

ÉTUDE COMPARATIVE DES DEUX TYPES D'ESSAI DE CISAILLEMENT (HORIZONTAL ET VERTICAL)

1. Introduction

L'étude du renforcement des sols à l'aide de l'essai à plan de cisaillement horizontal imposé ne modélise pas fidèlement la réalité d'un remblai renforcé, dans lequel la ligne de glissement se propage du haut vers le bas de celui-ci (Figure 1). La direction de la ligne de glissement est perpendiculaire à l'orientation des nappes. D'autre part, la mise en place des morceaux de plastique avec des surfaces de recouvrement est difficile à réaliser dans ce type d'essai.

Confrontés à ces problèmes, nous avons mis au point un essai de cisaillement original «à plan de cisaillement vertical». Les caractéristiques mécaniques du sol utilisé, obtenues à l'aide de cette boîte, sont comparées à celles obtenues à la boîte à plan de cisaillement horizontal. L'objectif étant de s'assurer que dans le cas des sols non renforcés, les deux types d'essais donnent des résultats comparables (principe d'objectivité).

2. Matériels et programmes expérimentaux

2.1 Matériaux utilisés

Le sol utilisé dans notre programme d'essais est une grave roulée provenant des carrières de la région lyonnaise. Pour obtenir une meilleure reproductibilité des essais, le sol est étuvé pour assurer une teneur en eau nulle. En effet, la teneur en eau pouvant avoir une influence sensible sur les caractéristiques du sol (cohésion, angle de frottement interne...), il devient important de figer celle-ci en considérant des échantillons secs.

2.2 Appareillage d'essai à plan de cisaillement vertical

L'appareillage (Figure 2) est constitué de :

- la cuve,
- le système de cisaillement,
- le système de chargement vertical du matériau.

2.2.1 La cuve

Les dimensions de la cuve sont : 600 mm de longueur, 400 mm de largeur, 465 mm de profondeur. Ses parois sont très rigides, afin que

soient supprimées toutes les vibrations. Les parois latérales sont munies de deux fentes en leur milieu pour permettre le passage de l'inclusion. Afin de visualiser les déplacements à l'intérieur, la paroi frontale est constituée d'une vitre qui résiste à la poussée du sol. Pour rassembler les deux zones (active et passive) du massif lors du glissement de celui-ci, cette cuve est formée par deux boîtes de dimensions identiques (300 mm x 400 mm x 465 mm) ; l'une (boîte n°2) mobile et l'autre (boîte n°1) fixe. Elles sont supportées par des portiques de grande rigidité. La hauteur de ces derniers est suffisante pour installer le vérin qui permet de déplacer la boîte n°2.

2.2.2 Le système de cisaillement

Un vérin mécanique d'une capacité de 50kN, ancré en position verticale permet de déplacer la boîte n°2. Sur le bord supérieur de celle-ci, nous avons incorporé un anneau dynamométrique entre le vérin et la boîte n°2. Sur le bord supérieur de celle-ci, nous avons placé un comparateur de course de 100 mm qui permet de suivre le déplacement vertical.

2.2.3 Le système de chargement vertical du matériau

Nous avons utilisé le système de chargement propre, composé de gueuses supportées chacune par un câble indéformable, accroché à une tige de grande rigidité. Cette tige est posée sur l'anneau. Ce dernier affiche l'effort normal qui existe sur le plateau transmettant une charge uniforme au sol.

2.3 Appareillage d'essai à plan de cisaillement horizontal

Nous avons conçu un appareil (une boîte) permettant d'effectuer des essais bien adaptés à notre étude (Figure 3). Il est composé de deux parties de largeur et hauteur identique, 250 mm et 200 mm respectivement. La partie inférieure, d'une longueur de 800 mm, est encastrée au sol. La partie supérieure, d'une longueur de 600 mm, est longitudinalement mobile, ceci afin de conserver la même surface de cisaillement (de frottement) au cours de l'essai. Il permet de tester ainsi des sols à grosse granulométrie [$(D_{max} < L/6 = 100 \text{ mm})$ collins (1981)] ou

T. MESSAS - C. COULET
R. AZZOUZ - L. CURTIL
L2M, IUT A Génie-civil
Lyon 1 - France

RÉSUMÉ

Nous nous sommes proposé, dans le cadre de cette publication, de représenter le mode réel de rupture lors d'un glissement d'un remblai. L'expérimentation est réalisée au laboratoire sur une boîte originale à plan de cisaillement vertical. Afin de confirmer les caractéristiques mécaniques du sol utilisé, nous avons effectué les essais à la boîte à plan de cisaillement horizontal imposé.

