

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE EN VRAIE GRANDEUR DES REMBLAIS RENFORCÉS PAR PIEUX ET GÉOSYNTHÉTIQUES

TRUE SCALE EXPERIMENTAL STUDY OF REINFORCED EMBANKMENT BY PILES AND GEOSYNTHETICS

Bastien LE HELLO¹, Pascal VILLARD¹, Hung Leong PHOON², Soon Hoe CHEW², Alain NANCEY³, Philippe DELMAS³

¹LIRIGM – Grenoble – France

²NUS – Singapour

³BIDIM Geosynthetics SAS – Bezons – France

RÉSUMÉ - L'utilisation d'un renfort géosynthétique pour limiter les tassements de surface dans le cas des remblais sur pieux construits en zone compressible est un procédé original. Il met en œuvre différents mécanismes complexes notamment le comportement en membrane du géotextile et les mécanismes de voûte qui s'initient dans le sol de remblai et entre les pieux dans le sol compressible. Pour mieux appréhender ce type de phénomènes, des expérimentations en vraie grandeur sur des ouvrages instrumentés ont été menées pour pouvoir, à terme, proposer une méthode de dimensionnement. Des résultats expérimentaux mettant en évidence les mécanismes de report de charge dans le remblai et d'effet membrane de la nappe géosynthétique sont présentés.

Mots clés : renforcement, sol compressible, inclusion rigide, géosynthétique, remblai.

ABSTRACT - Using a geosynthetic reinforcement to limit surface settlement in the case of embankments on piles built on compressible area is an original process. It implements various complex mechanisms in particular the membrane effect of the geotextile and the arching effect which is initiated in the embankment soil and between the piles in the sub grade soil. For better apprehending this kind of phenomena, full-scale experiments on instrumented structures were carried out to be able, in the long term, to propose a design method. Experimental results highlighting the mechanisms of report of load in the embankment and membrane effect of the geosynthetic sheet are presented.

Key words: reinforcement, compressible soil, piles, geosynthetic, embankment.

1. Introduction

L'amélioration des sols à portance médiocre (dépôt récents, sol à faible caractéristique mécanique) fait appel à des procédés récents et innovants. Le renforcement par inclusions rigides (pieux verticaux) est un procédé traditionnel souvent utilisé pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Une nouvelle approche de ce concept, mise en application dans le sud est asiatique, est d'ajouter une nappe géosynthétique directement à la base du remblai pour faciliter le transfert de charge vers les pieux et limiter les tassements de surface à des valeurs admissibles compatibles avec les infrastructures concernées. Les charges d'exploitation et celles dues au poids du remblai sont en partie transférées aux pieux (fig.1), directement par des mécanismes d'effet voûte et de report de charge dans le remblai, ou indirectement par effet membrane par l'intermédiaire du géosynthétique. Les charges transmises au sol sous jacent peuvent être redirigées vers les pieux par frottement négatif. Les efforts transmis aux pieux sont selon les cas repris par frottement ou transférés à un substratum rigide.

Ces mécanismes agissant en interaction sont complexes et fonctions de nombreux paramètres (géométrie du problème, caractéristiques physiques et mécaniques des constituants, interfaces et interactions). C'est pourquoi, dans le but d'améliorer la connaissance du comportement de ces ouvrages, une expérimentation en vraie grandeur a été menée en Malaisie de juillet à septembre 2002, en partenariat entre la National University of Singapore (NUS), le Lirigm de Grenoble et la société Bidim geosynthetics. L'objectif de ces expérimentations est de tester une solution de renforcement usitée dans le sud est asiatique, d'étudier les mécanismes de transfert de charge dans le remblai et d'appréhender le comportement en membrane de la nappe géosynthétique. Les matériaux et les géométries testées sont conformes aux techniques utilisées dans les pays concernés.

On appelle effet membrane la capacité d'une nappe géosynthétique à se déformer pour supporter, par tension, les forces verticales qui lui sont appliquées. Ceci nécessite une déformation conséquente de la nappe géosynthétique et un fort tassement du sol compressible sous jacent.

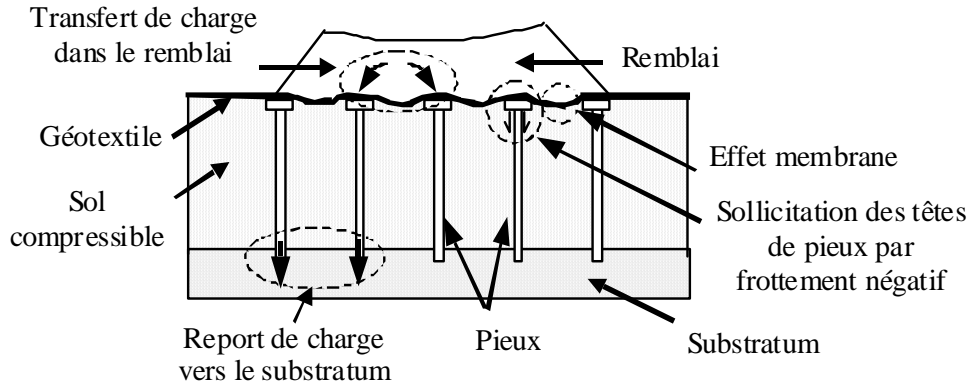


Figure 1. Remblai renforcé par pieux et géosynthétique.

