N° d'ordre NNT : 2025ISAL0012

**THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON, membre de l'Université de Lyon**

**Ecole Doctorale** N° 162
**Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique**

**Spécialité/ Génie civil** :

Soutenue publiquement le 17/02/2025, par :
**Julien Mannah**

# Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques

Devant le jury composé de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Djeran-Maigre, Irini | Professeure | INSA Lyon/GEOMAS | Présidente |
| Cuisinier, Olivier | Professeur | Université de Lorraine | Rapporteur |
| Mroueh, Hussein | Professeur | Université de Lille | Rapporteur |
| Jenck, Orianne | Maître de conférences, HDR | Université Grenoble Alpes | Examinatrice |
| Djeran-Maigre, Irini | Professeure | INSA Lyon/GEOMAS | Examinatrice |
| Marracci, Louis | Directeur Technique | Arcadis ESG | Invité |
| Chalak, Caroline | Ingénieur | Arcadis ESG | Invitée |
| Lenoir, Thomas | Ingénieur Divisionnaire des TPE, HDR | Université Gustave Eiffel | Encadrant |
| Dias, Daniel | Professeur | Université Grenoble Alpes | Co-directeur |
| Briançon, Laurent | Professeur | INSA Lyon/GEOMAS | Directeur |

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Département de la Formation par la Recherche et des Études Doctorales (**FEDORA**)

Bâtiment Charlotte Perriand 3e étage
17, av. des Arts
69621 Villeurbanne Cédex
fedora@insa-lyon.fr

Référence : TH1201_MANNAH Julien

L'INSA Lyon a mis en place une procédure de contrôle systématique via un outil de détection de similitudes (logiciel Compilatio). Après le dépôt du manuscrit de thèse, celui-ci est analysé par l'outil. Pour tout taux de similarité supérieur à 10%, le manuscrit est vérifié par l'équipe de FEDORA. Il s'agit notamment d'exclure les auto-citations, à condition qu'elles soient correctement référencées avec citation expresse dans le manuscrit.

Par ce document, il est attesté que ce manuscrit, dans la forme communiquée par la personne doctorante à l'INSA Lyon, satisfait aux exigences de l'Etablissement concernant le taux maximal de similitude admissible.

**INSA LYON**
**Campus LyonTech La Doua**
20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne cedex - France
Tél. +33 (0)4 72 43 83 83 - Fax +33 (0)4 72 43 85 00
**www.insa-lyon.fr**

membre de UNIVERSITÉ DE LYON

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

| SIGLE | ECOLE DOCTORALE | NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE |
|---|---|---|
| ED 206<br>CHIMIE | **CHIMIE DE LYON**<br>https://www.edchimie-lyon.fr<br>Sec. : Renée EL MELHEM<br>Bât. Blaise PASCAL, 3e étage<br>secretariat@edchimie-lyon.fr | **M. Stéphane DANIELE**<br>C2P2-CPE LYON-UMR 5265<br>Bâtiment F308, BP 2077<br>43 Boulevard du 11 novembre 1918<br>69616 Villeurbanne<br>directeur@edchimie-lyon.fr |
| ED 341<br>E2M2 | **ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION**<br>http://e2m2.universite-lyon.fr<br>Sec. : Bénédicte LANZA<br>Bât. Atrium, UCB Lyon 1<br>Tél : 04.72.44.83.62<br>secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr | **Mme Sandrine CHARLES**<br>Université Claude Bernard Lyon 1<br>UFR Biosciences<br>Bâtiment Mendel<br>43, boulevard du 11 Novembre 1918<br>69622 Villeurbanne CEDEX<br>e2m2.codir@listes.univ-lyon1.fr |
| ED 205<br>EDISS | **INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ**<br>http://ediss.universite-lyon.fr<br>Sec. : Bénédicte LANZA<br>Bât. Atrium, UCB Lyon 1<br>Tél : 04.72.44.83.62<br>secretariat.ediss@univ-lyon1.fr | **Mme Sylvie RICARD-BLUM**<br>Laboratoire ICBMS - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1<br>Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord<br>43 Boulevard du 11 novembre 1918<br>69622 Villeurbanne Cedex<br>Tél : +33(0)4 72 44 82 32<br>sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr |
| ED 34<br>EDML | **MATÉRIAUX DE LYON**<br>http://ed34.universite-lyon.fr<br>Sec. : Yann DE ORDENANA<br>Tél : 04.72.18.62.44<br>yann.de-ordenana@ec-lyon.fr | **M. Stéphane BENAYOUN**<br>Ecole Centrale de Lyon<br>Laboratoire LTDS<br>36 avenue Guy de Collongue<br>69134 Ecully CEDEX<br>Tél : 04.72.18.64.37<br>stephane.benayoun@ec-lyon.fr |
| ED 160<br>EEA | **ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE**<br>https://edeea.universite-lyon.fr<br>Sec. : Philomène TRECOURT<br>Bâtiment Direction INSA Lyon<br>Tél : 04.72.43.71.70<br>secretariat.edeea@insa-lyon.fr | **M. Philippe DELACHARTRE**<br>INSA LYON<br>Laboratoire CREATIS<br>Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle<br>69621 Villeurbanne CEDEX<br>Tél : 04.72.43.88.63<br>philippe.delachartre@insa-lyon.fr |
| ED 512<br>INFOMATHS | **INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES**<br>http://edinfomaths.universite-lyon.fr<br>Sec. : Renée EL MELHEM<br>Bât. Blaise PASCAL, 3e étage<br>Tél : 04.72.43.80.46<br>infomaths@univ-lyon1.fr | **M. Hamamache KHEDDOUCI**<br>Université Claude Bernard Lyon 1<br>Bât. Nautibus<br>43, Boulevard du 11 novembre 1918<br>69 622 Villeurbanne Cedex France<br>Tél : 04.72.44.83.69<br>direction.infomaths@listes.univ-lyon1.fr |
| ED 162<br>MEGA | **MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE**<br>http://edmega.universite-lyon.fr<br>Sec. : Philomène TRECOURT<br>Tél : 04.72.43.71.70<br>Bâtiment Direction INSA Lyon<br>mega@insa-lyon.fr | **M. Etienne PARIZET**<br>INSA Lyon<br>Laboratoire LVA<br>Bâtiment St. Exupéry<br>25 bis av. Jean Capelle<br>69621 Villeurbanne CEDEX<br>etienne.parizet@insa-lyon.fr |
| ED 483<br>ScSo | **ScSo**[1]<br>https://edsciencessociales.universite-lyon.fr<br>Sec. : Mélina FAVETON<br>Tél : 04.78.69.77.79<br>melina.faveton@univ-lyon2.fr | **M. Bruno MILLY** (INSA : J.Y. TOUSSAINT)<br>Univ. Lyon 2 Campus Berges du Rhône<br>18, quai Claude Bernard<br>69365 LYON CEDEX 07<br>Bureau BEL 319<br>bruno.milly@univ-lyon2.fr |

[1] ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Résumé

La technique de renforcement des sols par inclusions rigides (IR) a connu un développement rapide au cours des dernières années. Cette technique combine des inclusions rigides verticales traversant la couche de sol compressible et une plateforme de transfert de charge (PTC) installée entre l'ouvrage et les inclusions. Ces éléments transfèrent la charge vers des horizons porteurs en pied d'inclusions sans surcharger la couche de sol compressible. L'utilisation des plateformes de transfert de charge granulaires est courante dans les projets de renforcement du sol par inclusions rigides. Cependant, l'exploitation des ressources naturelles a fortement augmenté due à la croissance démographique et l'évolution du marché de la construction d'où la nécessité de trouver des solutions alternatives afin de limiter la pression sur les ressources en matériaux granulaires. Dans ce contexte, un traitement de la couche supérieure du sol en place peut être envisagé afin de limiter le sol d'apport.

Le projet national ASIRI « Amélioration des sols par inclusions rigides » a été mené en France entre 2005 et 2011 pour proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement du renforcement de sol par IR. En 2019, un nouveau projet national (ASIRI+) a été initié pour compléter les recommandations ASIRI (2012) sur des sujets insuffisamment traités tel que celui des PTC en sol traité. Les travaux de la présente thèse intitulée « Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques » s'intègrent dans le cadre du projet national ASIRI+ et ont pour objectif d'apporter des éléments de compréhension sur les mécanismes développés au sein des plateformes sur IR et de proposer de nouvelles règles de dimensionnement. Les moyens mis en œuvre sont expérimentaux avec des essais en laboratoire à échelle 1, des caractérisations des différents traitements et des ouvrages réels instrumentés. Ces moyens sont aussi numériques par la modélisation numérique de ces renforcements de sol calibrée sur les résultats des expérimentations. Enfin, un volet environnemental complète cette étude avec une analyse de cycle de vie (ACV) qui prend en compte les impacts environnementaux des PTC granulaires et traitées.

Les essais de caractérisation en laboratoire montrent bien l'effet du traitement sur les résistances mécaniques du sol traité. Des essais de résistance à la compression, flexion, traction (essai brésilien) et au cisaillement (essais triaxiaux) sont réalisés pour évaluer les performances mécaniques du sol traité. Plusieurs essais à échelle 1 permettent de tester le comportement des PTC en sol traité sur inclusions rigides où un comportement assimilable à celui d'une dalle est observé. Deux modes de rupture « poinçonnement et flexion » sont observés dans ces essais. L'instrumentation montrent que le transfert de charge dans les PTC traitées est immédiat contrairement au cas des PTC granulaires où les mécanismes de transfert de charge sont un peu plus progressifs. L'effet de la présence d'une plateforme de travail sous les PTC traitées est aussi évalué dans ces essais. Le modèle numérique développé permet d'évaluer à travers une étude paramétrique l'effet de différents paramètres sur l'efficacité en contrainte et en tassement du système. Le schéma du cône de cisaillement (ASIRI, 2012) représente le mieux les mécanismes de transfert de charge dans la PTC traitée. La diffusion de la contrainte est assimilée à un tronc de cône, issu de la tête de l'inclusion et formant un angle φ par rapport à la verticale. Cela a été vérifiée numériquement, analytiquement et expérimentalement. L'ACV réalisée prend en compte les effets environnementaux des PTC granulaires et traitées et montre qu'une analyse multicritère est requise pour chaque projet de renforcement du sol afin d'évaluer l'impact environnemental global.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Abstract

The technique of soil reinforcement using rigid inclusions has developed rapidly in recent years. This technique combines vertical rigid inclusions passing through the compressible soil layer and a load transfer platform (LTP) installed between the structure and the inclusions. These elements transfer the load to a substratum at the base of the inclusions without overloading the compressible soil layer. The use of granular load transfer platforms is common in soil reinforcement projects using rigid inclusions. However, the exploitation of natural resources has risen sharply due to population growth and the evolution of the construction market, hence the need to find alternative solutions to limit the pressure on granular material resources. In this context, soil treatment can be considered to limit the amount of imported soil.

The national ASIRI project "Amélioration des sols par inclusions rigides" (Soil improvement using rigid inclusions) was carried out in France between 2005 and 2011 to propose rules for the implementation and dimensioning of soil reinforcement using rigid inclusions. In 2019, a new national project (ASIRI+) has been initiated to complement the ASIRI (2012) recommendations on insufficiently addressed topics such as treated load transfer platforms. This thesis, entitled "Study of the behavior of treated load transfer platforms on rigid inclusions: Experimental and numerical approaches", is part of the national ASIRI+ project, and aims to shed light on the load transfer mechanisms developed within these treated LTP, and ultimately propose design rules. The resources deployed are experimental, with laboratory full-scale tests, characterization of the various treatments and instrumentation of real structures. These resources are also numerical, with numerical modeling of these projects calibrated on the basis of experimental results. Finally, an environmental analysis completes the study with a life cycle assessment (LCA) that takes into account the environmental impacts of granular and treated load transfer platforms.

Laboratory characterization tests clearly show the effect of the treatment on the mechanical resistance of the treated soil. Compressive, flexural, tensile (Brazilian) and shear (triaxial) strength tests were carried out to assess the mechanical performance of the treated soil. Several full-scale tests were carried out to test the behavior of treated LTP on rigid inclusions, where a slab-like behavior was observed. Two failure modes, punching and bending, were observed in these tests. The instrumentation shows that load transfer in treated LTP is immediate, unlike in the case of granular platforms, where load transfer mechanisms are a little more gradual. The effect of the presence of a working platform under the treated LTP is also evaluated in these tests. The numerical model enables us to evaluate through a parametric study the effect of different parameters on the stress and settlement efficiencies of the system. The shear cone diagram (ASIRI, 2012) best represents the load transfer mechanisms in the treated LTP. Stress diffusion is assimilated to a truncated cone with a vertical axis, originating from the head of the inclusion and forming an angle $\varphi$ with respect to the vertical. This has been verified numerically (Plaxis 2D), analytically (shear cone diagram) and experimentally (measurements and observations). The LCA carried out takes into account the environmental effects of both granular and treated LTP and shows that a multi-criteria analysis is required for each soil reinforcement project in order to assess the overall environmental impact.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Table des matières

**Résumé** ..... **i**

**Abstract** ..... **ii**

**Liste des figures** ..... **viii**

**Liste des tableaux** ..... **xiii**

**Introduction** ..... **1**

**Chapitre I. Synthèse bibliographique** ..... **3**

**I.1. Renforcement du sol par inclusions rigides** ..... **3**

I.1.1. Principe de fonctionnement ..... 3

I.1.2. Présentation de la technique ..... 3

I.1.2.1. Inclusions rigides ..... 3

I.1.2.2. Plateforme de transfert de charge ..... 4

I.1.2.3. Renforcement horizontal ..... 4

I.1.2.4. Domaine d'application ..... 5

I.1.3. Méthodes de calcul ..... 6

I.1.3.1. Méthodes analytiques ..... 6

I.1.3.2. Méthodes numériques ..... 9

I.1.4. Report de charge et efficacité ..... 10

**I.2. Plateforme de transfert de charge en sol traité** ..... **11**

I.2.1. Traitement du sol ..... 11

I.2.2. Couches de forme traitées ..... 11

I.2.2.1. Evaluation de l'aptitude du sol au traitement ..... 11

I.2.2.2. Effets du traitement ..... 12

I.2.2.3. Etude des performances mécaniques ..... 13

I.2.3. Traitement sur site ..... 14

I.2.4. Connaissance actuelle : PTC traitées sur IR ..... 15

I.2.4.1. Plateformes traitées sans IR ..... 15

I.2.4.2. PTC traitées sur IR ..... 17



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

**Chapitre II. Essais en vraie grandeur du Cerema de Rouen ..... 23**

**II.1. Etude expérimentale ..... 23**

II.1.1. Objectifs ..... 23

II.1.2. Caractérisation du limon de Dieppe traité ..... 23

II.1.2.1. Site du prélèvement du matériau ..... 23

II.1.2.2. Préparation du sol ..... 23

II.1.2.3. Essais de caractérisation du sol ..... 24

II.1.2.4. Traitement du sol ..... 25

II.1.3. Dispositif expérimental ..... 35

II.1.3.1. Fosse expérimentale ..... 35

II.1.3.2. Sol compressible ..... 35

II.1.4. Mise en œuvre ..... 37

II.1.4.1. Essai 1 : sans plateforme de travail ..... 37

II.1.4.2. Essai 2 : avec plateforme de travail ..... 43

II.1.5. Instrumentation ..... 44

II.1.5.1. Capteurs ..... 44

II.1.5.2. Instrumentation de la fosse ..... 45

II.1.6. Contrôle de la PTC traitée ..... 48

II.1.6.1. Teneur en eau ..... 48

II.1.6.2. Compactage ..... 48

II.1.7. Résultats ..... 50

II.1.7.1. Essai 1 : sans plateforme de travail ..... 50

II.1.7.2. Essai 2 : avec plateforme de travail ..... 58

II.1.7.3. Comparaison des essais ..... 63

II.1.8. Conclusions ..... 67

**II.2. Modélisation numérique des essais ..... 68**

II.2.1. Présentation du modèle ..... 68

II.2.1.1. Géométrie ..... 68

II.2.1.2. Phasage des calculs ..... 69

II.2.1.3. Paramètres d'entrée ..... 70

II.2.2. Confrontation des modèles numériques et des modèles physiques ..... 72

II.2.2.1. Calage de l'essai avec PTC granulaire ..... 73

II.2.2.2. Calage de l'essai avec PTC traitée ..... 75



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3. Analyse des mécanismes ..... 78
II.2.3.1. Transfert de charge ..... 78
II.2.3.2. Mise en place du remblai : phasage ..... 80
II.2.3.3. Répartition de la charge : PTC traitée ..... 81
II.2.3.4. Diffusion de la contrainte : PTC traitée ..... 83
II.2.3.5. Plan d'égal tassement ..... 85
II.2.4. Etude paramétrique ..... 87
II.2.4.1. Cohésion ..... 87
II.2.4.2. Epaisseur ..... 87
II.2.4.3. Module d'Young ..... 88
II.2.4.4. Surcharge ..... 88
II.2.4.5. Caractéristiques du remblai ..... 89
II.2.4.6. Maillage ..... 90
II.2.4.7. Interface Deltagom-IR ..... 91
II.2.5. Conclusions ..... 93

**Chapitre III. Plateformes traitées sur IR : Applications réelles ..... 94**

**III.1. Plateforme portuaire (HAROPA) ..... 94**
III.1.1. Description du projet ..... 94
III.1.1.1. Contexte de l'étude ..... 94
III.1.1.2. Description du site ..... 94
III.1.1.3. Description des essais ..... 95
III.1.2. Caractérisation du sol traité ..... 96
III.1.2.1. Essais de caractérisation du sol ..... 96
III.1.2.2. Traitement du sol ..... 97
III.1.3. Plots expérimentaux ..... 97
III.1.3.1. Planche d'essai de traitement du sol ..... 97
III.1.3.2. Instrumentation des plots ..... 98
III.1.3.3. Plateformes de transfert de charge ..... 99
III.1.3.4. Chargement ..... 102
III.1.4. Résultats : 1ère configuration ..... 103
III.1.4.1. Etude des tassements ..... 103
III.1.4.2. Etude des mécanismes de transfert de charge ..... 104
III.1.5. Résultats : 2ème configuration ..... 106



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

III.1.5.1. Etude des tassements ..... 106
III.1.5.2. Etude des mécanismes de transfert de charge ..... 108
III.1.6. Conclusions ..... 110
**III.2. Remblai routier sur IR en Allemagne ..... 111**
III.2.1. Contexte ..... 111
III.2.2. Caractérisation du sol traité ..... 112
III.2.3. Mise en œuvre et instrumentation ..... 112
III.2.4. Résultats ..... 115
III.2.4.1. Zone 1 ..... 115
III.2.4.2. Zone 2 ..... 116
III.2.5. Conclusion ..... 116
**III.3. Digue sur IR dans la centrale de Blayais ..... 117**
III.3.1. Contexte ..... 117
III.3.2. Profil géotechnique ..... 118
III.3.3. Caractérisation du sol traité ..... 119
III.3.4. Instrumentation ..... 121
III.3.5. Mesures et analyse ..... 122
III.3.6. Conclusions ..... 124
**Chapitre IV. Etude environnementale et économique ..... 125**
**IV.1. Introduction ..... 125**
IV.1.1. Contexte de l'étude ..... 125
IV.1.2. Paramètres d'entrée ..... 126
IV.1.2.1. Dimensions ..... 126
IV.1.2.2. Formules de traitement ..... 126
IV.1.2.3. Engins ..... 127
**IV.2. Analyse de cycle de vie (ACV) ..... 128**
IV.2.1. Définition ..... 128
IV.2.2. Catégories d'impact ..... 129
IV.2.3. Outils et bases de données utilisés ..... 130
IV.2.3.1. OpenLCA ..... 130
IV.2.3.2. Ecoinvent ..... 130
IV.2.4. Méthodes d'évaluation des impacts ..... 130
IV.2.4.1. Recipe 2016 Midpoint et Endpoint ..... 131



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

IV.2.4.2. EF v3.1 ..... 131
IV.2.4.3. NF EF 15804+A2 ..... 131
IV.2.5. Diagramme de Processus ..... 132
IV.2.6. Résultats ..... 133
IV.2.6.1. PTC traitée ..... 133
IV.2.6.2. PTC granulaire ..... 134
IV.2.6.3. Etude de sensibilité ..... 134
**IV.3. Etude économique ..... 146**
IV.3.1. Scénario 1 ..... 146
IV.3.1.1. Plateforme de travail traitée ..... 146
IV.3.1.2. Plateforme de transfert de charge (PTC) traitée ..... 149
IV.3.2. Scénario 2 ..... 152
IV.3.2.1. Plateforme de travail granulaire ..... 152
IV.3.2.2. Plateforme de transfert de charge (PTC) granulaire ..... 153
IV.3.3. Comparaison ..... 155
**IV.4. Conclusions ..... 156**
**Conclusions et perspectives ..... 158**
**Références ..... 162**



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Liste des figures

Figure I-1 Principe de renforcement du sol par inclusions rigides ..... 3
Figure I-2 Renforcement horizontal dans la plateforme de transfert de charge ..... 5
Figure I-3 Schéma de principe de l'effet voûte (d'après Chevalier, 2008) ..... 6
Figure I-4 (a) Forme classique (b) Forme modifiée d'après McKelvey III (1994) ..... 7
Figure I-5 Dômes hémisphériques de Hewlett & Randolph (1988) ..... 7
Figure I-6 Mécanismes de transfert de charge par hémisphères concentriques (Van Eekelen et al., 2013 ..... 8
Figure I-7 Modélisation biphasique d'un sol renforcé par inclusions rigides (ASIRI, 2012). ..... 8
Figure I-8 Calcul d'efficacité (ASIRI, 2012) ..... 10
Figure I-9 Etude Proctor Normal-IPI du sol naturel et traité (GTS, 2000) ..... 12
Figure I-10 Zones de classement des matériaux traités ..... 14
Figure I-11 Dispositif d'amélioration de sol par IR d'après Ferber et al. (2015) ..... 18
Figure I-12 Centrifugeuse géotechnique – Université Gustave Eiffel ..... 19
Figure I-13 Dispositif expérimental ..... 19
Figure I-14 Mécanismes de transfert de charge pour le sol traité et non traité ..... 20
Figure I-15 Modèle physique bidimensionnel du matelas ..... 21
Figure I-16 Vérification au poinçonnement de la plateforme ..... 21
Figure II-1 Séchage et broyage du sol ..... 23
Figure II-2 Limon de Dieppe ..... 24
Figure II-3 Limon de Dieppe et agents de traitement utilisés ..... 25
Figure II-4 Essais Proctor et IPI ..... 26
Figure II-5 Eprouvettes pour l'essai triaxial et l'essai de flexion ..... 27
Figure II-6 Eprouvettes pour les essais mécaniques ..... 28
Figure II-7 Evolution de la résistance à la compression avec le temps de cure ..... 29
Figure II-8 Evolution de la résistance à la flexion avec le temps de cure ..... 30
Figure II-9 Evolution de la résistance à la traction avec le temps de cure ..... 30
Figure II-10 Différents modes de ruptures pour le sol naturel et le sol traité ..... 31
Figure II-11 Evolution de l'angle de frottement et de la cohésion avec la cure ..... 32
Figure II-12 Résistance à la compression / Humidification 4 jours ..... 33
Figure II-13 Rc et teneur en eau / Humidification 60 ..... 33
Figure II-14 Corrélation entre les résistances à la traction et à la compression ..... 34
Figure II-15 Fosse expérimentale du Cerema de Rouen ..... 35
Figure II-16 Caillebotis – Couche de Biocofra ..... 36
Figure II-17 Couche de Deltagom – Couche de sable ..... 36
Figure II-18 Préparation du limon de Dieppe ..... 37
Figure II-19 Distribution des sacs de chaux ..... 38
Figure II-20 Epandage de chaux ..... 38
Figure II-21 Malaxage sol-chaux ..... 38
Figure II-22 Epandage et traitement au ciment du sol ..... 39
Figure II-23 Transport du mélange à la fosse pour compactage ..... 39
Figure II-24 Préparation de la première couche du sol ..... 40
Figure II-25 Compactage de la première couche du sol traité ..... 40
Figure II-26 Plateforme traitée ..... 41



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure II-27 Mise en place du remblai ..... 41
Figure II-28 Mise en place des surcharges ..... 42
Figure II-29 Coupe transversale de l'essai 1 ..... 42
Figure II-30 Plateforme de travail traitée ..... 43
Figure II-31 Coupe transversale de l'essai 2 ..... 43
Figure II-32 Instrumentation des inclusions de la maille centrale par des capteurs de pression totale et des capteurs de force ..... 44
Figure II-33 Instrumentation de la PTC par des capteurs de pression totale et des capteurs de tassement ..... 44
Figure II-34 Instrumentation - anneaux de force ..... 45
Figure II-35 Instrumentation au niveau du Biocofra ..... 45
Figure II-36 Instrumentation au niveau du Deltagom ..... 46
Figure II-37 Instrumentation au niveau du sable ..... 46
Figure II-38 Instrumentation au niveau de la PTC ..... 47
Figure II-39 Instrumentation au niveau du remblai ..... 47
Figure II-40 Teneur en eau sur site ..... 48
Figure II-41 Vérification du compactage de la PTC traitée ..... 49
Figure II-42 Contraintes en tête des inclusions centrales ..... 50
Figure II-43 Contraintes en pied des inclusions centrales ..... 50
Figure II-44 Evolution de la contrainte ..... 51
Figure II-45 Evolution du tassement ..... 52
Figure II-46 Instrumentation de la PTC ..... 52
Figure II-47 Comportement de la PTC traitée ..... 53
Figure II-48 Comparaison de la valeur CBR équivalent de la plateforme traitée ..... 53
Figure II-49 Rupture de la plateforme traitée ..... 54
Figure II-50 Evolution du tassement en fonction du temps ..... 55
Figure II-51 Schéma de Prandtl ..... 55
Figure II-52 Cône de cisaillement ..... 56
Figure II-53 Contraintes en pied des inclusions centrales ..... 58
Figure II-54 Contraintes en tête des inclusions centrales ..... 59
Figure II-55 Evolution de la contrainte ..... 59
Figure II-56 Evolution du tassement ..... 60
Figure II-57 Instrumentation de la PTC ..... 60
Figure II-58 Comportement en flexion de la PTC ..... 61
Figure II-59 Variation de la valeur CBR après rupture ..... 61
Figure II-60 Etat final de la PTC (levé topographique) ..... 62
Figure II-61 Compactage des PTC ..... 63
Figure II-62 Contraintes en pied des inclusions ..... 64
Figure II-63 Contraintes en tête des inclusions ..... 64
Figure II-64 Tassement des PTC à la fin des essais ..... 65
Figure II-65 Mesure de la déformée des plateformes lors du démontage ..... 66
Figure II-66 Comportement du Deltagom ..... 66
Figure II-67 Dissolution non uniforme du Biocofra sous le Deltagom ..... 68
Figure II-68 (a) coupe en vue (b) modèle numérique - PTC granulaire ..... 69
Figure II-69 (a) coupe en vue (b) modèle numérique - PTC en sol traité ..... 69
Figure II-70 Essai œdométrique - Deltagom ..... 70
Figure II-71 Comparaison des contraintes ..... 73



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure II-72 Comparaison des tassements ..... 73
Figure II-73 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation du module du Deltagom ..... 74
Figure II-74 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation des paramètres du sable, du remblai et de la PTC ..... 74
Figure II-75 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation des paramètres de l'interface IR-sol ..... 75
Figure II-76 Comparaison des contraintes et des tassements du deuxième essai (PTC traitée sans plateforme de travail) – paramètres initiaux de la PTC traitée ..... 75
Figure II-77 Comparaison des contraintes et des tassements du deuxième essai (PTC traitée sans plateforme de travail) après calibration ..... 76
Figure II-78 Comparaison des contraintes après calibration ..... 76
Figure II-79 Comparaison des tassements après calibration ..... 77
Figure II-80 Evolution de la contrainte verticale – PTC granulaire ..... 78
Figure II-81 Evolution de la contrainte verticale et du poids de la colonne au-dessus d'une IR – PTC granulaire ..... 78
Figure II-82 Evolution de la contrainte verticale – PTC traitée ..... 79
Figure II-83 Evolution de la contrainte verticale et du poids de la colonne au-dessus d'une IR – PTC granulaire ..... 79
Figure II-84 Effets du phasage de calcul sur les contraintes et les tassements ..... 80
Figure II-85 Répartition de la charge au niveau de la PTC traitée (a) numériquement (b) expérimentalement ..... 81
Figure II-86 Répartition de la charge au niveau du sol (a) numériquement (b) expérimentalement ..... 82
Figure II-87 Observations après démontage de l'essai et estimation du schéma de diffusion de la contrainte ..... 83
Figure II-88 Diffusion de la contrainte selon la méthode (a) numérique, (b) analytique et (c) expérimentale ..... 84
Figure II-89 Schéma d'équilibre - cône de cisaillement ..... 85
Figure II-90 Tassement au sein du remblai ..... 85
Figure II-91 Plan d'égal tassement ..... 86
Figure II-92 Evolution des efficacités en fonction de la cohésion de la PTC ..... 87
Figure II-93 Evolution des efficacités en fonction de l'épaisseur de la PTC ..... 88
Figure II-94 Evolution des efficacités en fonction du module de la PTC ..... 88
Figure II-95 Evolution des efficacités en fonction des surcharges ..... 89
Figure II-96 Evolution des efficacités en fonction des paramètres du remblai ..... 89
Figure II-97 Evolution de la contrainte en tête de la PTC en fonction de la qualité du remblai ..... 90
Figure II-98 Evolution des efficacités en fonction du maillage ..... 91
Figure II-99 Evolution des efficacités en fonction de $q_s$ ..... 91
Figure II-100 Evolution de la contrainte en pied de l'inclusion en fonction de $q_s$ ..... 92
Figure III-1 Zone de l'essai ..... 95
Figure III-2 Plots expérimentaux ..... 95
Figure III-3 Implantation des inclusions ..... 96
Figure III-4 Planche d'essai ..... 98
Figure III-5 Site de l'essai ..... 98
Figure III-6 Instrumentation du plot. ..... 99



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure III-7 Instrumentation des semelles de chargement ..... 99
Figure III-8 Couche de sable et grillage avertisseur ..... 100
Figure III-9 Plateforme mixte ..... 100
Figure III-10 Plateforme traitée ..... 101
Figure III-11 Différentes phases du traitement du sol ..... 101
Figure III-12 Système poutre/vérin pour l'application de la charge ..... 102
Figure III-13 Cycles de chargement ..... 102
Figure III-14 Tassement de la semelle/1ère configuration ..... 103
Figure III-15 Comportement des plateformes/1ère configuration ..... 104
Figure III-16 Report de charge ..... 105
Figure III-17 Répartition de la charge ..... 105
Figure III-18 Efficacité globale/1ère configuration ..... 106
Figure III-19 Tassement de la semelle/2ème configuration ..... 107
Figure III-20 Comportement des plateformes/2ème configuration ..... 107
Figure III-21 Report de charge/2ème configuration ..... 108
Figure III-22 Répartition de la charge ..... 109
Figure III-23 Efficacité globale/2ème configuration ..... 109
Figure III-24 B247- Mühlhausen ..... 111
Figure III-25 Remblai BW12 ..... 112
Figure III-26 Mise en place de la plateforme traitée ..... 113
Figure III-27 Renforcement du sol par inclusions rigides ..... 113
Figure III-28 Instrumentation par des capteurs de pression ..... 114
Figure III-29 Centrale d'acquisition ..... 114
Figure III-30 Evolution des contraintes – zone 1 ..... 115
Figure III-31 Evolution des contraintes – zone 2 ..... 116
Figure III-32 Coupe transversale de la digue ..... 117
Figure III-33 Profil géotechnique ..... 118
Figure III-34 Coupe transversale de la digue ..... 118
Figure III-35 Evolution de l'angle de frottement ..... 119
Figure III-36 Evolution de la cohésion ..... 120
Figure III-37 Réalisation de la planche d'essai, VINCI ..... 120
Figure III-38 Instrumentation du site ..... 121
Figure III-39 Instrumentation par des capteurs de tassement ..... 121
Figure III-40 Centrale d'acquisition ..... 122
Figure III-41 Evolution de la contrainte ..... 122
Figure III-42 Evolution du tassement à l'altitude des têtes des inclusions ..... 123
Figure III-43 Evolution du tassement à 50 cm au-dessus des têtes des inclusions ..... 123
Figure III-44 Evolution du tassement à 100 cm au-dessus des têtes des inclusions ..... 124
Figure IV-1 Phases de construction ..... 125
Figure IV-2 Mise en œuvre des PTC ..... 126
Figure IV-3 Résistance à la compression à 28 jours de cure ..... 127
Figure IV-4 Les étapes de l'ACV ..... 128
Figure IV-5 Méthode Recipe 2016 ..... 131
Figure IV-6 Type de DEP en fonction des étapes du cycle de vie concernées et étapes du cycle de vie et modules pour l'évaluation des ouvrages de construction – Source : NF EN 15804+A2 ..... 132
Figure IV-7 Diagramme de processus ..... 132



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure IV-8 Scores d'impact pour la PTC traitée avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1 ..... 133
Figure IV-9 Scores d'impact pour la PTC granulaire avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1 ..... 134
Figure IV-10 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1 ..... 136
Figure IV-11 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint ..... 136
Figure IV-12 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint ..... 137
Figure IV-13 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2 ..... 138
Figure IV-14 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1 ..... 139
Figure IV-15 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint ..... 139
Figure IV-16 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint ..... 140
Figure IV-17 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2 ..... 141
Figure IV-18 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2 ..... 142
Figure IV-19 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2 ..... 143
Figure IV-20 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1 ..... 144
Figure IV-21 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint ..... 144
Figure IV-22 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint ..... 145
Figure IV-23 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2 ..... 145
Figure IV-24 Coût total de réalisation des PTC ..... 155



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Liste des tableaux

Tableau I-1 Essais d'aptitude au traitement du sol ..... 11
Tableau I-2 Indice portant immédiat (IPI) minimal à obtenir ..... 13
Tableau I-3 Exigences requises pour les performances mécaniques d'un sol traité .... 13
Tableau II-1 Essais de caractérisation du limon de Dieppe ..... 24
Tableau II-2 Formules de traitement ..... 26
Tableau II-3 Proctor et IPI du sol naturel et des sols traités ..... 26
Tableau II-4 Résistances à la compression (MPa) en fonction du temps de cure ..... 29
Tableau II-5 Résistances à la flexion (MPa) en fonction du temps de cure ..... 29
Tableau II-6 Résistances à la traction (MPa) en fonction du temps de cure ..... 31
Tableau II-7 Cohésion (kPa) en fonction du temps de cure ..... 32
Tableau II-8 Paramètres d'entrée – Schéma de Prandtl ..... 56
Tableau II-9 Paramètres d'entrée – cône de cisaillement ..... 56
Tableau II-10 Contraintes limites calculées et mesurées ..... 57
Tableau II-11 Phases de calcul ..... 70
Tableau II-12 Paramètres d'entrées ..... 71
Tableau II-13 Résultats expérimentaux – Contrainte ..... 72
Tableau II-14 Résultats expérimentaux – Tassement ..... 72
Tableau II-15 Paramètres choisis après calibration des modèles ..... 76
Tableau II-16 Charge totale sur une maille élémentaire au niveau de la PTC traitée .. 81
Tableau II-17 Charge totale sur une maille élémentaire au niveau du sol ..... 82
Tableau II-18 Calcul de la base du cône de diffusion selon les différentes méthodes . 84
Tableau II-19 Maillages testés ..... 90
Tableau III-1 Essais de caractérisation du sol ..... 96
Tableau III-2 Proctor et IPI du sol naturel et traité ..... 97
Tableau III-3 Evolution des résistances mécaniques du sol traité à 7 jours ..... 97
Tableau III-4 Organisation de la planche d'essai ..... 98
Tableau III-5 Essais de caractérisation du sol traité et non traité ..... 112
Tableau III-6 Paramètres du remblai routier - zone 1 ..... 115
Tableau III-7 Essais de caractérisation du sol ..... 119
Tableau IV-1 Dimensions des plateformes ..... 126
Tableau IV-2 Rendement des engins ..... 127
Tableau IV-3 Catégories d'impact de la méthode EF v3.1 ..... 129
Tableau IV-4 Paramètres d'entrée de la PTC traitée ..... 133
Tableau IV-5 Paramètres d'entrée de la PTC granulaire ..... 134
Tableau IV-6 Paramètres d'entrée (étude de sensibilité qui porte sur la distance de transport du gravier) ..... 135
Tableau IV-7 Paramètres d'entrée (étude de sensibilité sur le type de ciment) ..... 138
Tableau IV-8 Formules de traitement ..... 141
Tableau IV-9 Composition des liants de traitement ..... 141
Tableau IV-10 Paramètres de l'étude de sensibilité qui porte sur le renforcement par géosynthétiques ..... 143
Tableau IV-11 Tarifs des essais d'identifications du sol ..... 146
Tableau IV-12 Coût de location des engins avec chauffeur ..... 147
Tableau IV-13 Tarifs des essais de caractérisation mécanique du sol ..... 147



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-14 Quantité des liants de traitement ..... 147
Tableau IV-15 Prix total de la chaux ..... 148
Tableau IV-16 Coût total de la plateforme de travail traitée ..... 148
Tableau IV-17 Coût de location des engins avec chauffeur ..... 149
Tableau IV-18 Formules de traitement testées ..... 149
Tableau IV-19 Tarifs des essais de caractérisation mécanique du sol traité ..... 150
Tableau IV-20 Quantité de liants de traitement ..... 150
Tableau IV-21 Coût total des liants de traitement ..... 151
Tableau IV-22 Coût total des PTC traitées ..... 151
Tableau IV-23 Coût de location des engins avec chauffeur ..... 152
Tableau IV-24 Plateforme de travail (gravier 0/31,5) ..... 152
Tableau IV-25 Prix total du gravier ..... 153
Tableau IV-26 Coût total de la plateforme de travail granulaire ..... 153
Tableau IV-27 Coût de location des engins avec chauffeur ..... 153
Tableau IV-28 Quantité des matériaux granulaires ..... 154
Tableau IV-29 Prix total des matériaux granulaires ..... 154
Tableau IV-30 Coût total des PTC granulaires ..... 154
Tableau IV-31 Formules de traitement ..... 155
Tableau IV-32 Coût total de réalisation des PTC ..... 155



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Introduction

La technique de renforcement des sols par inclusions rigides a connu un développement rapide au cours des dernières années. Son domaine d'application est largement étendu pour couvrir de nombreux ouvrages grâce à ses nombreux avantages : réduction des tassements, amélioration de la capacité portante et de la résistance des sols, rapidité de mise en œuvre ainsi que les effets écologiques et environnementaux significatifs résultant du maintien en place du sol compressible. Cette technique consiste à mettre en œuvre des inclusions, généralement en béton, dans le sol compressible jusqu'à un horizon porteur, surmontés par une couche de sol granulaire appelée « Plateforme de transfert de charge » ou « matelas » qui assure le transfert d'une partie de la charge appliquée en surface vers les inclusions rigides.

L'utilisation des plateformes de transfert de charge granulaires est assez courante dans les projets de renforcement du sol par inclusions rigides. Cependant, l'exploitation des ressources naturelles a fortement augmenté due à la croissance démographique et l'évolution du marché de la construction d'où la nécessité de trouver une solution alternative afin de limiter la pression sur les ressources en matériaux granulaires. Dans ce contexte, le traitement du sol en place peut être envisagé pour améliorer ses caractéristiques, le rendre utilisable en PTC et limiter le sol d'apport.

Le projet national ASIRI « Amélioration des sols par inclusions rigides » a été mené en France entre 2005 et 2011 pour proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement du renforcement de sol par inclusions rigides. 39 entreprises et partenaires académiques ont participé à ce projet pour un budget total de 2,9 M€, aboutissant après 6 ans de travail à la rédaction des recommandations ASIRI, 2012.

Après cinq années d'utilisation des recommandations ASIRI 2012, la profession a ressenti le besoin d'apporter des compléments pour aborder certains points non traités (ouvrages soumis à des sollicitations complexes, comportement des plateformes en sol traité, comportement des nappes géosynthétiques dans les PTC granulaires …). C'est pourquoi le projet national ASIRI+ a été initié en 2019 et a rassemblé 43 entreprises et institutions académiques pour un budget de 2,0 M€. Ce projet a été élaboré autour de trois axes principaux :

- Axe 1 : l'étude des plateformes de transfert de charge.
- Axe 2 : le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ou inclinées.
- Axe 3 : le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamique et sismiques.

Cette thèse, intitulée « Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques », est une thèse cifre réalisée en collaboration entre l'INSA de Lyon et la société ARCADIS ESG. Cette collaboration m'a permis de combiner la recherche académique avec son application en bureau d'études géotechniques et d'ancrer mes travaux de recherche dans des problématiques concrètes. La confiance que m'a accordée la société ARCADIS ESG, ainsi que le soutien constant, l'encadrement et les ressources mises à disposition, ont été essentiels à la réussite de cette recherche. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans l'axe 1 du projet national ASIRI+. Grâce à ce projet national et aux contacts avec de nombreux experts, j'ai pu acquérir une expertise en expérimentation, en modélisation numérique et en analyse du cycle de vie (ACV) à travers une étude programmée pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de charge dans les plateformes en sol traité sur inclusions rigides.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette étude comporte :

- Un volet expérimental en laboratoire avec des essais de caractérisation des sols et des essais de résistance mécanique pour les différents traitements envisagés.
- Un volet expérimental avec des ouvrages instrumentés et des essais en vraie grandeur :
    a. Essais en vraie grandeur dans une fosse expérimentale du Cerema de Rouen.
    b. Essais en vraie grandeur sur un site du port HAROPA de Rouen.
    c. Instrumentation d'une digue sur inclusions rigides (centrale nucléaire du Blayais).
    d. Instrumentation d'un remblai routier sur inclusions rigides (B247 – Mühlhausen).
- Un volet numérique avec des modélisations éléments finis (Plaxis 2D).
- Un volet environnemental avec une analyse du cycle de vie (ACV) qui prend en compte les impacts environnementaux des plateformes de transfert de charge granulaires et en sol traité.

Les essais de caractérisation du laboratoire, les essais en vraie grandeur, les ouvrages instrumentés et la modélisation numérique permettront de tester de nombreuses configurations afin d'analyser finement les mécanismes de transfert de charge dans les plateformes en sol traité et d'évaluer la contribution de chaque élément. L'objectif principal de cette thèse est donc de proposer des règles de dimensionnement des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides et d'avoir une vue globale de l'efficacité de ces plateformes ainsi que de leurs impacts économiques et environnementaux.

Cette thèse se décompose en 4 chapitres :

Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art où une étude bibliographique est faite sur la technique du renforcement du sol par inclusions rigides, le traitement du sol et les plateformes de transfert de charge en sol traité en présentant les différents aspects de ces techniques, les méthodes de calcul, les domaines d'application et les reconnaissances actuelles.

Le deuxième chapitre présente des essais en vraie grandeur réalisés dans la fosse expérimentale de Cerema-Rouen ainsi que la modélisation numérique de ces essais. Ce chapitre présente une étude qui permet d'améliorer la compréhension des mécanismes de transfert de charge dans les PTC traitées.

Le troisième chapitre est consacré aux applications réelles des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides, en présentant deux ouvrages instrumentés à la centrale nucléaire du Blayais et sur la route fédérale B247 de Mühlhausen en Allemagne et des essais réalisés sur un site du port HAROPA de Rouen sur différents types de plateformes de transfert de charge sur inclusions rigides.

Le quatrième chapitre présente une analyse de cycle de vie (ACV) et une étude économique dans le but d'évaluer les effets environnementaux et économiques des plateformes de transfert de charge granulaires et traitées.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Chapitre I. Synthèse bibliographique

## I.1. Renforcement du sol par inclusions rigides

### I.1.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des inclusions rigides est présenté à la Figure 1-1. La charge en surface est transmise au niveau du substratum à travers le système formé par la plateforme de transfert de charge et les inclusions rigides. Des renforcements horizontaux (géotextiles, géogrilles, treillis soudés) peuvent être ajoutés au sein du matelas dans le but d'améliorer l'efficacité de cette technique. Le transfert de charge se fait par cisaillement dans la plateforme et par frottement négatif le long des inclusions rigides. Ce mécanisme permet de réduire les tassements, limiter la charge transmise au sol compressible et améliorer la capacité portante du sol.

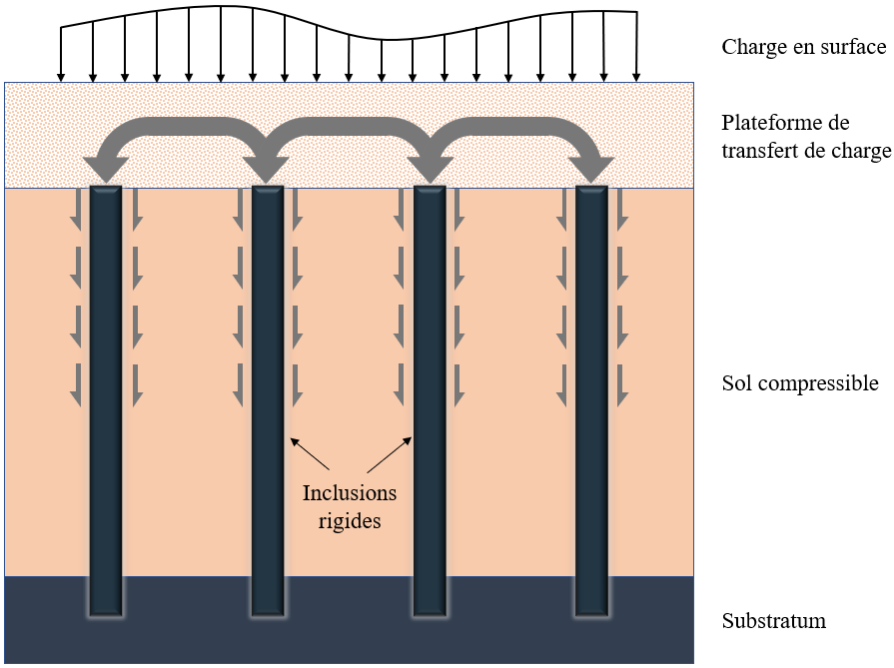



Figure I-1 Principe de renforcement du sol par inclusions rigides

### I.1.2. Présentation de la technique

L'utilisation des inclusions rigides est un procédé très ancien. On trouve des ouvrages sur IR datés de l'époque romaine où ils utilisaient des pieux en bois dans les travaux de construction. Cette technique a connu un développement remarquable depuis les années 70 et surtout dans les pays scandinaves mais ce n'est que depuis une trentaine d'années que son utilisation en France est devenue de plus en plus courante (Briancon et al., 2020; Nancey & Briancon, 2010). Le fonctionnement de cette technique dépend des différents éléments constitutifs présentés dans les paragraphes suivants.

#### I.1.2.1. Inclusions rigides

Les inclusions rigides, disposées dans le sol compressible, permettent le transfert des charges vers le substratum porteur par différents mécanismes. Une part de la charge est



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

directement transmise sur les têtes des inclusions rigides par des mécanismes de cisaillement à l'intérieur de la plateforme. Le frottement latéral se développe tout le long de l'inclusion dû aux tassements différentiels entre le sol compressible et l'inclusion. Des dalettes peuvent être mises en place pour augmenter la surface d'influence de chaque inclusion et réduire donc le risque du poinçonnement au niveau de la plateforme.

Il existe plusieurs types d'inclusions rigides qui peuvent être classés en deux grandes familles : les inclusions préfabriquées et les inclusions réalisées en place.

1. Inclusions préfabriquées :

- Pieux en bois : l'une des plus anciennes méthodes utilisées (pieux battus chez les Romains). Bien que ce soit une solution éco-responsable, elle présente plusieurs inconvénients : faible capacité portante, vulnérabilité au battage violent et aux nappes phréatiques, limite de longueur … Il existe des recommandations suédoises sur les IR en bois qui sont très utilisés en Asie et dans les pays nordiques.
- Pieux métalliques : constitués souvent de profilés métalliques de type H, ils présentent de nombreux avantages (installation rapide, grande capacité portante, impact environnemental minimal …). Cependant, cette solution est parfois rejetée due au risque de corrosion dans le cas des conditions défavorables.
- Pieux en béton préfabriqué : ce type d'inclusion peut être utilisé pour une grande variété d'ouvrages vu ses nombreux avantages (résistance à la corrosion, grande capacité portante …) mais ils sont limités en longueur pour des raisons de transport et nécessite d'être armés.

2. Inclusions construites in situ :

- Inclusions forées à la terrière creuse (non refoulantes) : un forage au diamètre de l'inclusion est réalisé en excavant le sol puis le béton est coulé pour remplir le forage et constituer l'inclusion.
- Inclusions vissées (refoulantes) : ce procédé consiste à introduire dans le sol une tarière refoulante jusqu'à la profondeur souhaitée et couler le béton en remontant l'outil.
- Colonne de soil mixing : il consiste à réaliser des inclusions où le sol en place est mélangé avec un liant.

### I.1.2.2. Plateforme de transfert de charge

La plateforme de transfert de charge est une couche de sol d'apport située normalement entre les inclusions rigides et l'ouvrage. Elle assure la transition de la charge répartie en surface à une charge concentrée au droit des inclusions rigides par effets de cisaillement. Cette plateforme est généralement constituée de matériaux granulaires ou des matériaux dits « nobles » comme les graves et les ballasts (Chevalier, 2008; Girout et al., 2013). Cependant, il peut être pertinent d'utiliser des techniques de traitement du sol in situ, qui consistent à incorporer des agents de traitements dans les sols, normalement de faible portance, afin d'améliorer leurs propriétés et leurs performances mécaniques à court et à long terme. La plateforme traitée est perçue comme une solution plus économique qui permet de réutiliser le sol en place et réduire les déchets, à titre d'exemple, une plateforme granulaire construite en Ile-de-France coûte 40% plus cher qu'une plateforme en sol traité (Cabane, 2004).

### I.1.2.3. Renforcement horizontal

Le renforcement horizontal au niveau de la plateforme de transfert de charge granulaire consiste à utiliser des nappes géosynthétiques (géotextile, géogrille ou treillis soudés) qui se



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

mettent en tension en cas de grandes déformations et favorisent ainsi les mécanismes de transfert de charge.

Le renforcement horizontal peut être classé en 2 familles (Figure 1-2) :

- Un ou plusieurs géosynthétiques sur les têtes des inclusions qui assurent par effet membrane le transfert de charge.
- Un ou plusieurs géosynthétiques placés au sein du matelas (Combarieu et al., 1994) (Adams & Collin, 1997) qui ont pour but d'augmenter la rigidité de la plateforme et améliorer le transfert de charge vers les inclusions rigides.

Cependant, il n'existe pas des études qui permettent de choisir le type, le nombre et la position des géosynthétiques, d'où l'intérêt du projet national ASIRI+.

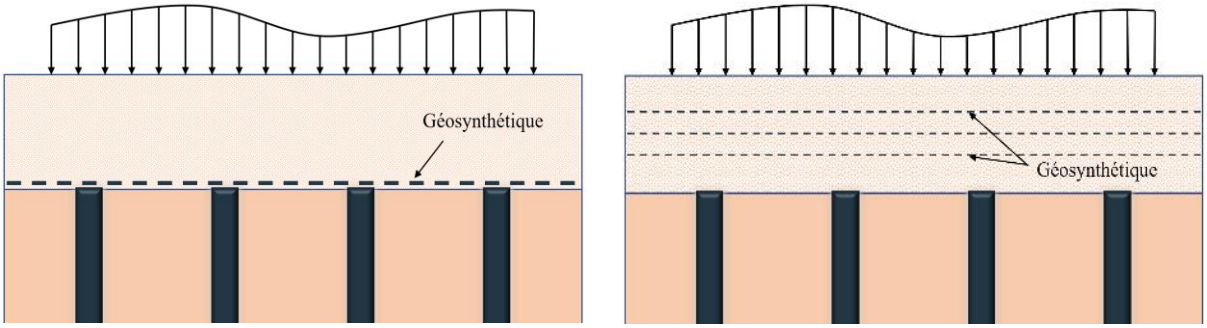



Figure I-2 Renforcement horizontal dans la plateforme de transfert de charge

### I.1.2.4. Domaine d'application

La technique de renforcement du sol par inclusions rigides a connu un développement remarquable pendant les dernières années et son domaine d'application est largement étendu en France et à l'étranger. On trouve dans la littérature de nombreuses applications pour cette technique :

- Les remblais routiers ou ferroviaires qui constituent un grand domaine d'application pour les sols renforcés par inclusions rigides. Cette technique permet de réduire la durée du chantier en limitant le tassement différentiel.
- Les dallages et les fondations des bâtiments industriels et commerciaux qui sont exposés à des charges localisées importantes (voies de roulement, stockage …) d'où la nécessité de minimiser le tassement différentiel entre les fondations et les dallages.
- Les bassins, les ouvrages de station d'épuration et les réservoirs de stockage qui sont caractérisés par des fortes variations de charge à cause de la vidange et du remplissage des réservoirs, pour cela les tassements admissibles doivent être bien contrôlés.
- Les ouvrages en zones sismiques où les plateformes de transfert de charge peuvent jouer un rôle important dans la dissipation d'énergie. C'est le principe utilisé pour la construction du pont de Rion-Antirion.
- Les fondations des éoliennes soumises à des charges cycliques puissantes (parc éolien des Tulipes situé dans la Somme – Menard)



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## I.1.3. Méthodes de calcul

Les méthodes de dimensionnement trouvées dans la littérature traitent le cas des remblais et des matelas granulaires sur inclusions rigides. Il n'existe aucune méthode pour les matelas constitués de matériaux traités ou cohérents, d'où la nécessité de mener des actions de recherche supplémentaires pour bien comprendre les mécanismes de transfert de charge et proposer des règles de dimensionnement.

Cette partie vise à présenter brièvement les méthodes actuelles de dimensionnement et d'évaluation des transferts de charge pour les remblais et les matelas granulaires qui sont basées sur les méthodes analytiques développées à partir des études expérimentales. Ces méthodes permettent de déterminer le report de charge vers les inclusions rigides et l'efficacité du système.

### I.1.3.1. Méthodes analytiques

Il existe trois grandes familles de méthodes de dimensionnement pour les PTC granulaires et les remblais :

- Cisaillement de bloc :

Terzaghi (1943) a proposé une méthode analytique 2D pour estimer l'effet de voûte dans les sols. Il a décrit le comportement d'un sol soumis à un tassement différentiel à sa base en écrivant la relation d'équilibre vertical d'une tranche élémentaire glissante au sein d'un massif fixe (Figure 1-3).

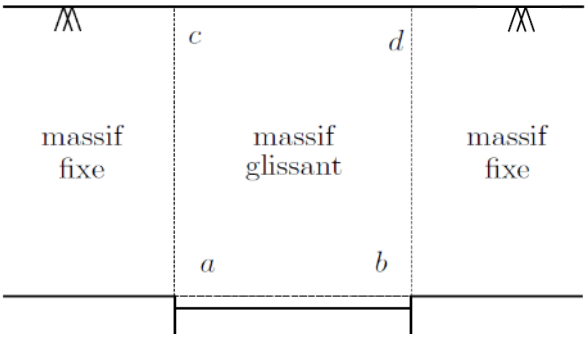



Figure I-3 Schéma de principe de l'effet voûte (d'après Chevalier, 2008)

Les travaux de (Handy, 1985) sont basés sur le concept de (Terzaghi, 1943) mais avec une forme de tranche de sol élémentaire modifiée. McKelvey III (1994) a proposé d'utiliser le coefficient $K_w$ de (Handy, 1985) dans la formule de Terzaghi pour calculer la contrainte résiduelle dans le sol compressible. Russel & Pierpoint (1997) ont adapté la méthode de Terzaghi au cas tridimensionnel. La forme classique de la tranche de sol élémentaire et la forme modifiée de McKelvey III (1994) sont présentées à la Figure 1-4 :



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

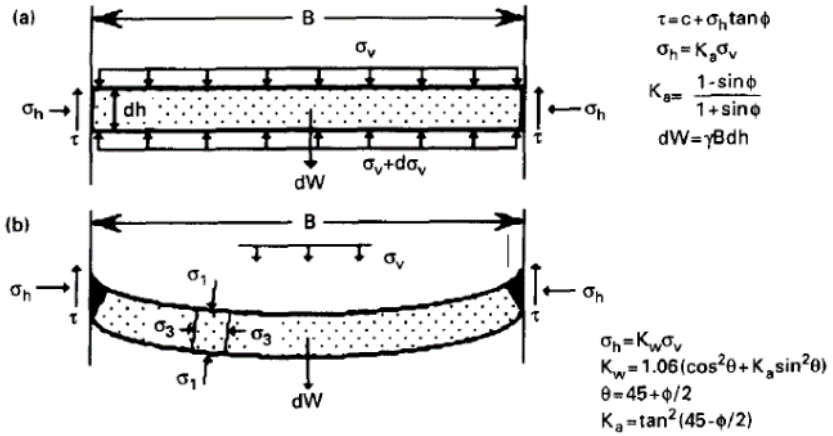



Figure I-4 (a) Forme classique (b) Forme modifiée d'après McKelvey III (1994)

- Effet de voute :

Hewlett & Randolph (1988) ont supposé qu'au sein d'une plateforme granulaire, le transfert de charge se fait selon un dôme hémisphérique en appui sur les têtes des inclusions (Figure 1-5). Low et al. (1994) ont développé l'approche de (Hewlett & Randolph, 1988) pour le problème bidimensionnel en tenant compte de la non uniformité de charge sur le sol. Les travaux de (Kempfert et al., 1999) et (Zaeske & Kempfert, 2002) sont à l'origine des recommandations allemandes (EBGEO, 2004). Ils ont proposé un modèle de transfert de charge basé sur des effets voûte de forme hémisphérique mais dont les surfaces supérieures et inférieures ne sont pas concentriques.

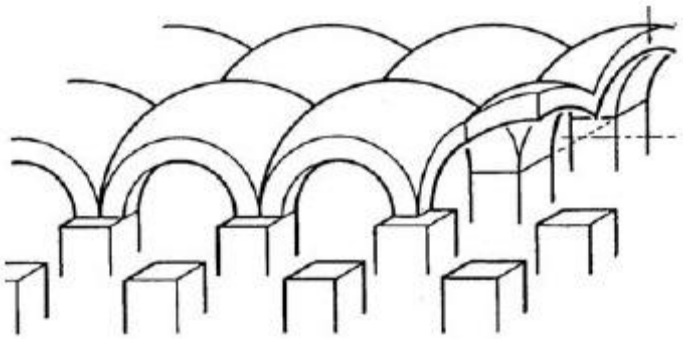


Figure I-5 Dômes hémisphériques de Hewlett & Randolph (1988)

Combarieu (1974, 1988) a proposé une méthode de dimensionnement globale tenant en compte la réaction du sol compressible. Il a fait l'hypothèse que l'inclusion rigide se prolonge fictivement avec le même diamètre dans la plateforme de transfert de charge et que l'effet de voûte se développe dès que le sol compressible tasse plus que l'inclusion rigide.

En se basant sur cette méthode et sur les lois de mobilisation du frottement et du terme de pointe (Frank & Zhao, 1982), Simon (2001) a proposé une approche pour le renforcement sous dallage qui a été intégrée dans le logiciel de calcul des fondations FOXTA. Finalement, Combarieu (2007) a étendu sa méthode, proposée en 1988. Il a remarqué qu'un plan d'égal tassement apparait au-dessus des têtes des inclusions à une distance appelée « Hauteur active ». Ce dernier modifie l'expression de la contrainte résiduelle calculée en 1988.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les travaux (Abusharar et al., 2008) sont basés sur l'étude de (Low et al., 1994) en tenant compte du tassement différentiel du sol compressible. Chen et al. (2008) ont proposé une méthode basée sur un équilibre proche de celui de (Terzaghi, 1943) pour calculer la contrainte verticale dans le remblai sans tenant compte de l'influence du géosynthétique. Van Eekelen et al. (2013) ont proposé un modèle de transfert de charge tridimensionnel par arches hémisphériques concentriques (Figure 1-6).

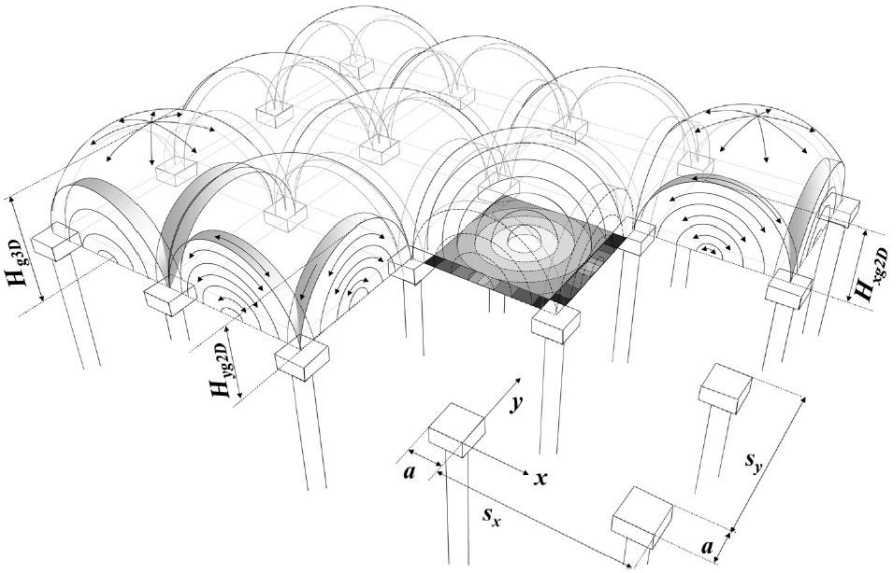



Figure I-6 Mécanismes de transfert de charge par hémisphères concentriques (Van Eekelen et al., 2013

- Biphasique :

S'inspirant d'une approche par homogénéisation, la modélisation biphasique d'un sol renforcé par inclusions rigides (Cartiaux et al., 2007; Sudret & De Buhan, 2001) peut être simplifiée en se limitant au principe illustré à la Figure 1-7. On considère le groupe « sol renforcé » modélisé à l'échelle macroscopique comme deux milieux continus nommés « phases » en interaction mutuelle et non comme un seul milieu comme dans l'approche par homogénéisation. Une telle modélisation aboutit à une description des contraintes relatives à chacune des phases prise séparément. Dans le cas d'un sol renforcée par IR, soumise à une surcharge verticale uniforme, la modélisation biphasique est équivalente à l'approche simplifiée développée dans l'outil de calcul Taspie+ (Cuira & Simon, 2009).

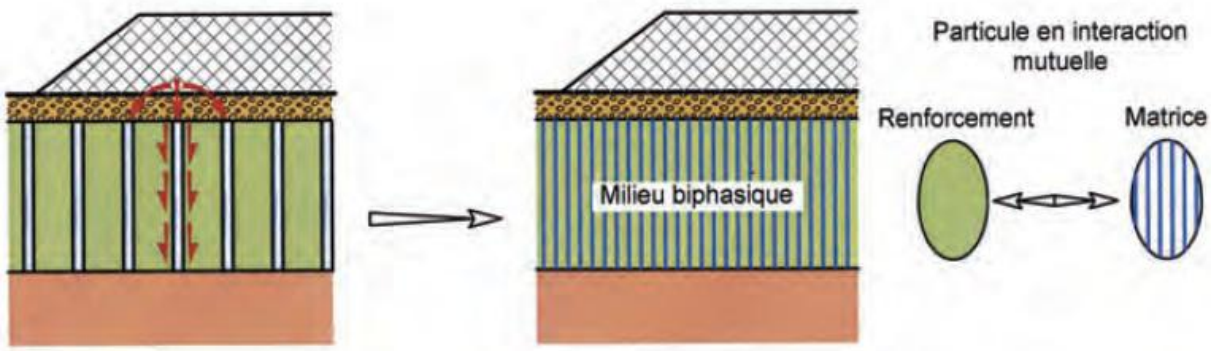



Figure I-7 Modélisation biphasique d'un sol renforcé par inclusions rigides (ASIRI, 2012).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

La méthode biphasique prend en compte les efforts axiaux, tranchants et les moments fléchissants pour la phase de renforcement du sol ce qui peux inclure la cohésion du sol et donc, utiliser cette méthode pour le cas des PTC traitées. Généralement, les méthodes de calcul présentées ci-dessus sont limitées aux cas des remblais et des PTC granulaires et ne sont pas appliquées pour le cas des plateformes en sol traité, d'où la nécessité de mieux comprendre les mécanismes de transfert de charge et proposer des règles de dimensionnement des PTC traitées.

#### I.1.3.2. Méthodes numériques

Il existe plusieurs outils et méthodes numériques pour décrire le comportement global du système du sol renforcé par inclusions rigides, parmi lesquels on cite des méthodes numériques en continuum (éléments finis et différences finies) qui connaissent un développement notable en France et à l'étranger dû à la versatilité des logiciels d'éléments finis comme Plaxis, CESAR LCPC ou différences finies comme FLAC.

Les projets de renforcement du sol par inclusions rigides sont généralement modélisés par des modèles 2D : modèle plan ou modèle axisymétrique pour représenter une maille élémentaire ou des modèles 3D. Ces approches présentent toutefois des limitations. Dans le cas d'un modèle plan, l'inclusion est représentée d'une manière peu réaliste alors que dans le modèle axisymétrique, les reports de charge sont imparfaitement modélisés, ce n'est que les modèles 3D qui présentent les meilleurs avantages puisqu'ils prennent en compte toutes les interactions, des chargements complexes et des lois de comportement plus diverses. Leur limitation est basée essentiellement sur le temps de calcul et de préparation.

Il existe peu d'exemples sur la modélisation numérique des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides. Okyay & Dias (2012) ont réalisé des essais en modèle réduit en centrifugeuse avec le dispositif du plateau mobile sur des plateformes granulaires et traitées sur inclusions rigides dans le cadre du PN ASIRI. Ils ont modélisé les essais en utilisant un modèle bidimensionnel axisymétrique centré autour d'une inclusion. Ils ont utilisé une loi de comportement hyperbolique de type élastoplastique avec un mécanisme d'écrouissage pour le matelas granulaire. Cette loi était capable de reproduire correctement le comportement du mélange de sable pour des niveaux de déformation inférieurs à 4%. Ils ont utilisé une loi élastique linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb pour la PTC traitée, cette loi de comportement était suffisante pour reproduire les mécanismes de transfert de charge dans le matelas traité.

Anggraini et al. (2015) ont étudié le comportement d'une PTC traitée sur inclusions rigides. Un modèle numérique simplifié plan a été réalisé avec ABAQUS CAE 6.11. Une loi linéaire élastique est utilisé pour les IR avec des interfaces inclusions-sol qui suivent la loi de Mohr Coulomb. Un modèle constitutif élastique linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb a été utilisé pour simuler les PTC traitées. Les résultats du tassement différentiel des modèles numériques étaient cohérents avec les résultats expérimentaux, donc le modèle numérique peut être utilisé pour une étude paramétrique afin d'observer l'effet des différents paramètres du sol sur la plateforme et sur l'efficacité du système.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### I.1.4. Report de charge et efficacité

L'efficacité des plateformes de transfert de charge est exprimée par le taux de réduction de contrainte SRR et l'efficacité du système E.

Soit Q la charge appliquée à la surface de la plateforme de transfert de charge, γ le poids volumique apparent du sol constituant le matelas et $H_R$ l'épaisseur de la plateforme. La charge moyenne appliquée sur la base de la plateforme est alors calculée selon la formule suivante :

$q^* = (\gamma . H_R + Q) = (W + Q)$

L'instrumentation des chantiers, des sites de travail et des essais en vraie grandeur par des capteurs de force et de tassement est très importante pour déterminer l'efficacité et le report de charge au niveau des inclusions. Cette instrumentation permet de déterminer la contrainte verticale appliquée au droit des têtes des inclusions rigides $Q_p$ et celle appliquée sur le sol mou entre les inclusions $Q_s$ (Figure 1-8).

- Taux de réduction de contrainte SRR = $\frac{Q_s}{q^*} = \frac{Q_s}{W+Q} \leq 1$
- Efficacité E = $\frac{Q_p}{(W+Q).s_{maille}}$

  avec $s_{maille}$, la surface d'une maille élémentaire.

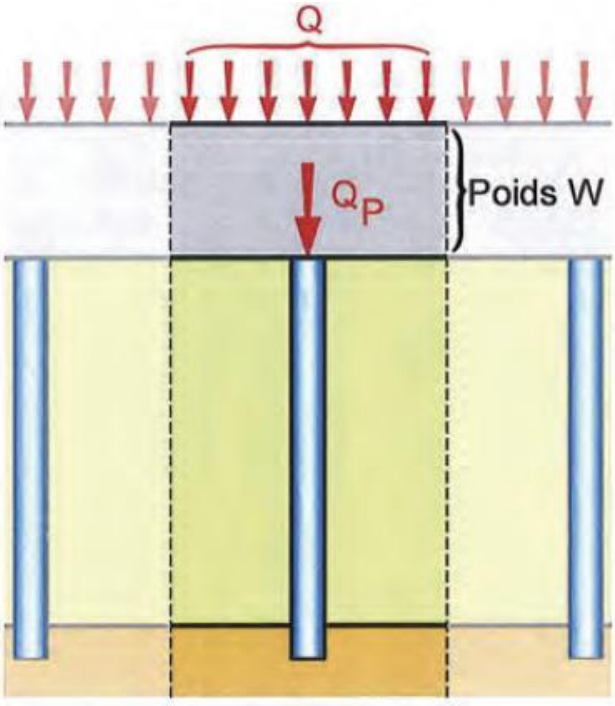



Figure I-8 Calcul d'efficacité (ASIRI, 2012)



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## I.2. Plateforme de transfert de charge en sol traité

### I.2.1. Traitement du sol

Le traitement des sols a connu un grand développement pendant les 50 dernières années. Cette technique était principalement appliquée pour les remblais en sols humides et sensibles à l'eau en 1965, puis s'est étendue à la réalisation des couches de forme et les couches d'assise entre 1975 et 1985. Finalement, des guides techniques ont été publié dans le but d'encadrer l'utilisation de cette technique allant du (RTR, 1976) qui a été remplacé par le (GTR, 1992) et les guides (GTS, 2000) et (GTS assise, 2007) ainsi que les règles et les procédures développées dans la norme NF EN 16907 et la nouvelle édition (GTR, 2023).

Le traitement du sol est une technique utilisée pour améliorer les propriétés physiques et les performances mécaniques du sol en place. Il s'agit d'incorporer des produits de traitement (chaux, ciment, liants hydrauliques routiers « LHR » …) dans des sols inaptes (généralement sols argileux et limoneux) et valoriser les matériaux du site par leur réutilisation. Cette technique permet de préserver les ressources naturelles et évite le transport et le dépôt des matériaux ce qui entraîne une diminution du coût et de la pollution.

Les produits de traitement ajoutés permettent d'assécher le sol, de modifier sa structure à travers les phénomènes de floculation et de cimentation et d'améliorer ses propriétés physiques ce qui facilite son compactage et augmente sa capacité portante.

### I.2.2. Couches de forme traitées

Dans les projets de renforcement des sols par inclusions rigides, le dimensionnement des plateformes de transfert de charge en sol traité est basé sur le guide du traitement des sols (GTS, 2000) qui traite le cas des couches de forme. Cette partie vise à présenter les différents essais de résistances mécanique, les critères et les exigences requis pour le traitement des couches de forme. L'objectif est d'évaluer les essais à retenir et proposer des nouveaux essais et critères pour le cas des PTC traitées.

#### I.2.2.1. Evaluation de l'aptitude du sol au traitement

Le guide du traitement des sols précise plusieurs critères permettant de vérifier l'aptitude du sol au traitement (Tableau 1-1). En effet, tous les sols ne peuvent pas être traités et ceux qui sont aptes à l'être doivent être testés par rapport aux agents de traitement utilisés.

