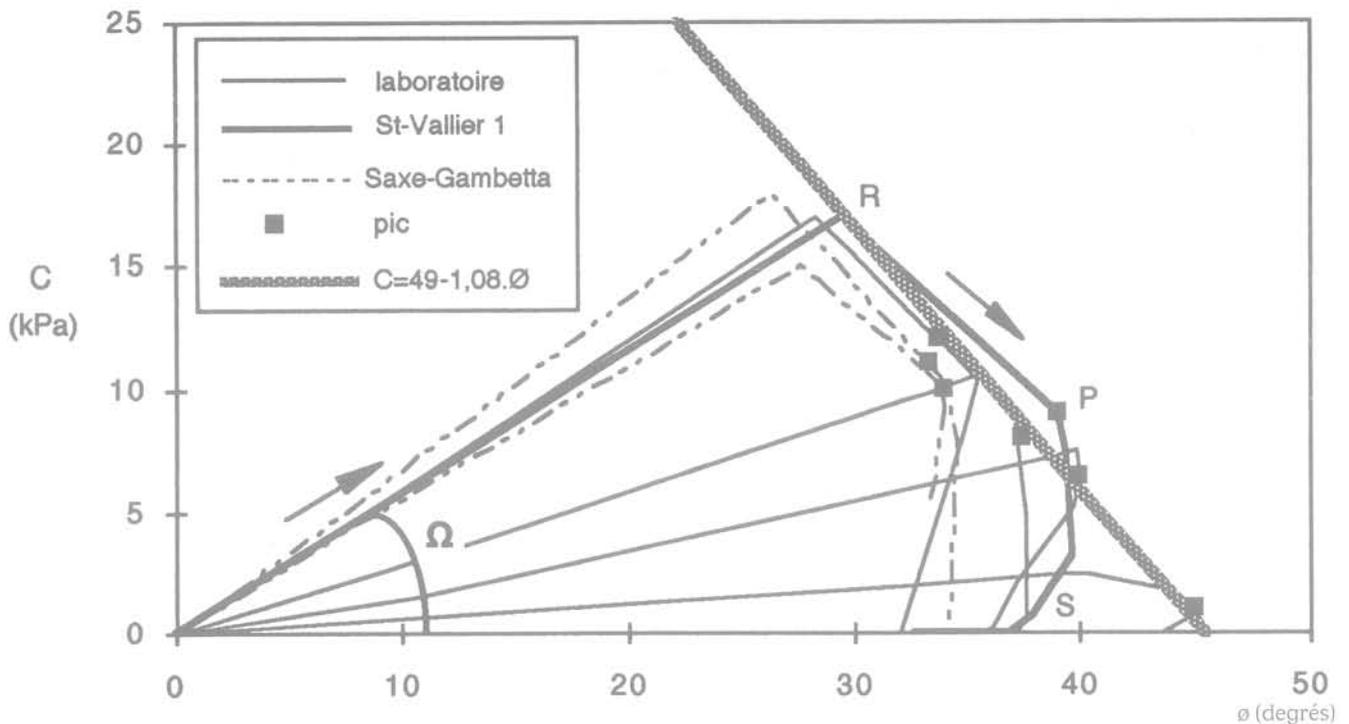


FIG.6 Évolution conjointe de la cohésion avec l'angle de frottement. Mobilized cohesion versus mobilized internal friction angle.

d'essais citées aux tableaux I et II. La position des pics est donnée en symboles noirs. Pour l'exemple de Saint-Vallier (courbe ORPS en trait gras) la première partie OR représente l'augmentation conjointe de C et ϕ jusqu'au point R de cohésion optimale C_{max} . Cette phase linéaire de pente Ω satisfait à la relation (5).

$$C = \Omega \phi \quad (5)$$

pour $U \leq U_{C_{max}}$

Malgré la dispersion des points de mesure pour les essais en place dans la représentation $\Omega - F_a$, la figure 7 montre que la pente Ω est plus faible pour les essais de laboratoire, ce qui signifie que la reconstitution du matériau et le délai de quelques heures autorisé entre l'application de la charge et le cisaillement ne permettent pas de retrouver complètement la cohésion naturelle en place. A facteur d'amélioration égal, les expressions (6a) pour le sol en place et (6b) pour l'échantillon reconstitué indiquent que la cohésion est détruite pour moitié avec le remaniement.

$$\Omega \text{ (kPa)} = 7,12 - 10 F_a \quad (6a)$$

$$\Omega \text{ (kPa)} = 3,56 - 5 F_a \quad (6b)$$

La seconde partie RP (Fig. 6) précise à la fois la diminution progressive de la cohésion et la poursuite de la mobilisation du frottement interne jusqu'au point P de résistance au cisaillement maximale. Les profils RP s'appuient sur une même enveloppe, représentée en grisé, dont l'approximation linéaire (7) convient pour le sol en place ou reconstitué.

$$C \text{ (kPa)} = 49 - 1,08 \phi \text{ (degré)} \quad (7)$$

pour $U_{C_{max}} \leq U \leq U_{pic}^*$

Pour décrire l'évolution de la cohésion avec le déplacement il suffit alors de combiner dans un premier temps les formules (3) et (5), en tenant compte de

(6a) ou (6b), puis les expressions (3) et (7). Ensuite, comme présenté à la figure 5, une extrapolation linéaire conduite entre $U_{C_{max}}$ qui est déduit de l'égalité entre (5) et (7) et U_{pic}^* qui est tiré de (4) permet de poursuivre la démarche jusqu'au déplacement $U_{C=0}$.

