

# Le projet national ASIRI+ - Retour sur cinq années de recherche appliquée partenariale

## *The national project ASIRI+ - Return on five years of applied research*

Laurent Briançon<sup>1</sup>, Luc Thorel<sup>2</sup>, Bruno Simon<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INSA-Lyon, GEOMAS

<sup>2</sup> Université Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais

<sup>3</sup> Terrasol-SETEC

**RÉSUMÉ** – Le projet ASIRI+ (<https://asiriplus.fr>) a réuni 43 partenaires de 2019 à 2024 pour compléter les études sur le renforcement des sols par inclusions rigides menées dans le cadre du Projet National ASIRI entre 2005 et 2012 et éditer de nouvelles recommandations. Les nouveaux axes de recherche se sont concentrés sur le comportement des plateformes de transfert de charge, le comportement des semelles sur inclusions rigides et les ouvrages soumis à des sollicitations complexes : cycliques, dynamiques et sismiques. L'ensemble des résultats obtenus par des expérimentations en laboratoire et *in situ*, par des modélisations numériques et grâce à une forte complémentarité entre partenaires académiques et praticiens a permis de rédiger de nouvelles recommandations.

**ABSTRACT** – The ASIRI+ project (<https://asiriplus.fr>) brought together 43 partners from 2019 to 2024 to complete the studies on soil reinforcement by rigid inclusions conducted as part of the National ASIRI Project between 2005 and 2012 and to publish new recommendations. The new lines of research focused on the behavior of load transfer platforms, the behavior of slab on rigid inclusions, and structures subjected to complex solicitations: cyclic, dynamic, and seismic. All the results obtained by laboratory and *in situ* experiments, by numerical modeling and thanks to a strong complementarity between academic partners and practitioners have made it possible to write new recommendations.

## 1. Introduction

Les recommandations ASIRI (2012) ont largement été diffusées, y compris à l'international. Elles traitent en particulier du dimensionnement des remblais et dallages sur inclusions rigides (IR). Certains points n'ont cependant pas été abordés dans ces recommandations et le développement de la pratique a nécessité un nouveau projet national pour compléter les premières recommandations. Ce projet, ASIRI+, a débuté en 2019 pour une durée de cinq ans. Il a particulièrement traité du comportement des plateformes de transfert de charge (PTC) granulaires renforcées par géosynthétiques et en sol traité, des semelles sur IR et du comportement des ouvrages sur IR soumis à des sollicitations complexes. L'aspect environnemental a aussi été abordé.

La complémentarité des 43 partenaires et les nombreuses approches (modélisation physique, expérimentation *in situ* et modélisation numérique) ont permis d'avancer sur tous les sujets d'étude et de proposer des règles de dimensionnement et de dispositions constructives.

Le projet ASIRIplus\_SDS, soutenu par l'ANR, a été parallèlement mené pour étudier le comportement du massif de sol renforcé par IR sous sollicitations dynamiques et sismiques. Le projet FUI FEDRE a aussi été mené en parallèle pour traiter particulièrement du comportement du massif de sol renforcé par IR sous sollicitations cycliques. Neuf thèses et six post-docs ont été financés dans le cadre de ces trois projets.

Ce travail a permis la rédaction des recommandations ASIRI+ qui remplaceront les recommandations ASIRI éditées en 2012.

## **2. Comportement des plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques**

### **2.1. Pratique avant le PN ASIRI+**

La PTC située à l'interface entre l'ouvrage et le massif de sol renforcé est le lieu où se concentrent les mécanismes de transfert de charge vers les IR. L'efficacité du renforcement du sol est fortement liée au bon dimensionnement de ce matelas. Plusieurs techniques permettent d'améliorer le transfert de charge dans la PTC, en particulier le renforcement par des nappes géosynthétiques (GSY) est couramment employé sous remblai.

