Étude du comportement de l'interface sol-inclusion par simulation aux éléments distincts d'essais de cisaillement direct

B. BAYLAC S. MASSON J. MARTINEZ

Laboratoire Ma²g (Mécanique appliquée, automatique et géomécanique) EA 3218 INSA Rennes 20, av. des Buttes de Coësmes, CS 14315 35043 Rennes Cedex bbaylac@insa-rennes.fr masson@insa-rennes.fr jmartinez@insa-rennes.fr Une analyse microstructurelle du cisaillement de l'interface sol-inclusion est mise en œuvre par la simulation d'essais de cisaillement direct à l'aide de la méthode des éléments distincts. La macrorugosité géométrique de l'interface constitue le principal paramètre des simulations réalisées. La réponse globale de l'échantillon montre une étroite relation entre les variations de la contrainte macroscopique de cisaillement à l'interface et l'évolution du réseau des forces de contacts interparticulaires. L'analyse des déplacements et des rotations des particules permet de localiser une bande de cisaillement dont l'épaisseur, de l'ordre de cinq fois le diamètre maximum des particules constituant l'échantillon, semble indépendante de la macrorugosité de l'interface. L'analyse microstructurelle réalisée aboutit à la caractérisation du comportement macroscopique de l'interface en termes de rigidité élastique et d'angles de frottement fonctions de la macrorugosité de l'interface. Plus précisément, une expression de l'angle de frottement macroscopique est proposée en fonction de la macrorugosité géométrique de l'interface et de la microrugosité des contacts particules-plaque.

Mots-clés : matériau granulaire, bande de cisaillement, dilatance, boîte de cisaillement, anisotropie, forces de contact.

Analysis of the behaviour of soil-inclusion interfaces using distinct element simulations of direct shear tests

Abstract

Résumé

A microscopic analysis of the shearing of soil-inclusion interfaces is performed using Distinct Element simulations of direct shear tests. These simulations focus on the geometrical macro-roughness of the interface. The global response of the sample shows a narrow relation between the variation of the macroscopic shear stress on the interface and the the evolution of the particle's contact forces network. The analysis of particles displacements and rotations allows localising a shear band whose thickness, of about five times the maximum diameter of the sample particles, seems to be independent on the interface macro-roughness. The microstructural analysis performed leads to the characterisation of the macroscopic interface behaviour in terms of elastic stiffness and friction angles as functions of the interface macro-roughness. More precisely, an expression of the macroscopic friction angle is proposed as dependent on the interface macro-roughness and on the micro-roughness of particle-plate contacts.

Key words: granular materials, shear band, dilatancy, shear box, anisotropy, contact forces.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} février 2004.

Introduction

Les fondations par pieux, le renforcement des sols par inclusions (terre armée, clouage, géotextiles...) sont des exemples qui mettent en jeu une interaction de cisaillement entre matériau granulaire et paroi, deux milieux aux propriétés extrêmement différentes. Afin de caractériser cette interface, les méthodes habituelles considèrent des paramètres simples, utiles pour les calculs d'ingénieur, tels que des angles de frottement solparoi. Pour gérer les fortes localisations se produisant à cette interface, les simulations numériques, comme celles aux éléments finis, utilisent des éléments minces spécifiques d'interface pour modéliser cette interaction (Boulon et al., 1995). Des modèles sophistiqués font parfois appel à des concepts comme la théorie de la bifurcation ou les milieux de Cosserat pour décrire la naissance et le développement de bandes de cisaillement à l'interface sol-structure (Unterreiner et al., 1994; Tejchman 2000). La plupart des modélisations numériques ci-dessus se basent sur la mécanique des milieux continus et imposent des conditions de continuité cinématique assez fortes sur l'interface matériau granulaire-paroi.

Depuis une trentaine d'années et les travaux pionniers de Cundall (1971), une alternative aux modèles continus a été proposée et développée en traitant le matériau granulaire à l'échelle du grain. Cette modélisation considère d'une part un comportement mécanique plus simple et d'autre part offre davantage de degrés de liberté cinématiques. Les modèles discrets ont montré leur capacité à reproduire de façon satisfaisante des phénomènes complexes comme l'anisotropie, la localisation des déformations ou la dilatance notamment par les travaux de Lanier et Jean (2000) ou Masson et Martinez (2000).

A ce jour, le comportement de l'interface sol-structure a fait relativement peu l'objet d'études à l'échelle microscopique. Toutefois, des approches discrètes ont été mises en œuvre pour étudier le comportement mécanique de l'interface sol-paroi par Claquin et Émeriault (2001).

Le travail présenté vise à apporter un éclairage microstructurel des phénomènes mécaniques mis en jeu à l'interface matériau granulaire-inclusion. Cette analyse est menée à l'aide de simulations par éléments distincts d'essais bidimensionnels de cisaillement direct avec différentes valeurs de la macrorugosité de l'interface. A partir de l'étude à l'échelle microstructurelle, nous nous proposons également d'interpréter les résultats en termes de comportement macroscopique de l'interface.