5.3

Corrélation entre valeurs au pic et caractéristiques physiques

L'examen de la figure 6 montre que l'expression (7) relative à l'enveloppe des tracés C - ϕ peut être étendue pour les valeurs au pic à la corrélation (8).

$$C_{pic} \text{ (kPa)} = 49 - 1,08 \phi_{pic} \text{ (degré)} \quad (8)$$

La procédure d'évaluation de ϕ et C avec U (voir §5-1 et 5-2) et la détermination de C_{pic} avec (8) nécessitent la connaissance de ϕ_{pic} . En l'absence d'essai spécifique cette valeur au pic peut être déterminée en fonction du facteur d'amélioration F_a , avec l'expression (9) tirée de la figure 8.

$$\tan \phi_{pic} = 3,7 F_a - 1,62 \quad (9)$$

Pour $C_{pic} = 0$ les relations générales (1), (2), (6a), (6b), (8) et (9) concourent aux valeurs limites $\phi_{C_{pic}=0}^{max} = 45^\circ$ de l'angle de frottement au pic et $F_{aC_{pic}=0}^{max} = 0,712$ du facteur d'amélioration. L'examen des valeurs γ_d et C_u mesurées en place (tableau I) montre que l'obtention de la condition [$F_{aC_{pic}=0}^{max} = \phi_{C_{pic}=0}^{max} = 0$] relève d'une conjoncture exceptionnelle. Ainsi, pour $d_{max} = 31,5$ mm, le couple de valeurs [$\phi_{pic} = 45^\circ$; $C_{pic} = 1$ kPa] figurant au tableau IV n'a pu être obtenu qu'au prix d'un compactage très énergique conduisant à $\gamma_d = 24,4$ kN/m³ (Tableau II).

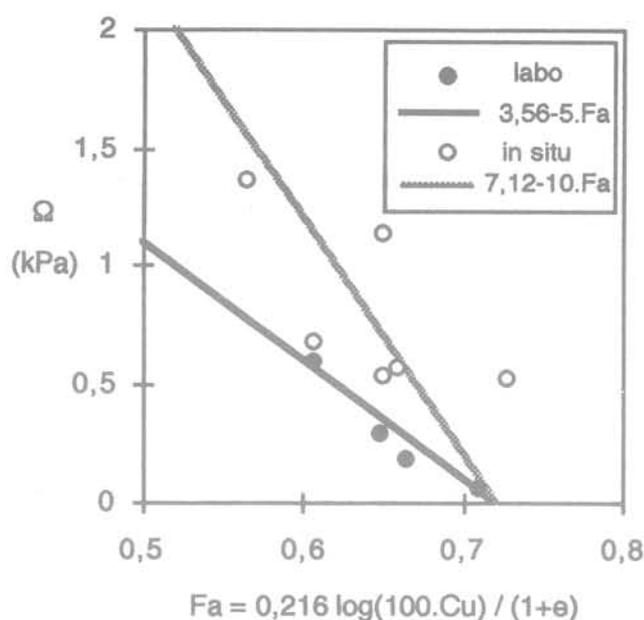


FIG. 7 Corrélation entre l'angle et le facteur Ω d'amélioration F_a .
Relation between Ω and coefficient F_a .

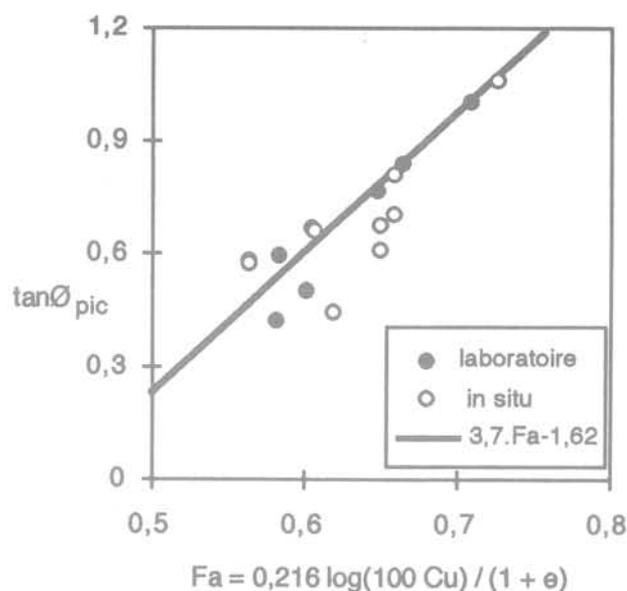


FIG. 8 Corrélation entre l'angle de frottement au pic et le facteur d'amélioration F_a .
Relation between ultimate friction angle and coefficient F_a .

5.4

Interprétation globale

Dans les tableaux récapitulatifs III et IV, $\phi_{V_{max}}$ représente l'angle mesuré au point de soulèvement maximal et U_{pic}^* correspond à la simulation propre à chacun des essais comme présenté à la figure 5. Cette valeur peut s'écarter légèrement du résultat déduit de la corrélation (4) ou des positions U_{pic} propres à chaque contrainte σ_o . Par ailleurs, hormis pour le site de Lyon Saxe-Gambetta (III), l'angle ϕ_{max} est supérieur à ϕ_{pic} ; l'écart n'excède cependant pas 2° , ce qui est logique compte tenu de la faible influence de σ_o sur U_p (voir Fig. 3 et 4).

Pour compléter les tendances marquantes tirées des relations (1) à (9), les valeurs conventionnelles ϕ_{pic} , ϕ_r et ϕ_{cv} de l'angle de frottement doivent être comparées entre elles et situées par rapport aux valeurs ϕ_{max} et $\phi_{V_{max}}$ déduites des relations $\tau - \sigma_o$ à U égal. La figure 9, qui traduit la correspondance entre les angles de frottement mesurés au pic et au palier, conduit ainsi à la relation linéaire (10).

$$\tan \phi_r = 0,48 + 0,2 \tan \phi_{pic} \quad (10)$$

Cette expression prouve que l'exploitation classique d'un essai de cisaillement direct peut conduire à un angle de frottement au pic inférieur à la fois à l'angle de frottement résiduel et à l'angle de frottement critique. Ce cas de figure survient ici pour $\phi_{pic} < 31^\circ$, ou pour $C_{pic} > 15,5 \text{ kPa}$ d'après la relation (8). Par ailleurs, bien qu'alors supérieur à ϕ_r , ϕ_{pic} reste encore inférieur à ϕ_{cv} pour $C_{pic} > 13,4 \text{ kPa}$.