Tableau I-1 Essais d'aptitude au traitement du sol

| Type de traitement | Aptitude du sol | Gonflement volumétrique $G_v$ (%) | Résistance en compression diamétrale $R_{tb}$ (MPa) |
|---|---|---|---|
| Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux | Adapté | $\leq 5$ | $\geq 0{,}2$ |
| | Douteux | $5 \leq G_v \leq 10$ | $0{,}1 \leq R_{tb} \leq 0{,}2$ |
| | Inadapté | $\geq 10$ | $\leq 0{,}1$ |
| Traitement à la chaux seule | Adapté | $\leq 5$ | Paramètre non considéré du fait de la lenteur de la prise pouzzolanique |
| | Douteux | $5 \leq G_v \leq 10$ | |
| | Inadapté | $\geq 10$ | |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### I.2.2.2. Effets du traitement

Les courbes Proctor du sol avant et après traitement permettent de déterminer les références de compactages du sol traité : la teneur en eau optimale ($W_{OPN}$) et la densité sèche maximale ($\rho d_{OPN}$). L'incorporation de la chaux à un sol provoque l'agglomération des particules fines. Ce phénomène, appelé floculation, conduit à une diminution de la densité sèche maximale ($\rho d_{OPN}$) du sol traité. Les agents de traitement entraînent une augmentation de la teneur en eau optimale ($W_{OPN}$) due à l'apport des matériaux secs, l'hydratation de la chaux vive, la prise hydraulique du ciment/LHR, l'évaporation de l'eau par la réaction d'hydratation (réaction exothermique) et les facteurs externes tel que le malaxage et l'aération du sol. L'indice portant immédiat (IPI) (NF P94-078) est un paramètre qui caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins en phase chantier. Le traitement du sol entraîne une augmentation de l'IPI comme le montre la Figure 1-9.

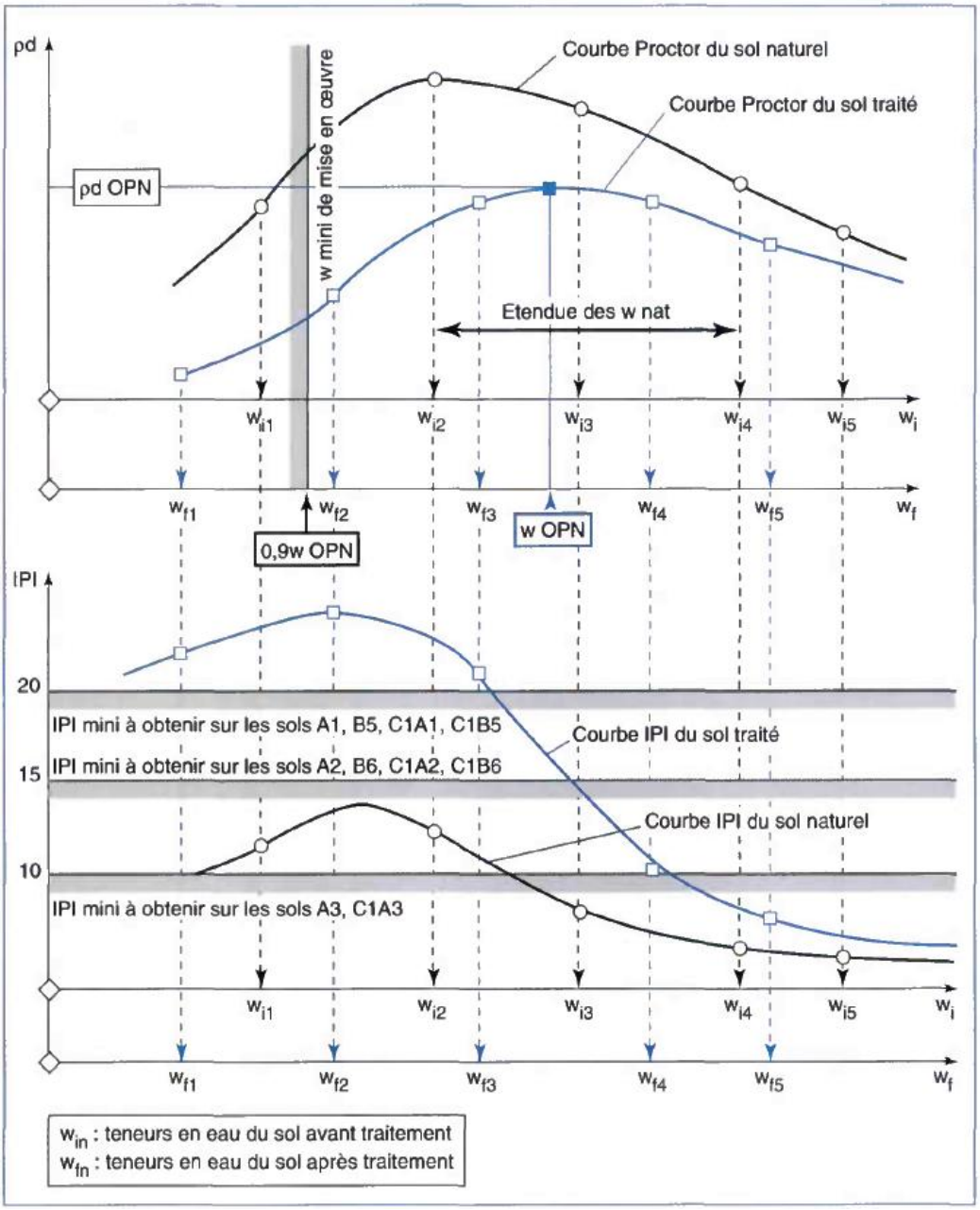



Figure I-9 Etude Proctor Normal-IPI du sol naturel et traité (GTS, 2000)



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Le Tableau 1-2 présente les valeurs de l'indice portant immédiat (IPI) minimales à obtenir à la mise en œuvre du sol traité.

Tableau I-2 Indice portant immédiat (IPI) minimal à obtenir

| GTR 2000 | GTR 2023 | IPI minimal |
|---|---|---|
| $A_3$ - $C_1A_3$ | $F_3$ – $VC_2F_3$ | 10 |
| $A_2$ - $C_1A_2$ - $B_6$ - $C_1B_6$ | $F_2$ – $VC_2F_2$ – $I_2$ – $VC_2I_2$ | 15 |
| $A_1$ - $B_5$ - $C_1A_1$ - $C_1B_5$ | $F_1$ – $I_1$ – $VC_2F_1$ – $VC_2I_1$ | 20 |
| Autres classes | Autres classes | A fixer d'après l'expérience ou à déterminer à l'appui d'une étude spécifique |

I.2.2.3. Etude des performances mécaniques

Le guide du traitement des sols (GTS, 2000) fixe des exigences de performances mécaniques minimales requises pour les couches de forme en sol traité. Ces critères dépendent du type de dosage et des conditions du chantier et sont classés en deux catégories (Tableau 1-3) :

- Performances mécaniques à court terme : Mise en œuvre ($I_{CBR}$, IPI), âge autorisant la circulation sur la couche traitée (Rc), Résistance à l'immersion au jeune âge.
- Performances mécaniques à long terme : La résistance à la traction $R_t$ et le module E déterminés à partir d'un essai de traction directe ou un essai de compression diamétrale réalisé à 90 jours ou éventuellement 180 jours de cure.

Tableau I-3 Exigences requises pour les performances mécaniques d'un sol traité

| **Traitement à la chaux seule** | |
|---|---|
| **Conditions** | **Critères de jugement** |
| Mise en œuvre | $I_{CBR} \geq 20$ et $\frac{I_{CBR}}{IPI} \geq 1$ |
| Risque de pénétration du gel dans la couche de forme | $R_c \geq 2{,}5$ MPa |
| | |
| **Traitement aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux** | |
| **Aspect du comportement du sol traité** | **Critères de jugement** |
| Age autorisant la circulation sur la couche traitée | $R_c \geq 1$ MPa |
| Résistance à l'immersion au jeune âge<br>-$R_{CI}$ : 28 jours de cure normale suivi de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20°C<br>-$R_{c60}$ : 60 jours de cure normale | $\frac{R_{CI}}{R_{c60}} \geq 0{,}8$ (si VBS du sol $\leq 0{,}5$) |
| | $\frac{R_{CI}}{R_{c60}} \geq 0{,}6$ (si VBS du sol $> 0{,}5$) |
| Résistance au gel | $R_{tb} > 0{,}25$ MPa |
| Performances escomptables à long terme | ($R_t$, E) déterminé à 90 j conduit au moins à un matériau de classe 5 |

Le couple ($R_t$, E) permet de déterminer la classe mécanique du sol traité à partir de l'abaque présenté à la Figure 1-10 et présenté dans le (GTS, 2000) qui classifie le sol traité en 5 zones (5 classes mécaniques) reflétant la qualité et les performances mécaniques du sol traité.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

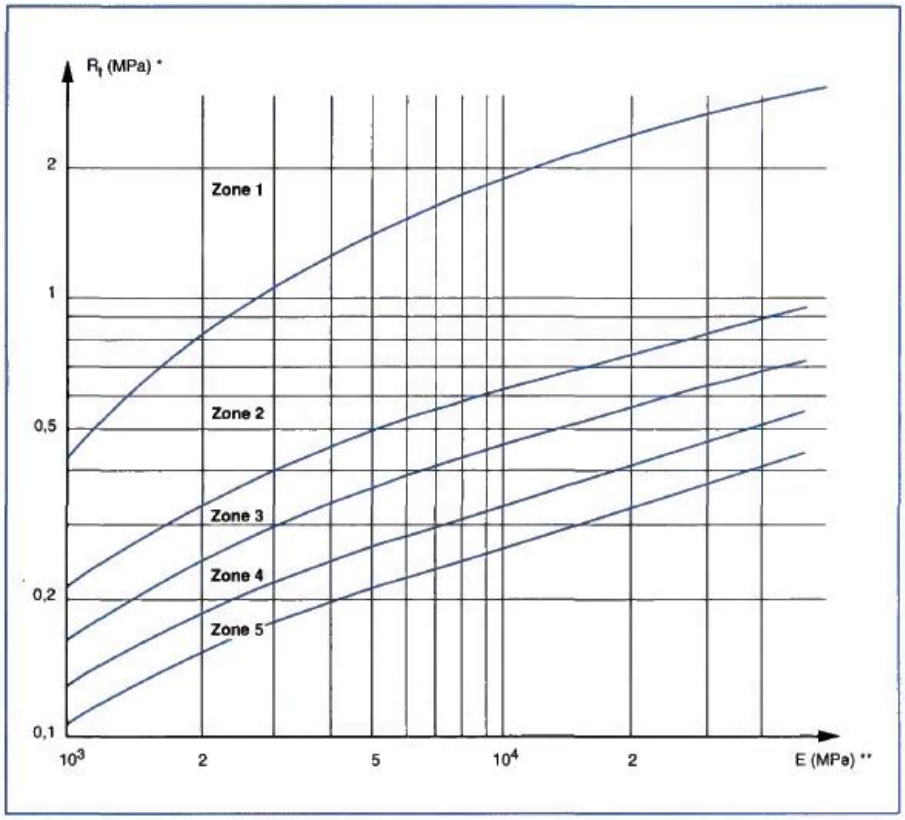



Figure I-10 Zones de classement des matériaux traités

### I.2.3. Traitement sur site

Cette partie vise à présenter les différentes étapes à suivre pour le traitement du sol dans les chantiers de petites tailles, le cas de la fosse expérimentale du Cerema de Rouen présentée dans le chapitre 2.

1. Livraison et stockage

L'approvisionnement des liants et des agents de traitement par sacs est limité seulement pour le cas des chantiers de petite taille et/ou de géométrie complexe. Le liant est livré en big bags ou en sacs de 25 à 50 kg, généralement sur des palettes, et protégé contre l'humidité et les courants d'air dans un abri ou sous une bâche imperméable.

2. Durée limite du stockage

On définit la durée limite du stockage selon le mode de stockage appliqué :

- Jusqu'à 3 mois dans le cas où les sacs sont mis dans un hangar non humide à peine ventilé.
- Jusqu'à 1 mois au maximum dans le cas où les sacs sont mis sous une bâche en plein air.

3. Epandage

Dans le cas des agents de traitement livré en sacs, l'épandage se fait manuellement sur le site en disposant les sacs selon un maillage bien déterminé basé sur le dosage de traitement prévu et ensuite, les sacs sont déchirés et le liant est étalé sur le sol au râteau.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## I.2.4. Connaissance actuelle : PTC traitées sur IR

La plateforme de transfert de charge en sol traité fait l'objet de peu de publications même si les chantiers d'amélioration de sol avec des matelas traités sont de plus en plus répandus (ASIRI+, 2019). Il est donc nécessaire de mener des actions de recherche pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de charge et rédiger des normes et des recommandations pour leurs dimensionnements et utilisations.

Actuellement, les applications sont basées sur les guides des terrassements routiers limités aux couches de forme et couches de fondation des ouvrages. Ces guides interdissent à titre d'exemple l'emploi des plateformes en sol traité dans les infrastructures ferroviaires (Preteseille et al., 2013). L'utilisation des plateformes en sol traité permet de minimiser les impacts économiques et environnementaux des opérations de terrassement en évitant le transport des matériaux granulaires et l'exploitation des ressources naturelles limitées (Capony et al., 2013). Ce sujet étant peu traité par ASIRI, il fait l'objet de recherche dans PN ASIRI+ et s'intègre dans l'axe 1 « Etude des plateformes de transfert de charge ».

Cette partie vise à présenter les études, les essais, les retours d'expérience et les travaux de recherche menés sur les plateformes de transfert de charge en sol traité sur et sans IR trouvés dans la littérature. En réalité, il y a peu de chantiers avec des PTC traitées sur inclusions rigides, il est donc important de rechercher dans la littérature des exemples de couches de forme et de remblais traités sans IR et de transposer ce qui a été réalisé pour le cas des PTC traitées sur IR. L'objectif est de s'inspirer des résultats issus de la recherche, trouver des similitudes avec notre cas d'étude et aller plus loin dans la connaissance du sujet.

### I.2.4.1. Plateformes traitées sans IR

- Couches de forme traitées

Allouche (1972) a réalisé un essai en vraie grandeur pour tester des couches de base de chaussée sans inclusions rigides avec la technique de traitement du sol en utilisant des graves concassées 0/16 provenant du concassage de matériaux alluvionnaires du Rhin traités aux cendres volantes et à la chaux. Deux dosages de cendres volantes ont été testés (8 et 13%). Les résultats obtenus ont présenté des intérêts en ce qui concerne les plateformes en sol traité ainsi que l'utilisation locale des sous-produits industriels dans le traitement du sol qui peut apporter des avantages environnementaux supplémentaires malgré quelques inconvénients trouvés sur la sensibilité de la couche à l'eau.

Du Mesnil Adelée (1984) a réalisé diverses études sur des couches instrumentées par des capteurs de déplacements afin de déterminer le comportement sous charge des chaussées ayant 2 ou 3 couches de limon traitées mais sans inclusions rigides. Rigot (1984) a réalisé un essai dans la région de Rouen sur une planche expérimentale de 200 m de longueur formée du limon traité à 1,5% chaux et 6% ciment. Boutonnet & Livet (1984) ont testé l'utilisation des limons traités en assise de chaussée contre la sensibilité au gel. Le limon utilisé est traité par chaux, ciment et un traitement mixte. Ces essais ont permis d'apporter des compléments pour mieux comprendre le concept de l'utilisation des couches de forme en sol traité en tenant compte de l'influence de plusieurs paramètres comme l'homogénéité du sol et du mélange, l'épaisseur des couches et les relations entre les caractéristiques des sols fins traités et leurs gélivités.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Preteseille (2014) a étudié le cas des plateformes des structures ferroviaires pour LGV sans inclusions rigides, il a étudié le comportement en fatigue des sols traités aux liants hydrauliques suivant l'approche du domaine routier et une nouvelle méthode d'essai. Trois types de sol sont testés : Un sable argileux (au sens du GTR, il se classe à la limite entre les classes A1, A2 et B6) traité à 5% de ciment, une argile (type $A_2$) traitée à 1% de chaux et 5% de ciment et une altérite de schiste (type $C_1B_5$) traitée à 5% de ciment. Le ciment utilisé est un CEM II/A-LL 42.5 R et la chaux est une chaux vive calcique. Pour caractériser les performances mécaniques des sols traités, il a réalisé des essais de résistance en compression, en traction indirecte, en traction directe et des essais triaxiaux. A la suite de ces essais, il a étudié l'effet de la fatigue des sols traités en réalisant des essais de fatigue en flexion sur des éprouvettes trapézoïdales adaptées pour les sols traités sous charges monotones et cycliques et des essais de fatigue biaxiaux BFT (biaxial Flexure test) qui sont capables de reproduire l'état de contrainte présente dans la couche de forme des LGV. Les deux essais ont été mis au point par des résolutions analytiques et numériques et validés par des essais sur une éprouvette témoin. Les résultats des essais en fatigue étaient encourageants et les sols traités ont présenté des performances compatibles avec les exigences de pérennité d'une couche de forme pour LGV.

- Remblais traités

Geetanjali et al. (2021) ont étudié l'effet à long terme d'un traitement à 2,5% de la chaux d'un remblai expérimental après sept ans d'exposition atmosphérique. L'évaluation a été faite en comparant la résistance à la compression des échantillons prélevés sur le terrain avec les échantillons du laboratoire, ainsi que les propriétés physico-chimiques et microstructurales du remblai traité à la chaux. Une résistance moyenne à la compression de 3,29 MPa a été mesurée dans les échantillons traités à la chaux prélevés au cœur du remblai. Cette résistance est comparable à celle obtenue pour les éprouvettes à durcissement accéléré au laboratoire. La persistance de l'effet de la chaux au cœur du remblai a été confirmée par la présence d'un pH supérieur à 11. Cependant, une diminution relative du pH et de la teneur en eau a été observée dans la couche supérieure du remblai. Cela indique que l'effet de la chaux a été perdu dans la couche supérieure sous l'effet d'une interaction constante entre le sol et l'atmosphère et en raison du développement des racines de la végétation.

Chabrat et al. (2023) ont évalué aussi l'effet à long terme d'un sol argileux expansif traité à la chaux et à la chaux/ciment. Le remblai d'essai, construit en 2010 a été testé en 2021. La performance hydromécanique au bord et au cœur du remblai a été comparée aux caractéristiques initiales des échantillons déterminées au moment de la construction ou disponibles dans les études existantes. Les résultats montrent que la partie centrale du remblai n'a pas été modifiée de manière significative depuis la construction du remblai. La compressibilité a diminué progressivement à partir de 2,5 m vers le bord du remblai et le comportement de retrait au bord était très proche du comportement de retrait du matériau non traité. Le suivi in situ depuis la construction montre que les variations de teneur en eau sont limitées au premier mètre du remblai. Ces observations mettent en évidence une altération du comportement du sol stabilisé depuis la construction. L'ampleur de la dégradation dépend de la distance à la surface. Au bord du remblai, le comportement des échantillons était comparable au comportement du sol non traité.

Ces études ont été menées pour des remblais traités sur un sol non renforcé par inclusions rigides. Les résultats montrent une persistance des performances mécaniques du sol



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

traité confiné (au cœur du remblai) à long terme. On peut constater quelques similitudes avec le cas d'une PTC traitée sur IR, qui n'est normalement pas exposée directement à l'atmosphère. Cependant, la PTC traitée est soumise à un chargement continu d'où la nécessité d'étudier l'effet de la fatigue sur ces plateformes.

### I.2.4.2. PTC traitées sur IR

Plusieurs auteurs ont étudié le comportement des PTC traitées sur inclusions rigides en utilisant différents dispositifs :

- Dispositif du plateau mobile : (Garcia et al., 2021; Okyay, 2010; Okyay et al., 2014).
- Modèle physique simplifié : (Anggraini et al., 2015)
- Ouvrage réel : (Ferber et al., 2015)

- Traitement du sol

Okyay (2010) a réalisé des études expérimentales à la centrifugeuse et des études numériques sur des plateformes granulaires et traitées sur inclusions rigides dans le cadre du PN ASIRI. Le sol utilisé pour la PTC traitée est du limon provenant de la Seine-Maritime, sur la RD 925 au sud de Goderville de type A1. Il a conduit une campagne expérimentale pour caractériser le limon de Goderville et tester les performances mécaniques de quatre formules de traitements :

- Sol + 3% chaux
- Sol + 6% ciment
- Sol + 2% chaux + 3% ciment
- Sol + 2% chaux + 5% ciment

Il a réalisé des essais de résistances mécaniques (compression uniaxiale, traction indirecte, essai de flexion et essai de cisaillement à la boîte de Casagrande) pour des différents jours de cure (7, 28, 90, 350) et a montré l'effet de chaque traitement sur l'évolution des performances mécaniques à long terme. Il a trouvé que le sol traité à la chaux a un comportement mécanique « souple et radoucissant » alors que le sol traité au ciment a un comportement mécanique « fragile et cassant ».

Anggraini et al. (2015) ont étudié le comportement d'une plateforme de transfert de charge sur inclusions rigides constituée d'argile traitée à la chaux et à la fibre de coco. Des essais de résistances à la flexion, traction indirecte et compression uniaxiale sont réalisés pour évaluer les performances mécaniques du sol traité.

Ferber et al. (2015) rapportent une variante proposée et mise en œuvre par CHARIER TP dans le cadre de la construction d'un remblai sur inclusions rigides avec une plateforme en sol traité et renforcé par une géogrille (Figure 1-11). La PTC traitée est formée d'un matériau marno-calcaire traité à 5% d'un liant hydraulique. A 28 jours de cure, une résistance en compression de 2,56 MPa et une résistance en traction de 0,28 MPa sont obtenues.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

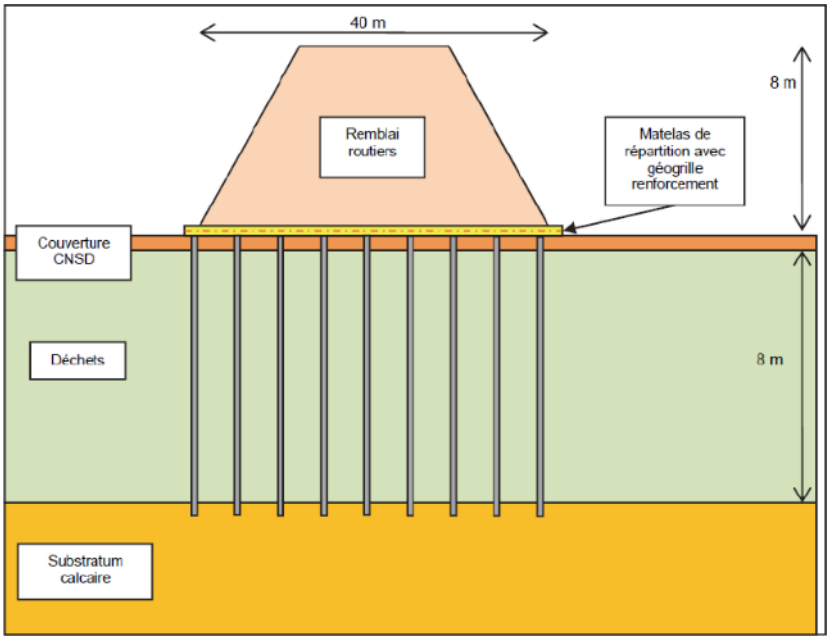



Figure I-11 Dispositif d'amélioration de sol par IR d'après Ferber et al. (2015)

Garcia et al. (2021) ont utilisé un modèle physique simplifié pour tester une plateforme de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides. Pour le traitement de la PTC, ils ont utilisé une argile sableuse de faible plasticité traitée pour des pourcentages de 2 à 8% de ciment, avec une période de cure de 7 jours. Des essais de résistances à la compression et des essais triaxiaux sont réalisés pour évaluer les performances mécaniques du sol traité. A la suite de ces essais, un dosage de 6% a été choisi pour le traitement de la PTC.

- Modélisation physique

Okyay (2010) et Garcia et al. (2021) ont utilisé le dispositif du plateau mobile pour modéliser leurs sols compressibles.

Suite aux essais de caractérisation mécanique du sol traité, (Okyay, 2010; Okyay et al., 2014) ont réalisé des essais en modèle réduit en centrifugeuse (Figure 1-12) avec le dispositif du plateau mobile. Le but de la modélisation physique en centrifugeuse est de répondre aux besoins des ingénieurs et des chercheurs en étudiant des modèles à échelle réduite. Le dispositif du plateau mobile permet d'évaluer l'influence des caractéristiques géométriques et physiques d'un réseau d'inclusions rigides sur les mécanismes de transfert de charge. Les essais en centrifugeuses ont été menés pour deux types de matelas (matelas granulaire et matelas en limon traité). En ce qui concerne le limon traité, le matelas est utilisé en tant que couche de forme sous dallage. Il a remarqué que pour le matelas constitué du limon traité à la chaux, l'efficacité maximale reste supérieure à 80% et le matelas reste intact à la fin des essais. Alors que dans le cas du matelas constitué du limon traité au ciment, l'efficacité maximale est atteinte avec un moindre tassement du sol due à son comportement fragile et cassant et pour des charges élevées, une fois que le matelas est endommagé, l'efficacité chute instantanément.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

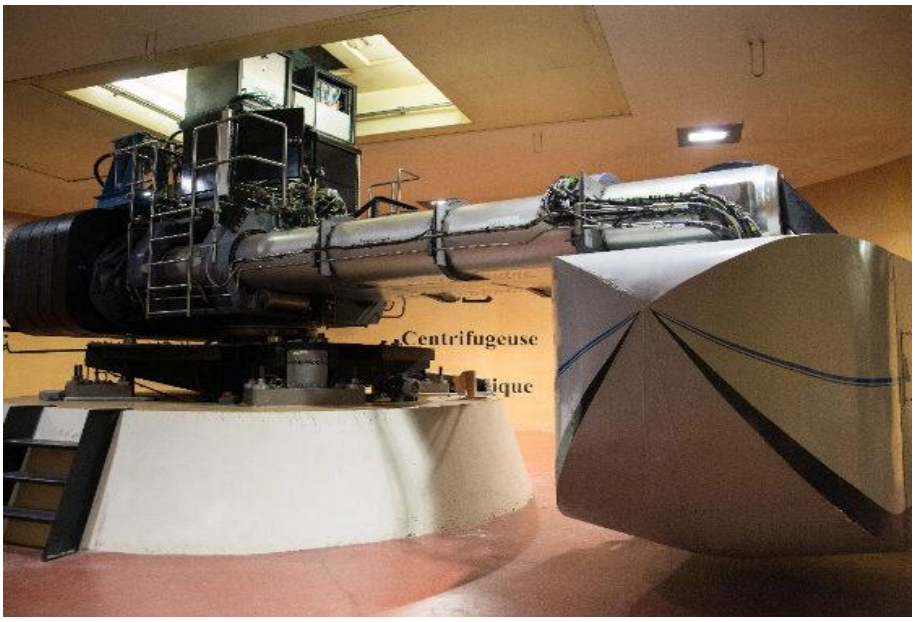



Figure I-12 Centrifugeuse géotechnique – Université Gustave Eiffel

Les essais réalisés par Okyay (2010) forment une première étape pour la compréhension du comportement des plateformes en sol traité dans les sols renforcés par inclusions rigides. Il s'agit d'une étude préliminaire non suffisante pour proposer des règles de dimensionnement d'où la nécessité de mener des essais en vraie grandeur et des instrumentations sur des chantiers afin de bien comprendre le comportement de ces plateformes et proposer des recommandations pour leurs utilisations.

Garcia et al. (2021) ont utilisé un modèle physique simplifié formé d'un cylindre en béton avec une inclusion rigide au centre pour représenter une maille élémentaire. Un plateau mobile est placé au bas du cylindre en béton et la plaque inférieure est percée d'un trou en son centre pour permettre l'inclusion de passer librement (Figure 1-13). Le sol est ensuite placé à l'intérieur du cylindre et une fois la plateforme de transfert de charge est compactée, la plaque inférieure est enlevée et une force est appliquée au-dessus de la PTC.

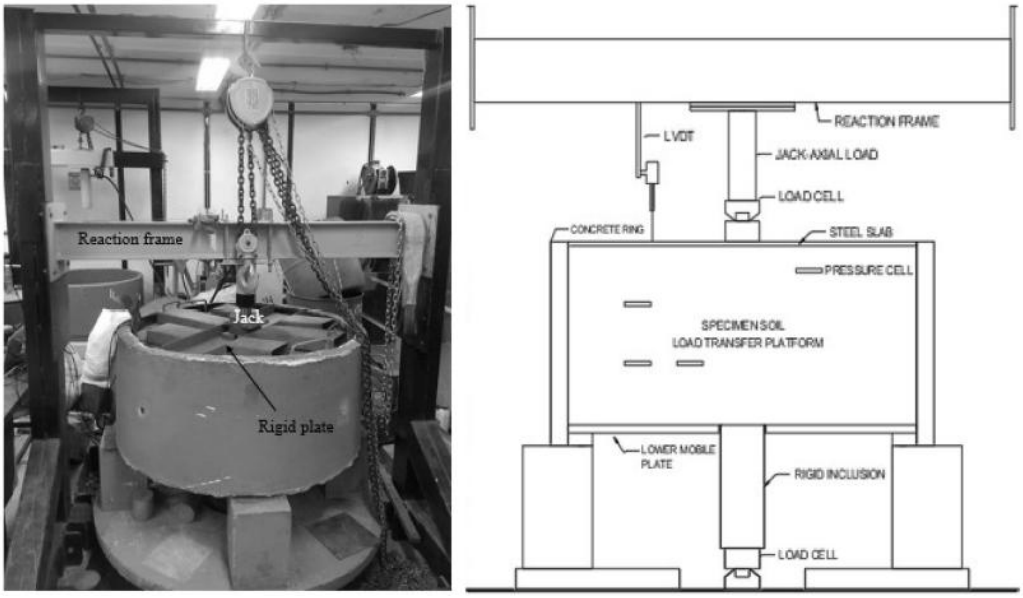



Figure I-13 Dispositif expérimental



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Six essais sont réalisés en variant les matériaux de la PTC et le diamètre de l'inclusion. La PTC est formée d'un sable argileux à faible plasticité avec et sans ciment. Les résultats montrent que le poids de la PTC et la charge appliquée étaient entièrement transmis à l'inclusion dans presque tous les cas, ce qui a permis d'obtenir une efficacité de transfert de charge de 100%. Après démontage des essais, il était possible d'obtenir physiquement la forme du mécanisme de transfert de charge. Dans ces essais, un cône tronqué inverse a été observé avec un angle externe du cône de 60° pour le sol non traité et de 65° pour le sol traité (Figure 1-14).




Figure I-14 Mécanismes de transfert de charge pour le sol traité et non traité

Anggraini et al. (2015) ont réalisé un modèle physique bidimensionnel (Figure 1-15) pour étudier les mécanismes de transfert de charge dans une plateforme traitée sur inclusions rigides. Ils ont trouvé que le sol traité à la chaux et renforcé par des fibres présente des bonnes performances mécaniques et peut être utilisé comme une plateforme de transfert de charge sur inclusions rigides. Le traitement de la plateforme entraîne une diminution du tassement différentiel et une augmentation de la résistance à la flexion de la PTC.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

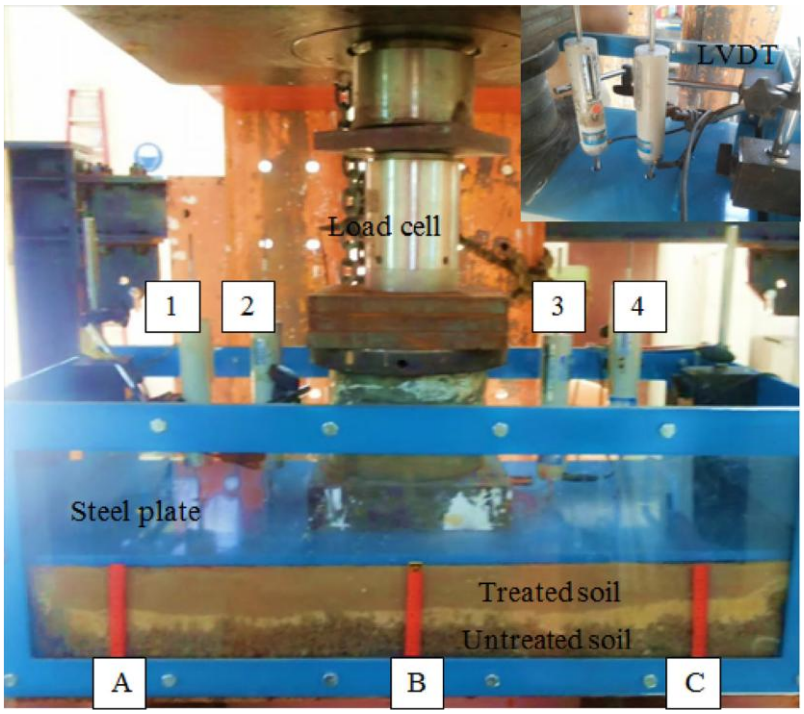



Figure I-15 Modèle physique bidimensionnel du matelas

Ferber et al. (2015) ont optimisé la construction d'un remblai sur inclusions rigides avec une plateforme en sol traité. La vérification de la PTC contre le poinçonnement a été faite selon le principe présenté à la Figure 1-16 où le principe est d'araser les IR dès leur mise en place sous la base de la plateforme de travail et de remplacer le béton par du matériau granulaire, on utilise donc, l'angle de frottement du matériau granulaire pour réduire les efforts de cisaillements dans le matelas traité. Une géogrille de renforcement d'une résistance de 600 kN/m dans les deux directions est utilisée pour le renforcement horizontal. Ces modifications ont permis d'optimiser la solution technique et réaliser des économies sur le projet.

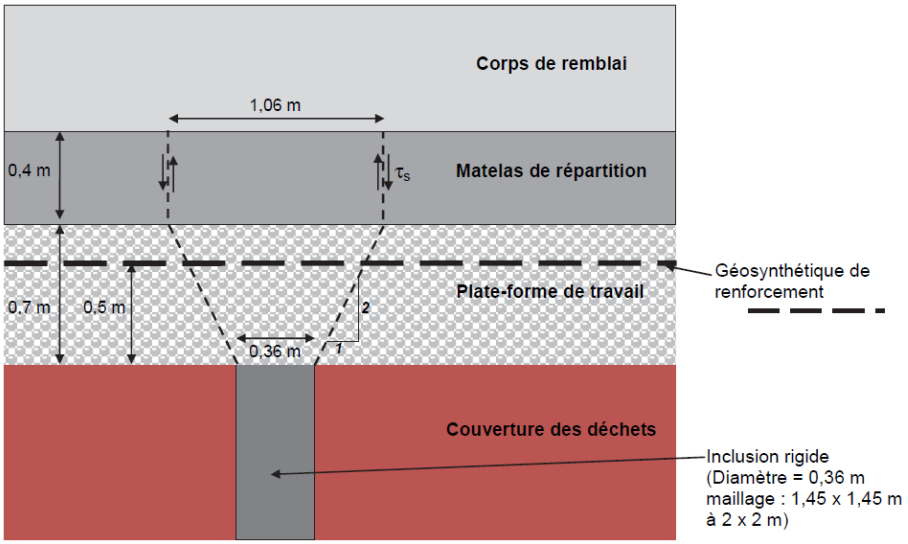



Figure I-16 Vérification au poinçonnement de la plateforme

Selon l'étude bibliographique présentée ci-dessus, aucun essai en vraie grandeur n'a été réalisé pour une plateforme traitée sur inclusions rigides, et les essais réalisés n'étaient pas



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

totalement représentatifs de la réalité. Okyay (2010) a utilisé le dispositif du plateau mobile qui ne prend pas en compte le tassement des plateformes lors de la mise en place et du compactage des PTC. De plus, il a considéré dans ces modèles numérique un plateau mobile fixe pendant la mise en place du matelas, du dallage et des surcharges et il a imposé un tassement à la fin de toutes les phases de construction, ce qui n'est pas le cas en réalité. Anggraini et al. (2015) ont utilisé un modèle physique bidimensionnelle de 800 mm de longueur, 400 mm de largeur et 300 mm d'épaisseur. La géométrie du modèle bidimensionnel et l'épaisseur des couches du sol utilisées ne permettent pas de représenter le comportement réel de la PTC ainsi que la présence des effets de bord affectent le comportement du système. Ferber et al. (2015) ont étudié le cas d'un remblai routier sur un matelas de répartition renforcé par géosynthétique qui a fait l'objet d'une optimisation en phase travaux par un traitement de sols au liant hydraulique suite au passage d'une future route dans cette zone. Une vérification au poinçonnement et à la reprise des efforts horizontaux et verticaux a été réalisé pour valider l'utilisation de cette solution. Cependant, aucune instrumentation s'est installée pour vérifier les mécanismes de transfert de charge et évaluer l'efficacité du système. Garcia et al. (2021) ont utilisé un modèle physique simplifié pour représenter une maille centrale d'une plateforme de transfert de charge sur inclusion rigide. L'utilisation d'une seule inclusion dans ce dispositif, la présence des effets de bord et l'utilisation d'un plateau mobile qui ne prend pas en compte le tassement lors de la mise en place de la PTC rendent ce dispositif non représentatif de la réalité.

L'étude bibliographique montre qu'aucun essai en vraie grandeur n'a été réalisé et qu'aucun ouvrage réel n'a été instrumenté pour tester le comportement des PTC traitées sur inclusions rigides, d'où la nécessité d'envisager des essais et des ouvrages capables de représenter réellement le comportement des PTC traitées. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'effectuer plus de recherches et de plots expérimentaux afin d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de charge dans les plateformes en sol traité sur inclusions rigides.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Chapitre II. Essais en vraie grandeur du Cerema de Rouen

## II.1. Etude expérimentale

### II.1.1. Objectifs

Selon l'état de l'art présenté dans le chapitre 1, aucun essai en vraie grandeur n'a encore été présenté pour tester le comportement des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides. Les essais réalisés sont des essais à échelle réduite en centrifugeuse ou des modèles physiques simplifiés. Dans ce contexte, deux essais en vraie grandeur ont été réalisés dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen pour étudier le comportement des PTC traitées sur inclusions rigides.

### II.1.2. Caractérisation du limon de Dieppe traité

Cette partie est consacrée à la caractérisation en laboratoire de la PTC traitée. Les essais d'identification du sol naturel, les formules de traitement et les différents essais de résistance mécanique du sol traité sont présentés.

#### II.1.2.1. Site du prélèvement du matériau

Le sol utilisé pour la plateforme de transfert de charge est du limon qui provient d'un chantier de la RN27 de la déviation de la commune de Dieppe à arques avec une teneur en eau naturelle comprise entre 17 et 23%.

#### II.1.2.2. Préparation du sol

Dans le but d'avoir les mêmes conditions du sol pour tous les essais de caractérisation et les essais de résistance mécanique du sol traité, le matériau a été homogénéisé, puis séché afin de faciliter le broyage et le tamisage. Le séchage a été effectué à l'aide d'une étuve à 105°C puis le matériau a été broyé à l'aide d'un broyeur à lames pour avoir une fraction du limon de Dieppe inférieure à 2 mm (Figure 2-1). Il a ensuite été stocké dans des bacs de 600 litres.



Figure II-1 Séchage et broyage du sol



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.1.2.3. Essais de caractérisation du sol

Des essais d'identification de sol ont permis de connaitre la nature du limon de Dieppe (Figure 2-2) en se référant aux normes françaises et aux classifications existantes. Dans cette étude le « Guide des terrassements des remblais et des couches de forme - 2023 » (GTR, 2023) a été utilisé pour la classification. Un sol de type F1 : Limon peu plastique a été obtenu selon les différents essais de caractérisation du sol présentés dans le Tableau 2-1.



Figure II-2 Limon de Dieppe

Tableau II-1 Essais de caractérisation du limon de Dieppe

| Essai | Paramètre | Valeur | Norme |
|---|---|---|---|
| Granulométrie | $D_{max}$ (mm) | 2 | NF EN 12948 |
| | Tamisat à 63 µm (%) | 45 | NF EN ISO 17892-4 |
| Limites d'Atterberg | $w_L$ | 29 | NF EN ISO 17892-12 |
| | $w_P$ | 20,3 | NF EN ISO 17892-12 |
| | Indice de plasticité Ip | 8,7 | NF EN ISO 17892-12 |
| Bleu de méthylène | VBS | 1,3 | NF EN 933-9 |
| Proctor | $\rho_{d\ OPN}$ (g/cm$^3$) | 1,84 | NF P94-093 |
| | $w_{OPN}$ (%) | 15,5 | NF P94-093 |
| Indice Portant Immédiat | IPI | 14 | NF P94-078 |
| Triaxial | Frottement (°) | 29 | NF P94-070 |
| | Cohésion (kPa) | 34 | NF P94-070 |
| Teneur en Carbonates | (%) | 1,03 | NF P94-048 |
| Perméabilité | k (m/s) | $2{,}92 \times 10^{-9}$ | NF X30-441 |
| Matières organiques | (%) | 2,5 | XP P94-047 |
| Teneur en eau naturelle | Wn (%) | 17-23 | NF EN ISO 17892-1 |
| Masse volumique des particules solides | $\rho_s$(g/cm$^3$) | 2,62 | NF EN 1097-7 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.1.2.4. Traitement du sol

#### II.1.2.4.1. Formules de traitement

Dans cette étude, trois formules de traitement ont été choisies pour traiter le limon de Dieppe :

- Traitement 1 (SCC) : Sol + 1% Chaux + 4% Ciment

Ce traitement a été choisi en se référant au guide technique du traitement des sols (GTS, 2000) et à l'état de l'art. Un dosage de 1 à 2% du chaux et de 4 à 7% du ciment est assez courant et utilisé dans les travaux de traitement du sol sur chantier. Le limon de Dieppe étant un sol fin, il est courant d'utiliser de la chaux à faible dose (1%) pour faciliter le mélange sol/liant. La chaux utilisée est une chaux vive (qualité génie civil) fournie par le groupe Lhoist et le ciment est de type CEM II 32,5 (entre 65 et 79% de clinker). Ce traitement a un délai de maniabilité de 1h.

- Traitement 2 (SCCO) : Sol + 1% Chaux + 4% Compaxem®

Un deuxième traitement à base d'argile a été choisi pour prendre en compte les effets environnementaux et écologiques. Le Compaxem® est un liant conforme à la norme NF P15-108 « Liants hydrauliques routiers : Composition, spécifications et critères de conformité » et parfaitement adapté au traitement du sol avec un délai de maniabilité de 1h à 1h30. Ce liant est formé de 40% de metakaolin (produit issu de la calcination de l'argile kaolinite) et 60% de clinker Portland. Le Compaxem® est fourni par la société Argeco.

- Traitement 3 (SA) : Sol + 5% Argiliant+®

Un troisième traitement a été choisi pour tester un second liant présentant une meilleure empreinte carbone, l'Argiliant+®. Ce liant est conforme à la norme NF P15-108 et adapté au traitement du sol avec un délai de maniabilité de 6 heures. Il est composé de 50% de metakaolin, 30% de clinker Portland et 20% du chaux calcique. L'Argiliant+® est fourni par la société Argeco.

La pouzzolane utilisée « argicem », pour le Compaxem® et l'Argiliant+® est obtenue par calcination « Flash » d'une argile kaolinique naturelle pour obtenir du metakaolin. Ce procédé original de calcination, à faible consommation d'énergie et à très faible émission de $CO_2$ utilise environ 40% de l'énergie consommée dans la méthode traditionnelle de calcination. Il apporte des avantages techniques significatifs au produit final et s'inscrit dans une action de développement durable. Le sol et les agents de traitement sont présentés à la Figure 2-3.




Figure II-3 Limon de Dieppe et agents de traitement utilisés



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Finalement, il s'agit de trois formules de traitement à base de 1% chaux et différents rapports Clinker/Metakaolin (Tableau 2-2).

Tableau II-2 Formules de traitement

| Traitement | Notation | Chaux (%) | Clinker (%) | Metakaolin (%) | Constituants secondaires (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1% Chaux + 4% Ciment[a] | SCC | 1 | 2,6 - 3,76 | - | 0,24 - 1,4 |
| 1% Chaux + 4% Compaxem® | SCCO | 1 | 2,4 | 1,6 | - |
| 5% Argiliant+® | SA | 1[b] | 1,5 | 2,5 | - |

[a] Le ciment CEM II 32,5 résultent du mélange de clinker en quantité au moins égale à 65% et d'autres constituants dont le total ne dépasse pas 35%.

[b] Argiliant+® contient 20% de chaux ce qui fait un total de 1% dans le mélange.

II.1.2.4.2. Préparation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes de sol naturel et des sols traités nécessite la connaissance des teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales des différents mélanges. Pour cela des essais Proctor normal ont été réalisés selon la norme NF P94-093 et puis les indices portants immédiats IPI ont été déterminés selon la norme NF P94-078 (Figure 2-4). Les résultats présentés dans le Tableau 2-3 montrent l'effet des agents de traitement qui font augmenter la teneur en eau optimale à cause de l'apport des matériaux secs d'une part et les différentes réactions chimiques entre les liants et l'eau de l'autre part. De même, on remarque la diminution de la densité sèche maximale. Ceci peut s'expliquer par l'effet de floculation des particules du sol suite à l'ajout de chaux. On note également l'augmentation de l'indice portant immédiat pour l'ensemble des matériaux traités.

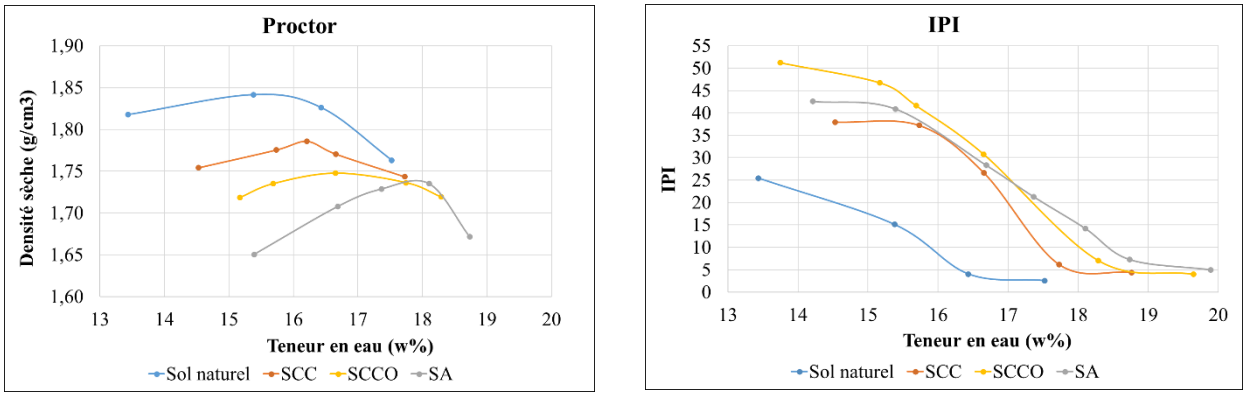



Figure II-4 Essais Proctor et IPI

Tableau II-3 Proctor et IPI du sol naturel et des sols traités

| Traitement | Notation | ρd OPN (g/cm³) | wOPN (%) | IPI (OPN) |
|---|---|---|---|---|
| Sol Naturel | Sol Naturel | 1,84 | 15,5 | 13 |
| 1% Chaux + 4% Ciment | SCC | 1,79 | 16,2 | 33 |
| 1% Chaux + 4% Compaxem® | SCCO | 1,75 | 16,7 | 28 |
| 5% Argiliant+® | SA | 1,74 | 18 | 15 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Suite à la détermination des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales, des essais d'aptitude au traitement ont été réalisés selon la norme NF P94-100 pour les trois formules de traitement. Ces essais consistent en un essai de gonflement volumétrique ($G_f$) selon la norme NF EN 13286-49 et un essai de résistance à la traction indirecte ($R_{it}$) comme spécifié dans la norme NF EN 13286-42 après 7 jours d'immersion à 40°C. Pour qu'un traitement soit apte à être utilisé pour un sol, il faut obtenir un $G_f$ inférieur à 5% et une $R_{it}$ supérieure à 0,2 MPa. Dans le cas du traitement SCC, un $G_f$ de 1% et une $R_{it}$ de 0,24 MPa ont été obtenus. Les formules SCCO et SA ont présenté un comportement « douteux » selon la norme NF P94-100, d'où une modalité alternative est appliquée en passant à 6 jours de cure avant immersion, ce qui a donné des résistances de 0,25 et 0,21 MPa et des gonflements volumétriques de 2,14 et 1,41% respectivement.

La résistance mécanique du sol traité dépend des conditions de cure, de la confection des éprouvettes et des propriétés physico-chimiques du sol. Il est donc nécessaire d'avoir une homogénéité globale sur l'ensemble des essais allant de la préparation du sol, à la confection et la conservation des échantillons, aux conditions de cure jusqu'à la réalisation de l'essai. Ainsi, toutes les éprouvettes ont été préparées à une teneur en eau optimale et à une densité sèche supérieure à 96% des densités sèches maximales déjà obtenues par les essais Proctor. Deux échantillons sont testés par essai et une valeur moyenne est considérée.

L'essai de compression uniaxiale se fait selon la norme NF EN 13286-41. Les éprouvettes ont été préparées selon la norme NF EN 13286-50, il s'agit des éprouvettes cylindriques de diamètre Φ=15 cm et de hauteur h=12,7 cm compactées à la dame Proctor.

L'essai de traction indirecte se fait selon la norme NF EN 13286-42. Les éprouvettes ont été préparées selon la norme NF EN 13286-52, il s'agit des éprouvettes cylindriques de diamètre Φ=10 cm et de hauteur h=20 cm.

L'essai de flexion 3 points se fait selon la norme NF EN 196-1, sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 alors que l'essai triaxial a été effectué selon la norme NF P94-070 avec des éprouvettes cylindriques de diamètre Φ=7 cm et de hauteur h=14 cm qui sont réalisées par un compactage statique avec une densité > 96% $\rho d_{OPN}$ (Figure 2-5).

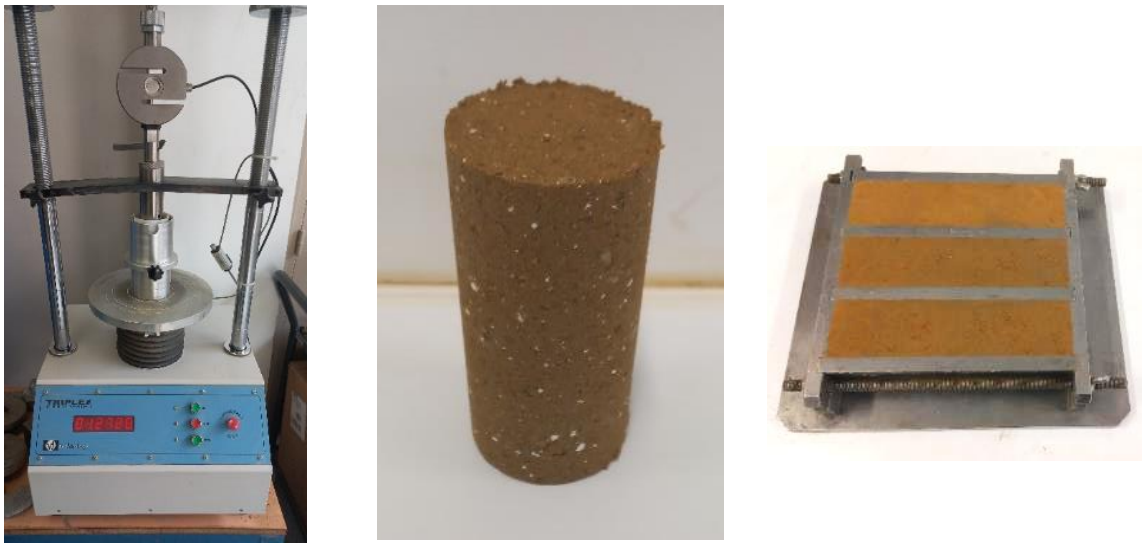


Figure II-5 Eprouvettes pour l'essai triaxial et l'essai de flexion



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Le délai de maniabilité est la durée, comptée à partir de la fin du malaxage, qui correspond à une diminution de 2% de la densité sèche maximale de l'échantillon, autrement dit, c'est le temps nécessaire pour réaliser les éprouvettes, compté à partir de la fin du malaxage sans perte de propriété du matériau. Toutes les éprouvettes (Figure 2-6) ont été préparées sans dépasser le délai de maniabilité déterminé selon la norme NF EN 13286-45 :

- Traitement 1 (SCC) : 1 h
- Traitement 2 (SCCO) : 1h à 1h30
- Traitement 3 (SA) : 6 h

Suite à la préparation des éprouvettes et pour maintenir les mêmes conditions de cure, toutes les éprouvettes ont été placées dans des sacs plastiques fermés et imperméables à une température de conservation de 20 °C ± 2 °C conformément à la norme NF P98-114-3.

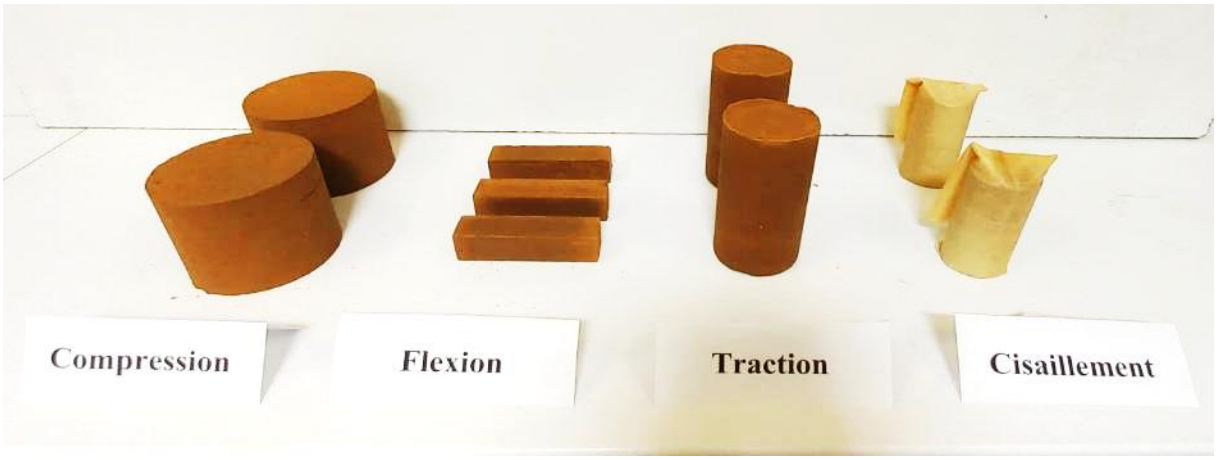



Figure II-6 Eprouvettes pour les essais mécaniques

II.1.2.4.3. Essais de résistance mécaniques

Des essais de résistance mécanique (compression, flexion, traction et cisaillement) ont été réalisés à 7, 14, 21, 28 et 90 jours afin d'évaluer les propriétés mécaniques des sols traités à court et à long terme.

Des essais de résistance à la compression après immersion dans l'eau ont été réalisés pour le premier traitement (SCC) dans le but de caractériser l'évolution des propriétés du sol soumis à des variations de régime hydrique.

a. Essais de résistance à la compression uniaxiale

Les essais de résistance à la compression donnent une résistance du sol naturel de 0,41 MPa (Tableau 2-4) et montrent une évolution de cette résistance pour les sols traités. Le traitement SCC présente les meilleures résistances à court terme et à long terme (Figure 2-7).

Le traitement SA présente de très bonnes résistances à la compression en comparant avec le traitement SCC et bien meilleures que SCCO. A 90 jours de cure, des résistances de 3,75, 3,4 et 2,29 MPa ont été mesurées pour SCC, SCCO et SA respectivement. On remarque que le traitement SA présente une meilleure résistance à la compression que le traitement SCCO ce qui ne correspond pas à une résistance attendue vu le pourcentage du clinker Portland dans les deux traitements (2,4% et 1,5% pour le SCCO et le SA respectivement).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

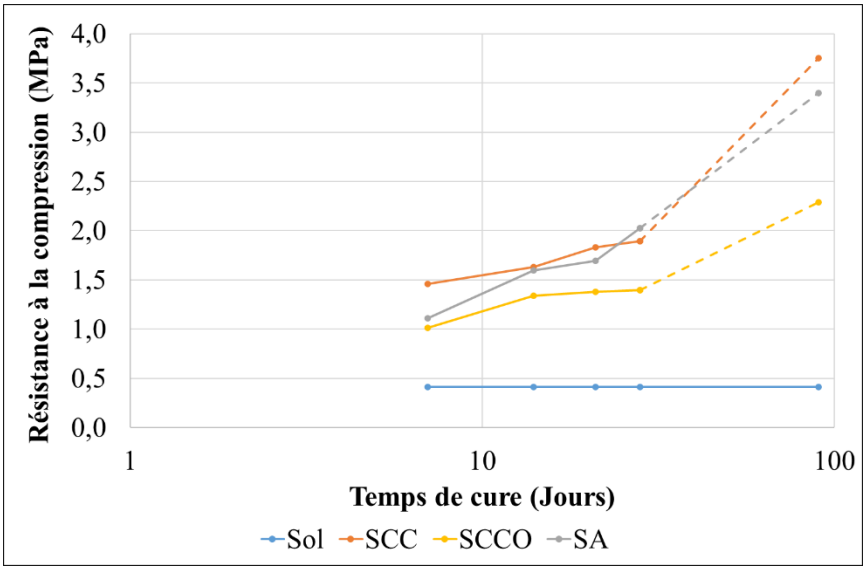





Figure II-7 Evolution de la résistance à la compression avec le temps de cure

Tableau II-4 Résistances à la compression (MPa) en fonction du temps de cure

| Jours de cure | Sol | SCC | SCCO | SA |
|---|---|---|---|---|
| **7** | 0,41 | 1,46 | 1,01 | 1,11 |
| **14** | 0,41 | 1,63 | 1,34 | 1,60 |
| **21** | 0,41 | 1,83 | 1,38 | 1,69 |
| **28** | 0,41 | 1,89 | 1,40 | 2,02 |
| **90** | 0,41 | 3,75 | 2,29 | 3,40 |

b. Essais de résistance à la flexion

Les essais de résistance à la flexion 3 points sont présentés à la Figure 2-8. Le sol naturel a une résistance de 0,17 MPa. Les essais montrent une évolution de cette résistance pour les sols traités où SCC et SCCO présentent les meilleures résistances à court terme (0-28j).

A 90 jours de cure, le premier traitement SCC atteint une résistance de 1,57 MPa en comparant avec les autres traitements (1,19 MPa pour SCCO et 0,78 MPa pour SA) (Tableau 2-5).

Tableau II-5 Résistances à la flexion (MPa) en fonction du temps de cure

| Jours de cure | Sol | SCC | SCCO | SA |
|---|---|---|---|---|
| **7** | 0,17 | 0,56 | 0,50 | 0,31 |
| **14** | 0,17 | 0,65 | 0,74 | 0,38 |
| **21** | 0,17 | 0,79 | 0,81 | 0,39 |
| **28** | 0,17 | 0,94 | 0,96 | 0,41 |
| **90** | 0,17 | 1,57 | 1,19 | 0,78 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

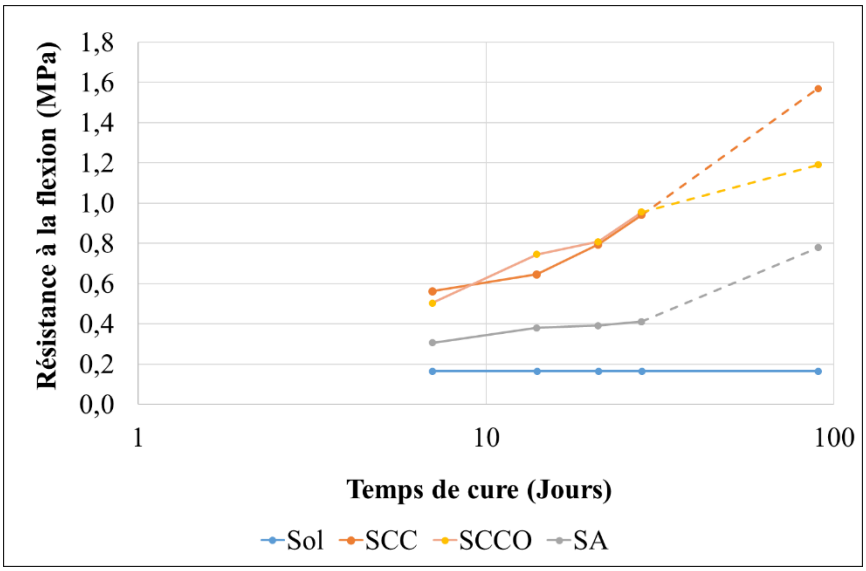





Figure II-8 Evolution de la résistance à la flexion avec le temps de cure

c. Essais de résistance à la traction indirecte

Les essais de résistance à la traction indirecte (essai brésilien) sont présentés à la Figure 2-9. Le sol naturel a une résistance de traction presque nulle (≈0,01 MPa) mais une évolution de cette résistance est observée pour les sols traités. Les traitements SCC et SCCO présentent toujours les meilleures résistances à court terme (0-28j).

A 90 jours de cure, le premier traitement SCC évolue rapidement et atteint une résistance de 0,52 MPa en comparant avec les autres traitements (0,29 MPa pour SCCO et 0,26 MPa pour SA) (Tableau 2-6). Une cohérence des résultats est observée entre les différents essais en ce qui concerne le comportement des sols traités à court et à long terme.

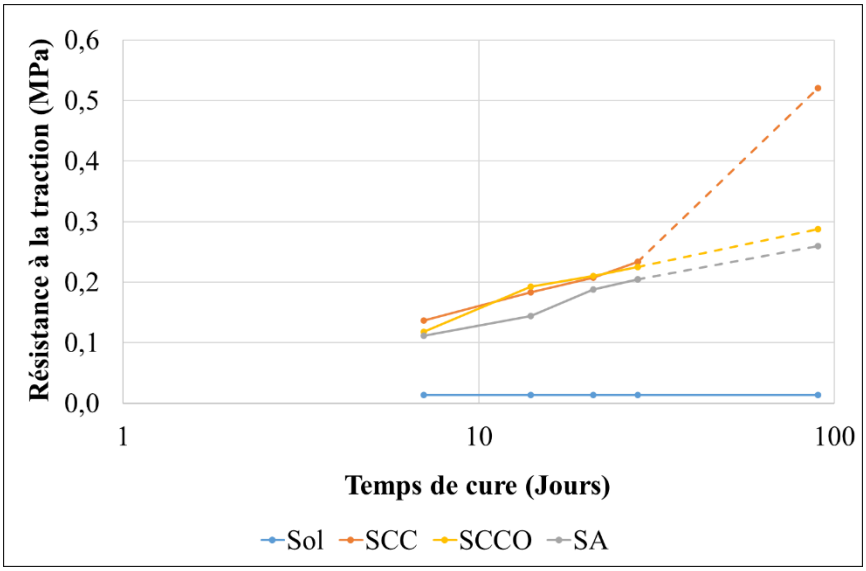





Figure II-9 Evolution de la résistance à la traction avec le temps de cure



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau II-6 Résistances à la traction (MPa) en fonction du temps de cure

| Jours de cure | Sol | SCC | SCCO | SA |
|---|---|---|---|---|
| **7** | 0,01 | 0,14 | 0,12 | 0,11 |
| **14** | 0,01 | 0,18 | 0,19 | 0,14 |
| **21** | 0,01 | 0,21 | 0,21 | 0,19 |
| **28** | 0,01 | 0,23 | 0,22 | 0,20 |
| **90** | 0,01 | 0,52 | 0,29 | 0,26 |

d. Essais de résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est déterminée par des essais triaxiaux réalisés avec trois pressions de confinement (100, 200 et 300 kPa). Les éprouvettes ne sont pas saturées et le calcul de la cohésion et l'angle de frottement est réalisé par la représentation dans le plan (s, t) dite représentation de Lambe.

Les essais de résistance au cisaillement montrent que le sol naturel a un angle de frottement de 27,9° et une cohésion de 34 kPa (Figure 2-11). Les résultats montrent que l'angle de frottement ne varie pas beaucoup avec le traitement. Une augmentation de la cohésion est observée pour les sols traités. Le traitement SCCO présente les meilleures cohésions à court terme (0-28j) lorsqu'il est comparé avec les traitements SCC et SA.

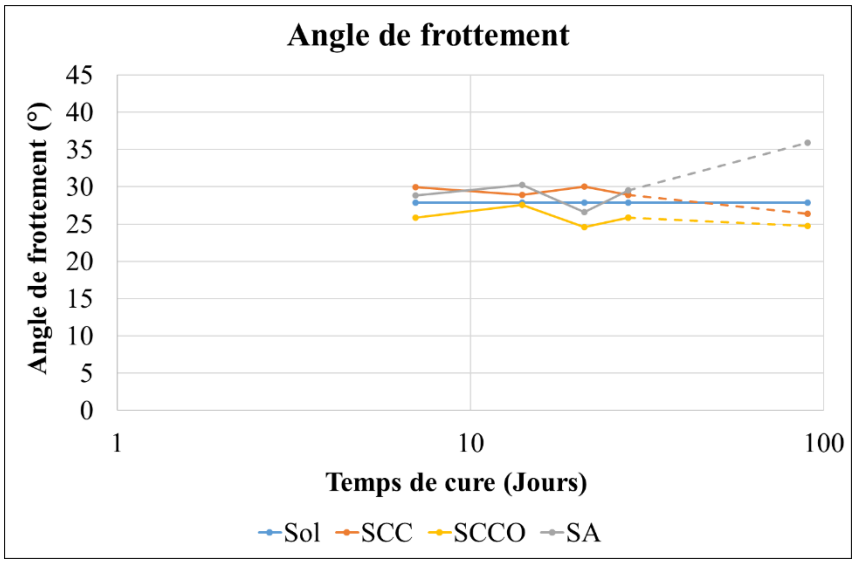
Au-delà de 28j, la cohésion évolue lentement pour le SCCO et à 90j c'est le premier traitement SCC qui présente la meilleure cohésion de 550 kPa en comparant avec les autres traitements (386 kPa pour SCCO et 340 kPa pour SA) (Tableau 2-7). Cette augmentation de cohésion est observée avec le changement du mode de rupture entre le sol naturel (rupture en tonneau) et le sol traité (rupture avec plan de cisaillement) (Figure 2-10).



Figure II-10 Différents modes de ruptures pour le sol naturel et le sol traité



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



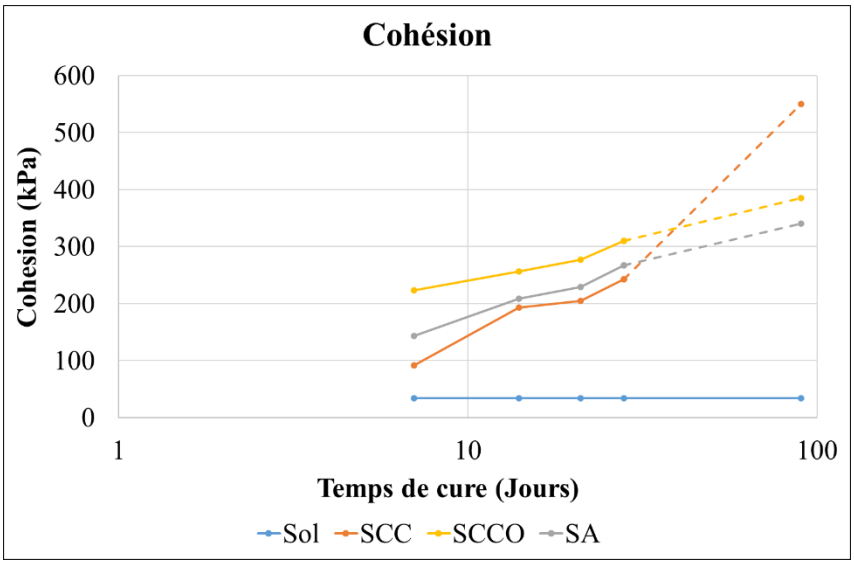




Figure II-11 Evolution de l'angle de frottement et de la cohésion avec la cure

Tableau II-7 Cohésion (kPa) en fonction du temps de cure

| Jours de cure | Sol | SCC | SCCO | SA |
|---|---|---|---|---|
| **7** | 34 | 92 | 224 | 143 |
| **14** | 34 | 193 | 256 | 209 |
| **21** | 34 | 205 | 277 | 229 |
| **28** | 34 | 243 | 310 | 267 |
| **90** | 34 | 550 | 386 | 340 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

e. Essais de résistance à la compression après humidification

Le premier traitement SCC (sol + 1% chaux + 4% ciment) a été testé pour mesurer la résistance à la compression après humidification. Les essais de résistance à la compression (Rc) après 4 jours d'immersion sont présentés à la Figure 2-12. Des différents jours de cure sont testés (0, 1 et 28 jours). Les essais montrent l'effet de l'immersion sur le sol naturel qui ne présente aucune résistance à la compression. Le traitement SCC met en évidence l'importance de la cure. Un jour de cure a suffi pour obtenir une résistance à la compression (1,08 MPa) deux fois supérieure à celle obtenue sans cure (0,56 MPa). A 28 jours de cure + 4 jours d'immersion, on remarque une résistance à la compression (1,61 MPa) inférieure à celle mesurée à 28 jours de cure sans immersion (1,89 MPa).

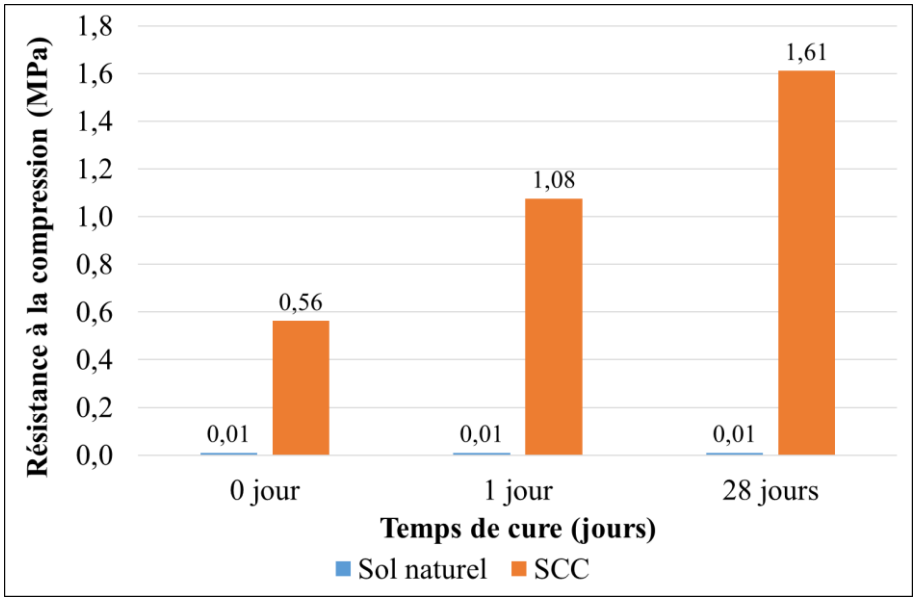



Figure II-12 Résistance à la compression / Humidification 4 jours

Des essais de résistance à la compression ont été également réalisés après 60 jours d'immersion et pour les mêmes jours de cure. Les résultats sont présentés à la Figure 2-13.

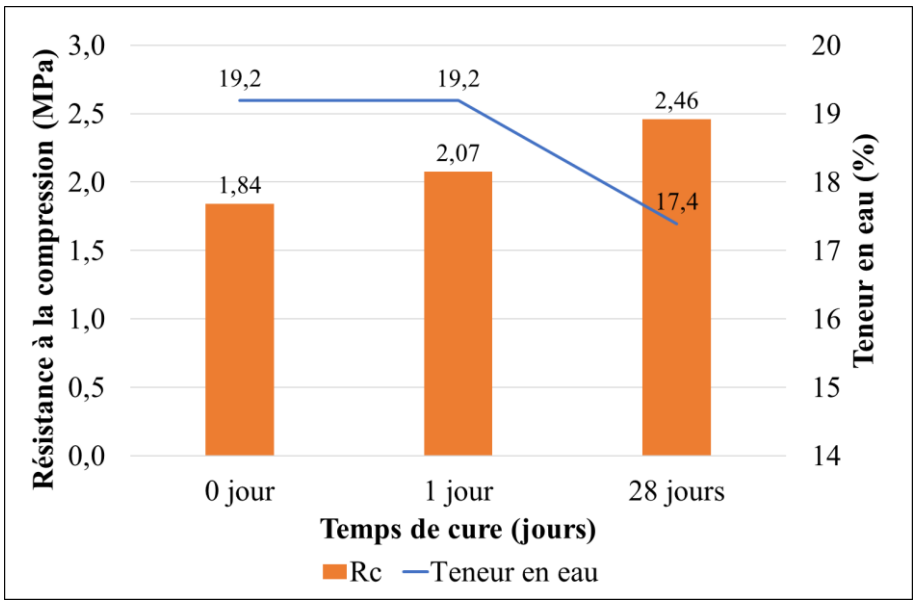



Figure II-13 Rc et teneur en eau / Humidification 60



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les échantillons ont été préparés à une teneur optimale Proctor (16,2%) et la teneur en eau a été mesurée après la réalisation de l'essai. Pour les trois jours de cure testés, la teneur en eau mesurée est plus grande que celle du Proctor. On constate une diminution de la teneur en eau avec le temps de cure, ce qui met en évidence l'effet de cure sur l'imperméabilité du sol traité. Les résultats montrent que les résistances à la compression après 60 jours d'immersion sont plus grandes que celles présentées pour 4 jours d'immersion (Figure 2-12) pour le même jour de cure, ce qui indique que le sol traité a continué sa prise sous immersion totale dans l'eau.

f. Corrélation entre la résistance à la traction et à la compression

L'évolution de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression pour les trois formules de traitement et pour les différents jours de cure est présentée à la Figure 2-14. On remarque une corrélation linéaire avec une pente de 0,11. Cette pente est très proche de celle trouvée par Castaneda-Lopez et al. (2024) qui ont établi des liens entre ces résistances pour un sol traité à 3% de ciment et qui ont trouvé une pente de 0,10.