Les mécanismes de transfert de charge dans le remblai permettent un report direct d'une partie des charges d'exploitation et des charges dues au poids du remblai vers les têtes de pieux. Ils s'initient pendant la construction du remblai ou après tassement du sol compressible sous jacent. Si le report de charge est important (création d'une voûte) les tassements de surface peuvent être faibles (en considérant des pieux rigides fixes).

Le report de charge est principalement fonction de la géométrie du réseau de pieux (forme, largeur, distance entre pieux, densité et répartition des pieux) et des caractéristiques physiques et mécaniques du sol de remblai, et est dans certains cas influencé par les caractéristiques mécaniques du renfort géosynthétique (principalement le module de rigidité en traction) ou du sol support compressible (Low et al. 1994).

De nombreuses méthodes analytiques ont été proposées pour évaluer la capacité de report de charge d'un sol de remblai (Carlson 1987, Hewlett and Randolph 1988 ; British Standards BS8006, 1995 ; Guido et al. 1987 ; Russel and Pierpoint 1997 ; Sintef 2002 ; EBGEO 2004). Ces méthodes sont basées sur des hypothèses diverses et permettent, entre autre, le calcul de l'efficacité des pieux E_p définie comme étant le rapport entre la charge supportée par les pieux et la charge totale résultant des surcharges d'exploitation et du poids du remblai. Comme le montre la comparaison des différentes méthodes de la figure 2, les résultats obtenus sont très disparates, d'où les difficultés actuelles quant au dimensionnement de ce type de structure. Les résultats de la figure 2 ont été établis avec : $a = 0,2$ m (largeur de la tête de pieux), $s = 1,2$ m (entre axe entre les pieux), $\gamma = 20$ kN/m³ (poids volumique du sol de remblai), $\phi = 35^\circ$ (angle de frottement du sol de remblai), $K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$, $K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ (Hewlett and Randolph 1988 ; Kempfert and al. 1997) et H la hauteur du remblai comprise entre 0 et 5 m.

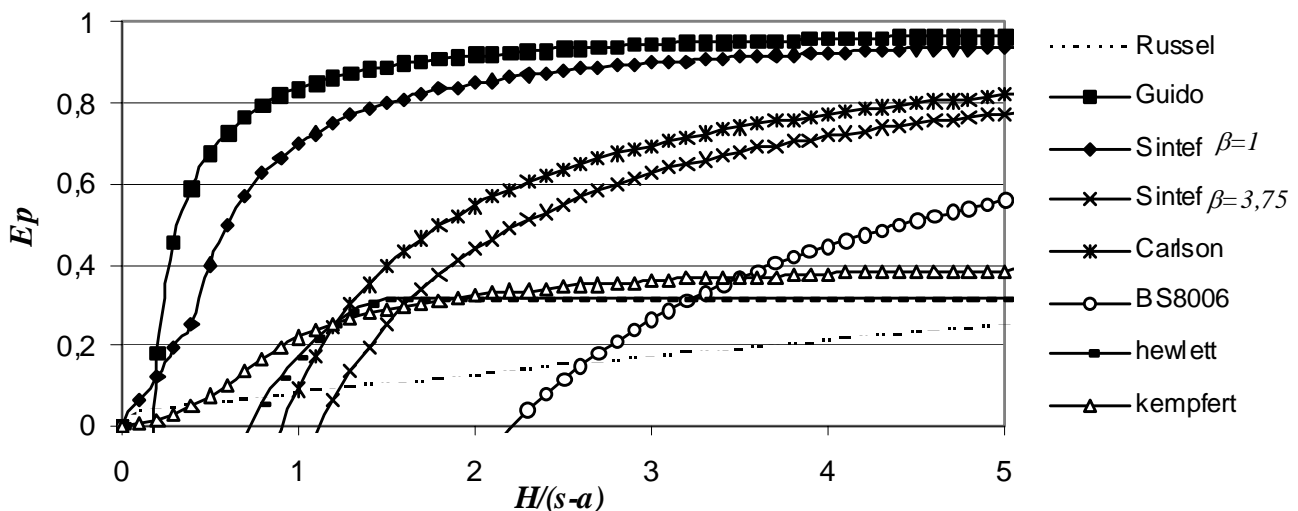


Figure 2. Comparaison des différentes méthodes analytiques de report de charge.

2. Principe et objectif des expérimentations en vraie grandeur

Neuf expérimentations en vraie grandeur ont été réalisées dans le but de simuler le comportement des remblais renforcés par pieux et géosynthétiques. Les géométries testées et les types de renfort employés sont adaptées aux sols et aux matériaux de remblai généralement utilisés dans le sud est de l'Asie.