MOTS CLÉS

Renforcement - sol - géotechnique - essai - cisaillement frottement.

Figure 1 : Glissement d'un remblai

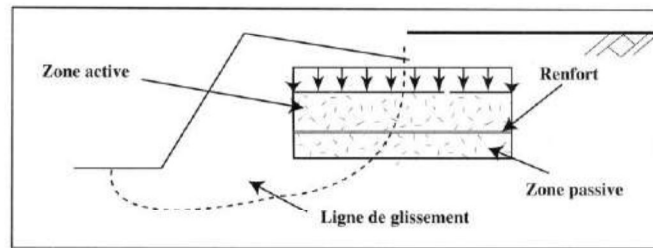
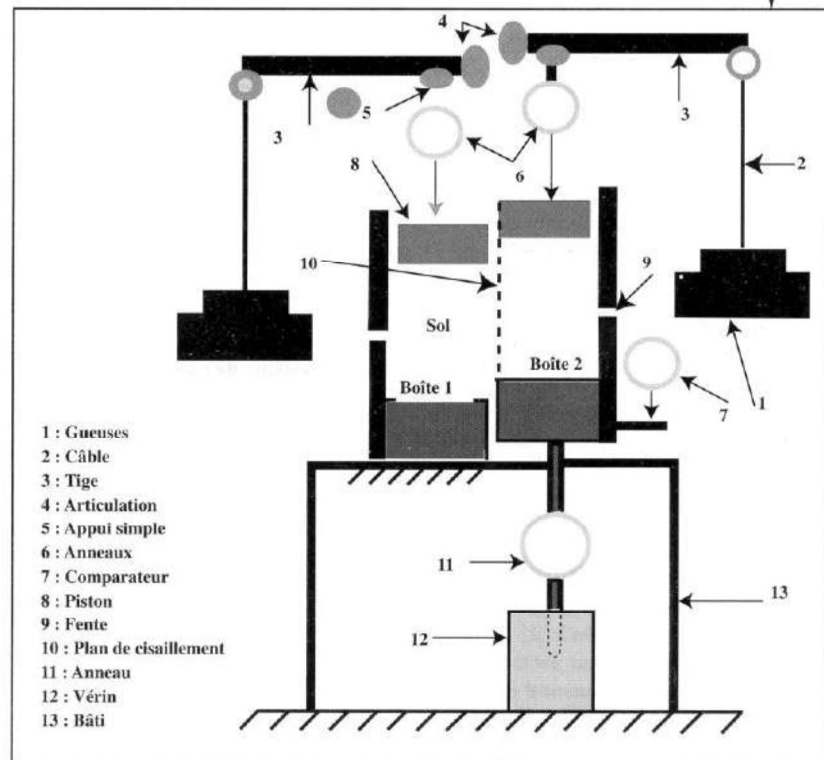


Figure 2 : Schéma de principe du dispositif expérimental de l'essai à plan de cisaillement vertical



- 1 : Gueuses
- 2 : Câble
- 3 : Tige
- 4 : Articulation
- 5 : Appui simple
- 6 : Anneaux
- 7 : Comparateur
- 8 : Piston
- 9 : Fente
- 10 : Plan de cisaillement
- 11 : Anneau
- 12 : Vérin
- 13 : Bâti