Les recommandations ASIRI traitent du dimensionnement des GSY de renforcement des PTC sur IR en se basant sur les préconisations sécuritaires de la norme anglaise BS 8006 (2010). Cette méthode de dimensionnement et celles proposées dans d'autres normes européennes (EBGEO, 2010, CUR, 2016) ont été invalidées par de nombreux exemples récents d'ouvrages instrumentés car elles ne prennent pas en compte toute la complexité des mécanismes. Cette absence de méthode de dimensionnement de référence est un frein au développement de la technique de renforcement des sols par IR intégrant des GSY dans les domaines routiers et ferroviaires présentant un fort potentiel d'application.

Entre les deux projets nationaux, une série d'expérimentations en centrifugeuse (Blanc et al., 2014, Fagundes et al., 2017, Girout et al., 2018) ont permis de montrer notamment que : l'effet membrane est d'autant meilleur que le GSY est raide, que le meilleur transfert de charge est obtenu pour un GSY localisé à la base de la PTC et que si un « effet de voûte » est développé, la présence du GSY n'améliore pas le transfert de charge.

### **2.2. Mise en évidence des mécanismes**

Plusieurs études ont été menées dans le PN ASIRI+ pour améliorer la compréhension des mécanismes :

- des essais en laboratoire à échelle 1, dans le cadre de la thèse de Clara Terqueux, pour étudier le rôle des nappes GSY (Terqueux et al., 2023), l'influence de leur position dans la PTC et l'influence de l'épaisseur de la PTC sur l'efficacité des nappes (Figures 1a & 1b),
- des instrumentations d'ouvrages réels,
- des essais en centrifugeuse (Thorel et al., 2024c) pour étudier particulièrement l'influence des recouvrements des nappes GSY (Figure 1c),
- des simulations numériques par éléments discrets (Villard et al., 2024) pour étudier finement les transferts de charge dans la plateforme (Figure 1d).

### **2.3. Enseignement pour les recommandations**

Ces essais et les modèles numériques ont mis en évidence plusieurs mécanismes :

- la nappe géosynthétique apporte une meilleure efficacité lorsqu'elle est positionnée près des têtes des inclusions,
- les profils de tassement horizontaux sont très plats avec un tassement différentiel important à proximité de l'inclusion ; ils permettent de supposer l'allure des profils de contrainte et la mobilisation des nappes géosynthétiques à proximité des têtes,
- les nappes géosynthétiques ne permettent pas une réduction du tassement en comparaison à la plateforme non renforcée qui est déjà très efficace ; en effet leur mise en tension nécessite un tassement différentiel supérieur à celui requis pour obtenir un transfert de charge par cisaillement dans la PTC,
- les nappes géosynthétiques jouent tout leur rôle pour de grands déplacements lorsque la plateforme ne permet pas de transmettre une part suffisante vers les inclusions ou lorsque des surcharges sont appliquées sur le toit du remblai,
- l'association des nappes géosynthétiques aux inclusions permet de constituer à proximité de leurs têtes l'équivalent d'une zone d'appui (« point dur »), au toit de la

PTC, d'une section supérieure à celle de l'inclusion ; cet effet favorise le déchargement du sol,

- une grande part du tassement est consommée pendant la mise en place du remblai et pendant les quelques jours qui suivent.

Concernant le recouvrement GSY sur une longueur  $l_{anc}$ , 3 mécanismes sont observés sur les expérimentations en centrifugeuse (Thorel et al., 2024c) : 1) Transfert de charge vers le plateau (simulant les sols compressible) au début du mouvement ; 2) Mise en tension progressive et glissement éventuel ; 3) (pour  $l_{anc}$  élevé) perte de contact du GSY. Selon que l'on s'appuie sur un critère en efficacité du transfert de charge ou en efficacité en tassement différentiel, les conclusions sur  $l_{anc}$  ne seront pas les mêmes. Enfin, plus le taux de couverture est grand, plus  $l_{anc}$  est petit.