L'objectif principal des ces expérimentations est d'étudier l'effet membrane et les mécanismes de report de charge dans le remblai dans un cas particulier (sans influence du sol sous jacent). Pour une distribution de pieux donnée (distribution en quinconce), plusieurs types de sol, plusieurs types de géosynthétique et plusieurs hauteurs de remblai (de 0,5 m à 1 m) sont testés.

Pour simuler l'action d'un sol fortement compressible, un matériau pulvérulent de remplissage a été mis en oeuvre entre les pieux sous le géosynthétique. Ce matériau a pour but de maintenir le remblai en place pendant la construction. Ensuite, il est progressivement excavé dans sa totalité pour provoquer des déplacements verticaux du géosynthétique et du sol de remblai.

3. Dispositif expérimental et instrumentation

3.1. Description de la cuve d'essais

Les expérimentations ont été réalisées dans une cuve (fig.3a) de 3 m de large, 4,75 m de long et 2 m de profondeur. Huit pieux en acier de 1 m de hauteur (fig.3b) sont fixés au fond de la cuve. Ils sont disposés en quinconce, avec un espacement inter pieu de 1,2 m. La distance entre les pieux et les murs (0,9 m d'un côté et 0,295 m de l'autre) a été optimisée par un modèle numérique afin de minimiser au maximum l'influence des conditions aux limites sur la maille centrale. Les têtes de pieux sont circulaires et ont un diamètre de 0,205 m.

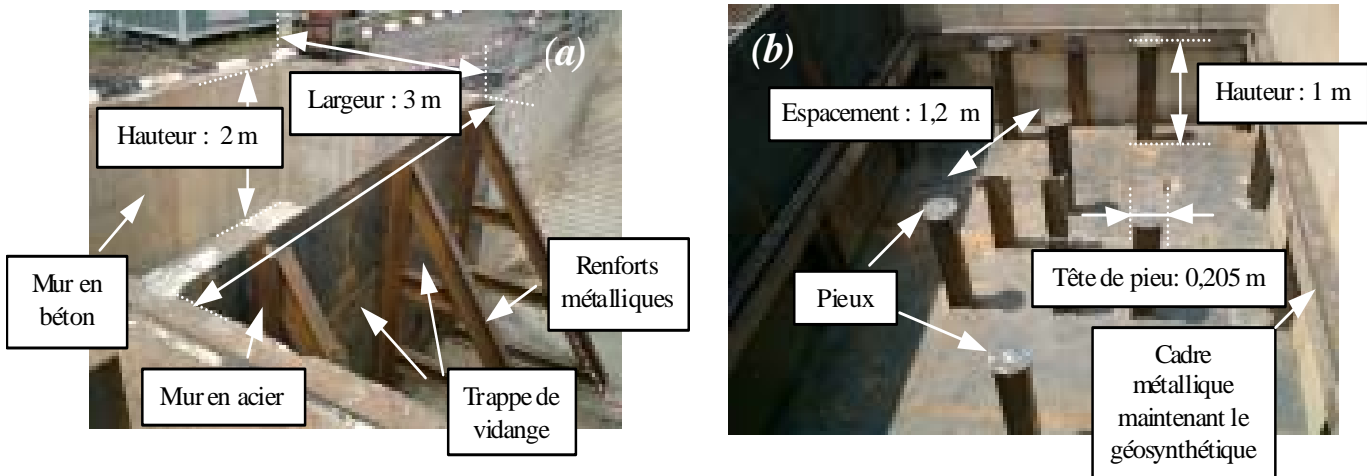


Figure 3. Géométrie de la cuve d'essai.

Trois des quatre murs de la cuve d'essais sont en béton, le quatrième est constitué d'une plaque en acier renforcée par des étais métalliques triangulaires (fig.3a). Deux trappes y ont été aménagées pour permettre le retrait du sol sous jacent, faciliter l'accès au géosynthétique et permettre les mesures des déplacements verticaux après vidange complète.

3.2 Les renforts géosynthétiques

Plusieurs types de renfort géosynthétique ont été utilisés à des fins comparatives : un non tissé renforcé dans une direction par des fibres en polyester (Rock PEC 75 dont le module de rigidité en traction dans la direction du renforcement est : $J = 750 \text{ kN/m}$), un non tissé (TS 60) et des micro grilles (MG100 dont le module de rigidité en traction dans les directions transversale et longitudinale est : $J = 1000 \text{ kN/m}$). Dans le cas du non tissé renforcé, deux nappes géosynthétiques orientées perpendiculairement ont été mises en place. Les renforts géosynthétiques ont été fixés à un cadre métallique positionné après mise en place du matériau de remplissage autour des pieux (fig.4).

3.3. Le sol de remblai

Les remblais sont compactés par plaque vibrante par couche de 0,5 m. Deux sols sont utilisés : un sable et un sable limoneux. Le sable a un angle de frottement de 37 degrés, une cohésion de 13 kPa et un poids volumique apparent de 19,4 kN/m³.

