



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Incidence de la vitesse de déplacement d'une paroi de soutènement sur la rupture d'un matériau analogique par poussée

The effect of displacement speed of rigid retaining walls on failure of analogical material by active earth pressure

Mostefa Kara Esma^{a,b,*}, Sekkel Abdelkrim^{b,c}, Fellah Mohamed^{a,b}, Djellal Abdelkader^{a,b}

^a Département de Génie Civil & Travaux Publics, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, Algérie

^b Laboratoire Génie civil & Environnement, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, Algérie

^c Département de Génie Civil & Hydraulique, Université Dr TAHAR Moulay, Saida, Algérie

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 3 Avril 2020

Révisé : 31 Mai 2020

Accepté : 1 Juin 2020

Mots clés:

Poussée

Modèle réduit

Bande de cisaillement

Vitesse de déplacement

Keywords :

Active Earth Pressure

small-scale model

shearing band

displacement speed

RESUME

Cet article s'intéresse au domaine de modélisation physique du phénomène de poussée des terres et de la cinétique de rupture rencontrée dans les milieux granulaires. Mieux comprendre le phénomène de poussée et les mécanismes de rupture derrière les ouvrages de soutènement contribuera à mieux les concevoir et permettra de rendre les sinistres moins dommageables. L'exploitation d'un modèle réduit rempli avec un matériau bidimensionnel de Schneebeli léger a permis la réalisation des essais de poussée en déplaçant la paroi mobile du dispositif vers l'extérieur du massif. L'évolution des bandes de cisaillement a mis en avant les localisations des déformations. Les résultats ont montré que la vitesse de déplacement du mur influe sur le mécanisme de rupture et qu'elle est proportionnelle à la perturbation du milieu granulaire. En perspective, il serait judicieux d'explorer la rupture sur sol réel conforté par des matériaux recyclés.

ABSTRACT

This paper illustrated the physical modeling of the phenomenon of Active Earth Pressure and kinetics of rupture in the granular soils. Better, understand the phenomenon of Active Earth Pressure and mechanisms of failure behind the retaining walls will contribute to better conceiving them and will make claims less damaging. The exploitation of a small-scale model filled with Schneebeli material; light two-dimensional material simulating granular non-cohesive soil, allowed tests realization of Active Earth Pressure by moving the mobile wall of the device towards the outside of two-dimensional material. The evolution of the shear bands has highlighted the locations of the deformations. The results showed that the wall's speed of movement influences the failure mechanism and is proportional to the disturbance of the granular soil. In perspective, it would be judicious to explore the failure on real soil reinforced by recycled materials.

* Corresponding author. Tel.: +213656223194.

E-mail address: mkesma@yahoo.fr

1 Introduction

L'étude du phénomène de poussée des terres est primordiale pour la conception des ouvrages de soutènement, et fait l'objet de nombreux axes de recherche dans le domaine de la mécanique des sols et la géotechnique. Cette discipline de plus de deux cent (200) ans reste cependant difficile à cerner vu la complexité des champs de déformation.

Beaucoup de recherches sur modèle réduit ont été effectuées par TERZAGHI en 1934[1]. Les résultats obtenus ont montré que le déplacement du mur a un effet significatif sur la poussée des terres. Les travaux entrepris par Sekkel et Meghachou [2] sur le mode de déplacement de la paroi mobile faisant office de mur de soutènement ont confirmé cette hypothèse.

Certains chercheurs comme Matsuo, Kenmochi et Yagi ont étudié la distribution de la contrainte de poussée sur des murs de soutènement rigides tournant autour de leur base [3]. Un modèle de mur de soutènement a été développé afin d'étudier la distribution de la poussée sous différents modes de mouvement du mur [4]. L'effet de l'angle d'inclinaison du mur sur la pression des terres a également été étudié [5].

Des études expérimentales complètes sur la poussée des terres en milieu grenu (sable) ont été effectuées à l'université de Cambridge entre 1962 et 1974.

Au cours de cette période, un certain nombre de chercheurs [6-12] ont effectué des expériences à la rupture par poussée et butée sur un sable sec se déformant dans des conditions de contraintes planes.

Le type de mouvement du mur (translation passive du mur) [6] a été étudié par Lucia en 1966. La rotation passive du mur autour de sa partie supérieure par Arthur, Lord et James [7, 8, 11], la rotation passive du mur autour de sa base par Bransby et Adeosun [9, 10], rotation active du mur autour de sa partie supérieure [11] par Lord. D'autres essais sur la flexibilité du mur (mur rigide et mur flexible) [12] ont été effectués par Milligan qui s'est aussi intéressé à la rugosité du parement (lisse et rugueux) comme son confrère Arthur [7, 12] qui a travaillé à son tour sur la densité initiale du sable (dense et lâche) [7], ainsi que le chercheur James [11].

On dénombre ici quelques exemples de travaux de recherches qui rendent l'étude de la rupture du sol derrière les murs de soutènement très intéressante à observer. Bien que les résultats des essais sur modèles grandeur nature soient plus crédibles, les coûts pour effectuer de tels essais sont très onéreux. Le modèle réduit s'avère donc un outil puissant pour la vérification de la théorie de pression des terres et la recherche des mécanismes de rupture qui y sont liés [13].

Les travaux de Sekkel et Meghachou [2] sur modèle réduit, ont montré que le mode de déplacement dit continu de la paroi (faisant office de mur de soutènement), translationnel vers l'extérieur du massif et, sans interruption dans le temps, génère des multi mécanismes de rupture assez complexes, avec plusieurs bandes de cisaillement et une perturbation du coin de Coulomb. En revanche, le mode discontinu marqué par un intervalle d'arrêt et un temps d'arrêt marque l'apparition d'une seule bande de cisaillement franche et nette, accompagnée de moins de perturbation du coin de Coulomb.