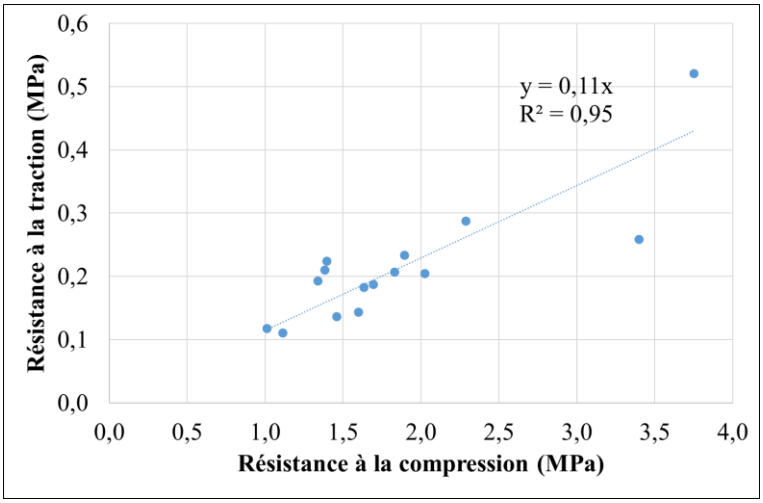



Figure II-14 Corrélation entre les résistances à la traction et à la compression

Les essais triaxiaux réalisés dans notre étude montrent que l'angle de frottement ne varie pas beaucoup avec le traitement (27,9 ± 3°, à l'exception de celui du traitement SA qui présente un angle de frottement de 35,9° à 90 jours, ce qui ne correspond pas à une valeur attendue) (Figure 2-11). Ces résultats sont aussi cohérents avec les essais de Castaneda-Lopez et al. (2024) qui ont montré que le temps de cure n'a pas d'impact sur l'angle de frottement. Cette comparaison permet d'assurer la fiabilité de nos essais et des résultats obtenus.

A la suite de tous les essais de résistance mécanique présentés dans ce chapitre, la formule SCC (1% chaux et 4% ciment) a été choisie pour le traitement de la PTC. Ce traitement, à base de chaux/ciment est cadré par le guide du traitement des sols (GTS, 2000), il présente les meilleurs résistances mécaniques parmi les trois formules testées à long terme et le dosage utilisé est assez courant dans les projets du traitement des sols.

Les trois formules de traitement entraînent une amélioration significative des performances mécaniques du sol naturel et les deux traitements SA (5% Argiliant+®) et SCCO (1% Chaux + 4% Compaxem®) présentent un intérêt pour l'utilisation du metakaolin dans le traitement des sols, ce qui peut limiter l'utilisation du ciment et des LHR.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.1.3. Dispositif expérimental

### II.1.3.1. Fosse expérimentale

La fosse expérimentale du Cerema de Rouen permet de construire en laboratoire un remblai sur inclusions rigides à l'échelle 1. La fosse d'une surface de 64 m², permet d'accueillir 16 inclusions rigides en béton armé non ancrées dans la fosse, de 30 cm de diamètre et 1 m de hauteur, inscrites dans un maillage carré de 2 m de coté (Figure 2-15).

Le dispositif mis en place pour évaluer l'efficacité des plateformes de transfert de charge en sol traité, est constitué de plusieurs couches de sol modélisant un sol compressible, des inclusions rigides le renforçant, une PTC traitée, un remblai de 1,5 m de hauteur et des surcharges.



Figure II-15 Fosse expérimentale du Cerema de Rouen

### II.1.3.2. Sol compressible

Le sol compressible est constitué d'une couche de biocofra de 10 cm d'épaisseur installée sur des caillebotis (Figure 2-16a), d'une couche de Deltagom de 50 cm d'épaisseur et d'une couche de sable.

Le Biocofra (Figure 2-16b) est une plaque de carton alvéolaire utilisée pour réaliser des vides sanitaires. Cette plaque peut supporter 5 t/m² lorsqu'elle est sèche et peut être dissoute par humidification. C'est cette dissolution des plaques de Biocofra qui permet d'appliquer un tassement maitrisé après la construction du remblai et la mise en place des surcharges. La présence des caillebotis sous les plaques de Biocofra assure une homogénéité de la saturation des plaques.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

Figure II-16 Caillebotis – Couche de Biocofra

Le sol compressible est modélisé par une couche de 50 cm de Deltagom et une couche de 37,5 cm de sable (Figure 2-17). Le Deltagom est un granulat de caoutchouc issus du recyclage de pneumatiques usagés, formé de particules de diamètre variant de 2 à 8 mm. Il atteint des déformations de l'ordre de 15% sous des charges de 100 kPa (Terqueux et al., 2022).



Figure II-17 Couche de Deltagom – Couche de sable

Les sols compressibles renforcés par inclusions rigides ont des épaisseurs variantes entre 5 et 30 m. La difficulté de la modélisation de la compressibilité de ces sols est d'obtenir des tassements similaires avec une couche beaucoup moins épaisse, d'où la nécessité d'utiliser une couche très compressible. Pour ne pas consommer tout le tassement pendant les premières étapes de construction, une couche de sable a été rajoutée sur la couche de Deltagom pour jouer un rôle de tampon.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.1.4. Mise en œuvre

La mise en œuvre est similaire pour les deux essais avec une seule différence, l'ajout d'une plateforme de travail traitée dans l'essai 2. L'installation du Biocofra, du sol compressible (Deltagom, sable) sont identiques pour les deux essais. Cette partie présente la plateforme de travail, le traitement de la PTC traitée et la mise en place du remblai et des surcharges.

#### II.1.4.1. Essai 1 : sans plateforme de travail

Le premier traitement SCC (sol + 1% chaux + 4% ciment) a été choisi pour la PTC traitée. Le traitement par sacs a été effectué puisque le sol ne peut pas être traité directement dans la fosse sous le risque de consommer tout le tassement du Deltagom et d'endommager les têtes des inclusions et les différents capteurs de contrainte et de tassement sur la fosse.

Une première étape a consisté à homogénéiser et étaler le sol (Figure 2-18), préférablement sous abri pour qu'il ne soit pas exposé à des conditions météorologiques défavorables. Une couche de 25 cm de sol a été installée dans un hall sur une surface de 20 m x 10 m. Les dimensions du site sont basées sur la quantité du sol nécessaire pour avoir une plateforme traitée de 40 cm d'épaisseur avec une densité de 1,79 t/m$^3$. L'épaisseur de 0,25 m est fixé par rapport aux caractéristiques géométriques du rotor du pulvimixeur qui peut malaxer le sol à cette épaisseur. La teneur en eau du sol naturel mesurée est égale à 19,5%.



Figure II-18 Préparation du limon de Dieppe

Le sol a été tout d'abord traité à la chaux, puis le traitement au ciment a été effectué une heure après. Cette procédure a permis d'une part de diminuer la teneur en eau du sol, et d'autre part de faciliter la floculation des particules. Les sacs de chaux de 25 kg, ont été disposés sur le site selon un maillage prédéterminé basé sur le dosage de traitement prévu (Figure 2-19). Ensuite, le liant a été étalé sur le sol manuellement (Figure 2-20). Toutes les mesures protectrices ont été prises en compte pour protéger le personnel du chantier, les ouvriers et les opérateurs des malaxeurs et des engins.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure II-19 Distribution des sacs de chaux



Figure II-20 Epandage de chaux

Une fois la chaux étalée sur le sol, le mélange a été malaxé à l'aide d'un pulvimixeur (Figure 2-21). A la fin de cette étape, la teneur en eau a diminué de 0,6%.



Figure II-21 Malaxage sol-chaux



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

A la suite du traitement à la chaux, les mêmes étapes ont été faites pour l'épandage du ciment où les sacs de 35 kg ont été distribués selon un maillage prédéterminé et le ciment a été étalé au râteau avant qu'il soit malaxé (Figure 2-22). Une fois que le mélange est traité au ciment, il faut qu'il soit directement transporté à la fosse pour qu'il soit compacté. Le ciment a une prise très rapide d'où le risque de perdre les propriétés du mélange.



Figure II-22 Epandage et traitement au ciment du sol

Le mélange a été transporté à la fosse par des tracteurs et des engins afin d'être compacté (Figure 2-23). Le mélange a été étalé au râteau et la teneur en eau a été mesurée avant le compactage pour vérifier que la teneur en eau est proche de la teneur optimale Proctor. La teneur en eau mesurée est 17,2%, légèrement supérieure à la teneur optimale du traitement SCC (16,2%).



Figure II-23 Transport du mélange à la fosse pour compactage

La plateforme de transfert de charge a été construite en 2 couches de 20 cm pour assurer le bon compactage du mélange et la bonne densité du sol. Une fois que tout le sol a été transporté sur la fosse (Figure 2-24) un niveau laser a été utilisé pour contrôler l'épaisseur de la première couche non compactée.

Selon les caractéristiques du sol et du traitement choisi, une couche de 30 cm du sol traité foisonné a été nécessaire pour avoir la première couche de 20 cm de la PTC après compactage.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure II-24 Préparation de la première couche du sol

Le compactage a été fait à l'aide d'un rouleau compacteur (Figure 2-25) et l'épaisseur de la couche a été toujours contrôlée par le niveau laser. Pour la première couche, un compactage par deux passes (aller-retour) et sans vibrations a été choisi pour limiter le tassement du Deltagom.

Le compactage a été réalisé d'abord au droit des files des inclusions rigides pour assurer des tranches de sol compactes et ensuite entre les IR. Une deuxième couche a été réalisée de la même façon afin d'obtenir finalement une PTC traitée de 40 cm d'épaisseur.



Figure II-25 Compactage de la première couche du sol traité

La plateforme traitée de 40 cm d'épaisseur (Figure 2-26) a été chargée après 14 jours de cure. Ce temps de cure a été choisi pour que la plateforme atteigne des résistances mécaniques suffisantes pour qu'elle supporte le remblai et les surcharges.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure II-26 Plateforme traitée

Un remblai de 1,5 m de hauteur a été ensuite installé sur la PTC traitée pour simuler un chargement réel. Le remblai a été mis en place en 3 couches de 0,5 m pour assurer le bon compactage (Figure 2-27).

Ensuite, il a été laissé pendant un mois pour avoir suffisamment de temps pour atteindre l'équilibre du système (tassement et contrainte stables au niveau des différentes couches) et pour observer les mécanismes de transfert de charge dans la plateforme.



Figure II-27 Mise en place du remblai

Finalement, des surcharges ont été ajoutées sur le remblai (Figure 2-28). L'objectif est d'étudier le comportement de la plateforme traitée sous charges importantes. Les surcharges ont été laissées pendant 14 jours avant la dernière étape : la dissolution du biocofra. Dans cette phase, la fosse a été alimentée en eau, qui monte jusqu'au niveau des caillebotis et assure une dissolution uniforme du Biocofra, imposant ainsi un tassement supplémentaire de 10 cm.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure II-28 Mise en place des surcharges

Une coupe transversale du dispositif expérimental complet de cet essai avec les différentes couches du sol installées, leurs épaisseurs et les surcharges ajoutées sont présentées à la Figure 2-29.

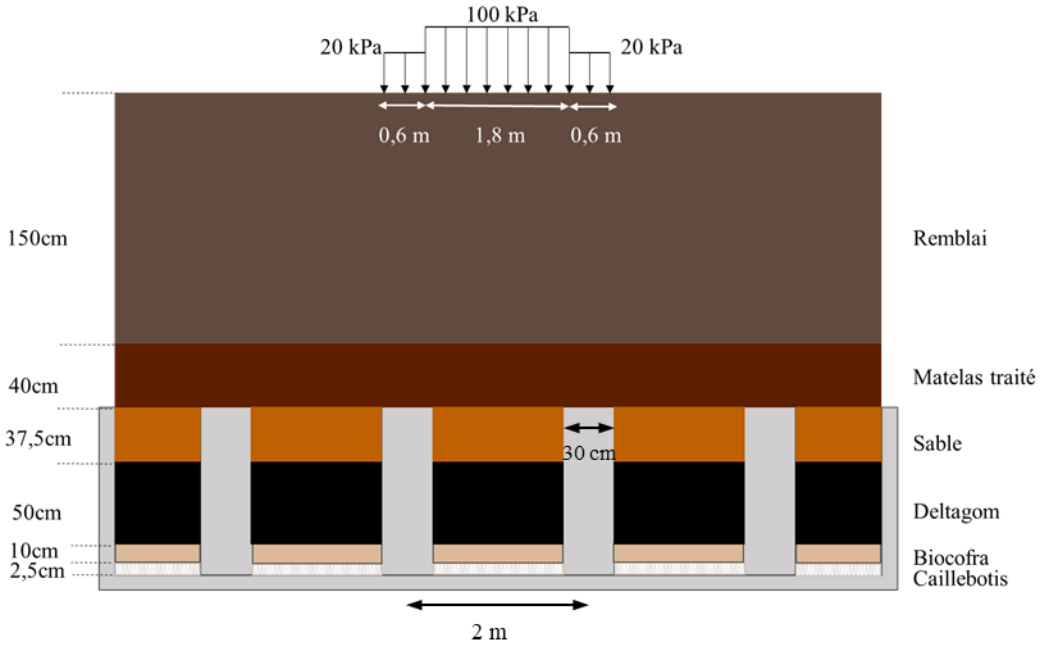



Figure II-29 Coupe transversale de l'essai 1



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.1.4.2. Essai 2 : avec plateforme de travail

Pour le deuxième essai, le dispositif expérimental utilisé est identique à celui de 1er essai avec quelques différences :

- Une plateforme de travail de 10 cm traitée à 2% de chaux a été ajoutée sous la plateforme traitée afin d'assurer l'homogénéité de son compactage (Figure 2-30). Un compacteur à plaque vibrante a été utilisé pour compacter la plateforme de travail afin de protéger les capteurs et les têtes des inclusions rigides et elle a été laissée pendant 21 jours de cure avant la mise en œuvre de la PTC. Cette durée a été suffisante pour atteindre des résistances mécaniques permettant la circulation des engins.
- La PTC traitée a été réalisée selon la même procédure de l'essai 1 mais laissée pendant 1 mois de cure.

Le traitement et l'installation de la plateforme traitée, du remblai et des surcharges ont été réalisés selon la même procédure que l'essai 1 présentée dans la section 1.4.1.



Figure II-30 Plateforme de travail traitée

Le nouveau schéma de l'essai est présenté à la Figure 2-31.

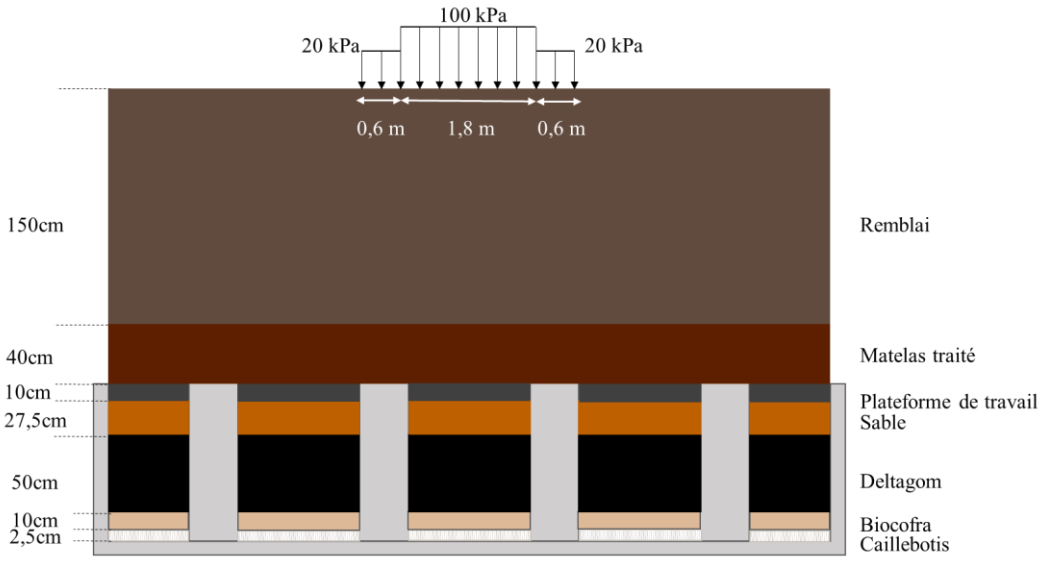



Figure II-31 Coupe transversale de l'essai 2



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.1.5. Instrumentation

### II.1.5.1. Capteurs

Le transfert de charge a été mesuré à l'aide de capteurs de pression totale localisés sur les inclusions de la maille centrale, sous et sur la plateforme de transfert de charge. La taille et la gamme de ces capteurs ont été adaptées à leur position. La charge a été aussi mesurée sous les quatre inclusions de la maille centrale par l'intermédiaire de capteurs de force installés entre des platines (Figure 2-32).



Figure II-32 Instrumentation des inclusions de la maille centrale par des capteurs de pression totale et des capteurs de force

Le tassement du sol compressible, de la plateforme de transfert de charge et du remblai a été mesuré dans la maille centrale par l'intermédiaire de capteurs de tassement (Figure 2-33).



Figure II-33 Instrumentation de la PTC par des capteurs de pression totale et des capteurs de tassement

Ces capteurs ont été connectés en série à un récipient rempli d'eau situé à proximité de la fosse mais ne subissant pas de tassement. La différence de pression entre le capteur qui tasse et le récipient qui est fixe permet de déterminer le tassement de chaque capteur.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.1.5.2. Instrumentation de la fosse

L'instrumentation de la fosse expérimentale a été faite en plusieurs niveaux avec une combinaison des capteurs de pression et des capteurs de tassement connectés à une centrale d'acquisition (DATATAKER DT85 GM) sur des voies préalablement configurées afin de récupérer les données des différents capteurs. La maille centrale a été tout particulièrement instrumentée car elle est isolée des effets de bord par les autres inclusions.

Quatre anneaux de force (F1, F2, F3 et F4) ont été placés sous les 4 inclusions centrales (Figure 2-34). Ils ont permis de mesurer la contrainte en pied des inclusions rigides.

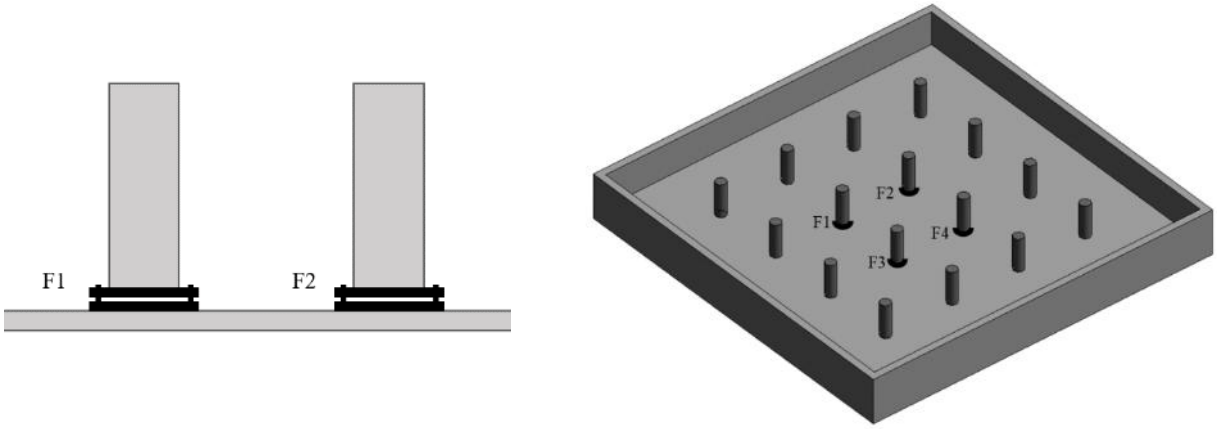



Figure II-34 Instrumentation - anneaux de force

Le capteur de tassement T1 a été installé sur le Biocofra pour vérifier la dissolution de cette couche (Figure 2-35). Il a été placé au centre de la fosse entre les 4 inclusions centrales.

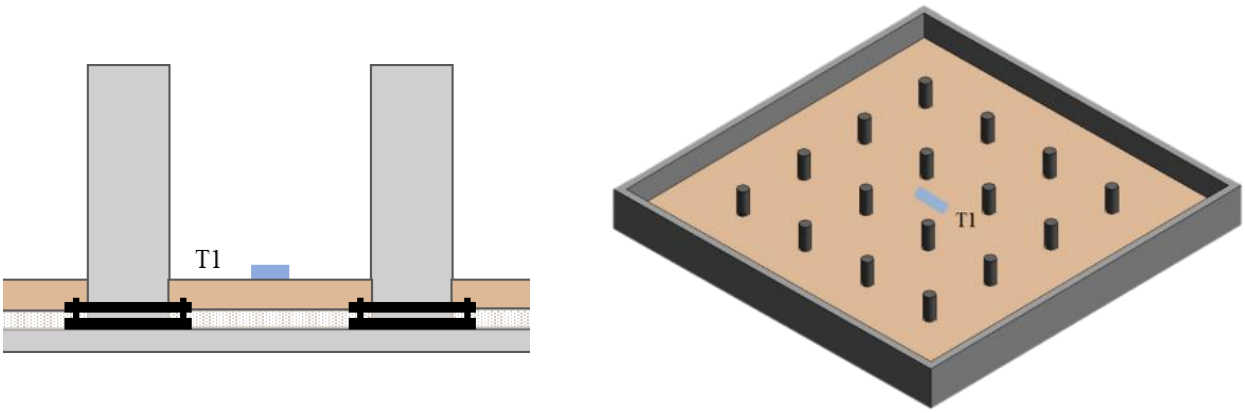



Figure II-35 Instrumentation au niveau du Biocofra

Le capteur de tassement T2 a été installé au centre de la maille centrale sur la couche de Deltagom pour mesurer son tassement lors des différentes phases de construction (mise en place du sable, de la PTC, du remblai et des surcharges) (Figure 2-36).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

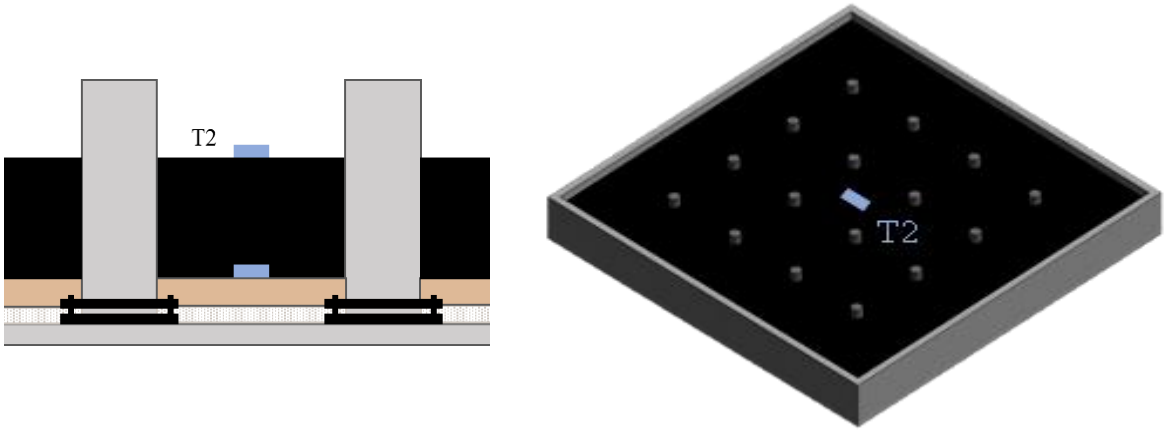



Figure II-36 Instrumentation au niveau du Deltagom

Au niveau du sable (Figure 2-37) :

- 4 capteurs de tassement ont été installés : T3 au centre de la fosse, T4 entre 2 inclusions et T5 et T6 sur la diagonale.
- 6 capteurs de pression totale ont été installés : CPT1, CPT2, CPT3 et CPT4 sur les têtes des inclusions centrales, CPT5 au centre de la fosse et CPT6 entre 2 inclusions.

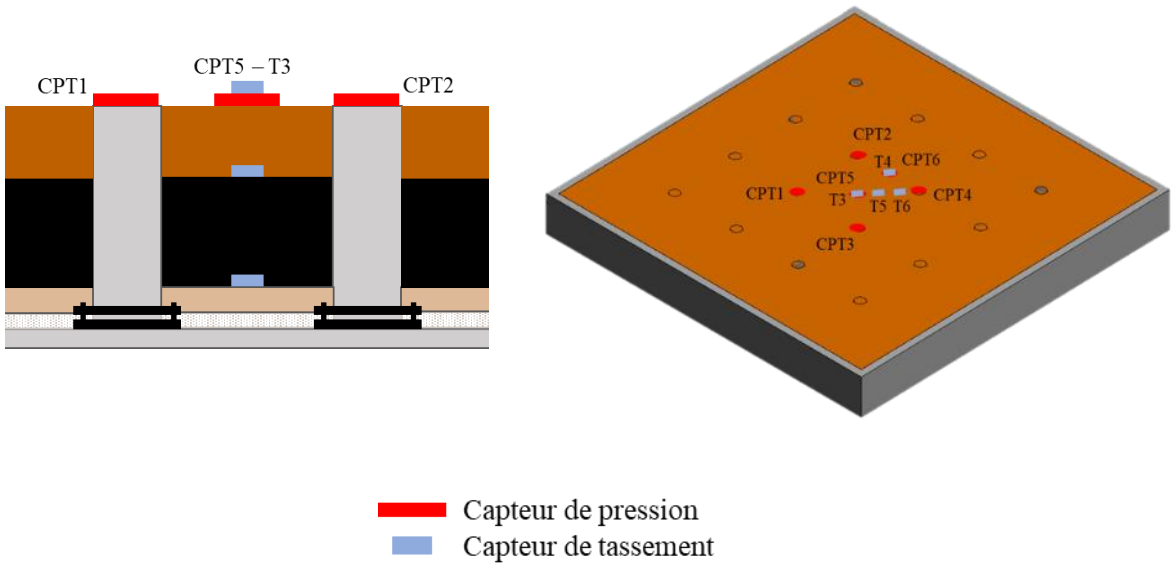



Figure II-37 Instrumentation au niveau du sable



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Sur la PTC traitée, des capteurs de tassement et de pression totale ont été installés (Figure 2-38) :

- Trois capteurs de tassement : T7 au milieu de la fosse, T8 entre deux inclusions et T9 au droit d'une inclusion.
- Cinq capteurs de pression totale : CPT9, CPT10, CPT11 au droit des inclusions, CPT12 est un capteur annulaire installé autour d'une inclusion, CPT8 entre deux inclusions et CPT7 au milieu de la fosse.

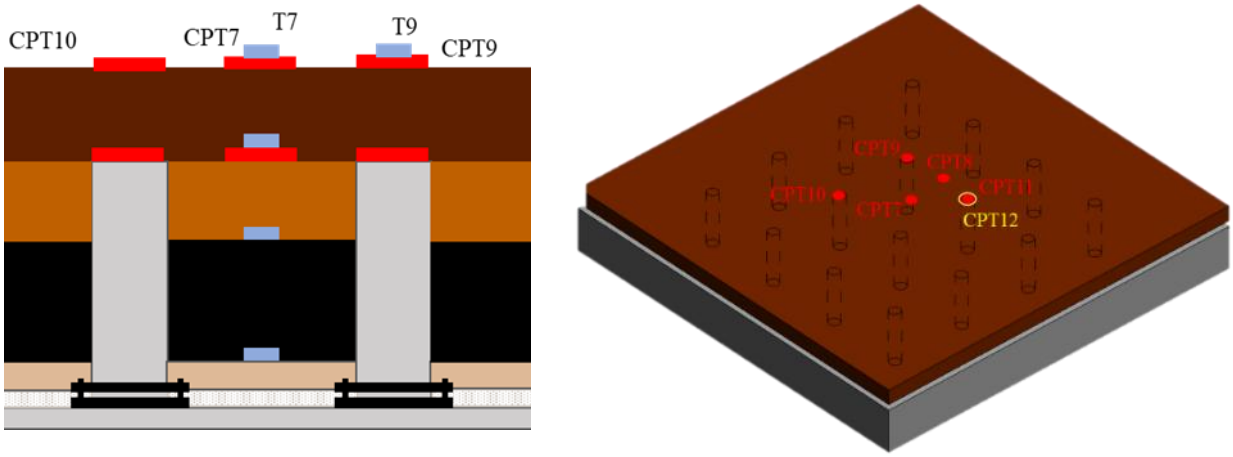



Figure II-38 Instrumentation au niveau de la PTC

Sur la première couche de remblai, trois capteurs de tassement ont été installés (Figure 2-39) :

- T10 au milieu de la fosse, T11 entre deux inclusions et T12 au droit d'une inclusion rigide.

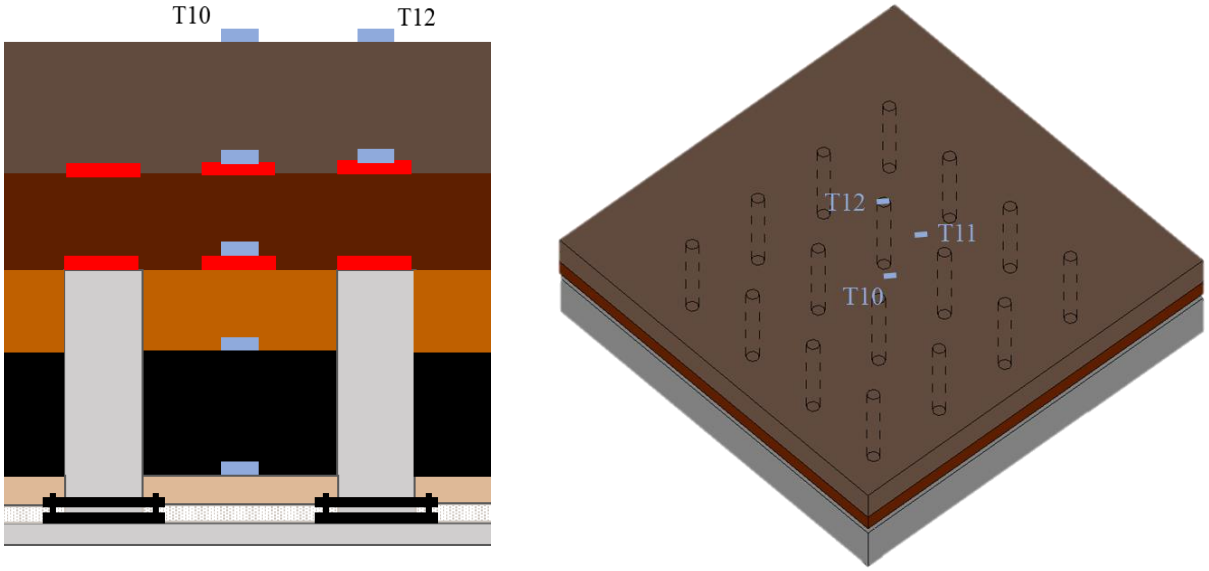



Figure II-39 Instrumentation au niveau du remblai



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.1.6. Contrôle de la PTC traitée

### II.1.6.1. Teneur en eau

La teneur en eau a été mesurée pour les différentes phases de traitement et les résultats sont présentés à la Figure 2-40 pour les deux essais. La teneur en eau du mélange (sol + chaux + ciment) avant compactage est de 17,2% et 16,6% pour les essais 1 et 2 respectivement. Ces teneurs en eau sont légèrement supérieures à la teneur en eau optimale Proctor (16,2%).

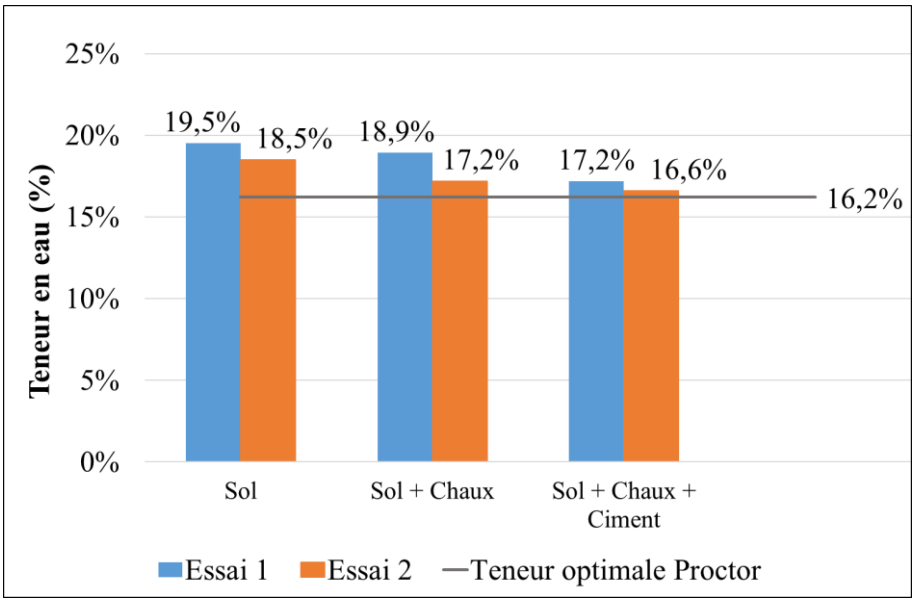



Figure II-40 Teneur en eau sur site

### II.1.6.2. Compactage

Un Compactomètre de CLEGG est un appareil qui permet d'exprimer la portance en subsurface des matériaux tel que les plateformes traitées en mesurant une valeur « Impact Value » qui peut être corrélée à l'indice C.B.R. (Californian Bearing Ratio) utilisé pour le dimensionnement des chaussées. Cet appareil consiste à faire descendre une masse frappante d'une hauteur définie et une boîte de mesure permet de déterminer une valeur moyenne après cinq impacts successifs. L'appareil utilisé dans notre étude est la version « légère » avec une masse frappante de 4,5 kg et une hauteur de chute de 457 mm. Cet appareil est utilisé donc pour réaliser des essais sur la fosse dans le but de déterminer la capacité portante et la qualité du compactage de la plateforme traitée après cure. Différents points de mesure sont choisis sur la maille centrale pour vérifier l'homogénéité du compactage en mesurant une valeur CBR moyenne (Figure 2-41).

Pour le 1$^{er}$ essai, une homogénéité de compactage a été observée sur la fosse entre les IR avec une valeur CBR moyenne de 41% ± 9% avec la présence des « Points durs » au droit des IR où les valeurs CBR ont été significativement plus importantes avec une valeur moyenne de 77% ± 4%.

Pour le 2$^{ème}$ essai, les mesures ont montré une meilleure homogénéité de compactage sur la totalité de la PTC avec des valeur CBR très proches au droit et entre les IR. La plateforme de travail traitée a permis donc d'assurer une homogénéité de compactage et réduire les « points durs » observés lors du 1$^{er}$ essai.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

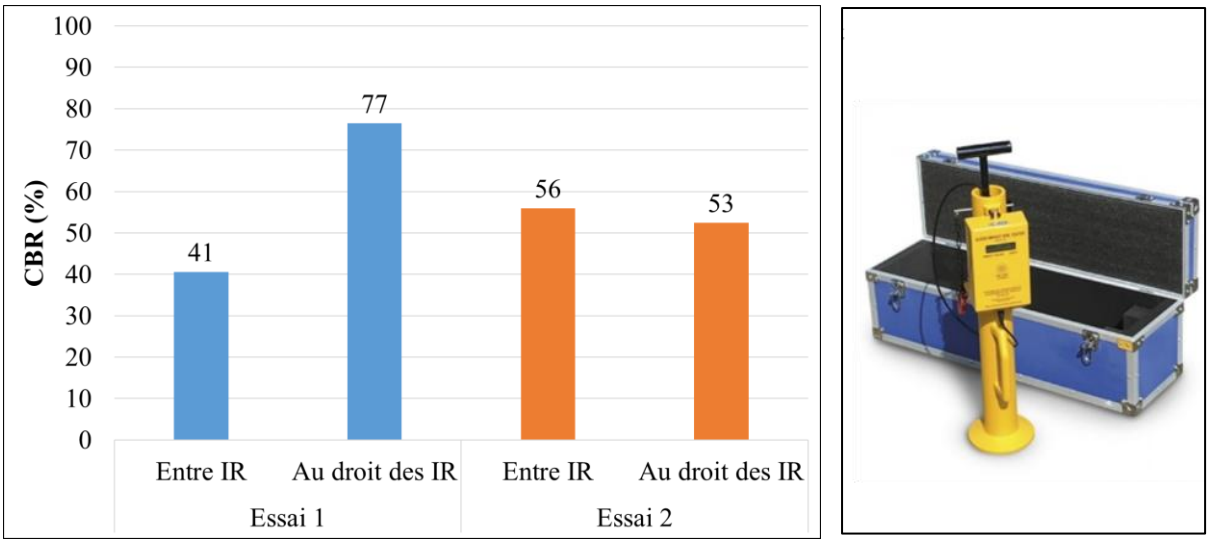



Figure II-41 Vérification du compactage de la PTC traitée



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.1.7. Résultats

### II.1.7.1. Essai 1 : sans plateforme de travail

- Evolution de la contrainte

Les contraintes en tête des quatre inclusions rigides centrales sont présentées à la Figure 2-42. Au niveau des têtes, le capteur CPT2 ne fonctionnait pas, les contraintes des trois autres capteurs sont donc présentées. Sur les têtes des inclusions, les CPT1 et 4 donnent des valeurs très proches. Ces mesures sont légèrement inférieures sur l'inclusion du CPT3.

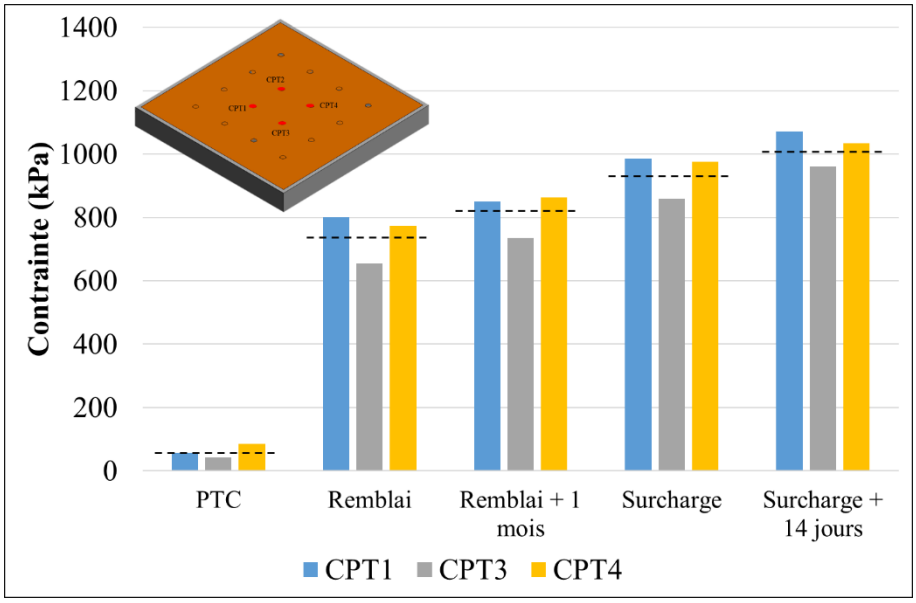



Figure II-42 Contraintes en tête des inclusions centrales

En pied (Figure 2-43), les contraintes sont calculées à partir des mesures des capteurs de force et les valeurs sont assez homogènes pour les quatre inclusions. Pour la suite, des valeurs moyennes des contraintes en pied et en tête des quatre inclusions centrales seront présentées.

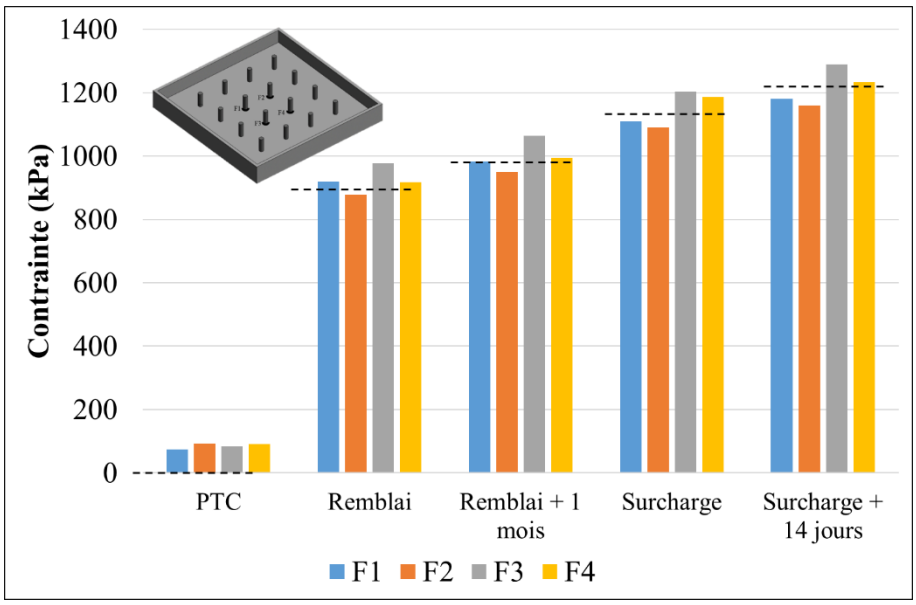



Figure II-43 Contraintes en pied des inclusions centrales



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L'évolution de la contrainte en pied et en tête des inclusions rigides ainsi qu'au niveau du sable est présentée à la Figure 2-44 pour les différentes phases de construction. La contrainte au niveau des inclusions est significativement plus grande qu'au niveau du sable mettant en évidence un bon transfert de charge. La contrainte en pied des IR est plus importante qu'en tête et peut s'expliquer par le frottement négatif mobilisé le long des inclusions.

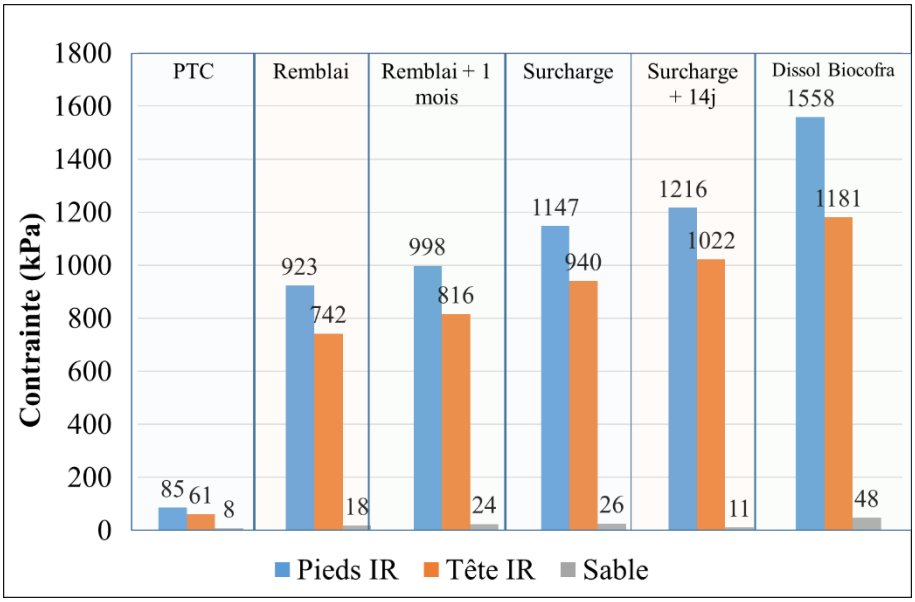



Figure II-44 Evolution de la contrainte

La contrainte sur les têtes des inclusions rigides était de 742 kPa après la mise en œuvre du remblai, et pendant le mois d'attente, cette contrainte a augmenté de 10% pour atteindre 816 kPa. Ce même essai a été réalisé par Terqueux et al. (2022) pour une plateforme granulaire en utilisant le même dispositif expérimental et la même instrumentation. Dans le cas de la PTC granulaire, la contrainte en tête des IR atteignait 463 kPa à la fin de la construction du remblai et augmentait de 39% pendant le mois de pause. Cette comparaison met en évidence des mobilisations du transfert de charge différentes selon la nature de la PTC où un transfert de charge immédiat est observé dans la plateforme traitée contrairement au cas de la plateforme granulaire où les mécanismes de transfert de charge sont un peu plus progressifs.

- Evolution du tassement

Des capteurs de tassement ont été installés sur un axe vertical au centre de la fosse sur les différentes couches du sol pour observer l'évolution du tassement (Figure 2-45).

Le capteur T1 est stable jusqu'à la dissolution du Biocofra. Les capteurs T2 et T3 sous la PTC mesurent un premier tassement lors de la construction de la PTC puis se comportent comme les capteurs T7 et T10 pendant les phases de construction. L'effet « dalle » qui peut être attendu avec une plateforme en sol traité (pas de tassement mesuré pendant les différentes phases de construction) n'est donc pas observé pour ce premier essai. Lors de la dissolution du Biocofra qui impose un tassement de 93 mm, on observe que tous les autres capteurs tassent de 140 mm mettant en évidence une rupture de la plateforme et un écrasement de la couche de Deltagom.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

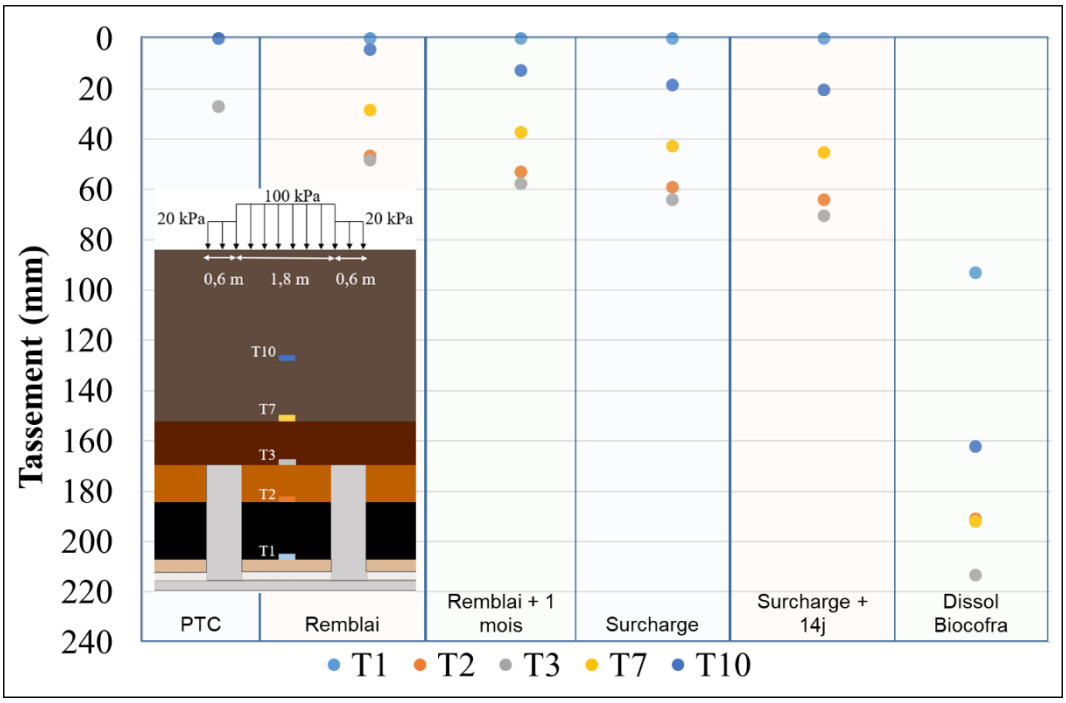



Figure II-45 Evolution du tassement

La mesure du tassement au toit de la plateforme en sol traité (Figure 2-46) permet de mettre en évidence le mécanisme de rupture par poinçonnement (Figure 2-47).

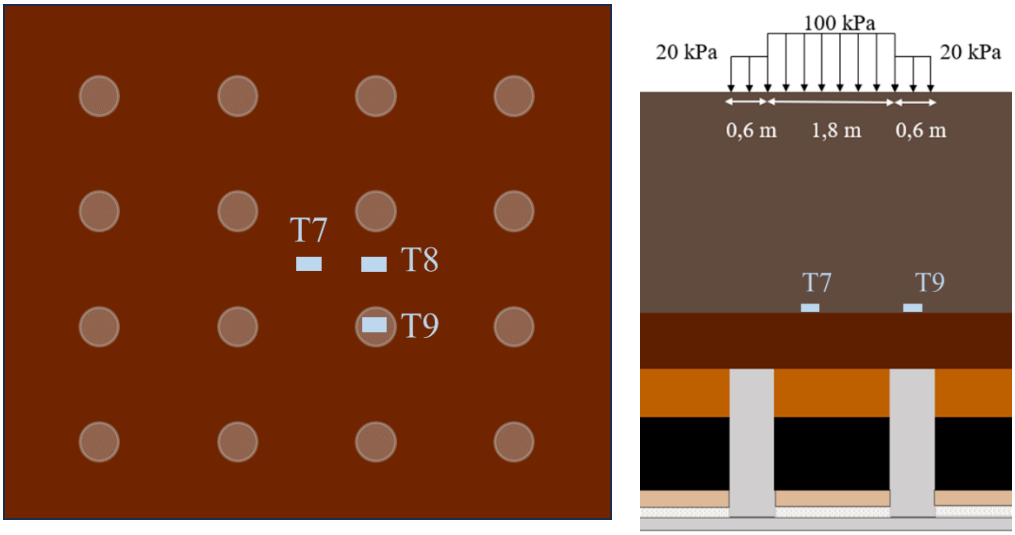



Figure II-46 Instrumentation de la PTC

Le tassement des capteurs T7 (entre 4 inclusions), T8 (entre 2 inclusions) et T9 (au droit d'une IR) installés sur la PTC traitée est le même pour toutes les phases de construction. Un mécanisme de rupture par flexion serait mis en évidence par un tassement plus grand du capteur T7 installé entre 4 IR.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

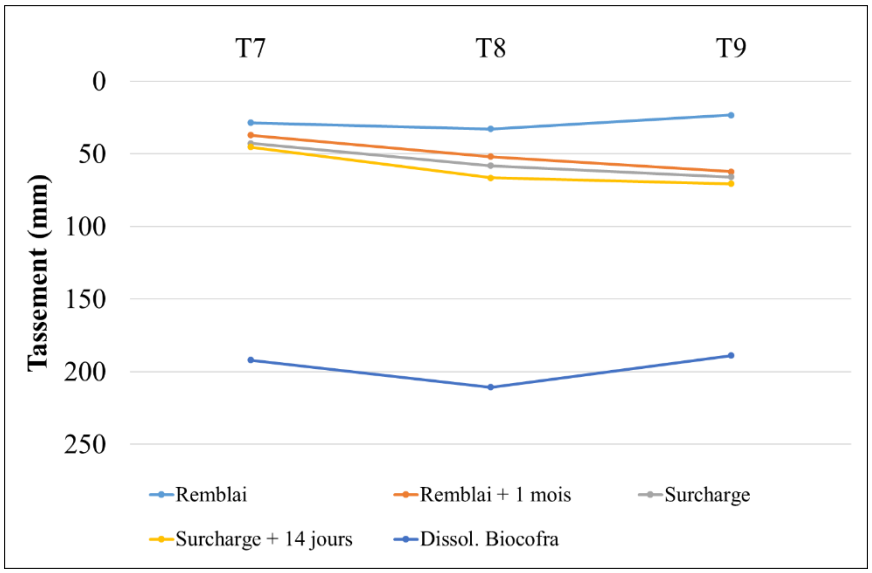



Figure II-47 Comportement de la PTC traitée

- Observation lors du démontage

Après le retrait du remblai, les valeurs du CBR équivalent ont été mesurées sur la plateforme traitée avec le compactomètre de Clegg pour comparer avec celles mesurées après 14 jours de cure (Figure 2-48).

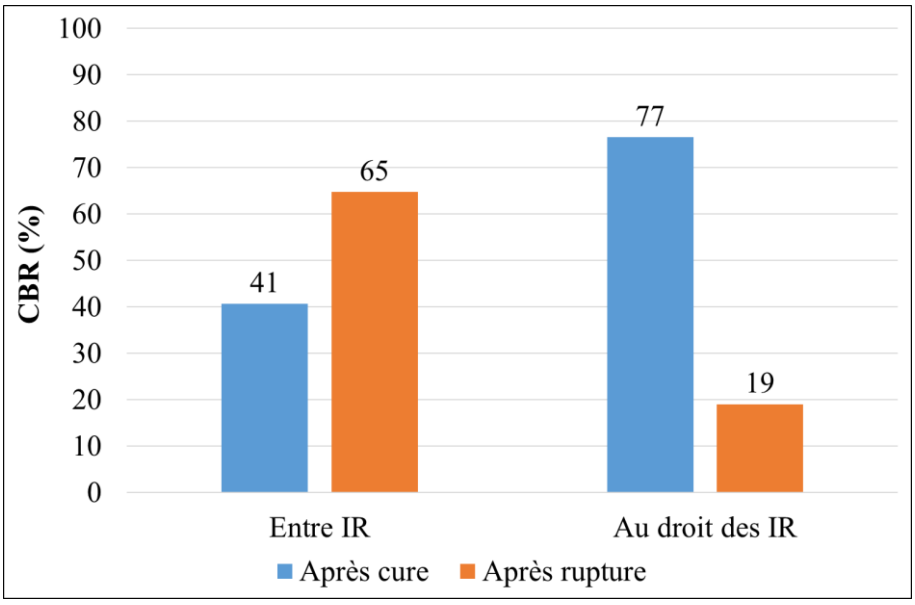



Figure II-48 Comparaison de la valeur CBR équivalent de la plateforme traitée

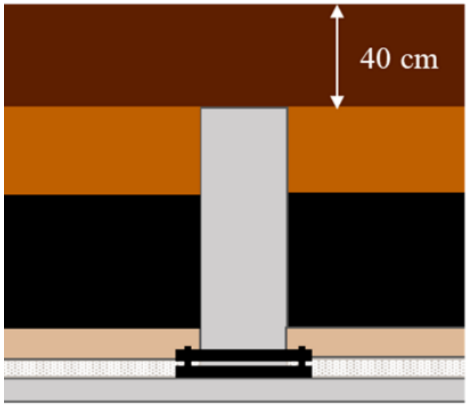
Une chute de la valeur du CBR équivalent est observée au droit des inclusions rigides ce qui indique une rupture au droit des IR. Par contre, une augmentation de la valeur CBR est mesurée entre les IR. Cette différence de comportement de la plateforme au droit des inclusions et au droit du sol confirme la rupture par poinçonnement qui sollicite uniquement la plateforme au droit des inclusions.

Lors du démontage de la plateforme traitée, les mécanismes de rupture ont été visualisés en coupant le sol avec précaution. On observe que la plateforme traitée, initialement de 40 cm

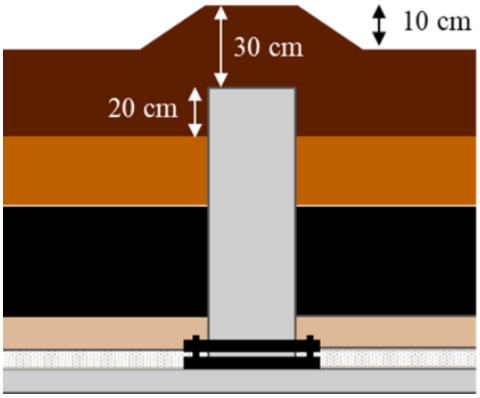


Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

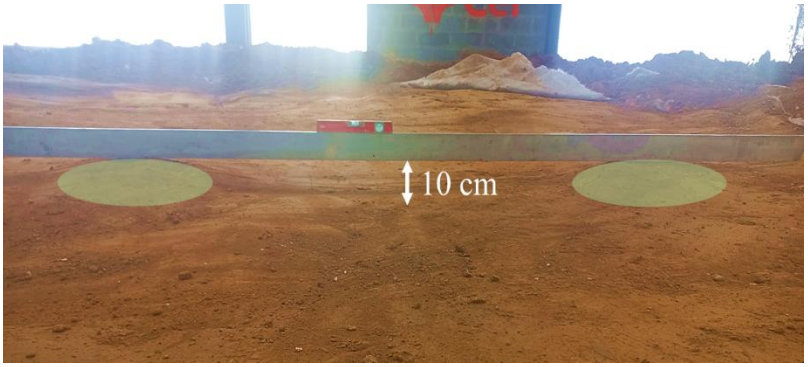
d’épaisseur, a été poinçonnée de 20 cm par les inclusions (cohérent avec les mesures) avec un écrasement de 10 cm au niveau des têtes des IR (Figure 2-49).




Etat initial




Etat final (après rupture)




Ecrasement au niveau des têtes des IR




Poinçonnement

Figure II-49 Rupture de la plateforme traitée

- Vérification analytique de la rupture

L’évolution du tassement en fonction du temps est présentée à la Figure 2-50. On remarque qu’après la construction du remblai, le tassement au niveau des différentes couches du sol s’est stabilisé jusqu’au 23 décembre où il y a eu une réactivation du tassement alors que le dispositif expérimental ne subissait aucune nouvelle sollicitation (le CEREMA était fermé). Cette réactivation du tassement peut être un signe d’une rupture de la plateforme.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

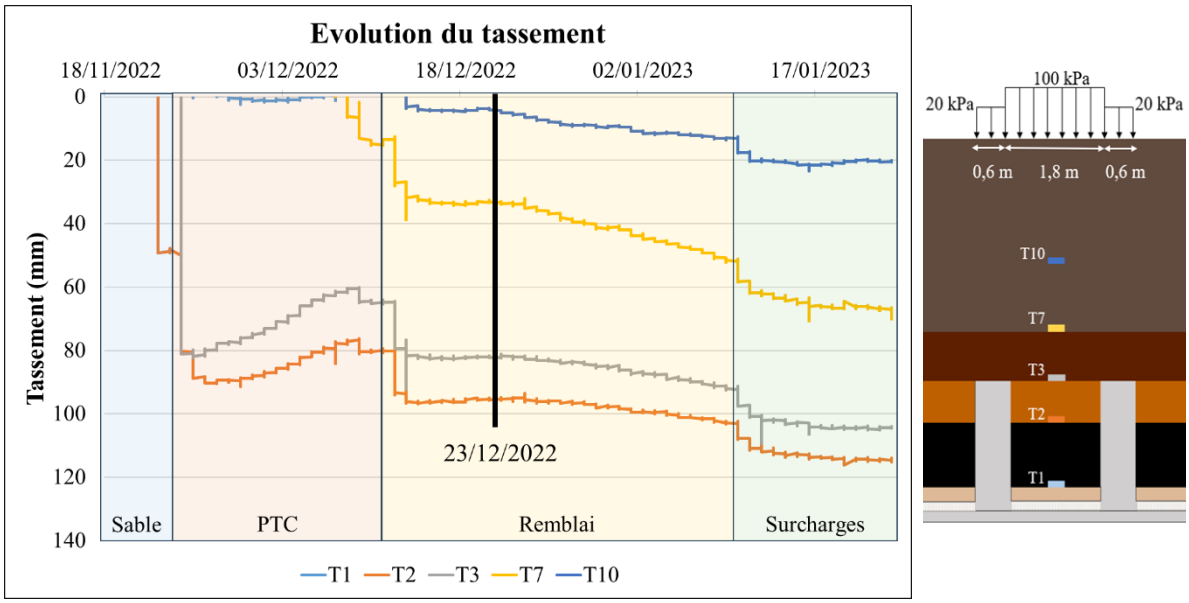



Figure II-50 Evolution du tassement en fonction du temps

Le calcul du report limite en tête des inclusions rigides est présenté dans les recommandations (ASIRI, 2012) pour le cas d'un matelas de répartition soumis à une charge uniformément répartie. Cette partie vise à présenter les deux méthodes de calcul, estimer la charge limite en tête d'IR et la comparer avec les mesures réelles du site.

- Schéma de Prandtl

Le schéma d'équilibre limite au sein de la plateforme de transfert de charge peut être assimilé à celui de Prandtl (Figure 2-51) qui associe une :

- Zone en équilibre de poussée de Rankine (I)
- Zone délimitée par un arc de spirale logarithmique (II)
- Zone en équilibre de butée de Rankine (III)

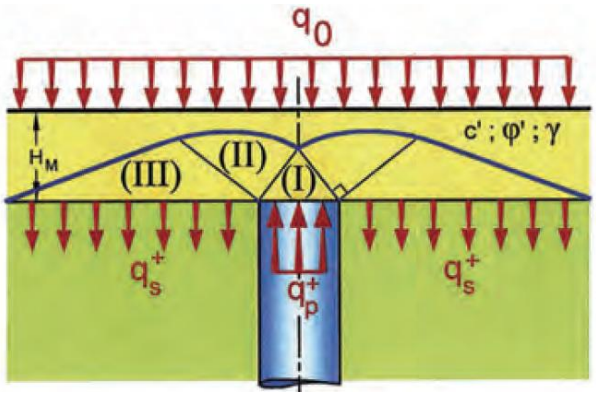



Figure II-51 Schéma de Prandtl

La contrainte maximale admissible selon le schéma de Prandtl a été modifiée pour inclure la cohésion selon la formule : $q_{p^+} = \frac{1}{1+\alpha(N_q-1)}[N_q * q_0 + (1-\alpha) * N_c * c]$



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les paramètres d'entrée sont présentés dans le Tableau 2-8.

Tableau II-8 Paramètres d'entrée – Schéma de Prandtl

| Paramètre | Valeur | Description |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{\alpha}$ | 0,017 | Taux de substitution (rapport entre la section de l'inclusion et la surface de la maille) |
| $\boldsymbol{N_q}$ | 16,443 | Facteur dépendant de l'angle de frottement interne de la plateforme |
| $\boldsymbol{q_0}$ (kPa) | 73 | Contrainte moyenne mesurée au niveau de la plateforme |
| $\boldsymbol{N_c}$ | 27,86 | Facteur dépendant de la cohésion de la plateforme |
| **c** (kPa) | 25 | Cohésion du matelas |

- Cône de cisaillement

Le schéma d'équilibre limite au sein de la plateforme de transfert de charge peut être aussi assimilé à un tronc de cône d'axe vertical, issu de la tête de l'inclusion et formant un angle φ par rapport à la verticale (Figure 2-52).

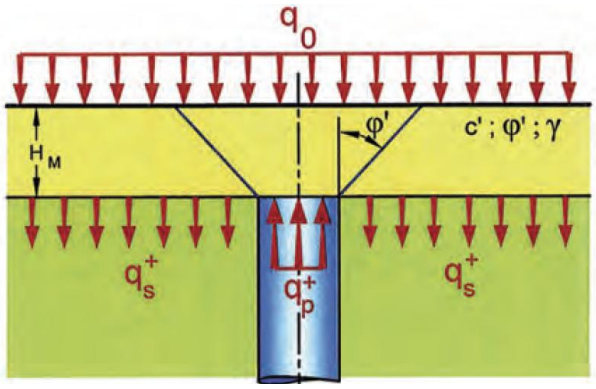



Figure II-52 Cône de cisaillement

La contrainte maximale admissible selon le schéma de rupture par cône de cisaillement est présentée selon la formule :

$$q_p + = \frac{H_M}{3}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} + 1 + \frac{R_c}{r_p}\right)\frac{\gamma}{\gamma_\gamma} + \frac{R_c^2}{r_p^2}q_0 + \frac{1}{tan\varphi}\left(\frac{R_c^2}{r_p^2} - 1\right)\frac{c}{\gamma_c}$$

Les paramètres d'entrée sont présentés dans le Tableau 2-9.

Tableau II-9 Paramètres d'entrée – cône de cisaillement

| Paramètre | Valeur | Description |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{H_M}$ (m) | 0,4 | Epaisseur de la plateforme |
| $\boldsymbol{R_c}$ (m) | 0,37 | Distance entre l'axe de l'inclusion et l'extrémité du cône |
| $\boldsymbol{r_p}$ (m) | 0,15 | Rayon de l'inclusion rigide |
| $\boldsymbol{\gamma}$ (kN/m$^3$) | 20,8 | Densité de la plateforme |
| $\boldsymbol{\gamma_\gamma}$ | 1 | facteur partiel sur le poids volumique du sol |
| **c** (kPa) | 25 | Cohésion de la plateforme |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

| | | |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{\varphi}$ (°) | 28,9 | Angle de frottement du matelas |
| $\boldsymbol{q_0}$ (kPa) | 73 | Contrainte moyenne mesurée au niveau de la plateforme |
| $\boldsymbol{\gamma_{c'}}$ | 1 | Facteur partiel pour la cohésion effective |

Les contraintes limites calculées et mesurées sont présentées dans le Tableau 2-10. Les paramètres de la PTC traitée ainsi que les dimensions de la fosse et de l'essai sont présentés dans les parties précédentes. Une valeur de la cohésion de 25 kPa est considérée pour la PTC traitée. Cette valeur est basée sur la modélisation numérique présentée dans la suite de ce document où la confrontation entre les modèles numériques et l'essai en vraie grandeur montre qu'une dégradation de la PTC traitée est nécessaire et qu'une valeur de cohésion de 25 kPa doit être considérée pour la calibration du modèle numérique.

Tableau II-10 Contraintes limites calculées et mesurées

| | **Contrainte (kPa)** |
|---|---|
| Prandtl | 1573 |
| Cône de cisaillement | 707 |
| Mesure (23/12/2022) | 803 |

Les calculs montrent que dans notre étude, le schéma de Prandtl surestime la valeur limite de la contrainte admissible pour ne pas poinçonner le matelas alors que la méthode du cône de cisaillement représente le plus les mécanismes de ruptures dans la plateforme traitée avec une contrainte maximale admissible (707 kPa) inférieure à celle mesurée le 23 décembre (803 kPa).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.1.7.2. Essai 2 : avec plateforme de travail

Lors de cet essai, une fuite d'eau s'est produite à côté de la fosse expérimentale du Cerema pendant la mise en place du remblai, ce qui a entraîné une dissolution partielle du Biocofra sous le Deltagom durant cette phase de construction. Cet incident a affecté le déroulement de cet essai et donc, la comparaison des différents résultats des deux essais. Cependant, il est possible de comparer d'une façon générale le comportement des plateformes dans chaque cas et les différents mécanismes de rupture.

- Evolution de la contrainte

En pied des inclusions rigides (Figure 2-53), les mesures montrent que la contrainte est sensiblement la même pour les quatre inclusions centrales jusqu'à la fin de la mise en place du remblai. Ensuite la dissolution du Biocofra s'est produite de façon non homogène et les inclusions affectées en premier par le tassement (celles des capteurs F3 et F4) sont celles qui présentent une plus grande contrainte.

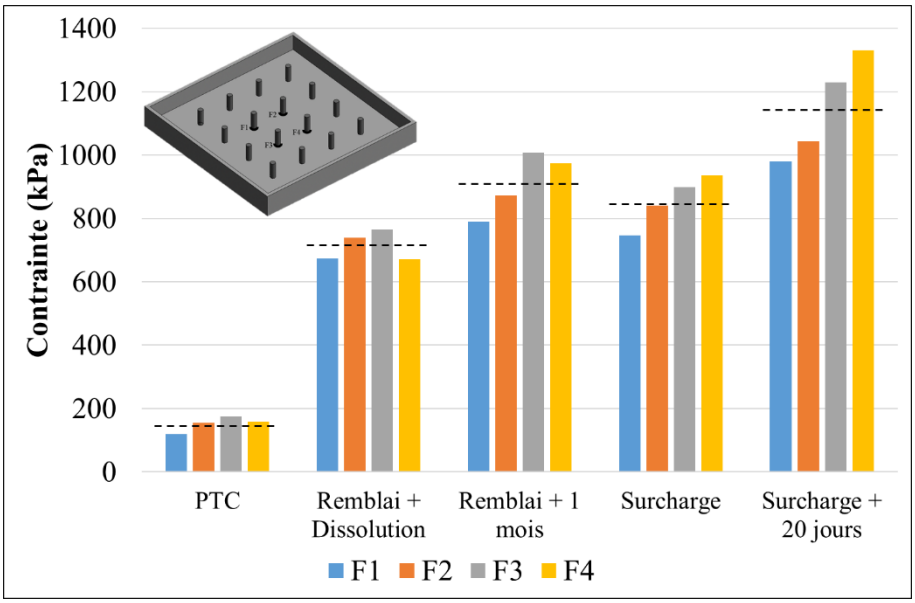



Figure II-53 Contraintes en pied des inclusions centrales

Au niveau des têtes des inclusions (Figure 2-54), trois capteurs ont cessé de fonctionner à la mise en place du remblai. Par contre, pendant la construction du remblai, les quatre capteurs donnaient des valeurs sensiblement égales.

A partir des mesures des capteurs en pied d'inclusion et en supposant la même différence entre la tête et le pied pour les différentes phases, il est possible d'estimer la contrainte en tête des inclusions pour lesquelles les capteurs ont cessé de fonctionner. Pour la suite, des valeurs moyennes des contraintes en pied et en tête des quatre inclusions centrales seront présentées (Figure 2-54).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

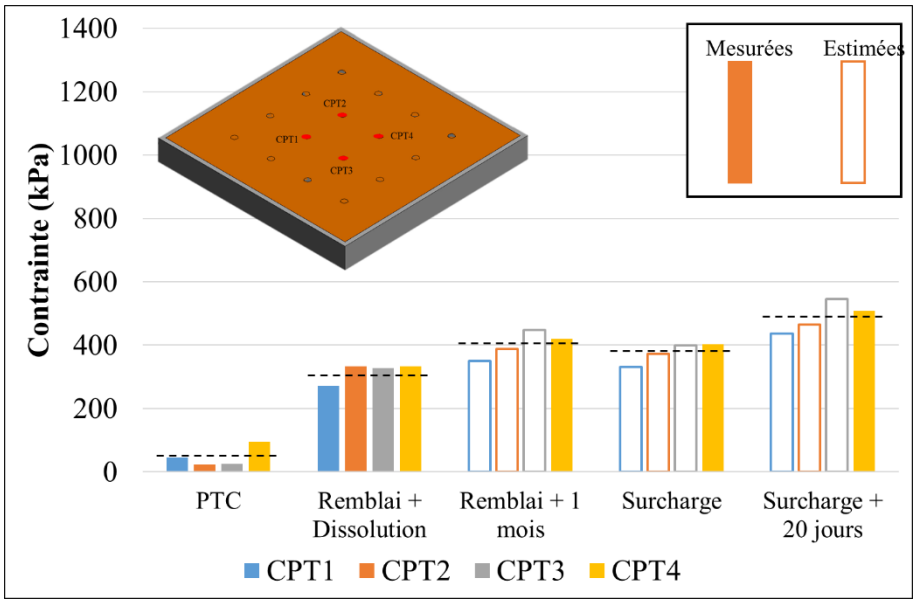



Figure II-54 Contraintes en tête des inclusions centrales

L'évolution de la contrainte au niveau des pieds et des têtes des inclusions rigides ainsi qu'au niveau de la plateforme de travail est présentée à la Figure 2-55 pour les différentes phases de construction. On observe que la plateforme de travail est très peu chargée et que la contrainte en pied est supérieure à la contrainte en tête. Enfin, une légère baisse de la contrainte est observée en tête et en pied des inclusions lors de l'application des surcharges, ce qui constitue une première indication sur une rupture possible de la plateforme pendant cette phase.

