THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP² - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production
Spécialité : 2MGE - Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie
Unité de recherche : Laboratoire Sols, Solides, Structures et Risques

Micro-mécanique de l'interaction milieu granulaire-géogrille souple sous chargement complexe - Investigation expérimentale et numérique

Micro-mechanics of the interaction between a granular matter and a soft geogrid under complex loading - Experimental and numerical investigation

Présentée par :

Ahmad EL AYOUBI

Direction de thèse :

Fabrice EMERIAULT PROFESSEUR DES UNIVERSITES, GRENOBLE INP - UGA	Directeur de thèse
Pascal VILLARD PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES	Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Marwan AL HEIB
DIRECTEUR DE RECHERCHE, INERIS
Eric VINCENS
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Ecole Centrale de Lyon

Thèse soutenue publiquement le **17 novembre 2025**, devant le jury composé de :

Stéphane GRANGE, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA Lyon	Président
Fabrice EMERIAULT, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP - UGA	Directeur de thèse
Marwan AL HEIB, DIRECTEUR DE RECHERCHE, INERIS	Rapporteur
Eric VINCENS, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Ecole Centrale de Lyon	Rapporteur
Claire SILVANI, MAITRESSE DE CONFERENCES, INSA Lyon	Examinatrice
Caroline CHALAK, INGENIEURE DOCTEURE, ARTELIA	Examinatrice

Invités :

Pascal VILLARD
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes
Luc SIBILLE
MAITRE DE CONFERENCES, Université Grenoble Alpes

Remerciements

Au cours de ce parcours, j'ai bénéficié de l'aide et du soutien de nombreuses personnes qu'il me serait difficile de citer toutes ici. Je me limiterai donc à mentionner celles et ceux qui ont été le plus directement impliqués dans la réalisation de ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance à mes encadrants Fabrice Emeriault, et Pascal Villard. Merci de m'avoir accueilli dans ce projet, pour votre soutien constant et vos conseils éclairés. Votre rigueur scientifique, vos encouragements et votre patience, notamment dans les moments difficiles, ont été essentiels à la réussite de cette recherche. À Luc Sibille, bien qu'il n'ait pas été encadrant officiel, je suis reconnaissant pour son implication constante dans nos discussions, son suivi attentif et ses nombreuses suggestions, qui ont contribué de manière décisive à l'avancement de mes travaux.

Je remercie également l'École Doctorale I-MEP2 pour le financement de ce projet et pour m'avoir offert l'opportunité de mener ces recherches dans un environnement scientifique stimulant.

J'exprime toute ma gratitude aux rapporteurs, Marwan Al Heib et Eric Vincens, pour avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi qu'aux autres membres du jury, Stéphane Grange, Claire Silvani et Caroline Chalak, pour l'opportunité qu'ils m'ont offerte en participant à ma soutenance.

Au sein du laboratoire 3SR, je souhaite remercier l'équipe administrative pour son efficacité et son accompagnement, qui ont facilité mon séjour. J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des membres du laboratoire et à mes collègues pour leur aide, qu'il s'agisse des expérimentations, des échanges scientifiques ou simplement de moments de convivialité. Une mention particulière à l'équipe de football avec laquelle on a eu la chance de remporter la compétition inter-laboratoires, ainsi qu'à tous ceux qui nous ont soutenus dans cette belle aventure sportive.

Je remercie également Olatounde Yaba, responsable du projet CyLo RT, ainsi que Fabrice Emeriault et Orianne Jenck, pour m'avoir donné l'opportunité de contribuer à ce projet aux côtés des représentants du laboratoire 3SR.

Mes remerciements vont aussi au Comité Français des Géosynthétiques pour m'avoir sélectionné comme lauréat lors du concours scientifique dans le cadre de la conférence EuroGeo8, une reconnaissance qui a constitué un encouragement précieux pour la poursuite de mes recherches.

Je n'oublie pas mes amis et collègues, pour leur amitié, leurs encouragements et la richesse de nos échanges, qui ont rendu ce parcours plus agréable et motivant.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude la plus profonde à ma famille pour son soutien indéfectible. Tout a commencé grâce à mes parents, mon père Omar et ma mère Houda, qui m'ont transmis l'éducation, les outils et les valeurs nécessaires pour réussir. À mes frères Mohammad, Amer et Hadi, qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragé à aller jusqu'au bout de ce doctorat, j'adresse toute ma reconnaissance et mon affection.

À toutes celles et ceux qui ne sont pas explicitement nommés, vous n'êtes pas oubliés : je témoigne ici ma gratitude sincère pour votre contribution, directe ou indirecte, à l'aboutissement de cette thèse.

Résumé

Ce projet de recherche s'inscrit dans le contexte de l'utilisation croissante des géogrilles pour le renforcement et la stabilisation des sols granulaires, en particulier dans les infrastructures de transport telles que les chaussées et les voies ferrées. L'objectif principal est de mieux comprendre, à l'échelle microscopique, les mécanismes d'interaction entre les particules de sol et les éléments de géogrille, afin d'identifier les paramètres déterminants de la performance du système sol–géogrille et de fournir des bases scientifiques pour son dimensionnement.

La démarche adoptée repose sur une approche conjointe expérimentale et numérique. Sur le plan expérimental, des essais triaxiaux ont été réalisés sur des échantillons granulaires secs de différentes tailles, complétés par des campagnes de tomographie à rayons X. Ces analyses ont permis d'évaluer l'effet du renforcement sur la rigidité initiale, la résistance au pic, le comportement volumique et la localisation des déformations, tout en révélant l'impact de la géogrille sur la microstructure et la porosité locale autour des ouvertures.

Sur le plan numérique, des simulations par la méthode des éléments discrets (DEM), mises en œuvre dans YADE, ont permis de reproduire fidèlement les conditions expérimentales. Différentes représentations de grains (sphères, et agrégats de sphères) et un modèle de la géogrille simplifié par un réseau de nœuds et de liaisons cylindriques ont été testés. La calibration du modèle, effectuée sur la base des courbes contrainte–déformation, du comportement volumique et des observations tomographiques, a montré une bonne capacité prédictive du modèle pour la rigidité initiale, la résistance au pic et la distribution des contacts à l'état initial.

Par la suite, une analyse numérique approfondie du comportement triaxial a été conduite. Les résultats mettent en évidence que l'efficacité de la géogrille repose sur la synergie entre les mécanismes de frottement et butée, dont la mobilisation dépend des propriétés mécaniques et géométriques du système. La zone d'influence autour de la géogrille se caractérise par une augmentation locale de la porosité et une redistribution en forme de dôme des contraintes horizontales. Le suivi des efforts internes montre en outre une mobilisation hétérogène de la géogrille, les nervures centrales étant plus sollicitées que celles en périphérie.

L'étude paramétrique confirme que la performance du système dépend de l'équilibre entre : les propriétés du sol (forme des grains, frottement intergranulaire), les conditions d'échantillon (confinement, élancement, nombre et position des nappes), et les caractéristiques de la géogrille (rigidité, taille, frottement d'interface). La rigidité de la géogrille présente un seuil d'efficacité au-delà duquel les performances se stabilisent. Par ailleurs, le rôle stabilisateur du renfort est confirmé : sous sollicitations cycliques, la géogrille limite significativement l'accumulation de déformations permanentes.

Cette recherche propose ainsi un cadre méthodologique robuste, combinant essais triaxiaux, tomographie 3D et simulations DEM, pour étudier les mécanismes multi-échelles d'interaction sol–géogrille. Dans l'ensemble, elle montre que les géogrilles agissent à la fois comme éléments de renforcement (accroissement de la résistance et de la rigidité) et de stabilisation (contrôle des déformations différées et maintien de la microstructure). Ces résultats, issus d'une approche intégrée expérimentale et numérique, constituent une avancée notable pour la compréhension des interactions micromécaniques sol–géogrille et offrent des perspectives concrètes pour l'optimisation des dispositifs de renforcement et de stabilisation des sols granulaires.

Mots clés : Inclusion, Milieu granulaire, Méthode des Eléments Discrets, Tomographie RX, Interaction sol-structure, Géogrille.

Abstract

This research project is set in the context of the increasing use of geogrids for the reinforcement and stabilization of granular soils, particularly in transportation infrastructures such as roads and railways. The main objective is to gain a deeper understanding, at the microscopic scale, of the interaction mechanisms between soil particles and geogrid elements, in order to identify the key parameters governing the performance of the soil–geogrid system and to provide scientific bases for its design.

The adopted methodology combines experimental and numerical approaches. On the experimental side, triaxial tests were conducted on dry granular samples of different sizes, complemented by X-ray tomography campaigns. These analyses made it possible to assess the effect of reinforcement on initial stiffness, peak strength, volumetric behavior, and strain localization, while also revealing the influence of the geogrid on the microstructure and local porosity around the apertures.

On the numerical side, simulations using the Discrete Element Method (DEM), implemented in YADE, were conducted to replicate the experimental conditions. Different grain representations (spheres and clumps) and a simplified geogrid model consisting of a network of nodes and cylindrical links were tested. Model calibration, based on stress–strain curves, volumetric behavior, and tomographic observations, demonstrated a good predictive capacity for initial stiffness, peak strength, and contact distribution at the initial state.

A detailed numerical analysis of the triaxial behavior was then carried out. The results highlight that the efficiency of the geogrid relies on the synergy between friction and abutment mechanisms, whose mobilization depends on the mechanical and geometrical properties of the system. The influence zone around the geogrid is characterized by a local increase in porosity and a dome-shaped redistribution of horizontal stresses. The monitoring of internal forces further shows heterogeneous mobilization of the geogrid, with central ribs being more solicited than peripheral ones.

The parametric study confirms that the system performance depends on the balance between soil properties (grain shape, interparticle friction), sample conditions (confinement, slenderness, number and position of geogrid layers), and geogrid characteristics (stiffness, aperture size, interface friction). The geogrid stiffness shows a threshold of efficiency beyond which performance stabilizes. Moreover, the stabilizing role of the reinforcement was confirmed: under cyclic loading, the geogrid significantly limits the accumulation of permanent strains.

This research thus proposes a robust methodological framework that combines triaxial testing, 3D tomography, and DEM simulations to investigate the multiscale mechanisms of soil–geogrid interaction. Overall, it demonstrates that geogrids act both as reinforcement elements (enhancing strength and stiffness) and as stabilizing elements (controlling long-term deformations and preserving soil microstructure). These results, obtained from an integrated experimental and numerical approach, represent a significant step forward in the understanding of soil–geogrid micromechanical mechanisms and offer concrete perspectives for optimizing reinforcement and stabilization systems in granular soils.

Keywords: Inclusion, Granular material, Discrete Element Method, X-ray Tomography, Soil–structure interaction, Geogrid.

Acronymes et Abréviations

DEM	Méthode des Eléments Discrets
Clumps	Agrégats de sphères (Formes C1 et C2)
Z	Selon le contexte : Numéro atomique (tomographe) – Nombre de coordination (simulation)
$N_{v_{moyen}}$	Nombre moyen des particules voisins par particule
I	Selon le contexte : Moment d'inertie (rigidité des nervures) – Nombre inertiel (équilibre mécanique du sustème lors d'une simulation)
D_{50}	Taille médiane des particules (mm)
C_u	Coefficient d'uniformité
C_u	Coefficient de courbure
ρ_d	Masse volumique sèche (Kg/m^3)
n	Porosité
B40x40	Géogrille biaxiale avec ouverture carrée de taille 40 mm
J	Module de traction de la géogrille (kN/m)
J_θ	Rigidité radiale sécante de la géogrille le long d'une direction d'angle θ (kN/m)
b/D_{50}	Rapport entre la taille d'ouverture de la maille et la taille moyenne des grains
xG	Configuration de l'échantillon en nombre de géogrille ; x = {0, 1, 2, 3}
H/D	Elancement de l'échantillon de hauteur H et de diamètre D
σ_i	Contrainte sur les parois de l'échantillon le long de l'axe i = {x, y, z} (kPa)
q	Contrainte déviatorique (kPa)
p	Contrainte moyenne (kPa)
ε_i	Déformation de l'échantillon le long de l'axe i = {x, y, z} (%)
ε_v	Déformation volumique de l'échantillon (%)
$\dot{\varepsilon}_z$	Taux de déformation appliqué le long de la direction verticale « z » (s^{-1})
q_{xG}	Contrainte déviatorique maximale pour la configuration xG (kPa)
σ_c	Contrainte de confinement (kPa)
ϕ_{int}	Angle de frottement de contact (°)
ψ	Angle de dilatance (°)
ϕ	Angle de frottement macroscopique apparente (°)
$\phi_{grains-grains}$	Angle de frottement de contact entre grains (°)
$\phi_{grains-géogrille}$	Angle de frottement d'interface entre les grains et la géogrille (°)
E_c	Module de contact qui définit la rigidité normale de contact K_n (Pa)
E	Module de Young apparent (MPa)
δq	Gain de résistance définit comme la différence des résistances maximales entre une configuration renforcé et non renfocé : $q_{xG} - q_{0G}$ (kPa)
$\delta q/\sigma_c$	Gain de résistance normalisé par la contrainte de confinement
$\delta q/q_{0G}$	Gain de résistance relatif par rapport au cas non renforcé (%)
F_n	Selon le contexte : Force normale de contact – Force normale de la nervure (N)
ε_{Gi}	Déformation de la géogrille le long d'un axe i = {1, 2, 3, etc.} (%)
ε_{Gmoy}	Déformation moyenne de la géogrille dans la direction X ou Y (%)
F_b	Force de butée à l'interaction grains-géogrille (N)
F_f	Force de frottement à l'interaction grains-géogrille (N)
F_c	Force de contact (N)

Table des matières

Remerciements i
Résumé ii
Abstract iii
Acronymes et Abréviations iv
Table des matières v
Liste des figures ix
Liste des tableaux xviii
1 Introduction 1
1.1 Contexte 1
1.1.1 Contexte général 1
1.1.2 Problématique scientifique et enjeux multi-échelles 1
1.2 Matériaux géosynthétiques 2
1.2.1 Généralités 2
1.2.2 Géogrille 3
1.3 Renforcement et stabilisation des sols par géosynthétiques 5
1.4 But et objectifs 6
1.5 Plan et organisation du mémoire 7
2 Bibliographie 9
2.1 Historique des études réalisées sur les géogrilles 9
2.2 Etat de l'art 9
2.2.1 Introduction générale 10
2.2.2 Mécanismes d'interaction géogrille – milieu granulaire 11
2.2.3 Distribution des contraintes verticales 13
2.2.4 Effets du nombre et de la position de la géogrille sur le comportement mécanique 14
2.2.5 Zone d'influence stabilisée mécaniquement 16
2.2.6 Paramètres influençant l'interaction entre le matériau et la géogrille 20
2.2.6.1 Taille de l'ouverture de la géogrille 20
2.2.6.2 Forme de l'ouverture de la géogrille 21
2.2.6.3 Rigidité de la géogrille 23
2.2.7 Résultats significatifs motivant le présent projet 23
2.2.7.1 Numérique sur l'aspect renforcement 23
2.2.7.2 Expérimental sur l'aspect stabilisation 23
2.3 Conclusions 24
3 Méthodologie et caractérisation expérimentales 26
3.1 Matériaux utilisés 26
3.1.1 Propriétés du matériau granulaire 26
3.1.1.1 Granulométrie 26

3.1.1.2 Paramètres de forme générale 27
3.1.2 Propriétés de la géogrille 29
3.1.2.1 Sélection de la géogrille 30
3.1.2.2 Propriétés mécaniques 30
3.1.3 Procédure de préparation 32
3.2 Essais triaxiaux 34
3.2.1 Répétabilité de la méthode de préparation des échantillons 35
3.2.2 Réponse mécanique des échantillons non renforcés 37
3.2.3 Réponse mécanique des échantillons renforcés 40
3.3 Imagerie 3D par tomographie rayons X 44
3.3.1 Principes de la tomographie à rayons X 45
3.3.2 Traitement d'images tomographiques 46
3.3.3 Tomographies et interprétation des images 48
3.3.3.1 Campagne au Laboratoire 3SR : Université Grenoble Alpes, France 48
3.3.3.2 Campagne au Centre d'imagerie à rayons X μ-VIS : Université de Southampton, Royaume-Uni 52
3.4 Conclusion générale 65
4 Méthodologie numérique 67
4.1 Méthode de modélisation 67
4.1.1 Nature discontinue d'un sol granulaire 67
4.1.2 Nature continue des géosynthétiques 68
4.1.3 Méthode numérique retenue pour la thèse 69
4.2 YADE – Définition 69
4.3 Simulations dans YADE 70
4.3.1 Interaction entre les particules de sol et la géogrille 70
4.3.2 Calculs des forces de contact et mouvements entre particules 73
4.4 Développements numériques spécifiques au sol renforcé par géogrille 75
4.4.1 Modélisation des particules de sol 75
4.4.1.1 Forme des particules 75
4.4.1.2 Construction et analyse de la forme des particules 76
4.4.2 Modélisation de la géogrille 81
4.4.2.1 Construction de la géogrille 81
4.4.2.2 Calibration numérique des propriétés mécaniques de la géogrille 83
4.4.3 Géométrie et préparation de l'échantillon 88
4.4.3.1 Représentation du domaine numérique 88
4.4.3.2 Préparation numérique de l'échantillon 89
4.5 Synthèse 95
5 Paramétrage du modèle numérique et confrontation expérimentale 96
5.1 Description de l'outil de chargement triaxial 96
5.2 Effet des caractéristiques de la répartition initiale des particules 100
5.3 Comparaison entre données expérimentales et simulations numériques 104