Ayant répondu à la question sur l'influence du mode de déplacement de la paroi mobile sur la rupture par poussée, puis après avoir mené une étude paramétrique sur le mode discontinu [13], il fallait à présent orienter notre étude sur l'incidence de la vitesse de déplacement de la paroi mobile sur l'évolution de la rupture du milieu sollicité en poussée derrière une paroi de soutènement.

Les conditions aux limites d'un milieu sollicité influent beaucoup sur le comportement global du milieu. L'étude présentée dans ce papier sera portée sur une surface libre horizontale non surchargée et un parement lisse vertical de 250mm de hauteur et ce pour l'ensemble du programme d'essais.

Pour rappel, le matériau étudié est celui de Schneebeli ; matériau bidimensionnel léger constitué d'un entassement dense de rouleaux cylindriques en plastique simulant un sol grenu sans cohésion (sable dense).

On rappellera également que le mode de déplacement de la paroi mobile est continu ; c'est à dire que le mouvement est horizontal et translationnel vers l'extérieur du massif et sans interruption dans le temps et ce, pendant tout le processus de transformation. Nous insistons également sur l'aspect cinématique de notre étude en focalisant les résultats sur le cisaillement maximum qui caractérise bien la réponse du milieu ainsi que l'aspect qualitatif qui traitera l'allure, la propagation et la diffusion par bandes de cisaillement au sein du milieu avec ou sans perturbation du coin de Coulomb.

2 Programme expérimental

Si une des hypothèses des théories des états d'équilibre limite est celle d'un milieu bidimensionnel, cette hypothèse ne peut être ignorée lors de tout travail expérimental. L'utilisation d'une technique de corrélations d'images (logiciel Kisdef-7D), a permis la visualisation qualitative et surtout la quantification de l'évolution des champs de déformations des objets plans qui resteront plans après un processus de transformation. Le principe de la méthode consiste à comparer deux images numériques. Un premier enregistrement de la surface de l'échantillon est pris avant déformation, alors qu'un deuxième est pris après déformation [14].

2.1 Matériau utilisé

Le milieu granulaire étudié est représenté par le matériau de Schneebeli [15, 16] qui, en 1956 a montré que les problèmes de mécanique des sols en milieux granulaires peuvent être ramenés à deux dimensions. L'analogie consiste à remplacer le sol grenu par un sol analogique représenté par un entassement de rouleaux cylindriques bidimensionnels.

De nombreux essais furent réalisés sur des rouleaux cylindriques composés de : dural [17-20] (dural ou duraluminium : alliage composé d'aluminium et de cuivre utilisé en industrie aéronautique pour ses hautes performances mécaniques), rouleaux en caoutchouc [21], en P.V.C [22-25] et en acier [26]. Tous les résultats ont montré que leurs comportement est assimilé à celui d'un sable dense.

Le sol analogique utilisé pour ce programme est constitué d'un entassement de rouleaux cylindriques en plastique légers (Dix-huit mille rouleaux) (Figure.1) découpés soigneusement présentant les caractéristiques suivantes [2,13] :

- Milieu léger sec, son poids volumique $\gamma_d = 3,5 \text{ kN/m}^3$ avec des bouchons constitués de « pâtes à modeler », son poids des grains solides est $\gamma_s = 9 \text{ kN/m}^3$, sa cohésion est nulle ($C=0$) et son angle de frottement interne $\varphi=10^\circ$;
- Rouleaux indéformables au vu des actions appliquées simulant ainsi des grains incompressibles. Les rouleaux initialement cylindriques restent cylindriques après un processus de transformation ;
- Leur empilement confère au milieu une configuration dense ;

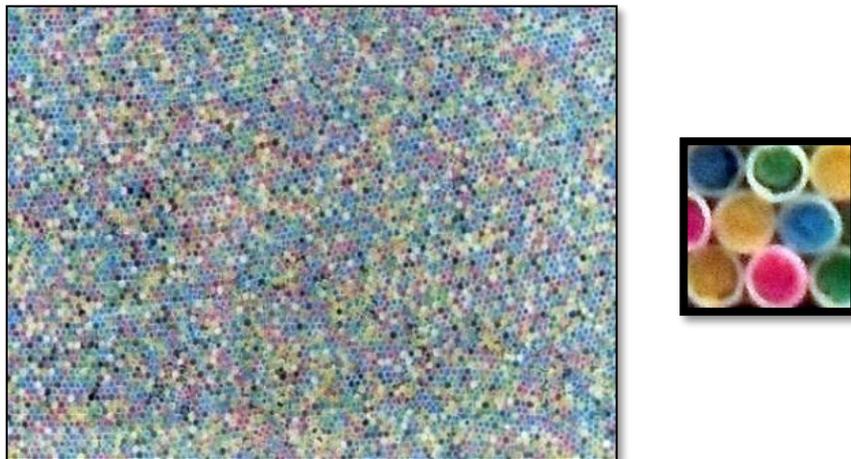


Fig. 1 – Disposition des rouleaux cylindriques en plastique [2]

2.2 Exploitation d'un modèle réduit

La figure 2 illustre le dispositif expérimental de poussée butée remplie avec dix-huit milles rouleaux cylindriques en plastique. Notons que le modèle est muni de plexiglas à haute résistance à indice de réfraction unitaire. Des milieux réellement granulaires pourront être étudiés [2, 13]. Les dimensions pour la longueur, largeur et profondeur sont

respectivement 800mm, 500mm et 100mm. Ainsi, un déplacement du mur de 30mm est relativement faible par rapport à la longueur du milieu étudié justifie un milieu semi-infini. Les lignes de glissement lorsqu'elles se propagent ne sont pas bloquées par autre paroi latérale. La profondeur de 100 mm est suffisante pour permettre le remplissage dans les meilleures conditions de stabilité afin d'éviter d'éventuels déversements des rouleaux de 70 mm de longueur. Les rouleaux occuperont un volume de $(550 \times 250 \times 70) \text{ mm}^3$ [13].

