

ETUDE EN CENTRIFUGEUSE DU RECOUVREMENT GEOSYNTHETIQUE POUR LES REMBLAIS SUR INCLUSIONS RIGIDES

CENTRIFUGE MODELLING OF GEOSYNTHETICS OVERLAP FOR PILED EMBANKMENTS

Luc THOREL¹, Mathieu GUEROIS¹, Thierry DUBREUCQ¹, Matthieu BLANC¹

¹ Université Gustave Eiffel, Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques (GERS-CG)

RÉSUMÉ – Le recouvrement de 2 lés, situés à la base de la plate-forme de transfert de charge granulaire, est étudié sur des modèles instrumentés à petite échelle à l'aide du dispositif de plateau mobile dans la centrifugeuse géotechnique de l'Université Gustave Eiffel. La largeur du recouvrement influe sur l'efficacité du transfert de charge et sur le tassement différentiel en surface.

ABSTRACT – The overlap of 2 strips, located at the base of the granular load transfer platform, is being studied on small-scale instrumented models using the moving plate device in the geotechnical centrifuge at the University Gustave Eiffel. The width of the cover influences the efficiency of the load transfer and the differential settlement at the surface.

1. Introduction

Le remblai sur inclusions rigides (IR) est un type de renforcement utilisé pour les ouvrages géotechniques dans les sols meubles. Il s'agit d'une fondation composite où de multiples phénomènes sont impliqués pour transférer, à travers la Plateforme de Transfert de Charge (PTC), les charges vers la fondation profonde et réduire les tassements différentiels (Almeida et Marques, 2013). Elle présente l'avantage de pouvoir être construite sans attendre la « fin » du tassement du sol compressible et d'avoir un impact environnemental réduit grâce à l'économie de matériaux (Almeida et al., 2020).

Dans le cadre du projet national ASIRI+ (2019-2024), de nouvelles recherches sont développées pour améliorer la compréhension de cette technique, et en particulier sur les PTC renforcées par géosynthétiques (GSY) installés horizontalement à la base des PTC.

La question soulevée ici concerne le recouvrement des GSY adjacents, leur largeur et leur emplacement. La technique d'investigation est basée sur la modélisation physique de modèles à petite échelle simplifiés et centrifugés.

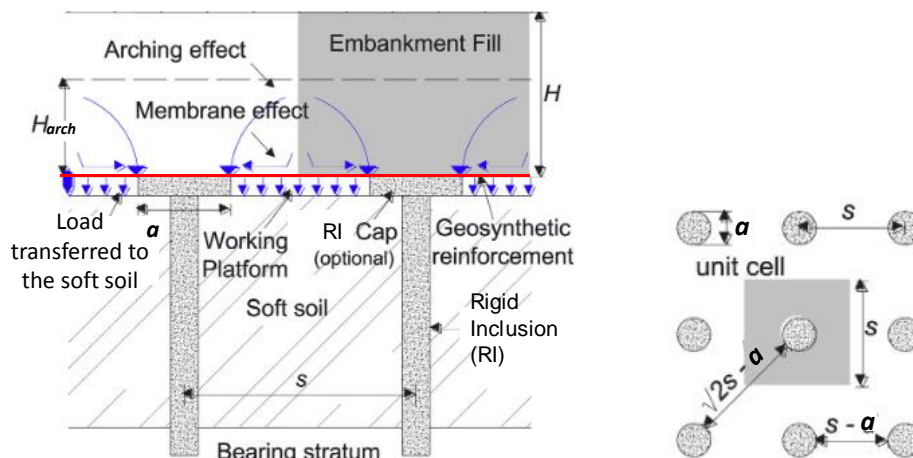


Figure 1. Eléments d'un remblai sur Inclusions Rigides (d'après Fagundes et al., 2017).