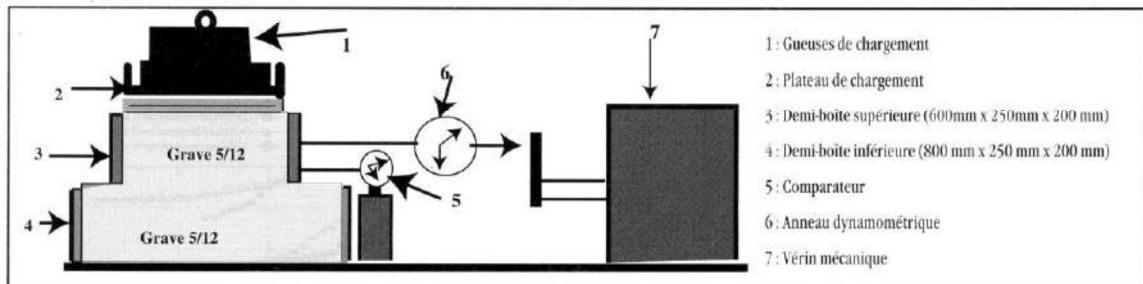
d'après le critère de Kerisel (1972) $L > 20 D_{max}$, L = cote de la boîte, et D_{max} = diamètre maximal des grains. Cette boîte es donc bien plus grande que les boîtes de Casagrande classiques. De ce fait, l'influence des bords de la boîte est diminuée. On peut expérimenter le matériau sol + renforcement tel qu'utilisé in situ. La demi-boîte supérieure est animée d'une vitesse constante et égale à 1 mm/mn, et ceci pour tous les essais. La traction est exercée par un vérin mécanique d'une capacité de 50 kN. A l'avant, est placé le comparateur (de course 100 mm) qui permet d'effectuer les mesures des efforts de cisaillement. Le chargement vertical est réalisé au moyen de gueuses de poids différents (103,

210 kg...) posées sur un plateau muni d'un piston de section rectangulaire afin de transmettre la charge verticale dont la valeur est fonction du nombre de gueuses posées.

2.3.1 Préparation de l'essai

Après avoir pesé la quantité du matériau nécessaire à mettre dans les deux demi-boîtes inférieure et supérieure pour obtenir la densité du sol voulue ($\rho=1.7$), nous procéderons à la mise en place comme suit :

• **remplissage des deux demi-boîtes :** la mise en place du matériau dans la demi-boîte inférieure s'effectue par couches de 90 mm. Nous compactons ensuite manuellement



chaque couche de matériau déversé à l'aide d'une dame d'acier clouté. Ensuite, on pose sur la demi-boîte inférieure, la demi-boîte supérieure en la reculant jusqu'au bord arrière pour obtenir le maximum de course lors de la traction. Le matériau est disposé dans la demi-boîte supérieure en suivant la même procédure.

• **Mise en place des systèmes de chargement vertical (application de l'effort de compression normale N)** : nous plaçons ensuite sur le matériau le plateau et sur ce dernier le nombre de gueuses nécessaires pour obtenir l'effort vertical voulu. Afin d'éviter tout déséquilibre lors du chargement, les gueuses sont posées les unes sur les autres au centre du plateau.

• **Mise en place du système de traction** : un vérin mécanique d'une capacité de 50 kN ancré en position horizontale permet de déplacer la demi-boîte supérieure à une vitesse de 1 mm/mn. Afin de mesurer l'effort de cisaillement, nous avons incorporé un capteur de force au système de traction. Nous avons placé à l'avant de la demi-boîte supérieure le comparateur qui permet de mesurer le déplacement horizontal.

2.3.2 Début de l'essai (application de l'effort horizontal de traction T)

Afin de déplacer les deux demi-boîtes, l'une par

rapport à l'autre, on applique à l'échantillon un effort horizontal de traction T . L'évolution de ces valeurs est lue sur l'anneau dynamométrique et nous relevons, à l'aide du comparateur, les déplacements correspondants.

2.3.3 Fin de l'essai

L'essai est terminé lorsque l'effort de traction décroît d'une façon remarquable. La contrainte tangentielle fait donc de même car la surface de cisaillement reste constante pendant le déroulement de l'essai.

La connaissance de N et T permet la détermination d'un point de la courbe intrinsèque dans la représentation de Mohr. En effet, si A est la section du plan de glissement, les composantes de la contrainte critique sont :

- composante normale : $\sigma = N/A$,
- composante tangentielle : $\tau = T/A$.