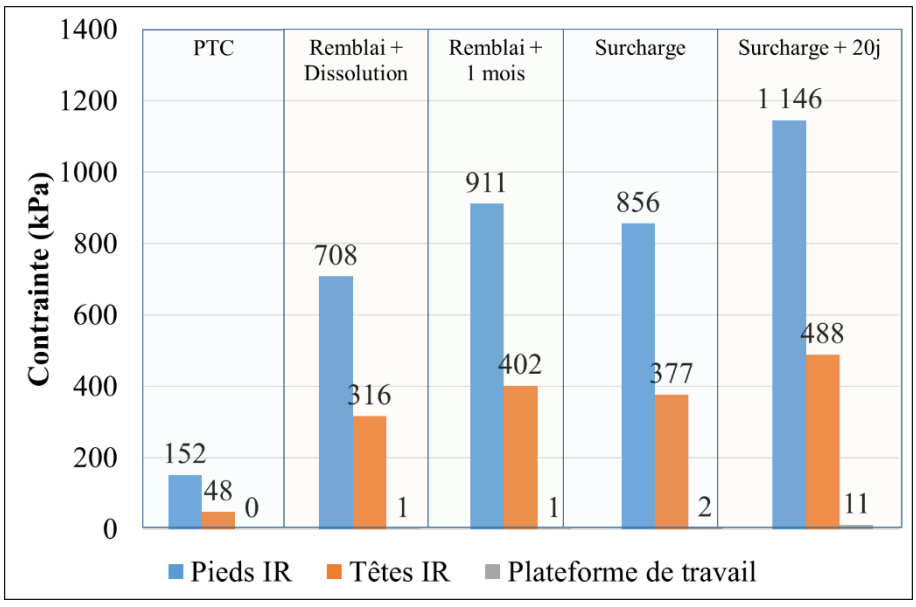



Figure II-55 Evolution de la contrainte



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

- Evolution du tassement

Des capteurs de tassement ont été installés sur un axe vertical, au centre de la maille centrale à différentes altitudes pour observer l'évolution du tassement (Figure 2-56).

On observe bien un tassement du capteur T1 pendant la phase de construction du remblai dû à la fuite d'eau. Les capteurs T2 et T4 ont un tassement identique pendant toutes les phases. Le tassement de tous les capteurs (saut T1) est identique pour les phases qui suivent la fin de la montée du remblai indiquant que la plateforme n'apporte pas l'effet dalle qui pourrait être attendu pour ce type de plateforme et sol traité.

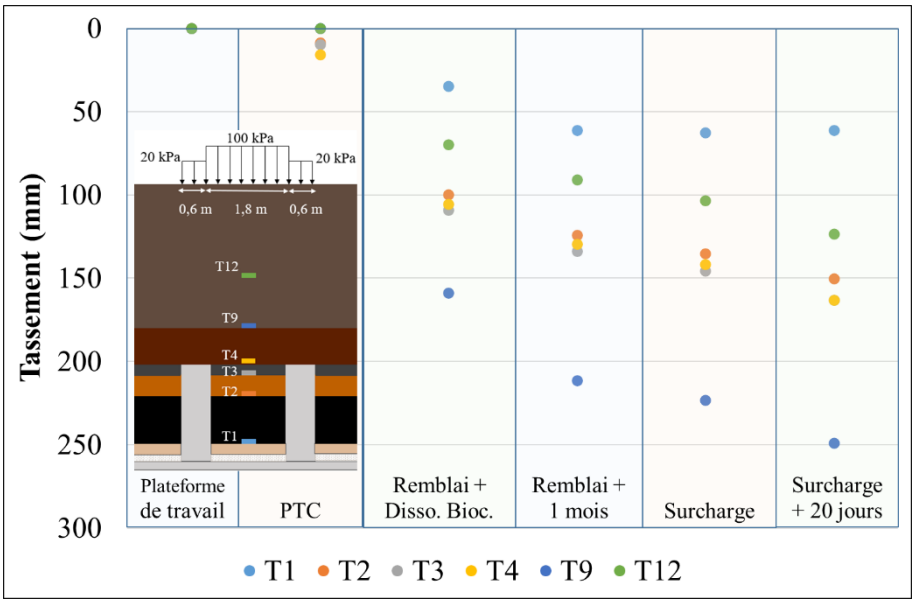



Figure II-56 Evolution du tassement

La mesure du tassement au toit de la plateforme en sol traité (Figure 2-57) permet de mettre en évidence le mécanisme de rupture par flexion (Figure 2-58).

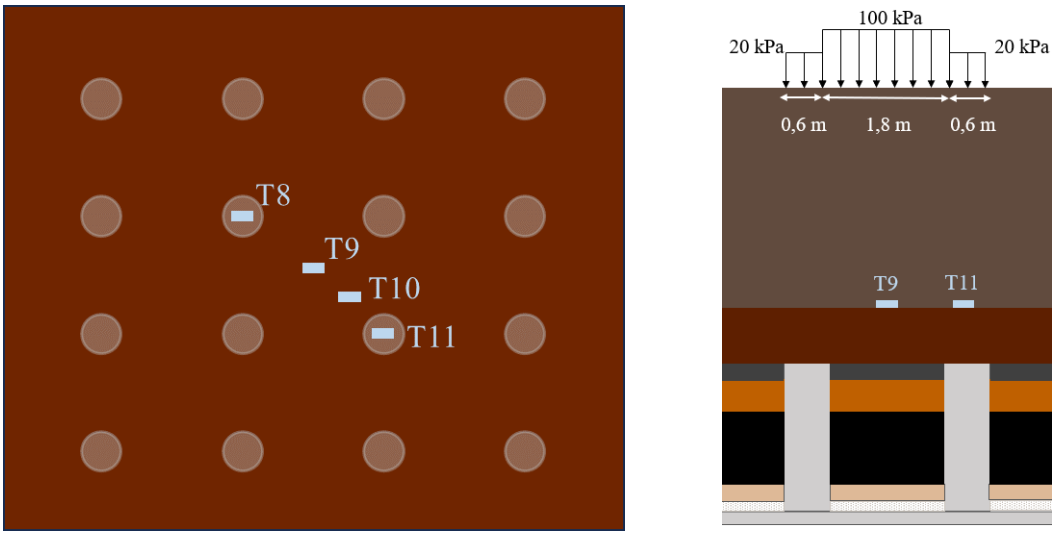



Figure II-57 Instrumentation de la PTC



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Entre les capteurs T8 et T9 la courbe est en pointillée due à l'absence d'un capteur dans cette zone (on a supposé que ce soit le même tassement du capteur T10). Les mesures montrent un poinçonnement de la plateforme par les têtes des inclusions de l'ordre de 50 mm et un tassement beaucoup plus important au centre des quatre inclusions dès la phase de la construction du remblai.

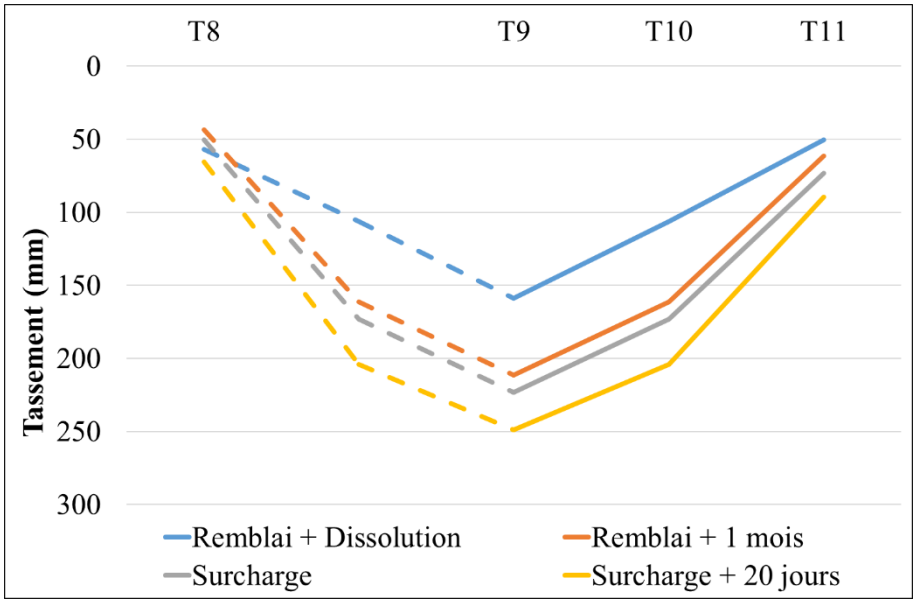



Figure II-58 Comportement en flexion de la PTC

- Observations lors du démontage

Après le retrait du remblai, les valeurs du CBR équivalent ont été mesurées sur la plateforme traitée avec le compactomètre de Clegg pour comparer avec celles mesurées après 1 mois de cure (Figure 2-59). Une chute de la valeur du CBR équivalent est observée au droit des inclusions et sur la PTC (entre les inclusions) ce qui indique que la rupture par flexion a fortement réduit les caractéristiques de la plateforme dans son ensemble.

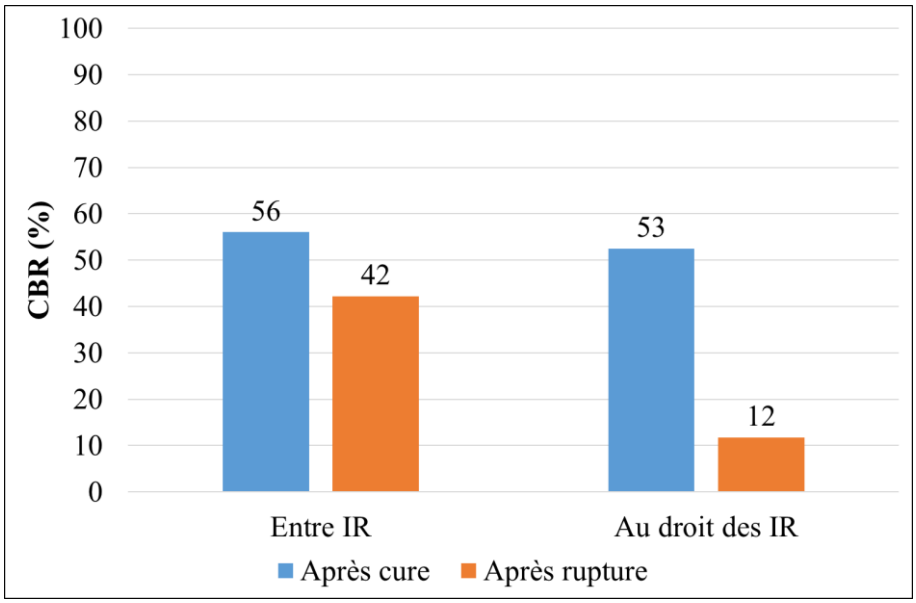



Figure II-59 Variation de la valeur CBR après rupture



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Un levé topographique au toit de la PTC a été effectué après le retrait du remblai. L'état final de la plateforme au niveau du maillage central est présenté à la Figure 2-60. La position des inclusions rigides est indiquée par des disques gris. On constate bien une rupture en flexion de la plateforme avec une déformation maximale au centre de la maille centrale due à la concentration des surcharges dans cette zone.

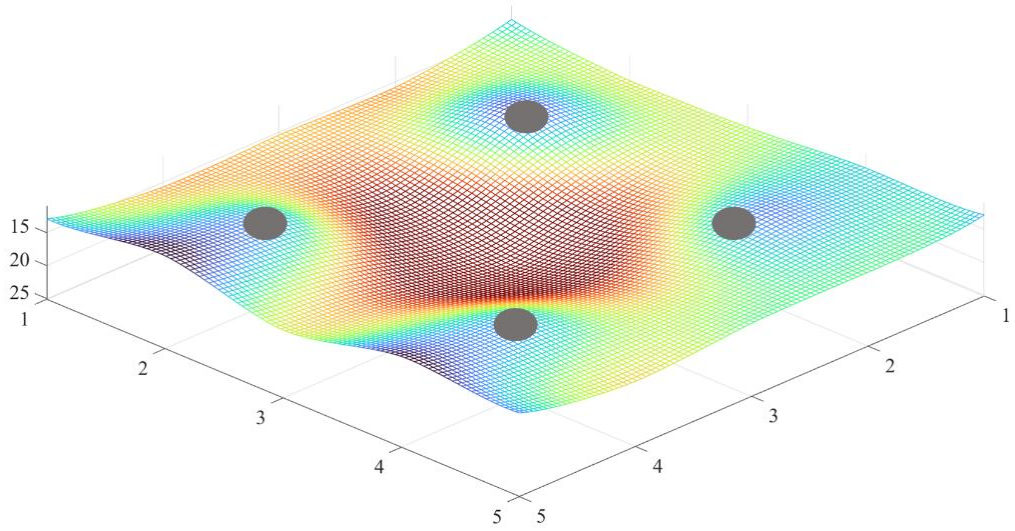



Figure II-60 Etat final de la PTC (levé topographique)



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.1.7.3. Comparaison des essais

La comparaison des mesures des deux essais permet d'identifier clairement que la présence de la plateforme de travail a modifié les mécanismes de transfert de charge et le comportement de la PTC traitée.

- Contrôle de la plateforme

Le traitement de la plateforme a été réalisé selon la même procédure dans les deux essais. La teneur en eau du mélange (sol + chaux + ciment) avant compactage est de 17,2% pour le premier essai et 16,6% pour le deuxième essai, ce qui est légèrement supérieure à la teneur en eau optimale Proctor (16,2%).

Un Compactomètre de CLEGG a été utilisé pour vérifier la qualité du compactage de la plateforme traitée en mesurant la valeur CBR équivalent. Les mesures sont présentées à la Figure 2-61 pour les deux PTC après cure et après rupture. Les mesures mettent en évidence l'importance de la plateforme de travail qui assure une meilleure homogénéité de compactage de la PTC (après la cure, les valeurs CBR équivalents sont très proches pour l'essai 2 alors qu'une présence des points durs est observée au droit des inclusions pour l'essai 1). Après la rupture, le poinçonnement de la PTC de l'essai 1 entraîne une augmentation de la valeur CBR entre les IR et une chute de cette valeur au droit des IR. Ce comportement n'a pas été observé pour le deuxième essai où une diminution de la valeur CBR a été observé sur toute la plateforme vu que la rupture s'est faite par flexion de la PTC traitée.

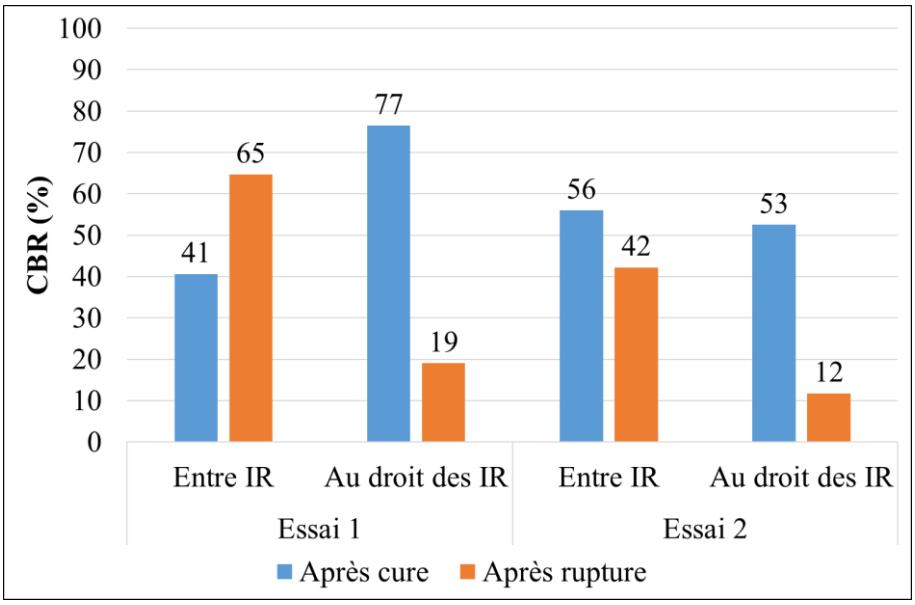



Figure II-61 Compactage des PTC

- Evolution de la contrainte

En pied d'inclusion (Figure 2-62), les mesures sont sensiblement égales pour les différentes phases de construction. Ce n'est pas le cas en tête (Figure 2-63) où l'on observe une contrainte beaucoup plus importante sur les têtes des IR pour l'essai 1. Cette différence pourrait s'expliquer par la présence dans l'essai 2 de la plateforme de travail qui est susceptible de reprendre une part de la charge appliquée à proximité des inclusions réduisant ainsi la part mesurée directement sur les têtes et transférant cette contrainte aux pieds des IR par frottement.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

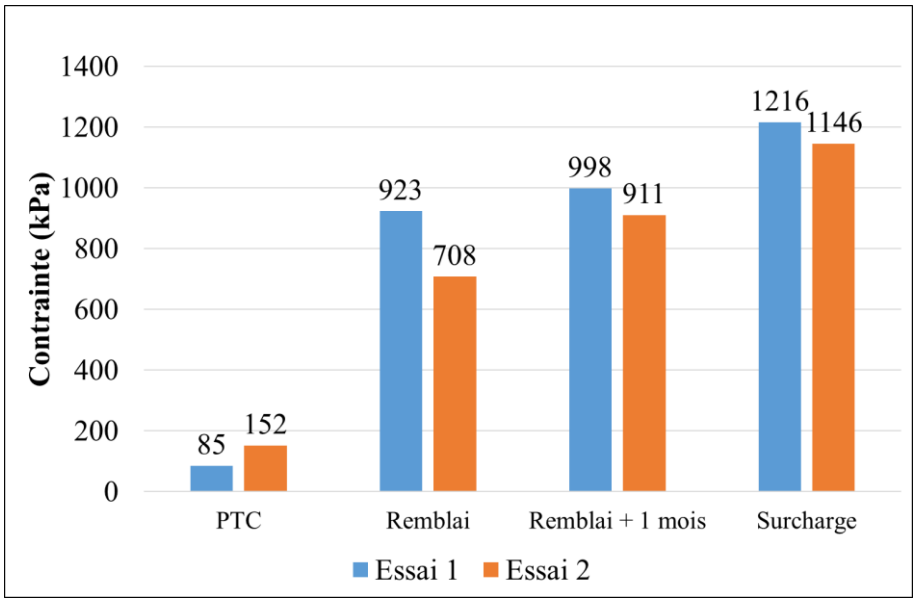



Figure II-62 Contraintes en pied des inclusions

Le calcul de l'efficacité selon les formules classiques (chapitre 1 - 1.4. Report de charge et efficacité) en ne considérant que le rapport de charge en tête des IR montre que l'essai 1 a une efficacité deux fois supérieure à celle de l'essai 2 alors que ce n'est pas le cas dans la réalité vu les différents mécanismes de transfert de charge et ce n'est donc pas nécessairement le bon paramètre pour évaluer l'efficacité du système dans notre cas.

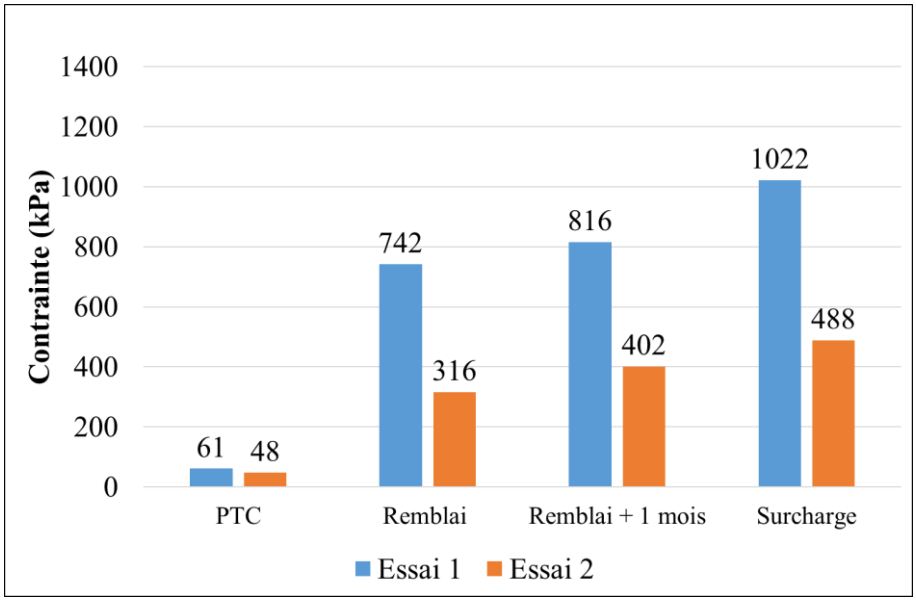



Figure II-63 Contraintes en tête des inclusions

- Evolution du tassement

Le tassement sur la PTC est présenté à la Figure 2-64. A la suite de la montée du remblai, on observe le même poinçonnement au niveau des têtes pour les deux essais, de l'ordre de 50 mm. Pour cette phase, le tassement mesuré sur le sol est beaucoup plus important pour l'essai 2, vraisemblablement dû à l'absence de réaction du sol support (dissolution du Biocofra). Après la mise en place de la surcharge et la dissolution du Biocofra pour l'essai 1, on observe une



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

rupture par poinçonnement de la plateforme au niveau des têtes des inclusions pour l'essai 1 (augmentation uniforme de 140 mm du tassement) alors que pour l'essai 2, le poinçonnement de la plateforme est moindre mais le tassement final entre les quatre inclusions est comparable à celui mesuré dans l'essai 1. On constate donc que les ruptures sont différentes dans les deux essais mais il est difficile d'expliquer ces comportements par la seule présence de la plateforme de travail pour l'essai 2, la dissolution du Biocofra survenu à des moments différents dans les deux essais peut aussi avoir joué un rôle sur les mécanismes.

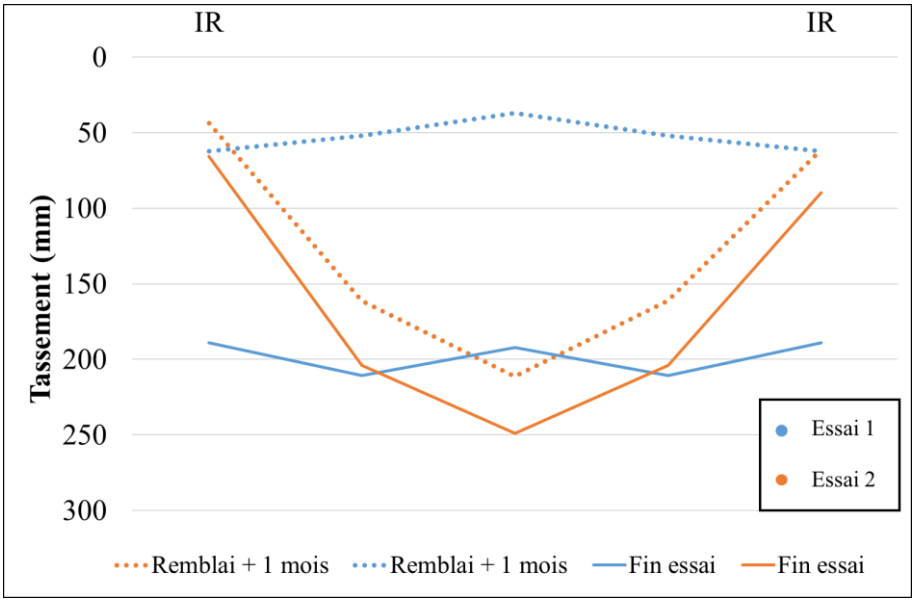
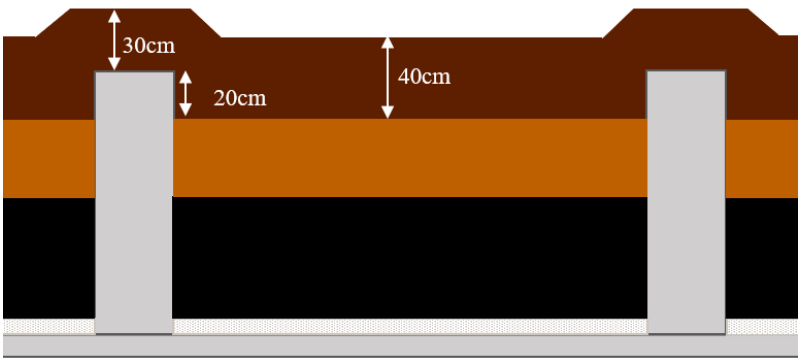



Figure II-64 Tassement des PTC à la fin des essais

- Mode de rupture

Les mesures des capteurs de tassement, les mesures CBR et les observations faites lors du démontage des essais mettent en évidence deux mécanismes de rupture différents des PTC traitées (Figure 2-65) :

- Un poinçonnement au niveau des têtes dans l'essai 1 affectant peu les caractéristiques mécaniques de la PTC entre les quatre inclusions centrales.
- Une rupture par flexion dans le cas de l'essai 2 diminuant les caractéristiques mécaniques de la plateforme sur toute sa surface.






Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

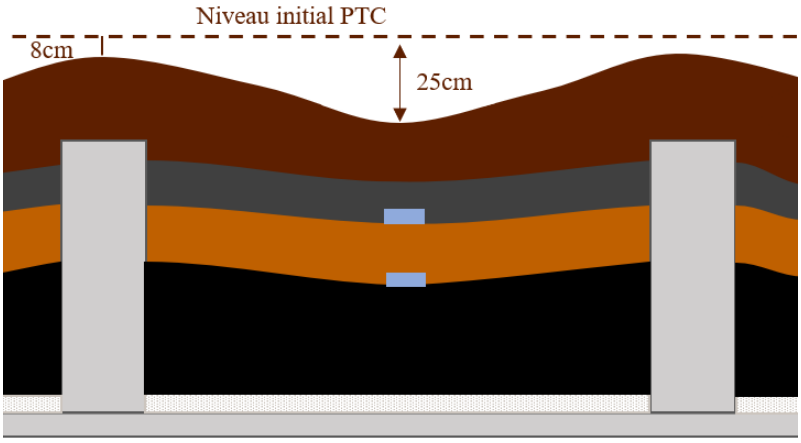



Figure II-65 Mesure de la déformée des plateformes lors du démontage

- Comportement du Deltagom

Le tassement au centre du Deltagom pendant les phases de mise en place de la plateforme de travail et de la PTC (Figure 2-66) montre un comportement identique pour les deux essais. Après la mise en œuvre de la plateforme de travail (essai 2), un tassement de 10 mm est mesuré au niveau du Deltagom. Après la prise de la plateforme, elle s'attache mieux aux inclusions rigides et perd tout contact avec le sable, créant ainsi un vide entre la plateforme et le sable, ce qui entraîne le foisonnement du Deltagom vu ses caractéristiques et la diminution du tassement mesuré. Le même comportement est observé lors de la mise en place de la PTC où un tassement est mesuré au niveau du Deltagom et puis après la prise de la PTC, elle s'appuie sur les inclusions rigides et perd tout contact avec le sol en-dessous, ce qui entraîne de nouveau le foisonnement du Deltagom. Les mesures montrent de plus l'effet de la plateforme de travail qui entraîne un tassement plus petit pour la phase de mise en place de la PTC dans l'essai 2. En réalité, le sol compressible n'a pas le même comportement que celui du Deltagom et il y aura donc un vide entre le sol compressible et les plateformes traitées après leurs prises, ce qui peut augmenter le risque d'un poinçonnement mineur au droit des inclusions rigides.

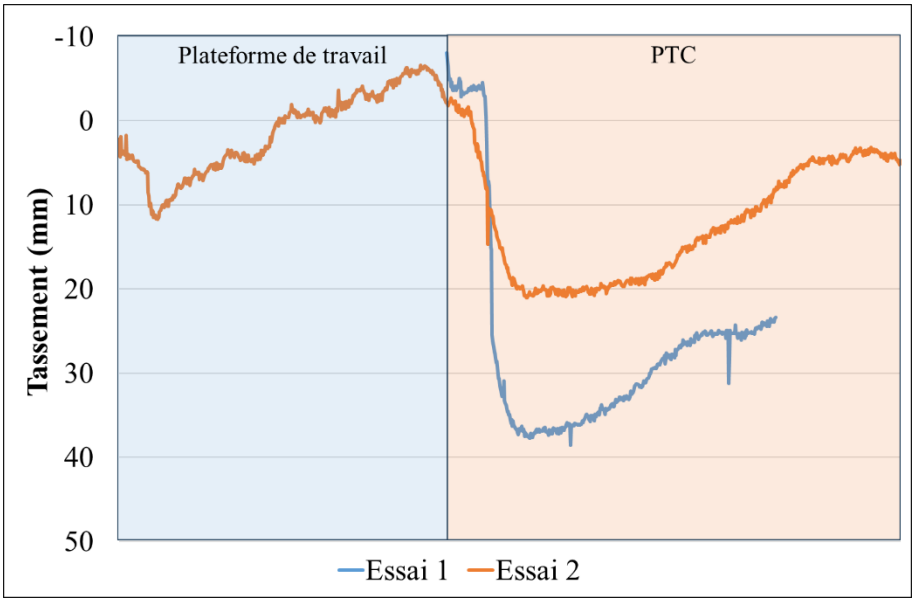



Figure II-66 Comportement du Deltagom



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.1.8. Conclusions

Dans le cadre du PN ASIRI+, deux essais en vraie grandeur ont été réalisés dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen pour tester l'efficacité des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides. Un dispositif expérimental a été installé pour simuler les conditions d'un chantier. Une instrumentation par des anneaux de force, des capteurs de pression et des capteurs de tassement a été installée dans les différentes couches du sol pour observer les mécanismes de transfert de charge, le tassement du sol et évaluer l'efficacité du système. Le sol utilisé pour la PTC traitée est un limon de type F1 (limon peu plastique) traité à 1% chaux et 4% ciment. Un remblai de 1,5 m d'épaisseur et des surcharges ont été utilisés pour simuler un chargement réel. Une plateforme de travail traitée à 2% de chaux a été ajoutée sous la PTC traitée dans le deuxième essai pour assurer l'homogénéité de son compactage.

Les essais du laboratoire montrent bien l'effet du traitement sur les performances mécaniques des sols traités. Les deux formules de traitement SCCO et SA entraînent de bonnes résistances mécaniques et présentent un intérêt pour le remplacement du clinker Portland par du metakaolin. Les essais de résistance à la compression après humidification montrent que le sol continue sa prise même quand il est totalement immergé dans l'eau. Une corrélation linéaire est trouvée entre la résistance à la traction et la résistance à la compression pour les trois formules de traitement avec une pente de 0,11 très proche de celle trouvée par Castaneda-Lopez et al. (2024) pour un sol traité à 3% de ciment (≈0,10). Finalement, les essais triaxiaux montrent que le temps de cure n'a pas d'impact sur l'angle de frottement, ce qui est cohérent avec les essais de Castaneda-Lopez et al. (2024).

Les essais sur la fosse expérimentale montrent que la PTC traitée a été bien installée et contrôlée et le protocole expérimental a été validé (fonctionnement des capteurs, dissolution du biocofra ...). L'instrumentation par des capteurs de pression totale et des anneaux de force a permis de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge et de frottement négatif au niveau des inclusions rigides pour les deux essais. Elle a montré de plus, que le transfert de charge est immédiat dans le cas de la plateforme traitée contrairement au cas d'une plateforme granulaire où les mécanismes de transfert de charge sont un peu plus progressifs mais les deux plateformes présentent une efficacité similaire à la fin de l'essai. Les mesures des capteurs de tassement ont montré qu'un foisonnement se réalise au niveau du Deltagom après la prise de la plateforme de travail et des PTC dans les deux essais. Ce comportement n'existe pas en réalité vu que le sol compressible n'a pas le même comportement que celui du Deltagom, ce qui peut créer un vide entre le sol compressible et les plateformes traitées après leurs prises et augmenter le risque d'un poinçonnement mineur au droit des inclusions rigides.

Les résultats montrent que la plateforme traitée se comporte comme une dalle rigide sur inclusions rigides et que deux mécanismes de rupture peuvent se produire : le poinçonnement de la plateforme par les têtes des inclusions observé dans l'essai 1 sans plateforme de travail ou la flexion de la plateforme entre les IR observé dans l'essai 2 avec plateforme de travail. La présence d'une plateforme de travail assure l'homogénéité du compactage de la PTC traitée, réduit les « points durs » et modifie significativement le report de charge en tête mais pas en pied des inclusions ce qui rend que le calcul du report de charge en tête des inclusions ne soit pas toujours le meilleur paramètre pour évaluer l'efficacité d'un système. Le calcul de la contrainte maximale admissible en tête des IR montrent que le schéma de rupture par cône de cisaillement (ASIRI, 2012) représente le plus les mécanismes de ruptures dans la PTC traitée.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.2. Modélisation numérique des essais

Dans cette partie, un modèle numérique est développé avec le logiciel Plaxis 2D afin de représenter l'essai 1 (PTC traitée sans plateforme de travail) présenté précédemment et un autre essai avec une plateforme de transfert de charge (PTC) granulaire réalisé par Terqueux et al. (2022). La confrontation entre les modèles numériques et les essais en vraie grandeur permet de mieux comprendre et de visualiser les mécanismes de transfert de charge et le fonctionnement du système.

Le deuxième essai (1.4.2 Essai 2) réalisé au Cerema avec une plateforme de travail traitée ne sera pas modélisé à cause de la fuite d'eau qui s'est produite à côté de la fosse pendant la mise en place du remblai, ce qui a entraîné une dissolution partielle non uniforme et non maitrisée du Biocofra sous le Deltagom (Figure 2-67) et qui ne permet pas de disposer de données expérimentales fiables pour la comparaison avec les résultats numériques.



Figure II-67 Dissolution non uniforme du Biocofra sous le Deltagom

### II.2.1. Présentation du modèle

Le modèle adopté est en configuration 2D axisymétrique. Il est centré autour d'une inclusion rigide. Un rayon équivalent à la maille carrée est utilisé pour la cellule élémentaire axisymétrique.

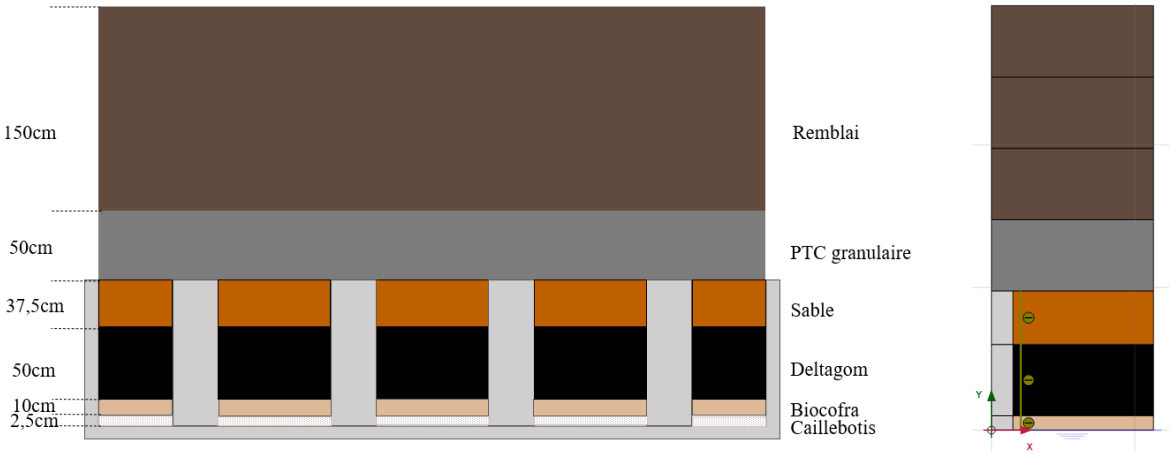
#### II.2.1.1. Géométrie

- PTC granulaire

La Figure 2-68 présente une coupe en vue de l'essai de Terqueux et al. (2022) avec une PTC granulaire de 50 cm ainsi que le modèle numérique correspondant. Les inclusions rigides sont inscrites dans un maillage de 2 m ce qui donne un rayon équivalent de 1,13 m.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

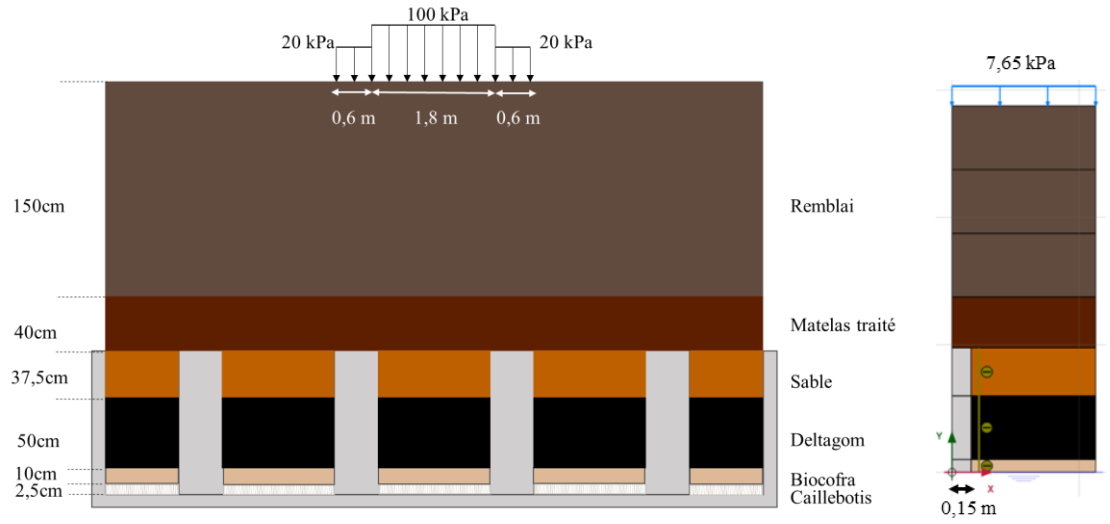



(a) (b)

Figure II-68 (a) coupe en vue (b) modèle numérique - PTC granulaire

- PTC en sol traité

La Figure 2-69 présente une coupe en vue du premier essai réalisé avec une PTC en sol traité sans plateforme de travail et le modèle numérique correspondant. La surcharge appliquée dans le modèle Plaxis est égale à 7,65 kPa. Elle est calculée à partir de la surcharge réelle (Figure 2-69-a) en considérant que cette dernière se diffuse dans le remblai et devient uniformément répartie au niveau de la PTC traitée.




(a) (b)

Figure II-69 (a) coupe en vue (b) modèle numérique - PTC en sol traité

II.2.1.2. Phasage des calculs

Le modèle numérique adopte le même phasage que les essais en vraie grandeur. Un état initial est considéré après la mise en place de la PTC (déplacement remis à zéro). C'est à partir de cette phase que la comparaison des états de contrainte et de tassement est effectuée. La mise en œuvre (MOE) du remblai est réalisée comme cela a été fait expérimentalement (trois couches de 50 cm). La dissolution du Biocofra est réalisée par une diminution du volume de 85% et



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

93% pour les PTC granulaires et traitées respectivement (cette valeur est basée sur le tassement mesuré expérimentalement). Le Tableau 2-11 présente les différentes phases de calcul.

Tableau II-11 Phases de calcul

| | Phases | PTC granulaire | PTC traitée |
|---|---|---|---|
| **Etat initial** | Phase 1 | Inclusion rigide + Biocofra | Inclusion rigide + Biocofra |
| | Phase 2 | Deltagom | Deltagom |
| | Phase 3 | Sable | Sable |
| | Phase 4 | PTC granulaire | PTC traitée |
| **MOE remblai** | Phase 5 | 1ère couche du remblai | 1ère couche du remblai |
| | Phase 6 | 2ème couche du remblai | 2ème couche du remblai |
| | Phase 7 | 3ème couche du remblai | 3ème couche du remblai |
| | Phase 8 | Dissolution Biocofra | Surcharge |
| | Phase 9 | - | Dissolution Biocofra |

II.2.1.3. Paramètres d'entrée

Une campagne expérimentale a été menée par Terqueux et al. (2022) pour caractériser les matériaux utilisés pour les essais en vraie grandeur.

- Une couche de Biocofra (planche de carton alvéolaire) de 10 cm est ajoutée pour permettre d'imposer un tassement supplémentaire à la fin de l'essai grâce à sa biodégradation par l'eau. Le Biocofra présente une forte résistance à la compressibilité (50 kPa) lorsqu'il est sec mais perd ses propriétés en présence d'eau.
- Le sol compressible est simulé par deux couches de sol :
  Une première couche de 50 cm de Deltagom (granulats de pneu) formée de particules de diamètre variant de 2 à 8 mm. Le Deltagom présente un indice de vide $e_0$ = 0,98 et deux modules œdométriques selon l'état de contrainte appliquée: Deltagom 1, $E1_{œd}$ = 0,23 MPa et Deltagom 2, $E2_{œd}$ = 0,652 MPa (Figure 2-70).

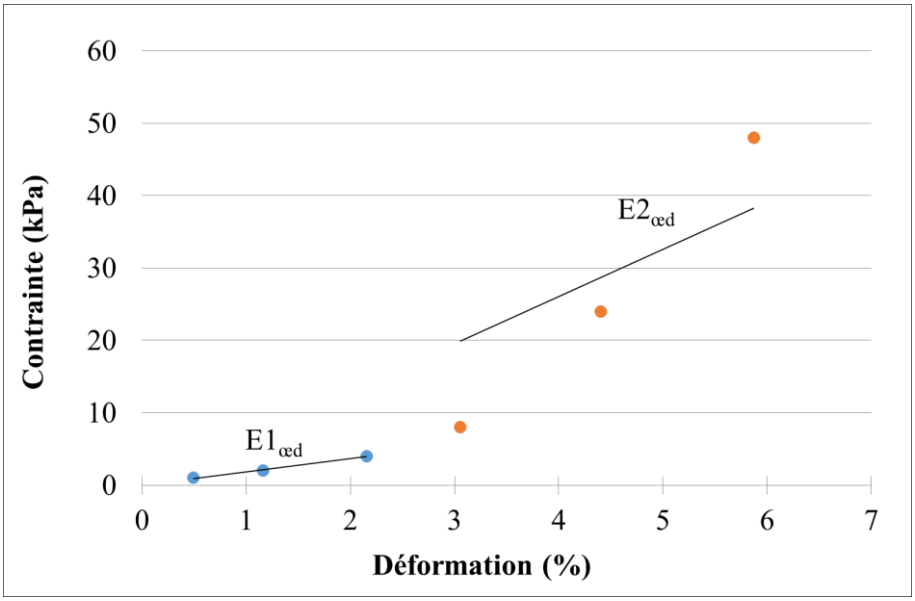



Figure II-70 Essai œdométrique - Deltagom



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Le matériau « Deltagom 1 » est utilisé jusqu'à la mise en place du sable (contrainte appliquée < 8 kPa) et puis remplacé par « Deltagom 2 » pour la suite du calcul (contrainte appliquée > 8 kPa).

Une deuxième couche de sable de 37,5 cm d'épaisseur a été caractérisée à la boîte de cisaillement 300 x 300 et présente un poids volumique $\gamma$ = 19 kN/m$^3$, un angle de frottement $\varphi$ = 32° et une cohésion c = 0 kPa. L'utilisation du sol analogique (Deltagom-sable) a été testée dans une cuve de 2 x 1,1 x 1,1 m et a permis de mettre en évidence une compressibilité de 15% sous une charge de 100 kPa.

- La plateforme de transfert de charge granulaire est formée d'une grave 0/31,5 caractérisée à la boîte de cisaillement. L'essai donne un poids volumique $\gamma$ = 19 kN/m$^3$, un angle de frottement $\varphi$ = 40° et une cohésion c = 2 kPa.
- La plateforme de transfert de charge en sol traité est formée d'un limon peu plastique de type F1 traité à 1% de chaux et 4% de ciment (voir 1.2 Caractérisation du limon de Dieppe traité). Le module est calculé à partir de l'essai triaxial réalisé à 14 jours (le temps de cure de la PTC avant la mise en place du remblai).
- Le remblai a été également caractérisé à la boîte de cisaillement. Il est formé d'une grave naturelle argileuse de granulométrie 0/63 avec un poids volumique $\gamma$ = 18 kN/m$^3$, un angle de frottement $\varphi$ = 33° et une cohésion c = 8 kPa.

Le Tableau 2-12 résume les paramètres d'entrée des deux modèles numériques. Une loi de comportement de type élastique linéaire a été utilisée pour l'inclusion rigide, le Biocofra et le Deltagom alors qu'une loi de comportement élastique linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de cisaillement de type Mohr-Coulomb a été utilisée pour le sable, le remblai et les PTC. Les propriétés des interfaces dans ces modèles sont identiques à celles des sols adjacents mais un facteur de réduction Rinter est appliqué pour dégrader leurs paramètres. En ce qui concerne l'interface Deltagom-IR, normalement, un nouveau matériau doit être créé et attribué à l'interface avec une loi de comportement de type Mohr-Coulomb en considérant un angle de frottement $\varphi$ = 0° et une cohésion équivalente au frottement latéral unitaire $q_s$. En raison des difficultés de caractérisation des paramètres de cette interface par les essais de mécanique de sol en laboratoire, l'interface Deltagom-IR partage également les propriétés du sol adjacent en appliquant un facteur de réduction Rinter. Une étude paramétrique sera présentée à la suite pour évaluer l'impact des propriétés de l'interface Deltagom-IR et du frottement latéral unitaire $q_s$ sur les résultats.

Tableau II-12 Paramètres d'entrées

| | **IR** | **Biocofra** | **Deltagom1** | **Deltagom2** | **Sable** | **Remblai** | **PTC granulaire** | **PTC traitée** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Loi** | LE | LE | LE | LE | MC | MC | MC | MC |
| **$\gamma$ (kN/m$^3$)** | 24 | 0 | 5,2 | 5,2 | 19 | 18 | 19 | 20,8 |
| **Ey (MPa)** | 11500 | 50 | 0,23 | 0,652 | 35 | 35 | 50 | 93 |
| **$\upsilon$ (-)** | 0,2 | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| **c (kPa)** | - | - | - | - | 0 | 8 | 2 | 193 |
| **$\varphi$ (°)** | - | - | - | - | 32 | 33 | 40 | 28,9 |
| **$\Psi$ (°)** | - | - | - | - | 2 | 3 | 10 | 0 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.2.2. Confrontation des modèles numériques et des modèles physiques

La confrontation entre les modèles numériques et les essais en vraie grandeur est basée sur plusieurs critères :

- Contrainte au niveau des têtes des inclusions rigides.
- Contrainte au niveau des pieds des inclusions rigides.
- Tassement au niveau du Deltagom, du sable et de la PTC.

Le Tableau 2-13 présente les contraintes obtenues par l'instrumentation par des anneaux de force au niveau des pieds des IR et par des capteurs de pression totale au niveau des têtes des inclusions. Etant donné que l'état initial du modèle est considéré après la mise en place de la PTC, seule la phase de la mise en place du remblai sera évaluée pour le cas de la PTC granulaire alors que les phases de mise en place du remblai et des surcharges seront étudiées pour la PTC traitée.

L'objectif de la phase de dissolution du Biocofra est d'imposer un tassement supplémentaire de 10 cm afin d'obtenir la rupture de la PTC. En réalité, un tel tassement ne se produit pas seul et pour le même état de contrainte (sans l'ajout de surcharges). Cette étape ne permet pas alors de disposer de données expérimentales représentatives pour la comparaison avec les résultats numériques et ne sera pas prise en compte pour la suite.

Tableau II-13 Résultats expérimentaux – Contrainte

| | **PTC granulaire** | **PTC traitée** | |
|---|---|---|---|
| | MOE Remblai | MOE Remblai | MOE Surcharges |
| **Contrainte Pied IR (kPa)** | 789 | 998 | 1216 |
| **Contrainte Tête IR (kPa)** | 643 | 816 | 1022 |

Le Tableau 2-14 présente les tassements obtenus par l'instrumentation par des capteurs de tassement au niveau des différentes couches entre les quatre inclusions de la maille centrale.

Tableau II-14 Résultats expérimentaux – Tassement

| | **PTC granulaire** | **PTC traitée** | |
|---|---|---|---|
| | MOE Remblai | MOE Remblai | MOE Surcharges |
| **Tassement Deltagom (mm)** | 50 | 26 | 37 |
| **Tassement sable (mm)** | 51 | 31 | 43 |
| **Tassement PTC (mm)** | 47 | 28 | 43 |

Un premier modèle est réalisé en considérant les paramètres d'entrée initiaux (Tableau 2-12). La Figure 2-71 présente les contraintes obtenues avec ces paramètres pour les deux modèles numériques. On constate que les modèles numériques donnent des valeurs de contrainte supérieures de 26% et 60% aux valeurs expérimentales pour les PTC granulaires et traitées respectivement.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

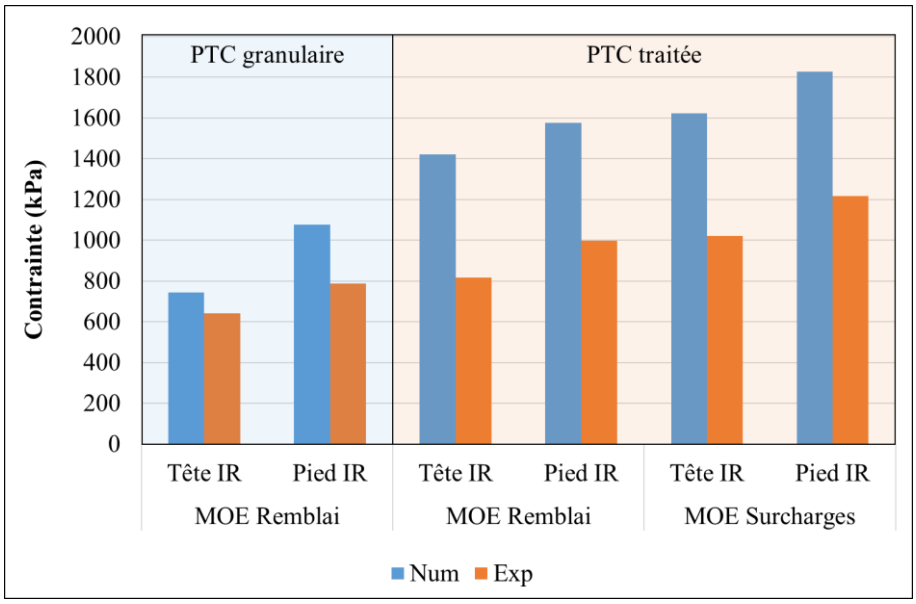



Figure II-71 Comparaison des contraintes

La Figure 2-72 présente les tassements obtenus avec ces paramètres pour les deux modèles numériques au niveau des trois couches (Deltagom, sable et PTC). Une très grande différence est observée entre les tassements numériques et expérimentaux (de l'ordre de 530%).

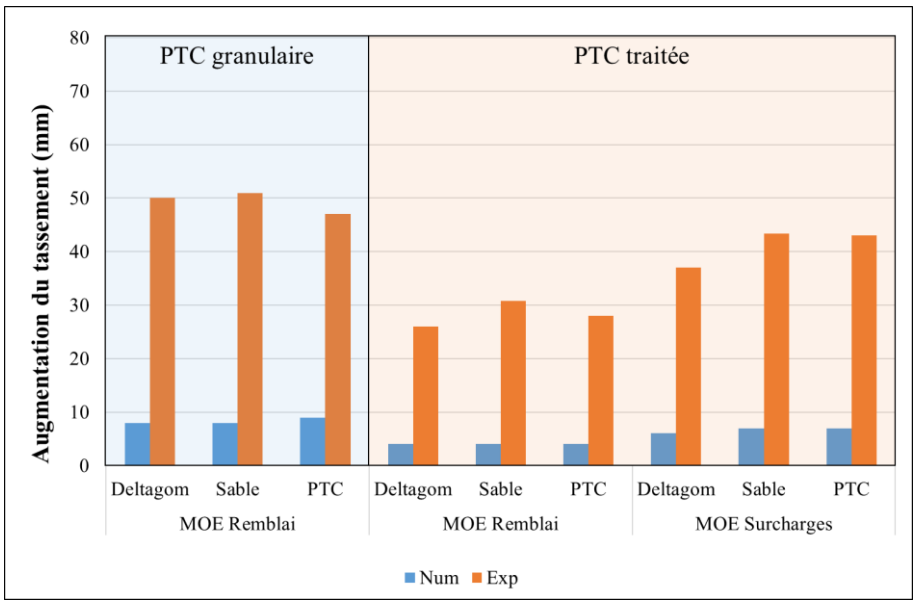



Figure II-72 Comparaison des tassements

### II.2.2.1. Calage de l'essai avec PTC granulaire

Suite aux résultats obtenus, la calibration des deux modèles a consisté à calibrer d'abord le premier essai formé d'une PTC granulaire (grave 0/31,5) pour la phase de la mise en place du remblai (pas de surcharges).

La dégradation du module du Deltagom a été prise en compte dans une première phase de calibration. Les résultats montrent qu'un module faible du Deltagom entraîne une augmentation des valeurs de tassement et une augmentation des contraintes au droit des IR vu



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

qu'on réduit la portance du sol compressible et donc la PTC s'appuie plus sur les IR. Cette première phase de dégradation du module de Deltagom (Ey = 0,13 MPa) a été faite jusqu'à l'obtention d'un tassement très proche de celui mesuré expérimentalement. Cependant, cette simple dégradation n'a pas permis d'obtenir les mêmes contraintes sur les inclusions que celles mesurées (Figure 2-73).

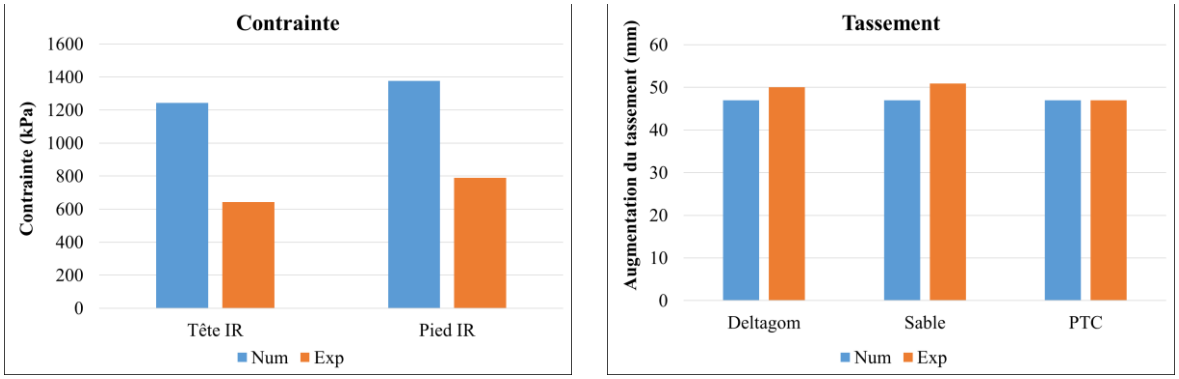



Figure II-73 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation du module du Deltagom

Une fois le modèle est calibré en termes de tassement, une dégradation de l'angle de frottement et de la cohésion du sable, du remblai et de la PTC a été effectuée pour atteindre des états de contraintes proches des valeurs expérimentales mesurées en tête des inclusions. Une dégradation des paramètres du remblai est réalisée en passant d'une cohésion initiale de 8 kPa à 4 kPa et d'un angle de frottement initial de 33° à 27°. Cette dégradation a permis de réduire les mécanismes de transfert de charge à l'intérieur du remblai ce qui a entraîné une réduction du report de charge en tête des inclusions au niveau du toit de la PTC granulaire. La dégradation des paramètres de la PTC a entraîné également la réduction des mécanismes de transfert de charge par effets de cisaillement à l'intérieur de la PTC ce qui a réduit les contraintes en tête des inclusions (Figure 2-74).

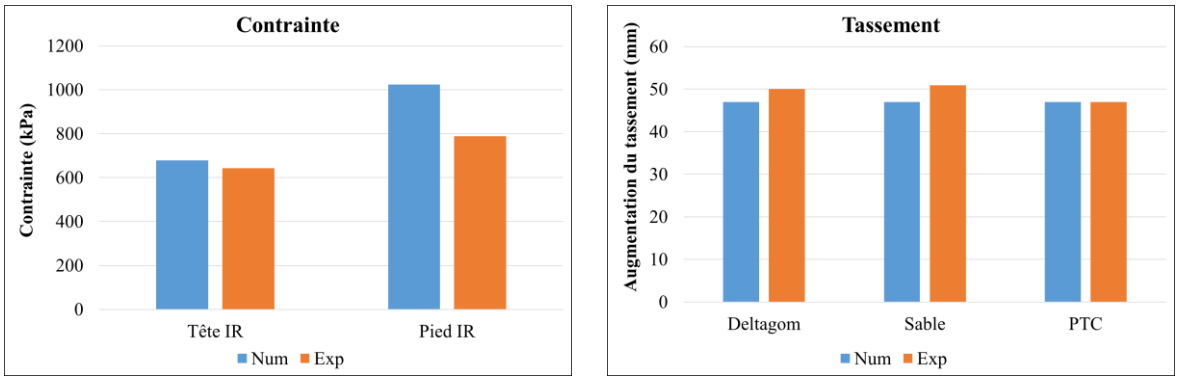



Figure II-74 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation des paramètres du sable, du remblai et de la PTC

Finalement, les paramètres de l'interface entre l'inclusion rigide et le sol ont été aussi dégradés pour obtenir les mêmes contraintes en pieds des inclusions que celles mesurées expérimentalement (l'interface affecte le frottement négatif et par conséquent la contrainte en pied des IR) (Figure 2-75).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

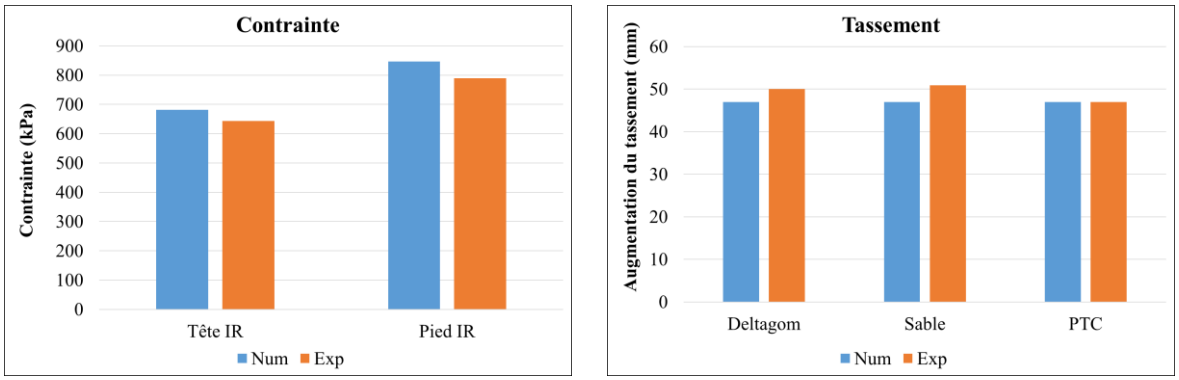



Figure II-75 Comparaison des contraintes et des tassements du premier essai (PTC granulaire) après dégradation des paramètres de l'interface IR-sol

### II.2.2.2. Calage de l'essai avec PTC traitée

Dans cette partie, la calibration du deuxième essai formé d'une PTC en sol traité sans plateforme de travail est présentée. L'objectif était de garder les mêmes paramètres du Deltagom, du sable et du remblai déjà calibrés et présentés précédemment mais pour le cas d'une PTC traitée. Dans un premier temps, les paramètres d'entrée initiaux de la PTC traitée ont été considéré (Tableau 2-12). La comparaison du modèle numérique avec les résultats expérimentaux a donné des valeurs de contrainte et de tassement supérieures de 89% et 150% respectivement aux valeurs expérimentales (figure 2-76).

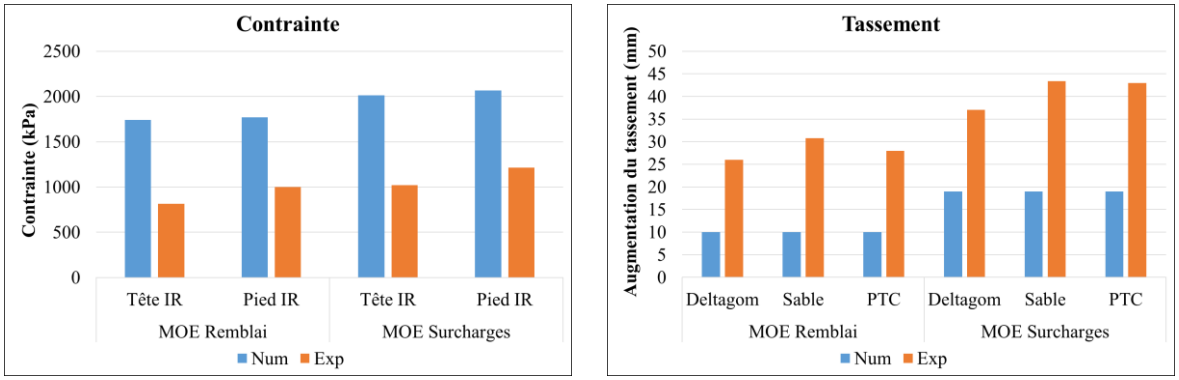



Figure II-76 Comparaison des contraintes et des tassements du deuxième essai (PTC traitée sans plateforme de travail) – paramètres initiaux de la PTC traitée

A la suite de ces résultats, une dégradation des paramètres de la PTC traitée était nécessaire pour obtenir des valeurs numériques proches de celles mesurées expérimentalement. La dégradation de la cohésion de la PTC traitée de 193 kPa à 25 kPa a entraîné des états de contrainte proches des résultats expérimentaux, mais des valeurs de tassement légèrement supérieures à celles mesurées sur le site, ce qui a nécessité une augmentation du module Deltagom pour finalement atteindre des valeurs similaires (Ey = 0,19 MPa) (Figure 2-77).

Finalement, les mêmes paramètres de sable et de remblai ont été considérés pour les deux modèles. Pour le Deltagom, l'instrumentation a montré des états de contraintes différents après la mise en place des PTC et du remblai, ce qui a conduit à considérer des modules différents dans les modèles calibrés (0,13 MPa pour la PTC granulaire et 0,19 MPa pour la PTC traitée). Les paramètres obtenus après calibration sont présentés dans le Tableau 2-15.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

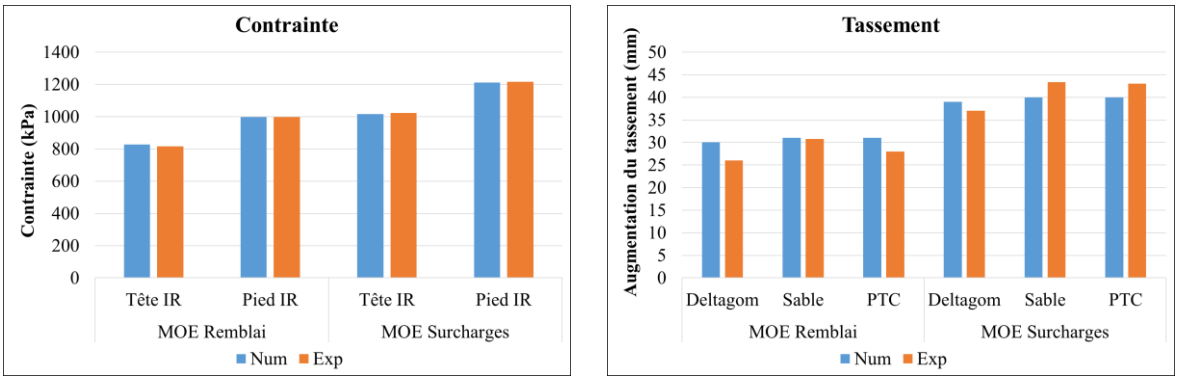



Figure II-77 Comparaison des contraintes et des tassements du deuxième essai (PTC traitée sans plateforme de travail) après calibration

Tableau II-15 Paramètres choisis après calibration des modèles

| | IR | Biocofra | Deltagom | Sable | Remblai | PTC granulaire | PTC traitée |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Loi** | LE | LE | LE | MC | MC | MC | MC |
| **γ (kN/m³)** | 24 | 0 | 5,2 | 19 | 18 | 19 | 20,8 |
| **Ey (MPa)** | 11500 | 50 | 0,652 (0,13/0,19) | 35 | 35 | 50 | 93 |
| **υ (-)** | 0,2 | 0 | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| **c (kPa)** | - | - | - | 0 | 8 (4) | 2 (0) | 193 (25) |
| **φ (°)** | - | - | - | 32 (30) | 33 (27) | 40 (30) | 28,9 |
| **Ψ (°)** | - | - | - | 2 (0) | 3 (0) | 10 (0) | 0 |
| **R inter** | - | 1 (0,9) | 1 (0,2) | 1 (0,7) | - | - | - |
| **( ) : Les valeurs présentées entre parenthèses sont les paramètres dégradés après calibration** | | | | | | | |

La Figure 2-78 présente les contraintes obtenues après calibration des deux modèles numériques (écart moyen de 3% par rapport aux résultats expérimentaux).

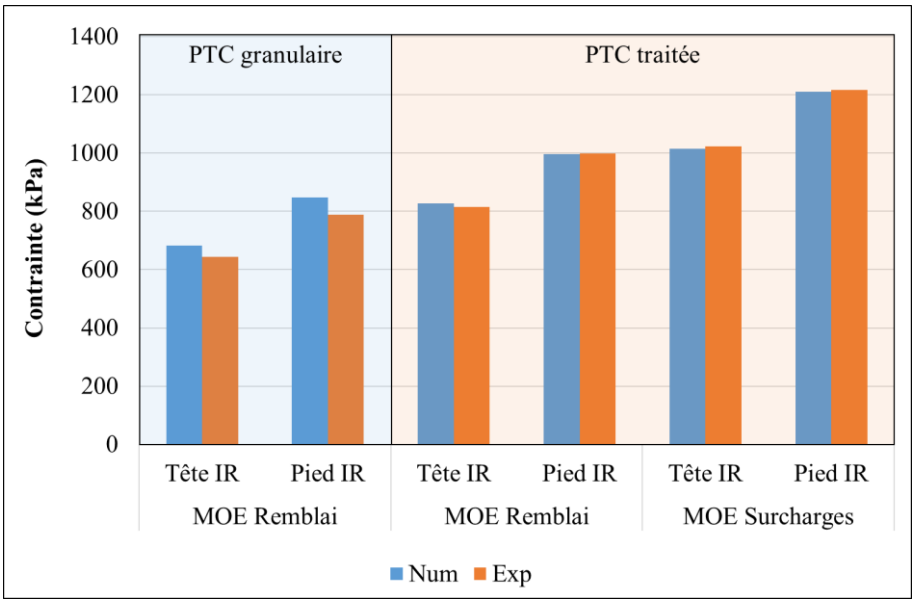



Figure II-78 Comparaison des contraintes après calibration



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

La Figure 2-79 présente les tassements obtenus après calibration des deux modèles numériques (incertitude moyenne de 6% par rapport aux résultats expérimentaux).

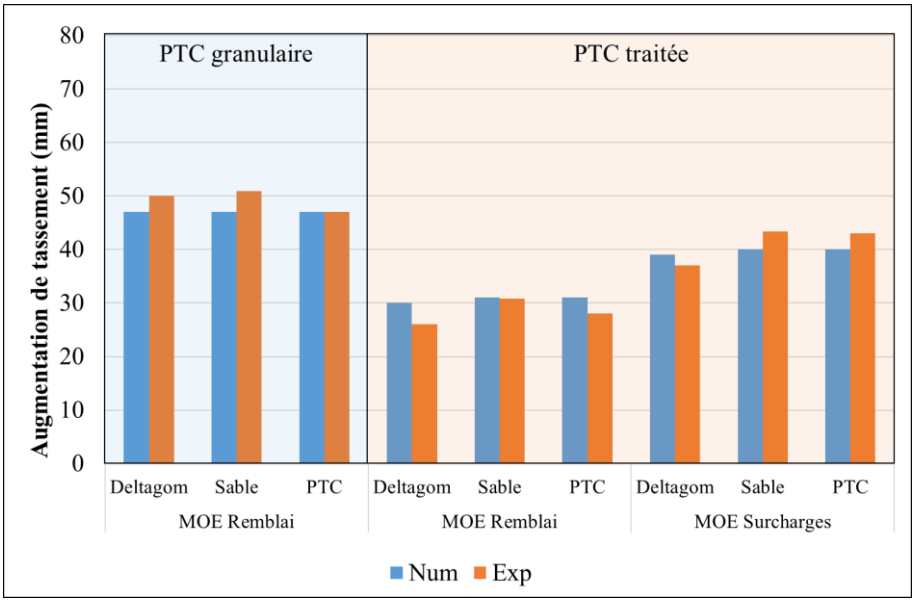



Figure II-79 Comparaison des tassements après calibration



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.2.3. Analyse des mécanismes

Disposant d'un modèle numérique calibré, il est intéressant de l'utiliser pour analyser les mécanismes par le suivi de l'évolution de paramètres dans le sol que l'instrumentation ne peut pas apporter.

### II.2.3.1. Transfert de charge

La Figure 2-80 montre une coupe horizontale à différents niveaux. Elle permet de montrer l'évolution de la contrainte verticale dans le cas de la PTC granulaire pour la phase de mise en place du remblai. On constate un transfert de charge par effets de cisaillement dans la première couche de remblai, avec notamment une augmentation de la contrainte au niveau des inclusions rigides. Cet effet est plus important au sein de la PTC granulaire, où la concentration des contraintes est très claire au niveau de l'inclusion.

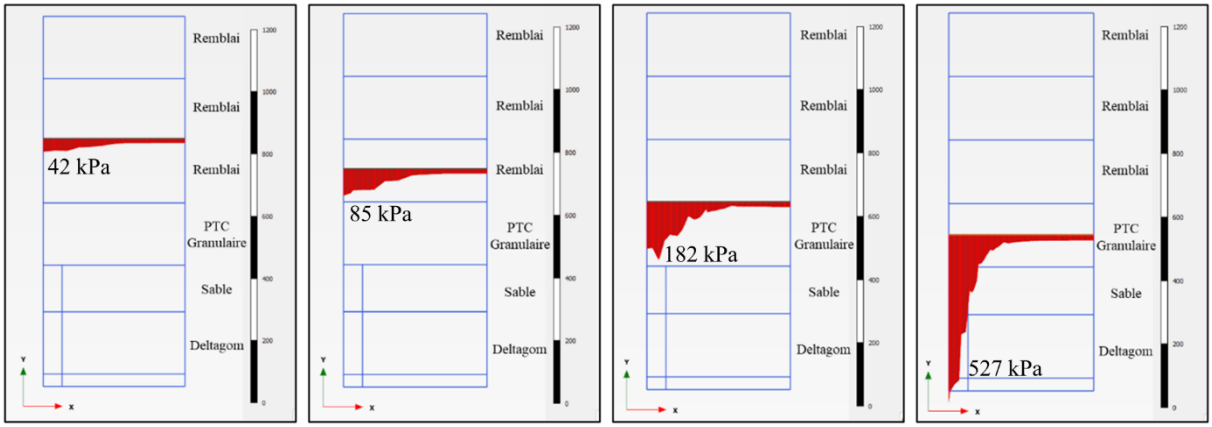



Figure II-80 Evolution de la contrainte verticale – PTC granulaire

La Figure 2-81 montre l'évolution de la contrainte verticale et celle du poids de la colonne du sol (au-dessus d'une IR) en fonction de l'altitude sur une coupe verticale allant du milieu de la tête de l'inclusion jusqu'au toit du remblai dans le cas de la PTC granulaire.

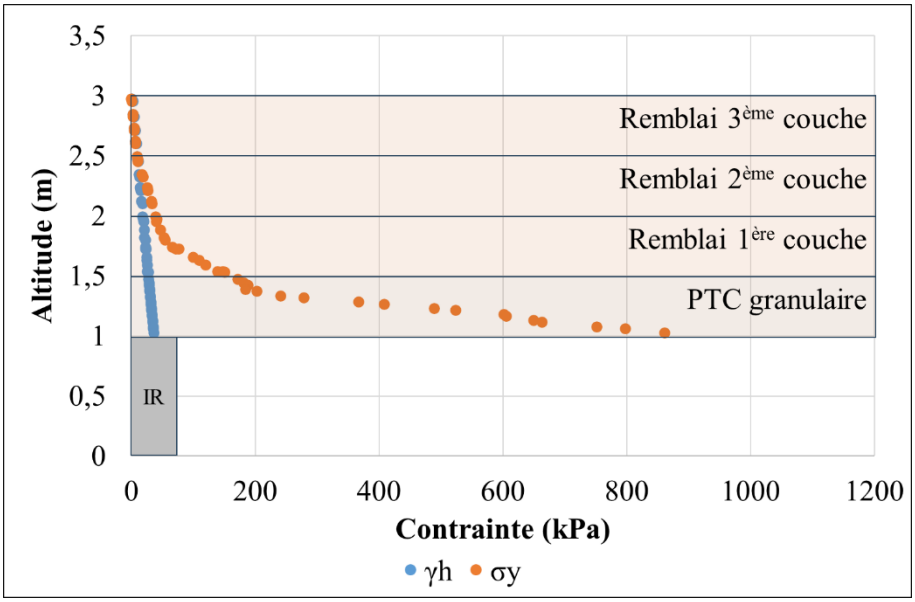



Figure II-81 Evolution de la contrainte verticale et du poids de la colonne au-dessus d'une IR – PTC granulaire



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L'évolution de la contrainte verticale en absence des IR correspond à celle du poids de la colonne γh (courbe bleue). C'est la présence des IR qui fait qu'il y a un transfert de charge qui se fait par effets de cisaillement et qui entraîne une augmentation de contrainte au droit des inclusions (courbe orange). On constate que le transfert de charge par effets de cisaillement commence dans la première couche du remblai et devient beaucoup plus important au niveau de la PTC granulaire avec une valeur maximale au niveau de la tête de l'inclusion.