Le modèle réduit est muni d'une paroi mobile reliée à une manivelle par l'intermédiaire d'une tige sans fin. Deux autres tiges placées aux quarts de la paroi mobile servent à guider le mouvement du mur lorsque la manivelle est actionnée dans le sens horaire amorçant ainsi un déplacement translationnel horizontal vers l'extérieur du massif, simulant le phénomène de poussée.

Un tour de manivelle correspond à 6mm. Cinq (05) tours sont nécessaires pour provoquer un déplacement total de 30mm qui est largement suffisant pour explorer la rupture du sol dans le domaine des grandes déformations.

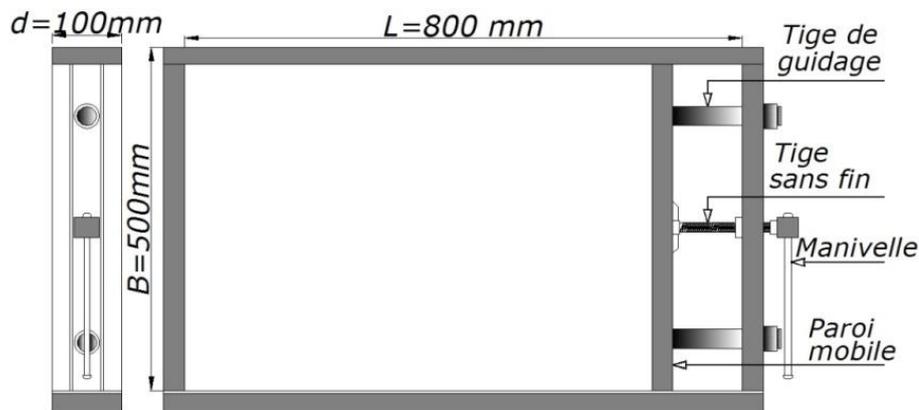


Fig. 2 – Dispositif expérimental de poussée – butée (Réf : 01-DPB-040404)[2]

3 Procédure d'essai

Le programme d'essais est structuré comme suit :

- Remplissage des rouleaux cylindriques en plastique dans le dispositif par couches successives de 10 à 20 mm et compactage pour avoir une densité uniforme. La profondeur et la longueur doivent être maintenues à 250mm et 550mm respectivement ;
- Déplacement du mur en mode continu : la paroi mobile effectue une translation dans le plan X-X sans interruption dans le temps pendant la durée de l'essai. La distance maximale parcourue notée (U) est de 30 mm ;

Afin d'étudier l'influence de la vitesse de déplacement de l'écran sur la rupture par bandes de cisaillement, on propose trois (3) variantes de vitesse expérimentale :

- Vitesse élevée : notée V_e , elle est de l'ordre de 0,5mm/s ;
- Vitesse moyenne : notée V_m , elle est de l'ordre de 0,25mm/s ;
- Vitesse faible : notée V_f , elle est de l'ordre de 0,125mm/s ;
- Les essais sont répétés trois fois en prenant des photos à des pas identiques aux essais précédents et en respectant les mêmes conditions aux limites ;
- Après chaque essai, les rouleaux doivent être réarrangés et compactés pour éliminer les zones de dilatance et avoir la même densité initiale ;

- Analyse des photos par logiciel de corrélation d'images Kisdef-7D pour les vitesses étudiées.

Remarque : Les trois vitesses sont expérimentales et sont liées aux limites du modèle réduit. Un tour correspond à un déplacement $U=6\text{mm}$ en 24s à vitesse moyenne, donc 1/8 de tour en 3s. A vitesse élevée on parcourt 1/8 de tour en 1,5s ou encore 1/4 de tour en 3s, ce qui reste néanmoins possible. La difficulté se situe à faible vitesse ou il faut tourner la manivelle très lentement pour parcourir 1/8 de tour en 6s et à ce niveau, l'on aurait atteint les limites du dispositif et de l'opérateur.

4 Résultats

Les résultats seront exprimés en déformation par cisaillement maximum. Le code de couleur utilisé traduit des intensités en cisaillement maximum. En gros, la couleur bleue traduit un gradient de déformation nul. La bande de cisaillement quant à elle est matérialisée par une couleur verte (parfois jaune ou cyan). Vu la complexité du champ de déformation qui varie au cours du processus de poussée ($U : 0 \rightarrow 30\text{mm}$), sa quantification reste néanmoins complexe à étudier. Néanmoins, en fin de comparaison, l'intensité du cisaillement maximum en fonction du déplacement horizontal de la paroi mobile au cours de l'essai sera illustrée pour les trois (03) variantes de vitesse.

4.1 Vitesse élevée $V_e : 0,5\text{mm/s}$

La figure ci-après illustre les résultats exprimés en déformation par cisaillement maximum sur une distance totale horizontale $U=30\text{mm}$ avec une vitesse constante élevée estimée à $0,5\text{mm/s}$.