Le remblai sur IR renforcé par GSY est une technique utilisée pour la fondation de constructions de grande surface, telles que les structures routières ou ferroviaires, sur des sols meubles. En plus du transfert de charge par effet "de voûte" (Almeida et Marques, 2013), le renforcement GSY peut développer un effet de "membrane" (Blanc et al., 2014 ; van Eekelen et al., 2012), qui augmente l'efficacité du transfert de charge vers les IR. Si ces IR (avec une dalle de diamètre a), font partie d'un réseau carré (avec un espacement s), son taux de couverture, caractérisant la surface de sol couverte par les IR est :

$$\alpha = \pi a^2 / 4s^2 \quad (1)$$

Un tel remblai (Figure 1) est généralement composé d'une plate-forme granulaire pour transférer la charge, de dalles d'IR (optionnelles) pour homogénéiser et contrôler α , et d'IR, qui atteignent la formation géologique porteuse capable de reprendre la charge. Sur le terrain, une plate-forme de travail est généralement mise en œuvre, mais ce n'est pas le sujet de la présente étude. Pour simplifier les expériences, une seule couche de matériau granulaire est utilisée dans le modèle physique. Cela correspond à la plate-forme de transfert de charge, mais aussi au remblai. La terminologie "inclusion rigide" est similaire à "pieu déconnecté", ce qui signifie que la fondation profonde n'est pas reliée à la superstructure.

L'efficacité du transfert de charge E est utilisée pour évaluer la qualité du transfert de charge. C'est le rapport, sur une cellule unitaire, de F la charge verticale sur l'IR et de la charge totale au-dessus, due au poids de l'ensemble du remblai et d'une éventuelle force de surcharge verticale q (ASIRI, 2013) :

$$E = \frac{F}{\gamma H s^2 + q} \quad (2)$$

La conception d'un remblai (éventuellement renforcé par GSY) sur IR suit des normes nationales telles que les recommandations d'ASIRI (2013) en France, les normes EBGEO (2012) en Allemagne, ou la norme BS8006 (BSI, 2010) au Royaume-Uni.

L'objectif principal de cette étude est d'observer et d'analyser l'influence des recouvrements GSY à la base de la PTC au cours d'une campagne expérimentale paramétrique menée en centrifugeuse. La hauteur H de la PTC est constante. La largeur l_{anc} et la position du recouvrement ont été testées pour 3 espacements s différents, et comparées au cas d'un GSY continu (Figure 2-0), mais seule la position de recouvrement au droit d'une ligne d'IR (Figure 2-1) est détaillée ici pour $\alpha=1,23\%$.

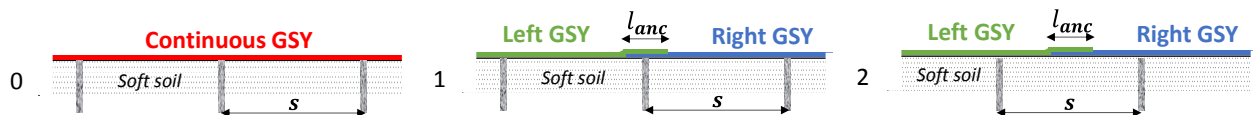


Figure 2. Différentes configurations géométriques : (0) GSY continu ; (1) recouvrement GSY centré sur une ligne d'IR ; (2) recouvrement GSY entre 2 lignes d'IR.

Le renforcement GSY (Msouti et al., 1997) est couramment utilisé pour les remblais sur IR car il augmente significativement l'efficacité du transfert de charge de la fondation (Blanc et al., 2013 ; Huckert, 2014 ; van Eekelen et al., 2012). Les géogrilles (GGR) permettent au sol de s'imbriquer à l'intérieur de leurs mailles pour créer une couverture rigide comparable à une dalle armée (Simon et al., 2020). Elles sont généralement placées au fond de la PTC, ou à l'intérieur de la PTC, comme dans Gunnvard et al. (2022). Seul le cas de la GGR à la base de la PTC est étudié ici.

Lorsque des GSY unidirectionnels sont utilisés (renforcement principalement dans une direction), deux couches de géosynthétiques sont nécessaires, une renforcée dans

chaque direction. Dans certains cas, des GSY bi-directionnels sont utilisés avec une seule couche. Une seule raideur rigidité d'un GSY 2D est considérée ici (Tableau 1).

Les géosynthétiques sont produits sous forme de bandes enroulées dont la taille dépend du fabricant (quelques mètres de largeur, quelques centaines de mètres de longueur). La jonction entre les bandes est généralement inévitable, tant en largeur qu'en longueur. La valeur minimale du recouvrement entre deux bandes adjacentes est $l_{anc}=0,3$ m (ASIRI, 2013). Elle est considérée ici comme la principale variable à étudier.