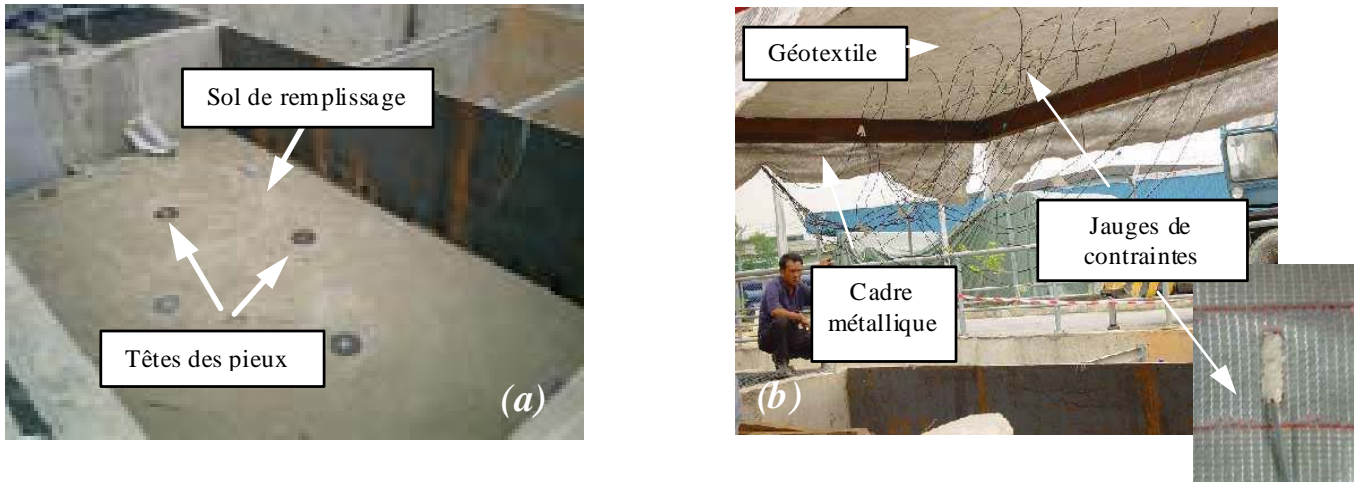


Figure 4. Mise en place du cadre métallique et de la nappe géosynthétique.

3.4. Instrumentation mise en place

Le remblai renforcé a été instrumenté pour suivre en continu les déplacements et les déformations du géotextile, les tassements de surface du sol de remblai et les charges verticales supportées par les pieux. Les capteurs utilisés sont :

- des capteurs LVDT positionnés au centre de la cuve (fig.5a). Ils permettent de mesurer le déplacement de la nappe géosynthétique en des points prédéterminés,
- des jauges de contrainte, positionnées dans la direction des renforts (fig.4b) pour mesurer les déformations longitudinale et transversale,
- des capteurs de force positionnés entre la nappe géosynthétique et les têtes de pieux (fig. 5b) pour évaluer les charges verticales transmises aux pieux,
- des capteurs de pression positionnés dans le sol de remblai. Ils permettent de suivre l'évolution de la contrainte verticale dans le sol.

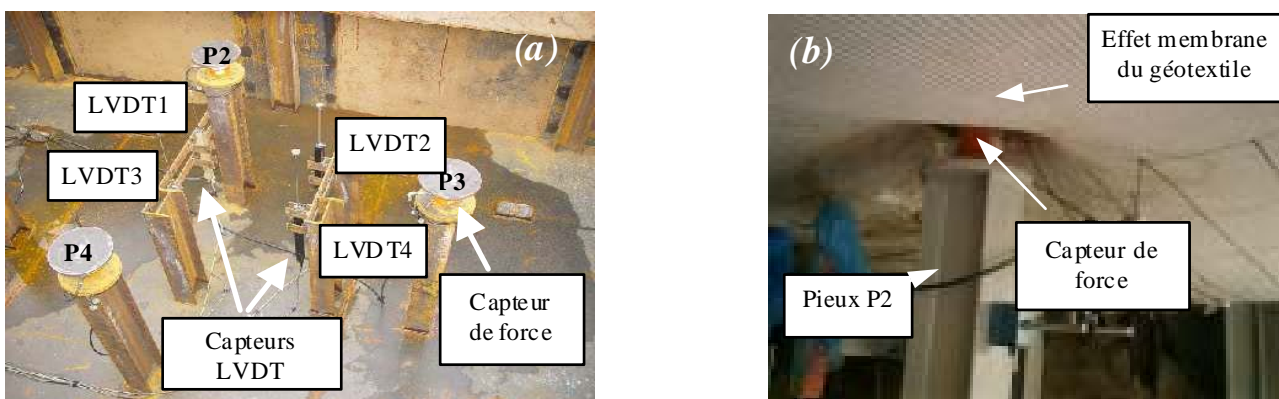


Figure 5. Instrumentation mise en place.