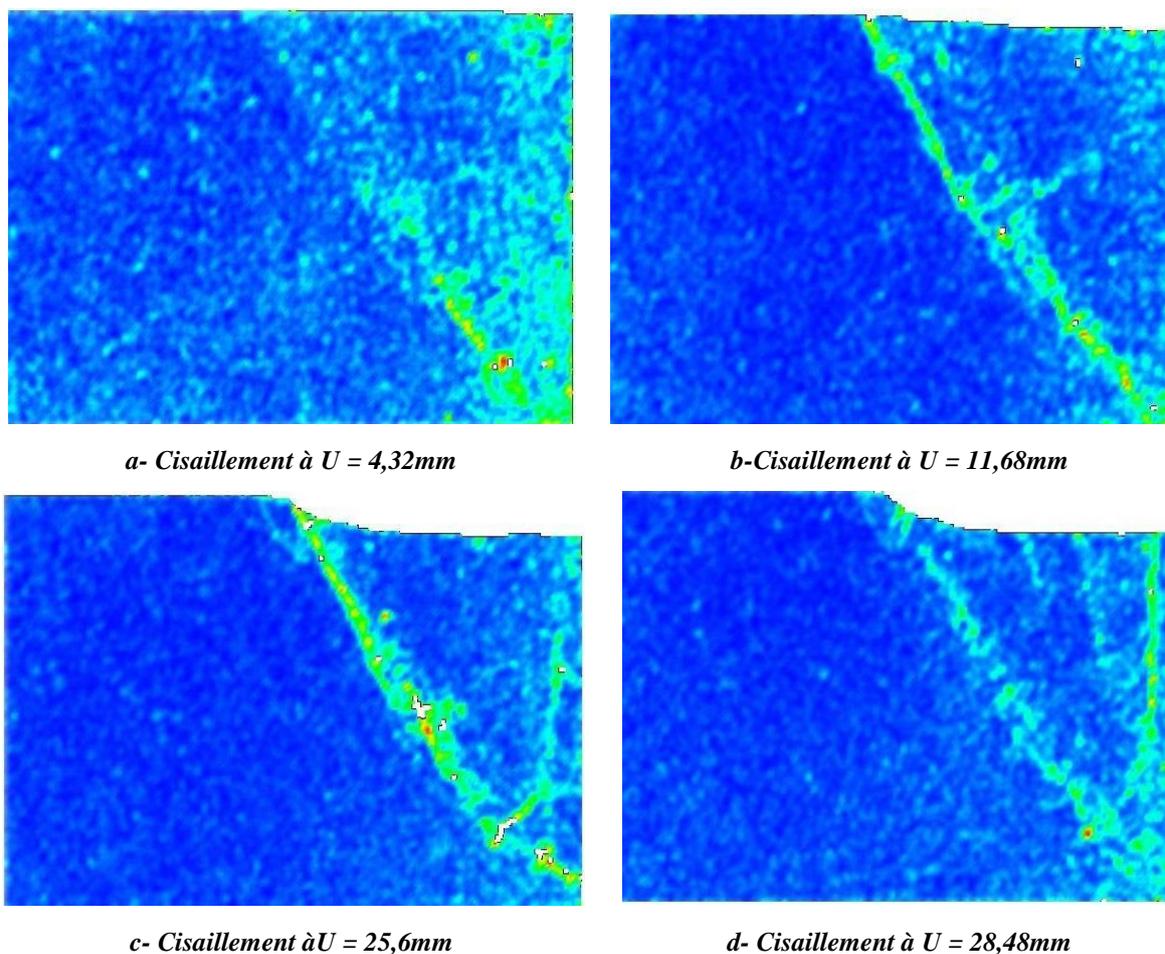


Fig. 3 – Evolution du cisaillement pour $V_e=0,5\text{mm/s}$

4.1.1 *Commentaire*

Pour les essais à vitesse élevée ($V_e=0,5\text{mm/s}$), et après avoir dépassé l'état d'équilibre limite inférieur, une perturbation du milieu donnera naissance à une bande de cisaillement (Fig.3 a) qui se développe au cours du processus de transformation ou elle sera clairement visible au fur et à mesure du déplacement U (Fig.3 b). On observe après une perturbation croissante du coin de Coulomb. Cette dernière est accompagnée de l'apparition d'une bifurcation, donnant naissance à une seconde bande de rupture (Fig.3 c) bien matérialisée en fin d'essai par une configuration en V (Fig.3. d).

4.2 *Vitesse moyenne $V_m : 0,25\text{mm/s}$*

La figure ci-après illustre les résultats exprimés en déformation par cisaillement maximum sur une distance totale horizontale $U=30\text{mm}$ avec une vitesse constante moyenne estimée à $0,25\text{mm/s}$.