Dans la méthode d'exploitation qui est présentée, la triple condition $\phi_{max} \geq \phi_{V_{max}} \geq \phi_{cv} \geq \phi_r$ est vérifiée à l'exception du site de Vénissieux et l'écart $\phi_{V_{max}} - \phi_{cv}$ est inférieur à 1° à l'exception du site de Saint-Vallier (série 1).

Il ressort de cette analyse que l'état critique des alluvions du Rhône peut être approché avec un excès infé-

rieur à 1 degré au point de soulèvement optimal du boîtier supérieur dans un essai de cisaillement direct à disposition symétrique. La difficulté de poursuivre l'essai avec une valeur nulle du gradient dV/dU explique que l'angle de frottement chute ensuite vers la valeur $\phi_r < \phi_{V_{max}}$.

L'étude phénoménologique de la mobilisation de la résistance au cisaillement des alluvions du Rhône peut donc être schématisée par une succession de phases dont l'ordre chronologique est décrit à la figure 10. La zone hachurée correspond au domaine d'évolution possible de ϕ_{pic} et C_{pic} .

6

Étude de la dilatance

6.1

Analyse de la dilatance dans un essai de cisaillement direct

Le modèle de la dilatance « en lame de scie » (sawtooth) présenté à la figure 11 a été utilisé par Bolton (1986), puis repris par Jewell (1989), Houslsby (1991), Creed (1994), Ogunro (1996) pour définir l'angle de dilatance ψ et les deux lois d'écoulement d'un sol granulaire purement frottant dans un essai de cisaillement direct. La première loi décrit l'évolution conjointe des paramètres de dilatance et de résistance au cisaillement au cours de l'essai et la deuxième loi corrèle ces paramètres mesurés au pic.

Dans ce modèle, l'angle de frottement ϕ mesuré dans le plan de cisaillement imposé $x-x'$ est décomposé selon un angle de frottement ϕ_c , qui est mobilisé le long des microfacettes de glissement préférentiel orientées suivant une direction $z-z'$, et un angle de dilatance ψ qui correspond à l'orientation de ces microfa-

TABEAU III Caractéristiques de cisaillement des alluvions du Rhône (essais *in situ*).
Shear parameters of Rhône alluvium materials (*in situ* tests).

Essais <i>in situ</i>	$C_{\text{pic}}^{\text{max}}$ (kPa)	$U_{C_{\text{pic}}^{\text{max}}}$ (mm)	\varnothing_{pic}	C_{pic} (kPa)	$U_{C_{\text{pic}}}$ (mm)	\varnothing_{max}	$\varnothing_{V_{\text{max}}}$	\varnothing_r
Lyon Part-Dieu (I)	-	-	37°5	3	-	-	-	-
Lyon Part-Dieu (II)	-	-	31°5	8	-	-	-	-
Lyon Part-Dieu (III)	-	-	26°2	13	-	-	-	-
Lyon Part-Dieu (IV)	-	-	33°5	7	-	-	-	-
Lyon Saxe-Gambetta (I)	18	1,7	33°3	11	4,5	34°6	-	25°5
Lyon Saxe-Gambetta (II)	-	-	30°0	16	-	-	-	30°8
Lyon Saxe-Gambetta (III)	15	1,8	34°0	10	4,3	33°4	-	29°6
Lyon Garibaldi	-	-	33°0	20	-	-	-	31°2
Vénissieux	32	4	29°8	20	9,7	30°5	-	30°7
Saint-Vallier (I)	17	2	39°0	9	7,6	40°0	35°0	32°7
Saint-Vallier (II)	27	2,4	31°3	16	7	33°4	33°3	31°0
Saint-Vallier (III)	-	-	34°8	8,5	-	-	-	30°0
Saint-Vallier (IV)	-	-	23°8	16	-	-	-	29°2
Millery	20	3	46°6	3	9,5	46°9	-	34°5
Feyzin	-	-	30°2	16	-	-	-	30°6

TABEAU IV Caractéristiques de cisaillement des alluvions du Rhône (essais de laboratoire).
Shear parameters of Rhône alluvium materials (laboratory tests).

Essais de laboratoire	$C_{\text{pic}}^{\text{max}}$ (kPa)	$U_{C_{\text{pic}}^{\text{max}}}$ (mm)	\varnothing_{pic}	C_{pic} (kPa)	$U_{C_{\text{pic}}}$ (mm)	\varnothing_{max}	$\varnothing_{V_{\text{max}}}$	\varnothing_r
Miribel 80 mm	10,5	4	37°5	8	5,4	37°6	33°0	33°4
Miribel 50 mm	7,5	6	40°0	6,5	6,2	40°0	33°0	33°2
Miribel 31,5 mm (I)	2,5	3	45°0	1	5,7	45°0	33°8	34°3
Miribel 31,5 mm (II)	-	-	26°5	17	-	-	-	30°1
Miribel 20 mm (I)	17	2,6	23°0	18	-	-	33°4	31°4
Miribel 20 mm (II)	-	-	33°7	12	5,5	35°3	34°0	31°8
Vénissieux 31,5 mm	-	-	30°7	12	-	33°0	-	30°9
Satolas 20 mm	-	-	26°1	13	-	-	-	-