Modélisation discrète de l'essai de cisaillement direct

2.1

2

Méthode des éléments distincts

La méthode discrète utilisée est la méthode des éléments distincts (DEM) créée par Cundall (1971) et par Cundall et Strack (1979); elle fut développée par la suite par des auteurs comme Bardet et Proubet (1991), Thornton et Sun (1994) ou Iwashita et Oda (1998). Cette méthode tient compte du mouvement individuel de chaque particule et actualise les contacts entre les éléments voisins en utilisant une loi de contact. Chaque cycle de calcul est constitué de trois étapes durant un pas de temps Δt : la détection des contacts particuleparticule et particule-paroi, la détermination des forces de contact, et enfin le calcul du mouvement des particules. Le mouvement d'une particule est déterminé grâce aux relations fondamentales de la dynamique reliant les résultantes des forces et des moments agissant sur celle-ci aux accélérations linéaires et angulaires :

$$\sum_{c} \mathbf{F}^{c} + \mathbf{mg} = \mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}$$
(1)

$$\sum_{c} \Gamma \|\mathbf{F}^{c}\| = I\ddot{\Theta} \qquad (2)$$

où \mathbf{F}_{c} est le vecteur force de contact au contact c, m la masse, r le rayon et l l'inertie de la particule animée des accélérations linéaire $\ddot{\mathbf{x}}$ et angulaire $\ddot{\mathbf{\theta}}$.

Afin de résoudre les équations ci-dessus, la méthode des éléments distincts utilise un schéma explicite aux différences finies sur un intervalle de temps Δt .

Le code de calcul utilisé est PFC2D (1995). Les particules de forme circulaire sont rigides et leur mécanisme d'interaction est caractérisé par des contacts déformables. La loi de contact utilisée dans les simulations est constituée de deux parties : une partie élastique reliant les forces de contact aux déplacements relatifs dans les directions normale et tangentielle, et un critère plastique de type Coulomb entre les forces de contact normale et tangentielle. Au temps t, la force normale $F_n^c(t)$ qui agit sur la particule A au contact avec la particule B est donnée par:

$$F_n^c(t) = k_n U_n(t)$$
(3)

où k_n représente la rigidité normale au contact, et U_n le recouvrement au contact défini par :

$$U_{n}(t) = r_{A} + r_{B} - \left\| \mathbf{L}_{AB}(t) \right\|$$
(4)

 $r_{\rm A}$ et $r_{\rm B}$ étant les rayons des particules A et B et ${\bf L}_{\rm AB}$ le vécteur joignant les centres des particules.

La force tangentielle au contact entre deux particules est déterminée de façon incrémentale par :

$$F_{t}^{c}(t + \Delta t) = \pm \min\left(F_{t}^{c}(t) + k_{t}\Delta s^{c}, \mu | F_{n}^{c}(t + \Delta t) |\right)$$
(5)

où μ est le coefficient de frottement particule - particule, k_i représente la rigidité tangentielle au contact, Δs^c correspond à l'incrément de déplacement tangentiel au contact durant un pas de temps Δt , calculé à partir la composante tangentielle V_i^c de la vitesse relative des particules par :

$$\Delta s^{c} = V_{t}^{c} \Delta t \tag{6}$$

La formulation du calcul étant de nature dynamique, le code PFC2D introduit une force et un moment d'amortissement s'opposant aux mouvements de translation et de rotation des particules qui modifient les équations de mouvement comme suit :

$$\sum_{c} \mathbf{F}^{c} + m\mathbf{g} - \alpha \left| \sum_{c} \mathbf{F}^{c} + m\mathbf{g} \right| \frac{\dot{\mathbf{x}}}{|\dot{\mathbf{x}}|} = m\ddot{\mathbf{x}}$$
(7)

$$\sum_{c} \mathbf{r} \|\mathbf{F}^{c}\| - \alpha \sum_{c} \mathbf{r} \|\mathbf{F}^{c}\| \frac{\dot{\theta}}{|\ddot{\theta}|} = \mathbf{I}\ddot{\theta}$$
(8)

L'amplitude de l'amortissement est fixée par la valeur du coefficient d'amortissement α ($\alpha \in [0,1]$). La valeur optimale proposée par Cundall est égale à 0,7 pour simuler les régimes quasi statiques, c'est cette valeur qui sera utilisée dans nos simulations.

2.2

Paramètres des simulations

L'essai simulé est le cisaillement direct entre matériau granulaire et plaque rugueuse (Fig. 1) lequel, malgré sa non-homogénéité, est couramment utilisé pour caractériser les interfaces sol-inclusion à cause de sa simplicité de mise en œuvre. Le matériau granulaire, de type Schneebeli, est composé d'un assemblage dense de 1 050 cylindres avec trois diamètres différents $(D_{min} = 2 \text{ mm}; D_{50} = 3 \text{ mm et } D_{max} = 4 \text{ mm})$ et ayant une masse volumique de 1,4.103 kg/m3. Le Tableau I donne le pourcentage massique et le nombre de particules pour chaque diamètre. Ce travail étant axé sur l'influence de la macrorugosité de l'interface, on adoptera arbitrairement les valeurs des paramètres micromécaniques précisées dans le Tableau II et correspondant à des particules relativement lisses et rigides. En considérant les parois de la boîte relativement rigides,



TABLEAU I Pourcentage massique et nombre de particules pour chaque diamètre. Mass percentage and number of particles for each diameter.