4. Résultats des expérimentations réalisées

Plusieurs séries d'expérimentations ont été réalisées (Chew and al., 2004 ; Villard and al., 2004) pour différents types de sol, plusieurs types de géosynthétique et plusieurs hauteurs de remblai. Dans certains cas, après excavation du sol de remplissage, certaines expérimentations ont été poursuivies par

l'ajout d'un remblai additionnel et par des essais de traficabilité. A titre de comparaison une expérimentation a été menée sans renfort géosynthétique. Cette expérimentation s'est traduite par l'effondrement du remblai dès le début de l'excavation, montrant l'intérêt, pour cette géométrie de renforcement, d'un renfort géosynthétique.

Les résultats présentés ici font référence à deux expérimentations (respectivement A et B) mettant en jeu des remblais sableux de 1 m de hauteur renforcés par deux nappes géosynthétiques entrecroisées (cas A, Rock PEC 75, $J = 750$ kN/m dans les directions longitudinale et transversale) et par deux micro grilles superposées (cas B, MG100, raideur équivalente $J = 2000$ kN/m dans les directions longitudinale et transversale). Chaque expérimentation a été poursuivie par l'addition d'une ou plusieurs couches de remblai additionnelles. On présentera successivement les principaux résultats mettant en évidence l'effet membrane dans le géosynthétique et les mécanismes de report de charge dans le remblai.

4.1. Résultats expérimentaux relatifs à l'effet membrane

Suite à l'extraction du sol de remplissage autour des pieux, la nappe géosynthétique s'est progressivement incurvée pour reprendre par traction les efforts verticaux qui lui sont appliqués. On a observé un effondrement progressif du corps de remblai sur la nappe et une forte déformation du géosynthétique au voisinage des pieux (fig.5b). Les déplacements verticaux de la nappe géosynthétique mesurés en différents profils sont présentés pour les deux expérimentations retenues sur les figures 6.

Comparativement (fig.6a et fig.6c), les déplacements verticaux obtenus dans le cas B ($J = 2000$ kN/m) sont inférieurs à ceux obtenus dans le cas A ($J = 750$ kN/m). On remarque également (cas A, fig.6), que l'action du poids du premier remblai ($H = 1$ m) sur le geotextile non tissé renforcé, est beaucoup plus importante que celle due au poids du remblai de surcharge ($\Delta H = 0,5$ m) (le déplacement maximal étant de 0,195 m pour $H = 1$ m et de 0,215 m pour $H' = H + \Delta H = 1,5$ m). Ceci résulte du comportement en membrane de la nappe géosynthétique. En effet, sous l'action du poids du premier remblai de 1 m, la nappe se met en position de membrane et subit une grande déformation. La nappe étant positionnée idéalement avant l'ajout du second remblai, elle s'oppose immédiatement aux efforts dus à la surcharge appliquée sans trop se déformer. Un comportement similaire a été obtenu pendant les essais de traficabilité ou aucun accroissement de déplacement significatif de la nappe n'a pu être observé.