La Figure 2-82 montre les coupes horizontales pour le cas de la PTC traitée pour la phase de mise en place du remblai. Le transfert de charge par effets de cisaillement est clair au niveau du remblai avec une concentration plus importante de contrainte au droit des IR dans la PTC. Ces observations mettent en évidence l'importance de modéliser le remblai comme une couche de sol et non comme une contrainte répartie sur la PTC.

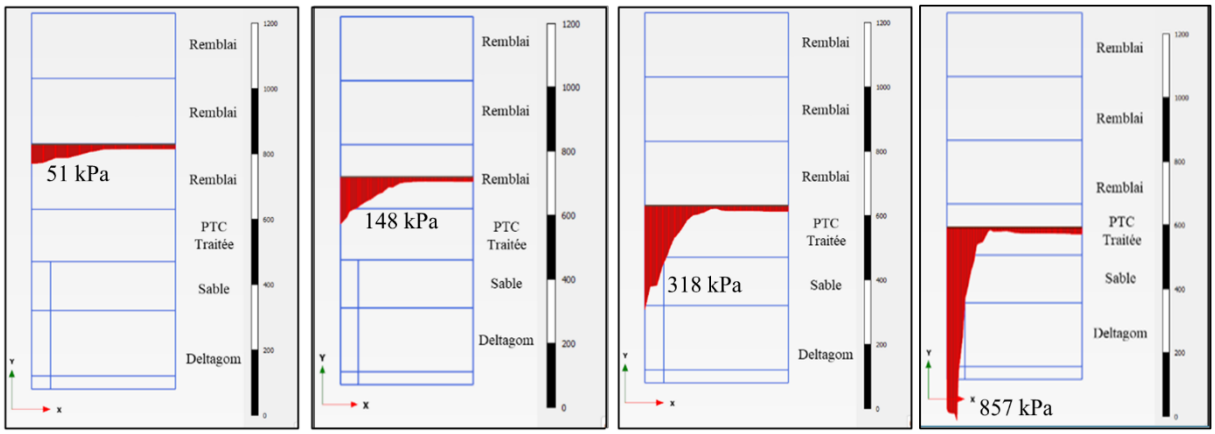



Figure II-82 Evolution de la contrainte verticale – PTC traitée

La Figure 2-83 montre également l'évolution de la contrainte verticale et celle du poids de la colonne du sol (au-dessus d'une IR) pour le cas de la PTC traitée. On constate le même comportement que celui de la PTC granulaire (Figure 2-82) avec un report de charge plus important au niveau de la PTC traitée.

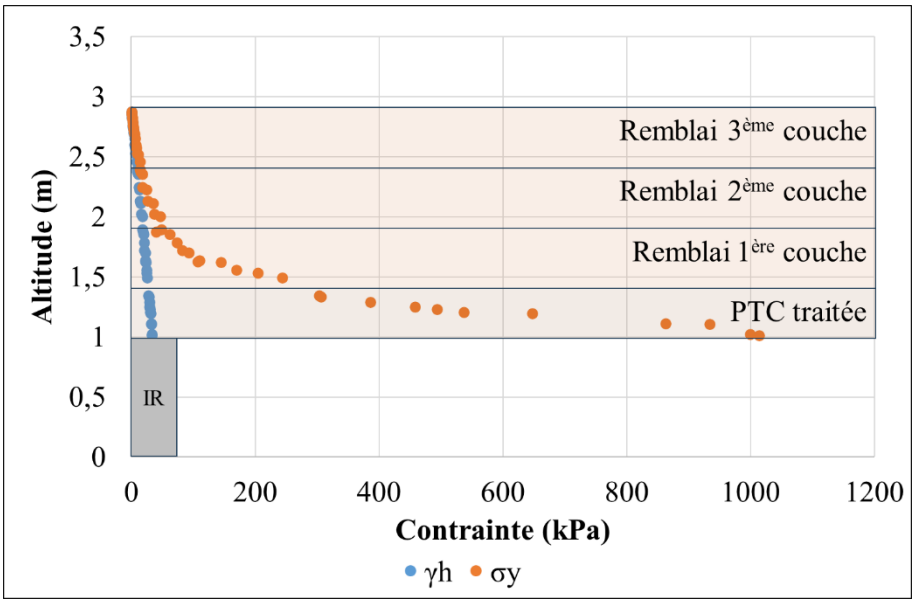



Figure II-83 Evolution de la contrainte verticale et du poids de la colonne au-dessus d'une IR – PTC granulaire



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3.2. Mise en place du remblai : phasage

Deux modèles numériques sont testés dans cette partie et visent à déterminer l'influence du phasage de calcul sur les états de contrainte et du tassement. Les deux modèles sont basés sur les paramètres choisis après calibration (Tableau 2-15) avec une seule différence : dans le premier modèle, la mise en place du remblai est réalisée comme cela a été fait expérimentalement (3 couches de 50 cm) alors que dans le deuxième modèle, elle est réalisée en une seule couche. La Figure 2-84 présente les contraintes et les tassements des deux modèles. On constate que la mise en place du remblai en une seule couche entraîne une augmentation de 67% et de 10% du tassement et de la contrainte, respectivement, par rapport au modèle calibré (3 couches). Cette comparaison met en évidence l'importance de prendre en compte le phasage dans la modélisation numérique.

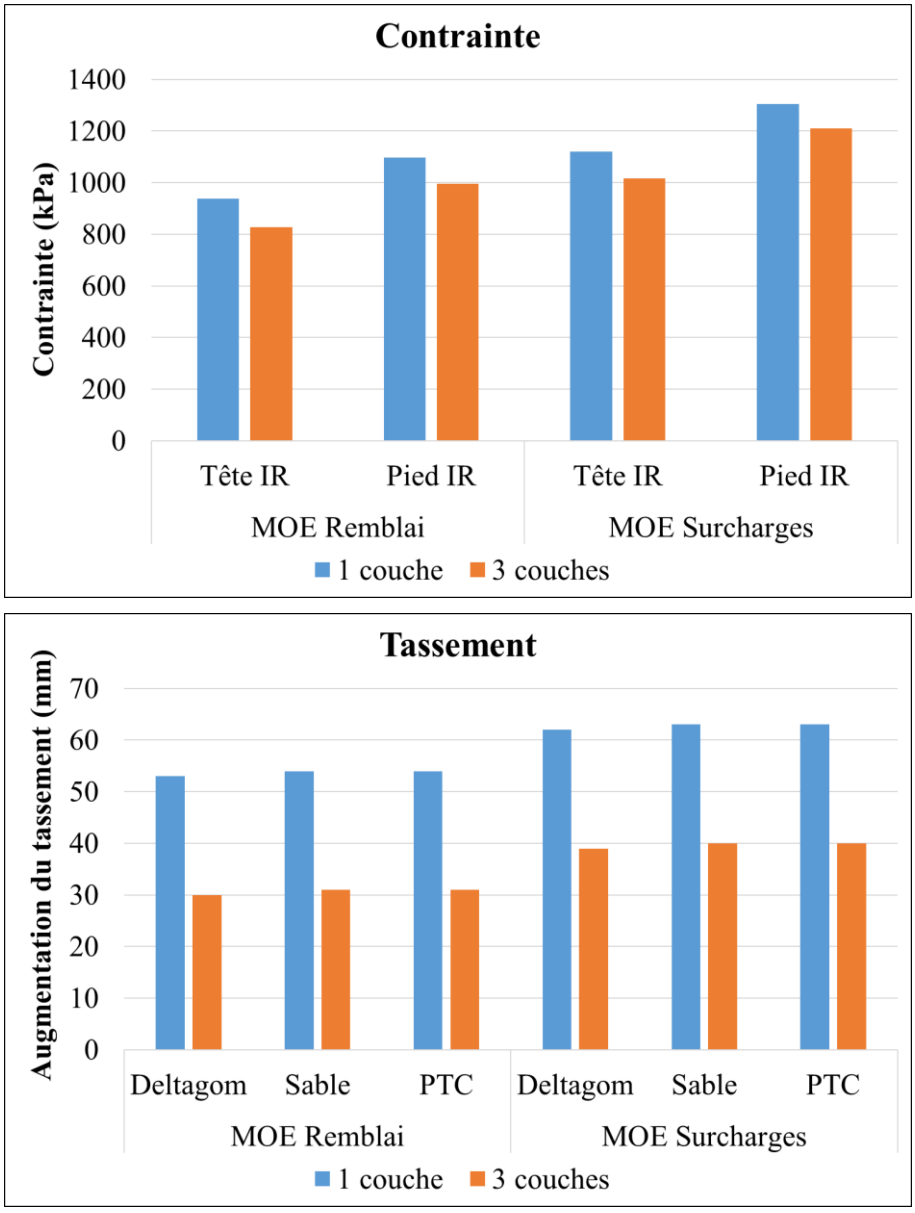



Figure II-84 Effets du phasage de calcul sur les contraintes et les tassements

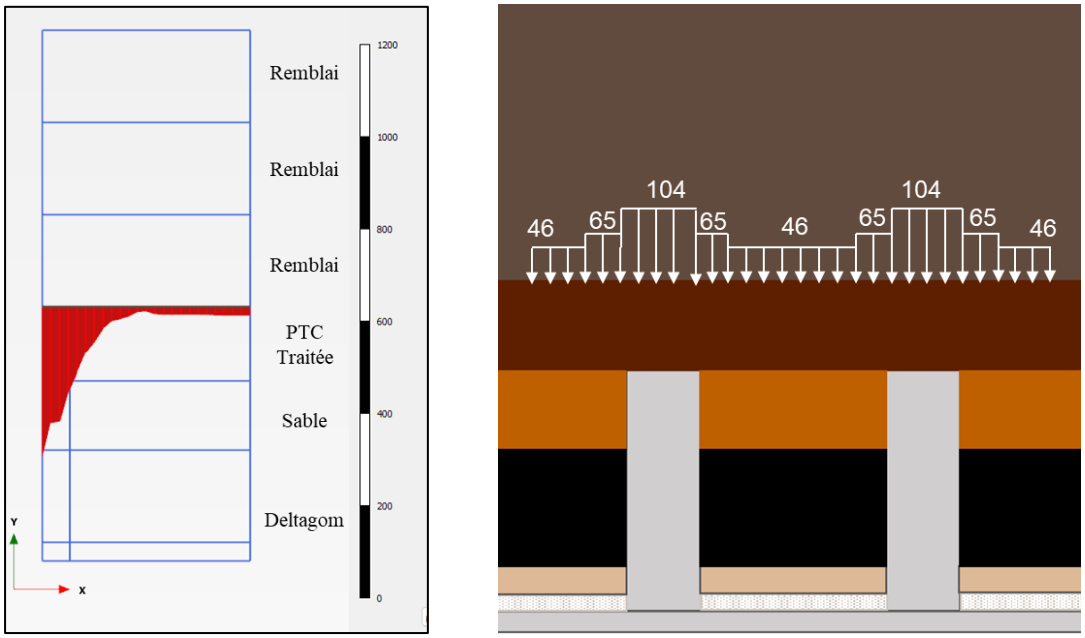


Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3.3. Répartition de la charge : PTC traitée

- Au niveau du toit de la PTC

La Figure 2-85 présente la répartition de la charge sur la PTC traitée numériquement et expérimentalement (à travers les mesures des capteurs de pression circulaire et annulaire installés au niveau de la PTC) pour la phase de mise en place du remblai.




(a) (b)

Figure II-85 Répartition de la charge au niveau de la PTC traitée (a) numériquement (b) expérimentalement

La charge totale appliquée sur une maille élémentaire (S = 4 $m^2$) au niveau de la PTC traitée est calculée numériquement, expérimentalement et analytiquement (Tableau 2-16). Le calcul analytique est basé sur le poids volumique du remblai ($\gamma$ = 18 $kN/m^3$) déterminé par les essais en laboratoire. On constate que les méthodes analytique et numérique présentent une même charge. Cependant, la méthode expérimentale présente une charge qui est beaucoup plus importante. Cette différence est liée à la limitation des mesures des capteurs de pression installés au niveau de la PTC traitée. En effet, la mesure de la contrainte sur le sol doit être prise qualitativement notamment lorsque les augmentations de contrainte mesurées sont faibles. Cependant, on obtient toujours les mêmes tendances où la contrainte mesurée au droit d'une inclusion est la plus importante et celle mesurée à proximité de l'inclusion rigide est toujours supérieure à celle au niveau du sol. Par contre, ce n'est pas le cas d'un capteur installé sur une tête d'inclusion et présentant la même section. Dans ce cas, les mesures sont plus fiables et exactes, ce qui est le cas de la calibration du modèle qui était basée sur les contraintes en tête et en pied des inclusions rigides.

Tableau II-16 Charge totale sur une maille élémentaire au niveau de la PTC traitée

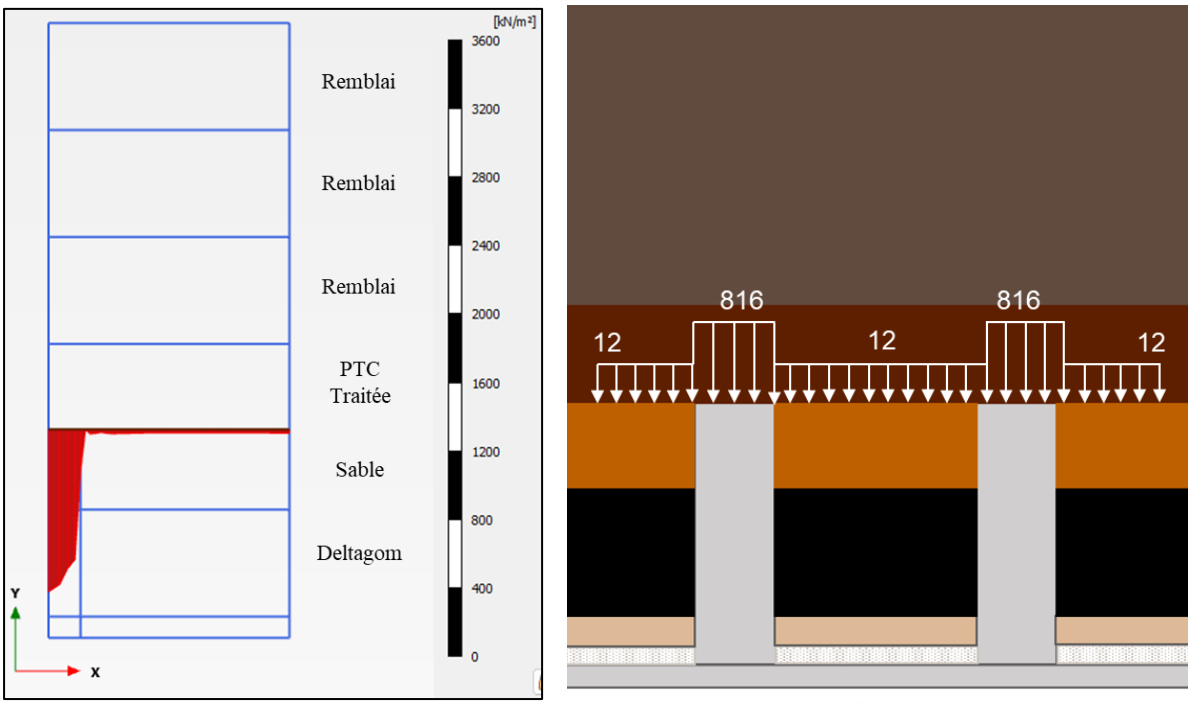
| **Méthode** | Analytique | Numérique | Expérimentale |
|---|---|---|---|
| **Charge (kN)** | 108 | 109 | 191 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

- Au niveau des têtes des inclusions

La Figure 2-86 présente la répartition de la charge au niveau du sol numériquement et expérimentalement pour la phase de mise en place du remblai.




(a) (b)

Figure II-86 Répartition de la charge au niveau du sol (a) numériquement (b) expérimentalement

La charge totale appliquée sur une maille élémentaire au niveau du sol est présentée dans le Tableau 2-17. Le calcul analytique est basé sur les poids volumiques du remblai et de la PTC traitée ($\gamma$ = 18 kN/m$^3$ et $\gamma$ = 20,8 kN/m$^3$ respectivement). On constate que les méthodes analytique et numérique présentent toujours une charge totale similaire, ce qui n'est pas le cas de la méthode expérimentale. Cependant, on constate que la méthode expérimentale présente dans ce cas des résultats plus proches de ceux des méthodes analytique et numérique, puisque les capteurs circulaires installés sur les têtes des inclusions présentent des mesures plus fiables.

Tableau II-17 Charge totale sur une maille élémentaire au niveau du sol

| **Méthode** | **Charge (kN)** |
|---|---|
| Analytique | 141 |
| Numérique | 142 |
| Expérimentale | 105 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

II.2.3.4. Diffusion de la contrainte : PTC traitée

Les mécanismes de rupture ont été visualisés au niveau de la plateforme traitée lors du démontage de l'essai (Figure 2-87-a). On remarque une surface de rupture au niveau de la PTC qui est plus grande que la surface de l'inclusion avec un mode de rupture qui peut être assimilé à un tronc de cône d'axe vertical, issu de la tête de l'inclusion. (Figure 2-87-b).

Au niveau de la PTC traitée, l'instrumentation montre que le capteur circulaire (Φ = 300 mm) installé sur la tête de l'inclusion rigide mesure une contrainte moyenne de 104 kPa. Le capteur annulaire d'épaisseur e = 10 cm installé autour de la tête de l'inclusion ($\Phi_{int}$ = 325 mm, $\Phi_{ext}$ = 525 mm) mesure une contrainte moyenne de 65 kPa alors que le capteur circulaire installé sur le sol (Φ = 300 mm) mesure une contrainte moyenne de 46 kPa (Figure 2-87-b). L'instrumentation met en évidence une zone de concentration de contrainte au niveau de la PTC traitée avec une surface qui est plus grande que celle de la tête de l'inclusion. La courbe de forme sinusoïdale présentée au-dessus des contraintes est une estimation du schéma de répartition de la charge vu que les capteurs donnent des valeurs moyennes sur la totalité de leurs surfaces, ce qui conduit à une répartition de charge du type « marches d'escalier » alors qu'en réalité la répartition est plus linéaire.




(a) (b)

Figure II-87 Observations après démontage de l'essai et estimation du schéma de diffusion de la contrainte

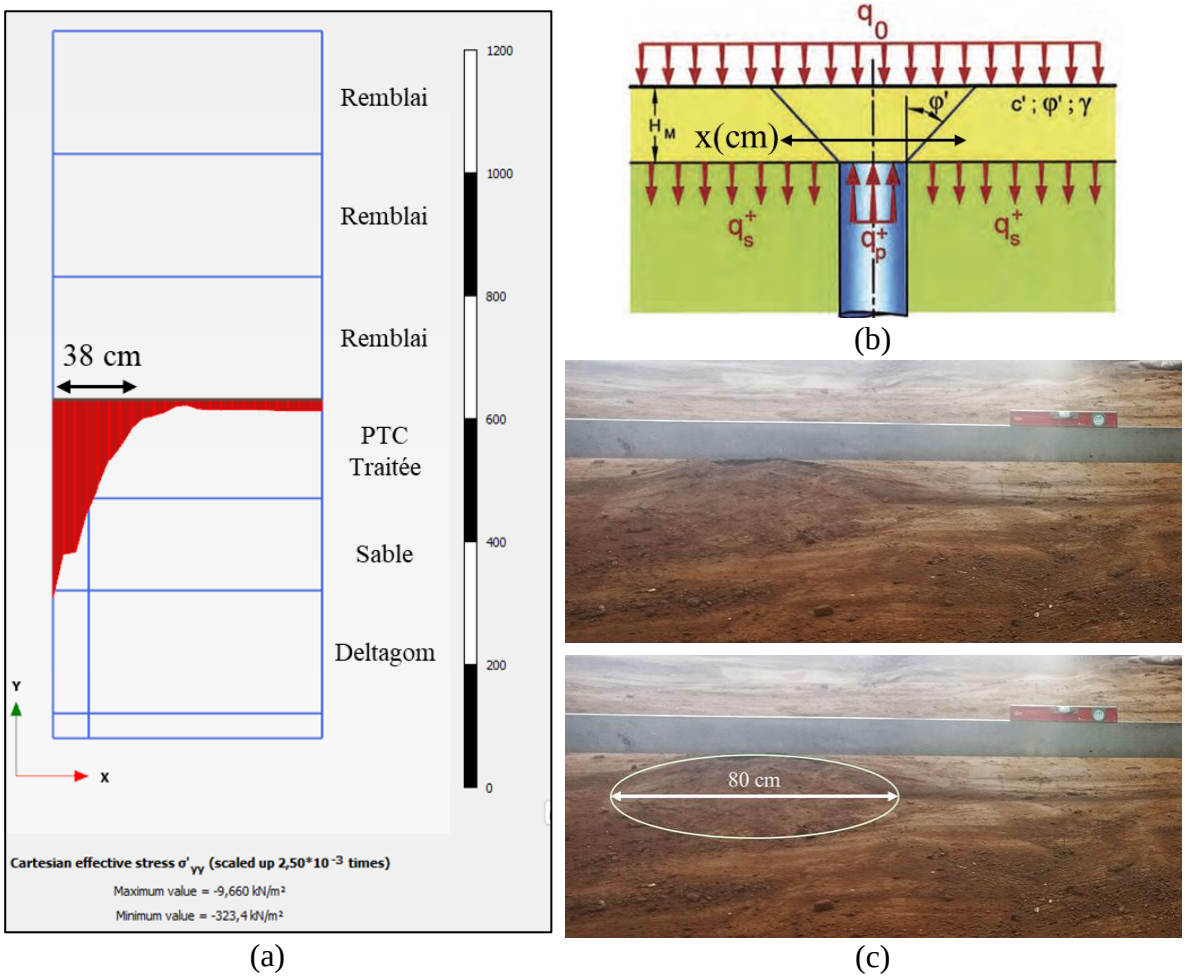
La Figure 2-88 présente le schéma de diffusion de la contrainte selon les méthodes numériques, analytiques et expérimentales pour la phase de mise en place du remblai. La méthode numérique est basée sur le modèle Plaxis déjà calibré où on constate qu'au niveau de la PTC, la contrainte est appliquée sur une surface qui est plus grande que celle de la tête de l'inclusion (rayon ≈ 38 cm). La méthode analytique est basée sur le schéma du cône de cisaillement présenté dans (ASIRI, 2012) où le transfert de charge est assimilé à un tronc de cône formant un angle φ par rapport à la verticale et la méthode expérimentale est basée sur les observations après le démontage de l'essai.

Le calcul des bases du cône x(cm) est présenté dans le Tableau 2-18. Les résultats montrent des valeurs similaires pour les trois méthodes de calcul, ce qui indique que le modèle numérique et la méthode du cône de cisaillement permettent de bien représenter les mécanismes



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

de transfert de charge dans la PTC traitée. Pour la phase de mise en place des surcharges, on obtient les mêmes valeurs des bases du cône mais des contraintes qui sont plus importantes.




(a) (b) (c)

Figure II-88 Diffusion de la contrainte selon la méthode (a) numérique, (b) analytique et (c) expérimentale

Tableau II-18 Calcul de la base du cône de diffusion selon les différentes méthodes

| **Méthode** | **Calcul** | **x (cm)** |
|---|---|---|
| Numérique | x(cm) = 2*38 | 76 |
| Analytique | x(cm) = $\Phi_{IR}$ + 2*$H_M$*tan($\varphi_{PTC}$)<br>= 30 + 2*40*tan (28,9) | 74 |
| Expérimentale | mesure | ≈ 80 |

Selon la méthode du cône de cisaillement, le schéma d'équilibre limite au sein de la plateforme de transfert de charge est présenté à la Figure 2-89. En se basant sur l'état de l'art présenté dans le chapitre 1, Garcia et al. (2021) ont trouvé que le transfert de charge se fait à l'intérieur de la PTC traitée sous forme d'un cône tronqué inversé avec un angle externe du cône de 65°. Cet angle a été déterminé visuellement (à l'aide d'un rapporteur). Ces résultats présentent des mécanismes de transfert de charge et des ruptures similaires de ce qu'on a obtenu mais un angle de tronc de cône différent. Cette différence peut être expliquée par le fait que



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

l’utilisation d’une seule inclusion rigide dans leur dispositif, la présence des effets de bord et l’utilisation d’un plateau mobile qui ne prend pas en compte le tassement lors de la mise en place de la PTC rendent ce dispositif non représentatif de la réalité.

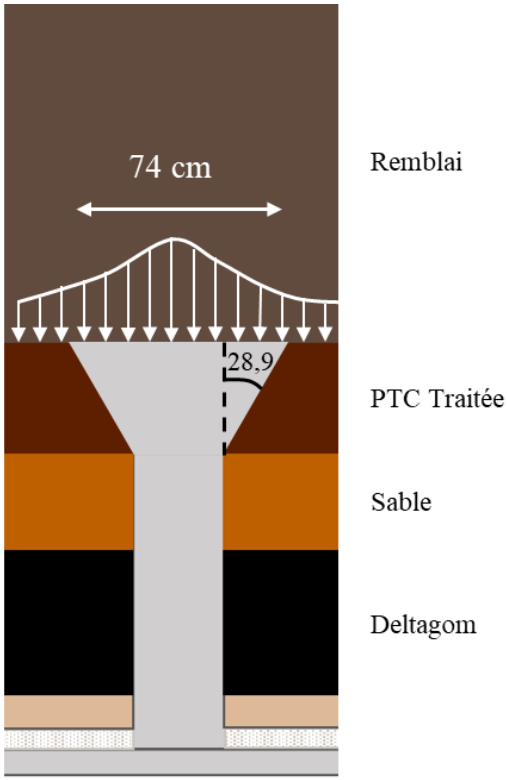



Figure II-89 Schéma d’équilibre - cône de cisaillement

### II.2.3.5. Plan d’égal tassement

Plusieurs coupes horizontales sont présentées à la Figure 2-90. Elles présentent le tassement à différents niveaux dans le remblai pour la phase de mise en place des surcharges.

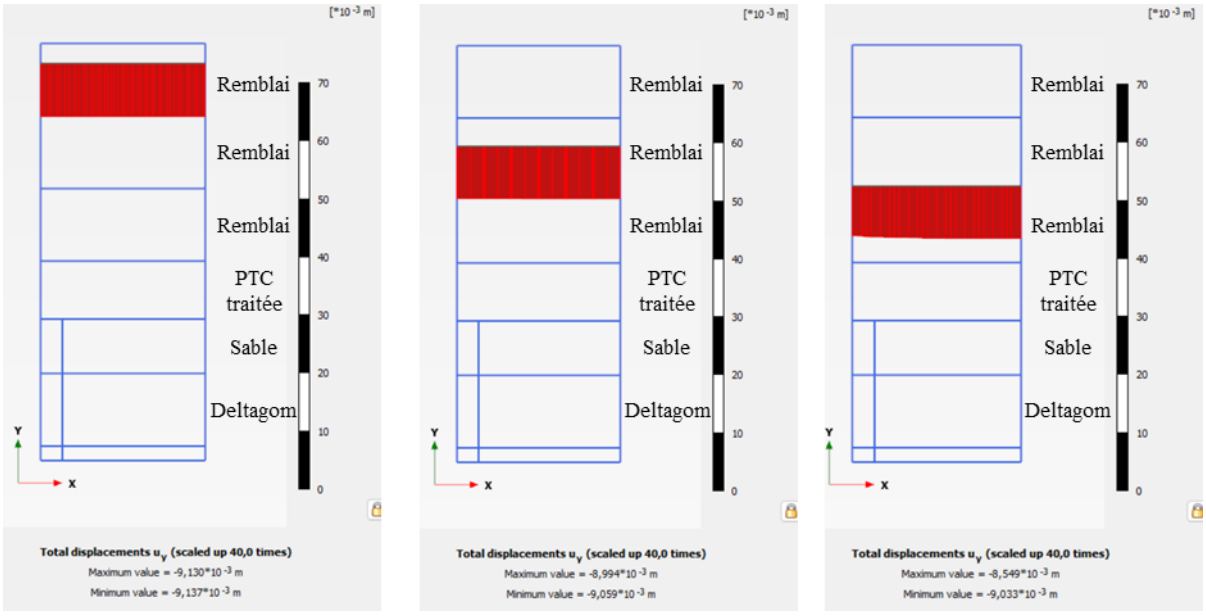



Figure II-90 Tassement au sein du remblai



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats montrent qu'après la mise en place des surcharges, un tassement total de 9 mm est observé avec un tassement différentiel très négligeable (inférieur à 1 mm). Dans notre étude, le tassement différentiel admissible a été fixé à 1 mm. Généralement, ce critère dépend du type de l'ouvrage construit. La Figure 2-91 montre que le tassement différentiel est de 1 mm à partir de 32 cm au-dessus de la PTC traitée. On considère alors que c'est la position du plan d'égal tassement.

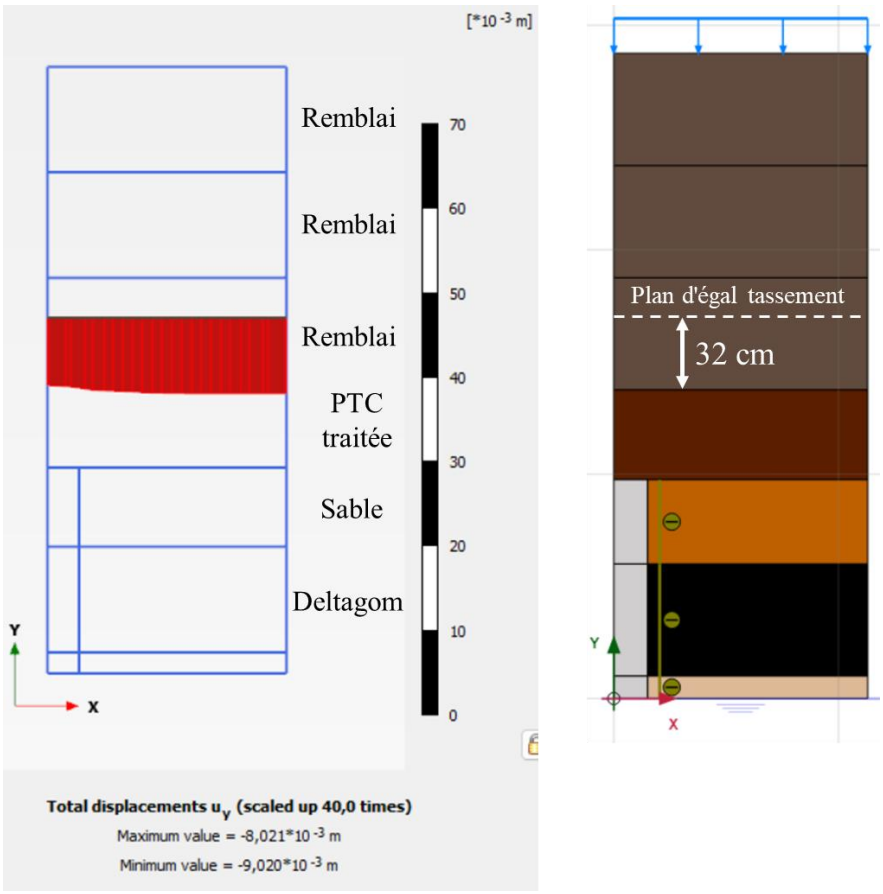



Figure II-91 Plan d'égal tassement



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## II.2.4. Etude paramétrique

L'étude de sensibilité se concentre sur le cas de la PTC traitée en évaluant l'effet de différents paramètres tel que le compactage et la cohésion de la PTC traitée, son épaisseur, les surcharges, les caractéristiques du remblai, le maillage et les interfaces sur l'efficacité en contrainte et en tassement du système.

Pour rappel, l'efficacité en contrainte consiste à calculer la charge prise par une inclusion par rapport à la charge totale au niveau d'une maille élémentaire (voir chapitre 1 - 1.4. Report de charge et efficacité) alors que l'efficacité en tassement consiste à calculer la réduction en pourcentage du tassement en comparant le tassement obtenu dans notre cas à celui pour le cas d'un sol non renforcé par IR selon la formule :

$$\text{Efficacité}_{\text{tassement}} = 1 - \frac{tassement\ (sol\ renforcé\ par\ IR)}{tassement\ (sol\ non\ renforcé\ par\ IR)}.$$

### II.2.4.1. Cohésion

Après la calibration du modèle, une cohésion de 25 kPa a été choisie pour la PTC traitée. La Figure 2-92 présente l'évolution des efficacités en contrainte et en tassement en fonction de la cohésion de la PTC traitée. Les résultats montrent des efficacités très similaires pour la mise en place du remblai et des surcharges. On remarque que les efficacités en contrainte et en tassement présentent une évolution similaire. Une augmentation importante des efficacités est observée en passant de 15 kPa à 100 kPa (de l'ordre de 33%) suivi d'une évolution qui est plus faible en passant de 100 kPa à 193 kPa (la cohésion mesurée au laboratoire) de l'ordre de 11%. Ces résultats mettent en évidence l'importance du compactage des PTC traitées et son effet sur l'efficacité du système. On constate de plus, l'augmentation importante des efficacités en passant de 50 kPa à 100 kPa. Cette pente nous montre qu'un compromis est possible entre la cohésion de la PTC et les efficacités obtenues, en tenant compte du dosage du traitement et des effets économiques et environnementaux.

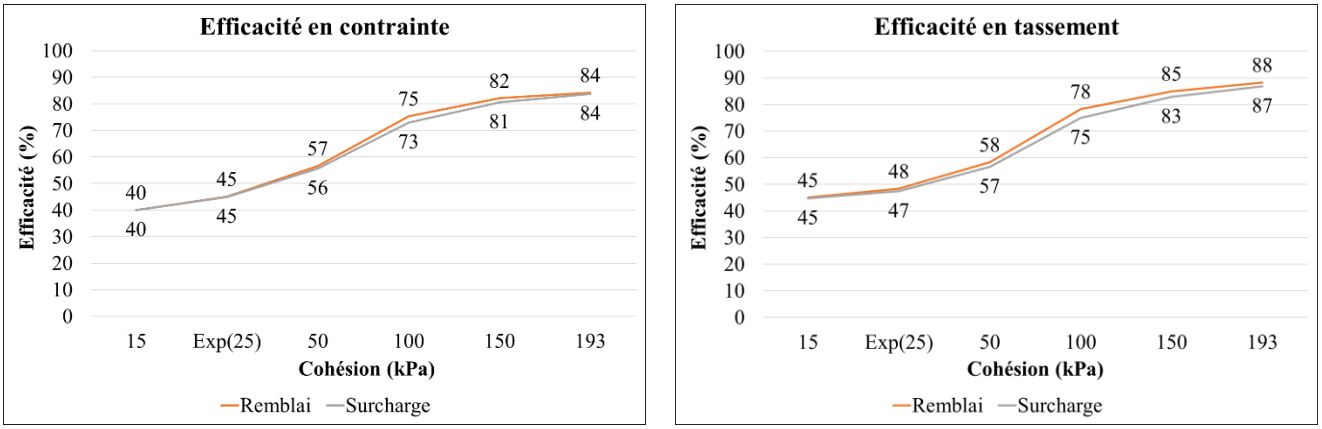



Figure II-92 Evolution des efficacités en fonction de la cohésion de la PTC

### II.2.4.2. Epaisseur

L'épaisseur de la PTC traitée dans notre cas est de 0,4 m. La Figure 2-93 présente l'évolution des efficacités en variant l'épaisseur de la PTC entre 0,3 et 0,5 m. Les résultats montrent que l'effet de l'épaisseur de la PTC est moins important que celui de la cohésion où



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

on remarque des meilleures efficacités en passant d'une cohésion de 25 à 50 kPa que pour une épaisseur de 0,4 à 0,5 m. Cependant, on remarque toujours des efficacités similaires pour la mise en place du remblai et des surcharges ainsi qu'une une même évolution linéaire des efficacités en contrainte et en tassement.

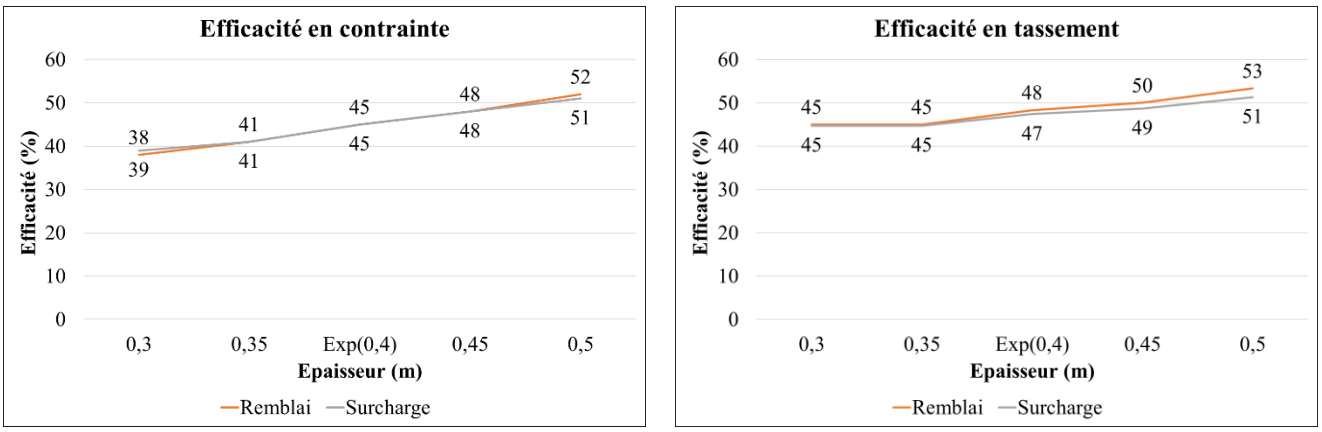



Figure II-93 Evolution des efficacités en fonction de l'épaisseur de la PTC

### II.2.4.3. Module d'Young

Le module d'Young mesuré au laboratoire pour la PTC traitée est de 93 MPa. Selon le retour d'expérience, dans la majorité des projets réels des plateformes traitées sur inclusions rigides, le module d'Young utilisé est estimée et une valeur générale est considérée. La Figure 2-94 présente l'évolution des efficacités en contrainte et en tassement en fonction du module de la PTC traitée. Les résultats montrent que le module d'Young a peu d'influence sur les efficacités du système. On remarque une augmentation moyenne des efficacités de 3% en passant d'un module de 30 à 150 MPa. Cette observation permet de relativiser l'importance de bien caractériser ce paramètre pour la modélisation numérique.

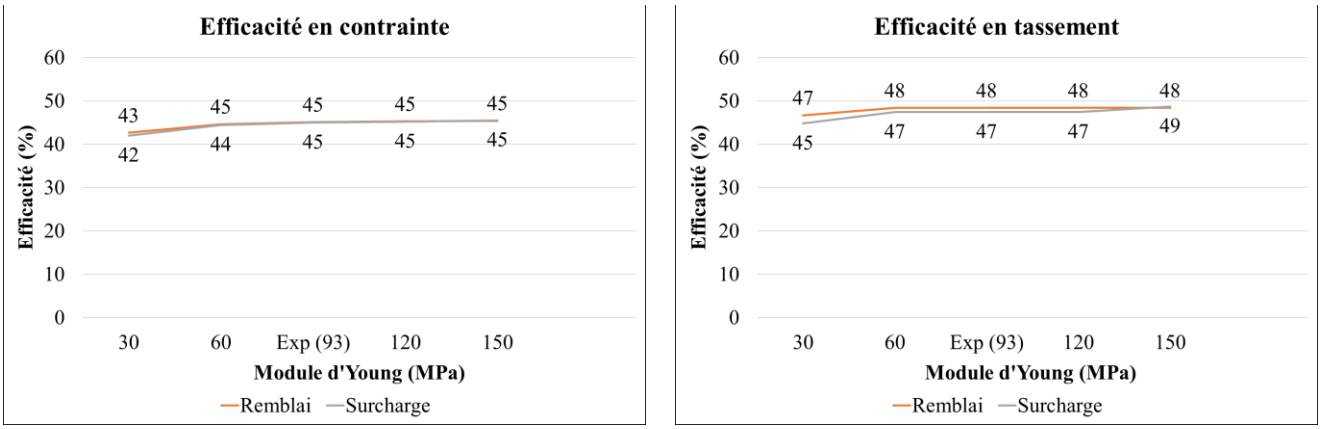



Figure II-94 Evolution des efficacités en fonction du module de la PTC

### II.2.4.4. Surcharge

La surcharge appliquée dans notre essai est de 7,65 kPa. La Figure 2-95 présente l'évolution des efficacités en fonction de la surcharge pour une cohésion de la PTC de 150 kPa. On remarque toujours une cohérence entre l'évolution des efficacités en contrainte et en



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

tassement. Les résultats montrent que la surcharge a une faible influence sur les efficacités où on constate une diminution de 6% en efficacité en triplant la surcharge (22,95 kPa).

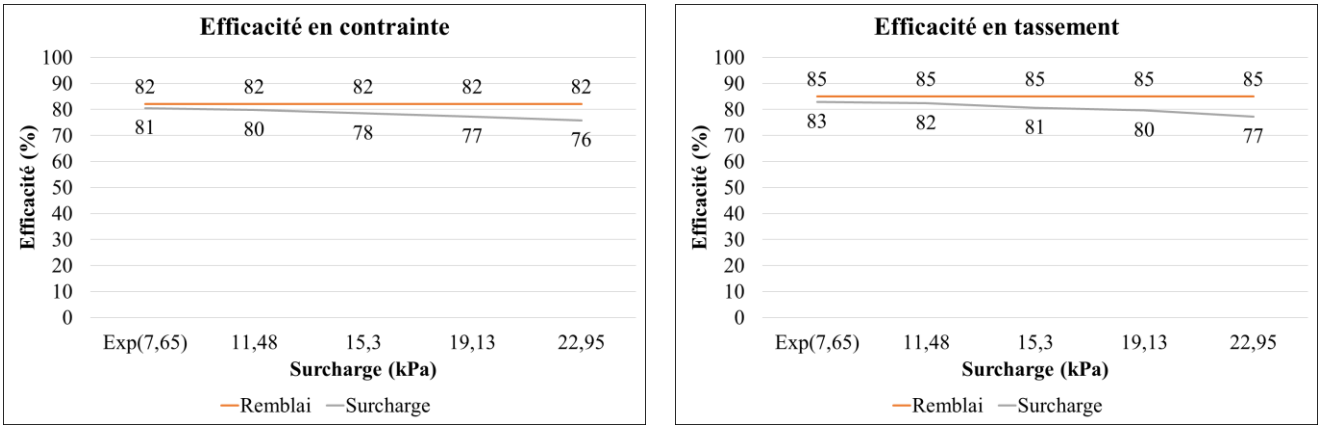



Figure II-95 Evolution des efficacités en fonction des surcharges

II.2.4.5. Caractéristiques du remblai

Les paramètres du remblai choisis après calibration sont : cohésion c = 4 kPa, angle de frottement φ = 27° et dilatance ψ = 0°. La Figure 2-96 présente l'évolution des efficacités avec l'amélioration des paramètres du remblai. L'objectif est d'évaluer le rôle du remblai dans les mécanismes de transfert de charge.

Les résultats mettent en évidence l'influence du remblai sur l'efficacité du système où on remarque qu'en améliorant la qualité du remblai on peut augmenter de 18% les efficacités en tassement et en contrainte. On constate toujours des efficacités très proches pour les phases de mise en place du remblai et des surcharges ainsi qu'une évolution similaire pour les efficacités en contrainte et en tassement.

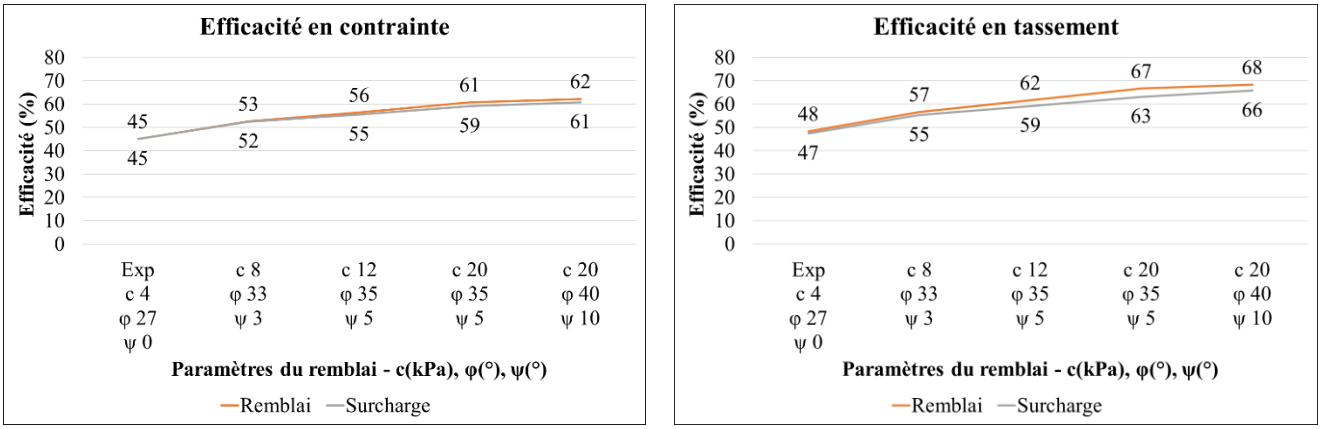



Figure II-96 Evolution des efficacités en fonction des paramètres du remblai

L'amélioration des paramètres du remblai entraîne un meilleur transfert de charge au niveau de la PTC traitée par effet de cisaillement. Cela peut être observé en comparant les états de contrainte en tête de la PTC (Figure 2-97).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

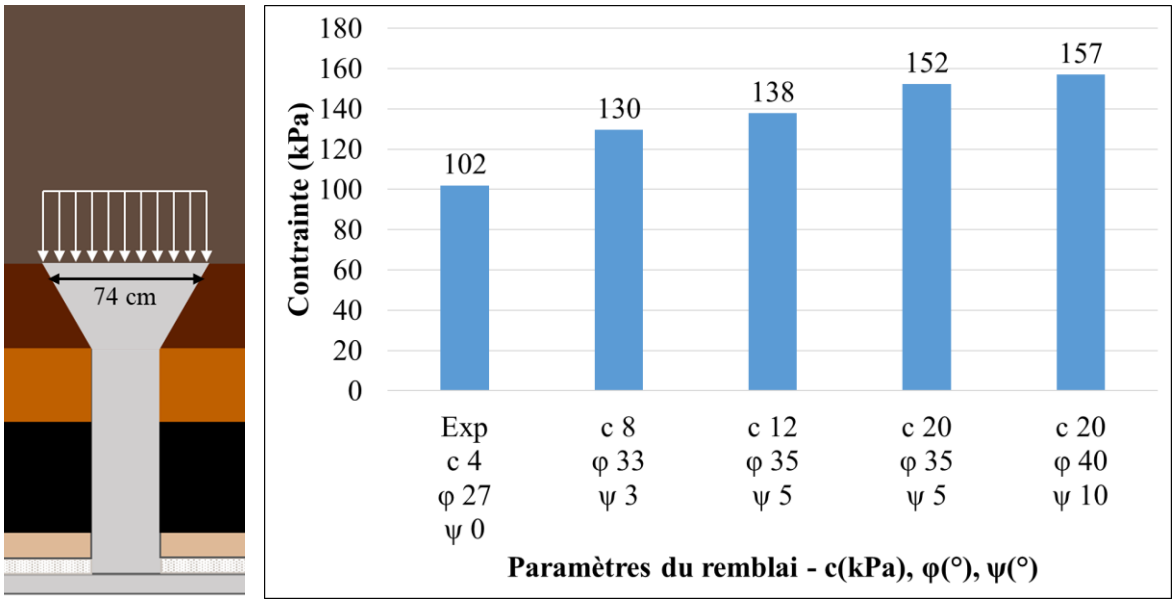
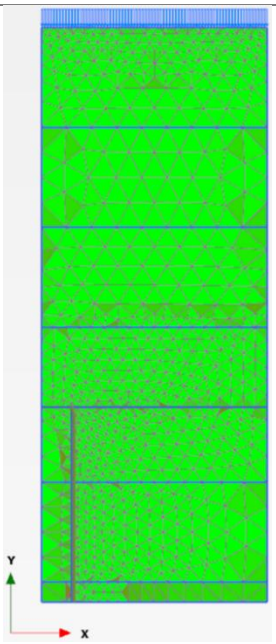
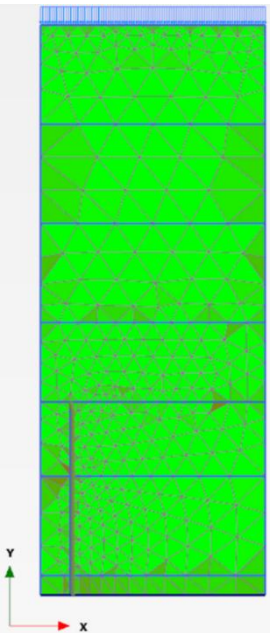



Figure II-97 Evolution de la contrainte en tête de la PTC en fonction de la qualité du remblai

### II.2.4.6. Maillage

Un maillage très fin a été utilisé pour le modèle calibré avec une densification plus importante au niveau de la PTC et à proximité de l'inclusion. Le Tableau 2-19 présente les trois maillages testés.

Tableau II-19 Maillages testés

| **Maillage** | Très fin (modèle calibré) | Fin | Moyen |
|---|---|---|---|
| **Schéma** |  |  |  |
| **Temps de calcul (mins)** | 17,5 | 5,5 | 1,5 |
| **Nombre de nœuds** | 18789 | 11225 | 5411 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

La Figure 2-98 présente l'évolution des efficacités en fonction de différents maillages. Les résultats montrent que le maillage n'a pas d'influence sur les efficacités en contrainte, ni sur celles en tassement. Cependant, il est intéressant d'avoir un maillage très fin avec une densification plus importante au niveau de la PTC, ce qui permet de simuler plus précisément les mécanismes de transfert de charge et la distribution de la charge en tête des inclusions rigides et au niveau du sable et de la PTC traitée.

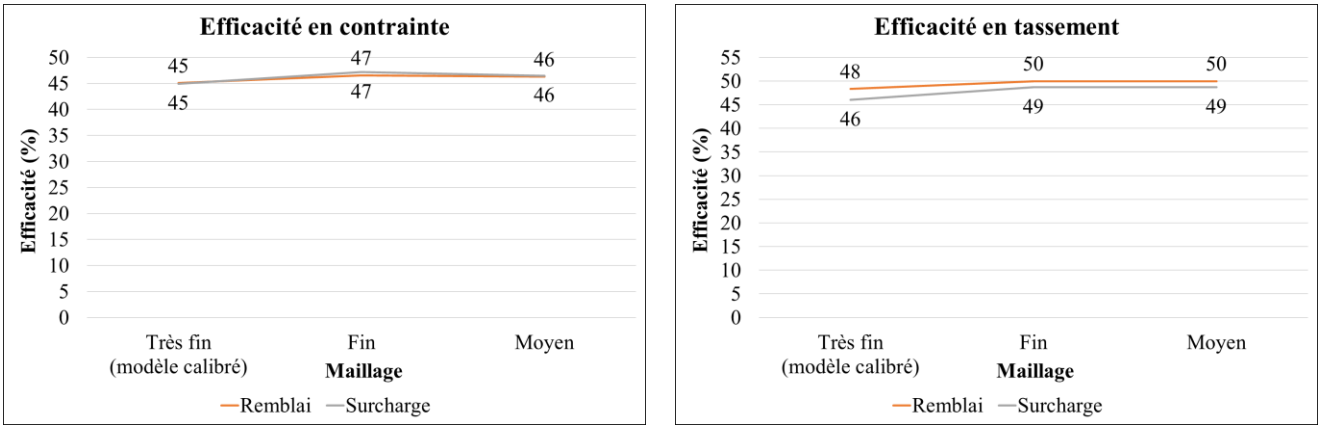



Figure II-98 Evolution des efficacités en fonction du maillage

### II.2.4.7. Interface Deltagom-IR

Dans le modèle calibré, les propriétés de l'interface Deltagom-IR sont identiques à celles du sol adjacent (Deltagom) en les dégradant par un facteur de réduction Rinter. Cette partie vise à déterminer l'influence d'une nouvelle interface sur les efficacités en contrainte et en tassement. Dans ce cas, un matériau est créé et attribué à cette interface avec une loi de comportement de type Mohr-Coulomb en considérant un angle de frottement $\varphi = 0°$ et une cohésion équivalente au frottement latéral unitaire $q_s$ variant de 1 à 20 kPa.

La Figure 2-99 présente l'évolution des efficacités en fonction de $q_s$. Les résultats montrent que le frottement latéral unitaire $q_s$ n'a pas d'influence sur les efficacités. L'interface n'affecte pas les contraintes en tête des IR ce qui entraîne une stabilité de l'efficacité en contrainte avec peu d'impact sur l'efficacité en tassement.

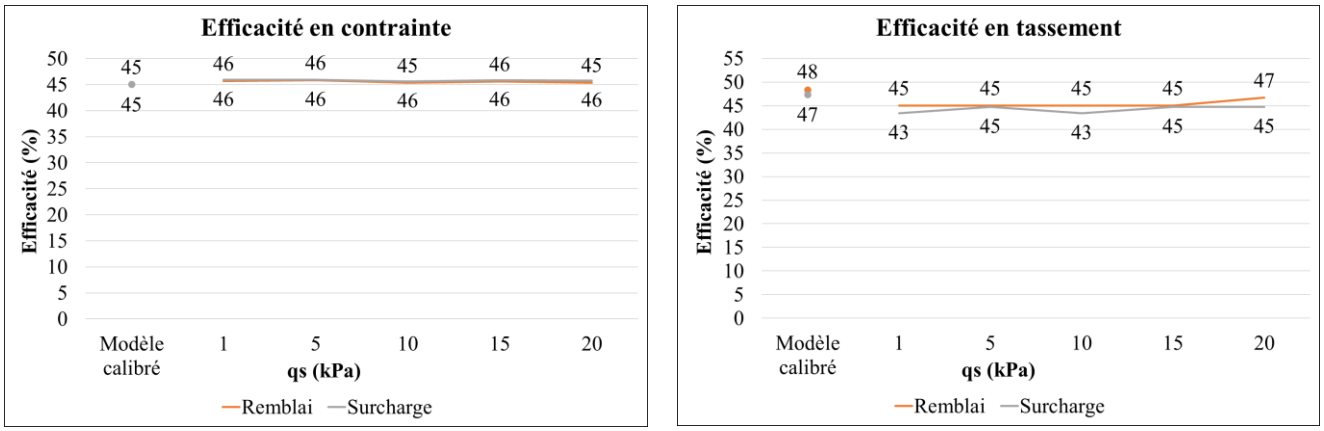



Figure II-99 Evolution des efficacités en fonction de $q_s$



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Cependant, cette nouvelle interface affecte les contraintes en pied des IR. La Figure 2-100 présente l'évolution de la contrainte en pied de l'inclusion en fonction de $q_s$. Les résultats montrent qu'en augmentant le frottement latéral $q_s$, la contrainte augmente en pied de l'inclusion avec des valeurs de contrainte proches de celles mesurées expérimentalement pour une valeur de $q_s$ proche de 20 kPa. Par contre, cette influence reste relativement acceptable où on constate une variation de 11% de contrainte en passant de 1 à 20 kPa.

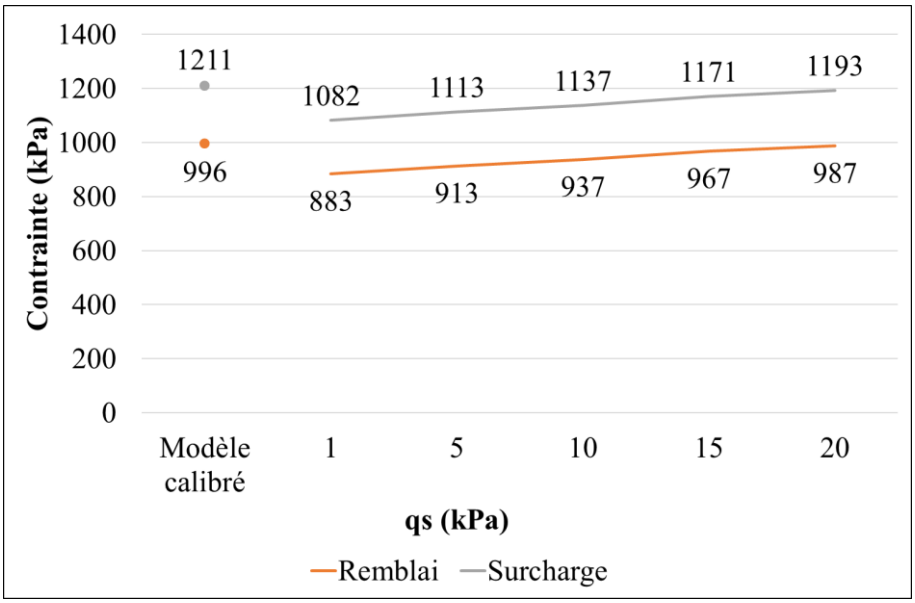



Figure II-100 Evolution de la contrainte en pied de l'inclusion en fonction de $q_s$



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### II.2.5. Conclusions

Un modèle numérique éléments finis a été développé pour représenter deux essais en vraie grandeur réalisés dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen : une PTC granulaire sur IR et une PTC traitée sans plateforme de travail sur IR. Le modèle numérique est 2D axisymétrique et centré autour d'une inclusion rigide.

La confrontation entre les modèles numériques et les essais en vraie grandeur est basée sur plusieurs critères : la contrainte au niveau des têtes et des pieds des inclusions rigides et le tassement au niveau du Deltagom, du sable et de la PTC. La calibration du modèle numérique sur les mesures expérimentales a donné des résultats cohérents avec une incertitude moyenne de 3% en contrainte et 6% en tassement. Elle a montré dans notre essai que les résistances mécaniques obtenues en réalité sont largement inférieures à celles mesurées en laboratoire ce qui nécessite de définir un facteur de sécurité.

Le modèle numérique met en évidence l'importance de modéliser le remblai comme une couche de sol en considérant un phasage similaire à la réalité et non comme une surcharge ce qui permet la formation des mécanismes de transfert de charge par effets de cisaillement dans le remblai ainsi que dans les PTC granulaires et traitées. La répartition de la charge au niveau de la PTC traitée et du sol est vérifiée numériquement et analytiquement ce qui assure la fiabilité du modèle numérique. Les calculs analytiques et numériques mettent en évidence la limitation des mesures des capteurs de pression installés sur la PTC ou sur le sol en comparant avec ceux installés sur les têtes des IR qui donnent des valeurs plus fiables et exactes. Le schéma du cône de cisaillement (ASIRI, 2012) représente le mieux les mécanismes de transfert de charge dans la PTC traitée où la diffusion de la contrainte est assimilée à un tronc de cône d'axe vertical, issu de la tête de l'inclusion et formant un angle φ par rapport à la verticale. Cela a été vérifiée numériquement, analytiquement et expérimentalement. L'évolution du tassement dans le remblai met en évidence la présence d'un plan d'égal tassement à une trentaine de cm au-dessus de la PTC traitée.

Une étude paramétrique a été réalisée pour évaluer l'effet de différents paramètres sur les efficacités en contrainte et en tassement du système. Elle montre que les phases de mise en place du remblai et des surcharges présentent une évolution similaire des efficacités en contrainte et en tassement. La cohésion de la PTC traitée présente le plus grand impact sur les efficacités. Les résultats montrent qu'un bon compactage de la PTC (densité > 96% ρd OPN) entraîne une augmentation qui peut atteindre 33% des efficacités. La qualité du remblai peut avoir également un grand impact sur les efficacités. Les résultats montrent qu'en améliorant les caractéristiques du remblai (cohésion et angle de frottement) on peut augmenter les efficacités en contrainte et en tassement de 18%. Les autres paramètres comme l'épaisseur et le module d'Young de la PTC traitée et les surcharges présentent une plus faible influence sur les efficacités (variation de 10, 3 et 6% respectivement). Le maillage n'a pas d'influence sur les efficacités mais un maillage très fin permet de simuler plus précisément les mécanismes de transfert de charge. Les résultats montrent également que les propriétés de l'interface n'ont pas d'influence sur les efficacités en contrainte, ni en tassement mais affecte les contraintes en pied des inclusions rigides. Les paramètres testés présentent des effets différents sur les efficacités en contrainte et en tassement, cependant, il est important de prendre en compte les effets économiques et environnementales de chaque scénario.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Chapitre III. Plateformes traitées sur IR : Applications réelles

Selon l'état de l'art présenté dans le chapitre 1, aucun essai en vraie grandeur ou ouvrage instrumenté n'a été réalisé sur des plateformes de transfert de charge en sol traité. Ce chapitre est consacré aux applications réelles des PTC traitées sur inclusions rigides, en présentant :

- Deux ouvrages instrumentés :
  - A la centrale nucléaire du Blayais.
  - Sur la route fédérale B247 de Mühlhausen en Allemagne.
- Des essais réalisés sur un site du port HAROPA de Rouen.

L'importance de ces applications est de permettre de surveiller en continu et aider à mieux comprendre le comportement des PTC traitées.

## III.1. Plateforme portuaire (HAROPA)

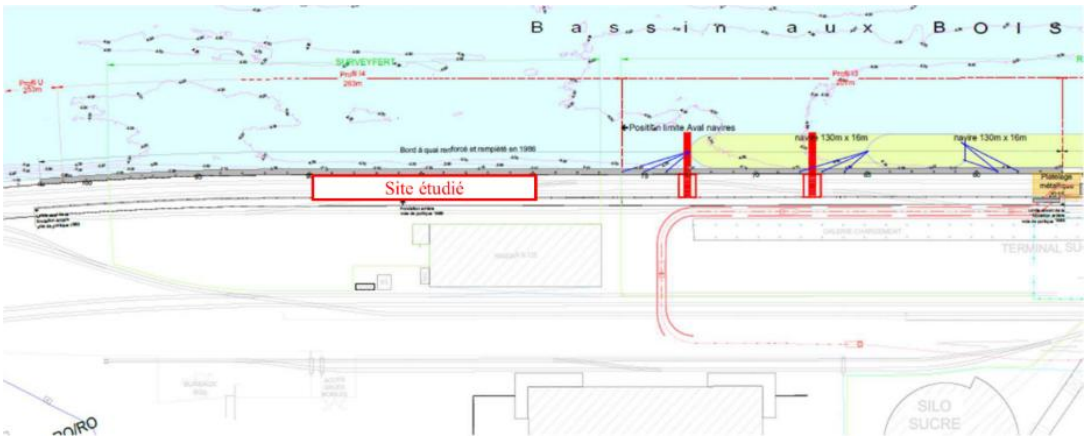
### III.1.1. Description du projet

#### III.1.1.1. Contexte de l'étude

L'ensemble du quai du port HAROPA (voir 1.1.2 Description du site) a été dimensionné avec une surcharge d'exploitation de 2 t/m$^2$. Le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) a souhaité d'augmenter cette surcharge entre 6 et 8 t/m$^2$ pour permettre la circulation d'une grue de type ITALGRUE et la pose d'un patin de grue LHM 400. Dans ce contexte, trois essais en vraie grandeur ont été réalisés dans le port HAROPA dans le cadre du PN ASIRI+, pour tester différents types des PTC sur inclusions rigides soumises à des charges ponctuelles très lourdes (patin de grue de 100 tonnes). L'objectif est de renforcer les quais existants avec ces plateformes pour les nouvelles grues portuaires. L'une des PTC testées est une plateforme en sol traité. Le port HAROPA dispose d'une grande quantité du limon de Dieppe (extrait du même endroit que le sol utilisé pour les essais de Cerema - chapitre 2) pollué par l'arsenic d'où l'intérêt de l'utiliser en tant qu'une PTC traitée au lieu de l'évacuer hors site et de le traiter comme déchet.

#### III.1.1.2. Description du site

Le projet est localisé au droit du Quai Bassin aux Bois, Terminal Sucrier et Céréalier du port de Rouen (parcelle cadastrée LD n°17 à 28), sur la commune du ROUEN (76). Le quai existant est un quai sur pieux bois construit et renforcé sur plusieurs périodes entre les années 1908 et 2005 avec des éléments métalliques ou en béton sur un linéaire de 735 m (Figure 3-1).






Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure III-1 Zone de l'essai

III.1.1.3. Description des essais

Des essais en vraie grandeur ont été réalisés sur le quai du port HAROPA de Rouen pour tester trois types de plateforme sur inclusions rigides dans le but de renforcer les quais existants (Figure 3-2).

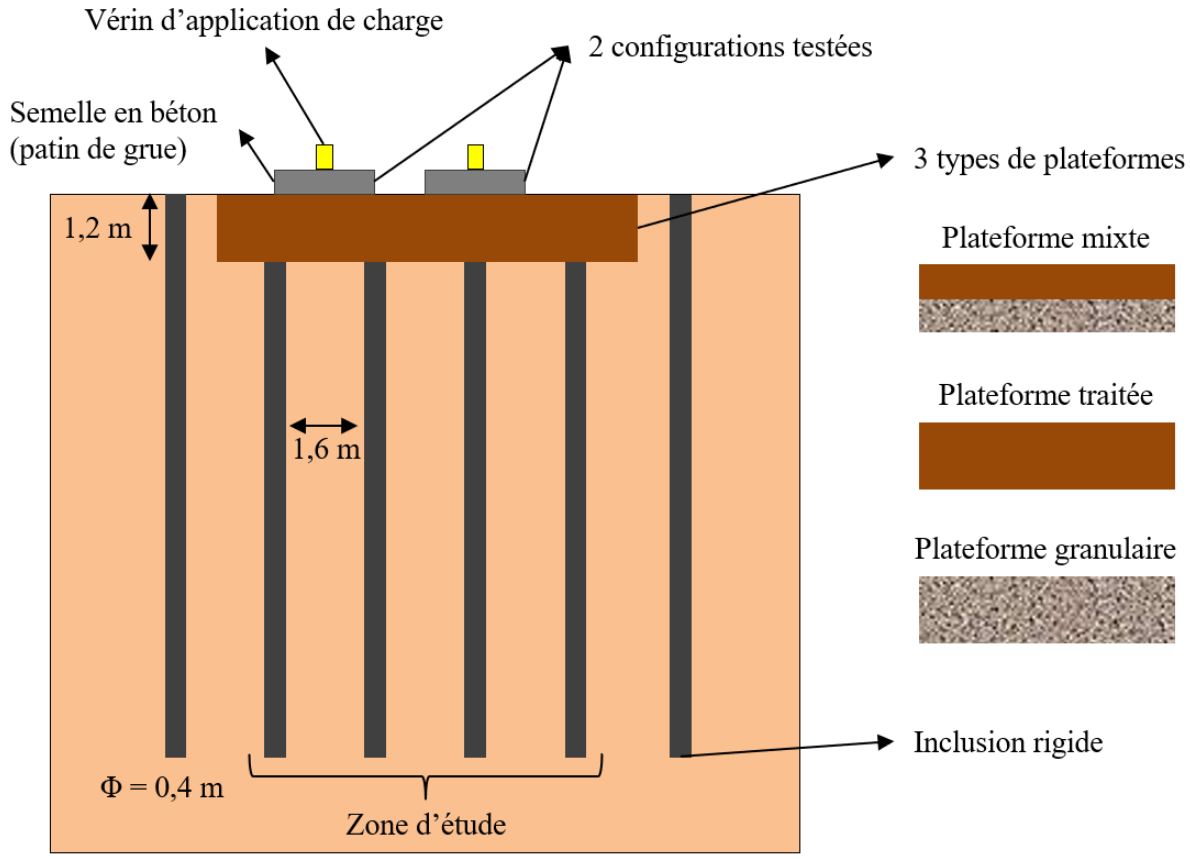



Figure III-2 Plots expérimentaux

Ces plateformes étant soumises à des chargements répétés dus au déchargement des bateaux par des grues portuaires sur patins, des essais de chargement « cyclique » ont été appliqués sur des semelles posées sur chaque plateforme testée. Chaque semelle de 2 x 1,5 x



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

0,4 m représente le patin d'une grue. Deux positions de semelles ont été évaluées : au droit d'une inclusion, entre deux inclusions. Trois plots ont été testés :

- Plot 1 : plateforme mixte de 1,2 m d'épaisseur composée de 60 cm de grave et 60 cm de sol traité pour valoriser les matériaux du port et assurer le non-poinçonnement de la couche traitée en interposant la couche de grave.
- Plot 2 : plateforme en sol traité de 1,2 m d'épaisseur envisagée par HAROPA pour valoriser les matériaux du port.
- Plot 3 : plateforme granulaire de 1,2 m d'épaisseur (principe de base ASIRI).

Les inclusions rigides, réalisés par NGE, sont de 12 m de long, de 40 cm de diamètre et sont inscrites dans un maillage de 1,6 m. Deux configurations (rectangles en pointillés) ont été testées. Ils représentent le cas d'un patin de grue sur une inclusion et entre 2 IR (Figure 3-3).

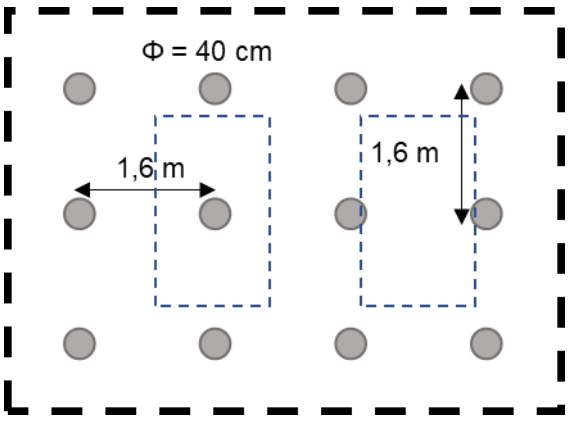



Figure III-3 Implantation des inclusions

## III.1.2. Caractérisation du sol traité

### III.1.2.1. Essais de caractérisation du sol

Le matériau granulaire utilisé pour les essais est une grave naturelle 0-31,5. Le matériau fin traité est le limon de Dieppe (extrait du même endroit que le sol utilisé pour les essais de Cerema – chapitre 2) de type F1. La classification du sol a été basée sur des essais de caractérisation au laboratoire (Tableau 3-1) en référant au « Guide des terrassements routiers, réalisations des remblais et des couches de forme » (GTR 2023).

Tableau III-1 Essais de caractérisation du sol

| Essai | Paramètre | Valeur | Norme |
|---|---|---|---|
| Granulométrie | Tamisat à 63 µm (%) | 45 | NF EN ISO 17892-4 |
| Proctor | $\rho_{d\ OPN}$ (g/cm$^3$) | 1,73 | NF P94-093 |
| | $w_{OPN}$ (%) | 17,75 | NF P94-093 |
| Indice portant immédiat | IPI | 11 | NF P94-078 |
| Limites d'Atterberg | $w_L$ | 30,6 | NF EN ISO 17892-12 |
| | $w_P$ | 22,7 | NF EN ISO 17892-12 |
| | Indice de plasticité Ip | 7,9 | NF EN ISO 17892-12 |
| Bleu de méthylène | VBS | 2 | NF EN 933-9 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

III.1.2.2. Traitement du sol

Un traitement à 7% du ciment CEM III/A 42,5, a été choisi pour les PTC mixtes et traitées. Ce ciment est fourni par l'entreprise EQIOM et composé de 35 à 40% du clinker, 60 à 65% de laitier de haut fourneau et 0 à 5% de constituants secondaires et participe donc à la réduction des émissions de $CO_2$. De plus, ce ciment résiste mieux aux environnements agressifs : salins, séléniteux ou pollués.

La teneur en eau optimale et la densité sèche maximale du sol traité ont été déterminées par des essais Proctor réalisés selon la norme NF P94-093 (Tableau 3-2).