D (mm)	% massique	Nombre de particules	
2	25	491	
3	50	436	
4	25	123	

TABLEAU II	Paramètres physiques et mécaniques des particules. Physical and mechanical parameters of particles.		
Para	amètre	Valeur	
Masse volumi Angle de frott Angle de frott Rigidité norm Rigidité tange Rigidité norm Rigidité tange	que des particules ρ (kg/m ³) ement interparticulaire ψ^{ρ} ement particule-paroi ψ^{m} ale particule-particule k_{n}^{ρ} (N/m) ntielle particule-particule k_{n}^{ρ} (N/m) ale particule-paroi k_{n}^{m} (N/m) ntielle particule-paroi k_{n}^{m} (N/m)	1400 13° 1.10^{9} $1.67.10^{9}$	

on prendra les valeurs correspondantes k_n^w et k_t^w des rigidités normale et tangentielle de contact aux parois supérieures à celles aux contacts entre particules.

Afin de considérer un volume élémentaire représentatif à l'échelle macroscopique, les dimensions de l'échantillon granulaire (hauteur H = 6 cm, longueur L = 12 cm) ont été choisies de manière à avoir un rapport minimal de 20 entre les longueurs caractéristiques de l'échantillon et le diamètre moyen des particules.

La plaque rugueuse, modélisant la paroi qui sollicite le matériau granulaire, est constituée par un plan de particules contiguës de même diamètre. Ce type de rugosité artificielle est souvent réalisé expérimentalement par collage de particules sur une surface plane. Afin de pouvoir comparer les résultats du cisaillement sol-plaque et ceux du cisaillement interne du même matériau granulaire obtenus par Masson et Martinez (2000), les paramètres micromécaniques des particules constitutives de la plaque ont été choisis égaux à ceux des particules du matériau granulaire.

Le seul paramètre variable suivant les simulations est la macrorugosité de l'interface sol-structure, matérialisée par la taille des particules constitutives de la plaque. Le fait d'utiliser des particules idéales circulaires pour constituer la rugosité de la plaque, d'une part, et l'importance du pourcentage massique des particules de taille D_{max} (25 %) dans l'échantillon, d'autre part, nous amène à définir une rugosité d'interface rpar le quotient :

$$r = D_p / D_{max}$$
(9)

où D_p représente le diamètre des particules constitutives de la plaque et D_{max} le diamètre maximal des particules de l'échantillon, soit ici $D_{max} = 4$ mm.

Notons qu'une autre définition de la rugosité d'interface *R*, mieux adaptée aux sols et aux inclusions réels, peut être mise en regard de celle proposée cidessus:

$$R = \Delta_{pc} / D_{50}$$
 (10)

où Δ_{pc} est la plus grande différence de hauteur entre le pic et le creux d'une aspérité calculée sur un pas de l'ordre de $10D_{50}$ et D_{50} est le diamètre moyen des particules de l'échantillon, soit ici $D_{50} = 3$ mm.

Le tableau III récapitule les différentes rugosités d'interface des simulations réalisées. On notera que la gamme des rugosités étudiées est particulièrement étendue depuis la plaque plane (r = R = 0) jusqu'à une plaque très rugueuse (r = 2; R = 4/3).

TABLEAU III	Simulations réalisées et rugosité		
	Simulations performed and roughness of soil-structure interface.		

Nom de l'essai	D _p (mm)	Rugosité : r	Rugosité : R
2Dmax	8	2	4/3
Dmax	4	1	2/3
0,5Dmax	2	0,5	1/3
0,25Dmax	1	0,25	1/6
Plaque plane	0	0	0

2.3

État initial et sollicitation

Une procédure identique a été appliquée lors de la création de l'état initial de chaque échantillon. Les particules constitutives de l'échantillon sont déposées dans la boîte de façon aléatoire et sous gravité. L'échantillon est alors consolidé sous une contrainte verticale $\sigma^{top} = 50$ kPa appliquée sur la paroi horizontale constituant le couvercle de la boîte. Par la suite, cette contrainte de confinement est maintenue constante tout au long de l'essai de cisaillement direct. De manière à générer un état initial dense, la phase de confinement s'est déroulée en utilisant des particules et des parois lisses, avec le coefficient de frottement microscopique fixé à zéro. Une fois l'état initial atteint, la valeur souhaitée du coefficient de frottement microscopique est rétablie avant de procéder au cisaillement. La génération de l'état initial, sous chargement oedométrique, avec des particules lisses permet d'obtenir un indice des vides initial des échantillons égal à $e_0 = 0.2$ correspondant à un assemblage dense.

Le cisaillement est produit par le déplacement horizontal *u* de la plaque rugueuse à vitesse constante, les parois verticales de la boîte restant fixes.

Compte tenu de la formulation dynamique du problème, la quasi-staticité du système est vérifiée à l'aide du quotient q_s de la force non équilibrée moyenne sur la force de contact moyenne qui doit être inférieure à



10⁻³ (PFC2D, 1995). Le choix d'une vitesse de la plaque égale à 5.10⁻³ m.s⁻¹ permet de vérifier ce critère global en obtenant une valeur moyenne du quotient inférieure à 10⁻⁴ (Fig. 2). Les pics observés sont dus à des réarrangements brusques des particules au sein de l'échantillon, produisant des instabilités de courte durée.