5.3.1 Représentativité des échantillons triaxiaux étudiés 104
5.3.1.1 Granulométrie et adéquation des dimensions de l'échantillon 105
5.3.1.2 Elancement des échantillons 107
5.3.2 Paramètres de calibration et validation du modèle 108
5.3.2.1 Réponse contrainte-déformation 109
5.3.2.2 Réponse volumétrique 115
5.3.2.3 Synthèse sur la calibration et validation du modèle 116
5.3.3 Analyse comparative des états initiaux : validation du modèle numérique à partir d'imagerie 3D 117
5.3.3.1 Procédure retenue pour l'étude de la microstructure 117
5.3.3.2 Evaluation de la représentativité géométrique des grains 120
5.3.3.3 Analyse quantitative de la porosité locale 122
5.3.3.4 Investigation des contacts intergranulaires : nombre et orientation des contacts 127
5.3.3.5 Synthèse sur la cohérence entre données tomographiques et modèle numérique 136
5.4 Conclusion générale 138
6 Analyse numérique du comportement triaxial d'un matériau granulaire renforcé par géogrille 139
6.1 Comportement global du matériau : influence de la géogrille 139
6.1.1 Effet global du renforcement 140
6.1.2 Influence de la position de la nappe de géogrille 141
6.1.3 Influence du nombre de nappes de géogrille 143
6.1.4 Influence conjointe de l'élancement et du nombre de nappes de géogrille sur le comportement triaxial d'un matériau granulaire 145
6.2 Comportement local et interactions microscopiques 146
6.2.1 Zone d'influence mécanique de la géogrille 146
6.2.1.1 Champs de porosité locale 147
6.2.1.2 Champs de contraintes locales 151
6.2.1.3 Analyse de l'état de déformation des échantillons 156
6.2.2 Efforts et déformations dans la géogrille 157
6.2.2.1 Suivi des efforts internes dans les éléments de géogrille 157
6.2.2.2 Déformation de la géogrille et corrélations avec le comportement global 162
6.2.3 Analyse micromécanique des interactions grain-géogrille 164
6.2.3.1 Identification des mécanismes locaux d'interaction grain–géogrille 164
6.2.3.2 Contribution de la butée et du frottement dans la mobilisation de la géogrille 166
6.3 Etude paramétrique 169
6.3.1 Effet du confinement appliqué 170
6.3.2 Effet de l'élancement de l'échantillon sur les mécanismes locaux 172
6.3.3 Effet de la forme des grains 173
6.3.4 Effet du frottement d'interface grain-géogrille 176
6.3.5 Effet de la rigidité de la géogrille 179

6.3.6 Effet de la taille et de la forme de la géogrille 182
6.3.7 Conclusion générale 186
6.4 Analyse préliminaire du comportement cyclique 187
6.4.1 Comportement contrainte–déformation sous chargement cyclique 187
6.4.2 Déformation permanente sous chargement cyclique 189
6.5 Synthèse générale 190
7 Conclusions et perspectives 192
7.1 Conclusions et discussions générales 192
7.2 Perspectives 194
7.2.1 Recommandations issues du modèle numérique et pistes de développement 194
7.2.2 Extension du modèle numérique à des configurations réalistes de grande dimension 195
7.2.3 Etude expérimentale à grande échelle « CyLo RT » : vers un couplage avec la simulation 196
7.2.3.1 Contexte et objectifs 197
7.2.3.2 Description générale du dispositif expérimental 198
7.2.3.3 Séquence de chargement 200
7.2.3.4 Résultats préliminaires 201
7.2.3.5 Synthèse 203
Références 204
A Annexes 209
A.1 Structure et fonctionnement du logiciel YADE 209
A.1.1 Structure et méthodologie 209
A.1.2 Pas de temps critique 211
A.1.1 Amortissement numérique 212
A.1.3 Détection de collision 213
A.2 Projet CyLo RT 215

Liste des figures

Figure 1.1. Les différents types d'une géogrille.....4
Figure 1.2. Les différents processus de fabrication d'une géogrille.....5
Figure 2.1. Mécanismes de renforcement par géogrille dans un sol granulaire sur couche de forme (adapté de Das (2016), d'après Perkins (1999)).....11
Figure 2.2. Mécanisme d'interlocking du matériau granulaire à l'intérieur de l'ouverture de la géogrille (extrait de Tensar).....11
Figure 2.3. Représentation qualitative de l'interaction géogrille-sol (Mulabdić et al., 2018).....12
Figure 2.4. (a) Hypothèse simplifiée de la distribution des contraintes dans le sol sous une surface circulaire uniformément chargée, située sur une couche granulaire renforcée par une géogrille ; (b) Relation entre l'angle de diffusion des contraintes et la charge appliquée par unité de surface sur une plaque circulaire (adaptée de Das (2016), d'après Shin et al. (2001)).....13
Figure 2.5. (a) Schéma de la configuration expérimentale en laboratoire pour les essais cycliques de charge sur plaque ; (b) Distribution des contraintes verticales mesurées à 76 mm sous la surface du sol de fondation après 30 000 cycles de charge pour différentes configurations de renforcement (Abu-Farsakh et Chen, 2011).....14
Figure 2.6. Positions des géogrilles et nombre de couches de renforcement installées dans l'échantillon, ainsi que les modes de rupture observés (adapté de Nazzal (2007)).....15
Figure 2.7. (a) Courbes contrainte–déformation et (b) évolution de la déformation verticale permanente accumulée pour les échantillons non renforcés et renforcés par une ou plusieurs géogrilles (adapté de Nazzal (2007)).....15
Figure 2.8. Confinement des agrégats dans une couche mécaniquement stabilisée (extrait de Tensar).....16
Figure 2.9 (a) Schéma de l'équipement d'essai triaxial ; (b) Déformation radiale moyenne pour les essais de déformation permanente (adapté de Perkins et al. (2004)).....17
Figure 2.10. (a) Schéma du modèle d'essai développé ; (b) Zone d'influence déterminée à partir des résultats des tests d'angle de rotation pour une géogrille précontrainte à 100 mm de profondeur (adapté de Schuettpelz et al. (2009)).....18
Figure 2.11. (a) Vue en plan du modèle réduit de ballast renforcé ; (b) Variation de l'indice de réduction de l'étalement latéral (LSRI) en fonction de la profondeur pour une géogrille placée à z = 0 mm et z = 65 mm (Hussaini, 2013).....18
Figure 2.12. Force normale maximale en fonction de la hauteur du modèle avant et pendant le test d'arrachement (adapté de Konietzky et al. (2004)).....19
Figure 2.13. Rapport de force en fonction de la hauteur du modèle après déchargement partiel vertical et horizontal ; les flèches indiquent l'emplacement des nappes de géogrille (Konietzky et al., 2004).....19
Figure 2.14. Mécanisme d'imbrication pour différentes tailles de particules situées autour de la géogrille (extrait de Han et al. (2018)).....21
Figure 2.15. Déformation permanente des échantillons de ballast non renforcés et renforcés par des géogrilles (Qian et al., 2013).....21
Figure 2.16. Effet du type d'ouverture de la géogrille sur la déformation permanente à différents niveaux de contrainte déviatorique (Gu, 2015).....22
Figure 3.1. (a) Matériau granulaire sélectionné et (b) sa distribution granulométrique.....27
Figure 3.2. (a) Illustration des longueurs caractéristiques définies à l'aide d'un prisme rectangulaire circonscrit et (b) Diagramme de classification de Zingg (1935), adapté de Quintanilla I. (2018).....28

Figure 3.3. (a) Les 11 grains sélectionnés pour l'analyse de forme et (b) leur classification Zingg correspondante basée sur les paramètres calculés. 29
Figure 3.4. Géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1 : (a) présentation réelle de la géogrille et (b) diagramme annoté mettant en évidence les éléments structurels 30
Figure 3.5. Courbe de résistance à la traction en fonction de la déformation de la géogrille fournie par Naue pour Secugrid® 40/40 Q1 31
Figure 3.6. Représentation schématique de l'échantillon préparé pour le scan sous rayons X. 32
Figure 3.7. Synthèse du processus de préparation des échantillons. 33
Figure 3.8. Préparation de l'échantillon : (a) membrane en latex utilisée (diamètre nominal de 70 mm), (b) installation dans un moule fendu et préparation de l'échantillon en couches, (c) démoulage assisté par une dépression interstitielle. 35
Figure 3.9. (a) Réponse contrainte-déformation et (b) Déformation volumique des échantillons non renforcés sous six niveaux de confinement : 0 kPa, 7 kPa, 15 kPa, 30 kPa, 50 kPa et 100 kPa. 37
Figure 3.10. (a) Enveloppe de rupture au pic de résistance ; (b) Variation de l'angle de frottement macroscopique individuel et de l'angle de dilatance au pic, obtenues à l'issue des essais de compression triaxiale des échantillons non renforcés sous trois niveaux de confinement : 30 kPa, 50 kPa et 100 kPa. 39
Figure 3.11. Configurations de géogrilles étudiées : (a) orientation uniforme de l'ouverture, (b) orientation différente de l'ouverture à chaque couche (offset de 45°), et (c) jonction centrale « configuration en croix ». 41
Figure 3.12. Comparaison des réponses contrainte-déformation et des réponses volumiques des échantillons non renforcés et renforcés sous quatre niveaux de confinement : 0 kPa, 7 kPa, 15 kPa et 30 kPa. 42
Figure 3.13. Mode de rupture des échantillons : (a) sans géogrille, (b) avec géogrille en configuration de référence ; et (c) Déformation de la géogrille après essai. 44
Figure 3.14. Illustration du principe de la tomographie à rayons X. 45
Figure 3.15. La radiographie historique de la main de la femme de Röntgen W. prise en 1895 (adaptée de Rebellato (2020)). 46
Figure 3.16. Coupe verticale extraite des images tridimensionnelles d'un échantillon de sable de Hostun HN 31 (Ando, 2013). 46
Figure 3.17. Schéma du traitement d'image classique appliqué à une coupe 2D issue d'un volume tomographique 3D (basé sur Ando (2013)). 47
Figure 3.18. Photographie légendée du scanner à rayons X du Laboratoire 3SR (adaptée de Ando E., 2013). 49
Figure 3.19. Photographie de l'échantillon (70 mm × 125 mm) préparé dans un tube en PMMA, comportant trois mailles de géogrille, destiné au scan tomographique dans la cellule du laboratoire 3SR. 49
Figure 3.20. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche 3D représentative de l'image à échelle de gris, comportant les trois phases : vides, grains et géogrille. 50
Figure 3.21. Evolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale le long de la hauteur de l'échantillon. 50
Figure 3.22. Coupes horizontales de l'image en niveaux de gris aux trois niveaux de géogrille, successivement de gauche à droite : quart inférieur, mi-hauteur et quart supérieur de l'échantillon. 51
Figure 3.23. De gauche à droite : coupe horizontale de l'image en niveaux de gris en l'absence de géogrille, suivie des deux coupes verticales associées (A–A et B–B), avec des encadrés mettant en évidence la géogrille. 51
Figure 3.24. Photographie légendée du scanner à rayons X du centre d'imagerie µ-VIS de l'Université de Southampton (Royaume-Uni). 53

Figure 3.25. Illustration du principe de scan par superposition de deux scans latéraux. 53
Figure 3.26. Photographie légendée du système de chargement de l'échantillon 200 mm × 200 mm, préparé dans un tube en PMMA, destiné au scan tomographique dans la cellule du centre µ-VIS..... 54
Figure 3.27. Relaxation du chargement pendant le scan. 55
Figure 3.28. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche 3D représentative, montrant les trois phases : vides, grains et géogrille, pour deux géogrilles différentes : (a) biaxiale et (b) triaxiale. 56
Figure 3.29. Illustration de l'approche de modification manuelle des valeurs de gris associées à la géogrille : (a) vues en plans orthogonaux ; (b) visualisation en inclinaison. 57
Figure 3.30. Illustration de l'approche de segmentation de la géogrille par soustraction des grains puis des vides..... 57
Figure 3.31. Illustration de la segmentation assistée par apprentissage supervisé : (a) image grise ; (b) étiquetage des pixels ; (c) probabilités de classification ; (d) segmentation finale. 58
Figure 3.32. Coupes horizontales de l'image en niveaux de gris pour les configurations sans géogrille, avec géogrille biaxiale, et avec géogrille triaxiale (de gauche à droite). 59
Figure 3.33. Coupe verticale au centre de l'échantillon montrant l'effet de superposition des deux scans latéraux. 60
Figure 3.34. Evolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale le long de la hauteur scannée de l'échantillon au repos. 62
Figure 3.35. Comparaison de l'évolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale entre l'état au repos et l'état sous chargement à 100 kPa. 63
Figure 3.36. Comparaison visuelle des coupes horizontales en niveaux de gris pour les configurations sans géogrille, avec géogrille biaxiale et triaxiale, à l'état au repos (10 kPa) et sous chargement de (100 kPa). 64
Figure 4.1 : Deux concepts différents pour modéliser les systèmes sol-inclusion avec le DEM : (a) chaîne de disques (b) chaîne d'éléments « barre » articulés entre eux par des nœuds ; les disques représentent les particules du sol (extrait de Chareyre et Villard (2005)). 68
Figure 4.2. Principe de l'évolution périodique des contacts à l'interface sol-inclusion (extrait de Chareyre et Villard (2005)). 69
Figure 4.3. Représentation géométrique des éléments modélisés et des types d'interaction..... 70
Figure 4.4. Représentation simplifiée du contact entre deux sphères..... 71
Figure 4.5. Représentation de la rigidité normale dans l'interaction entre deux sphères de (Smilauer et al., 2021)..... 71
Figure 4.6. Représentation (a) d'un clump formé par trois sphères de rayon ri en fonction du paramètre de chevauchement p (extrait de Suhr et Six, 2020), et (b) d'un ensemble de particules polyédriques. 76
Figure 4.7. Représentation des trois géométries de particules considérées dans cette étude..... 77
Figure 4.8. Classification de Zingg des 5 grains sélectionnés pour les simulations numériques : (a) grains réels et (b) clumps C2 simulés..... 78
Figure 4.9. Enveloppe de rupture obtenue à l'issue des essais de compression triaxiale des échantillons non renforcés, préparés avec différentes formes de grains (S, C1 et C2) sous deux niveaux de confinement : 50 kPa et 100 kPa. 80
Figure 4.10. Représentation du modèle d'une nervure. 81
Figure 4.11. Représentation numérique de la géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1 à l'aide de nœuds et de cylindres. 82
Figure 4.12. Différence de section des nervures de la géogrille réelle et celle modélisée..... 83
Figure 4.13. Schéma d'un essai de traction sur une géogrille..... 83
Figure 4.14. (a) Géogrille simulée pour l'essai de calibration et (b) Résultats de l'essai de calibration en traction du modèle de géogrille..... 84