2. Modélisation en centrifugeuse

Des approches à diverses échelles sont utiles pour étudier le rôle du renforcement GSY dans les remblais sur IR : modélisation en centrifugeuse (Fagundes et al., 2017 ; King et al., 2019 ; Shen et al., 2020), modèles 1xg (Terqueux et al., 2022) ou analyse numérique (Almeida et al., 2020). Seule la modélisation par centrifugation sera utilisée ici.

2.1 La centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel

Opérationnelle depuis 1985, la centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel (Thorel, 2022) a un rayon de 5,5 m. A l'extrémité du bras, une nacelle inclinable emporte un modèle réduit, avec une charge maximale de 2 tonnes à 100xg.

La technique de modélisation en centrifugeuse permet de reproduire sur le modèle à petite échelle le même niveau de contrainte qu'à l'échelle du prototype (en vraie grandeur). Des facteurs d'échelle (Tableau 1) sont utilisés pour concevoir le modèle réduit centrifugé afin qu'il corresponde au prototype à l'échelle réelle (Garnier et al., 2007).

Tableau 1. Facteurs d'échelle pour la modélisation en centrifugeuse considérée

Dimension	Unité	Prototype		N×g modèle	
longueur/hauteur	m	1	$a = 0,3 / s = 2,4$	1/N	$a = 0,025 / s = 0,2$
Gravité	m/s ²	1		N	
Force	kN	1		1/N ²	
Masse	kg	1		1/N ³	
Contrainte	kPa	1		1	
Déformation	%	1		1	
Taux de couverture (α)	%	1		1	
Densité	kg/m ³	1		1	
Tassement (γ)	m	1		1/N	
Efficacité (E)	%	1		1	
Traction (T)	kN/m	1	<i>long. 63 / transv. 57</i>	1/N	<i>756 / 684</i>
Raideur sécante (J)	kN/m	1	<i>840</i>	1/N	<i>10080</i>

2.2 Dispositif expérimental

Le Plateau Mobile (PM), est un appareil installé dans la nacelle de la centrifugeuse qui simule le tassement du sol meuble (Figure 3) : le plateau perforé, sur lequel est installée la PTC granulaire, se déplace vers le bas (grâce à 3 servo-vérins), laissant les IR poinçonner la PTC (Blanc et al. (2013), Rault et al. (2010)).

Le PM a été utilisé dans le passé pour réaliser des études paramétriques sur la PTC, en utilisant le même sable (mélange de fractions de sable d'Hostun dense) que dans la présente étude (Baudouin et al., 2008).

Blanc et al. (2013) ont étudié les mécanismes dans la PTC renforcée par GSY à une gravité de 20xg et ont montré que la précontrainte n'a pas d'impact significatif sur les performances. Il a également été démontré que les tassements différentiels en surface de la PTC étaient plus faibles en utilisant un GSY qu'en l'absence de GSY, pour la même contrainte appliquée.

Fagundes et al. (2017) ont observé que le tassement différentiel en surface est plus influencé par la distance entre les IR ou l'épaisseur de la PTC que par la présence d'un GSY. Ils ont également montré que le tassement de surface est nul pour $H/(s-d) > 2,1$, et peut-être pour des valeurs plus petites si l'espacement entre les IR $s-d$ est plus faible.

Blanc et al. (2014) ont montré que plus le GSY est raide rigide, meilleur est l'effet membrane.

Girout et al. (2016) ont montré que le transfert de charge augmente avec α , mais que la diminution de l'espacement des IR s est plus efficace que l'augmentation du diamètre de la dalle de l'IR a . L'effet de voûte augmente également avec l'angle de frottement φ de la PTC. L'efficacité E augmente avec H , a , φ' , ou la contrainte appliquée et diminue avec s .

Girout et al. (2018) ont également montré que si un " effet de voûte " total est développé, la présence de GSY n'améliore pas le transfert de charge. Ils ont également montré que le meilleur transfert de charge est obtenu pour un GSY situé à la base de la PTC.