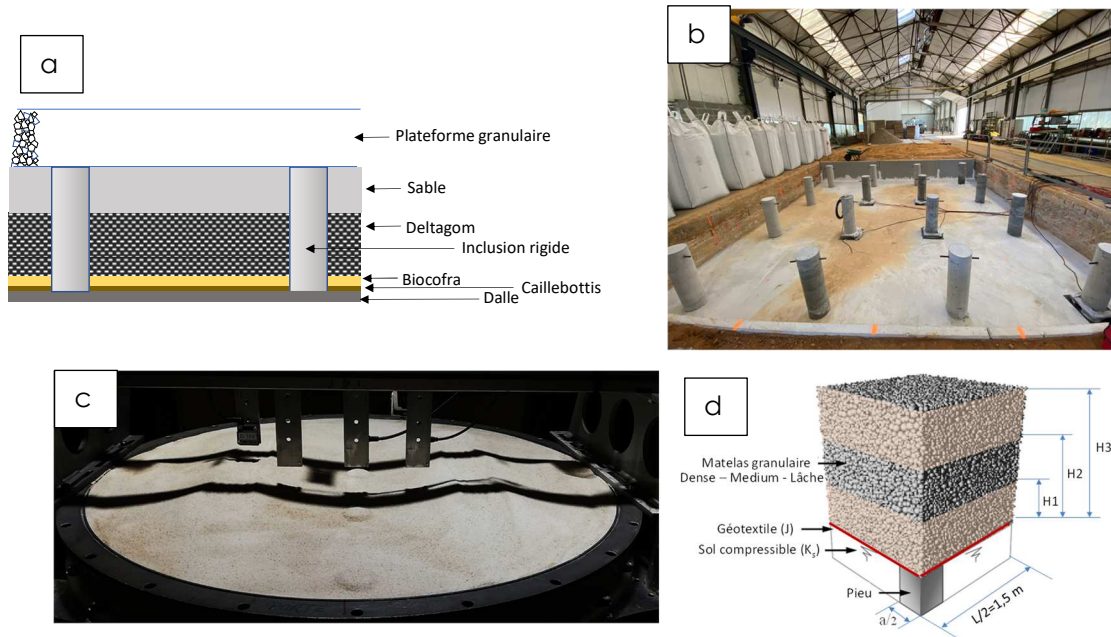


Figure 1. Moyens mis en œuvre pour étudier les plateformes renforcées par géosynthétiques sur inclusions rigides

### 3. Comportement des plateformes en sol traité

#### 3.1. Pratique avant le PN ASIRI+

Les retours d'expérience ont mis en évidence une augmentation de l'utilisation de matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour constituer la PTC. Ce traitement qui permet la réutilisation du matériau en place en épargnant les ressources minérales de meilleure qualité, apparaît comme une solution économique et respectueuse de l'environnement. Le comportement de ces PTC soumises à leur base au poinçonnement des IR doit de la même manière être étudié spécifiquement, sous sollicitations monotones et cycliques (comportement à la fatigue).

#### 3.2. Mise en évidence des mécanismes

Des études expérimentales ont été menées dans la thèse de Julien Mannah pour améliorer la compréhension des mécanismes des PTC en sol traité sur IR :

- une étude de traitement de sol en laboratoire (Mannah et al., 2024a)
- deux essais en laboratoire à échelle 1 (Figure 2a - Mannah et al., 2024a),
- deux remblais sur IR instrumentés (Figure 2b),

- des essais *in situ* de chargement de différentes PTC (granulaires, mixtes, en sol traité) sur IR (Mannah et al., 2024b).