Figure 4.15. Représentation de : (a) géogrille biaxiale constituée de 11 nervures et fixées aux deux extrémités, illustrant la largeur et la longueur effectives nominales de l'essai (exemple avec une orientation de 0°) ; (b) schéma des directions d'essai avec des incréments angulaires de 15° ; et (c) exemple de caractérisation de la rigidité sécante radiale pour une géogrille biaxiale (adaptée de ETA, 2018). 86
Figure 4.16. Définition de la rigidité sécante radiale de Secugrid® 40/40 Q1 : (a) résultats expérimentaux fournis par Naue pour deux niveaux de déformation (0,5% et 2%) avec un incrément directionnel de 15° ; et (b) résultats numériques de la géogrille simulée à une déformation de 0,5% avec un incrément directionnel de 1°. 87
Figure 4.17. Représentation de la méthode de mise en traction numérique de la géogrille pour 3 inclinaisons différentes (0°, 15°, et 45°) selon ETA (2018) 87
Figure 4.18. (a) Discrétisation de la géogrille en sous-nervures pour trois inclinaisons (0°, 15° et 45°); et (b) résultats numériques correspondants à 0,5 % de déformation avec un incrément directionnel de 5°. 88
Figure 4.19. (a) Vue schématique de l'échantillon non renforcé composé de 4 couches de particules et (b) Échantillon constitué de quatre couches de clumps C2 et d'une géogrille placée à mi-hauteur. 89
Figure 4.20. Procédure de préparation d'une couche de l'échantillon numérique. 90
Figure 4.21. Processus de stabilisation lors de la mise en place des couches : Évolution du rapport de force déséquilibrée avec les itérations 92
Figure 4.22. Schéma du processus de compactage par abaissement de la plaque de contrôle. 93
Figure 4.23. Influence de la méthode de compactage sur (a) la porosité initiale et (b) la réponse en contrainte-déformation de l'échantillon non renforcé, préparé avec les clumps C2, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa. 93
Figure 4.24. Procédure de préparation de l'échantillon numérique : Intégration d'une géogrille et configuration finale de l'échantillon après mise en place des couches successives 94
Figure 5.1. Evolution usuelle de la contrainte verticale au cours d'un essai de compression triaxiale (en fonction du nombre d'itérations) : (a) ensemble des phases du processus de compression triaxiale ; (b) détail de la phase de compactage ; (c) détail de la phase de confinement. 97
Figure 5.2. Influence de la gravité sur la réponse mécanique d'un échantillon, de section carrée de 200 mm, renforcé à mi-hauteur : comparaison des courbes contrainte-déformation avec et sans gravité, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa 99
Figure 5.3. Influence du taux de déformation sur la réponse mécanique d'échantillons avec et sans géogrille : (a) contrainte déviatorique et (b) déformation volumique fonction de la déformation verticale, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa. 99
Figure 5.4. Comparaison entre la distribution granulométrique cible et celles obtenues numériquement pour les différentes formes de particules (S, C1, C2) 101
Figure 5.5. Variation de (a) la porosité globale de l'échantillon et (b) de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation verticale pour différentes valeurs de la variable aléatoire (seed de 1 à 5), pour des échantillons préparés avec des clumps C2 sous un confinement isotrope de 100 kPa. 103
Figure 5.6. Variation de la contrainte déviatorique maximale et de la déformation latérale correspondante en fonction de la porosité et de la variable aléatoire correspondante, pour des échantillons renforcés par géogrille et préparés avec des clumps C2 sous un confinement isotrope de 100 kPa 103
Figure 5.7. Echantillon numérique (70 mm × 70 mm × 140 mm) utilisé pour la simulation triaxiale, constitué de quatre couches de particules de type clump C2 104
Figure 5.8. Distribution des diamètres équivalents des particules (clumps C2) en contact avec la plaque supérieure à différents stades de l'essai triaxial (début, pic, fin de chargement) pour un

échantillon numérique de section carrée de (a) 70 mm et (b) 200 mm, sous 100 kPa de confinement..... 106
Figure 5.9. Influence de l'élancement sur la réponse contrainte-déformation d'échantillons numériques de 200 mm de section carrée sous 100 kPa de confinement. 108
Figure 5.10. Distribution des rigidités normales de contact après compactage initial pour un échantillon numérique de section carrée de (a) 70 mm et (b) 200 mm. 111
Figure 5.11. Comparaison des courbes contrainte déviatorique–déformation axiale issues des essais expérimentaux et numériques (échantillons de 70 mm, clumps C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa). 112
Figure 5.12. Evolution du rapport de contraintes q/p issue des essais expérimentaux et des simulations numériques (échantillons de 70 mm, particules clump C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa). 115
Figure 5.13. Evolution de la déformation volumique issue des essais expérimentaux et des simulations numériques (échantillons de 70 mm, particules clump C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa). 116
Figure 5.14. Illustration du processus de segmentation des grains sur une coupe 2D extraite du volume tomographique réduit..... 118
Figure 5.15. Volume tomographique 3D segmenté et labellisé au voisinage de la géogrille, représentée ici avec une coupe verticale (à droite) afin d'illustrer son traitement comme un volume vide à mi-hauteur..... 119
Figure 5.16. Analyse de forme des grains segmentés selon la classification de Zingg, et comparaison avec des grains réels, numériques et segmentés pour les cas de référence « a » à « e ». 120
Figure 5.17. Distribution granulométrique : comparaison entre volumes tomographiques, simulation numérique (clumps C2) et courbe de tamisage..... 122
Figure 5.18. Méthodologie d'estimation locale de la porosité : discrétisation 3D du volume, sélection du plan de projection et projection 2D par moyenne dans la direction orthogonale.. 123
Figure 5.19. Configuration du modèle numérique avec géogrille biaxiale localisée dans le quart inférieur de l'échantillon..... 123
Figure 5.20. Cartes 2D de porosité locale pour les configurations avec et sans géogrille : (a) données tomographiques projetés dans le plan XY ; (b) comparaison entre les données tomographiques et les résultats numériques projetés dans le plan YZ..... 124
Figure 5.21. Profils verticaux de porosité dans la zone centrale de l'échantillon : comparaison entre les configurations avec et sans géogrille, issues de la tomographie et de la simulation numérique..... 126
Figure 5.22. Stratégie d'identification et de sélection des contacts des grains dans le modèle numérique : (a) catégorisation des types de contacts, (b) filtrage des contacts avec les éléments non granulaires, (c) regroupement des multi-contacts entre clumps. 128
Figure 5.23. Principe de projection d'un vecteur sur un plan 2D et détermination de son orientation angulaire..... 129
Figure 5.24. Distributions du nombre de voisins issu des données tomographiques et numériques : (a) sur l'ensemble du volume étudié ; (b) dans la zone locale autour de la géogrille. 130
Figure 5.25. Illustration de sous-segmentation dans la zone centrale de l'échantillon tomographique : coupe verticale faisant apparaître deux grains surdimensionnés. 131
Figure 5.26. Analyse numérique de la connectivité des grains selon les conditions de prise de contact pour les deux configurations avec et sans géogrilles..... 132
Figure 5.27. Distributions angulaires des orientations de contact obtenues par tomographie et simulation numérique : (a) ensemble du volume étudié ; (b) zone locale autour de la géogrille, selon la Condition 1..... 134

Figure 5.28. Distributions angulaires des orientations de contact dans la zone locale autour de la géogrille (± 4 mm), obtenues par simulation numérique selon la Condition 2..... 136
Figure 5.29. Distributions angulaires des orientations de contacts grain–géogrille obtenues par simulation numérique..... 136
Figure 6.1. Configurations testées pour l'analyse du comportement global : répartition des nappes de géogrille selon leur nombre et leur position dans un échantillon de section carrée (200 mm) et d'élancement H/D = 0,83. 140
Figure 6.2. (a) Courbes contrainte–déformation axiale et latérale ; (b) Évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale, pour les différentes configurations testées (0G à 3G), sous un confinement de 100 kPa. 141
Figure 6.3. Influence du mode de chargement sur les configurations avec une géogrille placée aux quarts de l'échantillon : évolution de la contrainte déviatorique et de la déformation volumique sous un confinement de 100 kPa. 142
Figure 6.4. Evolution du nombre de coordination global au cours du chargement triaxial pour les différentes configurations testées (0G à 3G). 144
Figure 6.5. Effet de la configuration de renforcement sur le gain de résistance normalisé et l'angle de dilatance au pic, lors d'un essai triaxial sous 100 kPa de confinement. 144
Figure 6.6. Evolution de la contrainte maximale et de l'angle de dilatance correspondant en fonction de l'élancement pour les échantillons renforcés et non renforcés par géogrille..... 145
Figure 6.7. Cartes 2D de porosité locale dans le plan YZ à l'état compacté, pour les configurations sans et avec géogrille (résultats numériques). 147
Figure 6.8. Profils verticaux de porosité numérique dans la zone centrale de l'échantillon pour les différentes configurations avec et sans géogrille, à différents états de l'échantillon : compacté, confiné, au pic de chargement et chargé à 20 % de déformation axiale. 149
Figure 6.9. Illustration des interactions entre particules et définition du vecteur branche (adapté de Catherine O'Sullivan (2011)). 152
Figure 6.10. Méthodologie d'estimation locale de la contrainte moyenne : sélection du plan de projection, discrétisation 2D du volume et calcul de la moyenne par particule projetée dans la direction orthogonale..... 152
Figure 6.11. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne σyy dans le plan YZ au pic de chargement, pour les configurations sans et avec géogrille (résultats numériques). 153
Figure 6.12. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne σyy dans le plan YZ au pic de chargement, pour des échantillons renforcés par une géogrille placée à mi-hauteur, pour trois élancements (H/D = 0,83, 1,64 et 2,42). 155
Figure 6.13. Distributions de la déformation déviatorique au pic de chargement, représentées dans les plans YZ et XY au centre de l'échantillon, pour les configurations sans et avec géogrille placée à mi-hauteur (particules sphériques, confinement 100 kPa)..... 156
Figure 6.14. Force normale interne induite dans les éléments de la géogrille. 157
Figure 6.15. Illustration des forces normales mobilisées dans une géogrille placée à mi-hauteur, à la fin de la sollicitation : comparaison entre l'algorithme développé et ParaView. 158
Figure 6.16. Évolution conjointe de la contrainte déviatorique et des forces normales dans les nervures centrales de la géogrille en fonction de la déformation latérale..... 159
Figure 6.17. Distribution spatiale des forces normales mobilisées dans les nervures de la géogrille, au pic et en fin de chargement (configuration 1G, mi-hauteur). 160
Figure 6.18. Forces normales dans les nervures de la géogrille pour la configuration 2G : (a) évolution conjointe des forces dans les nervures et du déviateur de contraintes en fonction de la déformation latérale, (b) distribution spatiale en fin de chargement..... 161
Figure 6.19. Courbes force – allongement des nervures centrales de la géogrille (configuration 1G à mi-hauteur). 162

Figure 6.20. Déformation de la géogrille et déformation latérale de l'échantillon en fonction de la déformation verticale de l'échantillon (configuration 1G à mi-hauteur). 162
Figure 6.21. Comparaison de la déformation moyenne des géogrilles et de la déformation latérale de l'échantillon pour les configurations : 0G, 1G (Mi-hauteur), et 2G. 163
Figure 6.22. Imbrication des grains dans les ouvertures de la géogrille : (a) après compactage et (b) au cours du chargement (adaptée de Rakowski, 2017). 165
Figure 6.23. Illustration schématique des forces d'interaction grain–géogrille : (a) cas idéalisé, (b) cas général. 165
Figure 6.24. Illustration de l'évolution des interactions grain–géogrille pour la configuration 1G à mi-hauteur : états confiné (a), pic (b) et fin de chargement (c) 166
Figure 6.25. Illustration des coupes réalisées dans la géogrille pour l'analyse des interactions grain–géogrille au pic de chargement (configuration 1G à mi-hauteur). 167
Figure 6.26. Evolution des forces mobilisées dans la section 3 : forces normales dans les nervures et forces de contact horizontales ; décomposition en butée et frottement (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$) 167
Figure 6.27. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long des différentes sections et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$). 168
Figure 6.28. Gain relatif de résistance et angle de dilatance au pic en fonction de la contrainte de confinement pour la configuration (1G à mi-hauteur). 170
Figure 6.29. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon pour différents niveaux de confinement : 1, 30, 50 et 100 kPa (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$). 171
Figure 6.30. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon pour différents élancement de l'échantillon : 0,45, 0,89, 1,64 et 2,42 (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$). 173
Figure 6.31. Evolution (a) de la contrainte déviatorique normalisée en fonction de la déformation latérale de l'éprouvette et (b) du gain de résistance normalisé au pic de contrainte en fonction de l'angle de dilatance pour les différentes formes de grains (S, C1, et C2). 174
Figure 6.32. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long de la section centrale (3) et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon, pour les trois formes de grains : S, C1 et C2 (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$). 175
Figure 6.33. Influence de l'angle de frottement à l'interface grain–géogrille sur le gain relatif de résistance (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = 30°$). 176
Figure 6.34. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long de la section centrale (3) et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon, pour différents angles de frottement d'interface : 0°, 15°, 30°, 45° et 89° (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = 30°$). 178
Figure 6.35. Evolution du gain relatif de résistance en fonction du module de traction (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$) 179
Figure 6.36. Comparaison de la déformation latérale de l'échantillon et de la déformation moyenne de la géogrille pour trois modules de traction : 100, 800 et 5000 kN/m (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains = \phi grains - géogrille = 30°$). 180
Figure 6.37. (a) Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille (section centrale) en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon ; (b) Distribution spatiale des forces mobilisées dans les nervures au pic de chargement, pour deux

modules de traction : 100 et 5000 kN/m (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains$ = $\phi grains - géogrille$ = 30°)..... 181
Figure 6.38. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne dans le plan YZ au pic de chargement, pour deux modules de traction : 100 et 5000 kN/m (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi grains - grains$ = $\phi grains - géogrille$ = 30°)..... 181
Figure 6.39. Géométries des géogrilles étudiées : configurations biaxiales et triaxiale conservant la même surface effective. 182
Figure 6.40. Evolution (a) du gain relatif de résistance et (b) de la déformation latérale de l'échantillon en fonction du rapport géométrique $bD50$..... 183
Figure 6.41. (a) Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille ; (b) Répartition des efforts dans les nervures pour la géogrille biaxiale optimale B53x53. 183
Figure 6.42. Zone d'influence en termes de contraintes horizontales pour la géogrille biaxiale optimale B53×53..... 184
Figure 6.43. Influence de la rigidité de la géogrille sur le gain relatif de résistance pour différentes formes et tailles de mailles de la géogrilles..... 185
Figure 6.44. (a) Répartition des efforts dans les nervures de la géogrille ; (b) Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne dans le plan YZ au pic de chargement (géogrille triaxiale T53×80). 185
Figure 6.45. Courbes contrainte-déformation sous charge cyclique pour les deux configurations (a) 0G et (b) 1G à mi-hauteur après 100 cycles de charge..... 188
Figure 6.46. Evolution de la déformation permanente accumulée au cours de 100 cycles de charge pour les deux configurations (a) 0G et (b) 1G à mi-hauteur. 189
Figure 7.1. Modèle numérique d'une traverse reposant sur un sol granulaire renforcé par une géogrille placée au tiers inférieur de la hauteur de la couche granulaire. 195
Figure 7.2. Distribution des efforts normaux mobilisés dans la géogrille placée au tiers inférieur de la couche granulaire, à la fin du chargement monotone appliqué par la traverse..... 196
Figure 7.3. Vue de côté de la fosse d'essais géotechniques de la TUDa contenant le modèle de voie ferrée..... 198
Figure 7.4. Schémas de chargement de la sous-couche pour un train de voyageurs à quatre voitures à différentes vitesses, de la basse vitesse (30 s/train) à la haute vitesse (3 s/train)..... 201
Figure 7.5. Evolution de la force appliquée et du déplacement vertical correspondant pendant les cycles initiaux (a) et pendant toute la durée (b) de l'essai 1 (sans géogrille). 202
Figure 7.6. Répartition des déformations dans le DFOS sous la traverse, à différents stades de chargement cyclique pendant l'essai 1 (sans géogrille). 202
Figure A.1. Représentation de la structure hiérarchique des cinq couches de l'environnement YADE..... 209
Figure A.2. Schéma du cycle typique d'une simulation DEM dans YADE..... 211
Figure A.3. Exemple d'algorithme Sweep-And-Prune « SAP » impliquant les scénarios de détection de collision bidimensionnels (de Moravia (2020), adapté de Smilauer et al. (2015a)). 214
Figure A.4. Distribution granulométrique du sable de Darmstadt (adaptée de Beroya-Eitner et al., 2024)..... 215
Figure A.5. Mise en place de sous-couches de sable et répartition uniforme sans compactage. 215
Figure A.6. Couche de granulats de pneu. 216
Figure A.7. Distribution granulométrique du gravier (rapport d'essai interne). 216
Figure A.8. (a) Répartition uniforme du gravier avant l'ajout d'eau et (b) Ajout d'eau à l'aide de réservoirs pneumatiques pour atteindre la teneur en eau optimale avant de commencer le compactage. 216