Grandeurs macroscopiques externes

3.1

Contrainte de cisaillement à l'interface

La contrainte tangentielle moyenne τ sur le plan de cisaillement, déduite de l'équilibre statique de l'échantillon sous les forces extérieures appliquées par les parois, est représentée en fonction du déplacement relatif u/H de la plaque ruqueuse sur la figure 3 avec le résultat d'une simulation de l'essai de cisaillement direct interne effectuée sur le même matériau par Masson et Martinez (2001). Pour des interfaces macroscopiquement rugueuses (r > 0), on observe une mobilisation rapide de la contrainte de cisaillement maximale et l'existence d'un pic initial. Ce pic est suivi d'une forte décroissance de la contrainte, puis d'oscillations de grande amplitude également observées par Thornton et Zhang (2001) et dont la longueur d'onde est liée au diamètre des particules constitutives de la plaque (Baylac 2001). On observe que les courbes de cisaillement des différentes interfaces sont bornées par deux courbes extrêmes : supérieurement par celle du cisaillement interne du sol et inférieurement par celle du cisaillement sur une surface plane. Dans le cas du cisaillement interne, les oscillations de grande longueur d'onde ne sont pas aussi marquées car les conditions cinématiques ne sont pas aussi restrictives au voisinage d'un plan virtuel de cisaillement interne qu'au niveau d'une interface réelle avec une paroi rigide. Notons que la courbe correspondant à une surface plane ne présente ni pic ni oscillations, ces phénomènes apparaissent donc comme la conséquence directe de la rugosité géométrique de la plaque.



Variation de volume de l'échantillon

La variation de volume de l'échantillon, mesurée par la variation relative de la hauteur *dH/H* (Fig. 4) met en évidence un comportement dilatant lié au caractère dense de l'assemblage granulaire. La variation de volume de l'échantillon est en outre croissante avec la macrorugosité de la plaque, ce qui traduit un comportement spécifique de l'interface.

Sauf dans les cas d'une plaque plane, des oscillations de la hauteur sont également observées, en phase avec celles de la contrainte de cisaillement, confirmant les phénomènes de réarrangements granulaires déjà signalés. L'essai de cisaillement interne produit une dilatance supérieure à celle produite par les différentes plaques rugueuses, ce qui peut s'expliquer par la plus grande liberté offerte au matériau granulaire de se déformer de part et d'autre d'un plan virtuel de cisaillement interne au matériau granulaire.

Réseau des forces de contact

4

La figure 5 présente le réseau des forces de contact, caractéristique du mode de transmission des efforts au sein du matériau granulaire, pour différentes valeurs de la rugosité géométrique *r* de l'interface et différents niveaux de la contrainte de cisaillement. Sur cette figure, où chaque vecteur force de contact *F*^c est repré-



senté par un segment orienté suivant la direction de la force et d'épaisseur proportionnelle au module du vecteur force, sont également indiquées les valeurs maximales $F_{\rm max}$ du module des forces de contact pour chaque cas.

Malgré l'existence visible de deux familles de forces de contact, fortes et faibles (Radjai *et al.*, 1998), le réseau de celles-ci à l'état initial (Fig. 5a) apparaît globalement homogène et isotrope quelle que soit la rugosité de l'interface. Cet état n'est pas fondamentalement modifié lors du cisaillement sur une surface plane (r = 0).



FIG. 5 Évolution du réseau des forces de contact pour différentes rugosités d'interface. Evolution of the contact forces network for different interface roughnesses.

Dans le cas d'interfaces géométriquement rugueuses (r = 1 ou r = 0,5), aux pics de la contrainte de cisaillement macroscopique (Fig. 5b), le réseau des forces de contact présente des chaînons de forte épaisseur reliant la plaque rugueuse au bas de la paroi verticale formant le front de la boîte ce qui traduit un arcboutement des forces de contact fortement localisé dans cette zone. Pour des valeurs minimales de la contrainte macroscopique, le réseau des forces de contact retrouve un caractère plus homogène (Fig. 5c), malgré une dissymétrie entre les parties droite et gauche de l'échantillon due au sens de cisaillement, également mise en évidence par Zhang et Thornton (2002).

Ces changements microstructurels des forces de contact expliquent les fortes variations de la contrainte de cisaillement macroscopique observées à l'interface. Plus précisément, les maxima de la contrainte de cisaillement correspondent au développement de chaînons de forces localisés pendant une durée suffisante pour permettre une forte compression le long de ceuxci. L'effondrement de ces chaînons conduit à une redistribution plus homogène des forces de contact et à une décroissance brutale de la contrainte de cisaillement. Cette localisation des efforts a été également décrite par Oda *et al.* (1996) et Iwashita et Oda (1998) lors de l'analyse des mécanismes de formation de bandes de cisaillement par des simulations discrètes d'essais de compression biaxiale.

Angle de frottement macroscopique sol-plaque

5

A cause du déplacement et du frottement des particules le long des parois verticales, il y a lieu de considérer la contrainte normale macroscopique σ^{int} sur l'interface laquelle peut être assez différente de la contrainte extérieure appliquée σ^{top} (Baylac, 2001; Thornton et Zhang, 2001; Zhang et Thornton, 2002). La figure 6 montre que la contrainte macroscopique de cisaillement τ et le quotient τ/σ^{int} suivent des évolutions très proches. En adoptant un critère macroscopique de Coulomb et en considérant une adhésion nulle, on peut définir deux valeurs de l'angle de frottement macroscopique δ de l'interface à l'aide du quotient τ/σ^{int}

- une valeur σ_{pic} correspondant au premier maximum du quotient τ/σ^{int} ;

– une valeur $\delta_{\rm res'}$ correspondant à la moyenne des minima du quotient $\tau/\sigma^{\rm int}$

Compte tenu des oscillations importantes du quotient τ / σ^{int} , les appellations ci-dessus ont un caractère conventionnel, en particulier la grandeur δ_{res} qui présente cependant l'avantage de décrire un état relativement homogène des forces de contact dans l'échantillon.