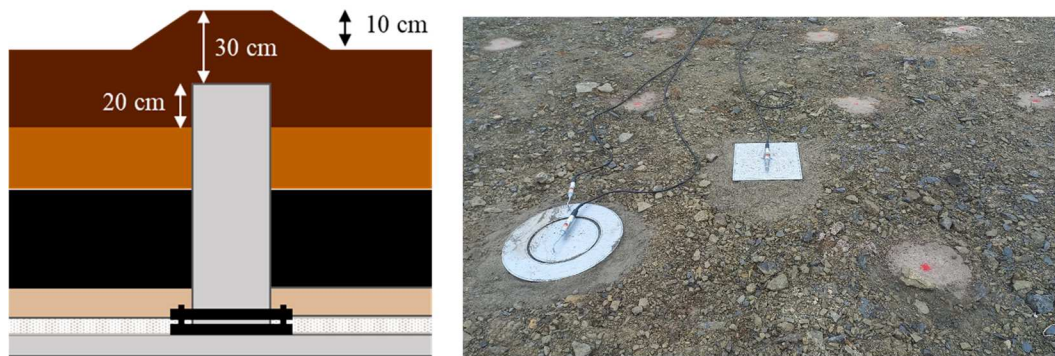


Figure 2. Moyens mis en œuvre pour étudier les plateformes en sol traité sur inclusions rigides (a) comportement de la plateforme après chargement (b) instrumentation par des capteurs de pression totale d'un remblai sur inclusions rigides

### 3.3. Enseignement pour les recommandations

Ces études ont permis de montrer que la charge se diffusait plus rapidement vers les têtes d'inclusions dans le cas d'une plateforme en sol traité. La rupture observée dans les essais en laboratoire à échelle 1 s'est faite par poinçonnement de la plateforme par les inclusions. La plateforme s'est montrée moins performante que les plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques pour de grands tassements imposés.

La caractérisation en laboratoire des différents traitements de sol a permis d'identifier les essais importants pour le dimensionnement des plateformes. Les essais triaxiaux à différents temps de prise sont des essais qui permettent de mesurer finement l'évolution de la cohésion avec le temps et devraient être réalisés pour des études de plateformes traitées sur inclusions rigides.

Des essais complémentaires seront néanmoins nécessaires pour caractériser les performances mécaniques à longs termes des plateformes en sol traité.

## 4. Comportement des semelles sur inclusions rigides

### 4.1. Pratique avant le PN ASIRI+

Les recommandations ASIRI ont proscrit de leur domaine d'application les ouvrages construits directement sur IR sans PTC. Depuis leur parution, certaines sociétés de renforcement de sol ont rédigé des cahiers de charges permettant de proposer cette disposition. Des essais en vraie grandeur (Pham et al., 2019) et les retours d'expérience ont montré l'efficacité du système et validé les moyens de le dimensionner. Il a été décidé que cette disposition spécifique devait être intégrée dans les recommandations ASIRI+ en lui donnant un cadre général après une validation à grande échelle.

### 4.2. Mise en évidence des mécanismes

Des essais *in situ* et des expérimentations sur modèles réduits centrifugés, couplés à des benchmarks numériques ont été réalisés dans le cadre du projet ASIRI+ pour étudier le comportement des semelles sur IR et évaluer les méthodes de calcul et modélisations numériques existantes et les enrichir si besoin.

Un premier plot expérimental d'essais de chargement sur des semelles sur IR a été réalisé en testant différentes configurations : sans plateforme, avec une plateforme

granulaire, avec une fine couche de sable. Un benchmark numérique a été mené sur ce cas (Szymkiewicz et al., 2024).

Un second plot expérimental de chargement sur deux semelles sur IR avec et sans PTC et sur une semelle sur sol non renforcé a permis de compléter les résultats du premier plot.

Parallèlement à ces plots expérimentaux *in situ*, une campagne d'essais en centrifugeuse a été menée pour compléter les premiers résultats en pouvant tester un plus grand nombre de configurations, en particulier sous charge excentrée.



Figure 3. Moyens mis en œuvre pour étudier les semelles sur inclusions rigides (a) Plots expérimental de Dourges (b) Plot expérimental du port HAROPA de Rouen

#### 4.3. Enseignement pour les recommandations

La comparaison entre les mesures des essais *in situ* et les résultats des modélisations numériques mettent en évidence la difficulté de modéliser précisément le report de charge. En effet, avec ou sans PTC, la charge appliquée n'est jamais reprise de façon égale par les quatre inclusions. Cette charge est reprise préférentiellement par deux ou trois inclusions quel que soit la configuration de la plateforme de transfert de charge. Même en considérant une valeur moyenne sur les inclusions, les modèles surestiment cette charge peut-être à cause d'une mauvaise prise en compte du comportement du sol à proximité de l'inclusion qui est amélioré par le refoulement qu'il subit lors de la mise en œuvre des inclusions et qui peut de ce fait reprendre une part de la charge appliquée. A la rupture, les modèles sont capables de bien simuler le comportement de la semelle sur inclusions.