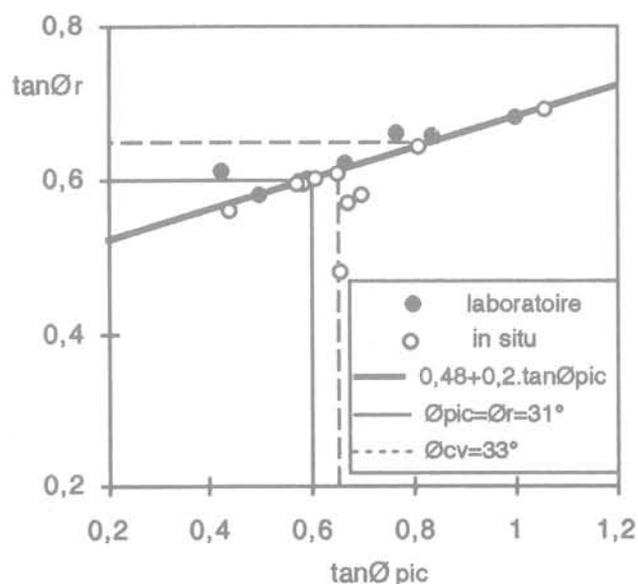


FIG. 9 Corrélation entre l'angle de frottement résiduel et l'angle de frottement au pic.
Residual friction angle versus ultimate friction angle.

cettes. La loi d'écoulement associée à ce modèle correspond à l'écriture (11).

$$\varnothing = \varnothing_c + \psi \quad (11)$$

La loi d'écoulement (11) présente cependant l'inconvénient de ne pas faire apparaître de relation explicite entre \varnothing et ψ , l'angle \varnothing_c pouvant varier entre \varnothing_{cv} et l'angle de frottement interparticules \varnothing_μ selon les conditions d'essai (Fig. 12). Les propositions de lois faisant intervenir la valeur critique \varnothing_{cv} sont bien résumées par Jewell (1989). L'expression (12) proposée par Stroud (1971) pour l'essai de cisaillement simple peut être approchée avec un excès de l'ordre de 10 % par un essai de cisaillement direct conforme à la disposition symétrique. L'angle de dilatance est alors calculé selon (13) à partir du gradient de soulèvement dV/dU du boîtier supérieur et \varnothing est donné par (14).

$$\tan \varnothing = \sin \varnothing_{cv} + \tan \psi \quad (12)$$

$$\tan \psi = dV/dU \quad (13)$$

$$\tan \varnothing = \tau/\sigma_c \quad (14)$$

6.2

Résultats expérimentaux

Le calcul du gradient dV/dU nécessite le lissage préalable de la relation $V - U$ avec une fonction polynomiale vérifiant d'une part la condition $dV/dU = 0$ aux points de contractance maximale et de soulèvement maximal et présentant d'autre part un point d'inflexion concomitant à l'effort de pic. Les lois (13) et (14) n'étant par ailleurs applicables qu'à un sol purement frottant, c'est-à-dire pour $U > U_c = 0$ avec les alluvions du Rhône, la figure 13 relative à l'exemple des alluvions écrêtées à

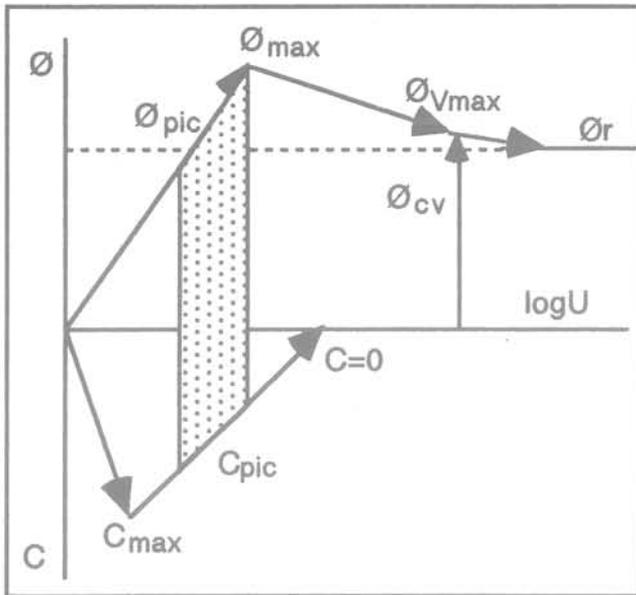


FIG.10 Schématisation de l'évolution des paramètres de cisaillement avec le déplacement.
Schematic model of components of shear strength as function of displacement.

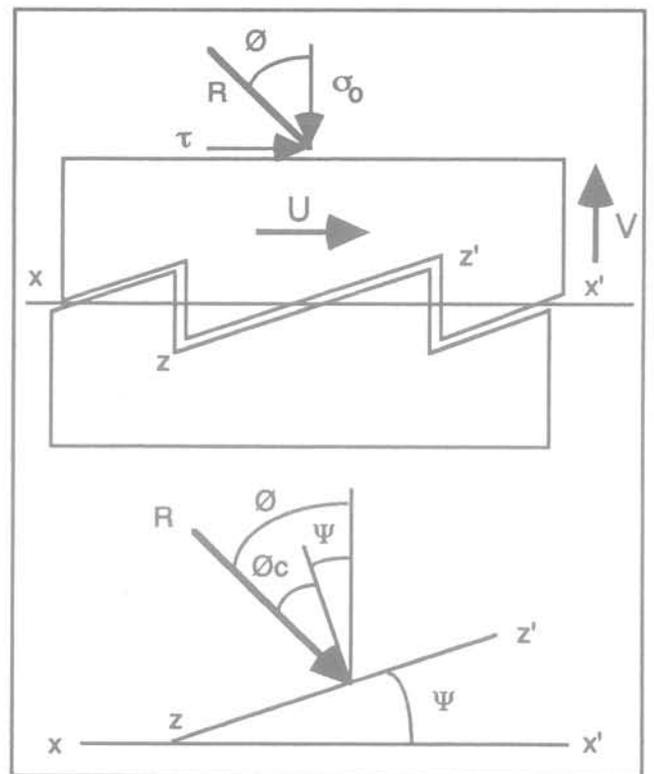


FIG.11 Le modèle de dilatance d'après Bolton (1986).
The sawtooth model for dilatancy (Bolton, 1986).