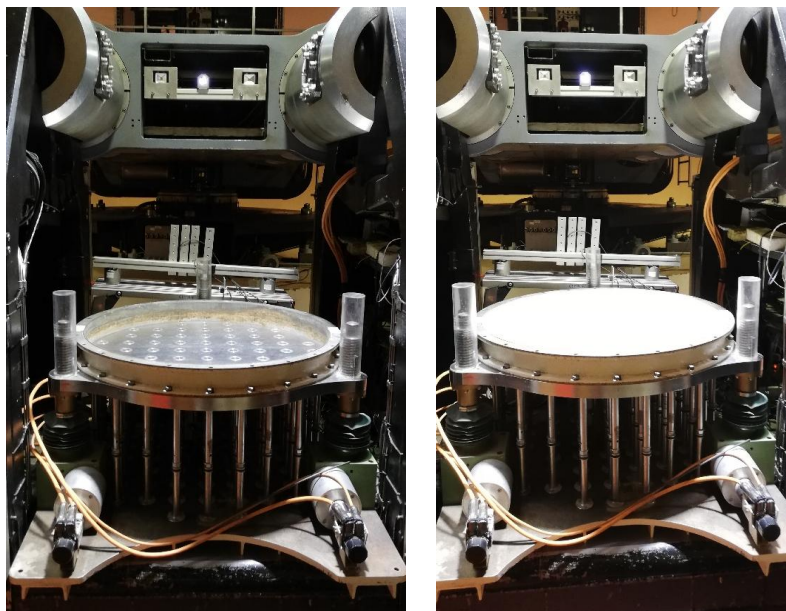


Figure 3. Plateau Mobile positionné dans la nacelle de la centrifugeuse : vide (à gauche) et rempli avec la PTC granulaire (à droite)

Le dispositif du plateau mobile a montré d'intéressantes possibilités d'étudier le comportement de la PTC granulaire et les interactions avec un GSY continu. Dans la configuration actuelle, le taux de couverture, le remblai et la PTC sont identiques, constitués d'un matériau granulaire, mais la géométrie du GSY est le paramètre clé de cette étude.

2.3 Instrumentation

L'instrumentation comprend la mesure de la force transmise aux IR, des tassements de la surface supérieure de la PTC et de la charge sur le plateau. Il est à noter que les mesures n'ont pas été les mêmes à chaque campagne. Les essais ont été instrumentés avec :

- 9 capteurs de force dans les 9 IR centrales, conçus pour une mesure axiale,
- 2 capteurs de déplacement LASER, placés sous le plateau pour mesurer le déplacement en son centre et en position périphérique,
- 4 capteurs de tassement LASER en surface de la PTC : au-dessus d'une IR y_{MP} , au-dessus du centre d'une cellule y_{MS} , entre deux IR adjacentes y_{MS2} ,
- 2 capteurs de force insérés dans le plateau (si possible) mesurant la charge au milieu d'une cellule.

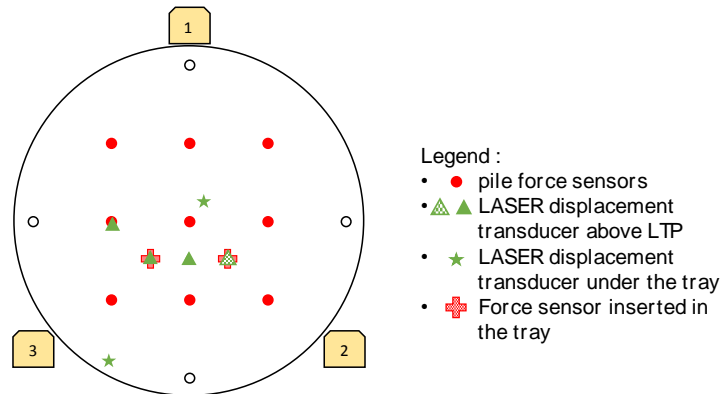


Figure 4. Vue de dessus de l'implantation des capteurs ($\alpha = 1.23\%$)

Les données recueillies avec les capteurs, sur le modèle réduit en centrifugeuse, sont numérisées à l'aide d'un Convertisseur Analogique Digital Quantum, puis transférées par fibre optique jusqu'à l'ordinateur de stockage. L'enregistrement et la visualisation des données ont été effectués à 0,1 ou 1 Hz (selon les phases des essais) avec le logiciel d'acquisition de données CATMAN.

2.4 Résultat typique : recouvrement au droit d'une rangée d'IR

Pour $\alpha=1,23\%$, il est possible d'inclure un capteur de force verticale au lieu d'une IR dans un diamètre de trou libre sur le plateau. Des résultats typiques (Guerois, 2023) sont présentés à la figure 5 avec différents recouvrements sur les côtés gauche et droit de la rangée d'IR du milieu. L'efficacité de transfert de charge est représentée en noir sur l'axe de gauche, l'effort en centre de maille sur le plateau en pointillés rouges sur le deuxième axe de gauche, et l'efficacité du tassement de part et d'autre du recouvrement, $\Delta y_{MS}/s$, en vert et en bleu sur l'axe de droite.