Les expérimentations en centrifugeuse permettent d'observer que la présence d'IR réduit la rotation par 4 sous un même chargement excentré et que 2 mécanismes semblent se mettre en place successivement, à savoir la mobilisation de la PTC, puis celle des IR (Thorel et al., 2024a).

### 5. Comportement sous sollicitations non monotones

Cet ensemble de sollicitations est très large, puisqu'il inclut les charges roulantes, les sollicitations cycliques, les charges dynamiques et les charges sismiques. Les deux derniers cas de charge ont été étudiés spécifiquement dans le projet ANR ASIR|plus\_SDS+ et seront présentés dans d'autres communications.

## 5.1. Comportement sous sollicitations cycliques

### 5.1.1. Pratique avant le PN ASIRI+

Les éoliennes constituent un domaine privilégié d'ouvrages dont les fondations sont soumises à des sollicitations cycliques. Le renforcement des sols par IR est une méthode qui est en plein essor dans le domaine de l'éolien terrestre car elle permet de gommer les hétérogénéités du sol en transférant les efforts vers des sols plus porteurs. Les recommandations françaises ASIRI ont permis de dimensionner le nombre d'IR sous fondation d'éolienne à un niveau raisonnable mais il est apparu que les recommandations du CFMS (2011) sur ce sujet méritaient une révision pour disposer de méthodes de dimensionnement optimisées.

### 5.1.2. Etudes menées dans le cadre du projet FUI FEDRE

L'analyse du transfert de charge dans le sol renforcé par inclusions rigides a été menée dans la thèse d'Adnan Sahyouni (2023) dans le cadre du projet FUI FEDRE par l'instrumentation du renforcement de sol sous une éolienne et le développement de modèles numériques capables de simuler le transfert de charge dans le sol renforcé.

A partir des mesures obtenues, il a été possible de proposer une modélisation numérique par éléments finis 3D du renforcement de sol en mettant en évidence quels étaient les modèles de sols à utiliser, quelle calibration était essentielle pour disposer d'un outil performant malgré toute la complexité de l'ouvrage modélisé et notamment le chargement différent sur chaque maille nécessitant une modélisation 3D.

L'instrumentation a permis, et c'est une première, de mettre en relation la charge reprise par les inclusions en fonction de leur position par rapport à la direction du vent et selon la vitesse du vent. Enfin un macro-élément a été développé réduisant le temps de calcul et apportant des résultats proches de la modélisation numérique (Figure 4). Un macroélément est un modèle qui permet de reproduire le comportement de l'ensemble du système sol et fondation à l'échelle macroscopique. Il a été développé sur la plateforme ATL4S (Grange, 2018) pour caractériser l'interaction entre l'inclusion rigide et le sol.