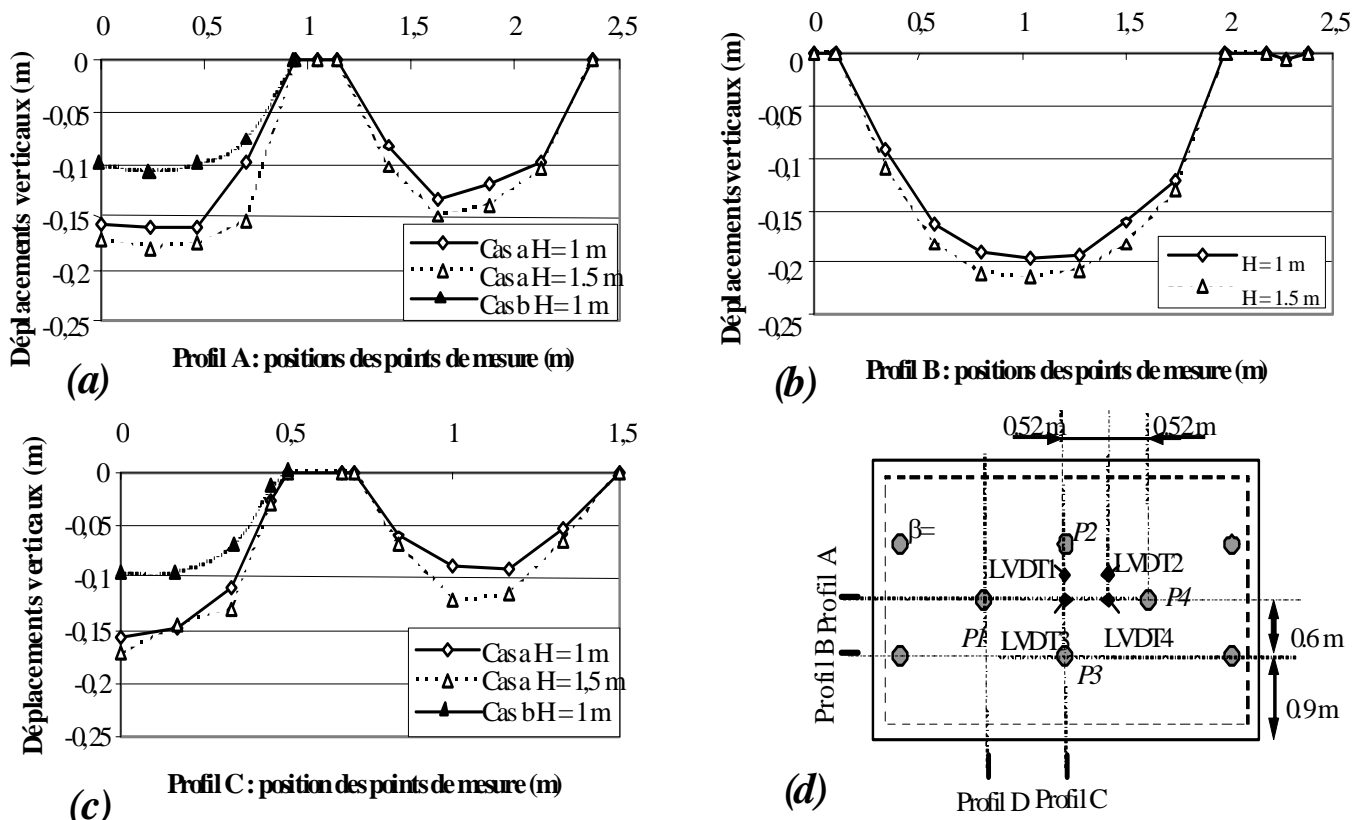


Figure 6. Déplacements verticaux de la nappe géosynthétique.

4.2 Résultats expérimentaux mettant en évidence le comportement du remblai

Après excavation du sol sous jacent et après stabilisation des mesures, on a pu observer des tassements de surface importants ainsi que des craquelures autour des pieux (Fig.7b) ; les craquelures observées en surface sont d'autant plus importantes que les hauteurs de remblais sont faibles. Les déplacements verticaux de surface du remblai ont été mesurés sur le profil D et comparés aux déplacements de la nappe (Fig.7c). Les différences entre les déplacements verticaux de surface et les déplacements du géosynthétique s'expliquent en partie par des mécanismes de décompaction du sol de remblai (augmentation du volume de sol dû à la désorganisation et à la fragmentation de la masse de sol du remblai). Cet effondrement partiel du remblai sur la nappe est associé à un mécanisme de report de charge qui s'initie au sein du remblai et qui permet de rediriger une partie des charges dues au poids du remblai vers ou aux voisinages des pieux.

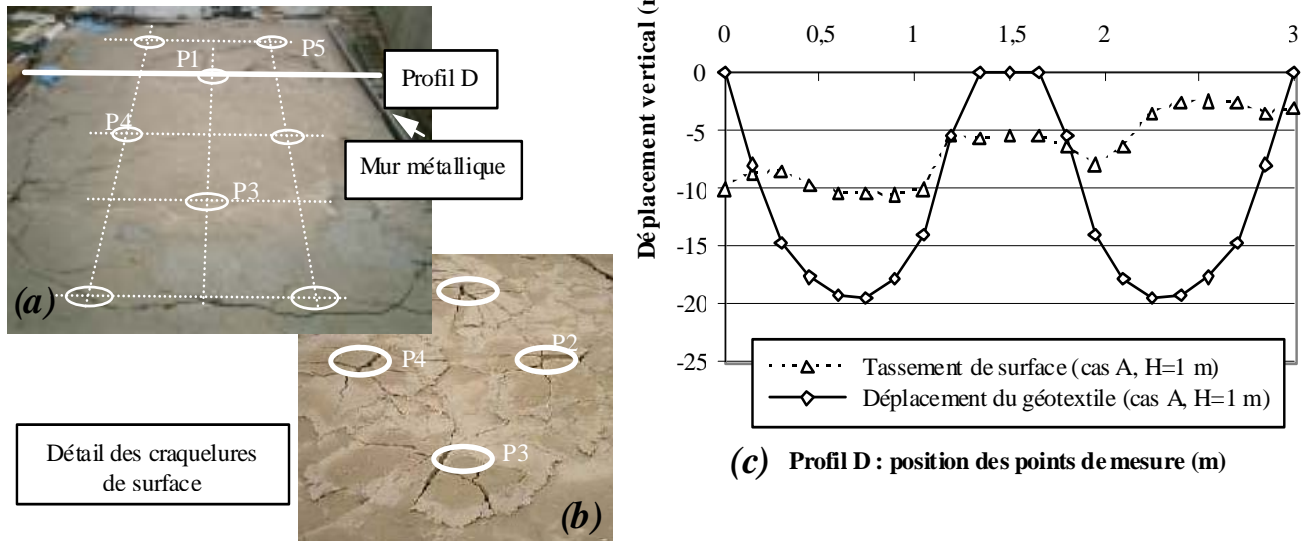


Figure 7. Tassement de surface (cas A, H =1 m).