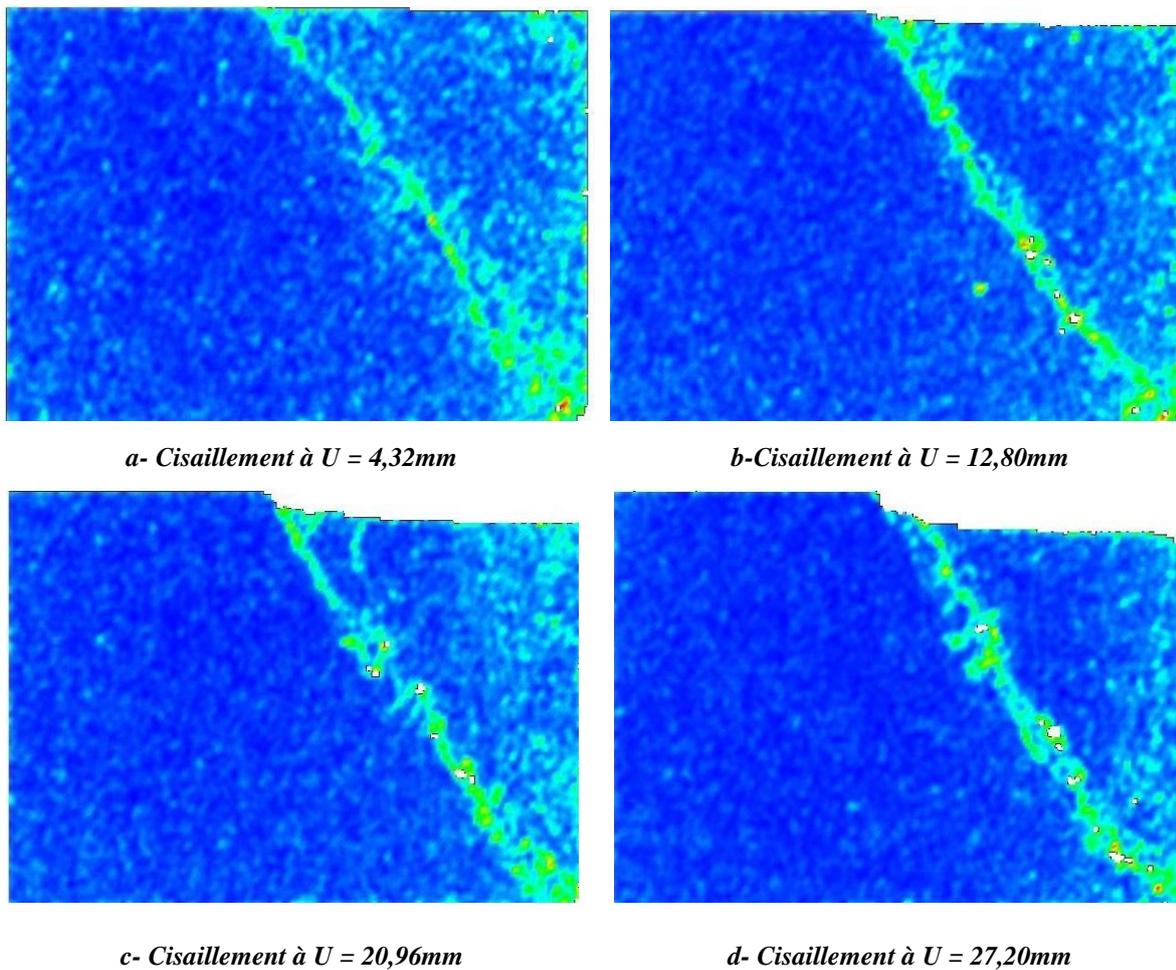


Fig. 4 – Evolution du cisaillement pour $V_m=0,25\text{mm/s}$

4.2.1 *Commentaire*

Pour cette campagne d'essais à vitesse moyenne ($V_m=0,25\text{mm/s}$), le début marque l'amorce de la paroi mobile en mouvement translationnel horizontal jusqu'à l'état d'équilibre limite inférieur (poussée). Une bande de cisaillement apparaît (Fig.4 a) puis s'installe un peu plus au cours de l'essai (Fig.4 b et c) ou elle est franche mais accompagnée de courtes bandes perpendiculaires localisées au milieu. On notera aussi la perturbation du coin de Coulomb qui reste néanmoins inférieur comparativement à l'essai réalisé à grande vitesse.

Une réflexion peut être envisagée entre la vitesse de la paroi, l'allure de la rupture et la perturbation du coin de Coulomb.

4.3 Vitesse faible $V_f : 0,125\text{mm/s}$

Fig. 5 illustre les résultats exprimés en déformation par cisaillement maximum sur une distance totale horizontale $U=30\text{mm}$ avec une vitesse constante faible estimée à $0,125\text{mm/s}$.

4.3.1 Commentaire

Pour cette dernière campagne d'essais à faible vitesse ($V_f=0,125\text{mm/s}$), le début de l'essai est toujours matérialisé par un état d'équilibre limite au-delà duquel, le milieu sollicité en poussée se décomprime matérialisant l'apparition d'une bande de cisaillement (Fig.5 a) qui se développe au cours du processus (Fig.5 b et c) jusqu'à la fin de l'essai (Fig.5 d) où l'on constate la localisation d'une seule bande de cisaillement franche et nette et sans perturbations significatives du coin de Coulomb.

Il est clair que les résultats des essais exprimés en cisaillement maximum montrent l'existence d'un lien entre la vitesse de déplacement de l'écran de soutènement et la propagation des bandes de cisaillement. En effet plus la vitesse augmente et plus la propagation de la bande de cisaillement devient complexe. À $V_f=0,125\text{mm/s}$, la bande de cisaillement est unique, franche et nette, mais lorsque la vitesse passe à $V_m=0,25\text{mm/s}$, la bande de cisaillement donne naissance à des branches perpendiculaires et commence à perturber le coin de Coulomb. À Vitesse élevée $V_e=0,5\text{mm/s}$, le milieu est très perturbé et la configuration de la rupture se matérialise par plusieurs bandes de cisaillement qui ont été validé par des essais de répétabilité. On conclut donc que la perturbation du milieu est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la paroi mobile.