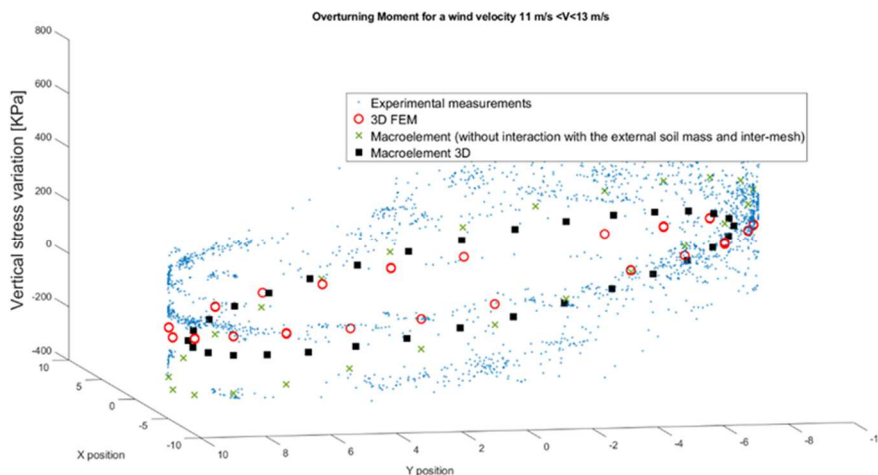


Figure 4. Mesure de l'augmentation de contrainte due au vent sur les inclusions périphériques sous la fondation – Comparaison des mesures et des modèles numériques

## 5.2. Comportement sous charges roulantes

Des essais centrifugés ont été réalisés pour mettre en évidence le comportement d'une plateforme sur IR soumise à diverses sollicitations et notamment des charges roulantes

alternées et non-alternées. L'impact d'un trafic 2D en sens unique ou alterné a ainsi été étudié, avec ou sans géogrille dans la plateforme (Figure 5).

Les modélisations physiques du trafic en 2D montrent une évolution du transfert de charge avec le roulement et un effet d'inversion sur la pression verticale résiduelle au-dessus des inclusions, en lien notamment avec la condition limite d'encastrement en pied. Le premier passage du rouleau annihile ainsi l'effet de voûte initialement présent entre les IR. La présence d'une géogrille limite les déplacements horizontaux des grains lors du passage. Avec la charge roulante ELS, du point de vue de l'efficacité de charge des IR, le fonctionnement en « membrane » du renforcement géosynthétique disposé juste au-dessus des têtes d'IR semble moins performant que le fonctionnement en « confinement » de la géogrille à mi-PTC. Cette observation est en accord avec les conclusions du paragraphe 2 sur la moindre efficacité des géosynthétiques pour de très faibles déplacements (Dubreucq et al., 2024).

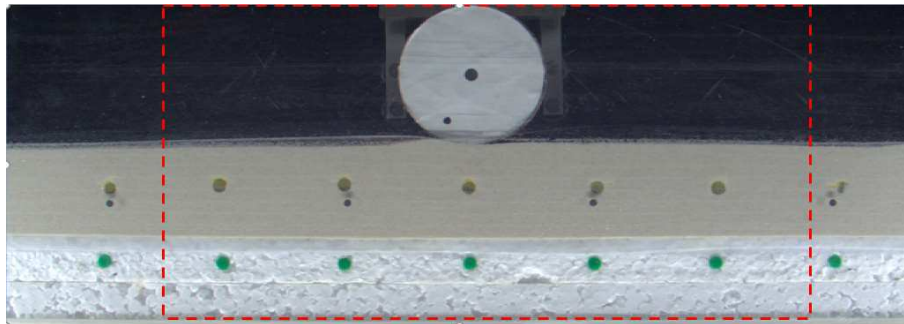


Figure 5. Essais de circulation centrifugés

## 6. Conclusions

La combinaison des approches déployées (modèles physique, modèles numériques, plots d'essai, ouvrages en vraie grandeur) dans le cadre du projet ASIRI+ permettent de mieux cerner les problématiques relatives au renforcement de sol par IR.

L'ensemble des résultats fera l'objet d'un recueil de recommandations en deux parties : le 1<sup>er</sup> tome détaillera les résultats et observations des mécanismes et le 2<sup>nd</sup> tome sera dévolu aux recommandations de dimensionnement mises à jour par rapport à la version de 2012.

## 7. Remerciements

Les auteurs remercient les 43 partenaires du projet national ASIRI+ pour leur participation à ce projet collaboratif. Ces travaux ont également reçu un financement de l'ANR via le projet ASIRIplus\_SDS n°. ANR-19-CE22-0015-01.