Au début de l'essai (phase I), la charge mesurée sur le PM sur une surface $\pi.a^2/4$ augmente, ainsi que E , ce qui correspond à une mise en tension progressive du GSY et peut être à un réarrangement des chaînes de force dans la PTC. Pour un GSY continu (figure 5a), la charge maximale sur le plateau correspond à environ la moitié du poids de la PTC sur le dessus du capteur. Comme il n'y a pas ou peu d'effet de voûte, toute la charge au sommet du GSY commence à être portée par le GSY et suit une possible répartition triangulaire. La charge maximale sur le plateau est obtenue pour un déplacement de 40 à 50 % du diamètre de l'IR.

Dans la phase II, la tension dans le GSY est observable avec un taux d'augmentation de E plus faible et une réduction de la charge sur le plateau (jusqu'à zéro). Lorsque le GSY n'est plus en contact avec le plateau (phase III), la charge sur le plateau est nulle.

Pour toute configuration de recouvrement, comme les bandes sont alignées symétriquement avec la rangée d'IR (ou entre les deux), un comportement symétrique est attendu. Ceci est vrai pour les tassements différentiels sous un certain déplacement du plateau (Figure 5, lignes en bleu et vert). Le tassement différentiel réduit, au milieu d'une maille sur les côtés gauche et droit de la ligne de recouvrement, a été mesuré : sur le côté avec la face inférieure du recouvrement (côté droit), le tassement différentiel réduit est plus élevé que sur l'autre côté à partir d'un certain tassement du PM. Pour les deux essais, la différence maximale entre les deux côtés est de 0,5 %.

L'analyse des charges semble suivre la mécanique des milieux continus dans la phase I et peut-être la phase II, jusqu'à ce que la discontinuité générée par la "coupe" ou le recouvrement joue progressivement un rôle et modifie la continuité initiale de l'ensemble de la structure. Par exemple, la figure 5b montre une série de pertes d'efficacité soudaines, qui sont probablement compensées sur d'autres parties du modèle (où aucune instrumentation n'est malheureusement disponible).