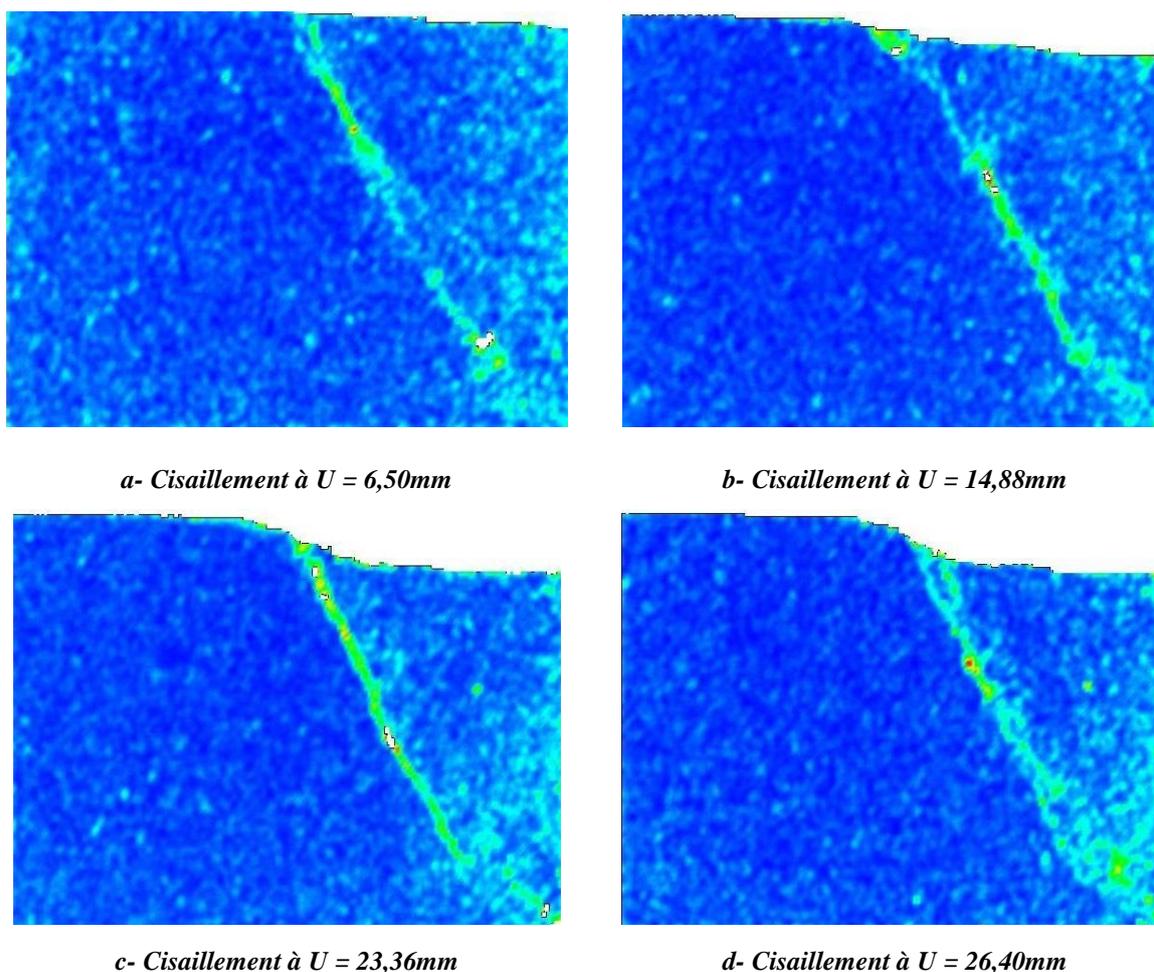


Fig. 5 – Evolution du cisaillement pour $V_f=0,125\text{mm/s}$

4.4 Evolution du cisaillement maximum en fonction du déplacement horizontal

Dans ce qui suit, nous allons présenter une comparaison des intensités de cisaillement maximum pour les essais réalisés avec les trois variantes de vitesse proposées.

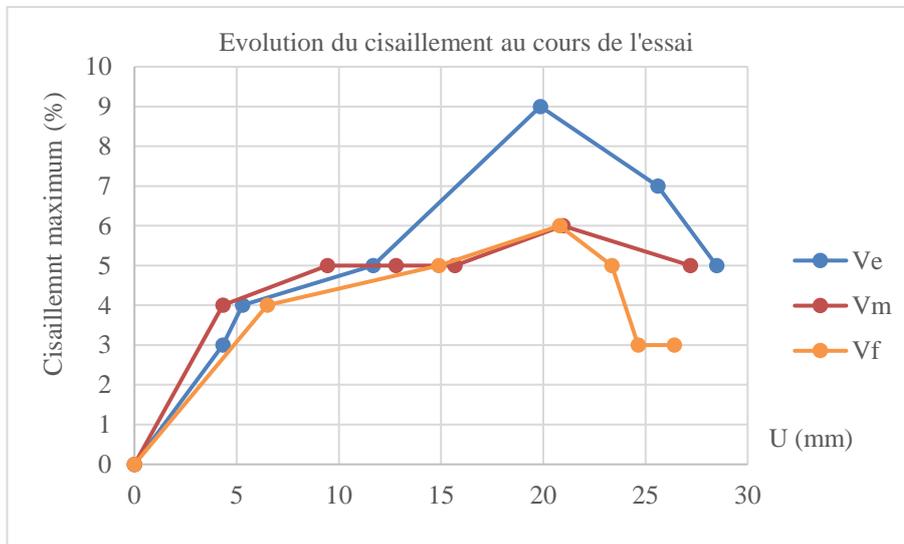


Fig. 6 – Evolution du cisaillement en fonction de U pour Ve, Vm et Vf

4.4.1 Commentaire

Il convient de préciser que l'objet de notre étude est purement cinématique, c'est-à-dire que l'on s'intéresse aux déformations essentiellement par bande de cisaillement. Dans cette perspective on se focalise sur l'évolution de la rupture, son allure, son mécanisme de rupture affectant plus ou moins le coin de Coulomb.

La matérialisation des intensités des bandes de cisaillement demeure très complexe à étudier et assujéti à un certain nombre de paramètres tel que l'angle de frottement interne, la forme des grains, leur réarrangement, intensité de contact, densité initiale...etc.

L'expérience a montré qu'une bande de cisaillement possède une épaisseur dont l'intensité varie le long de cette bande rendant sa quantification encore plus difficile.