Ces mécanismes de transfert de charge dans le remblai sont mis en évidence sur la figure 8 où l'on présente, pour plusieurs hauteurs de remblai ($H'=H+\Delta H$), les profils de contraintes verticales, au droit des pieux et dans l'axe central d'une maille élémentaire du réseau de pieux. A titre de comparaison, les contraintes correspondant au poids du sol ($\gamma H'$) sont représentées par des droites en pointillés.

On constate sur les figures 8b et 8d une augmentation conséquente de la contrainte verticale au-dessus des pieux lors de l'extraction du sol de remplissage ($H' = 1m$). Cette augmentation de contrainte est d'autant plus importante que la rigidité du renforcement est faible. Les mécanismes de report de charge dans le remblai sont en conséquence liés à la déformabilité du corps de remblai. Si l'on suppose que la force agissant sur les pieux par report de charge correspond à la contrainte dans le sol au-dessus du pieu multipliée par la section du pieu, il est possible d'estimer l'efficacité du report de charge (charge transmise par transfert de charge/poids du remblai), soit 28 % et 16 % respectivement pour les cas A et B. En fait, compte tenu de la présence du renfort géosynthétique au voisinage des pieux, la zone d'influence liée au report de charge est vraisemblablement plus importante, d'où une sous-estimation probable des mécanismes de transfert de charge. Dans tous les cas, l'efficacité globale du système de renforcement est de 100 % puisque la totalité des charges dues au poids du remblai est transmise aux pieux (soit par effet membrane, soit par report de charge).

Lors de la mise en place des remblais additionnels ($H' > 1m$) l'augmentation de contrainte au-dessus des pieux est peu différente de la contrainte additionnelle appliquée ; ceci étant d'autant plus vrai pour le cas A mettant en œuvre le géosynthétique. Les mécanismes de report de charge sont dans ce cas relativement faibles et en tout cas très différents des mécanismes que l'on a pu obtenir lors de l'extraction du sol de remplissage.

Compte tenu des mécanismes de report de charge, les contraintes verticales dans le sol de remblai au centre de la maille élémentaire du réseau de pieux (fig.8a et fig.8c) sont plus faibles que les contraintes dues au poids de la colonne de sol ($\gamma H'$). Au-dessus des renforts géosynthétiques, les contraintes mesurées correspondent au poids d'une colonne de sol d'environ 0,2 à 0,3 m.