Tableau III-2 Proctor et IPI du sol naturel et traité

| **Paramètre** | **Sol naturel** | **Sol traité** |
|---|---|---|
| $\rho_{d\ OPN}$ (g/cm$^3$) | 1,73 | 1,7 |
| $w_{OPN}$ (%) | 17,75 | 18,75 |
| IPI | 11 | 19 |

L'évolution des performances mécaniques du sol traité à 7 jours de cure, est présentée dans le Tableau 3-3. On constate bien l'effet du traitement sur les résistances mécaniques du sol. Une résistance à la compression à 7 jours de 2,58 MPa est mesurée. La préparation du sol, la modalité de confection et de conservation des échantillons et la réalisation des essais (Essai triaxial, résistance à la compression, flexion et l'essai brésilien/traction indirecte) ont été faites selon les normes françaises déjà mentionnées pour le limon de Dieppe dans le chapitre 2.

Tableau III-3 Evolution des résistances mécaniques du sol traité à 7 jours

| **Paramètres** | **Sol naturel** | **Sol traité** | **Normes** |
|---|---|---|---|
| Angle de frottement | 24,3 | 41,3 | NF P94-070 |
| Cohésion (kPa) | 89 | 257 | NF P94-070 |
| Résistance à la compression (MPa) | 0,34 | 2,58 | NF EN 13286-41 |
| Résistance à la flexion (MPa) | 0,07 | 0,98 | NF EN 196-1 |
| Résistance à la traction (MPa) | 0,03 | 0,14 | NF EN 13286-42 |

## III.1.3. Plots expérimentaux

III.1.3.1. Planche d'essai de traitement du sol

Une planche d'essai de 30 x 6 x 0,3 m du limon traité à 7% du ciment a été réalisée sur site pour vérifier les bonnes performances mécaniques du sol traité (Figure 3-4). Elle a été réceptionnée en portance après 3 jours de cure (mini dynaplaque). L'objectif est d'atteindre un module dynamique EVDyn > 80 MPa. Trois zones d'études ont été testées en variant la teneur en eau (Tableau 3-4) et six essais à la dynaplaque ont été réalisés. Les modules de déformation dynamiques varient de 80 à 150 MPa avec une moyenne de 136 MPa, conforme à l'objectif : EVDyn > 80 MPa.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure III-4 Planche d’essai

Tableau III-4 Organisation de la planche d’essai

| Zone | Teneur en eau après traitement à 7% de ciment (%) | Localisation |
|---|---|---|
| W OPN -2 | 15,9 | Amont |
| W OPN +0 | 18,1 | Centrale |
| W OPN +2 | 19,3 | Aval |

III.1.3.2. Instrumentation des plots

La Figure 3-5 présente le site de l’essai avec l’implantation des inclusions rigides et les quatre barres métalliques installées dans les inclusions du coin (jaunes) et servant de massif de réaction pour la poutre de chargement.

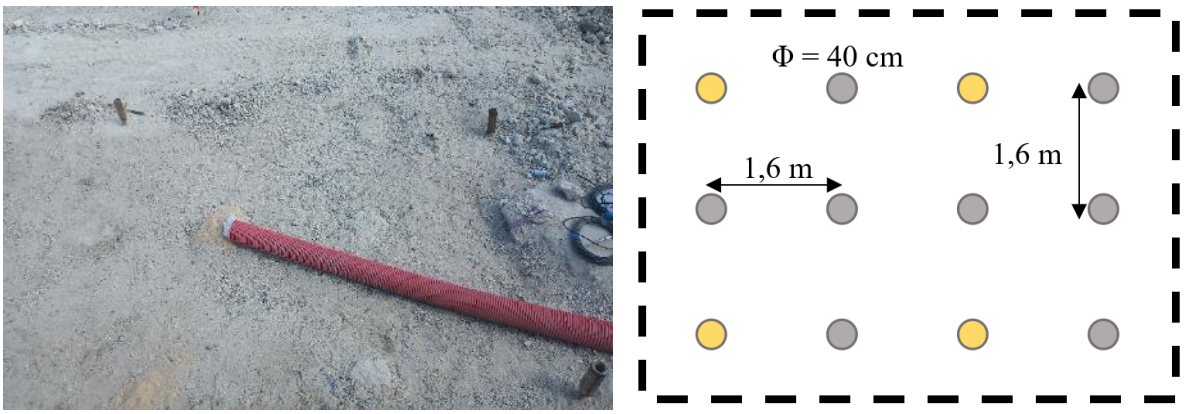



Figure III-5 Site de l’essai



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L’instrumentation a été installée au niveau des inclusions bleues (Figure 3-6). Des capteurs de tassement (T1-T6) et de contrainte (C1-C8) ont été installés au niveau des têtes d’inclusion pour observer le transfert de charge et le tassement du sol.




Figure III-6 Instrumentation du plot.

Des semelles en béton de 2 x 1,5 x 0,4 m ont été utilisées pour représenter les patins de grue sur les plateformes de transfert de charge. Elles ont été instrumentées par des capteurs de déplacement à fil (D1, D2, D3) pour mesurer leur tassement (Figure 3-7).

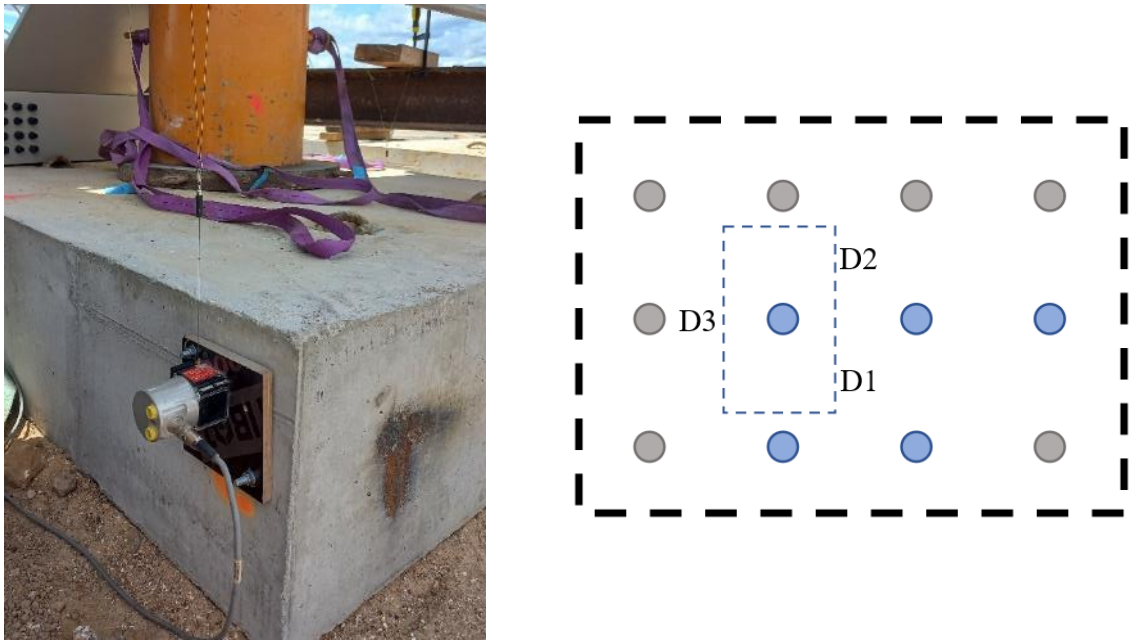



Figure III-7 Instrumentation des semelles de chargement

### III.1.3.3. Plateformes de transfert de charge

#### III.1.3.3.1. Couche de sable

Une couche de sable de 15 cm a été installée au début avec un grillage avertisseur pour protéger les capteurs et les câbles lors de la mise en place des plateformes et leur retrait (Figure



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

3-8). Un premier essai de chargement sur une plateforme granulaire a été réalisé initialement pour solliciter le sol et les inclusions en place avant la réalisation des plots expérimentaux.



Figure III-8 Couche de sable et grillage avertisseur

III.1.3.3.2. Plot 1 : plateforme mixte

Le premier plot a consisté en une plateforme mixte de 1,2 m d'épaisseur formée de 60 cm de grave 0/31,5 mm et 60 cm de sol traité sur inclusions rigides (Figure 3-9).



Figure III-9 Plateforme mixte



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

III.1.3.3.3. Plot 2 : plateforme traitée

Après la réalisation du premier essai, la totalité de la plateforme mixte a été enlevée pour installer une plateforme entièrement traitée avec une épaisseur de 1,2 m (Figure 3-10).



Figure III-10 Plateforme traitée

III.1.3.3.4. Plot 3 : plateforme granulaire

Finalement, la plateforme traitée a été enlevée pour mettre en place une plateforme granulaire de 1,2 m d'épaisseur formée de grave 0/31,5 mm.

Des essais à la dynaplaque ont été réalisés pour les trois plateformes pour vérifier la portance et les modules dynamiques mesurés sont conformes à l'objectif : EVDyn > 80 MPa.

III.1.3.3.5. Traitement du sol

Le traitement du limon à 7% du CEM III/A 42,5 N, a été réalisé à côté du site et puis le sol traité a été transporté au niveau du plot pour la mise en place et le compactage des plateformes mixtes et traitées (Figure 3-11).




Figure III-11 Différentes phases du traitement du sol



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

III.1.3.4. Chargement

Un système poutre/vérin a été utilisé pour l'application de la charge (Figure 3-12)

1 : Indicateur de déformation portable (contrôle la charge)

2 : Machine hydraulique (contrôle le mouvement du vérin)

3 : Vérin de force creux hydraulique

4 : Capteur de force 5t

5 : Poutre

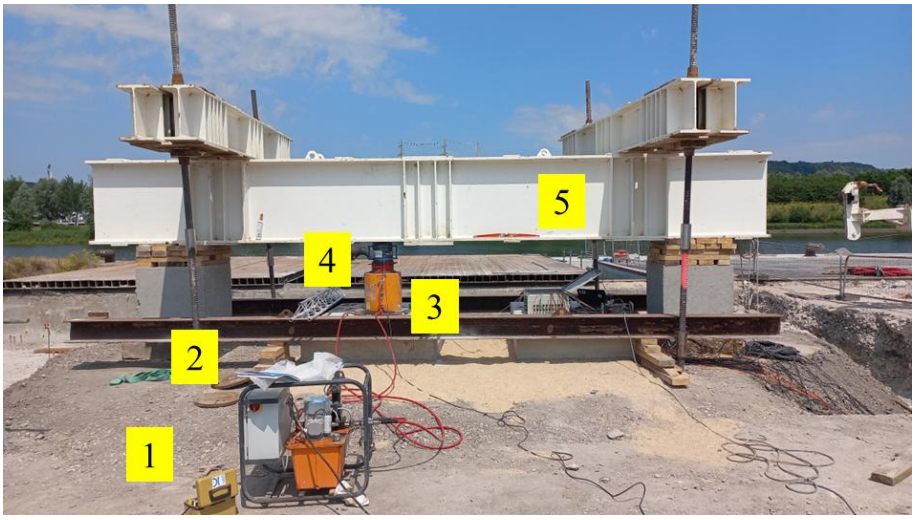



Figure III-12 Système poutre/vérin pour l'application de la charge

La charge a été appliquée sous forme des cycles de 55 tonnes et 110 tonnes représentant l'état de chargement (≈15 mins) et de déchargement (≈5 mins) des bateaux sur le port (Figure 3-13).

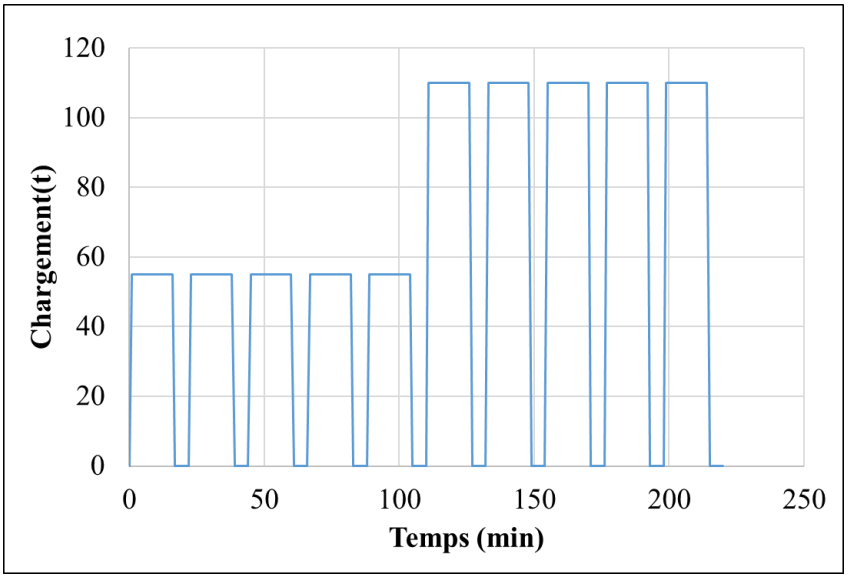



Figure III-13 Cycles de chargement



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## III.1.4. Résultats : 1ère configuration

Cette partie présente les résultats concernant la 1ère configuration (semelle au-dessus d'une inclusion rigide) pour les trois plateformes.

### III.1.4.1. Etude des tassements

#### III.1.4.1.1. Tassement de la semelle

Le tassement moyen de la semelle, mesuré à partir des capteurs de déplacement à fil est présenté à la Figure 3-14. On constate que le tassement de la semelle est le plus important dans le cas de la plateforme granulaire. Pendant les premiers cycles à 55 tonnes, le tassement est relativement faible (≈3 mm), puis augmente pour les cycles à 110 tonnes pour atteindre 14 mm. On note cependant que ce tassement commence à se stabiliser avec les cycles. Cette étude se concentre donc sur le comportement à court terme des différentes plateformes sous chargement cyclique.

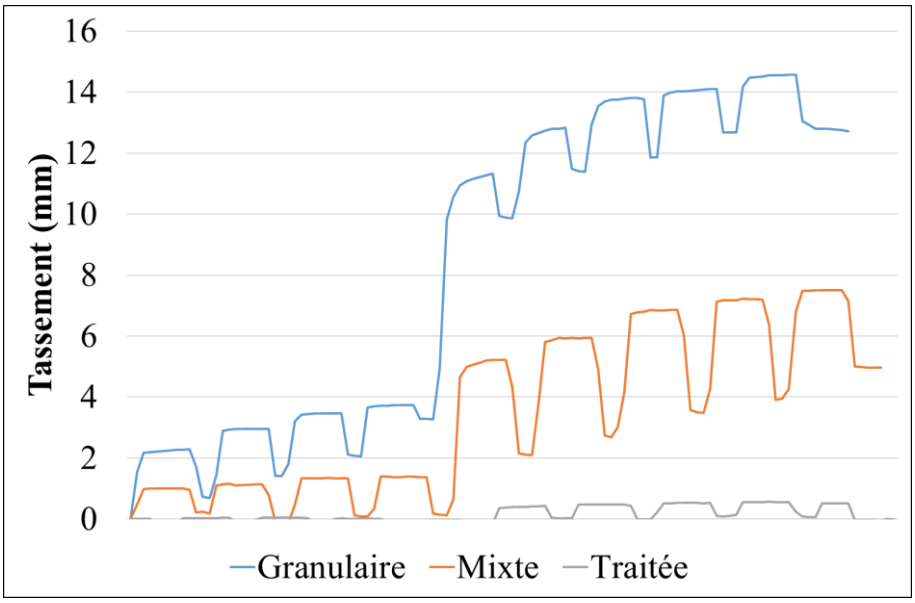



Figure III-14 Tassement de la semelle/1ère configuration

Le tassement de la semelle est moins important pour la plateforme mixte, avec des tassements moyens variant de 1 mm à 6 mm pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement. Enfin, la plateforme traitée a montré les meilleurs résultats en termes de tassement de la semelle à court terme. Aucun tassement n'est observé pendant les cycles à 55 tonnes avec un tassement négligeable (≈0,5 mm) pour les cycles à 110 tonnes.

Pour mieux observer et comparer le comportement des plateformes, le tassement de la semelle est présenté en fonction de la contrainte au niveau de l'inclusion située juste en-dessous (Figure 3-15).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

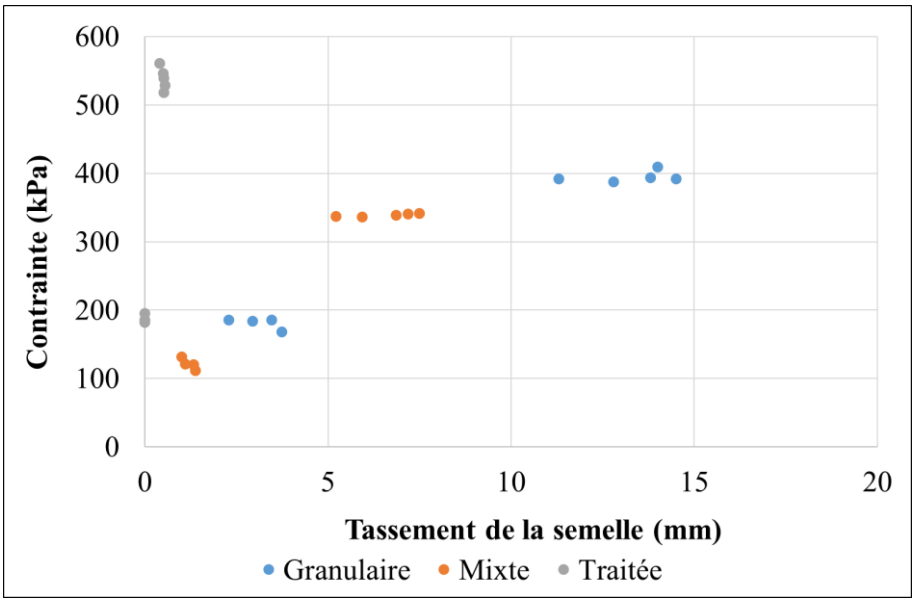



Figure III-15 Comportement des plateformes/1ère configuration

Les mesures montrent que pour la plateforme granulaire, il y a un bon report de charge au niveau de l'inclusion pendant les 1ers cycles (≈200 kPa). Cependant, on constate que le tassement de la semelle augmente avec chaque cycle de chargement. Ce comportement est mieux observé pour les cycles à 110 tonnes où le tassement augmente de 11 à 15 mm. Ce comportement peut être assimilé à une dégradation superficielle de la PTC.

La plateforme mixte présente un plus faible report de charge sur l'inclusion centrale pendant les cycles à 55 tonnes (≈120 kPa) et un meilleur comportement vis-à-vis du tassement de la semelle où on remarque un tassement constant (≈1 mm). Ce comportement change pour les cycles à 110 tonnes où on remarque de nouveau une augmentation du tassement avec chaque cycle de chargement.

La plateforme traitée présente les meilleurs résultats de tassement et de report de charge avec des contraintes proches de 200 et 550 kPa pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement. On remarque de plus qu'il n'y a pas de tassement pour les premiers cycles et un faible tassement constant (≈0,5 mm) pour les cycles à 110 tonnes.

#### III.1.4.1.2. Tassement du sol

Le tassement au niveau du sol et des têtes des inclusions rigides est mesuré à partir des capteurs de tassement installés sous les plateformes. Un tassement négligeable global est mesuré pour les 3 plateformes avec un maximum de ≈3 mm pour le matelas granulaire et ≈1,5 mm pour le matelas mixte et pas de tassement pour la plateforme traitée.

### III.1.4.2. Etude des mécanismes de transfert de charge

#### III.1.4.2.1. Répartition de la charge

Le report de charge au niveau de l'inclusion rigide située sous la semelle (1ère configuration) est présenté à la Figure 3-16. On constate que dans le cas d'une plateforme granulaire et traitée, l'inclusion rigide est plus chargée que dans le cas d'une plateforme mixte pour les cycles de 55 tonnes (≈200 kPa pour les matelas granulaires et traités et ≈120 kPa pour



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

le matelas mixte). Pour des cycles de 110 tonnes, c'est la plateforme traitée qui transfère plus la charge (≈550 kPa) en comparant avec les plateformes granulaires et mixtes (≈400 kPa et ≈340 kPa respectivement).

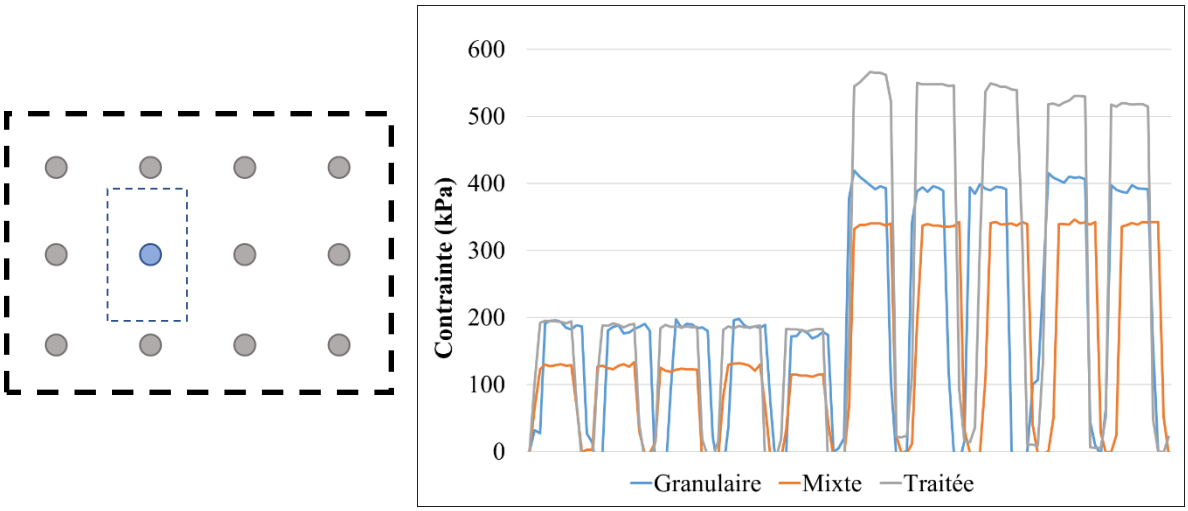



Figure III-16 Report de charge

La répartition de la charge sur les inclusions rigides pour la 1ère configuration dans le cas de la PTC traitée est présentée à la Figure 3-17. On remarque que pour une charge appliquée, ce sont les inclusions rigides proches du point d'application, qui reprennent la charge avec un transfert de charge très négligeable vers les inclusions un peu plus éloignées. Les trois plateformes présentent un comportement similaire en ce qui concerne la distribution de la charge sur les inclusions rigides, mais la répartition de la charge est plus homogène dans le cas de la plateforme traitée.

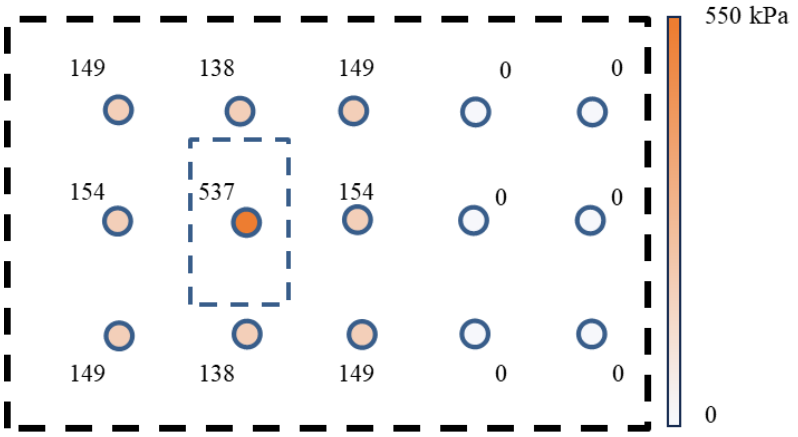



Figure III-17 Répartition de la charge

### III.1.4.2.2. Efficacité

L'efficacité du système consiste à calculer la charge totale dans la zone jaune et la part de cette charge reprise par les inclusions rigides (Figure 3-18). Les inclusions bleues sont les inclusions instrumentées, la contrainte sur les autres inclusions dans la zone jaune est supposée la même par symétrie. On remarque que même si l'inclusion C2 reprend plus de charge dans le



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

cas d'une plateforme granulaire, l'efficacité de la plateforme mixte est supérieure que celle de la plateforme granulaire du fait d'une meilleure répartition des charges sur les autres inclusions. La plateforme traitée présente la meilleure efficacité (≈7 et ≈12% pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement).

Cependant, ces efficacités restent relativement faibles, ce qui est normal pour un essai de courte durée (temps insuffisant pour la consolidation du sol, la cure de la plateforme traitée et la formation des mécanismes de transfert de charge dans la plateforme granulaire …).

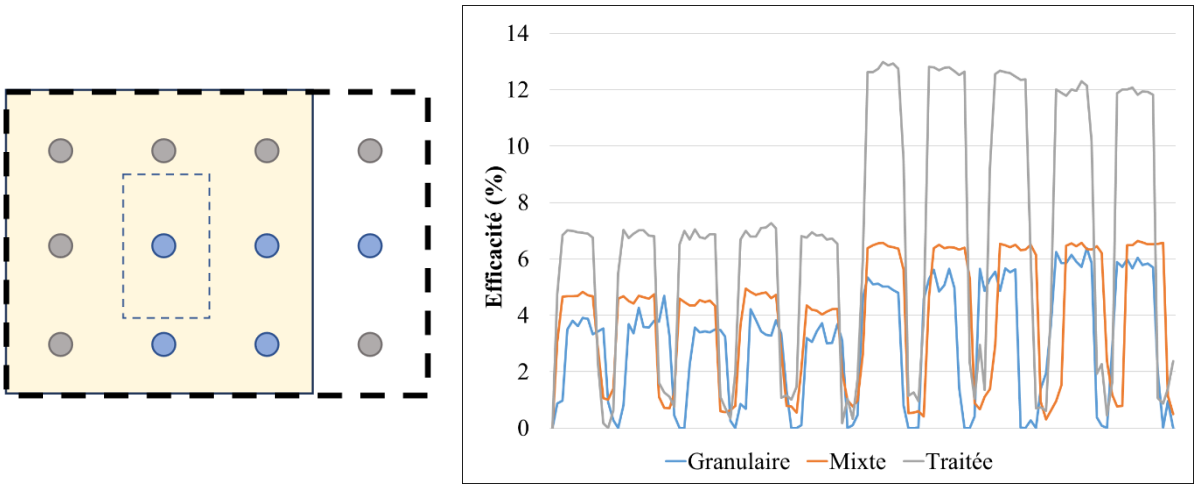



Figure III-18 Efficacité globale/1ère configuration

## III.1.5. Résultats : 2ème configuration

Cette partie présente les résultats concernant la 2ème configuration (semelle entre deux inclusions rigides) pour les trois plateformes.

### III.1.5.1. Etude des tassements

#### III.1.5.1.1. Tassement de la semelle

Les mesures des tassements moyens de la semelle (Figure 3-19) montrent que le tassement des trois plateformes est négligeable pour les cycles à 55 tonnes (≈1 mm). Le tassement devient plus important pour les cycles à 110 tonnes et c'est la plateforme granulaire qui tasse le plus (comportement similaire à celui de la 1ère configuration) avec un tassement moyen de 9 mm. Les plateformes traitées et mixtes présentent un tassement moins important (≈6 mm et ≈2,5 mm respectivement). Ce tassement reste relativement négligeable et le même comportement des plateformes est observé pour les deux configurations.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

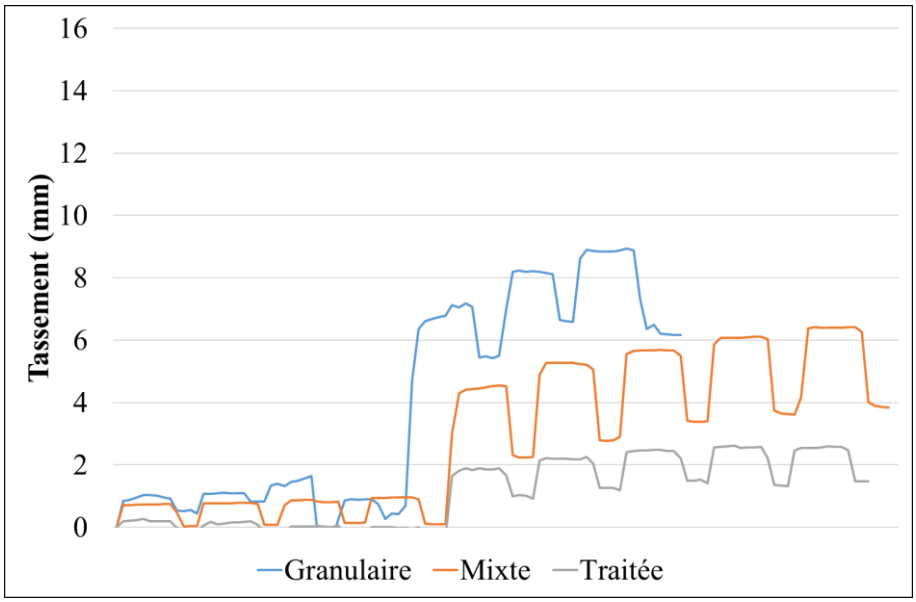



Figure III-19 Tassement de la semelle/2ème configuration

Pour mieux observer le comportement des plateformes, le tassement de la semelle est présenté en fonction de la contrainte moyenne des deux inclusions juste en-dessous (Figure 3-20).

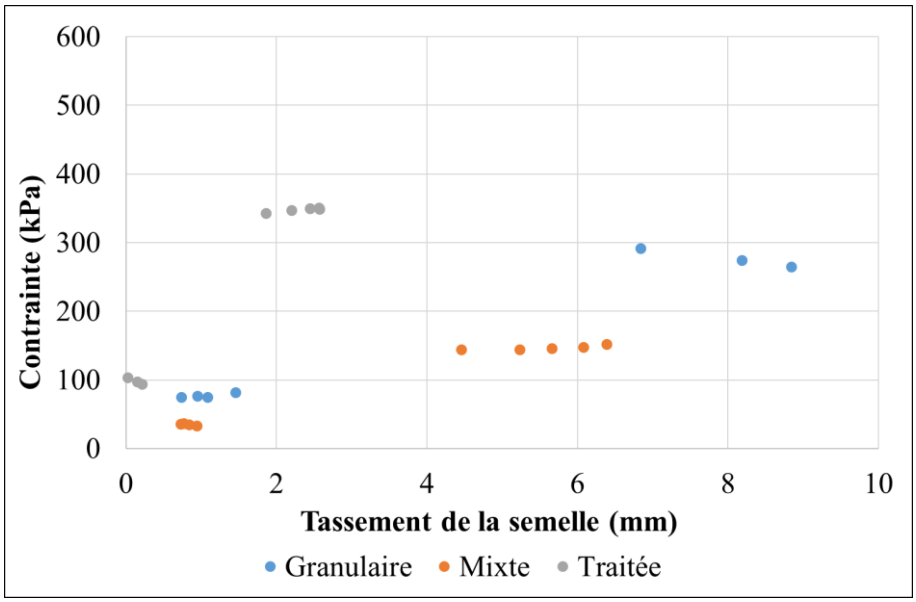



Figure III-20 Comportement des plateformes/2ème configuration

Les mesures montrent un comportement similaire à celui des plateformes pour la 1ère configuration. Pour les cycles à 55 tonnes, la plateforme traitée présente le report de charge le plus important (≈100 kPa) avec un tassement négligeable stable. Les plateformes granulaires et mixtes présentent un report de charge moins important (≈74 kPa et ≈36 kPa respectivement) avec un tassement constant pour la plateforme mixte (≈ 1mm) et un tassement qui augmente légèrement pour la plateforme granulaire avec chaque cycle de chargement.

Pour les cycles à 110 tonnes, la plateforme traitée présente toujours le meilleur report de charge (≈350 kPa) avec une augmentation légère du tassement qui maintient une valeur



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

stable pendant les cycles de chargement (≈2 mm). L'augmentation du tassement est plus évidente pour les plateformes mixtes et granulaires. Pour un report de charge (≈290 kPa) le tassement de la semelle augmente de 7 mm jusqu'à 9 mm pour la plateforme granulaire. Par ailleurs, la plateforme mixte présente un report de charge moins important (≈150 kPa) avec une augmentation de tassement de 4,5 mm jusqu'à 6,5 mm.

Le comportement des plateformes granulaires et mixtes peut être assimilé à une dégradation superficielle de la PTC. Malheureusement, c'est impossible de vérifier le comportement à long terme de ces plateformes (impossible d'effectuer plus de cycles de chargement) en raison des contraintes de temps, des coûts et des ressources disponibles pour cet essai.

#### III.1.5.1.2. Tassement du sol

Le tassement au niveau du sol et des têtes des inclusions rigides est mesuré à partir des capteurs de tassement installés sous les plateformes. Un tassement négligeable global est mesuré pour les 3 plateformes (similaires aux résultats de la 1ère configuration) avec un tassement maximal de ≈2 mm.

### III.1.5.2. Etude des mécanismes de transfert de charge

#### III.1.5.2.1. Répartition de la charge

Le report de charge des trois plateformes (Figure 3-21) est représenté par la contrainte moyenne des contraintes mesurées sur les deux inclusions sous la semelle (2ème configuration). Le comportement des plateformes est pareil que celui de la 1ère configuration où la plateforme traitée présente le meilleur report de charge (≈100 kPa et ≈350 kPa) pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement. Le report de charge de la plateforme granulaire est très proche que celui de la plateforme traitée pour les cycles à 55 tonnes avec un report moins important pour les cycles à 110 tonnes (≈275 kPa). Finalement, la plateforme mixte présente le report de charge le plus faible (≈35 kPa et ≈140 kPa) pour les cycles à 55 et 110 tonnes respectivement.

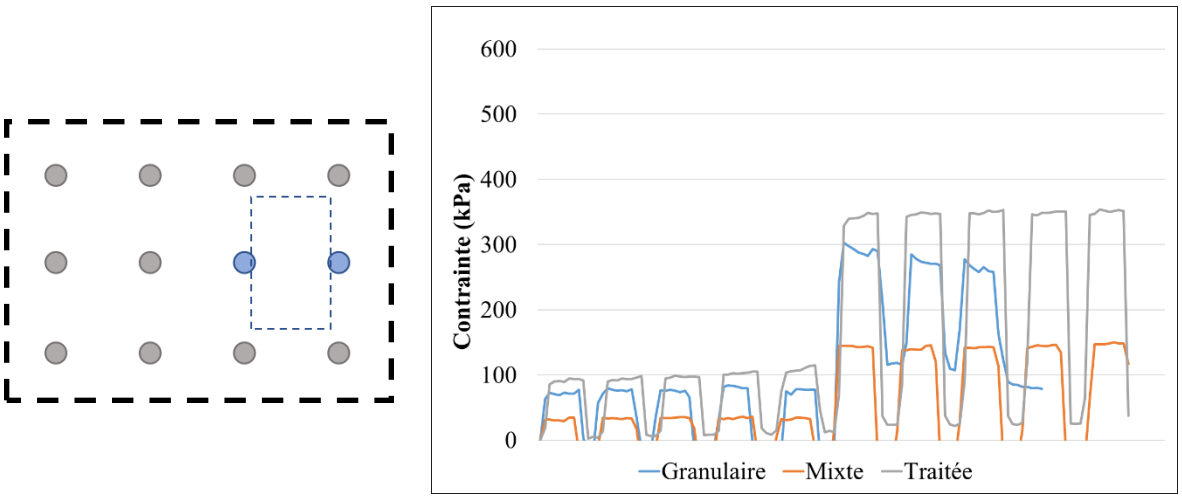



Figure III-21 Report de charge/2ème configuration



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

La répartition de la charge pour la plateforme traitée sur les inclusions rigides pour la 2ème configuration (Figure 3-22) est identique que celle pour la 1ère configuration, les inclusions rigides proches du point d'application de charge, reprennent plus la charge avec un transfert de charge très négligeable vers les inclusions un peu plus éloignées.

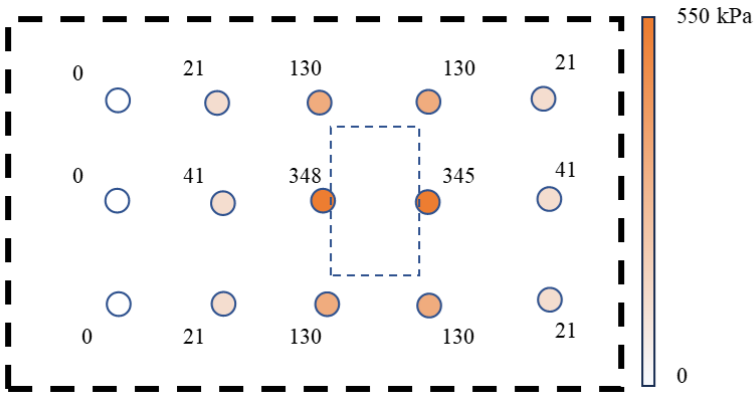



Figure III-22 Répartition de la charge

### III.1.5.2.2. Efficacité

L'efficacité du système est calculée pour la 2ème configuration (Figure 3-23). Les mesures montrent des efficacités proches que celle de la 1ère configuration avec la plateforme traitée qui présente toujours la meilleure efficacité. Les efficacités des trois plateformes restent relativement faibles, pareils que pour la 1ère configuration, ce qui est normal pour un essai de courte durée.

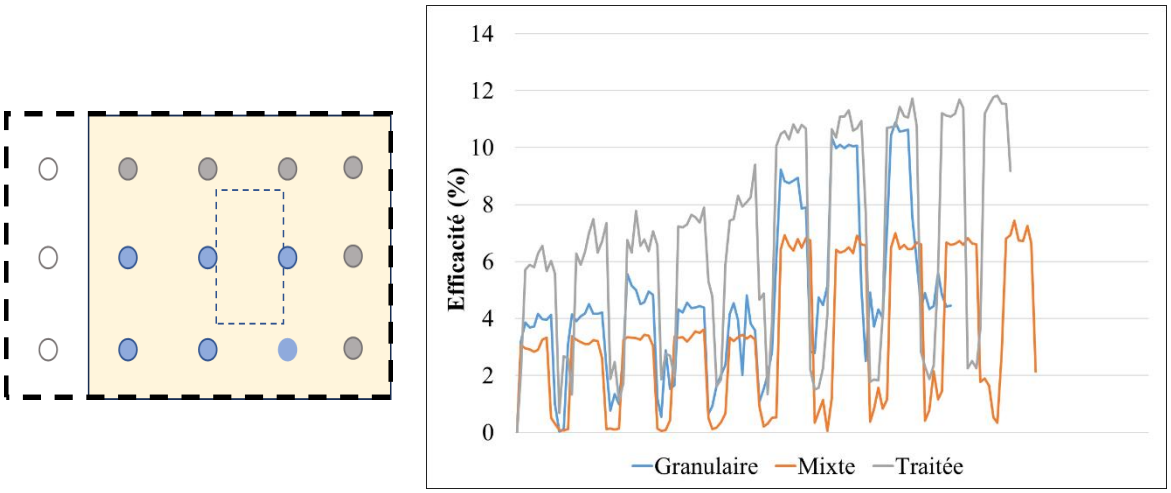



Figure III-23 Efficacité globale/2ème configuration



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### III.1.6. Conclusions

Dans le cadre du PN ASIRI+, trois essais en vraie grandeur sont réalisés dans le port HAROPA de Rouen pour tester l'efficacité de différents types des plateformes de transfert de charge (PTC) sur inclusions rigides soumises à des charges ponctuelles très lourdes (Patin de grue de 100 tonnes). L'objectif est de renforcer les quais existants avec ces plateformes pour les nouvelles grues portuaires.

- Plateforme mixte grave/sol traité
- Plateforme traitée
- Plateforme granulaire

Les plateformes de transfert de charge sont de 1,2 m d'épaisseur, compactées pour atteindre un module dynamique à la dynaplaque : EVDyn > 80 MPa. Les inclusions de 400 mm de diamètre sont inscrites dans un maillage carré de 1,6 m de côté. Des capteurs de tassement et des capteurs de pression sont installés sous la plateforme pour observer les mécanismes de transfert de charge. Deux positions de la semelle simulant le patin de grue sont testées.

Le sol utilisé pour la plateforme traitée est du limon peu plastique traité à 7% du ciment CEM III/A 42,5 N. La charge est appliquée à l'aide d'un système poutre/vérin sous forme des cycles de 55 tonnes et 110 tonnes représentant l'état de chargement et de déchargement des bateaux sur le port.

Les essais montrent que le traitement choisi est suffisant pour atteindre les résistances mécaniques souhaitées. Les modules dynamiques obtenus sur la planche d'essai et sur les différentes plateformes sont conformes à l'objectif d'un EVDyn supérieur à 80 MPa, ce qui indique que les plateformes sont bien installées et répondent aux critères et aux exigences requis.

Un tassement négligeable est observé au niveau du sol et des têtes des IR pour les différentes plateformes mettant en évidence le bon fonctionnement du système et les mécanismes de transfert de charge au niveau des différentes PTC. Une dégradation superficielle de la PTC est observée pour les plateformes granulaires et mixtes avec une augmentation du tassement de la semelle avec chaque nouveau cycle de chargement. Ce comportement n'est pas observé pour la plateforme traitée.

La plateforme traitée présente le meilleur report de charge et la meilleure efficacité en tête des inclusions rigides. Par contre, l'efficacité globale des trois plateformes reste relativement faible, due à la grande épaisseur des PTC et à la rapidité des chargements ne permettant pas au sol compressible de consolider.

Cette étude, qui se concentre sur le comportement à court terme des différentes PTC sur IR sous chargement cyclique, présente un intérêt pour l'utilisation des plateformes en sol traité, qui offrent des avantages en termes de tassement, de report de charge et d'efficacité. Cependant, il est nécessaire de tester ces plateformes à long terme pour évaluer l'effet de la fatigue sur l'efficacité et le comportement des PTC et l'absence du comportement singulier notamment vis-à-vis du poinçonnement des PTC traitées en tête d'inclusion.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## III.2. Remblai routier sur IR en Allemagne

### III.2.1. Contexte

Un projet de construction (B247 – Mühlhausen) a été réalisé en Allemagne par VINCI Highways. Il s'agit de construction et d'élargissement de la route fédérale B247 qui reliera les villes de Mühlhausen et Bad Langensalza, dans Thuringe. Environ 15 000 véhicules par jour devraient emprunter la nouvelle route, dont environ 15% de poids lourds.

Le projet représente un investissement de 500 millions d'euros, dont environ 350 millions d'euros pour la phase de construction et couvre la conception, le financement, la construction, l'entretien et l'exploitation d'une nouvelle route fédérale de 22 km de long de deux à quatre voies, avec deux contournements, 31 ouvrages d'art dont deux ponts, 5 ponts ferroviaires et 8 jonctions, ainsi qu'environ 6 km additionnels de routes publiques et fédérales (Figure 3-25 extrait du Système d'information sur les projets (PRINS) pour le plan fédéral des voies de communication 2030).

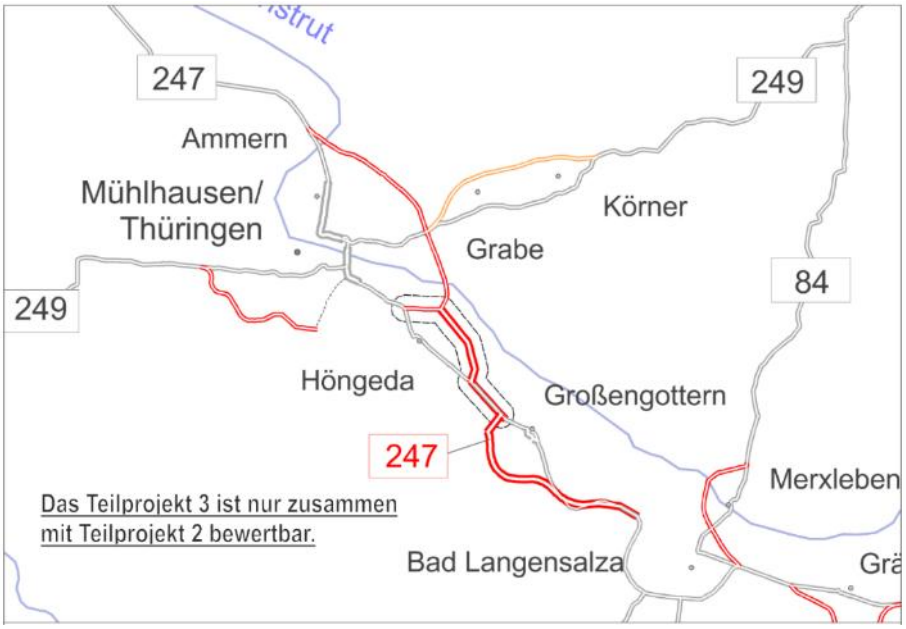



Figure III-24 B247- Mühlhausen

Ce projet contient de nombreux remblais et des plateformes traitées sur inclusions rigides où un de ces remblais (BW12) a été instrumenté par des capteurs de pression pour observer les mécanismes de transfert de charge. L'objectif est de solliciter énormément les inclusions rigides pour qu'ils prennent plus de 90% des charges appliquées en surface.

Une coupe transversale du remblai (BW12) montre que le sol est renforcé par des inclusions rigides de 32 cm de diamètre, inscrites dans un maillage de 1,5 m (Figure 3-25). La plateforme de transfert de charge (jaune foncé) est de 2 m d'épaisseur et formée du lœss traité à 5% du Varilith TF1 (mélange de 70% ciment et 30% chaux). Un remblai (jaune claire) formé du lœss traité à 3% du Varilith TF1 est aussi installé jusqu'au niveau de la route. Le renforcement de sol a été réalisé par Ménard et l'instrumentation par le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et UGE.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

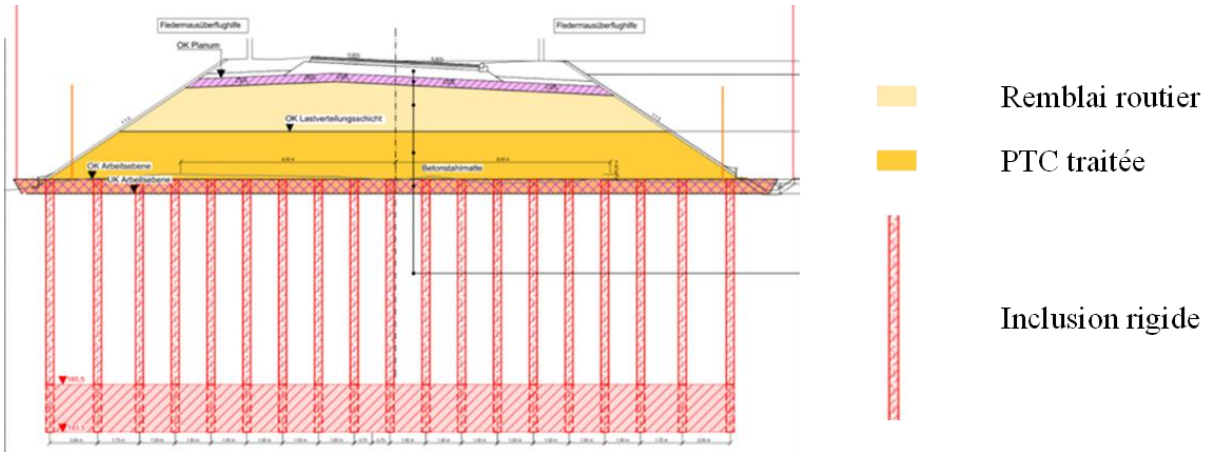



Figure III-25 Remblai BW12

## III.2.2. Caractérisation du sol traité

Le sol utilisé pour la plateforme traitée et le remblai est du lœss. Le tableau 3-5 présente les caractéristiques du lœss non traité et traité à 3 et 5% du Varilith TF1.

Tableau III-5 Essais de caractérisation du sol traité et non traité

| Essai | Paramètre | lœss | lœss traité à 3% | lœss traité à 5% |
|---|---|---|---|---|
| Proctor | $\rho_{d\ OPN}$ (g/cm$^3$) | 1,8 | 1,74 | 1,74 |
| | $w_{OPN}$ (%) | 16 | 16,6 | 17 |
| Résistance à la compression | Rc 7 (MPa) | - | 1,24 | 1,74 |
| | Rc 14 (MPa) | - | 1,46 | 2,09 |
| | Rc 28 (MPa) | - | 1,83 | 2,55 |
| Résistance au cisaillement | Φ (°) | 25,9 | - | - |
| | Φ 7j (°) | - | 34,6 | 41,3 |
| | Φ 28j (°) | - | 30,6 | 37,3 |
| | Cohésion (kPa) | 59 | - | - |
| | Cohésion 7j (kPa) | - | 272 | 242 |
| | Cohésion 28j (kPa) | - | 500 | 427 |

## III.2.3. Mise en œuvre et instrumentation

La mise en place de la plateforme traitée (zone jaune foncé de la Figure 3-25) est présentée en détail par le schéma de la Figure 3-26. Au-dessus des inclusions rigides, il y a une plateforme de travail granulaire d'environ 15 cm. Cette couche permet de rendre tout le sol au même niveau et protéger les capteurs et les têtes des inclusions rigides.

Le traitement du sol se fait par plusieurs couches pour assurer le bon compactage de la plateforme. Une première couche de 20 cm a été traitée en déblai, transportée au site et compactée par un compacteur léger. Des treillis métalliques ont été ensuite installés sur cette couche pour augmenter la résistance en traction de la plateforme. Deux autres couches de 20 cm ont été ensuite installées et l'ensemble est laissé pendant 7 jours de cure avant la poursuite des travaux de traitement.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Ensuite, une 4ème couche traitée de 35 cm a été installée. A partir de cette phase, le traitement en place et l'utilisation des compacteurs lourds ont été autorisés. Une 5ème couche traitée de 35 cm a été alors installée et l'ensemble a été laissé pendant 7 jours de cure.

Finalement, deux couches de sol traité de 35 cm ont été installées pour avoir une plateforme finale de 2 m d'épaisseur. Cette plateforme a été laissée encore une fois pendant 7 jours de cure avant chargement.

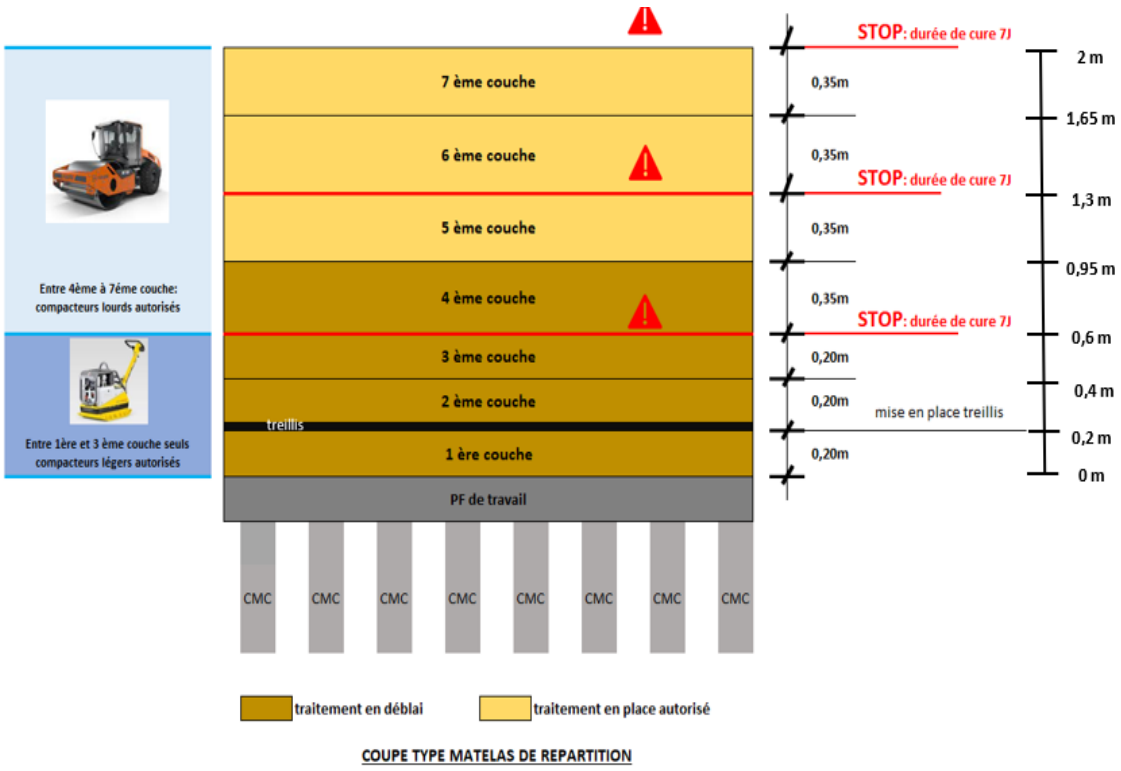



Figure III-26 Mise en place de la plateforme traitée

L'instrumentation a eu lieu dans deux zones identiques à différents endroits du site du BW12 (Figure 3-27). Ces deux zones présentent les mêmes caractéristiques : nombre, diamètre et maillage des inclusions rigides, une PTC traitée de 2 m d'épaisseur mais des remblais routiers de hauteurs différentes.



Figure III-27 Renforcement du sol par inclusions rigides



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L’objectif de cette instrumentation est de vérifier le comportement du système à différents endroits du site. Dans chaque zone, un capteur de pression circulaire de même section que celle de l’inclusion a été placé au droit d’une inclusion rigide, un capteur de pression annulaire a été placé autour de l’inclusion permettant de mesurer le transfert de charge à proximité et un capteur carré a été installé entre les inclusions pour mesurer la contrainte sur sol (Figure 3-28).



Figure III-28 Instrumentation par des capteurs de pression

Les capteurs sont connectés à une centrale d’acquisition « DATATAKER DT85 GM » sur des voies préalablement configurées afin de récupérer les données des différents capteurs. La centrale est connectée à un panneau solaire et une batterie pour assurer son fonctionnement (Figure 3-29).



Figure III-29 Centrale d’acquisition



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### III.2.4. Résultats

Les travaux de construction ont démarré en aout 2023. Certaines difficultés liées à l'éloignement du chantier et aux contacts locaux n'ont pas permis de disposer de mesures en continu pendant la phase de construction. Les mesures ont été suivies pendant plus qu'un an sur les deux zones instrumentées.

#### III.2.4.1. Zone 1

L'évolution des contraintes dans la zone 1 est présentée à la Figure 3-30. Les résultats montrent un transfert de charge important au droit de l'inclusion rigide avec une plus faible contrainte autour de l'inclusion et une contrainte négligeable sur le sol. Dans cette zone, la charge totale peut être calculée au niveau d'une maille élémentaire (s = 1,5 x 1,5 = 2,25 $m^2$) à travers les paramètres présentés dans le Tableau 3-6.

Tableau III-6 Paramètres du remblai routier - zone 1

| Paramètre | Plateforme de transfert de charge | Remblai |
|---|---|---|
| Hauteur (m) | 2 | 3,5 |
| $\gamma$ ($kN/m^3$) | 20 | 20 |

A partir de toutes ces données, on obtient une charge totale de 247,5 kN sur une maille élémentaire. La contrainte mesurée au droit d'une inclusion avoisine le 1600 kPa, donnant une charge de 129 kN, correspondant à une efficacité de 52%. L'objectif de ce renforcement de sol était de transférer plus de 90% de la charge sur les têtes des inclusions rigides, ce qui n'a pas été mesuré directement sur les têtes. Cependant, la contrainte de 175 kPa mesurée par le capteur annulaire de 10 cm de large correspond à une charge supplémentaire de 23 kN amenant l'efficacité à 61%. Notons enfin que pour des raisons de niveau des têtes des inclusions, une couche de gravier de 15 cm d'épaisseur a été rajoutée sur les têtes des inclusions avant de mettre en œuvre la plateforme en sol traité. La présence de cette couche granulaire peut expliquer la différence de contrainte attendue et mesurée sur les têtes des inclusions.

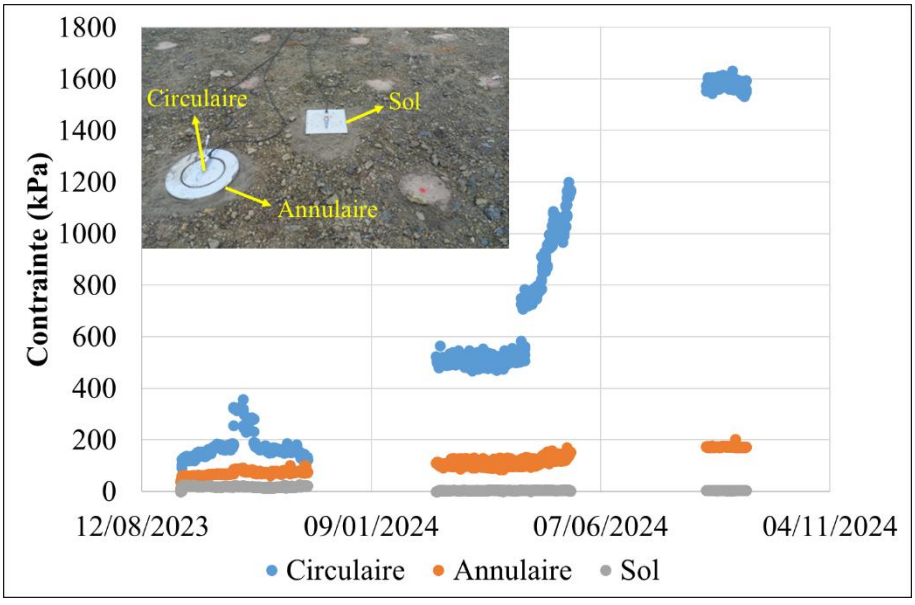



Figure III-30 Evolution des contraintes – zone 1



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

III.2.4.2. Zone 2

L'évolution des contraintes dans la zone 2 est présentée à la Figure 3-31. Dans cette zone on ne dispose pas de la hauteur exacte du remblai, ce qui ne nous permet pas de calculer l'efficacité du renforcement de sol. Cependant, on constate des similarités par rapport à la zone 1 : un bon report de charge sur les têtes des inclusions, une contrainte non négligeable à proximité des inclusions et une contrainte très faible sur le sol.

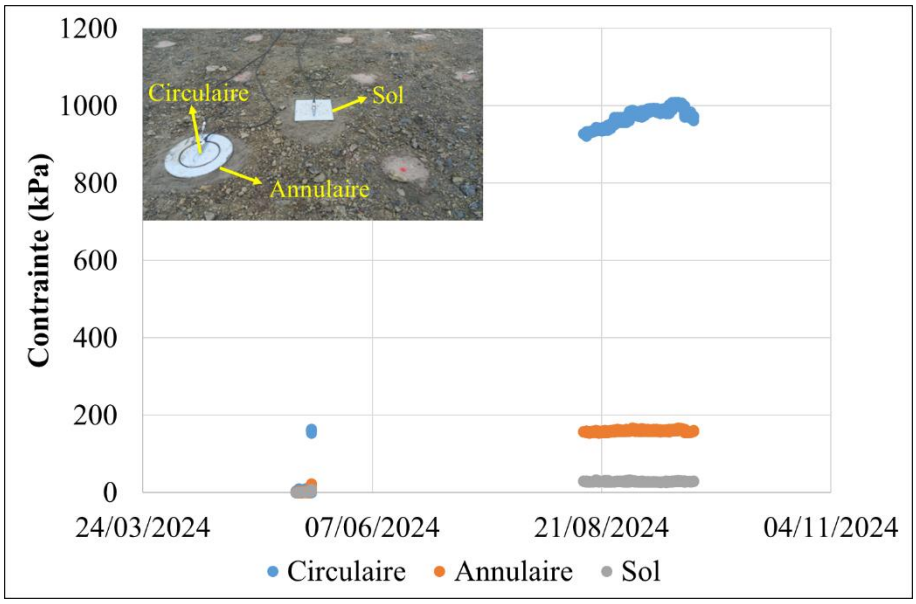



Figure III-31 Evolution des contraintes – zone 2

## III.2.5. Conclusion

Un projet de construction d'une route fédérale (B247 – Mühlhausen) a été réalisé en Allemagne par VINCI Highways. Ce projet contient de nombreux remblais et des plateformes traitées sur inclusions rigides. Un de ces remblais (BW12) a été instrumenté par des capteurs de pression pour observer les mécanismes de transfert de charge.

Les résultats montrent des mécanismes de transfert de charge similaires dans les deux zones avec une concentration de contrainte importante sur les têtes des inclusions, une contrainte non négligeable à proximité immédiate des inclusions et une contrainte très faible sur le sol. Ces mesures seront utilisées par l'entreprise d'amélioration des sols pour une rétro-analyse de leur dimensionnement.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## III.3. Digue sur IR dans la centrale de Blayais

### III.3.1. Contexte

En décembre 1999, un incident nucléaire classé au niveau 2 s'est produit dans la centrale nucléaire du Blayais. La digue de protection de la centrale n'était pas d'une hauteur suffisante contre l'inondation des eaux de l'estuaire de la Gironde. Des vents violents provoquèrent l'inondation d'une partie de la centrale et une surtension sur le réseau électrique qui a entraîné l'arrêt des deux réacteurs (2 et 4). Heureusement les moteurs Diesel de secours ont assuré le refroidissement des cœurs des réacteurs et l'incident n'a conduit à aucun dépassement des autorisations de rejet radioactif.

En mars 2011, un accident nucléaire a eu lieu dans la centrale nucléaire de Fukushima. Un énorme tremblement de terre suivi par un tsunami a causé une défaillance du refroidissement des réacteurs et des piscines de combustible. Le système de refroidissement a été tombé en panne et la température s'est mise à grimper rapidement dans la cuve des réacteurs nucléaire causant la fusion des cœurs des trois réacteurs.

Suite à ces catastrophes, l'autorité de sûreté nucléaire a demandé de conforter les protections périphériques de la centrale nucléaire de production d'électricité (CNPE) du Blayais pour protéger les matériels du « Noyau Dur » d'une inondation externe. La notion de « Noyau dur » a été proposée et retenue en France suite à la catastrophe de Fukushima, c'est l'ensemble des systèmes et des procédures qui assurent le fonctionnement et la sécurité d'une centrale nucléaire en situation extrême. Dans ce contexte, le rehaussement des digues existantes dans le CNPE de Blayais a été envisagé. Le renforcement de sol a été réalisé par Ménard, les travaux par VCT et l'instrumentation par le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et EGIS.

Une coupe transversale de la digue (Figure 3-32) montre le niveau des digues actuelles qui se trouvent à l'élévation +5,8 m NGF 0. Suite aux travaux du rehaussement des digues, le niveau sera entre +7,4 m et 7,8 m NGF 0.

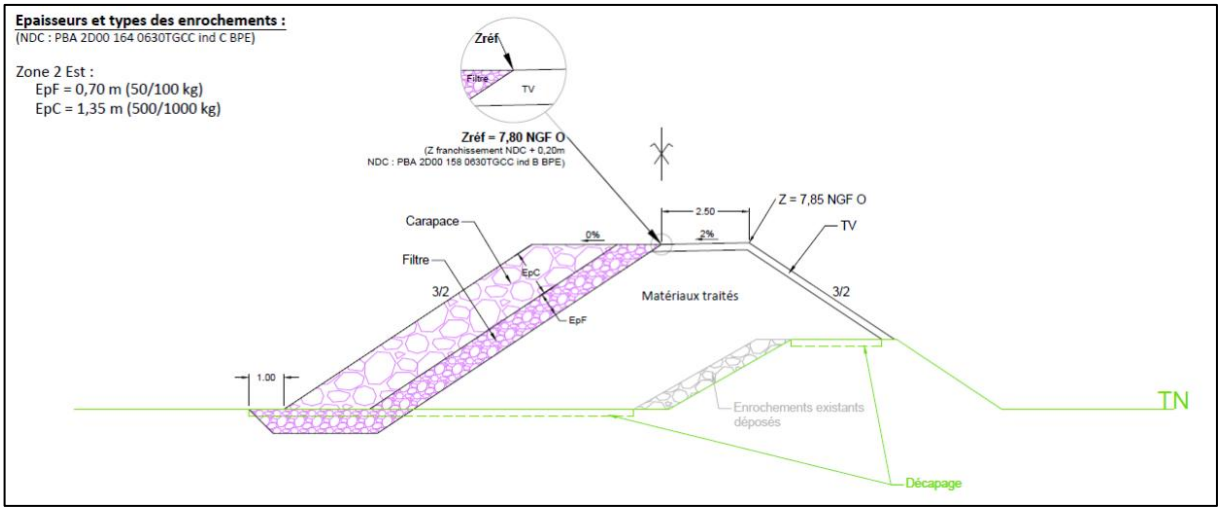



Figure III-32 Coupe transversale de la digue



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## III.3.2. Profil géotechnique

Le profil géotechnique (Figure 3-33) montre que le sol en place présente une couche de sol compressible de 10,5 m formé d'une couche d'anciens remblais de rehausse de la plateforme, globalement sablo-graveleux (U1), d'une couche d'argiles vasardes avec des intercalations de lentilles tourbeuses (U2) et une couche d'alluvions graveleuses (U3).

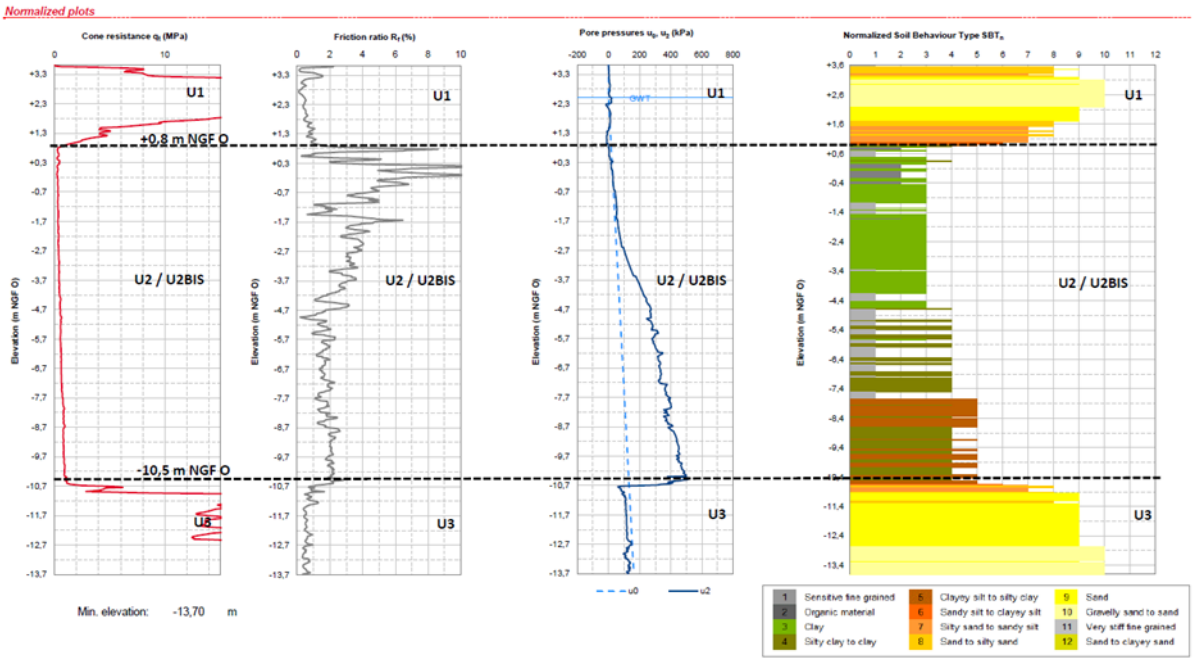



Figure III-33 Profil géotechnique

Le sol en place a été surmonté d'un remblai de 3,5 m et renforcé par des inclusions rigides de 360 mm de diamètre inscrites dans un maillage de 2 m. Le renforcement du sol a été réalisé par la société Menard. La plateforme et le remblai d'épaulement ont été traités à la chaux (Figure 3-34).

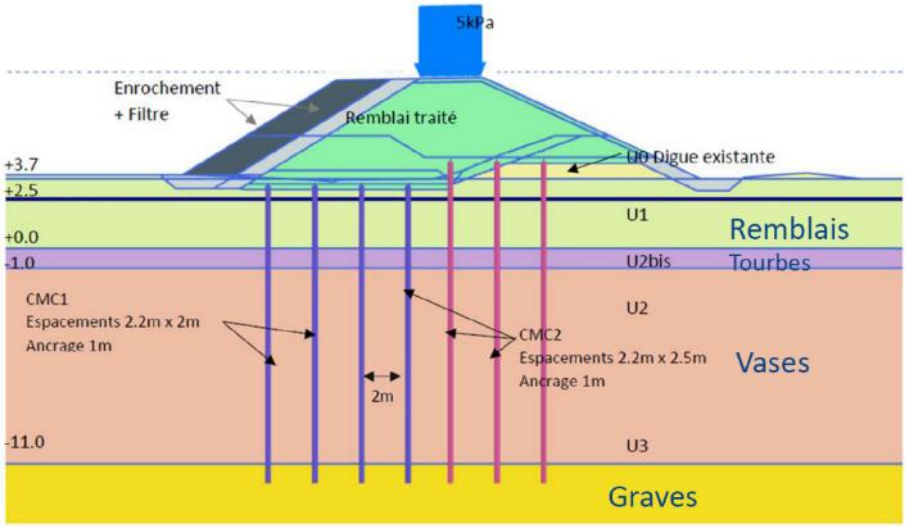



Figure III-34 Coupe transversale de la digue



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### III.3.3. Caractérisation du sol traité

Le même sol a été utilisé pour la digue et la plateforme de transfert de charge. Deux types de matériaux ont été identifiés sur un site extérieur au projet du Blayais. Les essais de caractérisation réalisés par VINCI sont présentés dans le Tableau 3-7 :

Tableau III-7 Essais de caractérisation du sol

| Matériaux | Granulométrie | | Argilosité | | Proctor | | GTR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80µm (%) | Dmax (mm) | VBS | IP | $\rho_{d\ OPN}$ (g/cm$^3$) | $w_{OPN}$ (%) | |
| Sable Argileux | 19,2 | 16 | 2,11 | 24,7 | 1,815 | 13,6 | I2 |
| Argile marneuse | 90,9 | 16 | 4,24 | 30,3 | 1,52 | 26,1 | F3 |

Les essais d'aptitude au traitement réalisés selon la norme NF P 94-100, ont écarté l'argile dû à un gonflement volumétrique ≈10%. Le sable argileux de type I2 a été donc choisi pour la réalisation de la plateforme et du remblai traité. Trois formules de traitement ont été testées où des valeurs de CBR immergé, des mesures de perméabilité et des essais de résistance mécanique ont été menés pour évaluer l'effet du traitement sur le sol. Les formules testées sont à base de 1, 1,5 et 2% du chaux vive. Plusieurs critères ont été fixés en se référant aux recommandations ASIRI, aux références Allemandes, et en fixant des critères propres au dimensionnement, à la réalisation des couches des formes et des critères hydrauliques.

Des essais de résistance au cisaillement ont été réalisés par VCT à la boîte de cisaillement et les résultats sont comparés avec des essais triaxiaux qu'on a réalisé au laboratoire GEOMAS (contraintes de confinement : 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa). A partir de ces essais, il est possible de suivre l'évolution de l'angle de frottement (Figure 3-35) en fonction du temps de cure. L'angle de frottement du sol naturel est égal à 23° au triaxial et 32° à la boîte de cisaillement. Avec les deux appareils, on observe peu d'évolution de l'angle de frottement avec le temps de cure pour les différents traitements.

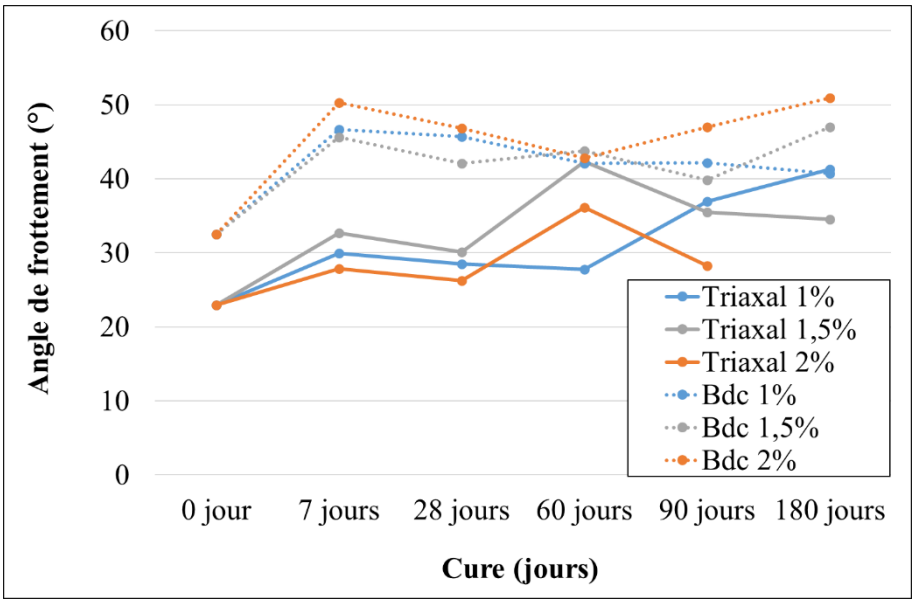



Figure III-35 Evolution de l'angle de frottement



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Ces essais permettent de suivre aussi l'évolution de la cohésion (Figure 3-36) en fonction du temps de cure. La cohésion du sol naturel est égale à 39 kPa au triaxial et 0,5 kPa à la boîte de cisaillement. A la boîte de cisaillement, il n'y a pas d'évolution de la cohésion avec le temps de cure ce qui ne correspond pas à une évolution attendue. Avec le triaxial, on observe une cohésion croissante avec le taux de chaux du sol traité.