A partir des résultats d'essais, il a été possible grâce au code de couleur de quantifier les intensités des bandes de cisaillement en se basant sur la couleur verte, mais parfois cyan ou tendant vers le jaune. Ce graphe montre que pour les trois variantes de vitesse, l'intensité du cisaillement maximum est nul au début de l'essai puis, à l'amorce de la paroi mobile et après avoir dépassé l'état d'équilibre limite inférieur (de poussée), le cisaillement évolue jusqu'à U=20mm pour l'ensemble des essais ou se produit un glissement important du coin de Coulomb. Après, l'intensité du cisaillement s'atténue jusqu'à la fin de l'essai. Ce schéma ressemble au pic de la contrainte tangentielle pour un essai de cisaillement sur un sable dense, et dans notre cas le sol analogique simule un sable dense.

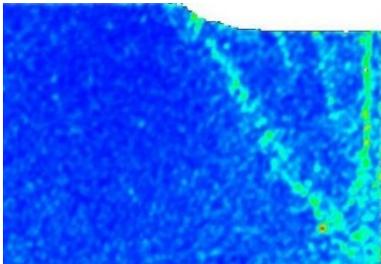
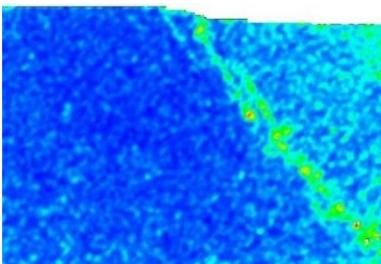
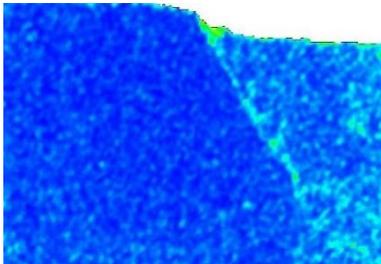
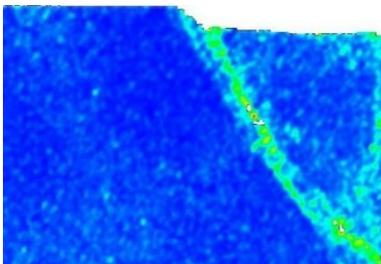
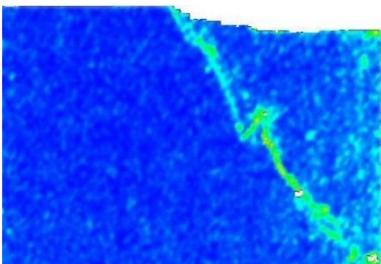
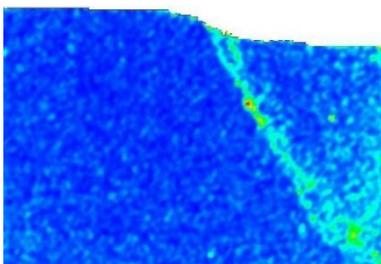
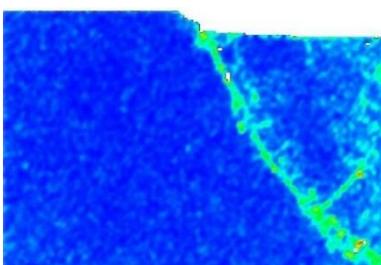
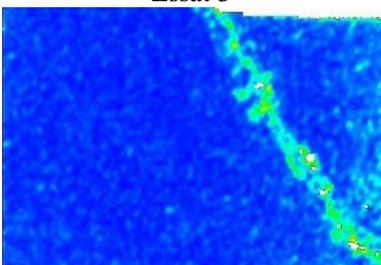
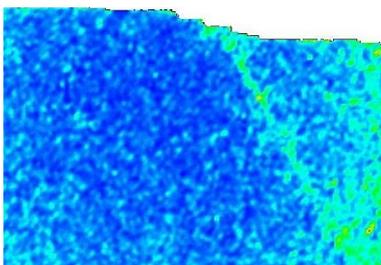
A priori, pour le matériau analogique étudié ayant un angle de frottement interne et une densité assez faibles, et compte tenu de la complexité du champ de déformation et des différents paramètres qui y sont liés, il n'a pas été possible de trouver un lien entre la vitesse de déplacement de la paroi mobile et l'intensité du cisaillement maximum.

5 Validation

Des essais de répétabilité ont permis la validation du programme en fixant bien entendu les mêmes conditions aux limites. Ils sont illustrés au tableau 1.

Il convient de préciser que ce qui est présenté dans ce papier ne constitue qu'une infime partie des résultats trouvés, car un processus d'essai implique un traitement lourd de plusieurs dizaines de couples traités au cours des essais (environ 700 traitements).

Tableau 1 –Validation des essais

Vitesse élevée $V_e=0,5\text{mm/s}$	Vitesse moyenne $V_m=0,25\text{mm/s}$	Vitesse faible $V_f=0,125\text{mm/s}$
	<i>Essai 1</i> 	
	<i>Essai 2</i> 	
	<i>Essai 3</i> 	

6 Conclusion

A l'issue de ce programme, nous arrivons aux conclusions suivantes :

L'exploitation d'un modèle réduit et d'un matériau bidimensionnel de Schneebeli soumis à des sollicitations en poussée a permis la mise en évidence de la rupture par bandes de cisaillement ;

La mise en œuvre des techniques de quantification des champs cinématiques du milieu étudié a été rendue possible par la technique de corrélation d'images, permettant un traitement lourd d'environ sept cent (700) photos de haute résolution dans un délai très raisonnable ;

Nous insistons sur l'aspect cinématique de notre étude. En effet, à aucun moment des forces ou des contraintes ne sont mesurées. D'ailleurs, l'état d'équilibre limite inférieur de la poussée est atteint lors des premiers incréments de déplacement du mur ;