Figure A.9. (a) Compactage de la sous-couche de gravier à l'aide d'une plaque vibrante BOMBAG BP 10/36e et d'un compacteur manuel pour les bords de la fosse et (b) Rugosité de la surface de la sous-couche de gravier actuelle pour améliorer l'imbrication des grains. 217
Figure A.10. Mise en place des géotextiles entre les couches du modèle. 217
Figure A.11. Mise en place du « Géotextile 3-4 » sur la deuxième couche de sable (couche 3) et installation de la géogrille instrumentée par jauge de déformation pour l'essai 2. 218
Figure A.12. DFOS installé dans la deuxième couche de sable. 218
Figure A.13. Mise en place des capteurs de pression de terre (EP1-9, EP11-14) dans la deuxième couche de sable. 218
Figure A.14. Assemblage du système de chargement (poutre transversale + traverse) avec capteurs instrumentés. 219
Figure A.15. Branchement du vérin hydraulique au dispositif de chargement et installation des LVDT sur la traverse. 219

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Types et propriétés des géosynthétiques. 3
Tableau 3.1. Propriétés géométriques et mécaniques de la géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1. 30
Tableau 3.2. Sommaire des conditions de préparation des échantillons scannés. 34
Tableau 3.3. Sommaire des conditions de préparation et d'essai des échantillons à taille réduite. 36
Tableau 3.4. Tableau récapitulatif du nombre de grains présents dans une zone centrale composée de 4 ouvertures pour la géogrille biaxiale et de 6 ouvertures pour la géogrille triaxiale issue de la Figure 3.32. 61
Tableau 4.1. Propriétés de forme des particules simulées et caractéristiques numériques des assemblages numériques de particules. 78
Tableau 4.2. Propriétés mécaniques des agrégats numériques. 79
Tableau 4.3. Propriétés géométriques et mécaniques de la géogrille numérique de référence. 82
Tableau 4.4. Propriétés géométriques et mécaniques de l'échantillon numérique. 90
Tableau 5.1. Synthèse des modules d'Young et des valeurs de contraintes et de déformations obtenus numériquement aux pics, selon le niveau de confinement. 111

1 Introduction

1.1 Contexte

1.1.1 Contexte général

Les sols granulaires occupent une place essentielle dans de nombreuses applications de l'ingénierie géotechnique : remblais routiers et ferroviaires, plateformes industrielles, assises de fondations pour éoliennes, ou encore matériaux de remblai pour ouvrages de soutènement. Leur utilisation généralisée s'explique par leur disponibilité, leur facilité de mise en œuvre et leurs bonnes propriétés mécaniques lorsqu'ils sont correctement compactés.

Cependant, ces matériaux présentent également certaines limites. Leur comportement mécanique dépend fortement des conditions de confinement et de leur densité après compactage. Ils sont généralement dépourvus de cohésion et peuvent donc développer des déformations plastiques importantes sous sollicitations répétées, ce qui conduit à une diminution progressive de la portance et de la durabilité des structures. Dans le cas des infrastructures de transport, par exemple, ces phénomènes se traduisent par la détérioration des voies ferrées, l'orniérage des chaussées ou des tassements différentiels, compromettant la sécurité et la performance à long terme. Ces déformations induites par les charges représentent donc un enjeu majeur en géotechnique.

La bonne performance des structures géotechniques est directement liée à leur capacité à résister et à contrôler ces déformations. Pour pallier les limitations des sols granulaires naturels, plusieurs techniques d'amélioration et de renforcement des sols ont été développées et ont évolué au fil du temps. Ces méthodes continuent de progresser, car les ingénieurs recherchent des solutions à la fois durables, économiques et adaptées à des contextes environnementaux de plus en plus contraints. Parmi ces approches, on distingue deux grandes familles d'inclusions introduites dans les sols :

- Les inclusions à fortes rigidités, qui sont généralement des éléments structurels, placés verticalement ou inclinés comme les pieux, les clous, les ancrages métalliques, etc., destinés à assurer une reprise de charge ou un confinement direct.
- Les inclusions plutôt déformables, qui sont généralement des matériaux géosynthétiques plans ou tridimensionnelles, placées horizontalement comme les géogrilles, les géotextiles, les géocellules, etc., visant à améliorer le comportement du massif par des interactions locales sol–renfort.

Le choix de la méthode de renforcement dépend de plusieurs facteurs : la nature du sol, les propriétés mécaniques recherchées, ainsi que l'emplacement, la surface et la profondeur de l'inclusion. Toutefois, malgré les nombreux développements, l'optimisation et le dimensionnement de ces ouvrages restent complexes, car les mécanismes d'interaction entre le sol et le renfort sont spécifiques à chaque application et encore imparfaitement compris. En particulier, les phénomènes locaux à l'interface sol–renfort sont à l'origine directe du principe de renforcement, mais ils demeurent difficiles à caractériser expérimentalement.

1.1.2 Problématique scientifique et enjeux multi-échelles

Le présent travail se focalise sur le cas des infrastructures ferroviaires, soumises à un grand nombre de cycles de chargement. Ces infrastructures jouent un rôle essentiel dans les réseaux de transport modernes, nécessitant des solutions robustes et durables pour assurer la performance

et la sécurité à long terme. De ce fait, les lignes ferroviaires sont constamment modernisées pour résister à des charges et des vitesses de plus en plus élevées, sans nuire au confort ni à la sécurité des passagers. L'attention portée aux voies ferrées s'explique par les défis uniques auxquels elles sont confrontées, comme les charges dynamiques dues au passage des trains, les sollicitations cycliques répétées et les effets de l'environnement tels que les précipitations et les changements de température. Ces facteurs contribuent à la dégradation des voies en raison de la détérioration des composants de la superstructure (rails et traverses), de la densification et de la rupture du ballast, et de la détérioration de la couche d'assise. Ces processus induisent des déformations irréversibles et une perte de performance mécanique, faisant des voies ferrées un candidat privilégié pour l'application de techniques de renforcement avancées. Le traitement efficace de ces problèmes peut réduire de manière significative les coûts de maintenance et les perturbations opérationnelles, rendant ainsi les systèmes ferroviaires plus fiables et plus durables.

Parmi les différentes techniques d'amélioration, l'utilisation de géosynthétiques, et plus particulièrement de géogrilles, a pris une importance croissante dans ces infrastructures. Ces matériaux polymères permettent à la fois d'augmenter la capacité portante des sols granulaires (renforcement) et de limiter leurs déformations excessives au cours du temps (stabilisation). Les mécanismes associés à ces deux aspects sont multiples et relèvent d'interactions complexes : interverrouillage des grains dans les mailles de la géogrille, frottement à l'interface, redistribution des contraintes et limitation de la dilatance locale. Pourtant, la distinction claire entre les contributions du renforcement et celles de la stabilisation reste encore insuffisamment étudiée dans la littérature.

Un autre défi majeur réside dans la compréhension multi-échelle du comportement des sols renforcés par géogrille. À l'échelle macroscopique, les essais de laboratoire permettent de mesurer la résistance et les propriétés volumétriques globales. Mais à l'échelle microscopique, les interactions locales entre grains et géogrille, pourtant déterminantes, restent difficiles à observer directement. Les approches expérimentales traditionnelles (triaxiaux, cisaillement direct, essais en boîte) apportent des données utiles mais ne permettent pas de visualiser l'évolution interne du massif. Dans ce contexte, l'utilisation combinée de la tomographie aux rayons X, qui offre une imagerie tridimensionnelle détaillée de la microstructure, et de la méthode des éléments discrets (DEM), permettant de simuler explicitement les grains et leurs interactions avec la géogrille, ouvre des perspectives inédites pour une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux du renforcement et de la stabilisation.

1.2 Matériaux géosynthétiques

1.2.1 Généralités

Sémantiquement le mot "géosynthétique" se décompose en deux parties : (1) Géo et (2) Synthétique. La première partie " Géo " qui fait référence à la terre, indique que les géosynthétiques sont associés dans leur utilisation courante aux matériaux géotechniques tels que les sols et les roches. La deuxième partie " Synthétique " précise que les matériaux géosynthétiques sont des produits manufacturés fabriqués à partir de divers polymères.

Historiquement, l'utilisation de matériaux artificiels pour améliorer le comportement des sols remonte à l'Antiquité : les Égyptiens employaient déjà des fibres végétales dans leurs constructions, et les Romains renforçaient certains remblais avec des roseaux (Bonaparte et Christopher, 1987). Toutefois, l'industrie moderne des géosynthétiques est apparue dans les années 1960, avec le développement de produits polymères manufacturés offrant une alternative plus fiable et durable aux techniques traditionnelles. L'utilisation de cet outil alternatif et pratique dans la construction d'infrastructures de génie civil n'a cessé croître au cours des dernières décennies. Ils sont aujourd'hui largement répandus en ingénierie géotechnique grâce à leurs

propriétés avantageuses : non-corrosivité, durabilité à long terme, légèreté et simplicité de mise en œuvre. Leur emploi contribue en outre à réduire les coûts de construction et d'entretien (par la diminution de l'épaisseur des couches d'assise) tout en favorisant la durabilité, ce qui montre également un caractère écologique en limitant l'empreinte carbone liée à l'extraction, au transport et au traitement des matériaux.

En pratique, de nombreux types de produits géosynthétiques existent dans le domaine géotechnique. Ils sont classifiés en fonction de leurs matériaux de fabrication, de leurs structures, de leurs applications et de leurs fonctions (certains d'entre eux ont des fonctions multiples simultanées) comme le montre le Tableau 1.1. Parmi ces géosynthétiques, ce projet se concentre uniquement sur l'utilisation de géogrilles pour renforcer un milieu granulaire.

Tableau 1.1. Types et propriétés des géosynthétiques.

Géosynthétique	Matériaux polymères	Structures	Domaines d'application	Fonctions principales
Géotextiles	Polypropylène (PP), Polyester (PET), Polyéthylène (PE), Polyamide (PA)	Tissus flexibles et perméables	Murs de soutènement, pentes, remblais, chaussées, centres de stockage de déchets, barrages	Séparation, renforcement, filtration, drainage, confinement
Géogrilles	PP, PET, Polyéthylène haute densité (HDPE)	Produit plan en forme de maillage formé par des éléments s'entrecroisant	Chaussées, ballast ferroviaire, murs de soutènement, pentes, remblais, culées de ponts	Renforcement, séparation
Géonets	Polyéthylène moyenne densité (MDPE), HDPE	Produit plan en forme de filet avec petites ouvertures	Barrages, canalisations enterrées, installations de drainage	Drainage
Géomembranes	PE, chlorure de polyvinyle (PVC), polyéthylène chloré (CPE)	Feuilles fines imperméables	Bassins de rétention, réservoirs, canaux	Barrières liquides / liner
Géocomposites	Selon les géosynthétiques inclus	Combinaison de géotextiles et de géogrilles/géonets /géomembranes	Remblais, chaussées, pentes, centres de stockage de déchets, barrages	Séparation, renforcement, filtration, drainage

1.2.2 Géogrille

La géogrille fait partie des matériaux géosynthétiques fabriqués à partir de polymères (généralement du polypropylène, du polyéthylène ou du polyester). Les géogrilles ont gagné leur popularité dans les années 1970 et 1980 (Das, 2016), lorsque les chercheurs et les ingénieurs ont

reconnu leur potentiel, principalement dans le renforcement des sols (amélioration des propriétés mécaniques) et de la séparation des sols (séparation physique entre deux types de sols différents lorsqu'elle est associée à un géosynthétique), en particulier dans les applications géotechniques comprenant la stabilisation des sols, la protection des pentes et les murs de soutènement.

Elle est formée de mailles ouvertes constituées d'ensembles continus d'éléments parallèles appelés « nervures » qui travaillent en tension et sont reliées entre elles par des jonctions plus ou moins rigides. La présence de mailles ouvertes favorise le mécanisme d'imbrication, autrement dénommé « interlocking », entre les particules de sol et la grille, ainsi que d'autres mécanismes d'interaction complexes qui sont encore mal identifiés, en particulier à l'échelle locale.

Au fil du temps, différents types de géogrilles ont été développés pour répondre à des besoins d'ingénierie spécifiques, chacun étant conçu pour fournir des caractéristiques de renforcement spécifiques. Les géogrilles sont classées sur la base de 2 critères :

1. Géométrie :

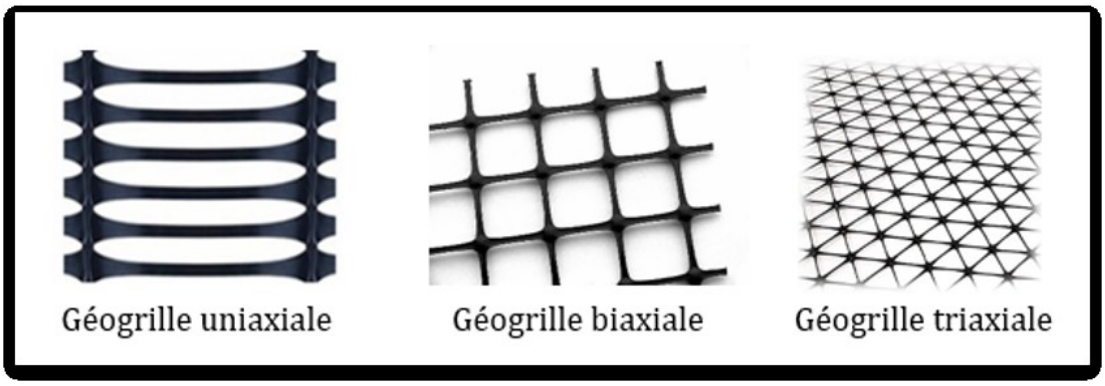


Figure 1.1. Les différents types d'une géogrille.

Les nervures sont présentes dans les directions longitudinale et transversale (également appelées direction de la machine "MD" et direction cross-machine "CMD" respectivement), ce qui permet d'obtenir trois géométries d'ouverture différentes (Figure 1.1) :

- **Géogrille uniaxiale** : le plus souvent utilisée dans le cas de problèmes de stabilité de pente et de murs de soutènement, car elle présente une résistance à la traction avec un faible allongement dans une seule direction.
- **Géogrille biaxiale** : elle présente des ouvertures carrées en général et une résistance à la traction qui peut être égale ou différente dans les deux directions. Ce type de géogrille est souvent utilisé dans les chaussées, les voies ferrées et le renforcement des fondations.
- **Géogrille triaxiale** : il s'agit d'un nouveau type de géogrille qui présente des ouvertures triangulaires, ce qui lui confère une résistance à la traction dans trois directions. Tensar® est le plus connu de ce type, sa conception brevetée de la géogrille pour optimiser le confinement des granulats et améliorer la répartition des charges, a conduit à une reconnaissance significative dans l'industrie. Cela ne signifie pas pour autant que cette technologie est exclusive, car d'autres fabricants développent également des solutions innovantes répondant à des besoins spécifiques.

2. Processus de fabrication :

À part la géométrie, les géogrilles sont également classées en fonction de leur processus de production (Figure 1.2) : géogrille extrudée (ou géogrille perforée et étirée à l'aide d'une feuille polymère plate), géogrille soudée (formée de nervures simples soudées ensemble) et géogrille tissée (formée de fibres enrobées).

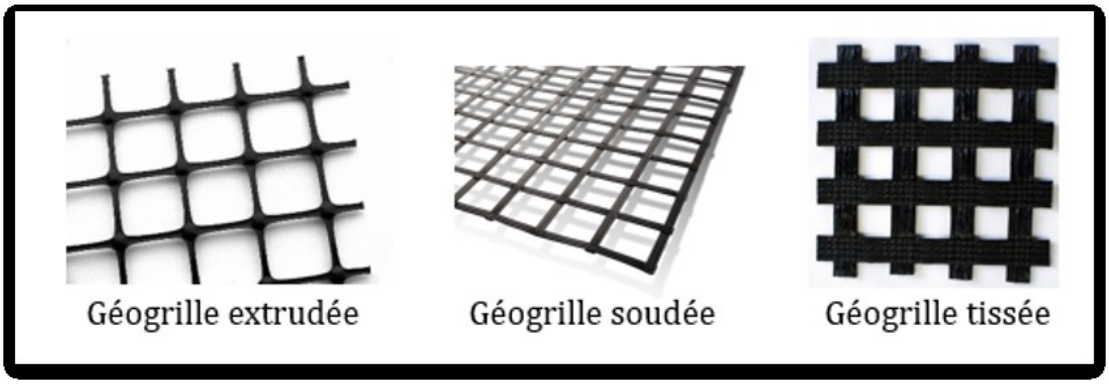


Figure 1.2. Les différents processus de fabrication d'une géogrille.