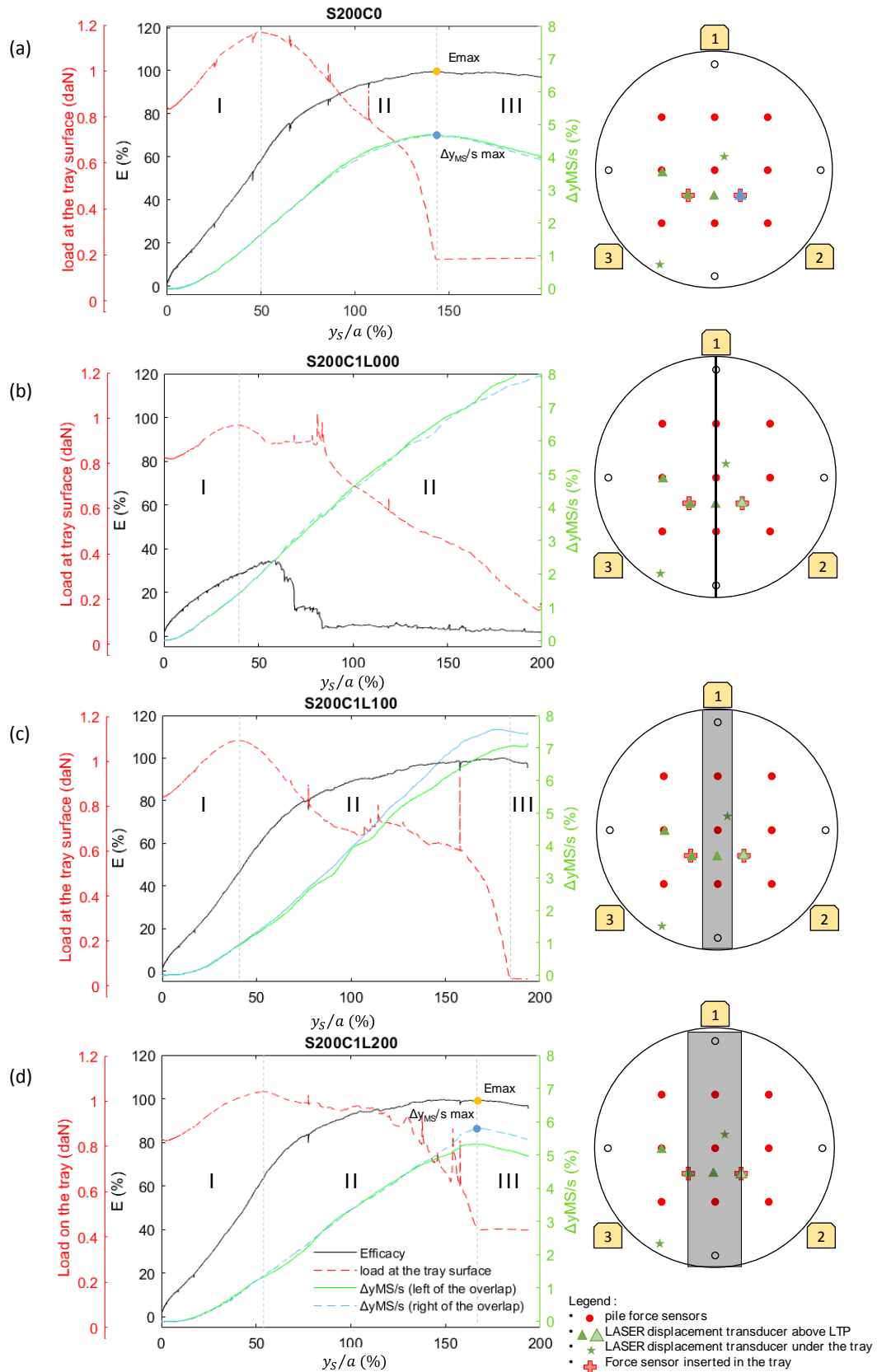


Figure 5. Efficacité de transfert de charge E , effort en centre de maille sur le PM et variation de l'efficacité en tassement différentiel $\Delta y_{MS}/s$ de chaque côté du recouvrement en fonction du tassement adimensionné y_s/a du PM pour : (a) le GSY continu, (b) $l_{anc} = 0$, (c) $l_{anc} = s/2$, (d) $l_{anc} = s$.

3. Conclusions

Les expérimentations sur modèle réduit ont montré que l'augmentation de la largeur de recouvrement améliore l'efficacité du transfert de charge et diminue le tassement différentiel à la surface de la plate-forme de transfert de charge.

Il a été observé que la charge transférée au "sol mou" (au PM) augmente au début du déplacement du plateau, en raison de la mise en tension du GSY ou du réarrangement de la PTC. L'efficacité correspondant à la charge maximale (fin de la phase I) augmente avec la longueur de recouvrement.

Pour de faibles recouvrements de GSY, on observe des mauvaises caractéristiques (faible efficacité et tassement différentiel élevé). Par contre avec l'augmentation du recouvrement, on tend à un comportement similaire à celui de l'essai sur géosynthétique continu. Pour un recouvrement supérieur à $s/2$, on observe ici un comportement très proche de celui du GSY continu pour des tassements inférieurs à 1 diamètre d'IR. Pour des tassements du sol compressible supérieurs, le tassement différentiel diverge peu à peu, tandis que l'efficacité est peu modifiée. Cela tend à montrer que la largeur de recouvrement « critique » est plus sensible à un critère en tassement différentiel qu'à un critère en efficacité.

D'autres configurations sont à étudier : autres valeurs de l'inter distance entre IR, autres positions du recouvrement (non centré sur une ligne d'IR),...