Lors de la campagne d'essais relative à l'étude de l'influence de la vitesse de déplacement de la paroi mobile, les résultats ont montré qu'à vitesse élevée, la perturbation s'installe de plus en plus dans le milieu, en arrivant à une bande finale en forme de V. En revanche le milieu est moins perturbé à vitesse moyenne. A faible vitesse, le milieu est très peu perturbé avec l'apparition nette d'une seule bande de cisaillement ;

Un lien a pu être établi entre l'incidence de la vitesse de déplacement de la paroi mobile sur l'évolution de la rupture par bandes de cisaillement. Il en résulte que la perturbation du milieu est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la paroi mobile ;

La matérialisation des intensités des bandes de cisaillement demeure très complexe à étudier et assujetti à un certain nombre de paramètres tel que l'angle de frottement interne, la forme des grains, leur réarrangement, intensité de contact, densité initiale, épaisseur de la bande, auquel cas il serait intéressant d'envisager de futures perspectives au présent travail ;

Des essais de répétabilité ont permis de valider les résultats obtenus en fixant bien entendu les mêmes conditions aux limites.

REFERENCES

- [1]- K. Terzaghi, Large retaining wall tests: I - Pressure of dry sand. *Engineering News Record*, 85 (1) (1934) 136-140.
- [2]- A. Sekkel, M. Meghachou, The Effect of Displacement Mode of Rigid Retaining Walls on Shearing Bands by Active Earth Pressure. *Eng. Tech. Appl. Sci. Res.* 3(5) (2013) 526-531.
- [3]- M. Matsuo, S. Kenmochi, H. Yagi, Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests. *Soils Found.* 18(3) (1978) 27–41. doi:10.3208/sandf1972.18.3_27
- [4]- M.A. Sherif, Y.S. Fang, R.I. Sherif, Ka and K0 behind rotating and non-yielding walls. *J. Geotech. Eng-ASCE.* 110(1) (1984) 41-56. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:1(41)
- [5]- Y.S. Fang, T.J. Chen, B.F. Wu, Passive earth pressures with various wall movements. *J. Geotech. Eng-ASCE.* 120(8) (1994) 1307-1323. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:8(1307)
- [6]- J.B.A. Lucia, Passive Earth Pressure and Failure in Sand. Research Report, University of Cambridge, 1966.
- [7]- J.R.F. Arthur, Strains and Lateral Force in Sand, PhD Thesis, University of Cambridge, 1962.
- [8]- R.G. James, Stress and strain Fields in Sand, PhD Thesis, University of Cambridge, 1965.
- [9]- P. L. Bransby, Stress in Sand Caused by Rotation of a Model Wall, PhD Thesis, University of Cambridge, 1968.
- [10]- A. Adeosun, Lateral Forces and Failure Patterns in the Cutting of Sands, Research Project, University of Cambridge, 1968.
- [11]- J.A. Lord, Stress and Strains in an Earth Pressure Problem, PhD Thesis, University of Cambridge, 1969.
- [12]- G.W.E. Milligan, The Behaviour of Rigid and Flexible Retaining Walls in Sand, PhD Thesis, University of Cambridge, 1974.
- [13]- A. Sekkel, Comportement des sols derrière les ouvrages de soutènement : Modélisation physique et analyse cinématique, Thèse de doctorat Ès Sciences, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2014.
- [14]- P. Vacher, S. Dumoulin, F. Morestin, S. Mguil-Touchal, Bidimensional strain measurement using digital images. *J. Mech. Eng. Sci.* (1999) 811-817. doi:10.1243/0954406991522428
- [15]- M. Oda, J. Konishi, S. Nemat-Nasser, Experimental Micromechanical Evaluation of Strength of Granular Materials: Effects of Particle Rolling. *Mech. Mater.* 1(4) (1982) 269-283. doi:10.1016/0167-6636(82)90027-8
- [16]- J. Lanier, P.C. Bonnet, Experimental study of displacements and rotations of grains in 2D-granular media. Meeting TC13, committee on mechanics of granular materials (ISSMFE), Birmingham, 1993.
- [17]- G. Schneebeli, Une analogie mécanique pour les terres sans cohésion. *CR Acad. Sci.* 243 (1956) 2647-2673.
- [18]- C. Coulet, Etude du profil optimal des murs-voiles de soutènement, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1977.
- [19]- R. Albert, A. Houy, J. Raud, G. Verdier, Etude à l'aide de modèles réduits de Batardeaux Massifs. In: Proceedings of the 5ème Congrès Européen, Madrid, 1972, pp. 231-239.
- [20]- J. Verdeyen, V. Roisin, Sollicitation des écrans souples de soutènement. In: Proceedings of the Congrès Int, Paris, 1961, pp. 422-426.
- [21]- M. Oda, J. Konishi, S. Nemat-Nasser, Experimental micromechanical evaluation of the strength of granular materials: effects of particle rolling. *Stud. Appl. Mech.* 7 (1983) 21-30. doi:10.1016/B978-0-444-42192-0.50009-8
- [22]- R. Gourves, M. Mezghani, Micromécanique des milieux granulaires, approche expérimentale utilisant le modèle de Schneebeli. *Revue Française de Géotechnique.* 42 (1988) 23-34. doi:10.1051/geotech/1988042023
- [23]- H. Joer, J. Lanier, J. Desrues, E. Flavigny, A new shear apparatus to study the behavior of granular materials. *Geotech. Test. J.* 15(2) (1992) 129-137. doi:10.1520/GTJ10235J
- [24]- G. Tratapel, Contribution à l'étude du comportement mécanique d'un milieu analogique bidimensionnel, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1977.
- [25]- A. Misra, H. Jiang, Measured kinematic field in the biaxial shear of granular materials. *Comput. Geotech.* 20(3-4) (1997) 267-285. doi:10.1016/S0266-352X(97)00006-2
- [26]- R. Kastner, Excavations profondes en site urbain, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1982.