Au cours des trois dernières décennies, les géogrilles ont été largement utilisées dans le génie civil, en particulier dans le domaine des transports (routes et voies ferrées). Leur efficacité repose sur plusieurs fonctions complémentaires : le renforcement par augmentation de la capacité portante, le confinement des particules par limitation de l'étalement latéral, et la séparation des couches granulaires. Ces contributions expliquent leur rôle majeur dans l'amélioration de la performance et de la durabilité des infrastructures.

Toutefois, pour prédire et garantir ces performances, certaines considérations pratiques doivent être prises en compte. Elles concernent à la fois : (i) la finalité de l'utilisation de la géogrille dans le projet, (ii) le choix d'un type de géogrille adapté aux caractéristiques du sol en place, et (iii) la définition précise des exigences techniques à satisfaire.

1.3 Renforcement et stabilisation des sols par géosynthétiques

Bien que complémentaires, le renforcement et la stabilisation répondent à des objectifs distincts lorsqu'il s'agit d'améliorer les performances des sols granulaires. Le renforcement vise une amélioration structurelle durable, en mobilisant la capacité portante du sol et en accroissant la résistance globale du massif. La stabilisation, quant à elle, s'intéresse à la réponse mécanique immédiate ou différée du sol, notamment sous l'effet de charges cycliques ou répétées, en limitant la déformation progressive et en assurant une meilleure durabilité.

Dans les infrastructures ferroviaires, la distinction entre ces deux contributions est essentielle, car elles conditionnent à la fois la sécurité à court terme et la pérennité à long terme des voies. Les géosynthétiques, et plus particulièrement les géogrilles, présentent l'avantage de combiner ces deux fonctions, apportant une solution complète aux défis rencontrés dans les assises granulaires soumises au trafic ferroviaire.

1. *Renforcement :*

Le renforcement correspond à l'amélioration de la résistance mécanique globale de l'ensemble sol–géogrille. En intégrant des inclusions capables de mobiliser des efforts de traction, comme les géogrilles, le massif granulaire développe une rigidité accrue et une contrainte de rupture plus élevée. Les principaux mécanismes associés au renforcement sont les suivants :

- Interverrouillage ou imbrication particule–géogrille : les grains s'insèrent partiellement dans les ouvertures de la géogrille, générant un effet de blocage mécanique ;
- Mobilisation du frottement à l'interface : le transfert des charges du sol vers le renfort se fait par adhérence et frottement, améliorant la résistance globale ;
- Redistribution des contraintes et confinement local : la présence de la géogrille limite les concentrations de déformations et homogénéise le comportement mécanique du massif.

Ainsi, le renforcement permet de limiter les déformations sous fortes charges et d'assurer une meilleure portance de la structure.

2. *Stabilisation :*

La stabilisation se rapporte davantage à la réduction des déformations différées ou progressives au sein de la structure granulaire. Elle ne vise pas uniquement l'accroissement de la résistance ultime, mais également le contrôle du comportement en service sous chargements répétés. Les mécanismes dominants de stabilisation incluent :

- Limitation des déplacements relatifs entre grains, réduisant la réorganisation interne du sol et le risque de tassements différentiels ;
- Diminution de l'accumulation des déformations permanentes, notamment sous trafic cyclique (ferroviaire ou routier) ;
- Amélioration de la durabilité microstructurale, par un maintien de la porosité et une stabilisation des arrangements granulaires.

En d'autres termes, la stabilisation agit comme un facteur de pérennité, en ralentissant la dégradation progressive des propriétés mécaniques des sols granulaires.

Cependant, la compréhension des mécanismes micromécaniques impliqués dans l'interaction entre un sol granulaire et une géogrille reste encore incomplète. Ces mécanismes locaux, tels que l'enchevêtrement et le désenchevêtrement des particules dans la maille, la butée des grains, le frottement à l'interface et les variations de densité autour de la géogrille, sont essentiels pour optimiser le comportement des sols renforcés ou stabilisés.

1.4 But et objectifs

Le sujet principal de cette étude est l'interaction micromécanique entre un matériau granulaire et des inclusions déformables, où le cadre d'application est le renforcement et la stabilisation des sols par des géogrilles dans le cas des voies ferrées. Peu d'approches sont actuellement consacrées à la compréhension des mécanismes d'interaction locaux, qui sont pourtant à l'origine du principe de renforcement.

Ces mécanismes d'interaction dépendent de plusieurs facteurs tels que la nature des matériaux utilisés (distribution granulométrique, forme, texture, imbrication, hétérogénéité), les propriétés du renforcement (rigidité, épaisseur et texture des nervures, taille et forme de l'ouverture de la maille), l'arrangement granulaire au voisinage de l'inclusion (affecté notamment par les tailles respectives des grains/maille de la grille), et le mode de sollicitation de la structure (chargement monotone/cyclique, petits déplacements/grandes déformations).

Le but général du travail de thèse est de comprendre les mécanismes impliqués dans l'interaction entre un milieu granulaire et une géogrille, ainsi que d'identifier les paramètres clés à l'échelle locale. Pour atteindre cet objectif, une double approche expérimentale et numérique est mise en œuvre, afin de fournir des éléments objectifs pour la conception des géogrilles de renforcement et de tester la capacité des méthodes numériques existantes à reproduire, dans un calcul à l'échelle de la structure, le comportement et le rôle des renforcements.

Dans un premier temps, une campagne d'imagerie 3D sera faite par microtomographie RX sur plusieurs échantillons de taille adaptée à la géométrie du problème, considérant en particulier les cas avec et sans grille, et des milieux granulaires de forme plus anguleuse. En complément, des essais triaxiaux ont été conduits afin de disposer de données expérimentales de référence pour la calibration du modèle numérique.

Une reconstruction numérique de l'arrangement granulaire et de la géogrille à l'aide d'éléments déformables sera réalisée, accompagnée des détails nécessaires à la préparation d'échantillons numériques de couches renforcées. Ces échantillons serviront ensuite à générer des avatars numériques, utilisés dans le code par éléments discrets YADE (Smilauer et al., 2021). Les simulations prédictives concerneront le comportement de l'interface sol–géogrille soumis à des sollicitations élémentaires (compression, cisaillement), aussi bien monotones que cycliques. En parallèle, certaines configurations de référence seront analysées afin de vérifier que la modélisation numérique reste proche de la réalité des phénomènes.

Ce couplage inédit entre données tomographiques 3D et simulations DEM constitue l'originalité de ce travail, en proposant une étude multi-échelle reliant la microstructure, le comportement global et les effets du renforcement. Dans ce cadre, la compréhension recherchée passe par le besoin de :

- Développer un modèle numérique pertinent, capable de démontrer les effets du renforcement et de la stabilisation ;
- Valider ce modèle à partir de résultats expérimentaux dédiés, couplés à la microtomographie aux rayons X ;
- Evaluer les principes de renforcement des sols par géogrilles sous sollicitations monotones et cycliques ;
- Identifier et quantifier les mécanismes micromécaniques (butée, frottement, dilatance, réorganisation des contacts) ;
- Analyser l'effet des géométries respectives de la géogrille et du matériau granulaire sur l'arrangement local et son évolution au cours du chargement ;
- Investiguer l'influence des caractéristiques mécaniques des matériaux sur les mécanismes d'interaction ;
- Etendre le modèle afin qu'il puisse ensuite être utilisé pour étudier des configurations plus complexes, non accessibles expérimentalement.

1.5 Plan et organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en cinq parties principales, structurées de manière à progresser de la méthodologie expérimentale à l'analyse numérique détaillée, avant de conclure sur les apports et les perspectives de ce travail :

Chapitre 2 : Bibliographie

Ce chapitre présente l'état de l'art des techniques de renforcement des sols, avec un focus particulier sur les géosynthétiques et les géogrilles. Il aborde l'historique des études, les mécanismes d'interaction sol–géogrille, l'influence du nombre, de la position et de la géométrie des géogrilles, ainsi que la zone d'influence stabilisée mécaniquement. Les paramètres affectant ces interactions (taille et forme des ouvertures, rigidité des géogrilles) sont discutés, et les résultats significatifs issus de travaux expérimentaux et numériques sont présentés pour justifier le cadre du présent projet.

Chapitre 3 : Méthodologie et caractérisation expérimentales

Cette partie décrit les matériaux utilisés (sol granulaire et géogrille) ainsi que la procédure de préparation des échantillons. Elle détaille les essais triaxiaux menés sur des échantillons renforcés et non renforcés afin de mettre en évidence les effets du renforcement. Une section est également

consacrée à la tomographie à rayons X, depuis les principes de l'imagerie jusqu'au traitement et à l'interprétation des données 3D, qui servent de support pour l'analyse microstructurale et la calibration numérique.

Chapitre 4 : Méthodologie numérique

Ce chapitre introduit la démarche numérique retenue. Après avoir rappelé la nature discontinue d'un sol granulaire et la représentation continue des géosynthétiques, il expose le choix de la méthode des éléments discrets (DEM) et son implémentation dans le code YADE. Les développements numériques spécifiques (modélisation des grains, de la géogrille et de la géométrie de l'échantillon) sont ensuite présentés.

Chapitre 5 : Paramétrage du modèle numérique et confrontation expérimentale

Cette section présente la calibration du modèle numérique à partir des essais triaxiaux. Les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales en termes de réponses contrainte–déformation et volumétrique. Un volet particulier est consacré à la validation microstructurale par confrontation avec les données tomographiques (granulométrie, porosité locale, nombre et orientation des contacts).

Chapitre 6 : Analyse numérique du comportement triaxial d'un matériau granulaire renforcé par géogrille

Ce chapitre constitue le cœur de l'analyse numérique et rassemble l'ensemble des résultats obtenus à partir du modèle DEM développé. Il débute par l'étude du comportement global du matériau granulaire renforcé, en analysant successivement l'influence de la présence de la géogrille, de sa position dans l'échantillon, du nombre de nappes, ainsi que de l'élancement des échantillons. Cette première étape permet de quantifier les effets de renforcement en termes de résistance au cisaillement et de dilatance. Dans un second temps, le chapitre se focalise sur les mécanismes locaux et micromécaniques qui sous-tendent ces effets globaux. Sont ainsi examinés la zone d'influence mécanique de la géogrille (évolutions locales de porosité et de contraintes), les efforts et déformations internes développés dans la grille, ainsi que la nature des interactions grains–géogrille (frottement, butée, imbrication). Le chapitre présente ensuite une étude paramétrique visant à identifier l'influence de paramètres clés : forme des grains, frottement d'interface et rigidité/forme de la géogrille. Cette analyse approfondit la compréhension des mécanismes d'interaction et met en évidence les conditions optimales de renforcement. Enfin, une analyse préliminaire du comportement cyclique est proposée, ouvrant la voie à des perspectives d'application dans le contexte des voies ferrées.

Chapitre 7 : Conclusions et perspectives

La dernière partie synthétise les principaux résultats et met en évidence les apports de l'étude, tant au niveau méthodologique que scientifique. Des perspectives sont ensuite proposées, incluant l'extension du modèle numérique à des configurations réalistes de grande dimension et l'articulation avec des campagnes expérimentales à grande échelle (projet CyLo RT).

2 Bibliographie

Étant donné que l'objectif principal de ce mémoire est d'étudier le comportement des matériaux granulaires renforcés par des géogrilles et soumis à des charges cycliques, ce chapitre présente une synthèse des travaux existants. Une attention particulière est portée aux mécanismes de renforcement et de stabilisation, ainsi qu'aux applications liées aux chaussées (pavées et non pavées) et aux voies ferrées.

2.1 Historique des études réalisées sur les géogrilles

L'histoire des études réalisées sur les géosynthétiques est relativement récente, datant du milieu du 20e siècle, mais qui évolue rapidement dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Les géogrilles, qui sont un sous-ensemble des géosynthétiques, ont fait l'objet d'une attention particulière en raison de leur efficacité dans la stabilisation et le renforcement des sols dans les années 1980 (Das, 2016). La technologie des géogrilles a continué à progresser, avec l'introduction de divers types de géogrilles optimisées pour des besoins d'ingénierie spécifiques. Leurs applications se sont étendues aux systèmes de support de charge pour les chaussées, à la stabilisation des remblais, au renforcement des sols mous et au contrôle de l'érosion. Le développement de géogrilles à haute résistance a permis aux ingénieurs de concevoir et de construire des structures plus efficaces et plus rentables. Les géogrilles ont ensuite été utilisées dans la construction de plates-formes ferroviaires et de ballasts afin d'améliorer leur performance et leur intégrité structurelle sous l'effet du trafic ferroviaire.

Tout au long de cette période, des études théoriques (Bonaparte et Christopher, 1987; Schneider et Holtz, 1986) et expérimentales (Jewell et al., 1984; Love, 1984; Haas et al., 1988; Perkins, 1999) sur les géogrilles ont contribué à l'élaboration de principes et de normes de conception pour les applications des géogrilles dans divers domaines de la géotechnique et du génie civil, ainsi qu'à l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques des géogrilles, notamment la résistance à la traction, le comportement de fluage et la durabilité. Ces études ont constitué les bases des méthodologies de conception des structures renforcées par des géogrilles en tenant compte de facteurs tels que l'interaction sol-géogrille, la répartition des charges et les performances à long terme. Elles ont également permis de mieux comprendre la mécanique des sols renforcés par des géogrilles et leurs avantages en termes d'amélioration de la stabilité, de réduction du tassement et de renforcement de la capacité portante dans divers projets de construction.

Ces dernières années, les progrès réalisés en matière d'équipements et de technologies ont permis de réaliser des études expérimentales plus approfondies sur les géogrilles. En outre, avec la progression des outils de modélisation, les simulations numériques sont devenues plus courantes pour étudier des interactions entre les géogrilles et le sol, surtout à l'échelle locale. Les chercheurs continuent d'étudier plus précisément des aspects tels que les mécanismes d'interaction entre le renforcement et le sol, le frottement de l'interface et les effets des différents matériaux et configurations des géogrilles.

2.2 Etat de l'art

Les systèmes de chaussées et de voies ferrées sont constitués de matériaux granulaires non cohésifs qui consistent en un assemblage, souvent hétérogène et anisotrope, de nombreuses particules macroscopiques individuelles en contact. Ces structures sont exposées à un grand nombre de cycles de charge pendant leur durée de vie.

2.2.1 Introduction générale

Le comportement mécanique de ces matériaux, soumis à des contraintes de compression, est complexe car il combine deux types de déformations :

- Les déformations résilientes, qui sont réversibles et liées à la capacité du matériau à reprendre sa forme initiale après chaque cycle de charge cyclique ou répété. Elles sont directement liées à la rigidité effective de l'assemblage granulaire et à l'interaction grain–grain.
- Les déformations permanentes, qui traduisent l'accumulation irréversible de déformation à chaque cycle, même sous de faibles niveaux de contrainte. Ces déformations sont critiques pour la durabilité des infrastructures, car elles conduisent à l'affaissement et à l'apparition de défauts de surface.

Par ailleurs, ces matériaux, considérés comme discontinus, ne possèdent pas de résistance intrinsèque à la traction, ce qui limite leur capacité à se maintenir seuls sous contrainte. C'est pourquoi l'ajout de renforts, tels que les géogrilles, est essentiel pour améliorer leur stabilité et leur performance à long terme.

Généralités des méthodes utilisées :

De nombreuses études théoriques, expérimentales et numériques ont été déjà menées sur l'effet de renforcement de chaussées et de voies ferrées par des géogrilles en fonction des paramètres géométriques et mécaniques liés à la géogrille et aux agrégats. Les campagnes réalisées se sont concentrées sur quatre catégories principales :

- Essais à échelle réelle (in situ) : permettent d'évaluer la réponse de ces structures dans des conditions proches de la réalité, mais sont coûteux et difficiles à répéter.
- Essais à échelle réduite : reproduisent certains aspects du comportement réel à l'aide de modèles de laboratoire, permettant de tester plusieurs configurations rapidement et à moindre coût.
- Essais triaxiaux
- Essais de cisaillement direct et essais d'extraction de géogrilles : permettent d'identifier les paramètres de frottement et d'interaction entre les grains et les barreaux, essentiels pour quantifier la contribution mécanique de la géogrille.