Les angles de frottement ci-dessus sont portés en fonction de la macrorugosité de la plaque sur la figure 7. L'angle δ_{pic} (respectivement δ_{res}) apparaît comme une fonction croissante de *r* bornée inférieurement par l'angle de frottement microscopique ψ et supérieurement par l'angle de frottement macroscopique interne du sol ϕ_{pic} (respectivement ϕ_{res}). Les maxima des courbes $\delta_{pic}(r)$ et $\delta_{res}(r)$ sont atteints pour une rugosité *r* de la plaque de l'ordre de 1, ce qui permet de différencier deux caractères de rugosité d'interface :



- une interface parfaitement rugueuse pour :

$$r \ge 1$$
 (11)

- une interface partiellement rugueuse pour :

$$0 \le r < 1 \tag{12}$$

Afin de séparer l'apport de la macrorugosité géométrique r de l'interface par rapport au frottement microscopique ψ de la surface des particules, on introduit un indice i_r compris ente 0 et 1, défini par:

$$\delta = \psi + (\varphi - \psi) i_r \tag{13}$$

soit:

$$i_r = \frac{\delta - \psi}{\varphi - \psi} \qquad (14)$$

Cette décomposition s'apparente à celle proposée par Rowe (1962) pour les angles de frottement interne. Sur la figure 8, on remarque que i_r est une fonction croissante de la macrorugosité r avec les valeurs aux bornes suivantes :

 $-i_r = 0$, correspondant à une interface plane;

 $-i_r = 1$, correspondant à une interface parfaitement rugueuse.



Pour $r \le 1$, $i_r(r)$ est proche de r. On peut alors en première approximation écrire :

$$\delta = \psi + (\varphi - \psi) r \tag{15}$$

Avec cette écriture, le paramètre de rugosité *r* dont la définition est purement géométrique, permet également de caractériser l'interface sur le plan mécanique.



Champs de grandeurs cinématiques

Vitesses instantanées

La figure 9 illustre le champ des vitesses instantanées des particules dans le cas d'une interface parfaitement rugueuse (r = 2), à deux stades, début et fin de la sollicitation de cisaillement.

On observe légitimement dans tous les cas une localisation des vitesses instantanées au voisinage de la plaque rugueuse avec des valeurs maximales de l'ordre de la vitesse de déplacement de la plaque (5 mm/s), ce qui confirme à l'échelle locale le caractère quasi statique des simulations, vérifié précédemment à l'échelle globale. Au début du cisaillement (Fig. 9a), les vitesses ascendantes quasi verticales et en bloc de la plupart des particules illustrent le phénomène de dilatance signalé auparavant et qu'on observe généré au voisinage de l'interface. A un stade de cisaillement avancé (Fig. 9b), la dilatance est stabilisée et l'essentiel des mouvements particulaires se produit dans la partie inférieure de l'échantillon avec par endroits un caractère tourbillonnaire.

6.2

Déplacements et rotations moyens des particules

Afin de comparer la cinématique des particules dans chaque cas d'interface, les déplacements moyens $u_{m'}v_m$ et les rotations moyennes θ_m des particules sont moyennés le long de dix couches horizontales de 6 mm d'épaisseur et présentés sur les figures 10 à 12 sous forme adimensionnelle. Cette normalisation fait intervenir le déplacement *u* de la plaque et la rotation théorique d'une particule de rayon $R_{50} = 3$ mm roulant sans glisser sur le plan de celle-ci, soit u/R_{50}

Malgré un glissement sol-plaque important (> 50 %), les courbes des déplacements horizontaux (Fig. 10) permettent de localiser une bande de cisaillement au voisinage de la plaque, d'une épaisseur H_b de



ticules (u/H = 10 %). Mean horizontal displacement of particles (u/H = 10 %).



FIG. 9 Champ des vitesses instantanées des particules (r = 2). Particle instantaneous velocity field (r = 2). l'ordre de 2 cm, soit 5D_{max} (ou 6D₅₀). Cette valeur, d'environ la moitié de l'épaisseur d'une bande de cisaillement interne, est comparable à celles mesurées expérimentalement lors d'essais de cisaillement à symétrie de révolution sur des échantillons denses constitués de particules cylindriques (Lerat *et al.*, 1997) ou de sable naturel (Dejong et Frost, 2002). De même, un gradient plus ou moins important des déplacements verticaux est également mis en évidence (Fig. 11) traduisant une localisation de la dilatance au sein de la bande de cisaillement. Au-dessus de la zone de cisaillement, le déplacement vertical des particules est pratiquement constant, correspondant au mouvement en bloc observé sur les vitesses instantanées.



Bien que les rotations moyennes des particules restent faibles par rapport à un roulement total sur la plaque (Fig. 12), les valeurs les plus fortes se produisent dans la bande de cisaillement. On observe également que les plus fortes variations des déplacements et des rotations se produisent pour la plaque la plus rugueuse (r = 2).