50 mm est donnée sous la forme plus générale $\tau/\sigma_0 - dV/dU$.

Dans le domaine des valeurs dV/dU positives la loi d'écoulement présente deux parties distinctes MP et PN, qui se chevauchent, de part et d'autre du point de rebroussement P marquant le passage concomitant de l'effort de pic et du gradient optimal dV/dU_{max} . Pour des valeurs τ/σ_0 et dV/dU croissantes, la phase MP représente le passage du point de contractance maximale à l'effort de pic (point P). Pour des valeurs τ/σ_0 et dV/dU décroissantes, la 2^e phase PN correspond au radoucissement de l'effort jusqu'au point de soulèvement V_{max} .

6.3

Lois d'écoulement pour les alluvions du Rhône

Malgré certaines difficultés de lissage de la courbe $V - U$, les phases MP et PN de la loi d'écoulement peuvent le plus souvent être approximées par des relations linéaires distinctes, de pentes respectives m et n (Fig. 14). Pour la première partie, qui satisfait à l'expression (15), l'ordonnée à l'origine τ_M/σ_0 croît et m décroît quand σ_0 augmente. τ_M/σ_0 varie globalement entre 0,44 et 0,69 et m , qui fait l'objet de la corrélation (16), peut varier entre 0,9 et 2. Cette analyse ne permet pas de préciser l'apport de la disposition symétrique adoptée au laboratoire vis-à-vis du chargement libre de l'essai en place, ni d'apprécier l'influence de l'écrêtage.

$$\frac{\tau}{\sigma_0} = \frac{\tau_M}{\tau_0} + m \left(\frac{dV}{dU} \right) \quad (15)$$

$$m = \frac{\tan \phi_{pic} \left(1 - \frac{34}{\sigma_0} \right) + \frac{34}{\sigma_0} \frac{\tau_M}{\tau_0}}{\tan \phi_{pic} \left(1 - \frac{34}{\sigma_0} \right) + \frac{34}{\sigma_0} - 0,65} \quad (16)$$

pour $U \leq U_{pic}^*$.

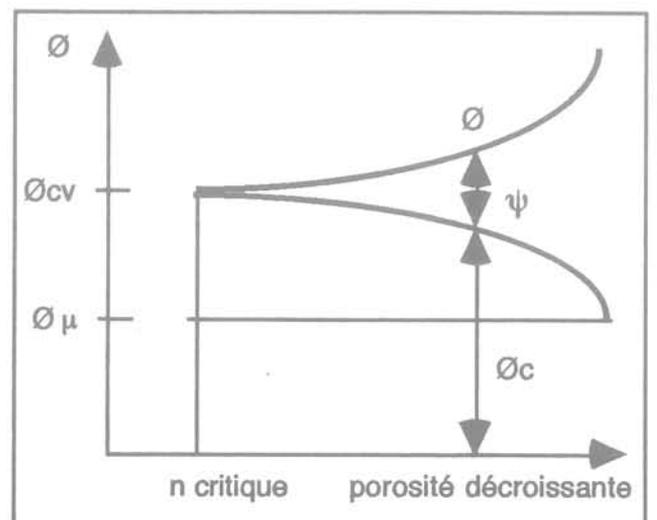


FIG.12 Schématisation de la résistance au cisaillement pour un sol frottant (d'après Rowe, 1962).
The components of shear resistance in a granular soil (Rowe, 1962).