Les essais triaxiaux sont les plus souvent utilisés pour évaluer l'influence des différents paramètres sur le comportement global de la structure. Les raisons de cette pratique ont été soulignées par Christopher et al. (2006), notamment la disponibilité de l'équipement d'essai, l'existence de réglementations et de normes, la possibilité d'appliquer différentes combinaisons de contraintes sur l'échantillon, la simplicité de la mesure de la déformation axiale, radiale et volumétrique. Et le plus important est que la cellule triaxiale utilisée pour l'essai triaxial statique peut également être employée pour les essais de charge répétée. Brecciaroli et Kolisoja (2006) ont également fait état des avantages de l'essai triaxial en termes de gain de temps et de coût par rapport à l'essai in situ, tout en signalant certaines limitations telles que le fait que seules les contraintes principales peuvent être appliquées directement à l'échantillon et que deux des contraintes principales doivent nécessairement être égales.

Objectifs des études et paramètres analysés :

Certaines études s'intéressent à l'identification des mécanismes d'interaction et de renforcement induits par la présence d'une géogrille. D'autres travaux portent sur le comportement mécanique, en conditions statiques ou cycliques (rôle de stabilisation), afin d'évaluer la contribution de la géogrille à la réduction des déformations permanentes dans les matériaux non cohésifs. Pour ce faire, plusieurs paramètres sont étudiés :

- Propriétés granulaires : forme, taille et angularité des grains.

- Caractéristiques de la géogrille : rigidité, géométrie et taille des ouvertures, nombre et position des couches.
- Zone d'influence : étendue et délimitation de l'effet de la géogrille sur le matériau environnant.

Quelques études non exhaustives pouvant être utiles à la bonne compréhension du mémoire sont présentées ci-dessous.

2.2.2 Mécanismes d'interaction géogrille – milieu granulaire

Des études portant sur le renforcement par géogrille de la couche de base d'une route ou d'une voie ferrée ont permis d'identifier différents mécanismes fondamentaux de renforcement.

Basé sur des essais de charge expérimentaux et une analyse des études antérieures réalisées par d'autres chercheurs sur l'effet du renforcement des chaussées par des géogrilles, Perkins (1999) a proposé trois mécanismes différents pour les sols renforcés par des géogrilles, qui sont présentés dans la Figure 2.1 : le confinement latéral ou autrement dit « mécanisme d'interlocking », l'augmentation de la capacité portante et l'effet de membrane tendue.

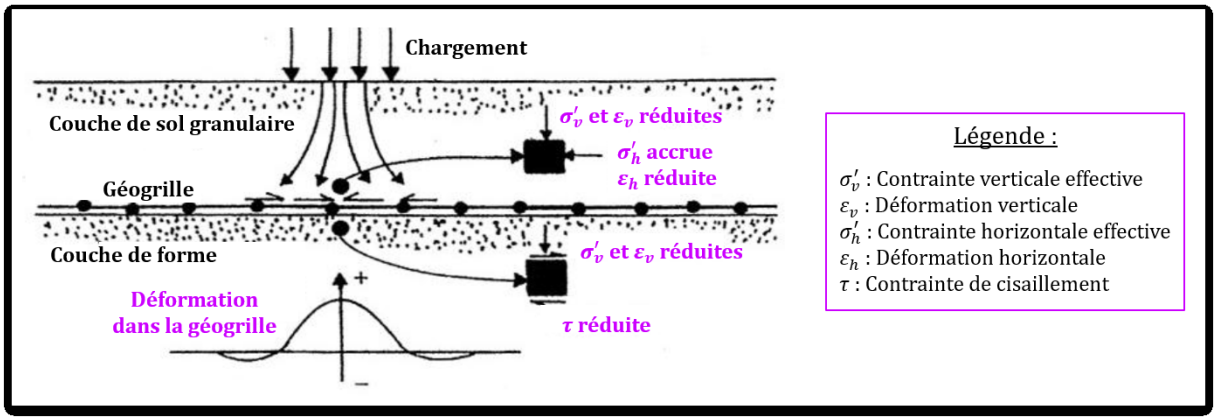


Figure 2.1. Mécanismes de renforcement par géogrille dans un sol granulaire sur couche de forme (adapté de Das (2016), d'après Perkins (1999)).

Lorsqu'une charge est appliquée, les particules de sol commencent à se déplacer vers le bas en s'éloignant de la surface de chargement, créant ainsi une déformation latérale en traction. A ce niveau apparaît la fonction primaire du renforcement par géogrille, qui est la restriction latérale des mouvements, qui se développe principalement par l'interaction de cisaillement de la couche de base avec la géogrille.

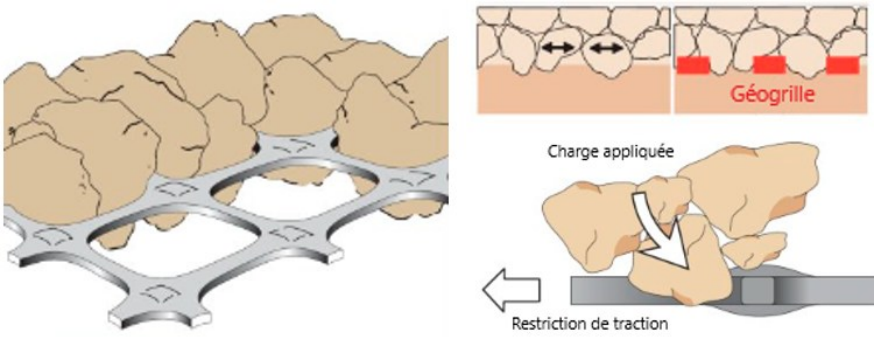


Figure 2.2. Mécanisme d'interlocking du matériau granulaire à l'intérieur de l'ouverture de la géogrille (extrait de Tensar).

Le mouvement des particules (étalement latéral) est donc réduit en raison du confinement des agrégats dans les ouvertures de la géogrille (Figure 2.2) ce qui entraîne une augmentation de la contrainte latérale entre les agrégats, une augmentation de la rigidité (initialement introduite par Bender et Barenberg, 1978), une répartition de la contrainte verticale sur une zone plus étendue et une contrainte de cisaillement plus faible sous la géogrille.

En outre, la charge de traction générée est transmise des agrégats à la géogrille qui travaille en tension. L'effet de membrane tendue se développe en créant une forme concave dans la couche de géogrille tendue. La composante verticale de la force de la membrane tendue peut réduire la contrainte verticale agissant sur le sol ce qui permet de diminuer la déformation verticale moyenne. En conséquence, la capacité portante du système augmente avec une distribution améliorée de la contrainte verticale dans le sol sousjacent. Ceci a été validé par l'étude de Palmeira et Góngora (2015) à travers des essais expérimentaux à grande échelle, dans un réservoir rigide de 1200 mm de diamètre et 520 mm de hauteur, sur des couches de remblai renforcées et non renforcées sur un sol de base compressible où la présence de la géogrille a provoqué des réductions significatives des contraintes verticales transmises au sol de base.

Cela implique que les ouvertures de la géogrille et les particules de sol doivent être correctement dimensionnées et qu'une meilleure interaction peut être obtenue si la géogrille est positionnée à l'intérieur de la base de manière à permettre le chevauchement des particules.

Mulabdic et al. (2018) ont mis en évidence certains aspects importants de l'interaction entre le sol et les géogrilles dans la fonction de renforcement et de stabilisation. Deux mécanismes principaux sont distingués : l'imbrication (interlocking) des particules dans les ouvertures de la géogrille et le frottement. Ils ont montré que la contribution dominante provient de l'imbrication des particules dans les mailles de la géogrille, tandis que le frottement — qu'il s'agisse de celui développé le long des nervures ou entre les particules coincées dans les ouvertures — joue un rôle plus limité. Afin d'illustrer ces phénomènes, ils ont proposé un diagramme qualitatif décrivant les principaux facteurs influençant l'interaction sol–géogrille (Figure 2.3). Celui-ci souligne que le frottement constitue une part relativement faible de la résistance globale, alors que les effets les plus déterminants sont liés à la rigidité de l'ouverture de la géogrille, à l'épaisseur et à la forme des nervures, ainsi qu'à la densité de sol.

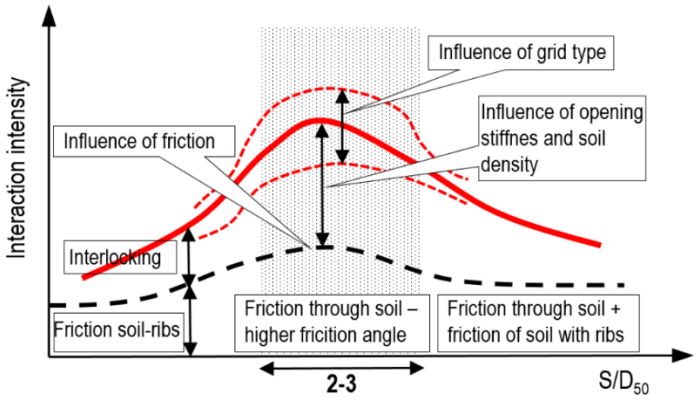


Figure 2.3. Représentation qualitative de l'interaction géogrille-sol (Mulabdić et al., 2018).

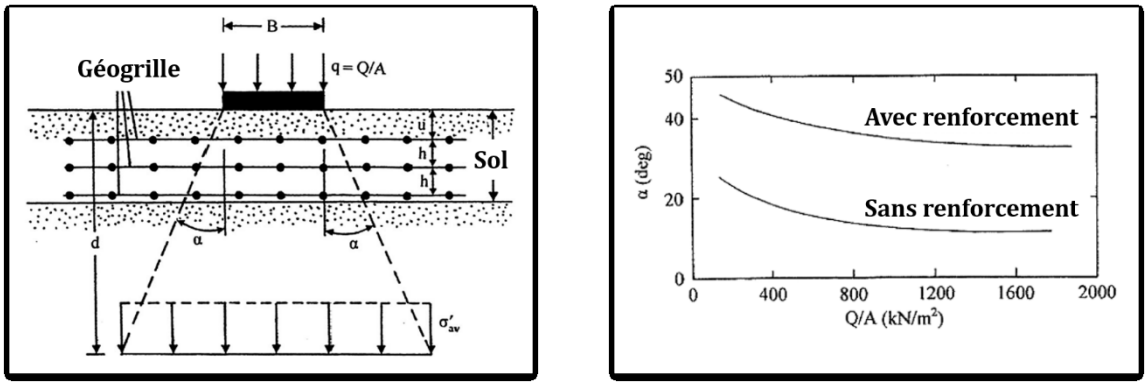
En résumé, la performance d'une géogrille de renforcement donnée est clairement influencée par une combinaison de ses propriétés mécaniques et physiques. Le type de géogrille — incluant la rigidité spécifique des ouvertures, la résistance des jonctions et la résistance à la traction — ainsi que le rapport entre la taille des ouvertures de la géogrille « *b* » (désigné par « *S* » par Mulabdic et

al. (2018)) et la taille moyenne des grains « D_{50} », déterminent l'interaction et les effets avantageux attendus de la géogrille dans le renforcement du sol.

2.2.3 Distribution des contraintes verticales

La présence d'une géogrille modifie la transmission des charges au sein de la couche granulaire en augmentant sa rigidité et en favorisant un meilleur contact entre les particules. Cette action élargit l'angle de diffusion des contraintes α et réduit la contrainte verticale transmise au sol de fondation, limitant ainsi l'intensité des tassements.

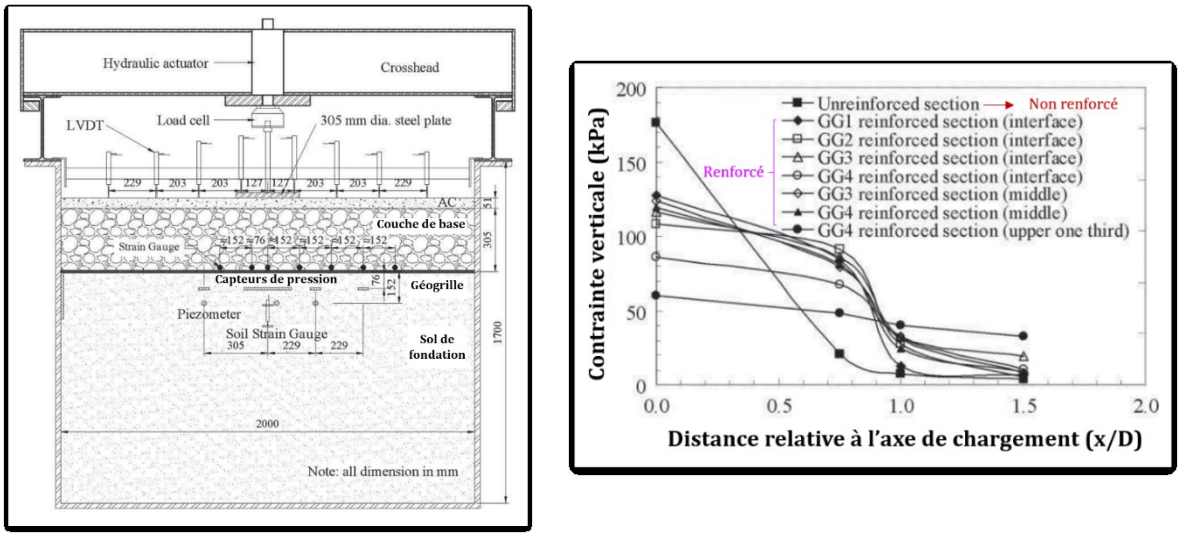
Des essais de chargement sur modèles réduits, réalisés par Shin et al. (2001), ont permis de quantifier cette redistribution en comparant les configurations avec et sans géogrille. La distribution supposée des contraintes est représentée sur la Figure 2.4.a, la limite de diffusion des contraintes étant inclinée d'un certain angle par rapport à la verticale. Cette représentation est comparable à la méthode dite 2V:1H, couramment utilisée en géotechnique pour estimer la contrainte verticale moyenne effective. La Figure 2.4.b illustre les variations de l'angle de diffusion en fonction des conditions de charge et de renforcement. Les résultats montrent que l'angle augmente en présence de géogrille et varie selon l'intensité de la charge appliquée, ce qui se traduit par une diminution de la contrainte verticale moyenne transmise au sol.



(a) (b)

Figure 2.4. (a) Hypothèse simplifiée de la distribution des contraintes dans le sol sous une surface circulaire uniformément chargée, située sur une couche granulaire renforcée par une géogrille ; (b) Relation entre l'angle de diffusion des contraintes et la charge appliquée par unité de surface sur une plaque circulaire (adaptée de Das (2016), d'après Shin et al. (2001)).

Abu-Farsakh et Chen (2011) ont évalué la performance d'une base renforcée par géogrille dans des chaussées souples en utilisant des essais de charge cyclique sur plaque (Figure 2.5.a), et sont parvenus à la même conclusion : l'inclusion d'un renforcement de la base par géogrille permet de redistribuer la charge appliquée sur une zone plus étendue, réduisant ainsi la concentration des contraintes et obtenant une meilleure distribution verticale des contraintes sur la couche de fondation. La Figure 2.5.b présente la distribution des contraintes verticales à 76 mm sous la surface du sol de fondation après 30 000 cycles de charge, obtenue à l'aide de capteurs de pression, pour différentes configurations de renforcement. Elle illustre comment la géogrille élargit la zone de diffusion des contraintes et réduit le pic de contrainte directement sous la plaque, contribuant ainsi à limiter les déformations permanentes et à améliorer la durabilité de la chaussée souple.



(a) (b)

Figure 2.5. (a) Schéma de la configuration expérimentale en laboratoire pour les essais cycliques de charge sur plaque ; (b) Distribution des contraintes verticales mesurées à 76 mm sous la surface du sol de fondation après 30 000 cycles de charge pour différentes configurations de renforcement (Abu-Farsakh et Chen, 2011).

2.2.4 Effets du nombre et de la position de la géogrille sur le comportement mécanique

Certaines études expérimentales ont démontré que le comportement de l'échantillon est influencé par la position et le nombre de géogrilles dans l'échantillon. Il a été également constaté que la position de la géogrille dépend de l'épaisseur de la couche de base et de la magnitude de la charge appliquée. Ces affirmations ont été obtenues en comparant les résultats d'essais obtenus avec la géogrille installée à différents niveaux de la hauteur de l'échantillon.