L'analyse des grandeurs cinématiques ci-dessus nous conduit donc à constater que la rugosité géométrique de la surface régit l'existence d'une bande de cisaillement d'interface et l'amplitude des déplacements et rotations au sein de celle-ci, et qu'en revanche l'épaisseur de la bande est essentiellement liée à la granularité du matériau granulaire.

Étude de la bande de cisaillement

Analyse spatiale

de différentes grandeurs

7.1.1

Porosité

La porosité du milieu granulaire, moyennée dans des cercles contenant environ 30 particules, est représentée en fonction de l'abscisse et pour différentes cotes, à l'état initial (Fig. 13a) et pour un déplacement relatif de la plaque u/H = 10 % (Fig. 13b) dans le cas d'une interface parfaitement rugueuse (r = 2).

A l'état initial, le champ initial de porosité peut être considéré comme relativement homogène, malgré l'effet des parois latérales (notamment de la paroi de gauche) qui induisent des valeurs légèrement supérieures le long de celles-ci.

Pour un cisaillement important de l'interface, la porosité produite dans la bande de cisaillement (cote = 1 cm) est nettement supérieure à celle existant en dehors (Fig. 13b), ce qui traduit une localisation de la dilatance dans la bande de cisaillement au cours de la sollicitation. La porosité est ainsi confirmée comme un indicateur de la présence et du développement de la bande de cisaillement à l'interface.

7.1.2

Orientation des forces de contact

L'orientation des forces de contact a été étudiée au sein de la bande de cisaillement et dans le reste de l'échantillon (Fig. 14). Seuls les contacts interparticulaires, et non les contacts particules-parois, ont été considérés. Deux états de cisaillement ont été étudiés ; l'état initial, et un état postérieur à l'apparition de la bande de cisaillement (u/H = 2 %).

L'orientation des forces de contact est représentée par la variable $F(\omega)$ qui quantifie la proportion des forces transmises dans la direction ω (Masson 1997), définie par:

$$F(\omega) = \frac{\sum f(\omega)}{N_c F_0}$$
(16)

où $\sum f(\omega)$ est la somme des intensités des forces orientées suivant la direction ω , N_c est le nombre total de contacts et F_o est l'intensité moyenne de l'ensemble des forces de contact.



b) u/H = 2 % (F_{max} = 1 kN)

a) u/H = 0 % (F_{max} = 0,58 kN) FIG. 14 Réseau des forces de contact (r = 2). Contact forces network (r = 2).

La grandeur $F(\omega)$ est représentée sous forme polaire sur la figure 15. A l'état initial (Fig. 15a), le champ des forces de contact est relativement isotrope pour l'ensemble de l'échantillon avec un léger pic de $F(\omega)$ suivant l'horizontale. Pour un déplacement relatif de la plaque u/H = 2 % (Fig. 15b), les forces de contact situées au-dessus de la bande de cisaillement montrent une anisotropie avec un axe majeur légèrement incliné dans le sens trigonométrique (+ 10 à 30°) par rapport à la verticale. Cette inclinaison est à relier aux déplacements horizontaux négatifs (vers la gauche) des particules se trouvant au-dessus de la bande de cisaillement, observables sur les figures 9a et 10. Au sein de la bande de cisaillement, on observe une anisotropie plus accen-



□ hors bande de cisaillement □ bande de cisaillement





□ hors bande de cisaillement □ bande de cisaillement

b) u/H = 2%

 FIG. 15
 Distribution polaire de l'orientation des forces de contact.

 Polar distribution of contact forces orientation.

tuée des forces de contact avec une orientation principale entre $+50^{\circ}$ et $+70^{\circ}$ par rapport à l'horizontale.

Il semble donc que l'anisotropie des forces de contact constitue un indicateur fort, de type statique, de la présence d'une bande de cisaillement.

7.2

Développement et évolution de la bande de cisaillement

Porosité et déformation volumique

Dans l'interprétation traditionnelle de l'essai de cisaillement direct, la déformation volumique ε_c est évaluée à l'aide de la variation relative de hauteur dH/H sur tout l'échantillon tel que cela a été présenté précédemment sur la figure 4. Cependant, dans la situation présente d'une localisation des déformations, et en particulier de la dilatance, dans la bande de cisaillement, il apparaît plus rigoureux de quantifier la déformation volumique locale à l'aide de l'épaisseur H_b de cette bande, soit :

$$\varepsilon_{v} = dH/H_{p} \tag{17}$$

Par ailleurs, la déformation volumique ε_{y} peut être reliée à la porosité *n*, par l'expression :

$$n = n_0 + \varepsilon_v \tag{18}$$

où n_o est la porosité initiale.

L'évolution de la déformation volumique dans la bande de cisaillement est représentée sur la figure 16 où sont également indiquées des valeurs de la porosité *n*.