## 8. Références bibliographiques

- ASIRi (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales (Recommandations Projet National ASIRi), Presse des Ponts - IREX Paris.
- BS 8006-1 (2010) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institution BSI, London, UK. ISBN 978-0-580-53842-1
- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L., Almeida, M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. *Geotextiles & Geomembrane* vol.36, pp.92-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2012.12.001>

- CFMS (2011). Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes, <https://www.cfms-sols.org>.
- CUR 226 (2016). Design guideline basal reinforced piled embankments. In: Design guideline basal reinforced piled embankments. CRC press
- Dubreucq, Th., Thorel, L., Jagu, A., Lerat, S., Neel, A., Gaudicheau, P., Audrain, Ph. (2024). Remblais de faible épaisseur sur sol mou renforcé par inclusions rigides : Essais 2D de charge roulante en centrifugeuse. Proceedings of 12<sup>e</sup> JNGG, Poitiers, France, 25-28 juin 2024.
- EBGEO (2011) Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements-EBGEO. Digital in English. German geotechnical society, Berlin, Germany.
- Fagundes, D.D.F., Almeida, M., Thorel, L., Blanc, M. (2017). Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments. Geotextiles and Geomembranes, vol. 45(2), 1-10.
- Girout, R., Blanc, M., Thorel, L., Dias, D. (2018). Geosynthetic reinforcement on piled-supported embankment Geosynthetics International. Vol.25, n°1 37–49.
- Grange, S. (2018). ATL4S: A Tool and Language for Simplified Structural Solution Strategy. Technical report, GEOMAS, INSA-Lyon, France
- Mannah, J., Marracci, L., Chalak, C., Briançon, L., Grange S., Dias D. and Lenoir Th. (2024a). Study of the behaviour of treated load transfer platform on rigid inclusions. Proceedings of the XVIII ECSMGE, Lisbon, Portugal, 26-30 August 2024
- Mannah, J., Briançon, L., Chalak, C., Vetillard, J., Lenoir Th. and Farhat H. (2024b). Etude de transfert de charge dans les plateformes granulaires, mixtes et traitées - Essais en vraie grandeur dans le port HAROPA. Proceedings of 12<sup>e</sup> JNGG, Poitiers, France, 25-28 juin 2024.
- Pham, V.H., Briançon, L., Dias, D., Racinais, J. (2019). Footings over rigid inclusion-reinforced soft soil. Experimental and numerical approaches. Canadian Geotechnical Journal, 56(12), 1940-1952
- Szymkiewicz, F., Briançon, L., Chevalier, B. et Lambert, S. (2024). Essais de chargement de semelles sur inclusions rigides – Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques. Proceedings of 12<sup>e</sup> JNGG, Poitiers, France, 25-28 juin 2024.
- Terqueux, C., Briançon, L., Racinais, J., Pantet, A. & Gotteland, Ph. (2023). Full-scale experiment of a geosynthetic-reinforced pile-embankment. Proceedings of 12<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Rome, Italy, 11-17 September 2023.
- Thorel, L., Blanc, M., Neel, A., Jagu, A., Audrain, Ph., Gaudicheau, P., Lerat, S. (2024a). Square shallow foundation on 4 Rigid inclusions subjected to extended vertical load: centrifuge modeling. XVIII ECSMGE24, Lisbonne
- Thorel, L., Blanc, M., Neel, A., Jagu, A., Audrain, Ph., Gaudicheau, P., Lerat, S. (2024b). Expérimentations en centrifugeuse de Semelles carrées sur Inclusions Rigides sous chargement vertical excentré. Proceedings of 12<sup>e</sup> JNGG, Poitiers, France, 25-28 juin 2024.
- Thorel, L., Guerois, M., Dubreucq, Th, Blanc, M. (2024c). Étude paramétrique en centrifugeuse du recouvrement géosynthétique pour les remblais sur inclusions rigides. Proceedings of 12<sup>e</sup> JNGG, Poitiers, France, 25-28 juin 2024.
- Villard, P. (2024). Mechanical behaviour of geosynthetic sheets used to reinforce load transfer mattresses in the case of embankments on soft soils reinforced by rigid inclusions. Proceedings of the XVIII ECSMGE, Lisbon, Portugal, 26-30 August 2024.