Par exemple, Nazzal (2007) a mené une étude approfondie pour caractériser et évaluer l'effet de différents facteurs sur la performance du comportement des matériaux de la couche de base (ayant une taille de grains maximale de 19 mm) renforcée par des géogrilles biaxiales dans les chaussées flexibles par le biais d'essais triaxiaux cycliques sur un échantillon de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur. Différentes configurations ont été testées (Figure 2.6), et les résultats ont été synthétisés par les courbes contrainte-déformation ainsi que par l'évolution de la déformation verticale permanente au cours des cycles.

L'examen des échantillons non renforcés révèle la formation d'une bande de cisaillement épaisse, avec un plan de rupture proche de celui prévu par les théories classiques de la mécanique des sols, soit environ 45°. Pour les échantillons renforcés par une géogrille située dans le tiers supérieur ou au milieu de l'échantillon, la formation de bandes de cisaillement est également observée, mais leur orientation, leur position et leur plan sont modifiés par la position de la géogrille. Dans le cas de deux couches de géogrille, la rupture se produit par gonflement de la zone comprise entre les couches. Ces observations suggèrent que la présence de couches de renforcement modifie le mécanisme global de déformation et le mode de rupture des échantillons.

Les résultats montrent que l'ajout d'une ou plusieurs géogrilles améliore significativement la rigidité et la résistance du matériau tout en limitant les déformations permanentes (Figure 2.7). Avec une seule géogrille, l'efficacité est plus marquée lorsque celle-ci est placée dans le tiers supérieur ou inférieur de l'échantillon plutôt qu'à mi-hauteur. L'utilisation de deux couches, positionnées dans les tiers supérieur et inférieur, offre la meilleure performance, en maximisant la réduction des déformations permanentes et en accroissant la résistance globale.

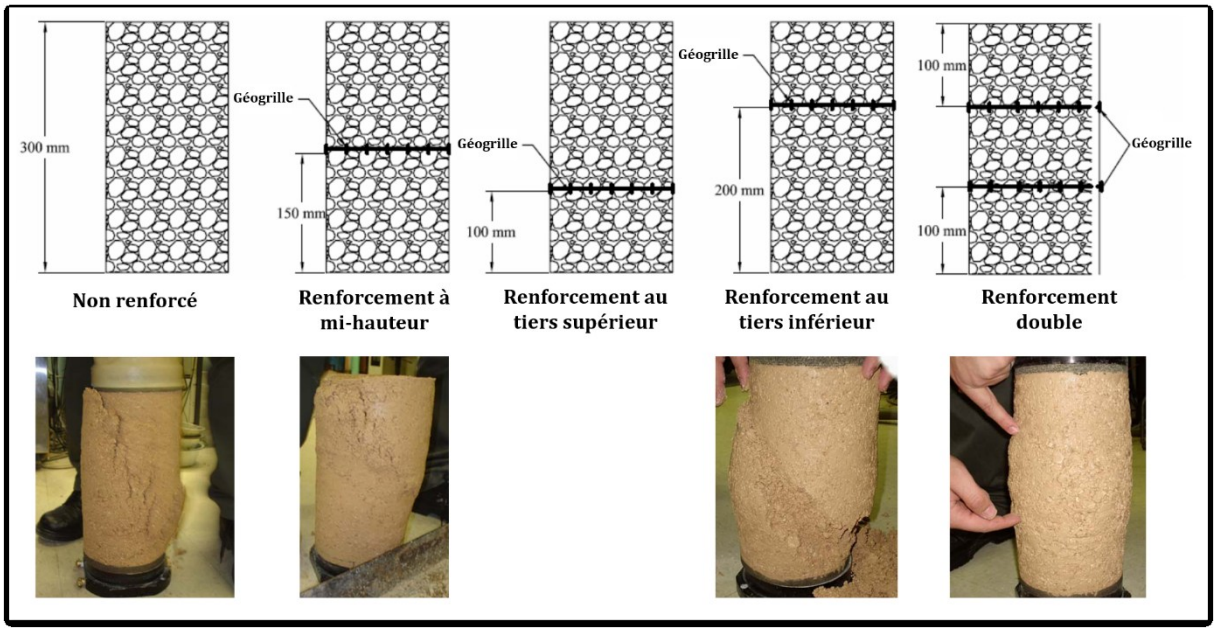
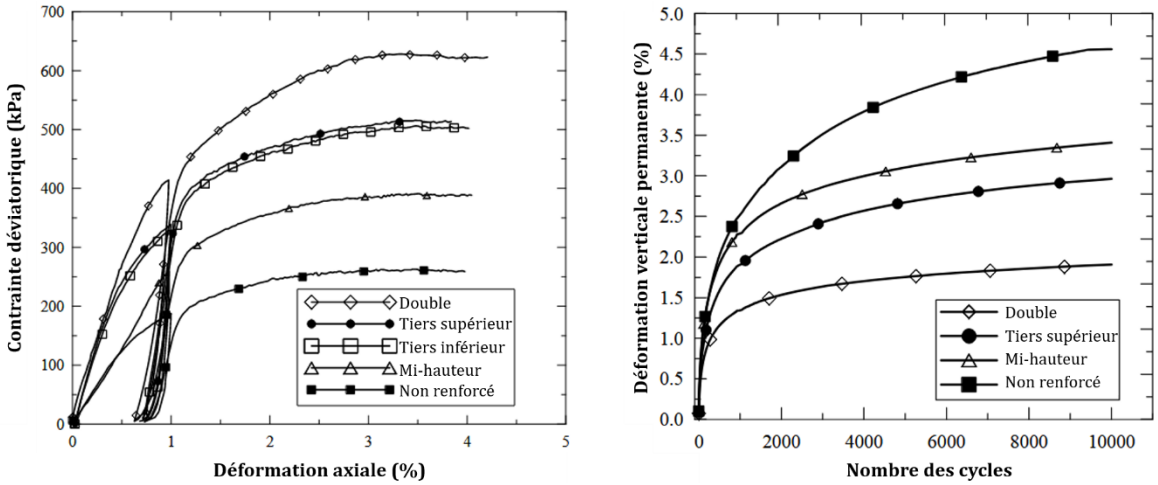


Figure 2.6. Positions des géogrilles et nombre de couches de renforcement installées dans l'échantillon, ainsi que les modes de rupture observés (adapté de Nazzal (2007)).



(a) (b)

Figure 2.7. (a) Courbes contrainte–déformation et (b) évolution de la déformation verticale permanente accumulée pour les échantillons non renforcés et renforcés par une ou plusieurs géogrilles (adapté de Nazzal (2007)).

En suivant le même principe d'analyse mais à l'aide d'un dispositif d'essai de charge localisé à grande échelle (voir Figure 2.5), Abu-Farsakh et Chen (2011) sont parvenus à des conclusions similaires concernant l'influence de la position de la géogrille. De meilleures performances ont été observées lorsque la géogrille était placée au tiers supérieur de la couche de base que lorsque la géogrille était placée à l'interface couche de base - couche de forme ou au milieu de la couche de base. Ce comportement a été particulièrement marqué pour la géogrille identifiée comme « GG4 », qui a permis d'obtenir une répartition plus étendue et homogène des contraintes verticales ainsi qu'une réduction notable de leur intensité maximale sous la zone de chargement.

Ainsi, d'autres recherches ont mis en évidence des résultats parfois divergents. Par exemple, Gu (2015) a évalué l'effet de la géogrille en fonction de son emplacement dans la couche de base en utilisant un échantillon cylindrique de 150 mm de diamètre et 150 mm de hauteur sous charge cyclique. Dans son étude, la géogrille a été placée à différentes positions, notamment à mi-hauteur

et au quart inférieur de l'échantillon. Les résultats ont révélé que la configuration la plus performante correspondait à une géogrille placée à mi-hauteur, cette position permettant de mieux limiter les déformations permanentes.

En revanche, Knighton (2015), en s'appuyant sur des essais triaxiaux cycliques répétés réalisés conformément à la norme AASHTO T 307 (essai du module de résilience), a comparé deux positions de renforcement : à mi-hauteur et au quart supérieur de l'échantillon. Ses résultats indiquent que la seconde configuration procurait de meilleures performances, traduites par un module élastique plus élevé et une résistance au cisaillement mobilisée supérieure.

Ces constats soulignent que l'efficacité optimale du renforcement par géogrille dépend à la fois de son positionnement dans la matrice granulaire, mais aussi de la géométrie de l'échantillon et du protocole d'essai adopté.

2.2.5 Zone d'influence stabilisée mécaniquement

L'épaisseur du matériau affectée par la mise en place d'un renforcement géosynthétique est considérée comme un facteur de conception important. Ainsi, de nombreuses recherches ont été lancées pour évaluer l'étendue de la zone d'influence du renforcement, son effet sur l'accroissement de la rigidité du matériau granulaire ainsi que sur l'amélioration de sa stabilité globale.

La zone d'influence théorique d'un matériau granulaire stabilisé mécaniquement par la présence d'une géogrille est illustrée dans la Figure 2.8.

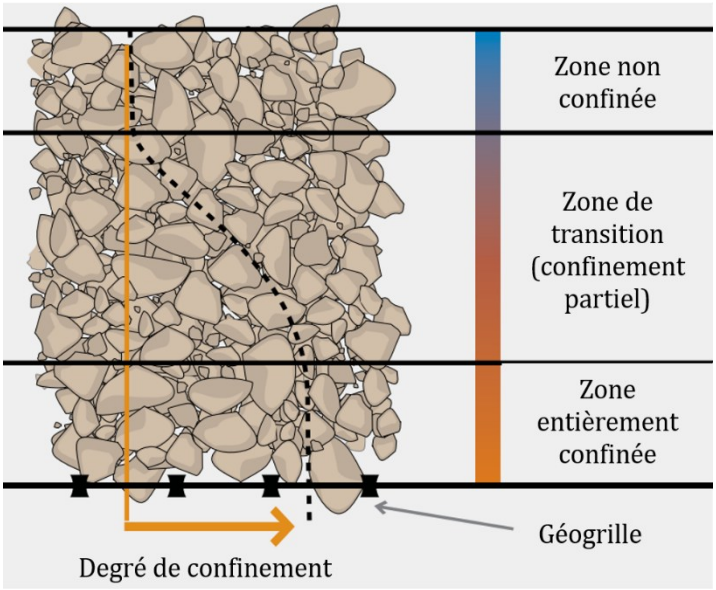
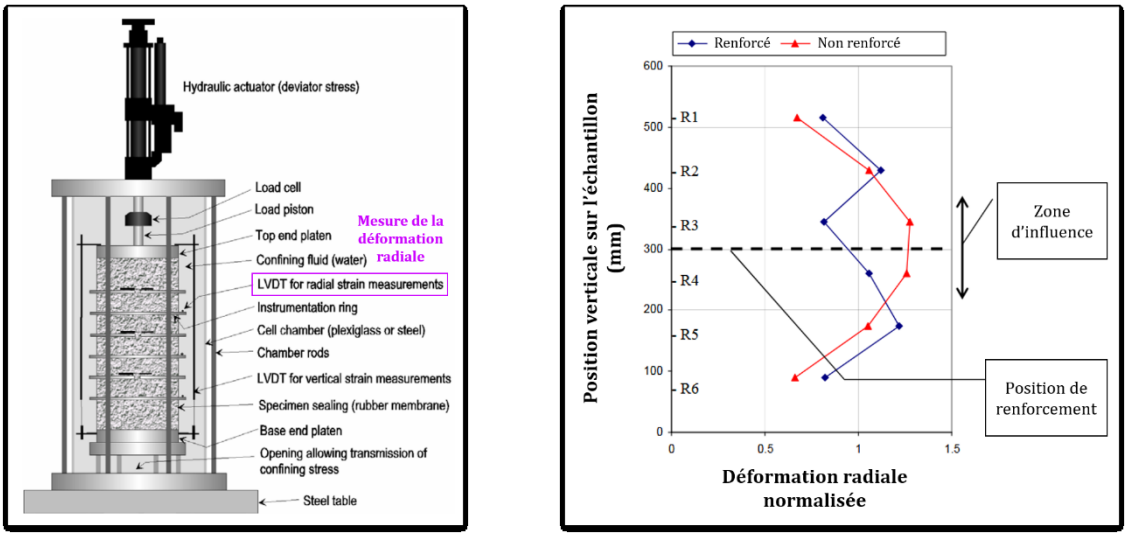


Figure 2.8. Confinement des agrégats dans une couche mécaniquement stabilisée (extrait de Tensar).

Cette influence est répartie dans l'espace et se caractérise par trois zones distinctes en fonction du degré de confinement induit par la géogrille. Près de la géogrille, le matériau entre dans une zone de confinement total, où le degré de confinement est le plus élevé. Dans cette zone, la géogrille limite efficacement le mouvement latéral des particules, ce qui améliore l'imbrication et la stabilité mécanique globale. En s'éloignant de la géogrille, le matériau passe dans une zone de confinement partiel, où l'effet de confinement diminue progressivement. Ici, la géogrille influence toujours le comportement des particules, mais dans une moindre mesure, ce qui entraîne une réduction progressive de la retenue latérale. Au-delà se trouve la zone non confinée, où la géogrille n'a pas d'effet perceptible sur la matrice granulaire. Dans cette zone éloignée, le comportement

des particules n'est pas affecté par le renforcement et le matériau se comporte comme s'il n'était pas renforcé. Cette délimitation spatiale souligne la nature localisée du renforcement par géogrille et met en évidence l'importance de son placement stratégique dans les systèmes granulaires afin d'optimiser les performances mécaniques.

Perkins et al. (2004) ont étudié expérimentalement l'étendue de la zone d'influence d'une géogrille à l'aide de 15 essais triaxiaux cycliques sur des échantillons de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur, constitués d'agrégats de tailles moyennes de 5 et 10 mm (Figure 2.9.a). Pour les échantillons renforcés, une seule couche de géogrille a été placée à mi-hauteur. Afin de caractériser l'effet du renforcement, six LVDT ont été disposés sur la surface cylindrique pour mesurer les déformations radiales. Ces dernières ont été normalisées par rapport à la moyenne des six mesures et représentées dans la Figure 2.9.b.



(a) (b)

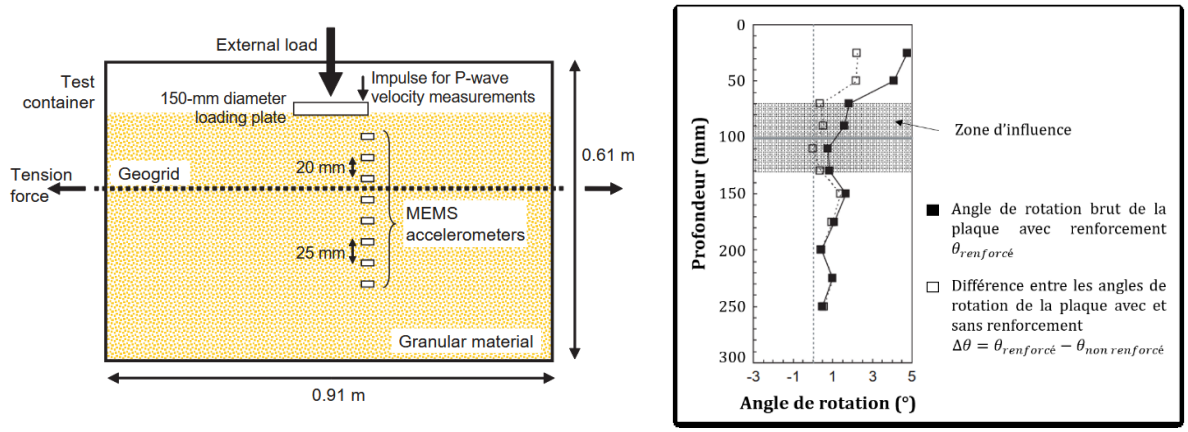
Figure 2.9 (a) Schéma de l'équipement d'essai triaxial ; (b) Déformation radiale moyenne pour les essais de déformation permanente (adapté de Perkins et al. (2004)).

Les résultats montrent que le renforcement a pour effet de restreindre le mouvement radial des agrégats. Cela peut être directement lié à l'imbrication des particules dans les ouvertures de la géogrille créant une zone d'amélioration des propriétés du sol où la meilleure performance est enregistrée juste à côté de la géogrille, environ 150 mm (soit 10 à 30 D_{50}) au-dessus et au-dessous du renforcement, tandis que l'influence de l'imbrication diminue avec l'augmentation de la distance par rapport à la géogrille. Il a également été démontré que les géogrilles sont efficaces en améliorant la rigidité et la stabilité des structures de chaussées renforcées et en réduisant la déformation permanente accumulée, ce qui confirme les observations de Haas et al. (1988).