Mis à part le cas particulier d'une plaque à surface plane où la porosité moyenne ne varie pas au cours du cisaillement, cette dernière croît avec le déplacement relatif de la plaque jusqu'à atteindre une valeur plus ou moins stationnaire, croissante avec la rugosité d'interface (Fig. 16). Ainsi, les valeurs de ε_{\downarrow} dans les cas r = 2 et r = 1 sont du même ordre que lors du cisaillement interne, indiquant le caractère parfaitement rugueux de telles interfaces alors que dans le cas d'interfaces partiellement rugueuses (r = 0,5 et r = 0,25) la variation de ε_v est moindre. Il semble donc que dans le cas d'un cisaillement d'interface, la porosité asymptotique atteinte soit fonction de la rugosité de la surface et non seulement de la granularité du matériau et de l'éffort appliqué comme dans le cas du cisaillement interne.



7.275

Orientation des forces de contact

L'évolution de l'orientation des forces de contact est suivie pour différents instants à l'aide de la variable statistique $F(\omega)$ définie auparavant. Les instants d'étude choisis sont représentatifs de l'état initial, de valeurs τ_{pic} et minimale de la contrainte de cisaillement, et d'un cisaillement élevé (Fig. 17).





b) u/H = 2 % ($\tau = \tau_{min}$); u/H = 10 % ($\tau = \tau_{max}$)

REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE Nº 104 3º trimestre 2003 L'anisotropie induite par le cisaillement sur l'orientation des forces de contact se manifeste fortement dès le pic de la contrainte de cisaillement τ (Fig. 17a). Les efforts aux contacts sont transmis majoritairement suivant une direction de compression inclinée de l'ordre de + 40° par rapport à l'horizontale, correspondant à la direction de la contrainte principale majeure (Masson, 1997; Calvetti *et al.*, 1997).

Pour un cisaillement plus important correspondant à une valeur minimale de τ (soit u/H = 2 %), la direction principale de transmission des efforts s'incline d'une dizaine de degrés dans le sens trigonométrique par rapport à la direction principale trouvée au pic de la contrainte de cisaillement τ (Fig. 17b). Cette direction majeure d'orientation des forces de contact semble se stabiliser par la suite (Thornton et Zhang 2001).

Rigidité élastique de l'interface

8

On se propose d'évaluer par une méthode approchée une rigidité élastique macroscopique de l'interface durant la phase pseudo-élastique du cisaillement, avant le premier pic de la contrainte de cisaillement. On considère (Fig. 18) un tronçon de la bande de cisaillement loin des parois verticales et soumis à une contrainte de cisaillement moyenne σ_{xy} calculée par homogénéisation des forces de contact. La déformation de cisaillement ε_{xy} est déduite du déplacement *u* de la plaque rugueuse, supposé égal à celui du bord de l'échantillon, dans la mesure où pendant la phase élastique il ne se produit pas de glissement notable entre le matériau granulaire et la plaque d'essai.



Dans ces conditions, le module élastique de cisaillement *G* est obtenu à partir de la relation :

$$\sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} \tag{19}$$

avec:

$$\varepsilon_{xy} = \gamma/2$$
 (20)

Dans l'hypothèse des petites déformations on a :

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{u}{H_{\rm b}}$$
(21)

d'où, l'expression pratique de G :

$$G = \frac{\sigma_{xy}}{\left(\frac{u}{H_b}\right)}$$
(22)

On applique la procédure d'identification du module de cisaillement élastique ci-dessus à un état de contrainte proche de τ_{pic} : le module correspondant a donc le sens d'une raideur globale d'interface pendant la phase initiale de mobilisation du cisaillement. Les résultats de cette procédure appliquée aux différents cas de rugosité d'interface, sont portés sur la figure 19.

Il apparaît que, tout comme les angles de frottement macroscopique, le module élastique de cisaillement est une fonction croissante de la macrorugosité r de l'interface. Le module évalué dans le cas du cisaillement interne est inférieur à celui correspondant à une interface parfaitement rugueuse. Cette différence peut être attribuée à une cinématique moins contraignante au voisinage d'un plan de cisaillement interne qu'en présence d'une plaque rigide.

Compte tenu de l'hétérogénéité des efforts et des déplacements dans l'échantillon, la connaissance de l'épaisseur de la bande de cisaillement s'avère ainsi indispensable pour l'évaluation d'un module de déformation de l'interface qui avec les angles de frottement δ_{res} et δ_{pic} évalués précédemment constituent un ensemble de paramètres permettant de construire un modèle macroscopique d'interface à partir d'une analyse microstructurelle.



Conclusion

Dans ce travail, ont été présentées des simulations aux éléments distincts d'essais de cisaillement direct de l'interface sol-inclusion avec différentes valeurs de la macrorugosité de l'inclusion.

La réponse macroscopique de l'échantillon a été caractérisée et certains aspects ont pu être expliqués à partir d'une analyse microstructurelle. Plus particulièrement une relation très étroite a été mise en évidence entre les pics de la contrainte macroscopique de cisaillement à l'interface et les localisations très fortes du réseau des forces de contact interparticulaires.

L'analyse des déplacements et des rotations des particules a permis de mettre en évidence une bande de cisaillement au voisinage de l'interface dont l'épaisseur, de l'ordre de cinq fois le diamètre des plus grosses particules constituant le matériau granulaire, s'avère être indépendante de la rugosité de l'interface et égale à environ la moitié de l'épaisseur d'une bande de cisaillement interne.

Cette bande de cisaillement est le siège à la fois d'une dilatance et d'une forte anisotropie des forces de contact. Ces deux indicateurs, l'un de nature cinématique, l'autre de nature statique, se manifestent différemment au cours du cisaillement. L'anisotropie des forces de contact est induite dès le début du cisaillement alors que la dilatance se développe progressivement au cours de la sollicitation.