3. Avantages et inconvénients des deux types d'essais de cisaillement

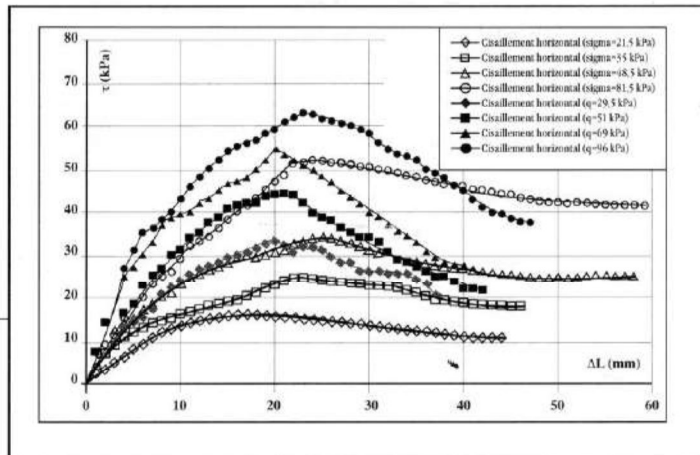
La boîte à plan de cisaillement horizontal est également appelée boîte de cisaillement direct du fait de sa facilité de préparation et de fonctionnement. Cet essai reste l'essai classique le plus simple à utiliser. Toutes ces facilités permettent d'étudier et de contrôler les différents facteurs.

Type de plan de cisaillement	Avantages	Inconvénients
Horizontal	• Procédure d'essai simple • Surface de cisaillement constante • Préparation simple • Contrainte normale (σ) constante	• Ne modélise pas la rupture des sols renforcés • Concentration de contraintes aux bords • Difficulté d'étudier le cisaillement des sols renforcés par nappes continues ou discontinues
Vertical	• Modélise mieux la rupture des sols renforcés • Assurance du recouvrement entre nappes discontinues • Bon ancrage des nappes continues • Contrôle les conditions aux extrémités de la nappe	• Système et procédure d'essai complexe • Préparation d'essai lourde • Surface de cisaillement variable • Concentration de contraintes aux bords • Contrainte normale (σ) variable

Figure 3 : Schéma descriptif de l'appareil grand modèle de cisaillement

Tableau 1 : Avantages et inconvénients de chaque type d'essai de cisaillement (sol seul)

Figure 4 : Courbes contraintes de cisaillement-déplacements (Essai de cisaillement grave-grave)



Cependant, la boîte à plan de cisaillement vertical est préférée, du fait de sa représentation de la réalité lors d'un glissement de terrain. Nous indiquons dans le tableau 1, les avantages et les inconvénients de chaque type d'essai : Dans le cas de cisaillement du sol renforcé, l'essai à plan de cisaillement vertical est préféré, vu la facilité de mise en œuvre des nappes discontinues avec une certaine surface de recouvrement entre les éléments voisins, et l'assurance de bon ancrage des nappes continues.

4. Courbes contraintes de cisaillement-déplacement

Les résultats obtenus peuvent se distinguer les uns des autres par l'allure des courbes expérimentales (figure 4). La présence de pics, en terme de contrainte de cisaillement, est à noter à ΔL compris 16 et 25 mm dans le cas de cisaillement à plan de rupture horizontale, et entre 20 et 23 mm dans le cas d'un essai à plan de cisaillement vertical. Dans celui-ci, on empêche toute variation de volume au cours du cisaillement de l'échantillon, ce qui a pour consé-

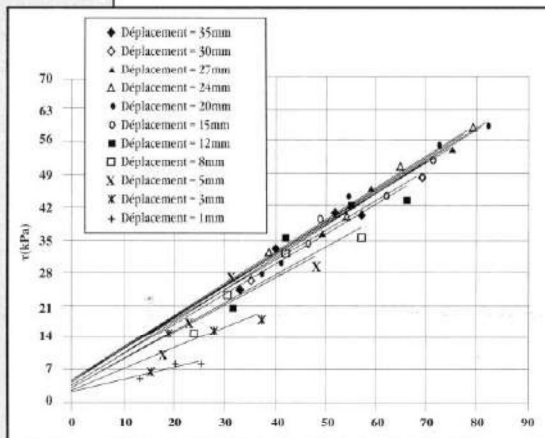
quence de produire des contraintes de cisaillement très élevées. Ceci est dû au fait que le gravier au voisinage du plan de cisaillement. Au début, pour l'essai à plan de rupture horizontale, le gonflement de l'échantillon provoque un soulèvement de la boîte supérieure, puis d'un écoulement de grains de faibles diamètres. La contrainte de cisaillement à la rupture augmente quand la contrainte normale initiale s'accroît. Nous remarquons que la contrainte de cisaillement décroît par la suite jusqu'à atteindre la valeur résiduelle.