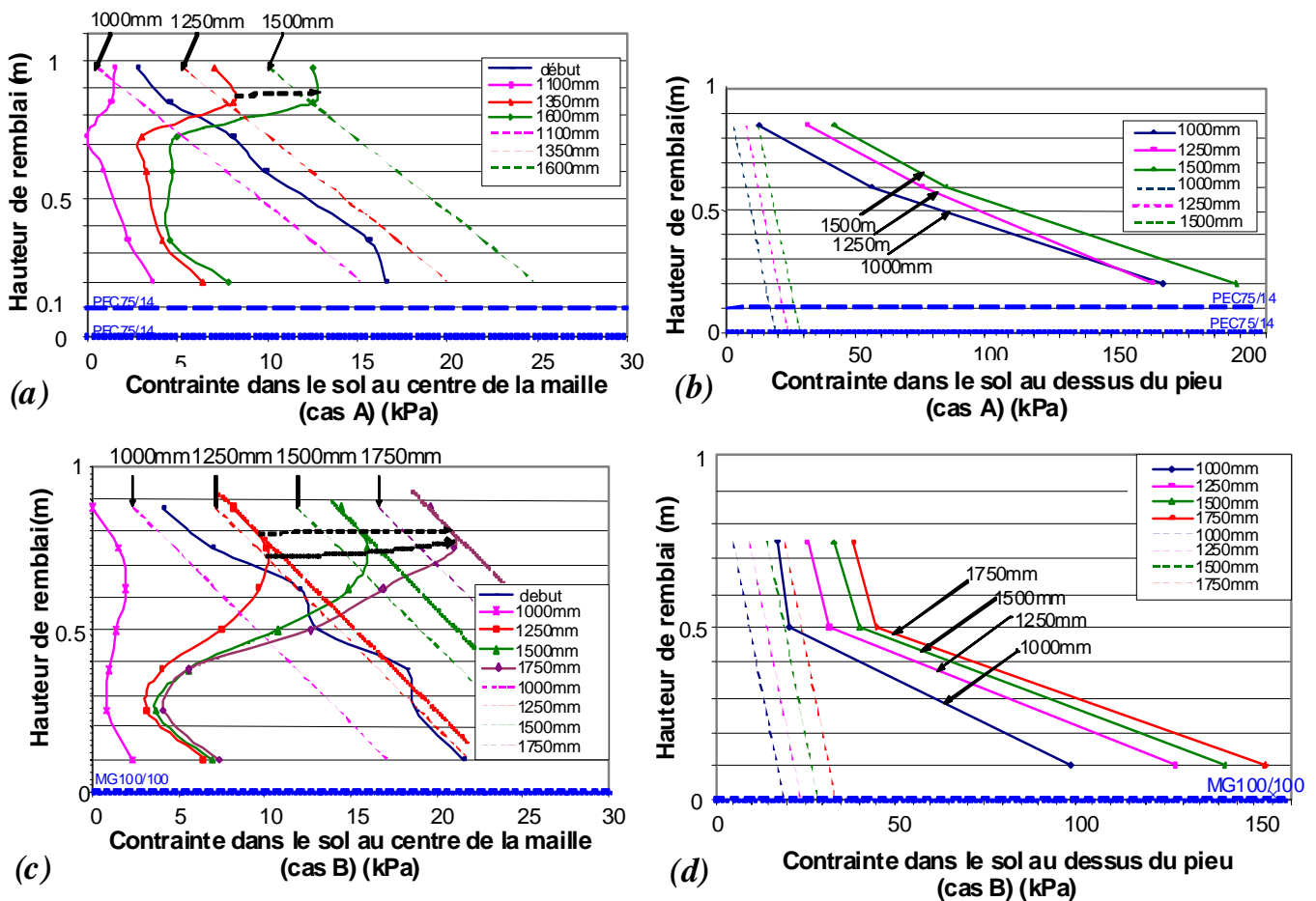


Figure 8. Répartition des contraintes dans le sol de remblai.

5. Conclusion

Les expérimentations en Malaisie ont permis de valider la solution de renforcement mixte par pieux et géosynthétique dans des conditions très défavorables (sans sol support). Elles ont permis de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge dans le remblai et le comportement en membrane de la nappe géosynthétique. Elles ont montré que les mécanismes de voûte étaient influencés par la raideur du renfort géosynthétique et qu'ils étaient liés à la déformabilité du corps de remblai. Le mode de sollicitation du remblai (par excavation du sol de remplissage ou par remblaiement en partie supérieure), conduit à des mécanismes de report de charge assez différents. Compte tenu de la présence du géosynthétique, on peut penser que les reports de charge ne se font pas exclusivement de pieux à pieux, mais peuvent s'exercer entre différents points de la nappe de renforcement. Comme le montre les résultats obtenus, ces mécanismes sont très complexes, et il est très difficile à la vue des seuls résultats expérimentaux de tirer des conclusions très précises. Des modélisations numériques par éléments discrets ont été engagées pour apporter des éclairages nouveaux sur ces mécanismes.

6. Références bibliographiques

- British Standard BS8006 (1995) Strengthened/reinforced soils and other fills, *section 8: design of embankments with reinforced soil foundation on poor ground*, pp. 80-121.
- Carlson B.O. (1987) Armerad Jord beräkningsprinciper för banker på pÅlar, *Terranova, Distr. SGI. Linköping 1987*.
- Chew S.H., Phoon H.L., Loke K.H., Lim L.K., Le Hello B., Villard P (2004) Geotextile reinforced piled embankment – full scale model tests, *Proc. 3rd Asian Regional Conference on geosynthetics, GeoAsia 2004 (Now and Future of Geosynthetics in Civil Engineering), Seoul, Korea, Editors: J.B. Shim, C. Yoo and H-Y. Jeon, June 21-23 2004, pp. 661-668*.

- EBGEO Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (2004) Bewehrte Erdkörper auf punkt – oder linienförmigen Traggliedern, *Kapitel 6.9, Stand 16/05/2004*.
- Guido V.A., Kneuppel A., Sweeney M.A. (1987) Plate loading test on geogrid reinforced earth slabs, *Proc. Geosynthetics'87 Conference, 1987, New Orleans, pp. 216-225*.
- Hewlett W., Randolph M.A. (1988) Analysis of piled embankments, *Ground Engineering, April 1988, pp. 12-18*.
- Kempfert H.G., Stadel M., Zaeske D. (1997) Berechnung von geokunststoffbewerten Tragschichten über Pfahlelementen, *Bautechnik 74, Heft 12, pp. 818-825 (In Deutsch)*.
- Low B.K., Tang S.K., Choa V. (1994) Arching in piled embankments, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering, vol. 120, pp. 1917-1938*.
- Sintef (2002) A computer program for designing reinforced embankments, *Proc. 7th International Conference on geotextiles, Nice 2002, France, vol.1, pp 201-204*.
- Russell D., Pierpoint N (1997) An assessment of design methods for piled embankments, *Ground Engineering, November 1997, pp. 39-44*.
- Villard P., Le Hello B., Nancey A., Chew S.H., Loke K.H. (2004) Use of high strength geotextiles over piles results from a full scale test, *Proc. the 3rd European Geosynthetics Conference, Munich, Germany, 01-04 March 2004, vol. 1, pp. 295-298*.