La porosité limite atteinte dans la bande de cisaillement dépend de la rugosité de l'interface, ce qui distingue une telle bande de cisaillement de celles qui se développent à l'intérieur du matériau granulaire.

L'analyse microstructurelle réalisée a rendu possible la caractérisation du comportement macroscopique de l'interface en termes de rigidité élastique et de résistance au cisaillement. L'étude précise de la bande de cisaillement nous a permis d'évaluer une rigidité élastique dépendant de la macrorugosité de l'interface. D'autre part, pour le matériau dense considéré, deux angles de frottement, au pic et résiduel, ont permis de caractériser la résistance au cisaillement de l'interface. Une expression de ces angles est proposée en fonction de la macrorugosité géométrique de l'interface et de la microrugosité des contacts particulaires.

Bibliographie

- Bardet J.-P., Proubet J. « A numerical investigation of the structure of persistent shear band in granular media ». *Geotechnique*, 41, 1991, p. 599-613.
- Baylac B. Analyse du cisaillement solinclusion par éléments discrets. Thèse de doctorat. INSA de Rennes, 2001.
- Boulon M., Garnica P., Vermeer P.A. «Soil-structure interaction: FEM computations». *Mechanics of Geomaterial Interfaces*, Selvadurai et Boulon (eds), Elsevier, 1995, p. 147-171.
- Calvetti F., Combe G., Lanier J. «Experimental micromechanical analysis of a 2D granular material: Relation between structure evolution and loading path». *Mech. Cohes.-Frict. Mat.*, 2, 1997, p. 121-163.
- Claquin C., Emeriault F. «Interface behavior of granular materials: discrete numerical simulation and statistical homogenization». *Powders and Grains* 2001, 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media, Kishino (ed.). Balkema, Sendai, Japan, 2001, p. 323-326.
- Claquin C., Emeriault F. « Interface behavior of polydisperse granular materials: discrete numerical simulation of a ring simple shear test ». 15th Engineering Mechanics Conference EM 2002, ASCE, New York, 2002.
- Cundall P.A. « A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems ». Proc. Int. Symp. on Rock Fracture, Nancy, France, 1971.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. « A discrete numerical model for granular assemblies». *Geotechnique*, 29, 1, 1979, p. 47-65. Deiong, J.T., Erset, J.D., Physical evidence
- Dejong J.T., Frost J.D. Physical evidence

of shear banding at granular-continuum interfaces. *15th Engineering Mechanics Conference EM 2002, ASCE,* New York, 2002.

- Iwashita K., Oda M. «Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM». Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 124, 1998, p. 286-292.
- Johson K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985.
- Lanier J., Jean M. Experiments and numerical simulations with 2D disks assembly. *Powder Technology*, 109, 2000, p. 206-221.
- Lerat P., Boulon M., Schlosser F. «Étude expérimentale de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires ». *Revue française de génie civil*, vol. 1, n° 2, 1997, p. 345-366. Masson S. – Simulations numériques dis-
- Masson S. Simulations numériques discrètes de l'écoulement de matériaux granulaires dans les silos. Utilisation de la méthode des éléments distincts. Élaboration et validation de modèles de grains sur réseau. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 1997.
- Masson S., Martinez J. «Micromechanical analysis of the shear of a granular material using 2D discrete simulations of a direct shear test ». 14th ASCE Engineering Mechanics Division EMD 2000 Conference, Austin, USA, 2000.
- Masson S., Martinez J. «Micromechanical analysis of the shear behavior of a granular material». *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 127, n° 10, 2001, p. 1007-1016.
- Oda M., Iwashita K., Kazama H. « Microstructure developped in shear bands of dense granular soils and its computer

simulation. Mechanism of dilatancy and failure ». N.A. Fleck & A.C.F. Cocks (eds.), Proc. IUTAM Symp. on Mechanics of Granular and Porous Materials, Cambridge U.K., Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 353-364.

- PFC2D User Manual. Itasca consulting group. Inc. Minneapolis, USA, 1995.
- Radjai F., Wolf D., Jean M., Moreau J.J. «Bimodal character of stress transmission in granular media». *Phys. Rev. Letter*, 80, 61, 1998.
- Rowe P.W. « The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact ». Proc. Roy. Soc., vol. 269, 1962, p. 500-527.
- Tejchman J. « Behaviour of granular bodies in induced shear zones ». Granular Matter, n° 2 vol. 2, 2000, p. 77-96.
- Thornton C., Sun G. «Numerical simulation of general 3D quasi-static shear deformation of granular media». Numerical methods in geotechnical engineering, Smith I. (ed), Balkema, 1994, p. 143-148.
- Thornton C., Zhang L. « A DEM comparison of different shear testing devices ». 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media Powders and Grains, Kishino (ed.). Balkema, 2001, p. 183-190.
- Unterreiner P., Vardoulakis I., Boulon M., Sulem, J. – «Essential features of a Cosserat continuum in interfacial localisation ». *Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, Chambon R. Desrues J. et Vardoulakis I. (eds), Balkema, 1994, p. 141-152.
- Zhang L., Thornton C. 2002. «DEM simulations of the direct shear test ». 15th Engineering Mechanics Conference EM 2002, ASCE, New York, 2002.