5. Analyse en isodéplacement

Afin de suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques tout au long de chaque déplacement, nous avons effectué une analyse par des courbes intrinsèques d'isodéplacement de la même manière que l'analyse en isodéformation selon la définition donnée par Long (1972). Nous avons pris onze valeurs du déplacement DL (mm) : 1, 3, 5, 8, 12, 15, 20, 24, 27, 30 et 35 mm.

Nous représentons dans les figures 5 et 6 les droites des courbes intrinsèques qui correspondent à chaque déplacement donné pour les essais à plan de cisaillement vertical et horizontal. L'axe des abscisses peut être considéré comme la courbe intrinsèque d'isodéplacement correspondant à un déplacement nul. Dans le plan (s, t) , nous constatons que la pente des droites augmente graduellement avec le déplacement DL . Dès que le déplacement atteint environ 8 mm, la pente de ces droites ne varie pratiquement plus. L'intersection des droites tangentielle en un point d'ordonnées 2.5 kPa, ce qui montre que la cohésion naturelle de notre matériau est négligeable. Les pentes de ces droites représentent l'angle de frottement interne f . le tableau 2 donne les valeurs de l'angle de frottement interne correspondant au déplacement.

Figure 5 : Droite des courbes intrinsèques d'isodéplacement (Essai à plan de cisaillement vertical)



Déplacement ΔL (mm)	1	3	5	8	12	15	20	24	27	30	35
Essai à plan de cisaillement vertical	18.2	26.9	28.8	32.8	33.5	34.8	35.2	35	34.6	33.5	33.4
Essai à plan de cisaillement horizontal	13	21	25	29	31	31.5	32.4	33	32.6	32.2	32

Tableau 2 : Valeurs de l'angle de frottement interne ϕ pour différentes valeurs du déplacement ΔL (approche en isodéplacement)

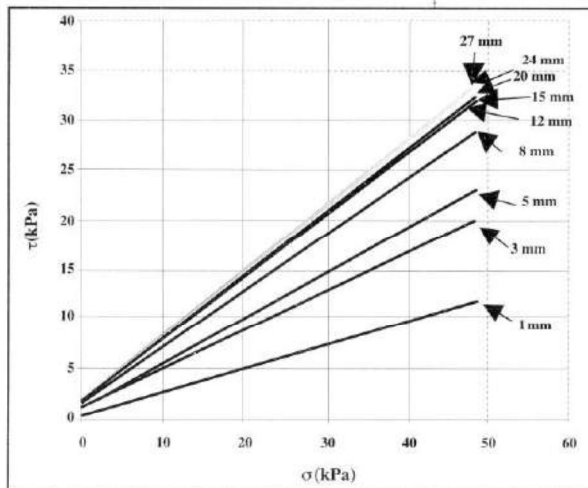


Figure 6 : Droite des courbes intrinsèques d'isodéplacement (Essai à plan de cisaillement horizontal)

6. Analyse des résultats à la rupture

Nous avons supposé que le comportement du matériau à la rupture suit le critère de Mohr-Coulomb. Les valeurs moyennes obtenues à

partir de ces essais sont résumées dans le tableau 3. A partir de la notion d'angle de frottement (Figure 8), nous constatons que la valeur de l'angle de frottement moyen grave-grave, déterminée par l'essai à plan de cisaillement horizontal, est du même ordre que la valeur de l'angle de frottement interne déterminée dans un essai à plan de cisaillement vertical. L'écart

La figure 7 montre l'évolution de l'angle de frottement interne en fonction du déplacement. Ces courbes représentent trois zones de déplacement :

- **la première zone :** pour ΔL allant de 0 à 10 mm, l'angle de frottement interne augmente sensiblement. A 5 mm de déplacement, il atteint environ 90% de sa valeur maximale,
- **la deuxième zone :** Pour ΔL allant de 10 à 15 mm, nous remarquons que l'angle de frottement interne ϕ avec augmente lentement,
- **la troisième zone :** Pour ΔL supérieur à 15 mm, nous constatons la stabilisation de l'angle de frottement ϕ avec quelquefois une diminution de celui-ci.

D'après cette approche en isodéplacement, nous avons observé une augmentation rapide de ϕ pour les déplacements faibles ($\Delta L = 0$ à 10 mm). Ce qui correspond à la phase où la grave commence à être sollicitée mais reste dans un état élastique.