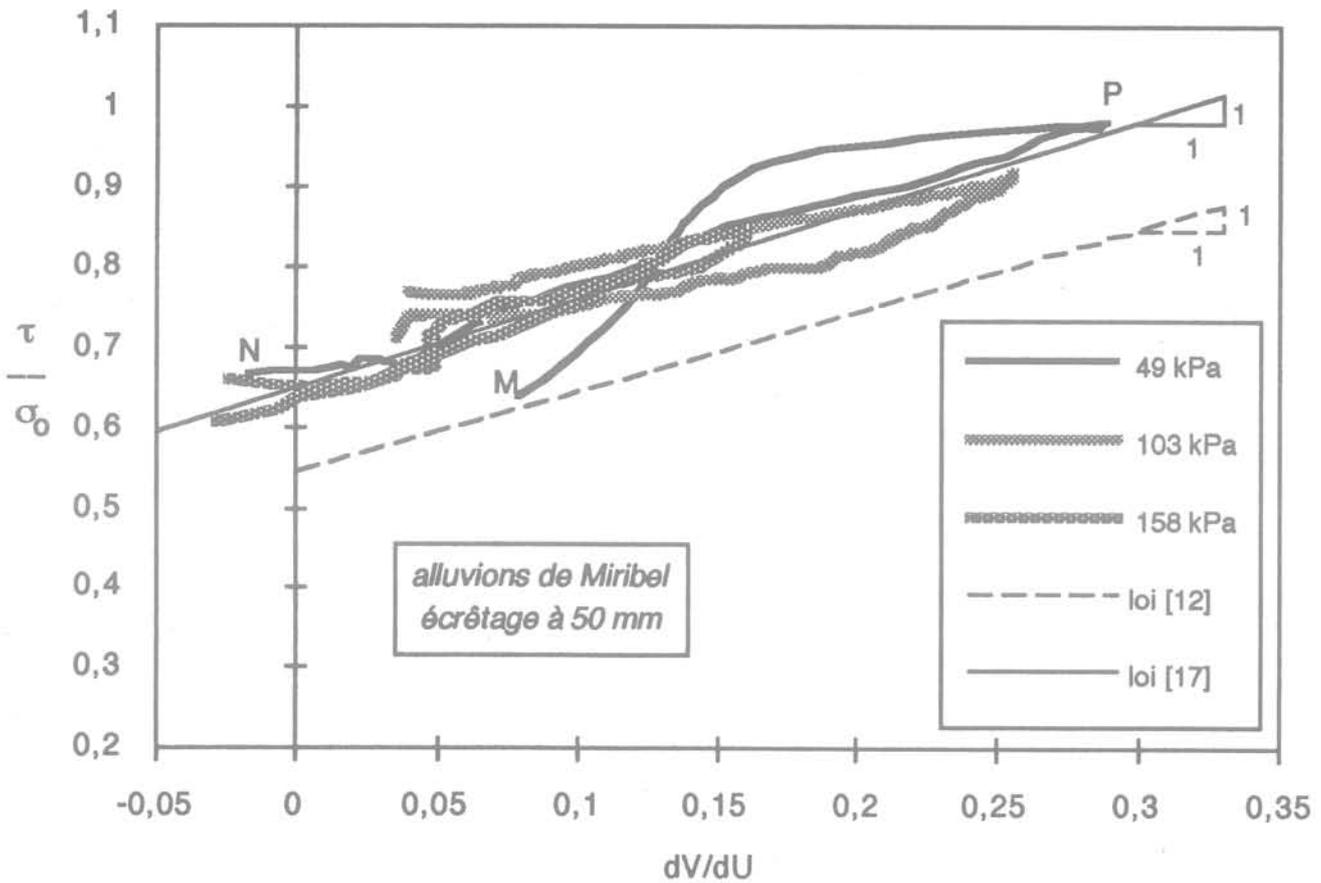


FIG.13 Exemple de loi d'écoulement contrainte de cisaillement – gradient de soulèvement dans un essai de cisaillement direct avec les alluvions du Rhône ($d_{max} = 50$ mm).
Example of shear stress versus rate of dilation flow rule during direct shear test on Rhône alluvium materials.

La pente et l'ordonnée à l'origine de la deuxième partie sont indépendantes des conditions d'essai. La valeur $n = 1,06$ proposée par Ogunro (1996) pour les essais de laboratoire a été abaissée à $n = 1$ pour un meilleur calage avec les essais *in situ* et l'ordonnée $\tau_N/\sigma_0 = \tan\phi_{cv} = 0,65$ de l'expression réduite (17) est en accord avec le principe que l'angle de frottement critique soit approché avec un léger excès au point de soulèvement maximal, pour $dV/dU = 0$.

$$\frac{\tau}{\sigma_0} = \tan\phi_{cv} + \left(\frac{dV}{dU}\right) \quad (17)$$

pour $U \geq U_{pic}^*$

L'écart observé entre les lois d'écoulement empiriques (16) et (17) et la loi (12) se situe dans le fuseau d'épaisseur $\tan\phi_{cv} - \sin\phi_{cv} = 0,105$ représenté à la figure 13. Il peut être attribué d'une part à l'empêchement du développement de la dilatance par la cohésion et expliqué d'autre part par l'analyse de Jewell (1989) (voir §6-1).

La loi d'écoulement (18) obtenue au pic avec les valeurs τ_{max}/σ_0 et dV/dU_{max} découle de l'expression (17) relative à la deuxième phase PN. La figure 15 indique qu'elle est indépendante du mode de réalisation de l'essai.

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_0} = \tan\phi_{cv} + \left(\frac{dV}{dU}\right)_{max} \quad (18)$$

6.4

Correspondance entre la dilatance et le comportement pic-palier

La relation entre la dilatance et le radoucissement de l'effort dans l'essai de cisaillement direct est établie à partir de la définition $\Delta\tau = (\tau_{max} - \tau_r)$ donnée à la figure 16, en supposant que les paramètres C_{pic} , ϕ_{pic} et ϕ_r sont relatifs au même échantillon. La prise en compte de (10) et (18) conduit à l'écriture (19) entre le gradient dV/dU_{max} et l'écart relatif $\Delta\tau/\sigma_0$.

$$\frac{\Delta\tau}{\sigma_0} = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0} - \frac{\tau_r}{\sigma_0} = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0} - \tan\phi_r$$

$$\frac{\Delta\tau}{\sigma_0} = \frac{\tau_{max}}{\sigma_0} - 0,48 - 0,2 \left(\frac{\tau_{max}}{\sigma_0} - \frac{C_{pic}}{\sigma_0} \right) \quad \text{d'après (10)}$$

$$\frac{\Delta\tau}{\sigma_0} = 0,8 \left[0,65 + \left(\frac{dV}{dU}\right)_{max} \right] - 0,48 + 0,2 \frac{C_{pic}}{\sigma_0} \quad \text{d'après (18)}$$

$$\left(\frac{dV}{dU}\right)_{max} = 1,25 \frac{\Delta\tau}{\sigma_0} - 0,05 - 0,25 \frac{C_{pic}}{\sigma_0} \quad (19)$$

La figure 17 confirme que la loi linéaire $dV/dU_{max} = 1,25 \Delta\tau/\sigma_0 - 0,05$ constitue la borne supérieure de la relation $dV/dU_{max} - \Delta\tau/\sigma_0$ pour le cisaillement direct des

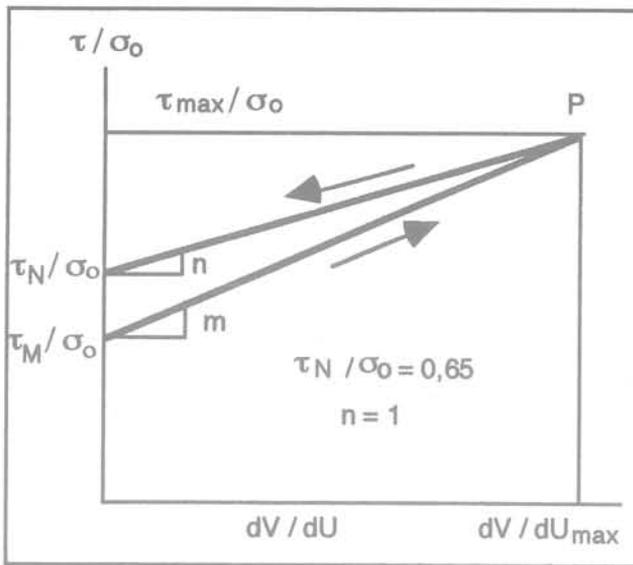


FIG.14 Schématisation de la loi d'écoulement.
Schematic model of flow rule.