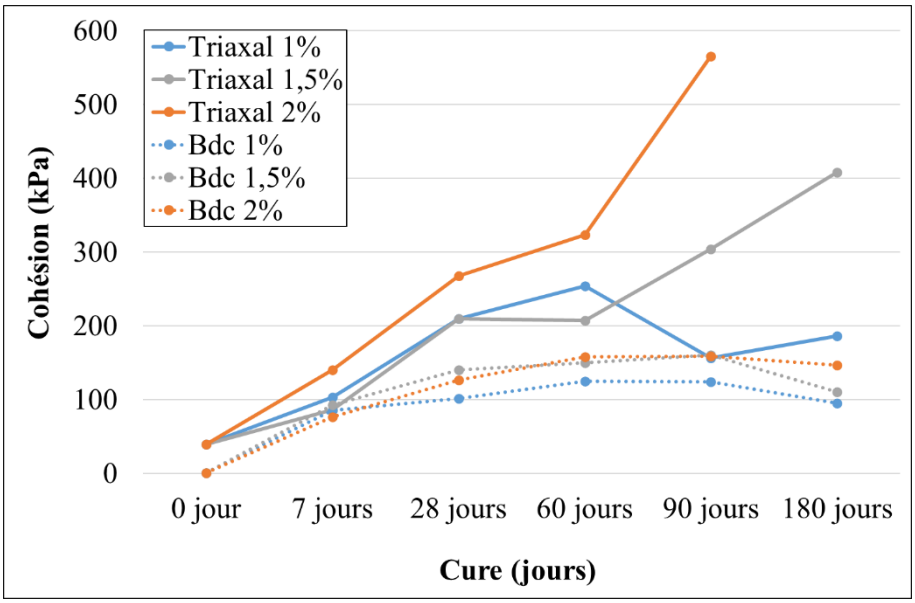



Figure III-36 Evolution de la cohésion

Le traitement à base de 1% chaux a été choisi à la suite de ces essais parce qu'il répond à la majorité des critères et des exigences, en plus de ses avantages économiques et environnementaux.

Deux planches d'essais de 20 m de long, 6 m de large et 2 à 3 m de haut ont été réalisées pour vérifier les performances mécaniques du sol traité (Figure 3-37). Des vérifications sur la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, le compactage, la hauteur et la perméabilité de la couche traitée ont été réalisés pour valider le choix du traitement.



Figure III-37 Réalisation de la planche d'essai, VINCI



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### III.3.4. Instrumentation

Une instrumentation a été mise en place par INSA Lyon et EGIS afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de transfert de charge dans la plateforme traitée. Un capteur de pression circulaire et un capteur annulaire ont été installés au droit et autour d'une inclusion pour vérifier le transfert de charge (Figure 3-38).

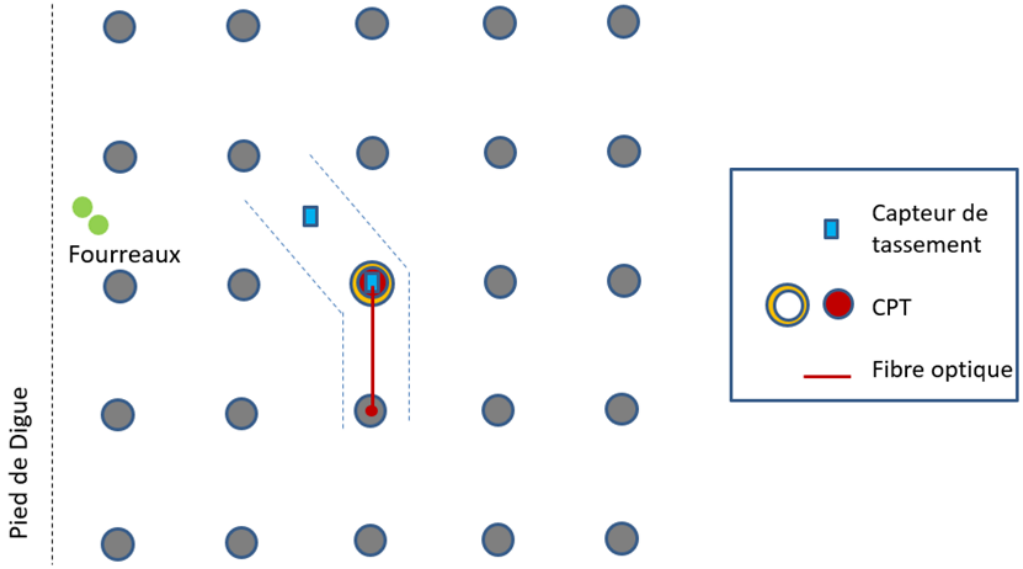



Figure III-38 Instrumentation du site

Les capteurs de tassement (Figure 3-39) ont été installés dans le remblai, à trois niveaux : au niveau des têtes des inclusions et à 50 cm et 1 m au-dessus des IR.



Figure III-39 Instrumentation par des capteurs de tassement



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les capteurs électriques sont connectés à une centrale d'acquisition autonome grâce à son panneau solaire (Figure 3-40). Des réservoirs alimentent les circuits hydrauliques pour connecter les capteurs de tassement. Les mesures sont suivies pendant plus de trois ans.

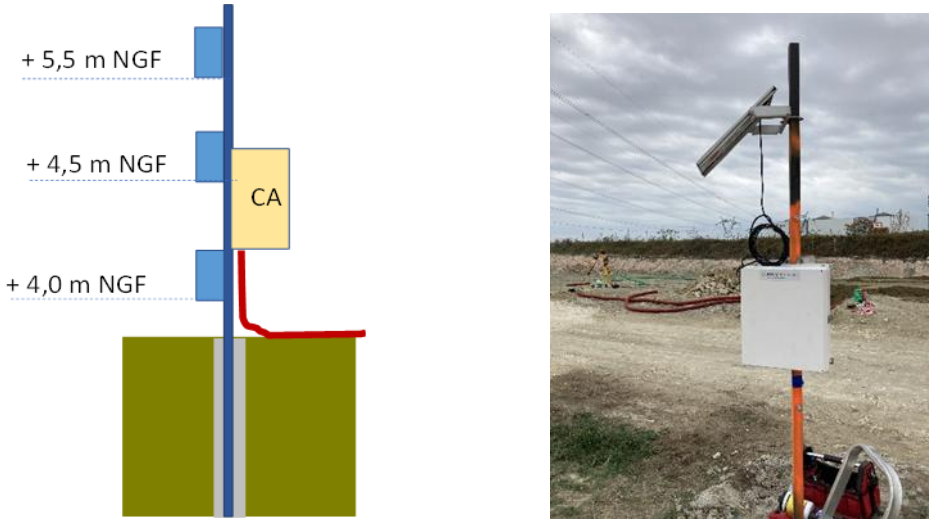



Figure III-40 Centrale d'acquisition

## III.3.5. Mesures et analyse

Les mesures des capteurs de pression totale (Figure 3-41) montrent que la contrainte mesurée sur la tête de l'inclusion augmente avec la mise en œuvre du remblai puis diminue lorsque des travaux de terrassement sont réalisés à proximité de la zone instrumentée et augmente à nouveau jusqu'à la fin des travaux. Un dysfonctionnement de la centrale n'a pas permis d'enregistrer les mesures de mai à octobre 2022. La contrainte augmente lentement depuis la fin de la montée du remblai (26/04/2022) et n'a toujours pas atteint un palier. On note aussi que la contrainte mesurée autour de l'inclusion par le capteur annulaire n'est pas négligeable (égale à 1/3 de la contrainte mesurée sur l'inclusion).

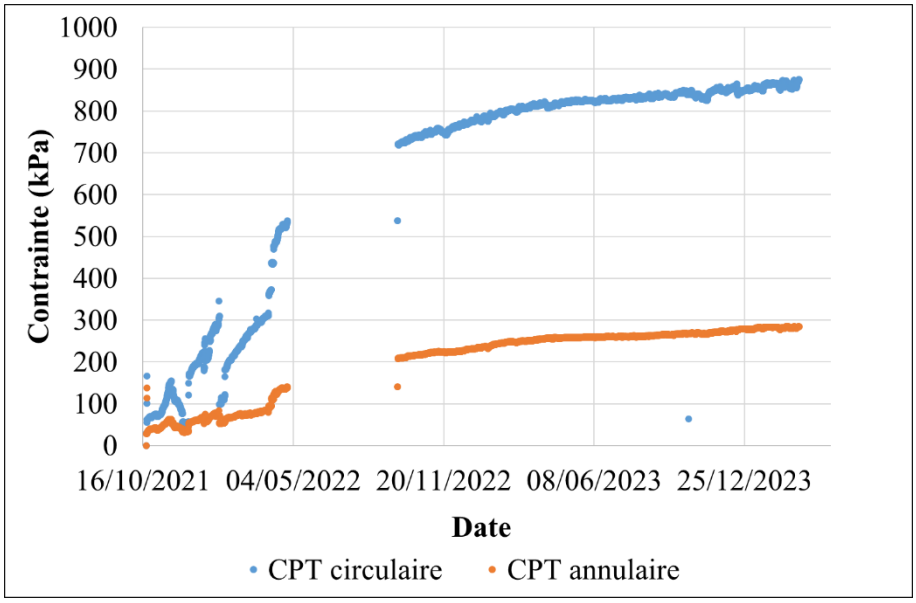



Figure III-41 Evolution de la contrainte



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L’évolution du tassement à l’altitude des têtes des inclusions rigides (Figure 3-42) montre que le tassement a augmenté lors de la mise en place du remblai puis s’est stabilisé. Le capteur sur l’inclusion a cessé de fonctionner depuis mars 2023, mais l’évolution du tassement au droit de l’inclusion et le sol était cohérente dès le début.

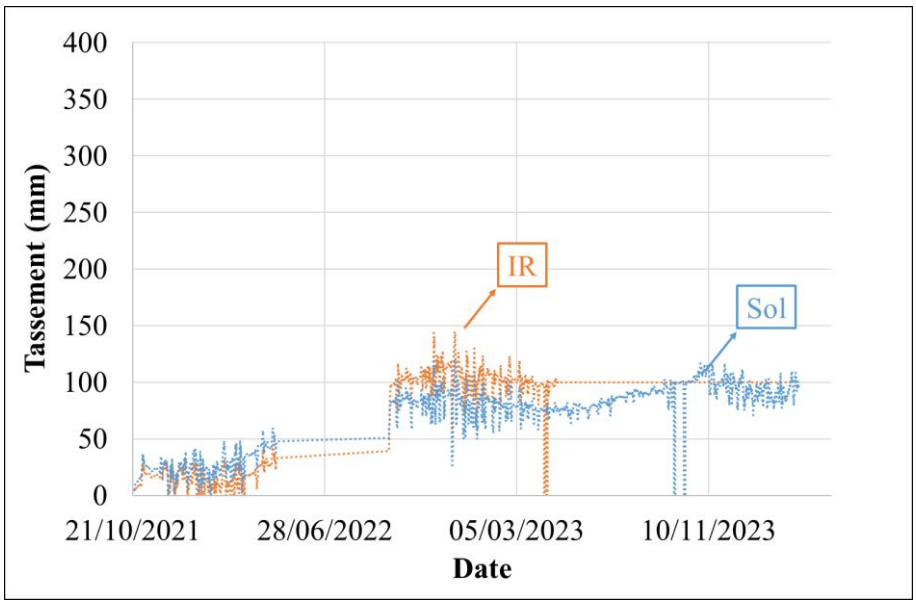



Figure III-42 Evolution du tassement à l’altitude des têtes des inclusions

A 50 cm au-dessus des têtes des inclusions (Figure 3-43), le capteur au droit de l’inclusion (en orange) présente un tassement anormalement important et vraisemblablement faux au regard du tassement des autres capteurs. Au droit du sol, les tassements sont cohérents avec ceux mesurés sur le niveau des têtes des inclusions et se sont aussi stabilisés depuis la fin de la montée du remblai.

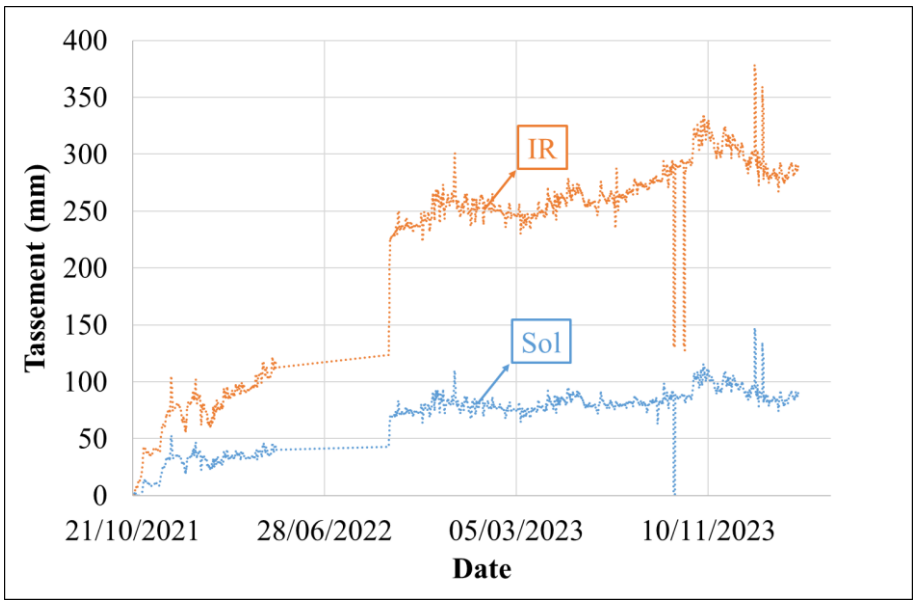



Figure III-43 Evolution du tassement à 50 cm au-dessus des têtes des inclusions



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

A 100 cm au-dessus des têtes des inclusions (Figure 3-44), on observe les mêmes tendances en comparant avec le tassement au niveau des têtes des inclusions.

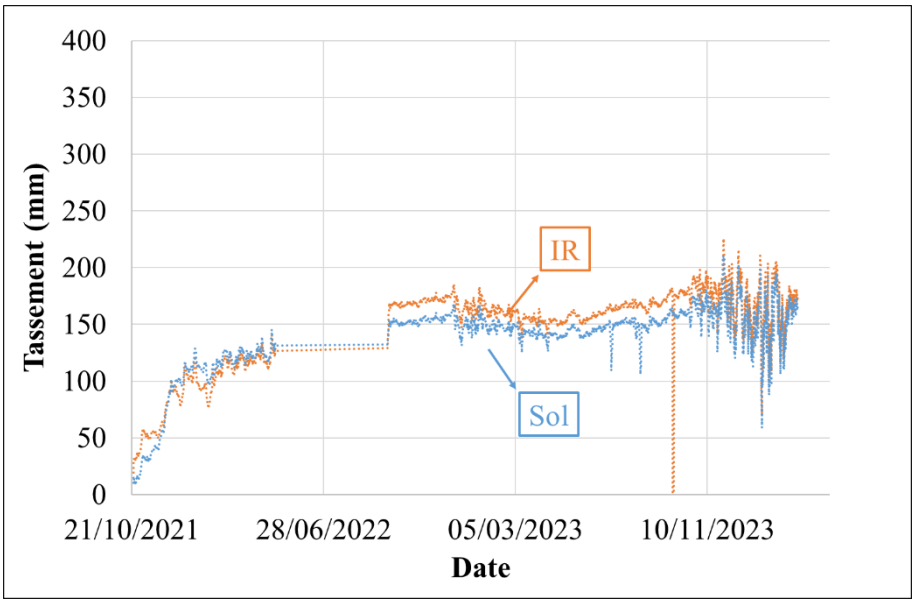



Figure III-44 Evolution du tassement à 100 cm au-dessus des têtes des inclusions

## III.3.6. Conclusions

Le rehaussement des digues existantes dans le CNPE de Blayais a été envisagé pour protéger les matériels du « Noyau Dur » de la centrale contre une inondation externe. Le sol en place est surmonté d'un remblai de 3,5 m formé d'un sable argileux de type I2 traité à 1% de chaux et l'instrumentation a été réalisée par le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et EGIS pour observer les mécanismes de transfert de charge.

La caractérisation mécanique de la plateforme de transfert de charge et du remblai traités a été réalisée au laboratoire par des essais triaxiaux et des essais à la boîte de cisaillement pour trois formules de traitement. Les deux essais donnent des valeurs des angles de frottement différentes mais un comportement similaire en fonction du temps de cure (peu d'évolution est observé). En ce qui concerne l'évolution de la cohésion, une cohésion croissante est observée avec le taux de chaux du sol traité pour le triaxial alors qu'à la boîte de cisaillement, il n'y a pas d'évolution de la cohésion avec le temps de cure ce qui ne correspond pas à une évolution attendue.

L'instrumentation par des capteurs de pression met bien en évidence les mécanismes de transfert de charge au droit des inclusions rigides avec une contrainte mesurée autour de l'inclusion par le capteur annulaire qui n'est pas négligeable (égale à 1/3 de la contrainte mesurée sur l'inclusion). La contrainte augmente lentement depuis la mise en place du remblai (≈ 3 ans) et n'a toujours pas atteint un palier. L'instrumentation par des capteurs de tassement à trois niveaux différents montrent que le tassement a augmenté lors de la mise en place du remblai puis s'est stabilisé. L'instrumentation a permis donc de collecter des mesures indiquant une stabilisation rapide du tassement et un transfert de charge significatif vers les têtes des inclusions. Ces mesures ainsi que les résultats des essais en laboratoire pourront être utilisés pour une rétro-analyse.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Chapitre IV. Etude environnementale et économique

## IV.1.Introduction

Le comportement des plateformes de transfert de charges (PTC) traitées est présenté en détail dans les chapitres précédents avec une comparaison avec les PTC granulaires en termes d'efficacité, de transfert de charge et de réduction de tassement. Cette partie vise à prendre en compte les effets économiques et environnementaux pour avoir une comparaison globale entre ces différentes plateformes.

### IV.1.1. Contexte de l'étude

Une étude générale d'une plateforme de transfert de charge sur inclusions rigides est présentée dans ce chapitre. La Figure 4-1 présente les différentes phases de construction avant la mise en place des PTC. Une excavation de 30 cm est réalisée en surface pour enlever la couche de terre végétale. Ensuite une plateforme de travail (PT) de 30 cm est installée pour permettre la circulation des engins et l'installation des inclusions rigides. Les inclusions sont présentées en pointillés au niveau de la plateforme de travail en raison du recépage possible des inclusions.

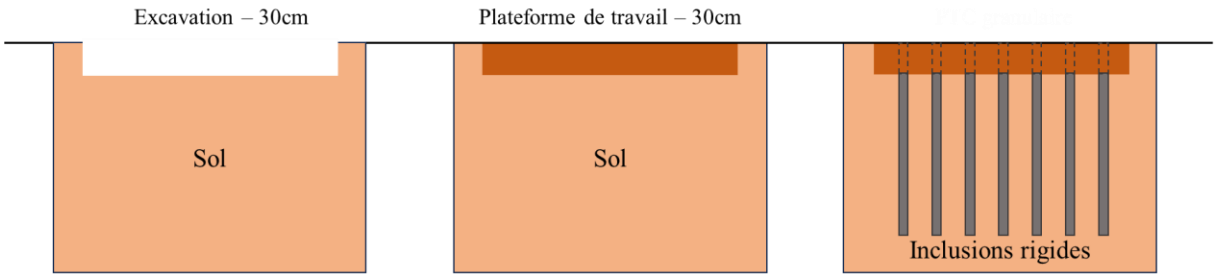



Figure IV-1 Phases de construction

Une fois cette phase terminée, les PTC sont installées au-dessus des plateformes de travail. Dans cette étude, la phase d'excavation et d'installation des inclusions rigides ne seront pas prises en compte dans le modèle et les calculs puisqu'il qu'il s'agit de la même procédure pour les PTC granulaires et traitées.

Généralement, le type de la plateforme de travail dépend du type de la PTC où une plateforme de travail traitée est utilisée dans le cas d'une PTC traitée et une plateforme de travail granulaire est utilisée sous une PTC granulaire. Cette hypothèse a été adoptée dans notre cas pour simplifier l'étude.

La Figure 4-2 présente les deux cas de cette étude. Les épaisseurs des PTC varient selon le type de la plateforme et le dosage du traitement qui seront présentés par la suite.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

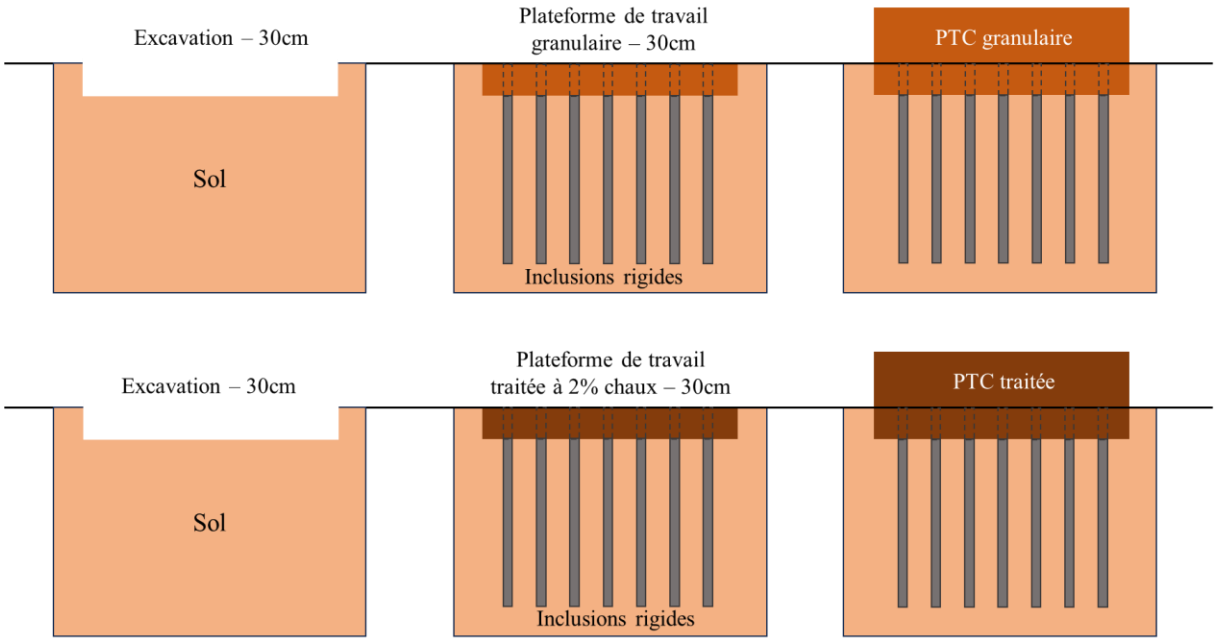



Figure IV-2 Mise en œuvre des PTC

## IV.1.2. Paramètres d'entrée

### IV.1.2.1. Dimensions

Pour une même surface de plateforme, différentes épaisseurs sont évaluées selon le type de PTC (Tableau 4-1).

Tableau IV-1 Dimensions des plateformes

| Paramètre | PTC granulaire | PT granulaire | PTC traitée | PT traitée |
|---|---|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | | | |
| Largeur (m) | 50 | | | |
| Epaisseur (m) | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,3 |

Les épaisseurs des PTC sont basées sur les essais au laboratoire en vraie grandeur réalisés à Cerema de Rouen et présentés dans le chapitre 2 qui montrent qu'une plateforme granulaire (formée de gravier 0/31,5) de 50 cm d'épaisseur présente la même efficacité qu'une plateforme traitée de 40 cm d'épaisseur.

### IV.1.2.2. Formules de traitement

Cette étude s'appuie sur les essais réalisés dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen, mais à plus grande échelle. Le même sol est considéré dans ce cas avec la même formule de traitement déjà adoptée. Le sol en place est un limon de type F1.

Un traitement à base de 1% chaux et 4% ciment (SCC) a été choisi pour tester la PTC traitée au Cerema et sera donc utilisé dans cette étude pour comparer avec la PTC granulaire. Un traitement à base de 2% de chaux est choisi pour la plateforme de travail traitée. Deux autres formules de traitement (SCCO : 1% chaux et 5% Compaxem® - SCA : 1% chaux et 5%



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Argiliant+®) ont été choisis pour étudier l'impact de ces agents sur les effets économiques et environnementaux. Le choix des formules de traitement est basé sur la résistance à la compression à 28 jours où un Rc > 1,5 MPa est requis pour les PTC traitées pour les essais du Cerema. Les résistances à la compression à 28 jours de cure (Figure 4-3) montre que les trois formules vérifient ce critère.

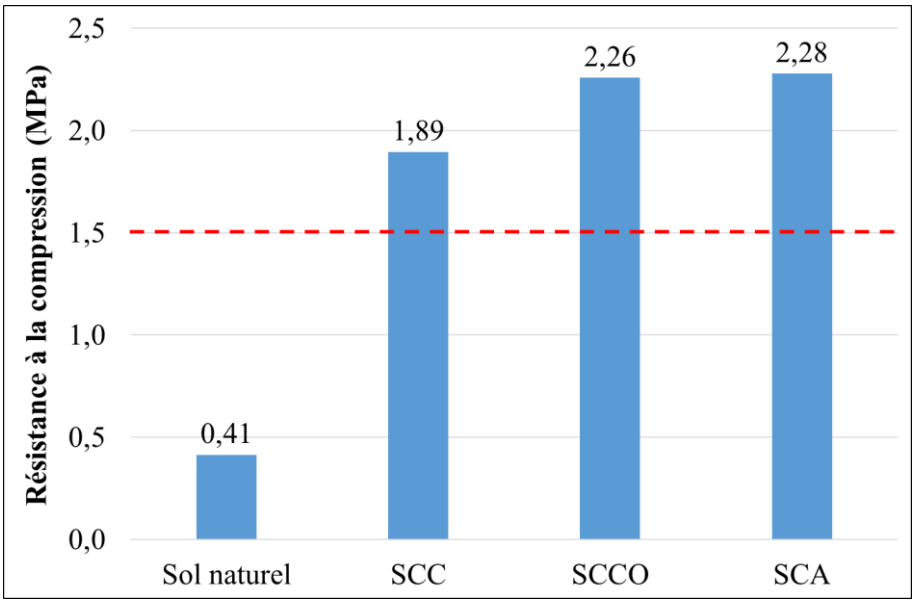



Figure IV-3 Résistance à la compression à 28 jours de cure

Pour rappel, la chaux utilisée est une chaux vive et le ciment est de type CEM II/B 32,5. Le Compaxem® et l'Argiliant+® sont fournis par la société Argeco. Ces agents de traitement sont conformes à la norme NF P15-108 et adaptés au traitement du sol avec un délai de maniabilité de 1h à 1h30 et 6 heures respectivement. Le Compaxem® est formé de 40% de metakaolin et 60% de clinker Portland. L'Argiliant+® est composé de 50% de metakaolin, 30% de clinker Portland et 20% du chaux calcique.

IV.1.2.3.Engins

Les engins nécessaires à la mise en œuvre des plateformes sont évalués selon leurs rendements (Tableau 4-2). Le rendement de la pelle est calculé selon la nature du sol et les conditions du chantier. Pour le reste des engins, les rendements sont des valeurs moyennes générales en 2024.

Tableau IV-2 Rendement des engins

| Engins | Rendement | Unité |
|---|---|---|
| Pelle | 115 | $m^3/h$ |
| Niveleuse | 600 | $m^2/h$ |
| Compacteur | 9375 | $m^2/h$ |
| Epandeur | 2500 | $m^2/h$ |
| Malaxeur | 1000 | $m^2/h$ |
| Tombereau citerne | 2500 | $m^2/h$ |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## IV.2.Analyse de cycle de vie (ACV)

### IV.2.1. Définition

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'évaluer l'impact environnemental d'un système (service ou produit) en intégrant les différentes étapes du cycle de vie allant de l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie de l'ouvrage.

L'ACV a été standardisée dans les années 90 par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) qui a normalisé la méthodologie et les lignes de conduite de l'ACV en élaborant les séries suivantes :

- ISO 14040 - Principes et cadre ;
- ISO 14041 - Objectif et champ de l'étude - définition et analyse des stocks ;
- ISO 14042 - Évaluation de l'impact du cycle de vie ;
- ISO 14043 - Interprétation du cycle de vie ;
- ISO 14044 - Exigences et lignes directrices.

Le principe de l'ACV est basé sur quatre étapes présentées à la Figure 4-4. La première étape consiste à définir une unité fonctionnelle qui représente la fonction et le besoin auquel répond le système étudié (phase : Définition des objectifs et du champs de l'étude). La seconde étape consiste à définir tous les flux de matière et d'énergie entrants (matières premières, énergie électrique) et sortants (déchets, énergie thermique) reliés à notre système (phase : Inventaire du cycle de vie). La troisième étape est celle de l'évaluation des impacts du cycle de vie sur les différentes catégories ou domaines à protéger. Finalement, la quatrième étape (phase : Interprétation) se fait tout de même à chaque étape de l'étude et permet de discuter les hypothèses et les résultats et vérifier si les objectifs fixés initialement ont été bien retenus et atteints.

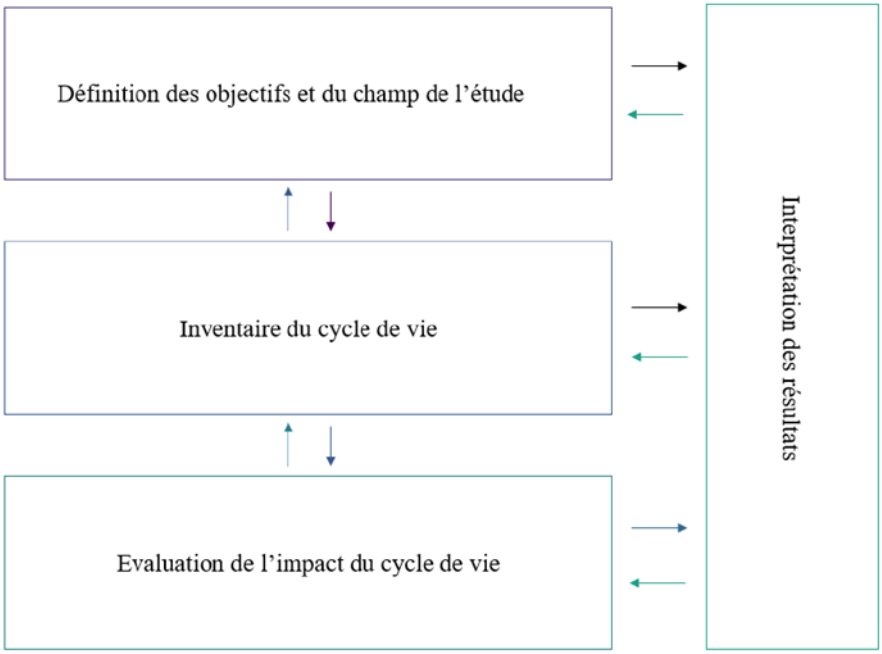



Figure IV-4 Les étapes de l'ACV



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### IV.2.2. Catégories d'impact

Les catégories d'impact et les indicateurs environnementaux sont nombreux et dépendent du logiciel d'ACV utilisé et des méthodes d'évaluation adoptées. Les quatre méthodes utilisées dans notre étude sont présentées dans la partie 2.4. Les catégories les plus communes selon les méthodes EF v3.1 (environmental footprint) sont présentées dans le Tableau 4-3 :

Tableau IV-3 Catégories d'impact de la méthode EF v3.1

| Indicateur | Unité | Description |
|---|---|---|
| Acidification | mol H+-Eq | Concerne le phénomène des pluies acides, liées entre autres à l'émission de composés azotés ou soufrés dans l'atmosphère |
| Changement climatique | kg CO2-Eq | Contribution des différents gaz à l'effet de serre à travers leur forçage radiatif, sur un horizon de 100 ans. |
| Ecotoxicité | CTUe | Exprime le potentiel d'écotoxicité dans l'eau douce que produit un système considéré sur l'ensemble de son cycle de vie |
| Épuisement des ressources énergétiques | MJ, net calorific value | Exprime la quantité d'énergies non renouvelables utilisée pour la mise à disposition, le transport et l'utilisation ou des différents éléments en cycle de vie |
| Eutrophisation eau douce | kg P-Eq | Correspond à l'augmentation du taux des nutriments dans les milieux naturels, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie (zone morte) |
| Eutrophisation marine | kg N-Eq | Correspond à l'augmentation du taux des nutriments dans les milieux naturels, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie (zone morte) |
| Eutrophisation terrestre | mol N-Eq | Correspond à l'augmentation du taux d'azote du milieu, conduisant à un déséquilibre et un appauvrissement de l'écosystème. |
| Toxicité humaine cancérigène | CTUh | Concerne l'impact sur la santé lié à l'exposition aux contaminants chimiques via les pollutions du milieu (air, eau, sol) |
| Toxicité humaine non cancérigène | CTUh | Concerne l'impact sur la santé lié à l'exposition aux contaminants chimiques via les pollutions du milieu (air, eau, sol) |
| Radiation ionisante | kBq U235-Eq | Représente les dommages causés à la santé humaine liés à la libération de matières radioactives dans l'environnement. |
| Usage des terres | Sans dimension | Reflète l'impact d'une activité sur la dégradation des terres, en référence à « l'état naturel ». |
| Épuisement des ressources minérales | kg Sb-Eq | Correspond à l'épuisement des ressources minérales non renouvelables : cuivre, sable … |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

| | | |
|---|---|---|
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC-11-Eq | Représente les émissions dans l'air de gaz participant à la destruction de la couche d'ozone. |
| Particules fines | Disease incidence | Concerne les particules fines qui pénètrent dans les organismes via les poumons. Elles ont un effet sur la santé humaine. |
| Formation photochimique d'ozone | kg NMVOC-Eq | Concerne la formation d'ozone dans la troposphère qui cause des problèmes pour la santé humaine notamment au niveau respiratoire. |
| Utilisation d'eau | m3 world eq. deprived | Correspond à la consommation d'eau et son épuisement dans certaines régions. |

### IV.2.3. Outils et bases de données utilisés

Il existe plusieurs logiciels et bases de données aujourd'hui pour réaliser une analyse de cycle de vie. Ces outils permettent d'évaluer les impacts environnementaux selon les différents systèmes étudiés et dans de nombreux champs. Dans notre étude, le logiciel OpenLCA est utilisé avec la base de données Ecoinvent 3.9.1.

#### IV.2.3.1. OpenLCA

OpenLCA est un logiciel d'ACV gratuit et en code source libre qui permet d'évaluer les impacts environnementaux en modélisant les flux, les procédés et les systèmes pour réaliser une ACV. Ce logiciel, développé par GreenDelta, présente un moyen puissant et flexible pour modéliser les systèmes de cycle de vie, avec sa capacité à calculer des indicateurs environnementaux, sociaux et économiques.

#### IV.2.3.2. Ecoinvent

Le logiciel OpenLCA doit être alimenté avec une base de données afin de lui permettre de calculer les indicateurs environnementaux. Cette base doit contenir des flux élémentaires et intermédiaires, des processus et leurs inventaires ainsi que des facteurs de caractérisation et des méthodes d'évaluations.

Ecoinvent est l'une des plus grandes bases de données du monde avec des utilisateurs dans plus de 40 pays. Elle est utilisée dans la réalisation des ACV, des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) des produits, des empreintes carbones etc. Elle contient des inventaires de cycle de vie pour l'énergie, les matériaux, le traitement des déchets, les produits et les processus agricoles, électroniques etc.

### IV.2.4. Méthodes d'évaluation des impacts

L'évaluation de l'impact du cycle de vie (EICV) est la méthode qui permet d'analyser les données d'inventaire du cycle de vie du système étudié et de le convertir en un ensemble d'impact potentiel. Plusieurs méthodes d'évaluation existent pour la réalisation des ACV, pour cela, il n'existe pas une liste de catégories d'impact unique utilisée et donc, il faut atteindre un compromis entre les applications envisagées des résultats et l'applicabilité des modèles et du choix des catégories. Dans notre étude, quatre méthodes sont utilisées : EF v3.1, Recipe 2016-Midpoint, Recipe 2016-Endpoint et la norme Française NF EF 15804+A2.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### IV.2.4.1. Recipe 2016 Midpoint et Endpoint

La méthode Recipe a pour objectif de transformer la longue liste des résultats de l'inventaire du cycle de vie en un nombre limité d'indicateurs qui expriment l'impact d'une catégorie sur l'environnement. Les indicateurs de la méthode Recipe sont déterminés à deux niveaux, dix-huit indicateurs intermédiaires et trois indicateurs finaux qui montrent l'impact sur l'environnement à trois niveaux d'agrégation plus élevés : l'effet sur la santé humaine, la biodiversité et la rareté des ressources (Figure 4-5).

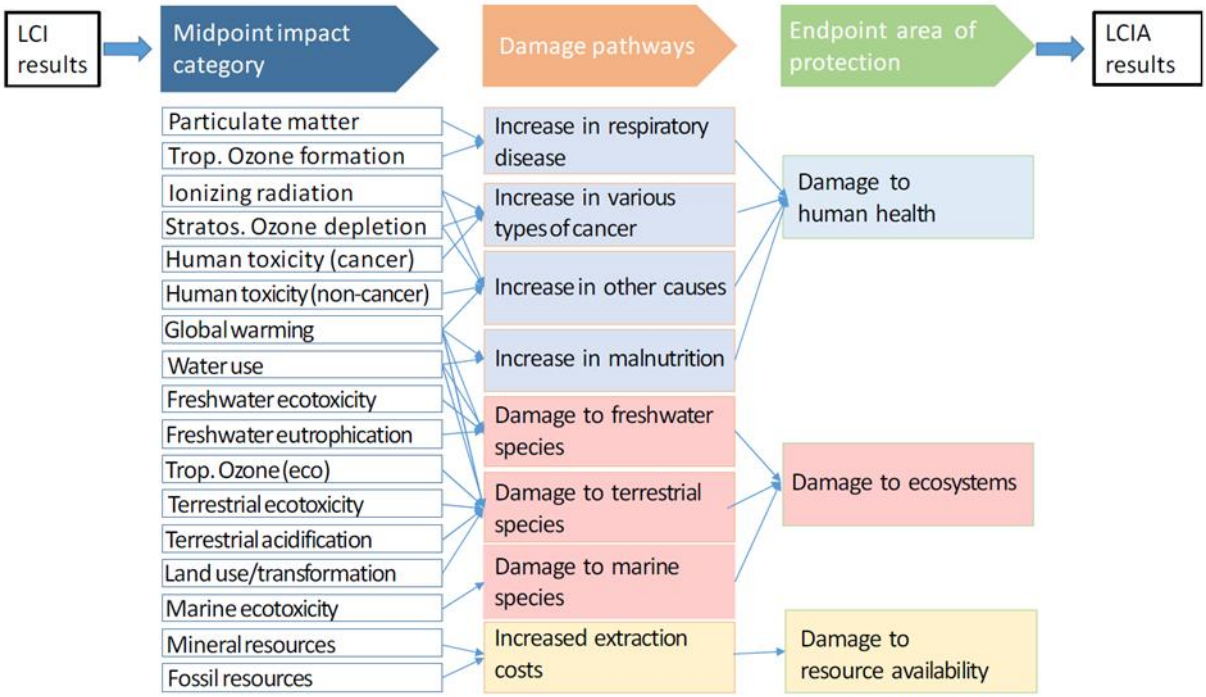



Figure IV-5 Méthode Recipe 2016

### IV.2.4.2. EF v3.1

EF est l'acronyme de Environmental Footprint (empreinte environnementale) et cette méthode est gérée par la Commission Européenne. Les versions 3.0 et 3.1 sont implémentées dans Ecoinvent. Il s'agit d'une méthode intermédiaire qui évalue plusieurs catégories d'impact. Les différentes catégories d'impact sont présentées dans la partie (2.2 – Catégories d'impact).

### IV.2.4.3. NF EF 15804+A2

La nouvelle norme européenne NF EN 15804 +A2 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction » a été publiée en 2022 et les entreprises ont adopté cette norme pour réaliser des déclarations environnementales sur les produits de construction. Elle fournit 28 catégories d'indicateurs environnementaux. Les produits et les matériaux de construction doivent déclarer les modules A1→A3 (étape de production), A4-A5 (étape du processus de construction), B1→B7 (étapes d'utilisation), C1→C4 (étapes de fin de vie) et le module D (bénéfices et charges au-delà des frontières du système) (Figure 4-6). Les modules A1→A3 « du berceau à la sortie de l'usine / Cradle to gate », C1→C4 et D sont le minimum à déclarer pour un FDES par défaut.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés




Figure IV-6 Type de DEP en fonction des étapes du cycle de vie concernées et étapes du cycle de vie et modules pour l'évaluation des ouvrages de construction – Source : NF EN 15804+A2

### IV.2.5. Diagramme de Processus

La Figure 4-7 présente le diagramme de processus de notre étude avec les limites du système. L'excavation et le renforcement du sol par inclusions rigides sont exclus du système vu qu'il s'agit des mêmes étapes pour les deux types de plateformes. Les matériaux granulaires et les agents de traitement utilisés sont basés sur notre étude du chapitre 2.

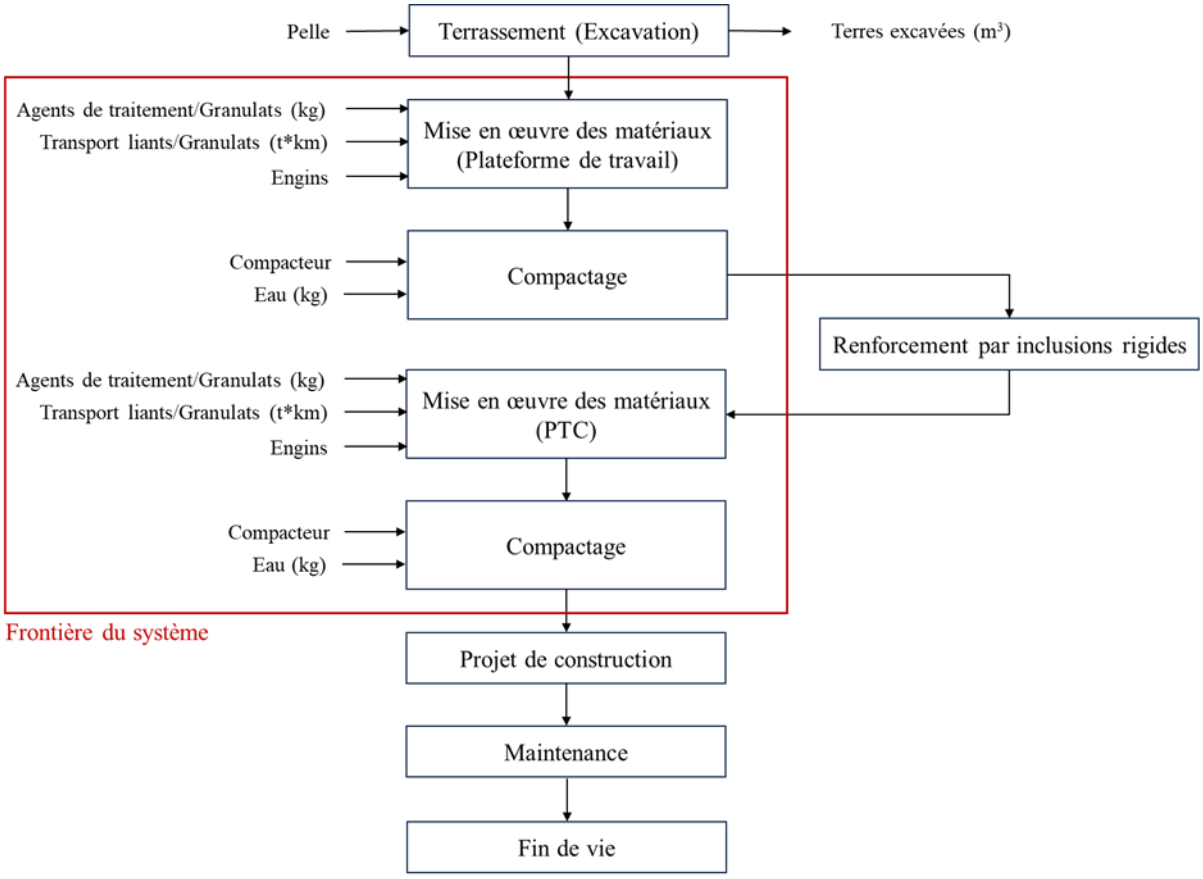



Figure IV-7 Diagramme de processus



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## IV.2.6. Résultats

Dans un premier temps, une étude environnementale est réalisée pour un cas d'une plateforme de transfert de charge granulaire et traitée pour identifier les paramètres les plus impactant sur l'environnement. Ces paramètres sont ensuite utilisés dans une étude paramétrique pour évaluer l'effet de ces paramètres pour différents scénarios.

### IV.2.6.1. PTC traitée

Une ACV est réalisée pour le cas d'une PTC traitée selon le diagramme de processus présenté à la Figure 4-7. Cette étude est faite selon la méthode d'évaluation d'impact EF v3.1. Les paramètres d'entrée sont présentés dans le Tableau 4-4.

Tableau IV-4 Paramètres d'entrée de la PTC traitée

| Paramètre | PTC traitée | Plateforme de travail |
|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | 50 |
| Largeur (m) | 50 | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,4 | 0,3 |
| Ciment CEM II/B 32,5 (%) | 4 | - |
| Chaux vive (%) | 1 | 2 |

Les résultats de l'ACV (Figure 4-8) montrent que les scores d'impact sont dominés par la production du ciment et de la chaux (53% et 28% respectivement du score total) avec une contribution moins importante pour l'opération des engins (8%) et le transport des engins (9%).

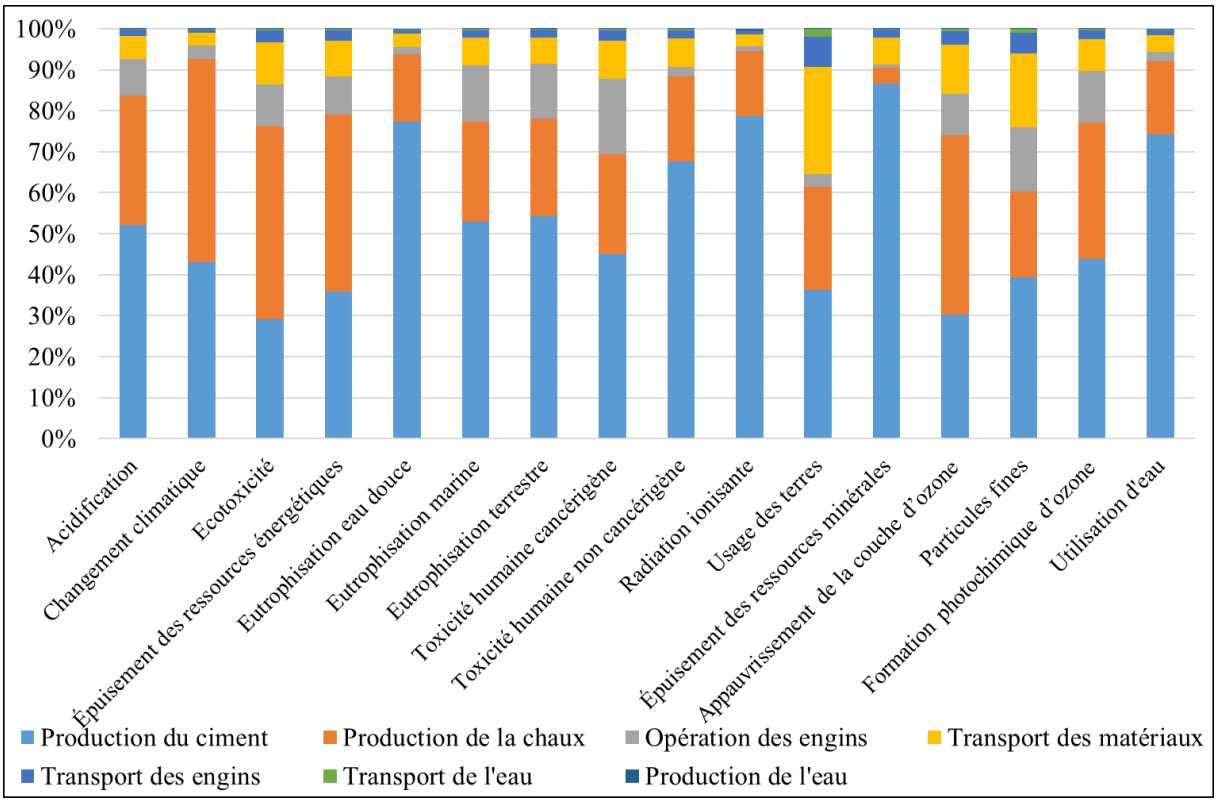



Figure IV-8 Scores d'impact pour la PTC traitée avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### IV.2.6.2. PTC granulaire

La même analyse est réalisée pour le cas d'une PTC granulaire selon la méthode EF v3.1. Les paramètres d'entrée sont présentés dans Tableau 4-5.

Tableau IV-5 Paramètres d'entrée de la PTC granulaire

| Paramètre | PTC granulaire | Plateforme de travail |
|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | 50 |
| Largeur (m) | 50 | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,5 | 0,3 |
| Gravier 0/31,5 (t/m3) | 1,7 | 1,7 |

Les résultats de l'ACV (Figure 4-9) montrent que les scores d'impact sont dominés par le transport et l'extraction du gravier (53% et 45% respectivement du score total) avec une contribution moins importante pour l'opération des engins de l'ordre de 1,8%.

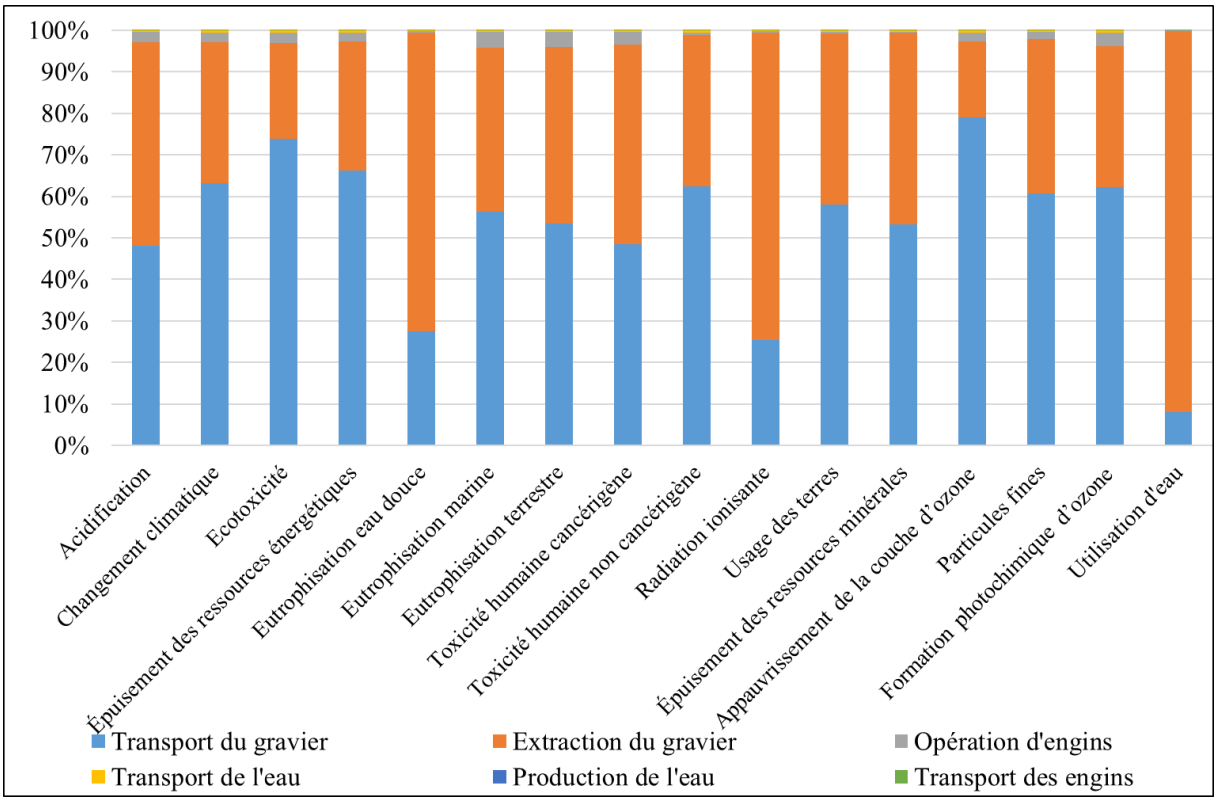



Figure IV-9 Scores d'impact pour la PTC granulaire avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1

### IV.2.6.3. Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité a porté sur les paramètres les plus contribuants des PTC traitées et granulaires, en particulier, la distance de transport du gravier, le type du ciment, les formules de traitement et le renforcement ou pas des plateformes granulaires par des géosynthétiques.

#### IV.2.6.3.1. Distance de transport du gravier

Trois distances de transport du gravier (50, 100 et 150 km) sont considérées dans cette étude de sensibilité. L'analyse est réalisée selon les quatre méthodes d'évaluation d'impact déjà



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

présentées dans la partie (2.4 Méthodes d'évaluation des impacts), et les trois scenarios sont comparés avec le cas de la PTC traitée. La distance de transport des agents de traitement est une distance moyenne considérée sur différents projets de construction et la distance de transport des engins est fournie par le manuel utilisateur (ECORCE, 2013) (ECO comparateur Routes Construction Entretien) (Tableau 4-6). Les plateformes de travail (PT) sont incluses dans ces études :

- Plateforme de travail granulaire (gravier 0/31,5) de 30 cm pour la PTC granulaire (gravier 0/31,5).
- Plateforme de travail de 30 cm traitée à 2% de chaux pour la PTC traitée.

Tableau IV-6 Paramètres d'entrée (étude de sensibilité qui porte sur la distance de transport du gravier)

| **Paramètres** | **PTC granulaire** | **PTC traitée** | **PT granulaire** | **PT traitée** |
|---|---|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Largeur (m) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| Ciment CEM II/B 32,5 (%) | - | 4 | - | - |
| Chaux vive (%) | - | 1 | - | 2 |
| Gravier (t/m3) | 1,7 | - | 1,7 | - |
| Densité sol traité (t/m3) | - | 17,9 | - | 17,8 |
| Transport gravier (km) | 50/100/150 | - | 50/100/150 | - |
| Transport chaux (km) | - | 150 | - | 150 |
| Transport ciment (km) | - | 150 | - | - |
| Transport engins (km) | 20 | 20 | 20 | 20 |

Les résultats de l'ACV selon la méthode EF v3.1 (Figure 4-10) montrent bien l'influence de la distance de transport du gravier sur les différentes catégories d'impact. La catégorie d'impact la plus influencée est l'appauvrissement de la couche d'ozone vu qu'en doublant la distance de transport du gravier de 50 à 100 km son score d'impact augmente de 65% (59% pour l'écotoxicité d'eau douce, 49% pour l'épuisement des ressources énergétiques et 46% pour le changement climatique). Cette augmentation est moins importante pour les catégories de type eutrophisation eau douce (16%) et radiations ionisantes (15%). L'effet de l'augmentation du transport du gravier n'est donc pas le même pour toutes les catégories d'impact.

Dans le cas de la plateforme traitée, le changement climatique est la catégorie d'impact la plus importante avec un score d'impact plus grand que celui de la plateforme granulaire avec une distance de transport du gravier de 100 km. Dans la majorité des études environnementales, le changement climatique est le seul paramètre présenté, ce qui peut influencer l'analyse des résultats et le choix des solutions. Si on considère la totalité des catégories d'impact, on remarque que la plateforme traitée présente les meilleurs scores d'impact par rapport aux autres scénarios.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

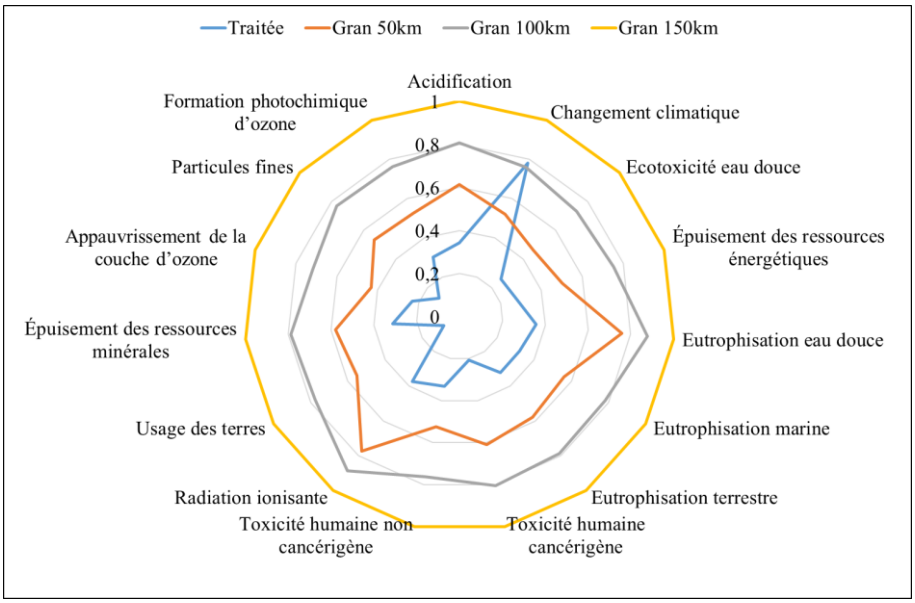



Figure IV-10 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1

Les résultats de l'ACV selon la méthode Recipe 2016-Midpoint (Figure 4-11) sont cohérents avec ceux de la méthode EF v3.1. La catégorie d'impact la plus influencée est l'écotoxicité terrestre qui augmente de 86% en passant d'une distance de transport de gravier de 50 à 100 km (57% pour l'appauvrissement de la couche d'ozone et 46% pour le changement climatique et 45% pour l'écotoxicité marine, l'eutrophisation marine et la toxicité humaine non cancérigène). Cette augmentation est toujours moins importante pour les catégories de type eutrophisation eau douce (16%) et radiation ionisantes (15%). De même, le changement climatique est toujours la catégorie d'impact la plus importante dans le cas de la PTC traitée suivie de la radiation ionisante).

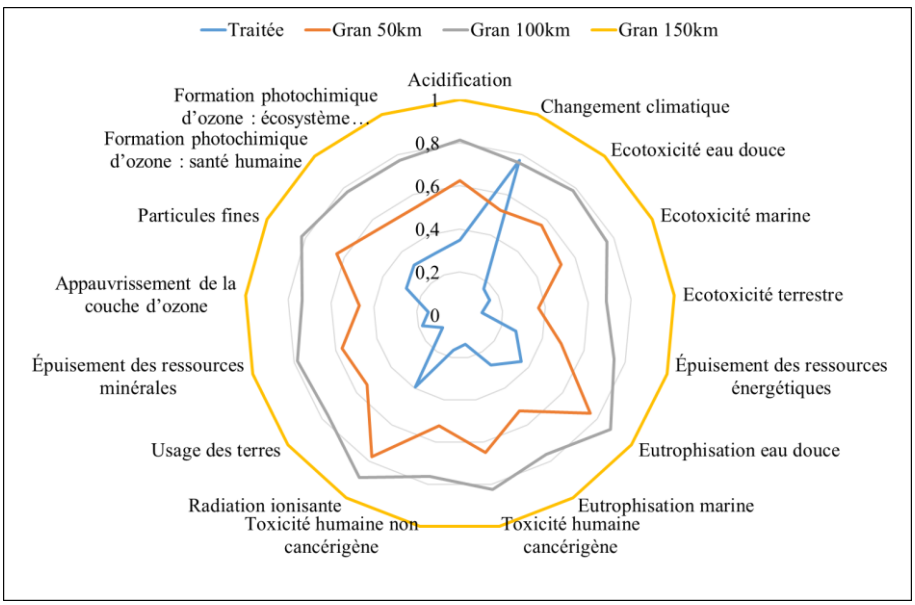



Figure IV-11 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

La méthode Recipe 2016-Endpoint (Figure 4-12) regroupent les indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint (Figure 4-11) en trois indicateurs finaux qui montrent l'impact sur l'environnement à trois niveaux d'agrégation plus élevés : l'effet sur la santé humaine, la biodiversité et les ressources naturelles.

Dans cette méthode, l'impact de la distance de transport du gravier est bien clair sur les indicateurs environnementaux. L'augmentation de cette distance de 50 à 100 km entraîne une augmentation des impacts sur les ressources naturelles de 62% (43% pour la biodiversité et 36% pour la santé humaine). Selon cette méthode d'évaluation, la plateforme traitée est meilleure sur le plan environnemental pour une distance de transport de gravier supérieure à 50 km.

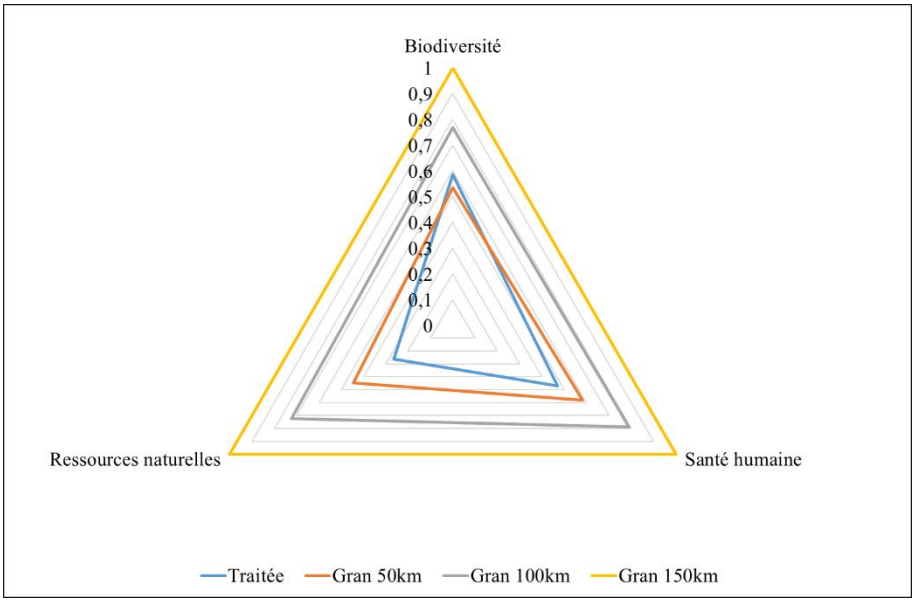



Figure IV-12 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint

Les résultats de l'ACV selon la norme française NF EF 15804+A2 (Figure 4-13) sont cohérents avec les autres méthodes d'évaluation. La catégorie d'impact la plus influencée est l'appauvrissement de la couche d'ozone qui augmente de 65% en passant d'une distance de transport de gravier de 50 à 100 km (49% pour l'épuisement des ressources énergétiques et 46% pour le changement climatique).

En ce qui concerne la plateforme traitée, le changement climatique reste la catégorie d'impact la plus importante avec un score d'impact plus grand que celui de la plateforme granulaire avec une distance de transport du gravier de 100 km, suivie de la radiation ionisante.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

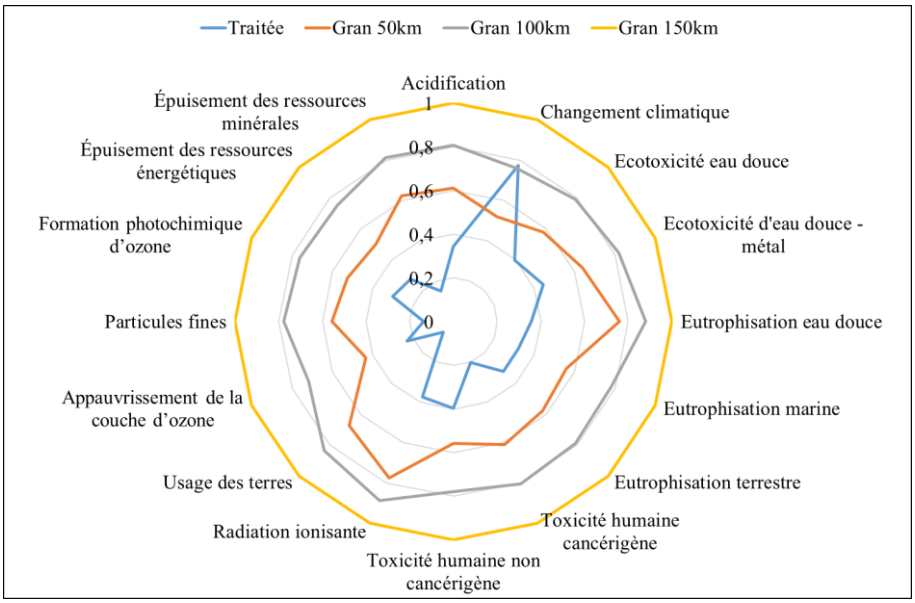



Figure IV-13 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2

#### IV.2.6.3.2. Type de ciment

Trois types de ciment sont considérés dans cette étude de sensibilité. L'analyse est réalisée selon les trois méthodes d'évaluation d'impact déjà présentées dans la partie 2.4 et se concentre juste sur le cas de la PTC traitée. Le Tableau 4-7 rappelle les paramètres de cette étude.

Tableau IV-7 Paramètres d'entrée (étude de sensibilité sur le type de ciment)

| **Paramètres** | **PTC Traitée** | **PT traitée** |
|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | 50 |
| Largeur (m) | 50 | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,4 | 0,3 |
| CEM II/B, Portland, CEM III/B | 4 | - |
| Chaux vive (%) | 1 | 2 |
| Sol traité (t/m3) | 17,9 | 17,8 |
| Transport chaux (km) | 150 | 150 |
| Transport ciment (km) | 150 | - |
| Transport engins (km) | 20 | 20 |

Les résultats de l'ACV selon la méthode EF v3.1 (Figure 4-14) montrent que l'utilisation du ciment portland à la place du CEM II/B entraine une augmentation des scores d'impact où la catégorie la plus influencée est l'épuisement des ressources minérales (21%) suivie par l'eutrophisation des eaux douces (19%) et 18% pour la toxicité humaine non cancérigène et l'utilisation de l'eau. L'impact n'est pas similaire pour toutes les catégories d'impact avec une plus faible influence sur l'écotoxicité de l'eau douce (3%) et sur l'usage des terres (6%).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

L'utilisation du ciment CEM III/B présente un intérêt au plan environnemental où on remarque une amélioration sur 10 catégories d'impact sur le total des 16 catégories. Pour rappel, le ciment CEM II/B est composé de 65 à 79% de clinker et 21 à 35% d'autres constituants, alors que le ciment CEM III/B contient entre 20 et 34% de clinker et au minimum 66% de laitier de haut fourneau. Le laitier, formé des particules très fines (un diamètre moyen de 10 µm) pénètrent dans les organismes via les poumons et affecte donc la santé humaine, ce qui explique son effet sur la catégorie des particules fines. On remarque de plus une forte augmentation des scores d'impact des catégories « Usages des terres » et « Ecotoxicité eau douce ».

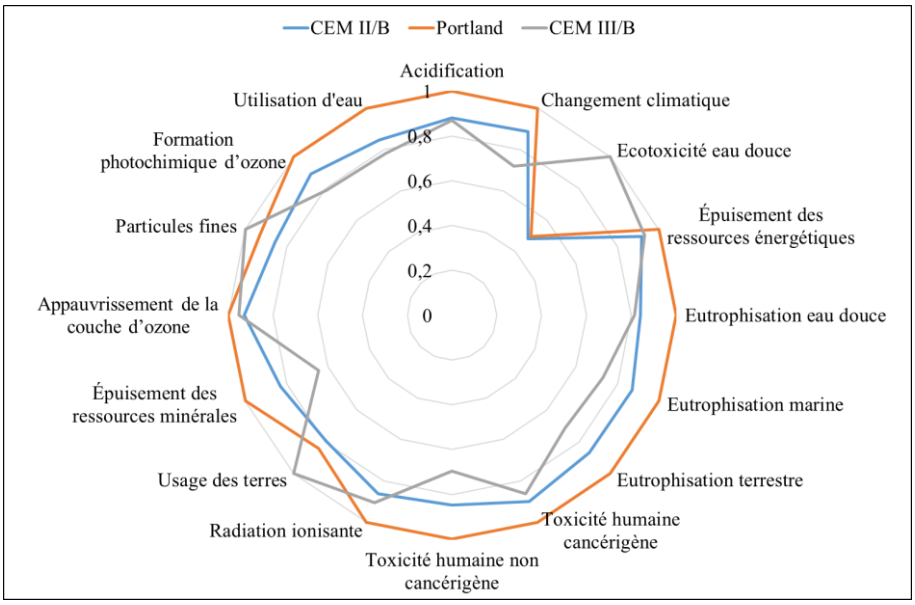



Figure IV-14 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1

Les résultats selon la méthode Recipe 2016-Midpoint (Figure 4-15) sont cohérents avec ceux de la méthode EF v3.1 en ce qui concerne l'utilisation l'effet du ciment portland.

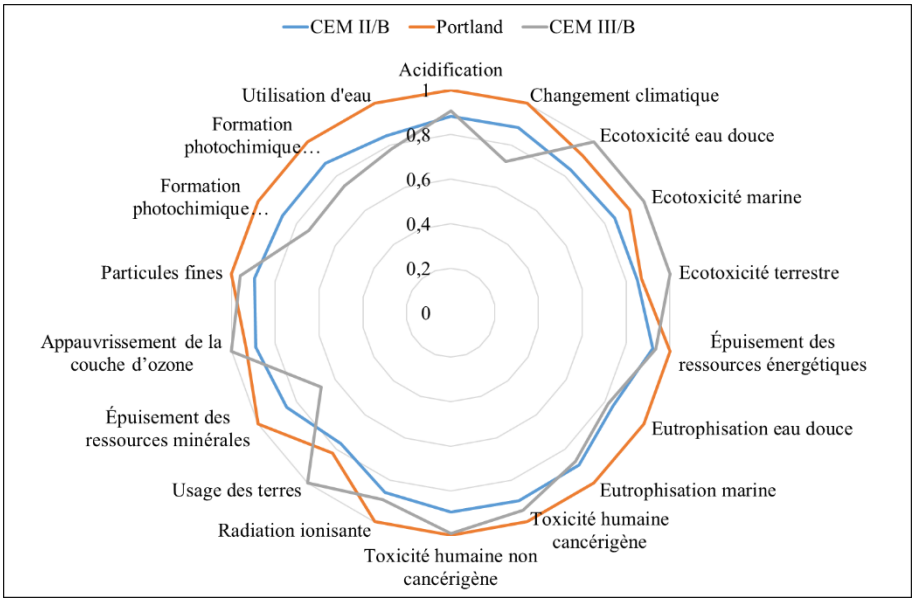



Figure IV-15 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Cependant, en ce qui concerne le ciment CEM III/B, on remarque une amélioration sur 7 catégories d'impact sur le total des 18 catégories, alors que le CEM II/B rapporte une amélioration sur 11 catégories d'impact sur le total des 18 catégories). Le CEM III/B présente un grand impact négatif sur plusieurs catégories d'impact (on remarque une augmentation de 30% pour « Usage des terres » et 19%, 18% et 17% pour « Ecotoxicité eau douce », « Ecotoxicité marine » et « Ecotoxicité terrestre » respectivement par rapport au ciment CEM II/B).

Les résultats selon la méthode Recipe 2016-Endpoint (Figure 4-16) présente un intérêt pour l'utilisation CEM III/B. L'utilisation du ciment portland entraîne une augmentation des scores d'impact de l'ordre de 13% sur les catégories « Biodiversité » et « Santé humaine » et 7% sur la catégorie « Ressources naturelles » par rapport au CEM II/B qui présente lui-même, une augmentation des scores d'impact de 16% et 12% sur les catégories « Biodiversité » et « Santé humaine » respectivement avec aucun effet sur la catégorie « Ressources naturelles » par rapport au CEM III/B.