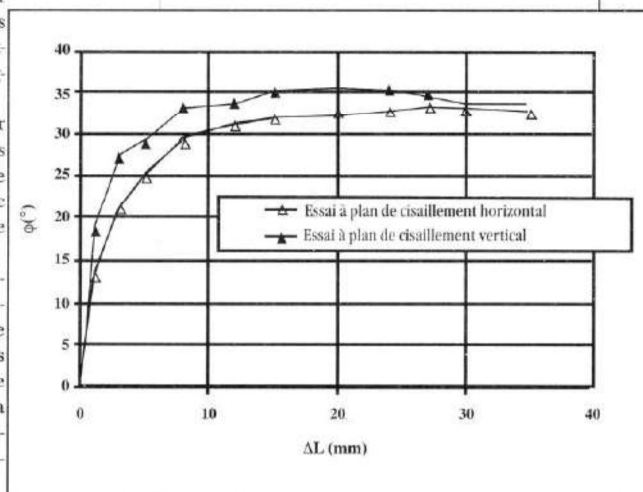


Figure 7 : Mobilisation de l'angle de frottement interne ϕ en fonction du déplacement

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Bacot «Contribution à l'étude du frottement entre une inclusion souple et un matériau pulvérulent» cas de la terre armée. Thèse Sci. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Univ. Lyon I, 1981, 390 p.
- [2] M. Boulon & N. Hoteit : «Interface sol-inclusion. Comportement de l'essai de cisaillement direct à rigidité normale imposée», p.314-321. Rapport Greco, 1988.
- [3] P. Lareal & Y. Bourdeau : «Essais de cisaillement in situ sur des sols alluvionnaires dans la vallée du Rhône». Travaux, n° 459-460, Juin-Juillet, pp.52-59.
- [4] T. Messas : «Etude du renforcement des sols par nappes discontinues en matières plastiques souples». Thèse Doct. : Université Claude Bernard de Lyon (UCBL-Lyon I), 1997, 231p.

Type de plan de cisaillement	Cohésion C (kPa)	Angle de frottement interne ϕ (°)
Horizontal	2,3	33
Vertical	2,5	3,5

Tableau 2 : Caractéristiques de la grave 5/2

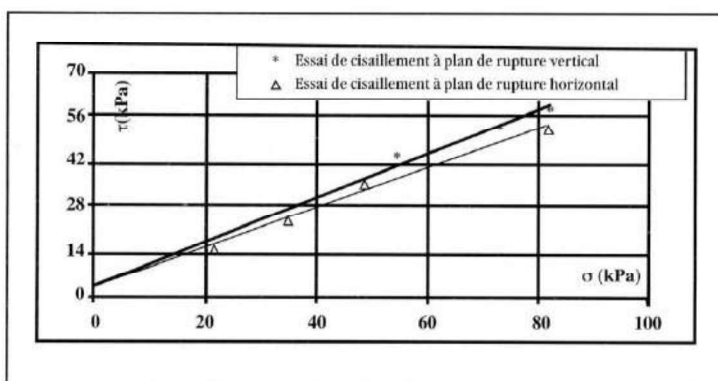


Figure 8 : Courbes intrinsèques (Essai de cisaillement grave-grave)

entre les deux valeurs ne dépasse pas 5%. Cet écart se traduit par la différence entre le mode de rupture en cisaillement, l'état de contrainte, et les incertitudes de mesure.

7 Conclusion

L'étude comparative des deux boîtes (à plan de cisaillement horizontal et vertical) a abouti aux remarques suivantes :

- le pic de la contrainte tangentielle est très prononcé dans le cas de la boîte à plan de cisaillement vertical ; ceci est dû au phénomène de dilatance qui est important dans cette boîte,
- la valeur de l'angle de frottement moyen grave-grave déterminée par l'essai à plan de cisaillement horizontal est du même ordre que la

valeur de l'angle de frottement interne déterminée dans un essai à plan de cisaillement vertical,

- on note une certaine analogie qualitative de la variation du coefficient de frottement apparent en fonction de la contrainte normale pour les deux types d'essai,
- l'essai à plan de cisaillement vertical est préféré pour l'étude du comportement de cisaillement du sol, vu sa représentation de la réalité lors d'un glissement de terrain ■