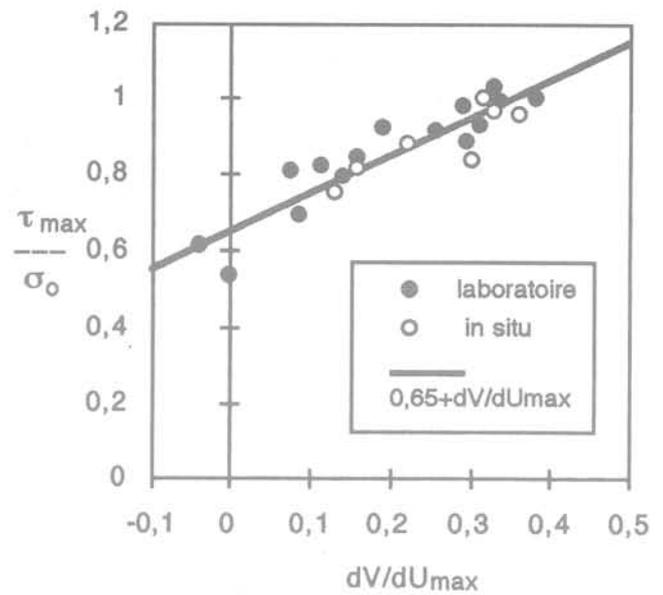


FIG.15 Loi d'écoulement au pic.
Ultimate flow rule.

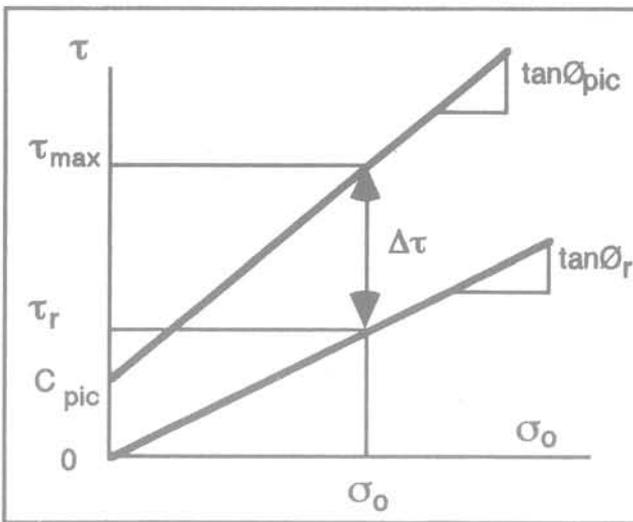


FIG.16 Définition du radoucissement $\Delta\tau$.
Definition of strain softening $\Delta\tau$.

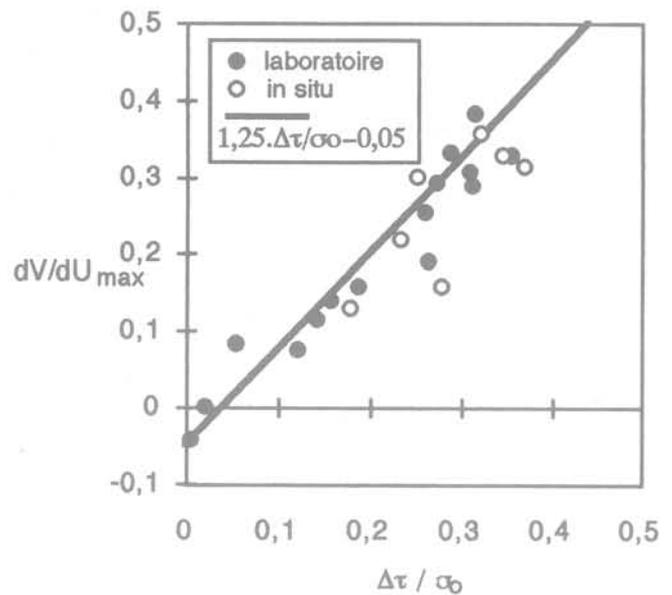


FIG.17 Corrélation entre le gradient de soulèvement maximal et le radoucissement relatif.
Ultimate rate of dilation versus relative strain softening.

alluvions du Rhône. Elle correspond au sol supposé purement frottant et montre le lien étroit entre le développement de la dilatance et le radoucissement postpic de l'effort. L'effet de la cohésion sur ce comportement tient à l'écart $0,25 C_{pic}/\sigma_0$ et devient négligeable pour $\sigma_0 \geq 200$ kPa compte tenu des valeurs courantes de la cohésion au pic (voir Tableaux III et IV).

6.5

Effet de l'écrêtage non compensé

Les points de mesure qui correspondent sur les figures 15 et 17 à un comportement pic-palier et à un effet de la dilatance peu marqués sont relatifs aux

échantillons de laboratoire écrêtés à 20 mm et soumis aux plus fortes valeurs de σ_0 , ce qui prouve les limites d'un écrêtage non compensé sur la conservation du comportement du matériau. La figure 1 révèle en effet qu'un écrêtage simple à 20 mm conduit à un rejet d'éléments parfois supérieur à 25 %, alors que plusieurs auteurs admettent que le dépassement de cette tolérance doit être accompagné d'une compensation ou d'un remodelage par similitude (Post, 1979; Dendani, 1988).