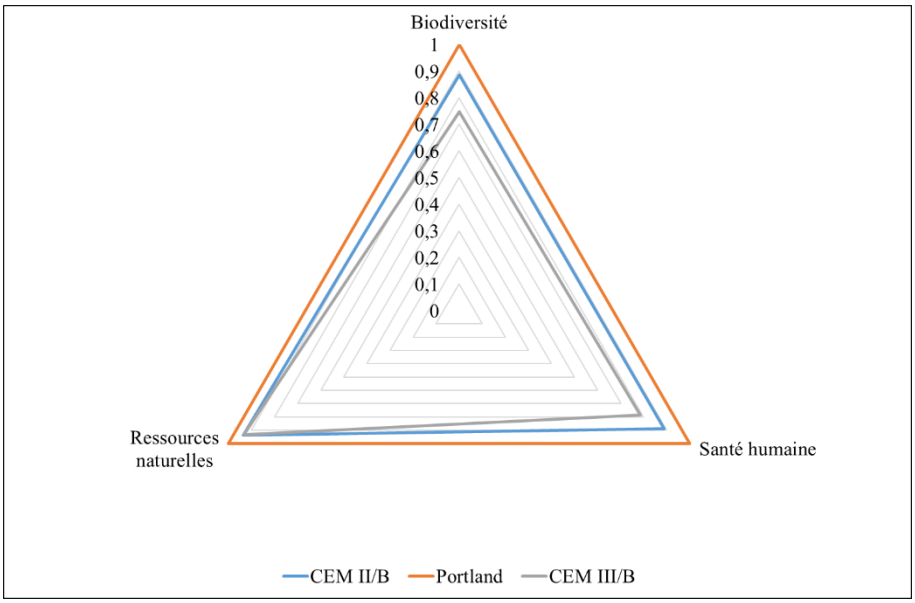



Figure IV-16 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint

Les résultats selon la norme française NF EF 15804+A2 (Figure 4-17) sont cohérents avec la méthode Recipe 2016-Midpoint en ce qui concerne les effets du ciment portland et du ciment CEM III/B. Ce dernier rapporte une amélioration sur 8 catégories d'impact sur le total des 17 catégories, alors que le CEM II/B rapport une amélioration sur 9 catégories d'impact sur le total des 18 catégories. Le CEM III/B entraîne une augmentation de 31% pour « Epuisement des ressources minérales », 25% pour « Usage des terres », 23% pour « Toxicité humaine » et 20% pour « Ecotoxicité eau douce » par rapport au ciment CEM II/B.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

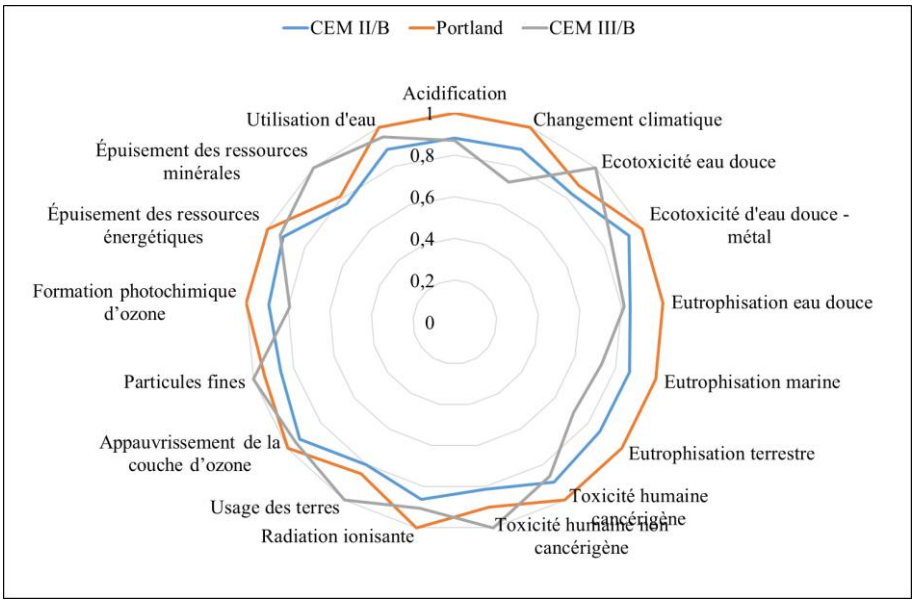



Figure IV-17 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2

#### IV.2.6.3.3. Formules de traitement

Trois formules de traitement (Tableau 4-8) sont choisies pour traiter le limon de Dieppe. Elles vérifient le critère de performance mécanique fixé pour les essais de Cerema (Rc 28j > 1,5 MPa).

Tableau IV-8 Formules de traitement

| Notation | Traitement |
|---|---|
| SCC | 1% Chaux + 4% Ciment |
| SCCO | 1% Chaux + 5% Compaxem® |
| SCA | 1% Chaux + 5% Argiliant+® |

La composition des deux agents de traitement Compaxem® et Argiliant+® fournis par la société Argeco est présentée dans le Tableau 4-9. A noter que le ciment utilisé pour le traitement SCC est du CEM II/B 32,5.

Tableau IV-9 Composition des liants de traitement

| Liant | Metakaolin (%) | Clinker Portland (%) | Chaux (%) |
|---|---|---|---|
| Compaxem® | 40 | 60 | - |
| Argiliant+® | 50 | 30 | 20 |

Des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) sur le metakaolin « Flash » utilisé pour le Compaxem® et l'Argiliant+® sont réalisées par la société Argeco selon la norme la norme française NF EN 15804/CN. La mise à jour de ces fiches pour répondre à la nouvelle norme (NF EN 15804+A2) n'est pas encore réalisée et donc les fiches actuelles seront utilisées pour la réalisation de l'ACV. Les résultats (Figure 4-18) prennent en compte une



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

plateforme de travail de 30 cm traitée à 2% de chaux pour chacune des PTC traitées. Ils présentent un intérêt pour l'utilisation de l'Argiliant+® qui entraîne une amélioration sur toutes les catégories d'impact à part de l'appauvrissement de la couche d'ozone « Ozone depletion » à cause de la présence de la plus grande quantité du Metakaolin qui possède le plus grand score d'impact ($27{,}4x10^{-6}$, $5{,}76x10^{-6}$ et $3{,}18x10^{-6}$ kg de CFC-11 équivalent pour le Metakaolin, la chaux et le clinker respectivement) et l'épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles « Epuisement des ressources énergétiques » à cause de la plus grande quantité de chaux (2% en total) qui possède le plus grand score d'impact (5056, 3299 et 2450 MJ pour la chaux, le clinker et le Metakaolin respectivement). Les formules de traitement SCC et SCCO présentent des scores d'impact proches surtout pour les catégories « Changement climatique, Acidification, Eutrophisation et Formation photochimique d'ozone ». C'est difficile de juger sur le reste des catégories vu que le traitement SCCO présente une amélioration sur l'épuisement des ressources minérales et l'utilisation de l'eau et le traitement SCC présente une amélioration sur l'épuisement des ressources énergétiques et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

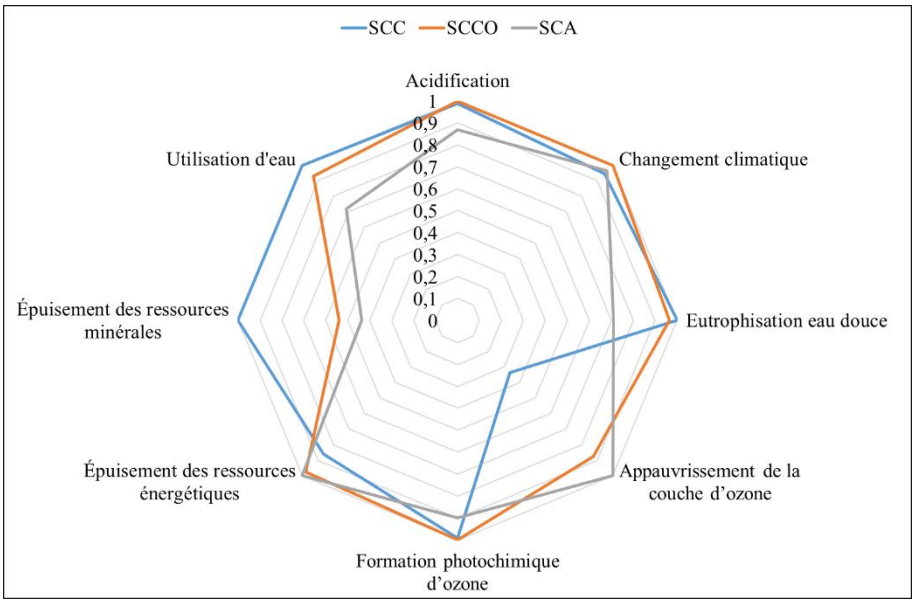



Figure IV-18 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2

#### IV.2.6.3.4. Renforcement par géotextile

Le renforcement ou non par des géosynthétiques est testé dans cette partie en comparant des PTC granulaires renforcées, non renforcées et une PTC traitée. Les paramètres de cette étude sont présentés dans le Tableau 4-10 pour une distance de transport du gravier de 100 km. Des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) sur le géosynthétique (géotextile GEOLON PET 400/50) sont réalisées par SOLMAX selon la norme française NF EN 15804+A2 et seront donc utilisées pour la réalisation de l'ACV. Les plateformes de travail appropriées sont toujours incluses dans les résultats.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-10 Paramètres de l'étude de sensibilité qui porte sur le renforcement par géosynthétiques

| Paramètres | Granulaire e50 | Traitée e40 | Granulaire e40/géotextile | Granulaire e30/géotextile |
|---|---|---|---|---|
| Longueur (m) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Largeur (m) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| Ciment CEM II/B 32,5 (%) | - | 4 | - | - |
| Chaux vive (%) | - | 1 | - | - |
| Gravier (t/m3) | 1,7 | - | 1,7 | 1,7 |
| Renforcement par géosynthétiques | Non | Non | Oui | Oui |

Les résultats de l'ACV selon la norme française NF EF 15804+A2 (Figure 4-19) montre des scores d'impact proches pour le cas de la PTC granulaire non renforcé (e = 50 cm) et la PTC granulaire renforcée (e = 40 cm). C'est à partir d'une épaisseur de 30 cm que la PTC renforcée présente des améliorations claires sur les catégories d'impact (réduction de 31% sur l'eutrophisation d'eau douce et 24% sur l'eutrophisation marine et terrestre ainsi que sur la formation d'oxydants photochimiques). Cependant, elle entraîne toujours une augmentation des scores d'impact de l'appauvrissement de la couche d'ozone (2%) et l'épuisement des ressources minérales (12%).

La PTC traitée à 1% de chaux et 4% du CEM II/B 32,5, présente les meilleurs scores d'impact sur toutes les catégories à l'exception du changement climatique où elle présente une augmentation moyenne de 5% par rapports au scénario « Granulaire e40/géotextile » et 21% par rapport au scénario « Granulaire e30/géotextile ».

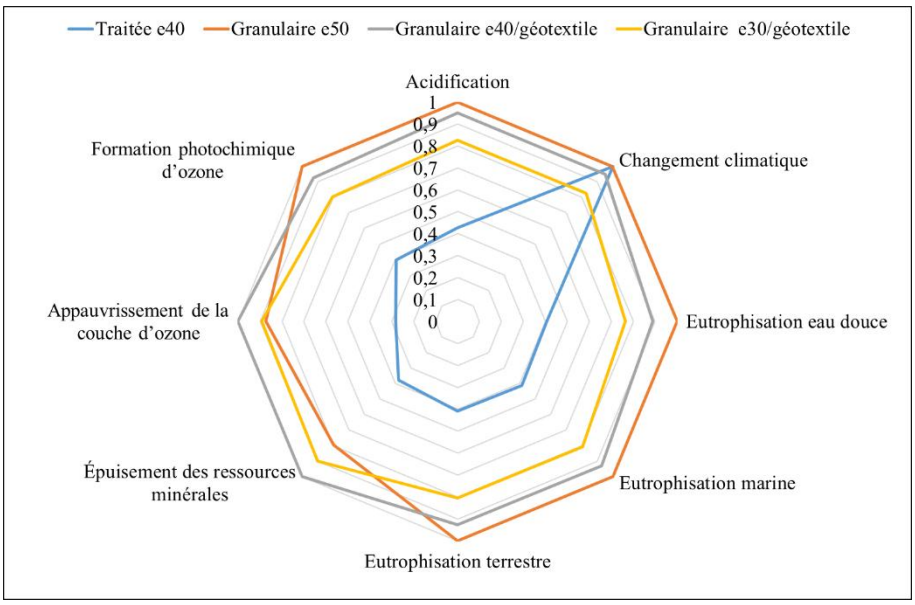



Figure IV-19 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

#### IV.2.6.3.5. Matériaux granulaires

La PTC granulaire (formée du gravier 0/31,5) est comparée avec une PTC formée du sable. Une distance de transport des matériaux granulaires de 100 km est considérée pour cette étude avec des plateformes de travail de 30 cm et des PTC de 50 cm.

Les résultats de l'ACV selon la méthode EF v3.1 (Figure 4-20) montrent que l'utilisation d'une PTC formée du sable présente des énormes intérêts sur le plan environnemental avec des réduction des scores d'impact sur toutes les catégories notamment les radiations ionisantes (138%) et l'eutrophisation des eaux douces (106%) et changement climatique (41%).

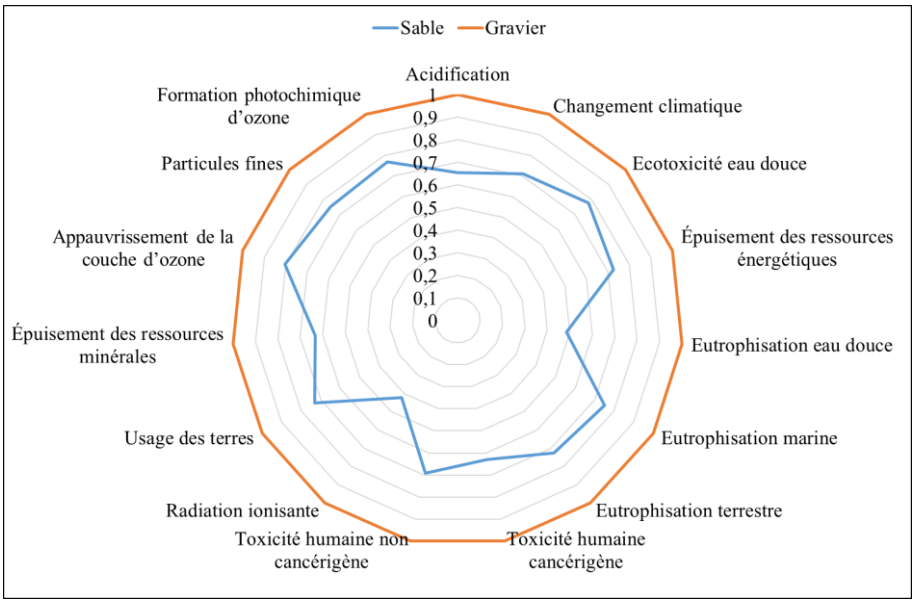



Figure IV-20 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode EF v3.1

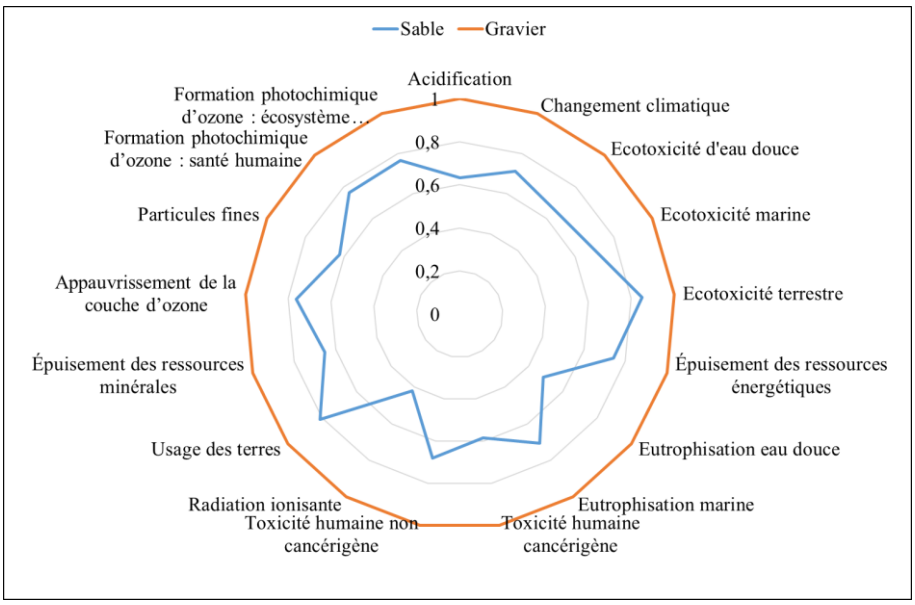



Figure IV-21 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Midpoint



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats de l'ACV selon la méthode Recipe 2016-midpoint (Figure 4-21) sont cohérents avec ceux de la méthode EF v3.1 où la PTC formée du sable présente les meilleurs scores d'impact (réduction de 138% pour les radiations ionisantes, 106% pour l'eutrophisation des eaux douces et 41% pour le changement climatique).

Les résultats de la méthode Recipe 2016-endpoint (Figure 4-22) montrent une réduction des scores d'impact dans le cas d'un PTC formée de sable de l'ordre de 53%, 40% et 25% pour les catégories « Santé humaine », « Biodiversité » et « Ressources naturelles » respectivement.

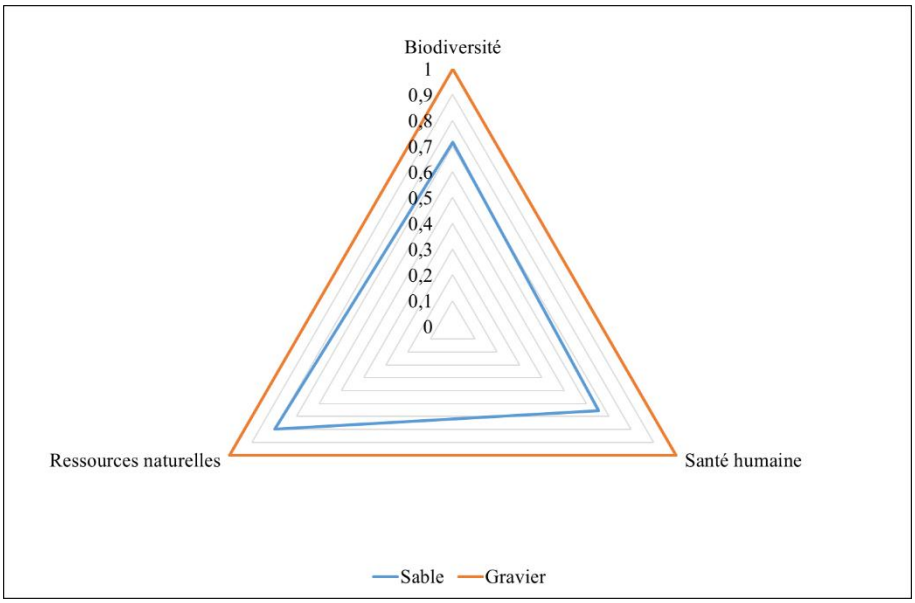



Figure IV-22 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la méthode Recipe 2016-Endpoint

Finalement, les résultats selon la norme française NF EF 15804+A2 (Figure 4-23) sont cohérents avec les autres méthodes où la PTC formée du sable présente des meilleurs scores d'impact dans toutes les catégories.

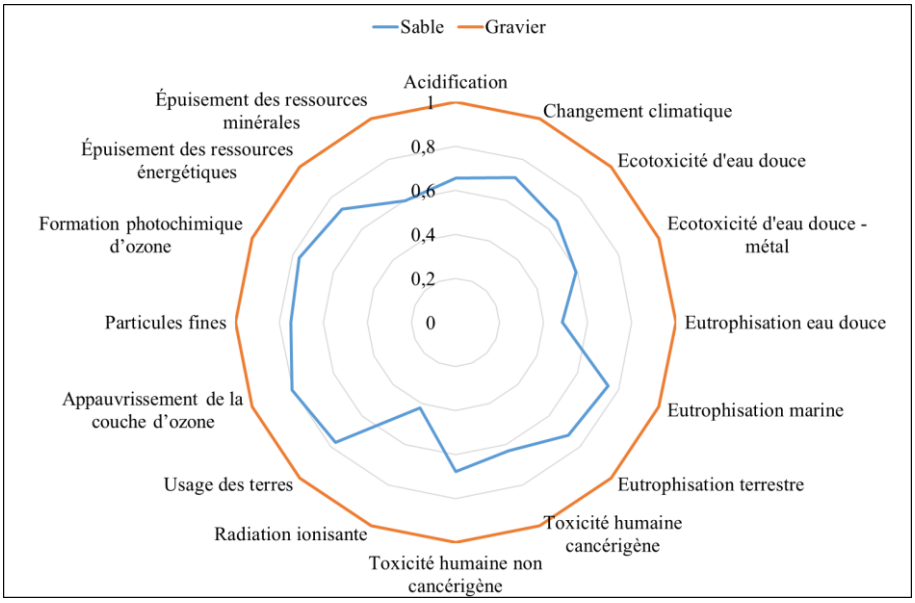



Figure IV-23 Comparaison des scores d'impact des différents scénarios avec le set d'indicateurs de la norme NF EF 15804+A2



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## IV.3.Etude économique

Les PTC de différentes natures sont comparées d'un point de vue économique. Cette étude est basée sur le cas présenté dans la partie (1. Introduction). Deux scénarios sont testés :

- Scénario 1 : Plateformes en sol traité.
- Scénario 2 : Plateformes granulaires (gravier 0/31,5).

### IV.3.1. Scénario 1

#### IV.3.1.1.Plateforme de travail traitée

##### IV.3.1.1.1. Caractérisation au laboratoire

Pour classifier le sol utilisé pour la plateforme de travail traitée, plusieurs essais d'identification du sol sont requis par le GTR (2003). Les tarifs de ces essais sont présentés dans le Tableau 4-11. Une valeur moyenne des tarifs en 2024 est considérée.

Tableau IV-11 Tarifs des essais d'identifications du sol

| **Essai** | **Nombre d'essai** | **Coût à l'unité (€) TTC** | **Coût total (€) TTC** |
|---|---|---|---|
| Proctor normal + IPI | 1 | 384 | 384 |
| Valeur au bleu | 1 | 72 | 72 |
| Limite d'Atterberg (cône et rouleaux) | 1 | 120 | 120 |
| Analyse granulométrique à eau 20mm>X>80µm | 1 | 200 | 200 |
| | | **Coût Total (€) TTC** | **776** |

##### IV.3.1.1.2. Location des engins

La mise en place de la plateforme de travail nécessite une location d'engins pour la réalisation des différentes étapes de construction. Pour le cas de la PTC traitée, le sol utilisé pour la PTC et la plateforme de travail est considéré à proximité du site. Le sol sera transporté sur site pour traitement. Le temps de location des engins est calculé en se basant sur les rendements des engins (1.2.3 Engins) avec une valeur minimale de 1 jour (dans le cas où le temps de location est inférieur à 1 jour) avec l'hypothèse qu'un jour de travail vaut 7,5 heures.

Les coûts de location des engins avec chauffeur est une valeur moyenne en 2024 basée sur différents loueurs. La plateforme de travail est de 30 cm et sera donc installée en une seule couche. Les différentes phases de construction, les engins, les tarifs et la durée de location sont présentés dans le Tableau 4-12.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-12 Coût de location des engins avec chauffeur

| Etape | Engin | Coût (€/j) HT | Jours de location | Coût total (€) HT |
|---|---|---|---|---|
| Mise en place du sol | Pelleteuse 15t | 750 | 1 | 750 |
| Réglage | Minipelles sur chenille | 475 | 1 | 475 |
| Arrosage | Tombereau citerne | 340 | 1 | 340 |
| Epandage | Epandeur | 2000 | 1 | 2000 |
| Malaxage | Malaxeur/Pulvimixeur | 1100 | 1 | 1100 |
| Compactage | Rouleau Compacteur 10T | 560 | 1 | 560 |
| | | | **Coût Total (€) HT** | **5225** |
| | | | **Coût Total (€) TTC** | **6270** |

IV.3.1.1.3. Agent de traitement

Le traitement de la plateforme de travail est basé sur les essais en vraie grandeur du Cerema présentés dans le chapitre 2. Un traitement à base de 2% de la chaux est choisi. Les essais de caractérisation mécanique requis sont préconisés par le GTS (2000) et sont donnés avec leurs tarifs moyens en 2024 (Tableau 4-13). Six essais de compression uniaxiale sont réalisés pour déterminer la résistance à la compression pour le sol naturel et le sol traité à 7 et 28 jours de cure (deux échantillons sont requis pour prendre une valeur moyenne pour chaque essai). Une résistance à la compression de 1 MPa est demandée selon le GTS pour la circulation des engins.

Tableau IV-13 Tarifs des essais de caractérisation mécanique du sol

| Essai | Nombre d'essai | Coût à l'unité (€) TTC | Coût total (€) TTC |
|---|---|---|---|
| Proctor normal + IPI | 1 | 384 | 384 |
| Essais d'aptitude | 1 | 125 | 125 |
| Compression uniaxiale | 6 | 65 | 390 |
| | | **Coût Total (€) TTC** | **899** |

La quantité de la chaux et les différents paramètres de la PT traitée sont présentés dans le Tableau 4-14.

Tableau IV-14 Quantité des liants de traitement

| Paramètres | PT traitée |
|---|---|
| Longueur (m) | 50 |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

| | |
|---|---|
| Largeur (m) | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,3 |
| Densité limon (t/m$^3$) | 1,84 |
| Densité PT traitée (t/m$^3$) | 1,78 |
| Volume PTC (m$^3$) | 750 |
| Quantité sol traité (t) | 1335 |
| Quantité limon (t) | 1309 |
| Quantité chaux (t) | 27 |

Le coût total de transport de la chaux est présenté dans le Tableau 4-15. Le nombre de camions requis pour le transport des matériaux est basé sur la quantité de chaux requise (Tableau 4-15).

Tableau IV-15 Prix total de la chaux

| **Paramètres** | **Coût à l'unité (€) HT** | **Quantité** | **Coût total (€) HT** |
|---|---|---|---|
| Transport des matériaux (camion 20T) | 300 | 2 | 600 |
| Chaux (t) | 390 | 27 | 10530 |
| | | **Coût Total (€) HT** | **11130** |
| | | **Coût Total (€) TTC** | **13356** |

IV.3.1.1.4. Coût total

Le coût total de la plateforme de travail traitée est présenté dans le Tableau 4-16.

Tableau IV-16 Coût total de la plateforme de travail traitée

| **Paramètres** | **Coût Total (€) TTC** |
|---|---|
| Caractérisation GTR du sol naturel | 776 |
| Location des engins | 6270 |
| Caractérisation GTS du sol traité | 899 |
| Agent de traitement + transport | 13356 |
| **Coût Total (€) TTC** | **21301** |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### IV.3.1.2. Plateforme de transfert de charge (PTC) traitée

En considérant que le même sol est utilisé pour la plateforme de travail et la PTC traitée, aucuns essais de caractérisation du sol selon le GTR sont requis. La PTC est de 0,4 m d'épaisseur et donc sera installée en deux couches de 20 cm pour assurer le bon compactage.

#### IV.3.1.2.1. Location des engins

Les différentes phases de construction de la PTC traitée, les engins, les tarifs et la durée de location sont présentés dans le Tableau 4-17.

Tableau IV-17 Coût de location des engins avec chauffeur

| Etape | Engin | Coût (€/j) HT | Jours de location | Coût total (€) HT |
|---|---|---|---|---|
| Mise en place du sol | Pelleteuse 15t | 750 | 1 | 750 |
| Réglage | Minipelles sur chenille | 475 | 1 | 475 |
| Arrosage | Tombereau citerne | 340 | 1 | 340 |
| Epandage | Epandeur | 2000 | 1 | 2000 |
| Malaxage | Malaxeur/Pulvimixeur | 1100 | 1 | 1100 |
| Compactage | Rouleau Compacteur 10T | 560 | 1 | 560 |
| Scarification | Tracteur | 555 | 1 | 555 |
| Scarification | Décompacteur/Ripper | 85 | 1 | 85 |
| | | | **Coût Total (€) HT** | **5865** |
| | | | **Coût Total (€) TTC** | **7038** |

#### IV.3.1.2.2. Agents de traitement

Trois formules de traitement (Tableau 4-18) sont testées pour la PTC traitée.

Tableau IV-18 Formules de traitement testées

| Notation | Traitement |
|---|---|
| SCC | 1% Chaux + 4% Ciment |
| SCCO | 1% Chaux + 5% Compaxem® |
| SCA | 1% Chaux + 5% Argiliant+® |

Les essais de caractérisation mécanique selon le (GTS, 2000) sont présentés dans le Tableau 4-19 avec leurs tarifs moyens en 2024. Quatre essais de compression uniaxiale sont réalisés pour caractériser la résistance à la compression du sol traité à 7 et 28 jours de cure. La résistance à la compression du sol naturel est déjà mesurée pour la plateforme de travail traitée.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Trois essais triaxiaux sont réalisés pour déterminer la résistance au cisaillement pour le sol naturel et le sol traité à 7 et 28 jours de cure.

Tableau IV-19 Tarifs des essais de caractérisation mécanique du sol traité

| Essai | Nombre d'essai | Coût à l'unité (€) TTC | Coût total (€) TTC |
|---|---|---|---|
| Proctor normal + IPI | 1 | 384 | 384 |
| Essais d'aptitude | 1 | 125 | 125 |
| Compression uniaxiale | 4 | 65 | 260 |
| Essai triaxial (trois contraintes) | 3 | 672 | 2016 |
| | | **Coût Total (€) TTC** | **2785** |

La quantité des trois liants de traitement et les différents paramètres de la PTC traitée sont présentés dans le Tableau 4-20.

Tableau IV-20 Quantité de liants de traitement

| Paramètres | PT traitée |
|---|---|
| Longueur (m) | 50 |
| Largeur (m) | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,4 |
| Densité limon (t/m3) | 1,84 |
| Volume PTC (m3) | 1000 |
| **SCC (Sol + 1% chaux + 4% ciment)** | |
| Densité PTC traitée (t/m3) | 1,79 |
| Quantité sol traité (t) | 1790 |
| Quantité limon (t) | 1705 |
| Quantité ciment (t) | 69 |
| Quantité chaux (t) | 18 |
| **SCCO (Sol + 1% chaux + 5% Compaxem®)** | |
| Densité PTC traitée (t/m3) | 1,76 |
| Quantité sol traité (t) | 1760 |
| Quantité limon (t) | 1660 |
| Quantité Compaxem® (t) | 84 |
| Quantité chaux (t) | 17 |
| **SCA (Sol + 1% chaux + 5% Argiliant+®)** | |
| Densité PTC traitée (t/m3) | 1,72 |
| Quantité sol traité (t) | 1720 |
| Quantité limon (t) | 1623 |
| Quantité Argiliant+® (t) | 82 |
| Quantité chaux (t) | 17 |

Le coût total de transport des trois liants est présenté dans le Tableau 4-21. Le nombre de camions requis est basé sur la quantité des liants pour chaque formule.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-21 Coût total des liants de traitement

| Paramètres | Coût à l'unité (€) HT | Quantité | Coût total (€) HT | Coût total (€) TTC |
|---|---|---|---|---|
| **SCC (Sol + 1% chaux + 4% ciment)** | | | | |
| Transport des matériaux (camion 20T) | 300 | 5 | 1500 | 1800 |
| Ciment (t) | 241 | 69 | 16629 | 19954,8 |
| Chaux (t) | 390 | 18 | 7020 | 8424 |
| | | | **Coût total (€) TTC** | **30179** |
| **SCCO (Sol + 1% chaux + 5% Compaxem®)** | | | | |
| Transport des matériaux (camion 20T) | 300 | 5 | 1500 | 1800 |
| Compaxem® **(**t) | 249 | 84 | 20916 | 25099,2 |
| Chaux (t) | 390 | 17 | 6630 | 7956 |
| | | | **Coût total (€) TTC** | **34855** |
| **SCA (Sol + 1% chaux + 5% Argiliant+®)** | | | | |
| Transport des matériaux (camion 20T) | 300 | 5 | 1500 | 1800 |
| Argiliant+® (t) | 258 | 82 | 21156 | 25387,2 |
| Chaux (t) | 390 | 17 | 6630 | 7956 |
| | | | **Coût total (€) TTC** | **35143** |

IV.3.1.2.3. Coût total

Le coût total des PTC traitées est présenté dans le Tableau 4-22.

Tableau IV-22 Coût total des PTC traitées

| Paramètres | SCC : Coût Total (€) TTC | SCCO : Coût Total (€) TTC | SA : Coût Total (€) TTC |
|---|---|---|---|
| Location des engins | 7038 | 7038 | 7038 |
| Caractérisation GTS | 2785 | 2785 | 2785 |
| Agents de traitement | 30178,8 | 34855,2 | 35143,2 |
| **Coût Total (€) TTC** | **40002** | **44678** | **44966** |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## IV.3.2. Scénario 2

### IV.3.2.1. Plateforme de travail granulaire

#### IV.3.2.1.1. Location des engins

Une PT granulaire est généralement utilisée dans le cas d'une PTC granulaire. Une plateforme de travail formée du gravier 0/31,5 sera utilisée pour les PTC granulaires. Les phases de construction, les engins, les tarifs et la durée de location sont présentés dans le Tableau 4-23.

Tableau IV-23 Coût de location des engins avec chauffeur

| Etape | Engin | Coût (€/j) HT | Jours de location | Coût total (€) HT |
|---|---|---|---|---|
| Mise en place du sol | Pelleteuse 15t | 750 | 1 | 750 |
| Nivellement | Niveleuse | 475 | 1 | 475 |
| Compactage | Rouleau Compacteur 10T | 560 | 1 | 560 |
| | | | **Coût Total (€) HT** | **1785** |
| | | | **Coût Total (€) TTC** | **2142** |

#### IV.3.2.1.2. Type de plateforme

Une plateforme de travail formée du gravier 0/31,5 est utilisée pour les deux types de PTC (sable et gravier 0/31,5). La quantité du gravier et les différents paramètres de la plateforme de travail sont présentés dans le Tableau 4-24.

Tableau IV-24 Plateforme de travail (gravier 0/31,5)

| Paramètres | PT traitée |
|---|---|
| Longueur (m) | 50 |
| Largeur (m) | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,3 |
| Densité gravier (t/m3) | 1,7 |
| Volume PTC (m3) | 750 |
| Quantité gravier (t) | 1275 |

Le coût total de transport du gravier est présenté dans le Tableau 4-25. Un prix moyen avec transport en 2024 est considéré selon différents fournisseurs pour une distance de transport moyenne (≈50 km).



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-25 Prix total du gravier

| Paramètres | Coût à l'unité (€) HT | Quantité | Coût total (€) HT | Coût total (€) TTC |
|---|---|---|---|---|
| Gravier : matériau + transport (€/t) | 20,36 | 1275 | 25959 | **31151** |

IV.3.2.1.3. Coût total

Le coût total d'une plateforme de travail granulaire (gravier 0/31,5) est présenté dans le Tableau 4-26.

Tableau IV-26 Coût total de la plateforme de travail granulaire

| Paramètres | Gravier : Coût Total (€) TTC |
|---|---|
| Location des engins | 2142 |
| Matériaux granulaires | 31151 |
| **Coût Total (€) TTC** | **33293** |

IV.3.2.2. Plateforme de transfert de charge (PTC) granulaire

IV.3.2.2.1. Location des engins

Deux types de plateformes granulaires sont étudiés dans cette partie selon le type des matériaux granulaires (sable ou gravier 0/31,5). Les phases de construction, les engins, les tarifs et la durée de location sont présentés dans le Tableau 4-27.

Tableau IV-27 Coût de location des engins avec chauffeur

| Etape | Engin | Coût (€/j) HT | Jours de location | Coût total (€) HT |
|---|---|---|---|---|
| Mise en place du sol | Pelleteuse 15t | 750 | 2 | 1500 |
| Nivellement | Niveleuse | 475 | 2 | 950 |
| Compactage | Rouleau Compacteur 10T | 560 | 2 | 1120 |
| | | | **Coût Total (€) HT** | **3570** |
| | | | **Coût Total (€) TTC** | **4284** |

IV.3.2.2.2. Type de plateforme

Le type de la PTC dépends des matériaux granulaires choisis (sable ou gravier 0/31,5). La quantité des matériaux granulaires et les différents paramètres des PTC granulaires sont présentés dans le Tableau 4-28.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau IV-28 Quantité des matériaux granulaires

| Paramètres | PT traitée |
|---|---|
| Longueur (m) | 50 |
| Largeur (m) | 50 |
| Epaisseur (m) | 0,5 |
| Densité sable (t/m3) | 1,5 |
| Densité gravier (t/m3) | 1,7 |
| Volume PTC (m3) | 1250 |
| Quantité sable (t) | 1875 |
| Quantité gravier (t) | 2125 |

Le coût total de transport des matériaux granulaires est présenté dans le Tableau 4-29. Un prix moyen des matériaux avec transport est considéré selon différents fournisseurs pour une distance de transport moyenne (≈50 km).

Tableau IV-29 Prix total des matériaux granulaires

| Paramètres | Coût à l'unité (€) HT | Quantité | Coût total (€) HT | Coût total (€) TTC |
|---|---|---|---|---|
| Sable : matériau + transport (€/t) | 25,12 | 1875 | 47100 | **56520** |
| Gravier : matériau + transport (€/t) | 20,36 | 2125 | 43265 | **51918** |

IV.3.2.2.3. Coût total

Le coût total des PTC granulaires est présenté dans le Tableau 4-30.

Tableau IV-30 Coût total des PTC granulaires

| Paramètres | Sable : Coût Total (€) TTC | Gravier : Coût Total (€) TTC |
|---|---|---|
| Location des engins | 4284 | 4284 |
| Matériaux granulaires | 56520 | 51918 |
| **Coût Total (€) TTC** | **60804** | **56202** |



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

### IV.3.3. Comparaison

Le Tableau 4-31 rappelle les formules de traitement utilisées dans cette étude.

Tableau IV-31 Formules de traitement

| Notation | Traitement |
|---|---|
| SCC | 1% Chaux + 4% Ciment |
| SCCO | 1% Chaux + 5% Compaxem® |
| SCA | 1% Chaux + 5% Argiliant+® |

Les coûts de réalisation des différents types des PTC avec les plateformes de travail correspondantes sont présentés dans le Tableau 4-32.

Tableau IV-32 Coût total de réalisation des PTC

| Plateforme de travail | PTC | Coût Total (€) TTC |
|---|---|---|
| Gravier | Sable | 94097 |
| Gravier | Gravier | 89495 |
| Limon traité à 2% chaux | SCC | 61 303 |
| Limon traité à 2% chaux | SCCO | 65 979 |
| Limon traité à 2% chaux | SCA | 66 267 |

Le coût de réalisation des plateformes granulaires est proche pour les deux cas étudiés et donc une valeur moyenne est considérée (91796 € TTC). De même, pour la plateforme traitée où les trois formules de traitement montrent un coût similaire avec une moyenne de 64516 € TTC, ce qui montre qu'une PTC granulaire est de 42% plus chère qu'une PTC traitée (Figure 4-24).

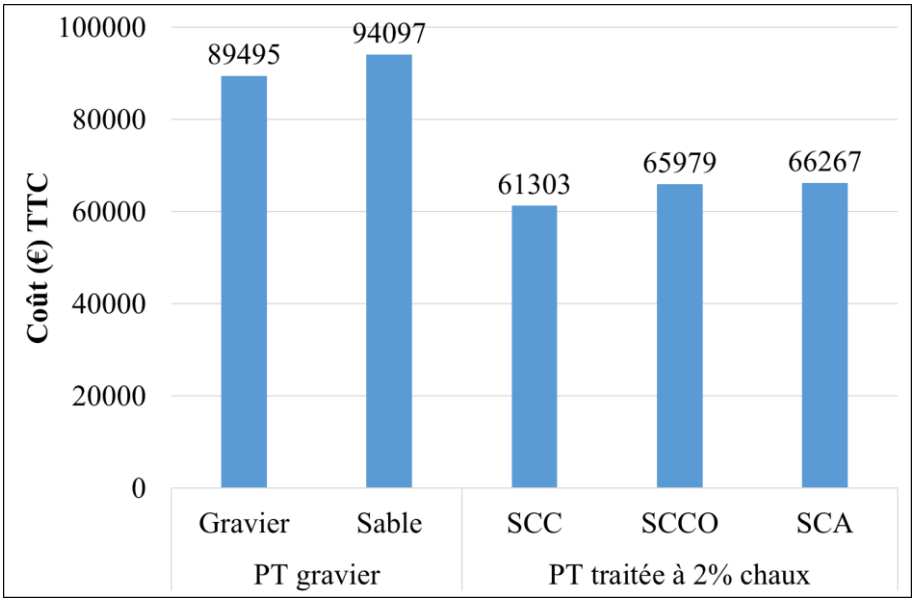



Figure IV-24 Coût total de réalisation des PTC



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

## IV.4.Conclusions

Une étude comparative d'une plateforme de transfert de charge (PTC) granulaire et traitée est présentée dans ce chapitre du point de vue environnemental et économique. Une plateforme de travail formée du gravier 0/31,5 est utilisée dans le cas d'une PTC granulaire (formée du sable ou du gravier 0/31,5) alors qu'une plateforme de travail formée du limon traitée à 2% de chaux est utilisée pour le cas d'une PTC traitée où trois formules de traitement sont testées :

- SCC : 1% chaux et 4% ciment
- SCCO : 1% chaux et 5% Compaxem®
- SCA : 1% chaux et 5% Argiliant+®

Cette étude est basée sur les essais en vraie grandeur réalisés à Cerema de Rouen et présentés dans le chapitre 2.

Une analyse de cycle de vie (ACV) est réalisée pour comparer les impacts environnementaux des plateformes de transfert de charge granulaires et traitées. Une étude paramétrique est basée sur la distance de transport des matériaux granulaires, le type du ciment, les formules de traitement et le fait que les PTC granulaires soient ou non renforcées par des géosynthétiques, afin d'évaluer leurs effets sur l'environnement.

Les résultats obtenus montrent que dans le cas d'une PTC granulaire le paramètre le plus impactant sur le plan environnemental est la distance de transport des matériaux granulaires alors que dans le cas d'une PTC traitée, c'est la production des agents de traitement. Les quatre méthodes d'évaluation (Environmental footprint EF v3.1, Recipe 2016-Midpoint et Endpoint et la norme Française NF EN 15804+A2) présentent des résultats très similaires en termes de scores d'impact pour les différentes catégories et scénarios testés.

Les modèles ACV réalisés soulignent l'importance d'effectuer une analyse multicritère, en prenant en compte toutes les catégories d'impact, étant donné que le changement climatique n'est pas suffisant pour évaluer une solution et étudier son effet sur l'environnement. A titre d'exemple, la PTC traitée présente en général des meilleurs scores d'impact que les PTC granulaires sur toutes les catégories à part celle du changement climatique.

Les différentes formules de traitement testées mettent en évidence l'importance de l'unité fonctionnelle dans les études environnementales. En comparant uniquement les agents de traitement (ciment, Compaxem® et Argiliant+®), il est facile de déterminer lequel est le meilleur sur le plan environnemental, mais en fixant une unité fonctionnelle (dans ce cas Rc 28j > 1,5 MPa) les trois formules de traitement choisies (SCC, SCCO et SCA) présentent des scores d'impact différents et modifient l'effet global sur l'environnement.

La PTC granulaire formée du sable présente des meilleurs scores d'impact que celle formée du gravier 0/31,5 sur toutes les catégories compte tenu des différentes densités de ces matériaux, ce qui signifie qu'une plus grande quantité de gravier est nécessaire pour réaliser une plateforme.

Une étude économique est réalisée pour les mêmes scénarios et les résultats montrent que dans le cas de la PTC traitée le coût est similaire pour les trois formules de traitement testées



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

ayant la même unité fonctionnelle (Rc 28j > 1,5 MPa) et qu'une PTC granulaire formée à partir de sable ou de gravier a un coût similaire qui est 42% plus élevé que celui de la PTC traitée.

Finalement, il n'existe pas de règle générale pour comparer entre une plateforme granulaire et traitée du point de vue économique et environnemental et une étude au cas par cas doit être réalisée afin d'évaluer les effets globaux de ces PTC. Cependant, l'identification d'une unité fonctionnelle et la réalisation d'une analyse multicritère peuvent avoir des effets considérables sur le choix des solutions et permettent d'optimiser les plateformes de transfert de charge (formulations, choix des matériaux granulaires, renforcement ou non par des géosynthétiques et réduction des dosages des liants de traitement, etc.), ce qui peut avoir des avantages énormes sur les plans économiques et environnementaux.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Conclusions et perspectives

## Conclusions

Les travaux de cette thèse intitulée « Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques » s'intègrent dans le cadre de l'axe 1 du projet national ASIRI+ où une étude a été programmée dans le but de bien comprendre les mécanismes de transfert de charge dans les plateformes en sol traité sur inclusions rigides. Cette étude comporte :

- Un volet expérimental avec des essais de caractérisation du laboratoire, des essais en vraie grandeur et des ouvrages instrumentés,
- Un volet numérique avec des modélisations éléments finis (Plaxis 2D),
- Un volet environnemental avec une analyse du cycle de vie (ACV) qui prend en compte les impacts environnementaux des PTC traitées et granulaires.

Cette étude permet d'étudier le comportement des plateformes de transfert de charge en sol traité sur inclusions rigides, évaluer leurs efficacités ainsi que leurs impacts environnementaux.

Plusieurs formules de traitement ont été caractérisées au laboratoire pour différents projets afin d'évaluer les performances mécaniques des sols traités.

- Traitement 1 : Limon de Dieppe de type F1 traité à 1% chaux et 4% ciment (SCC), 1% chaux et 4% Compaxem® (SCCO) et 5% Argiliant+® (SA) (Chapitre 2).
- Traitement 2 : Limon de Dieppe de type F1 traité à 7% de CEM III/A 42,5 (chapitre 3 – 1. Port HAROPA).
- Traitement 3 : Lœss traité à 3 et 5% du Varilith TF1 (chapitre 3 – 2. Remblai routier sur IR en Allemagne).
- Traitement 4 : Sable argileux de type I2 traité à 1, 1,5 et 2% de chaux (chapitre 3 – 3. Digue sur IR dans la centrale de Blayais).
- Traitement 5 : Limon de Dieppe de type F1 traité à 1% chaux et 4% ciment (SCC), 1% chaux et 5% Compaxem® (SCCO) et 1% chaux et 5% Argiliant+® (SCA) (Chapitre 4).

Les différentes formules mettent en évidence l'effet du traitement sur l'évolution des résistances mécaniques des sols traités avec le temps de cure. Pour le traitement 1, une corrélation linéaire est trouvée entre la résistance à la traction et la résistance à la compression avec une pente de 0,11. Ces résultats sont cohérents avec la littérature. Il montre de plus à travers des essais de compression après humidification que le sol traité continue sa prise même quand il est totalement immergé dans l'eau. Pour les traitements 1, 3 et 4, des essais triaxiaux sont réalisés. Ils montrent que le temps de cure n'a pas d'impact sur l'angle de frottement ce qui est également cohérent avec la littérature. Pour le traitement 4, des essais triaxiaux et des essais à la boîte de cisaillement sont réalisés et les résultats montrent qu'un comportement similaire est obtenu pour les deux appareils en ce qui concerne l'évolution de l'angle de frottement en fonction du temps de cure (peu d'évolution est observé). En ce qui concerne la cohésion, une évolution croissante est observée avec le taux de chaux du sol traité pour le triaxial alors qu'à la boîte de cisaillement, il n'y a pas d'évolution avec le temps de cure ce qui ne correspond pas à une évolution attendue. Le traitement 5 met en évidence l'importance de



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

l'unité fonctionnelle dans les études environnementales et économiques vu qu'il est facile de déterminer lequel des trois agents de traitement (ciment, Compaxem® et Argiliant+®) est le meilleur sur le plan environnemental mais en fixant une unité fonctionnelle les formules de traitement choisies (SCC, SCCO et SCA) présentent des scores d'impact différents et modifient l'effet global sur l'environnement.

Deux essais en vraie grandeur ont été réalisés dans la fosse expérimentale du Cerema de Rouen pour étudier le comportement des PTC traitées sur inclusions rigides avec et sans plateforme de travail. Un modèle numérique a été développé avec le logiciel Plaxis 2D afin de représenter le premier essai (PTC traitée sans plateforme de travail) et un autre essai avec une plateforme de transfert de charge (PTC) granulaire réalisé par Terqueux et al. (2022). L'instrumentation met en évidence un transfert de charge immédiat dans la plateforme traitée contrairement au cas de la plateforme granulaire où les mécanismes de transfert de charge sont un peu plus progressifs. La présence d'une plateforme de travail (dans le deuxième essai) modifie significativement le report de charge en tête mais pas en pied des inclusions (dû au frottement négatif). Cette observation confirme que le calcul du report de charge en tête des inclusions (recommandations ASIRI) n'est pas toujours le meilleur paramètre pour évaluer l'efficacité d'un système. Les essais montrent également qu'un vide peut être créé entre le sol compressible et les plateformes traitées après leurs prises ce qui augmente le risque d'un poinçonnement mineur au droit des inclusions rigides.

Notre étude a montré que le schéma du cône de cisaillement (ASIRI, 2012) représente bien le comportement des PTC traitées sur inclusions rigides. La diffusion de la contrainte au sein de la PTC traitée est assimilée à un tronc de cône d'axe vertical, issu de la tête de l'inclusion et formant un angle φ par rapport à la verticale. Cette diffusion a été vérifiée numériquement (Plaxis 2D), analytiquement (schéma du cône de cisaillement) et expérimentalement (mesures et observations). L'étude bibliographique montre, de plus, qu'aucun essai en vraie grandeur n'a été réalisé et qu'aucun ouvrage réel n'a été instrumenté pour tester le comportement réel des PTC traitées sur inclusions rigides d'où l'intérêt des travaux de cette thèse. De plus, la contrainte maximale admissible selon le schéma de rupture par cône de cisaillement est la plus proche de celle mesurée en réalité lors du poinçonnement de la PTC.

La modélisation numérique permet de mieux comprendre et visualiser les mécanismes de transfert de charge et le comportement des PTC traitées. Le modèle numérique développé a été calibré sur les résultats expérimentaux en se basant sur plusieurs critères : la contrainte au niveau des têtes et des pieds des inclusions rigides et le tassement au niveau du Deltagom, du sable et de la PTC. Le modèle calibré met en évidence les mécanismes de transfert de charge par effets de cisaillement dans le remblai ainsi que dans les PTC granulaires et traitées. Il permet de valider les calculs analytiques et les résultats expérimentaux. L'étude paramétrique montre l'importance du compactage des plateformes traitées et son effet sur les efficacités en contrainte et en tassement où un bon compactage de la PTC (densité > 96% ρd OPN) entraîne une augmentation qui peut atteindre 33% des efficacités. La qualité du remblai peut avoir également un grand impact sur les efficacités dû à un meilleur report de charge au droit des inclusions. Tous les paramètres testés présentent des effets différents sur les efficacités en contrainte et en tassement, cependant, il est important d'évaluer les scénarios dans leur ensemble, en tenant compte des effets économiques et environnementaux.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Plusieurs ouvrages instrumentés et applications réelles des PTC traitées sur inclusions rigides sont présentés dans le chapitre 3. Des essais ont été réalisés sur un site du port HAROPA de Rouen pour tester l'efficacité de différents types des plateformes de transfert de charge (PTC) sur inclusions rigides soumises à des charges ponctuelles très lourdes (Patin de grue de 100 tonnes). L'objectif est de renforcer les quais existants avec ces plateformes pour les nouvelles grues portuaires. Cette étude se concentre sur le comportement à court terme des différentes PTC mais présente un intérêt pour l'utilisation des plateformes en sol traité, qui offrent des avantages en termes de tassement, de report de charge et d'efficacité en comparant avec les PTC granulaires et mixtes.

Le premier ouvrage instrumenté a consisté à instrumenter deux zones sous le remblai (BW12) de la route fédérale (B247 – Mühlhausen) construite en Allemagne par VINCI Highways pour observer les mécanismes de transfert de charge. Un report de charge similaire est observé dans les deux zones avec une concentration de contrainte importante sur les têtes des inclusions, une contrainte non négligeable à proximité immédiate des IR et une contrainte très faible sur le sol. Ces mesures seront utilisées par l'entreprise d'amélioration des sols pour une rétro-analyse de leur dimensionnement.

Un deuxième ouvrage a consisté à réhausser les digues existantes dans le CNPE de Blayais pour protéger la centrale contre les inondations externes. Le sol en place a été surmonté d'un remblai de 3,5 m formé d'un sable argileux de type I2 traité à 1% de chaux et l'instrumentation a été installée à différents niveaux du remblai pour observer les mécanismes de transfert de charge. L'instrumentation par des capteurs de pression et de tassement permet de collecter des mesures indiquant une stabilisation rapide du tassement et un transfert de charge significatif vers les têtes des inclusions depuis la construction du remblai (≈ 3 ans).

Une analyse de cycle de vie (ACV) et une étude économique basées sur les essais en vraie grandeur réalisés à Cerema de Rouen (chapitre 2) ont été réalisées pour comparer les impacts environnementaux et économiques des plateformes de transfert de charge granulaires et traitées. Les résultats obtenus montrent que dans le cas d'une PTC granulaire le paramètre le plus impactant sur le plan environnemental est la distance de transport des matériaux granulaires alors que dans le cas d'une PTC traitée, c'est la production des agents de traitement. Les résultats mettent en évidence l'importance d'une analyse multicritère qui prend en compte toutes les catégories d'impact, étant donné que le changement climatique n'est pas suffisant pour évaluer une solution et étudier son effet sur l'environnement. En ce qui concerne les matériaux granulaires, le sable présente des meilleurs scores d'impact que le gravier 0/31,5 sur toutes les catégories d'impact vu les différentes densités de ces matériaux. L'étude économique montre qu'en général une plateforme de transfert de charge granulaire a un coût qui est 42% plus élevé que celui de la PTC traitée.

Pour conclure, il n'existe pas de règle générale pour comparer une plateforme granulaire et une plateforme traitée du point de vue mécanique, économique et environnemental et une étude au cas par cas doit être réalisée afin d'évaluer les effets globaux de ces PTC. Cependant, l'identification d'une unité fonctionnelle et la réalisation d'une analyse multicritère peuvent avoir des effets considérables sur le choix des solutions. Les travaux de cette thèse présentent les étapes nécessaires à la conduite de ces études ce qui permet une comparaison globale entre les PTC granulaires et traitées.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

**Perspectives**

La caractérisation mécanique des sols traités en laboratoire a connu un développement remarquable au cours des dernières années. L'association Française de normalisation (AFNOR) a remis à jour en 2003 et 2005 toutes les normes concernant la confection des échantillons et la réalisation des essais de résistance mécanique des sols traités. Au cours des années, plusieurs auteurs ont caractérisé l'effet du traitement sur les performances mécaniques des sols traités et ont essayé de déterminer des corrélations entre les différentes résistances. Pour aller plus loin dans l'étude, il est important de spécifier les essais à réaliser afin de caractériser les propriétés des PTC traitées sur inclusions rigides, étudier le comportement à long terme par des essais de fatigue et déterminer les facteurs de sécurité à prendre pour évaluer les résistances mécaniques obtenus sur les chantiers en comparant avec celles mesurées en laboratoire.

Les essais en vraie grandeur et les ouvrages instrumentés réalisés dans cette thèse présentent un intérêt pour l'utilisation des PTC traitées sur inclusions rigides à court terme. Cependant il est nécessaire de tester ces plateformes à long terme pour évaluer l'effet de la fatigue sur l'efficacité et le comportement des PTC. Les recommandations ASIRI+ qui seront publiées en 2025 préciseront des critères de dimensionnement des PTC traitées sur inclusions rigides et sont basées sur les travaux de cette thèse. Du point de vue environnemental, il sera intéressant de plus développer les bases de données pour considérer des agents de traitement alternatifs au ciment et à la chaux et présentant une meilleure empreinte carbone.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# Références

**Normes Françaises**


NF EN 13286-45. (2004), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 45 : méthodes d’essai pour la détermination du délai de maniabilité”.

NF EN 196-1. (2016), “Méthodes d’essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances”.

NF EN 197-1. (2012), “Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants”.

NF EN 197-2. (2020), “Ciment - Partie 2 : évaluation et vérification de la constance de la performance”.

NF EN 933-9. (2022), “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essais au bleu de méthylène”.

NF EN 1097-7. (2022), “Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 7 : détermination de la masse volumique réelle du filler - Méthode au pycnomètre”.

NF EN 12948. (2010), “Amendements minéraux basiques - Détermination de la distribution granulométrique par tamisage par voie sèche et par voie humide”.

NF EN 13282-1. (2014), “Liants hydrauliques routiers - Partie 1 : liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité”.

NF EN 13282-2. (2015), “Liants hydrauliques routiers - Partie 2 : liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité”.

NF EN 13282-3. (2015), “Liants hydrauliques routiers - Partie 3 : évaluation de la conformité”.

NF EN 13286-41. (2021), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d’essai pour la détermination de la résistance à la compression des graves traitées aux liants hydrauliques”.

NF EN 13286-42. (2003), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42 : méthode d’essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques”.

NF EN 13286-49. (2004), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 49 : essai de gonflement accéléré pour sol traité à la chaux et/ou avec un liant hydraulique”.

NF EN 13286-50. (2005), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 50 : méthode de confection par compactage avec un appareillage Proctor ou une table vibrante des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques”.

NF EN 13286-52. (2005), “Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 52 : méthode de confection par vibrocompression des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques”.




Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

NF EN 15804+A2. (2019), “Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction”.

NF EN ISO 14040. (2006), “Analyse du cycle de vie - Principes et cadre”.

NF EN ISO 14041. (1998), “Analyse du cycle de vie - Définition de l’objectif et du champ d’étude et analyse de l’inventaire”.

NF EN ISO 14042. (2000), “Analyse du cycle de vie - Évaluation de l’impact du cycle de vie”.

NF EN ISO 14043. (2000), “Analyse du cycle de vie - Interprétation du cycle de vie”.

NF EN ISO 14044. (2006), “Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices”.

NF EN ISO 17892-1. (2014), “Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau”.

NF EN ISO 17892-4. (2018), “Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules”.

NF EN ISO 17892-12. (2018), “Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité”.

NF P15-108. (2000), “Liants hydrauliques - Liants hydrauliques routiers - Composition, spécifications et critères de conformité”.

NF P94-048. (1996), “Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre”.

NF P94-070. (1994), “Sols : reconnaissance et essais - Essais à l’appareil triaxial de révolution - Généralités - Définitions.”

NF P94-078. (1997), “Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.”

NF P94-093. (2014), “Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d’un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié”.

NF P94-100. (2022), “Sols - Reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d’évaluation de l’aptitude d’un sol au traitement”.

NF P98-114-3. (2009), “Assises de chaussées - Méthodologie d’étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 3 : sols traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux”.

NF X30-441. (2008), “Déchets - Détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d’un matériau - Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant/variable”.

XP P94-047. (1998), “Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d’un matériau - Méthode par calcination.”



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

**Liste bibliographique**


Abusharar, S. W., Zheng, J. J., Chen, B. G., & Yin, J. H. (2008). A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes, 27*, 39-52.

Adams, M., & Collin, J. (1997, janvier). Large scale spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 66-72.

Allouche, C. (1972, juillet). Chantier expérimental de traitement aux cendres volantes et à la chaux des graves concassées. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées , n° 67*, 137-141.

Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B. K., & Nahazanan, H. (2015). Performance of Chemically Treated Natural Fibres and Lime in Soft Soil for the Utilisation as Pile-Supported Earth Platform. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, *1*(3), 28. https://doi.org/10.1007/s40891-015-0031-5

ASIRI+ (Éd.). (2019). *Projet national ASIRI+*.

ASIRI (Éd.). (2012). *Recommandations pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides*. Presses des ponts.

Boutonnet, M., & Livet, J. (1984). Sols fins traités en assise de chaussées : Influence du traitement des limons sur leur comportement au gel. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°134*.

Briancon, L., Simon, B., & Thorel, L. (2020). Le projet ASIRI+ : Amélioration et Renforcement des Sols par Inclusions RIgides. *JNGG2020,* 8. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03200347

Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des élèments perturbateurs de la stabilisation*. Ecole Nationale Supérieure des Mines St-Etienne.

Capony, A., Muresan, B., Dauvergne, M., Auriol, J.-C., Ferber, V., & Jullien, A. (2013). Monitoring and environmental modeling of earthwork impacts : A road construction case study. *Resources, Conservation and Recycling*, *74*, 124-133. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.007

Cartiaux, F.-B., Gellée, A., De Buhan, P., & Hassen, G. (2007). Modélisation multiphasique appliquée au calcul d'ouvrages en sols renforcés par inclusions rigides. *Revue Française de Géotechnique*, *118*, 43-52.

Castaneda-Lopez, M., Lenoir, T., Thorel, L., & Sanfratello, J.-P. (2024). Mechanical features of stabilized soils with low cement content. *ECSMGE 2024 - XVIII European conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Portuguese Geotechnical Society*, 375-379.




Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Chabrat, N., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2023). In Situ Alteration of the Hydro-Mechanical Behaviour of a Compacted Stabilised Expansive Soil. *Geotechnics, 3*(3), 921-936. https://doi.org/10.3390/geotechnics3030049

Chen, R. P., Chen, Y. M., Han, J., & Xu, Z. Z. (2008). A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one dimensional compression. *Canadian Geotechnical Journal (45)*, 611-623.

Chevalier, B. (2008). *Études expérimentale et numérique des transferts de charge dans les matériaux granulaires. Application au renforcement de sols par inclusions rigides.* Université Grenoble 1 - Joseph Fourier.

Combarieu, O. (1974). Effet d'accrochage et méthode d'évaluation du frottement négatif. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 71*, 42-50.

Combarieu, O. (1988). Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue Française de Géotechnique, 74*, 42-50.

Combarieu, O. (2007). Remblais sur sol compressible et inclusions rigides. Amélioration de l'approche du dimensionnement. *Révue française de géotechnique, 132*, 45-54.

Combarieu, O., Gestin, F., & Pioline, M. (1994). Remblais sur sol améliorés par inclusions rigides : Premier chantier. In *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (Vol. 191, p. 55-61).

Cuira, F., & Simon, B. (2009). Deux outils simples pour traiter des interactions complexes d'un massif renforcé par inclusions rigides. *Proc. 17th Int. Conf. on soil Mech. and Found. Eng, 1163-1166.*

Du Mesnil Adelée, M. (1984, décembre). Sols fins traités en assises de chaussées : Comportement de structures de chaussées en limon traité à la chaux et au ciment : Chantiers expérimentaux. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°134*, 46-51.

ECORCE. (2013, mars 4). *Manuel utilisateur ECORCE 2.0*. Institut Français des sciences et technologies des transports de l'aménagement et des réseaux - IFSTTAR.

Ferber, V., Bourguet, R., Ouvry, J.-F., Cibot, L., & Gautier, Y. (2015). *Conception d'un matelas en sols traités renforcé par géosynthétique sur inclusions rigides : Rocade de Bourges*. 10.

Frank, R., & Zhao, S. R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfocement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 119*, 17-24.

Garcia, J. A. B., Rodríguez Rebolledo, J. F., Dos Santos Mützenberg, D. V., Caicedo, B., & De Farias Neves Gitirana, G. (2021). Experimental Investigation of a Load-Transfer Material for Foundations Reinforced by Rigid Inclusions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147*(10), 04021110. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002649



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Geetanjali, D., Razakamanantsoa, A., Herrier, G., Saussaye, L., Lesueur, D., & Deneele, D. (2021). *Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty soil embankment after seven years of atmospheric exposure : Mechanical, physiochemical, and microstructural studies*.

Girout, R., Blanc, M., & Thorel, L. (2013). *Apport des géosynthétiques dans le renforcement par inclusions rigides des sols compressibles*. 11. https://www.researchgate.net/publication/275654918

GTR. (1992). *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes.

GTR. (2023). *Guide des terrassements, des remblais et des couches de forme, GTR*.

GTS. (2000). *Guide Technique Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques—Application en remblais et couches de forme – SETRA / LCPC, 2000*.

Handy, R. L. (1985, mars). The arch in soil arching. *Journal of Geotechnical Engineering*, 302-317.

Hewlett, W. J., & Randolph, M. F. (1988). Analysis of piled embankment. *Ground Engineering*, *21*, 12-18.

Kempfert, H. G., Zaeske, D., & Alexiew, D. (1999). Interactions in reinforced bearing layers over partial supported underground. *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure*, 1527-1532.

Low, B. K., Tang, S. K., & Choa, V. (1994). Arching in piled embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *120*, 1917-1938.

McKelvey III, J. A. (1994). The Anatomy of Soil Arching. *Geotextiles and Geomembranes*, *13*(5), 317-329.

Nancey, A., & Briancon, L. (2010). *Renforcement de remblais sur inclusions - Exemples de réalisations*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG, 2010, 8.

Okyay, U. S. (2010). *Etude expérimentale et numérique des transferts de charge dans un massif renforcé par inclusions rigides—Application à des cas de chargements statiques et dynamiques*. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Okyay, U. S., & Dias, D. (2012). Use of lime and cement treated soils with rigid inclusions. *3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6.

Okyay, U. S., Dias, D., Thorel, L., & Rault, G. (2014). Centrifuge Modeling of a Pile-Supported Granular Earth-Platform. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *140*(2), 04013015. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001004

Preteseille, M. (2014). *Comportement à la fatigue des sols traités aux liants hydrauliques dans les plates-formes des structures ferroviaires pour LGV - Modélisations numérique et expérimentale de leur comportement*. Université Nantes Angers Le Mans.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

Preteseille, M., Lenoir, T., & Hornych, P. (2013). Sustainable upgrading of fine-grained soils present in the right-of-way of High Speed Rail projects. *Constr. Build. Mater. 44*, 48-53.

Rigot, A. (1984, décembre). Sols fins traités en assises de chaussées : Fabrication et mise en oeuvre d'un limon traité à la chaux et au ciment : Essais sur chantier expérimental. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°134*, 35-45.

RTR. (1976). *La recommandation pour les terrassements routiers, Guide technique*. Bull. liaison laboratoire central des ponts et chaussées.

Russel, D., & Pierpoint, N. (1997, novembre). An assessment of design methods for piled embankments. *Ground Engineering*, 34-36.

Simon, B. (2001). Une méthode intégrée pourdimensionner lesréseauxd'inclusions rigides en déformation. *International society for soil mechanics and geotechnical engineering*, 1007-1010.

Sudret, B., & De Buhan, P. (2001). Multiphase model for inclusion-reinforced geostructures : Application to rock-bolted tunnels and piled raft foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *25*(2), 155-182.

Terqueux, C., Briancon, 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. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG2022 - Lyon*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03720103

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1002/9780470172766

Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A., & van Tol, A. F. (2013). An analytical model for arching in piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, *39*, 78-102. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.005

Zaeske, D., & Kempfert, H. G. (2002). Berechnung und Wirkungsweise von unberwehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punkt- und linienförmigen Traggliedern. *Bauingenieur*, *77*, 80-86.



Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés

# FOLIO ADMINISTRATIF

## THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON

NOM : MANNAH DATE de SOUTENANCE : 17/02/2025
Prénoms : Julien

TITRE : Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques

NATURE : Doctorat Numéro d'ordre : 2025ISAL0012
Ecole doctorale : MEGA (Mécanique, énergétique, génie civil, acoustique)

Spécialité : Génie civil

RESUME : La technique de renforcement des sols par inclusions rigides (IR) a connu un développement rapide au cours des dernières années. Cette technique combine des inclusions rigides verticales traversant la couche de sol compressible et une plateforme de transfert de charge (PTC) installée entre l'ouvrage et les inclusions. Ces éléments transfèrent la charge vers des horizons porteurs en pied d'inclusions sans surcharger la couche de sol compressible. L'utilisation des plateformes de transfert de charge granulaires est courante dans les projets de renforcement du sol par inclusions rigides. Cependant, l'exploitation des ressources naturelles a fortement augmenté due à la croissance démographique et l'évolution du marché de la construction d'où la nécessité de trouver des solutions alternatives afin de limiter la pression sur les ressources en matériaux granulaires. Dans ce contexte, un traitement de la couche supérieure du sol en place peut être envisagé afin de limiter le sol d'apport. Le projet national ASIRI « Amélioration des sols par inclusions rigides » a été mené en France entre 2005 et 2011 pour proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement du renforcement de sol par IR. En 2019, un nouveau projet national (ASIRI+) a été initié pour compléter les recommandations ASIRI (2012) sur des sujets insuffisamment traités tel que celui des PTC en sol traité. Les travaux de la présente thèse intitulée « Étude du comportement des plateformes en sol traité sur inclusions rigides : Approches expérimentales et numériques » s'intègrent dans le cadre du projet national ASIRI+ et ont pour objectif d'apporter des éléments de compréhension sur les mécanismes développés au sein des plateformes sur IR et de proposer de nouvelles règles de dimensionnement. Les moyens mis en œuvre sont expérimentaux avec des essais en laboratoire à échelle 1, des caractérisations des différents traitements et des ouvrages réels instrumentés. Ces moyens sont aussi numériques par la modélisation numérique de ces renforcements de sol calibrée sur les résultats des expérimentations. Enfin, un volet environnemental complète cette étude avec une analyse de cycle de vie (ACV) qui prend en compte les impacts environnementaux des PTC granulaires et traitées. Les essais de caractérisation en laboratoire montrent bien l'effet du traitement sur les résistances mécaniques du sol traité. Des essais de résistances à la compression, flexion, traction (essai brésilien) et au cisaillement (essais triaxiaux) sont réalisés pour évaluer les performances mécaniques du sol traité. Plusieurs essais à échelle 1 permettent de tester le comportement des PTC en sol traité sur inclusions rigides où un comportement assimilable à celui d'une dalle est observé. Deux modes de rupture « poinçonnement et flexion » sont observés dans ces essais. L'instrumentation montrent que le transfert de charge dans les PTC traitées est immédiat contrairement au cas des PTC granulaires où les mécanismes de transfert de charge sont un peu plus progressifs. L'effet de la présence d'une plateforme de travail sous les PTC traitées est aussi évalué dans ces essais. Le modèle numérique développé permet d'évaluer à travers une étude paramétrique l'effet de différents paramètres sur l'efficacité en contrainte et en tassement du système. Le schéma du cône de cisaillement (ASIRI, 2012) représente le mieux les mécanismes de transfert de charge dans la PTC traitée. La diffusion de la contrainte est assimilée à un tronc de cône, issu de la tête de l'inclusion et formant un angle φ par rapport à la verticale. Cela a été vérifiée numériquement, analytiquement et expérimentalement. L'ACV réalisée prend en compte les effets environnementaux des PTC granulaires et traitées et montre qu'une analyse multicritère est requise pour chaque projet de renforcement du sol afin d'évaluer l'impact environnemental global.

MOTS-CLÉS : Plateforme de transfert de charge, Inclusions rigides, Traitement de sol

Laboratoire (s) de recherche : GEOMAS (Géomécanique, Matériaux, Structures)

Directeur de thèse: Laurent Briançon

Présidente de jury : Irini Djeran-Maigre

Composition du jury :
Olivier Cuisinier (Professeur, Université de Lorraine, Rapporteur), Hussein Mroueh (Professeur, Université de Lille, Rapporteur), Irini Djeran-Maigre (Professeure, INSA Lyon/GEOMAS, Examinatrice), Orianne Jenck (Maître de conférences, HDR, Université Grenoble Alpes, Examinatrice), Laurent Briançon (Professeur, INSA Lyon/GEOMAS, Directeur), Daniel Dias (Professeur, Université Grenoble Alpes, Co-directeur), Thomas Lenoir (Ingénieur Divisionnaire des TPE, HDR, Université Gustave Eiffel, Encadrant), Louis Marracci (Directeur Technique, Arcadis ESG, Invité), Caroline Chalak (Ingénieur, Arcadis ESG, Invitée)

Thèse accessible à l'adresse : https://theses.insa-lyon.fr/publication/2025ISAL0012/these.pdf © [J. Mannah], [2025], INSA Lyon, tous droits réservés