4. Références bibliographiques

- Almeida M. de S.S., Marques M.E.S. (2013). Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils. CRC Press, London.
- Almeida M.S.S., Fagundes D.F., Thorel L., Blanc M. (2020). Geosynthetic-reinforced pile-embankments: numerical, analytical and centrifuge modelling. Geosynth. Int. 27, 301–314. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00011>
- ASIRI (2013). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. ISBN9782859784706, Presses des Ponts, 383p.
- ASIRI+ (2019). Improvement and reinforcement of soils by rigid inclusions. <https://asiriplus.fr/> (accessed on 7th august 2023).
- Baudouin G., Rosquoët F., Canou J., Dupla J.-C., Thorel L., Rault G., Andria-Ntoanina I. (2008). Caractérisation mécanique d'un mélange de sables d'Hostun. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur Nantes 18-19 juin JNGG08. ISBN 9782720825204. pp 491-498. <https://www.geotech-fr.org/download.php?type=pdf&doc=jngg-2008>
- Blanc M., Thorel L., Girout R., Almeida M. (2014). Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling. Geosynthetics international. February 2014, Vol.21, 1, pp.37-52. DOI: [10.1680/gein.13.00033](https://doi.org/10.1680/gein.13.00033)
- Blanc M., Rault G., Thorel L., Almeida M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. Geotext. Geomembr. 36, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.12.001>
- BS8006 (2010). Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BS8006-1. British Standard Institution. ISBN 978-0-580-53842-1.
- Fagundes D.F., Almeida M.S.S., Thorel L., Blanc M. (2017). Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments. Geotext. Geomembr. 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.11.002>
- EBGEO (2012). Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements - EBGEO. John Wiley & Sons.
- Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., König D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F., Thorel L. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude

- questions in geotechnical centrifuge modelling. Int. J. Physical Modelling in Geotechnics ISSN 1346-213X, vol7, n°3, pp 1-24. doi.org/10.1680/ijpmg.2007.070301
- Girout R., Blanc M., Thorel L., Fagundes D.F., Almeida M.S.S. (2016). Arching and deformation in a piled embankment: centrifuge tests compared to analytical calculations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 142(12), 10p [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001557).
- Girout R., Blanc M., Thorel L., Dias D. 2018 Geosynthetic reinforcement on piled-supported embankment Geosynthetics International. Vol.25, n°1 37–49. <https://doi.org/10.1680/jgein.17.00032>.
- Guerois M. (2023). Centrifuge parametric study of the geosynthetic overlap above piled embankment foundations. Internship report University Gustave Eiffel/ Polytech' Clermont. 122p
- Gunnvard P., Mattsson H., Laue J. (2022). Evaluating the Design Criteria for Light Embankment Piling: Timber Piles in Road and Railway Foundations. Appl. Sci. 12, 166. <https://doi.org/10.3390/app12010166>
- Huckert A. (2014). Optimisation with numerical and experimental approaches of the mechanical properties of geosynthetic materials used in soil reinforcement (in french) .Ph.D. Dissertation, Univ. Grenoble. <https://www.theses.fr/2014GRENI030>
- King L., Bouazza A., Gaudin C., O'Loughlin C. D., Bui H. H. (2019). Behavior of geosynthetic-reinforced piled embankments with defective piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(11), 04019090.
- Msouti M.F., Blivet J.-C., Levacher D. (1997). Comportement au fluage des géotextiles en renforcement mécanique. Laboratoire central des ponts et chaussées. 143p.
- Rault G., Thorel L., Néel A., Buttigieg S., Derkx F., Six G., Okyay U. (2010). Mobile tray for simulation of 3D load transfer in pile-supported earth platforms. 7th international Conference on Physical Modelling in Geotechnics June 28th- July 1st, Zurich, Springman, Laue, Seward (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-59288-8, pp.261-266.
- Shen P., Xu C., Han J. (2020). Centrifuge tests to investigate global performance of geosynthetic-reinforced pile-supported embankments with side slopes. Geotextiles and Geomembranes, 48(1), 120-127
- Simon B., Briançon L., Thorel L. (2020). Amélioration des sols par inclusions rigides : le rôle des géosynthétiques dans la plateforme de transfert de charge. Rev. Fr. Géotechnique 1. <https://doi.org/10.1051/geotech/2020003>
- Terqueux C., Briançon L., Delmas P., Jacqueline D., Racinais J., Pantet A., Gotteland P. (2022). Renforcement d'un sol compressible par inclusions rigides: étude des transferts de charge au sein de la plateforme granulaire renforcée par des géosynthétiques, in: 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur.
- Thorel L. (2022). Physical Modelling Facilities: from Galileo to 3D Printing. Presented at the ICPMG 2022, 10th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, ISBN 978-89-952197-7-5, 64-72. <https://www.issmge.org/uploads/publications/53/115/P00503.pdf>
- van Eekelen S.J.M., Bezuijen A. Lodder H.J. , van Tol A.F. (2012). Model experiments on piled embankments. Part I. Elsevier Enhanced Reader. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.11.002>