L'analyse des résultats ayant par ailleurs prouvé que les alluvions du Rhône conservent toutes leurs propriétés pour $d_{max} \geq 31,5$ mm, avec un rejet inférieur à 25 %, la règle susmentionnée apparaît donc vérifiée ici.

Conclusion

La procédure décrite dans cet article permet de préciser les paramètres de cisaillement des alluvions du Rhône à partir de lois de comportement empiriques de formulation simple, complémentaires, qui peuvent être classées en deux groupes :

– les lois du premier groupe permettent de corrélérer entre eux ou avec le facteur d'amélioration F_a défini par (2) les paramètres conventionnels établis au pic ou au palier. Le couplage des lois (8) et (9) avec (2) est ainsi d'un grand intérêt pratique, car il permet d'estimer les valeurs au pic à partir de propriétés physiques et granulométriques du matériau facilement identifiables ; le projeteur aura cependant intérêt à effectuer des recoupements avec d'autres sources d'information. Par

ailleurs, la loi d'écoulement établie au pic permet la prise en compte de la dilataance dans les ouvrages, ou peut encore être utilisée pour établir des corrélations avec les caractéristiques pressiométriques ;

– en décrivant l'évolution de \emptyset , C et de la dilataance avec le déplacement imposé, les lois (3) à (7) et (15) à (17) du deuxième groupe peuvent être d'un grand intérêt pour le calcul en service de structures déformables, pour l'étude de la stabilité de pentes où la gradation des paramètres de cisaillement est sensible le long de la surface de glissement, et pour les ouvrages où la dégradation des paramètres de cisaillement est manifeste.

Dans certaines de ces lois empiriques la prise en compte de l'atténuation de la cohésion avec la reconstitution du matériau mérite une étude plus approfondie pour définir notamment l'influence du facteur temps sur le phénomène.

Bibliographie

- Bacot J. – Contribution à l'étude du frottement entre une inclusion souple et un matériau pulvérulent : cas de la Terre Armée, Thèse Sci., INSA Lyon, 1981, 389 p.
- Bolton M.D. – The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, vol. 36, n° 1, 1986, p. 65-78.
- Bourdeau Y., Laréal P., Marchal J. – Résistance au cisaillement des alluvions du Rhône, Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, vol. 1, août 1989, p. 695-696.
- Cambefort H. – Curiosités des massifs alluvionnaires et des nappes d'eau. Supplément aux *Annales de l'ITBTP*, n° 211-212, juillet-août 1965, p. 923-947.
- Creed M.J. – A laboratory introduction to critical state soil mechanics, Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, vol. 4, janvier 1994, p. 1479-1482.
- Dendani H. – Comportement de matériaux de barrages en terre : étude expérimentale et modélisation, Thèse de Doctorat, INP Grenoble, 1988, 291 p.
- David L. – Formations glaciaires et fluvio-glaciaires de la région Lyonnaise, Doc. Labo. Géologie Fac. Sci. Lyon, n° 22, 1967, 159 p.
- Guichard J.-C. – La résistance au cisaillement des sols grossiers : étude des alluvions du Rhône, DEA Génie Civil, INSA Lyon, 1995, 135 p.
- Houlsby G.T. – How the dilatancy of soils affects their behaviour, Proc. X ECSMFE, Florence, vol. 4, mai 1991, p. 1189-1202.
- Jewell R.A. – Direct shear tests on sand, *Géotechnique*, vol. 39, n° 2, 1989, p. 309-322.
- Kastner R. – Excavations profondes en site urbain : problèmes liés à la mise hors d'eau, dimensionnement des soutènements butonnés, Thèse Sci., INSA Lyon, 1982, 409 p.
- Laréal P., Bourdeau Y., Lambert P., Cotteureau Cl. – Essais de cisaillement *in situ* sur des sols alluvionnaires de la vallée du Rhône, *Travaux*, n° 459-460, juin-juillet 1973, p. 52-59.
- Laréal P. – Sols de la région lyonnaise : prévision de leur comportement mécanique à l'aide d'essais *in situ* et en vraie grandeur. Thèse Sci., Univ. Claude-Bernard, Lyon, 1975, 253 p.
- Mogami T. – On the angle of internal friction of rockfill materials. VII ICSMFE, Mexico, Specialty session n° 13, vol. E1 : Contributions and discussions on mechanical properties of rockfill and gravel materials, août 1969, p. 25-42.
- Negussey D., Wijewickreme W.K.D., Vaid Y.P. – Constant-volume friction angle of granular materials, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 25, 1988, p. 50-55.
- Ogunro V.T. – Le comportement d'interface de géosynthétiques avec des sables et des sols grossiers : influence des conditions d'essais, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 1996, 281 p.
- Ortigosa P. – Propriétés géotechniques des sols grossiers, Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, vol. 5, août 1989, p. 2881-2883.
- Oyenuga D.A., Tisot J.-P. – Looking for an intrinsic key for sands. Proc. Int. Conf. on Micromechanics of Granular Media : Powders and grains, Clermont-Ferrand, septembre 1989, p. 171-175, Edited by Biarez and Gourves, Rotterdam, AA. Balkema, 1989.
- Post G. – Design parameters for fill, Proc. VII ECSMFE, Brighton, vol. 4, 1979, p. 209-215.
- Rowe P.W. – The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, Proc. *Royal Society of London*, series A, vol. 269, 1962, p. 500-527.
- Stroud M.A. – The behaviour of sands at low stress levels in the simple shear apparatus, Ph. D. thesis, University of Cambridge, 1971.