D'autre part, Schuettpelz et al. (2009) ont développé un modèle d'essai afin de quantifier la zone d'influence générée par la présence d'une géogrille dans des matériaux granulaires. Les essais ont été réalisés dans une boîte d'essai de 0,61 m de large, 0,91 m de long et 0,61 m de profondeur, dimensions choisies afin de limiter les effets de bord sur la distribution des charges et la propagation des ondes élastiques (Figure 2.10.a). Le matériau testé était un granulat calcaire concassé (D_{50} = 3 mm, C_u = 23,8, C_c = 0,2), constitué de particules anguleuses. Une géogrille biaxiale extrudée, présentant des ouvertures de 38 mm, a été précontrainte afin de favoriser l'interaction entre les granulats et le renforcement.

Le protocole expérimental consistait à appliquer des chargements statiques et cycliques simulant le trafic à l'aide d'une plaque circulaire de 150 mm de diamètre, tout en mesurant l'angle de rotation sous le bord de la plaque en fonction de la profondeur à différentes profondeurs. Les

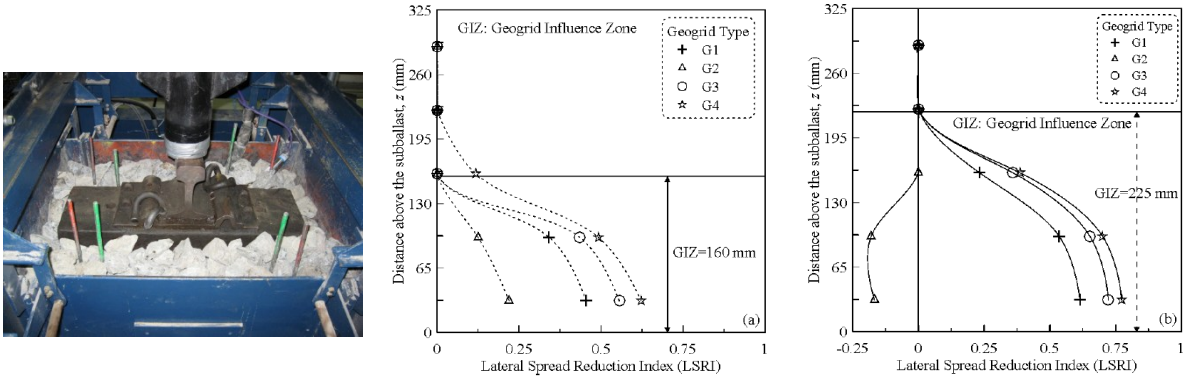
mesures ont été effectuées à l'aide de capteurs de type systèmes micro-électromécaniques (MEMS) intégrés dans la masse granulaire, tandis que les ondes étaient générées par percussion instrumentée de la plaque de chargement. Les résultats indiquent que l'épaisseur et la position de la zone d'influence varient selon la profondeur d'installation de la géogrille (Figure 2.10.b). L'analyse des angles de rotation a montré qu'une zone confinée se développe de part et d'autre du renforcement, avec une épaisseur moyenne de l'ordre de 30 mm (soit 10 D_{50}).



(a) (b)

Figure 2.10. (a) Schéma du modèle d'essai développé ; (b) Zone d'influence déterminée à partir des résultats des tests d'angle de rotation pour une géogrille précontrainte à 100 mm de profondeur (adapté de Schuettpelz et al. (2009)).

Hussaini (2013) a également étudié la zone d'influence de la géogrille dans le matériau de ballast (D_{50} = 35 mm, C_u = 1,87, C_c = 1,12) à l'aide d'essais sur un modèle réduit de voie ferrée (Figure 2.11). La zone d'influence a été définie à partir d'un paramètre normalisé appelé indice de réduction de l'étalement latéral (LSRI, Lateral Spread Reduction Index), calculé comme le rapport entre la différence de déplacement latéral du ballast non renforcé et du ballast renforcé et le déplacement latéral du ballast non renforcé, en fonction de la profondeur.



(a) Géogrille placée à z = 0 mm (b) Géogrille placée à z = 65 mm

Figure 2.11. (a) Vue en plan du modèle réduit de ballast renforcé ; (b) Variation de l'indice de réduction de l'étalement latéral (LSRI) en fonction de la profondeur pour une géogrille placée à z = 0 mm et z = 65 mm (Hussaini, 2013).

Les résultats montrent que, pour une position donnée de la géogrille, l'épaisseur de la zone d'influence de la géogrille (GIZ, Geogrid Influence Zone) varie entre 160 mm (4,6 D_{50}) et 225 mm (6,45 D_{50}), selon le type et la position de la géogrille. En particulier, la zone d'influence maximale de 225 mm (6,45 D_{50}) a été observée lorsque la géogrille était insérée dans la couche de ballast, contre 160 mm (4,6 D_{50}) lorsqu'elle était placée à l'interface avec le sous-ballast. Cette variation

s'explique par la présence d'un sous-ballast plus dense sous la géogrille, limitant l'imbrication des particules dans les ouvertures et réduisant ainsi l'efficacité de l'interaction particule-géogrille.

Dans le même contexte, Konietzky et al. (2004) ont utilisé la modélisation par éléments discrets pour étudier les effets d'imbrication des géogrilles biaxiales sous deux types de sollicitations différentes. Le premier essai était un essai d'arrachement quasi-statique d'une géogrille formée de chaînes de petites particules en utilisant des liaisons parallèles et placée à mi-hauteur d'une boîte de dimensions 180x180x700 mm remplie de sphères rigides de taille 0,6/20 mm (D_{50} = 7,5 mm). L'analyse des forces interparticulaires mesurées dans le modèle avant et pendant l'essai d'arrachement a montré une augmentation significative des forces de contact dans la zone proche de la géogrille, ce qui constitue un indicateur clair de l'effet d'imbrication entre les particules et le renforcement (Figure 2.12).

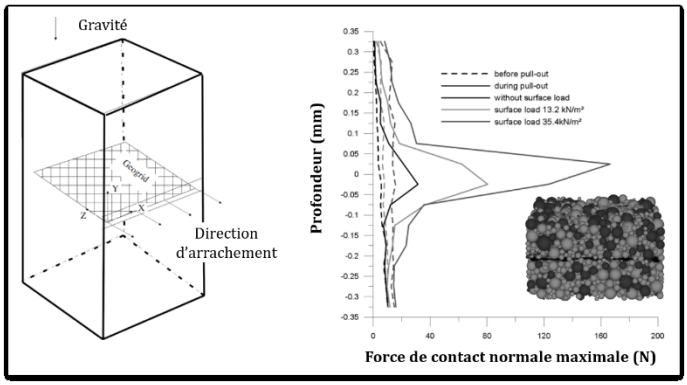


Figure 2.12. Force normale maximale en fonction de la hauteur du modèle avant et pendant le test d'arrachement (adapté de Konietzky et al. (2004)).

Le deuxième essai était quant à lui un essai triaxial cyclique utilisant trois géogrilles symétriques placées dans un cylindre de 600 mm de hauteur et de 160 mm de diamètre (Figure 2.13). Cette fois-ci, pour quantifier l'effet d'imbrication, un rapport de forces a été défini comme le rapport entre la force moyenne à l'intérieur d'un bloc couvrant horizontalement quatre mailles intactes et sur une hauteur de 2 cm, et la force moyenne dans le même intervalle de hauteur mais considérant l'ensemble de la section transversale.

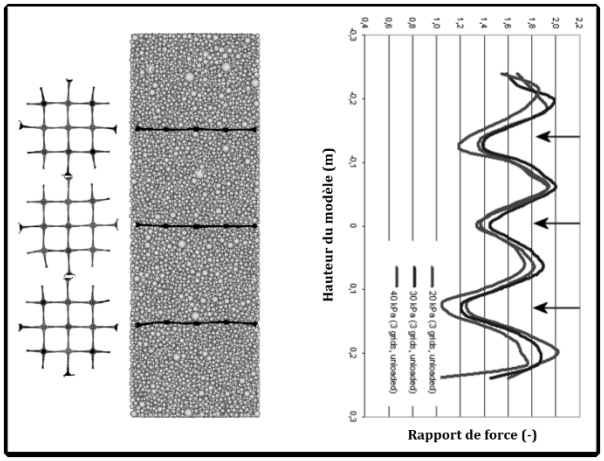


Figure 2.13. Rapport de force en fonction de la hauteur du modèle après déchargement partiel vertical et horizontal ; les flèches indiquent l'emplacement des nappes de géogrille (Konietzky et al., 2004).

Les résultats de ces deux essais montrent que l'effet d'imbrication est limité à une hauteur de 100 mm (13,33 D_{50}) de part et d'autre de la géogrille en termes d'augmentation des forces de contact entre les particules et qu'il disparaît à une valeur supérieure.

2.2.6 Paramètres influençant l'interaction entre le matériau et la géogrille

2.2.6.1 *Taille de l'ouverture de la géogrille*

Comme présenté précédemment, l'imbrication des grains dans l'ouverture de la géogrille est considérée comme le mécanisme prédominant parmi ceux qui se produisent au niveau de l'interaction sol-géogrille. Son efficacité dépend considérablement du rapport entre la taille de l'ouverture de la géogrille et la granulométrie du sol dans lequel la géogrille est installée. Par conséquent, de nombreuses études se sont concentrées sur la détermination du rapport optimal mais celui-ci diffère d'une étude à l'autre.

Tout d'abord, rappelons l'étude de Mulabdic et al. (2018) qui a proposé un diagramme décrivant les facteurs d'influence sur l'interaction sol-géogrille présentée dans la Figure 2.3. Le rapport optimal a été trouvé égale à 2-3 et il est clair que tout rapport plus petit ou plus grand par rapport au rapport optimal, ne permettra pas d'obtenir une imbrication optimale avec un renforcement ou une stabilisation du sol plus faible en conséquence.

Brown et al. (2007) ont déterminé expérimentalement les paramètres clés qui influencent le renforcement du ballast ferroviaire par géogrille biaxiale extrudée sous chargement répété. Parmi ces paramètres est le rapport b/D_{max} entre la taille d'ouverture de la géogrille b et la taille maximale des agrégats D_{max}. La valeur 1,4 a abouti à une performance optimale en réduisant le tassement pour cette étude.

Kwan (2006) a utilisé la taille moyenne des particules de ballast au lieu de la taille maximale et a obtenu à peu près le même résultat en déclarant que ce nouveau ratio devrait être au moins 1,6 fois pour obtenir un bon renforcement. Dans le même sens, Hussaini (2013) a étudié expérimentalement l'effet de la taille de l'ouverture de la géogrille sur le comportement de l'interface ballast-géogrille en utilisant un appareil de cisaillement direct à grande échelle. Les résultats ont été extraits en observant la variation d'un facteur d'interface, défini comme le rapport entre la résistance au cisaillement de l'interface et la résistance au cisaillement interne du sol, en fonction du rapport entre la taille de l'ouverture de la géogrille et la taille moyenne des particules. Il a été observé que ce rapport varie entre 0,95 et 2,5 pour obtenir des résultats bénéfiques où le comportement optimal est déterminé à une valeur égale à 1,2.

En suivant le même principe, Han et al. (2018) ont constaté que le rapport optimal était compris entre 1,30 et 1,71 pour les géogrilles biaxiales, et entre 1,08 et 1,43 pour les géogrilles triaxiales. D'autre part, Palmeira et Góngora (2015) ont trouvé la valeur optimale du rapport entre la taille équivalente de l'ouverture de la géogrille et le diamètre maximal des particules de remblai égale à 0,94 et la valeur optimale de ce rapport en considérant le diamètre moyen des particules de remblai égale à 1,8.

En revanche, Ahmadi et Moghadam (2017) ont effectué des essais d'arrachement en laboratoire et ont montré que le rapport entre la dimension de l'ouverture appropriée et la taille moyenne des particules dépend de la distribution de la taille des particules et de la classification : des valeurs plus élevées (7-12) ont été trouvées pour les sols bien gradués par rapport à celles des sols présentant une granulométrie uniforme (3-4).

Toutefois, l'utilisation de la taille moyenne ou maximale des particules pour caractériser le comportement de l'interface agrégat-géogrille est discutable car la taille varie en fonction des portions de toutes les particules autour de la géogrille dont certaines tailles (des tailles trop

grandes ou trop petites) peuvent ne pas avoir d'impact efficace sur l'imbrication entre les agrégats et les géogrilles (Figure 2.14).

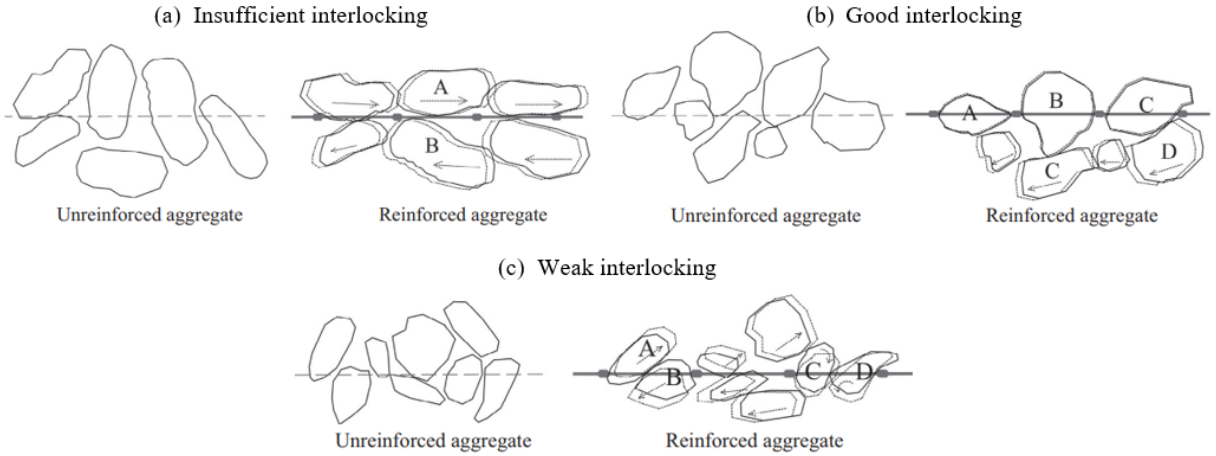


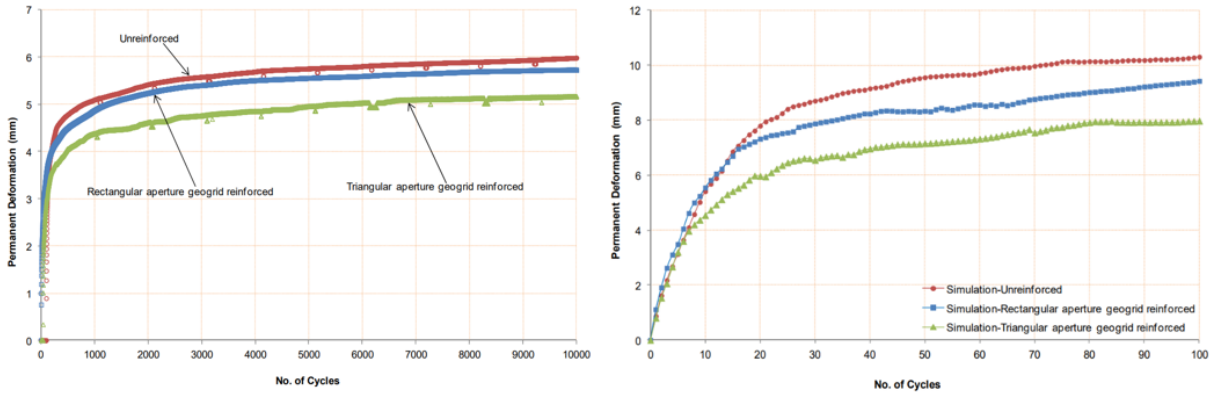
Figure 2.14. Mécanisme d'imbrication pour différentes tailles de particules situées autour de la géogrille (extrait de Han et al. (2018)).

Tous ces résultats montrent l'importance du choix d'une géogrille adaptée en fonction de la granulométrie du sol sur le comportement de la structure, en particulier le mécanisme d'interlocking, sous chargement.

2.2.6.2 *Forme de l'ouverture de la géogrille*

D'autres études ont été menées afin de déterminer la forme la plus efficace de l'ouverture de la géogrille pour le renforcement des matériaux granulaires.

Abu-Farsakh et al. (2011) ont étudié l'effet de la forme de l'ouverture de la géogrille sur le comportement sous charge cyclique en utilisant quatre géogrilles différentes (deux géogrilles biaxiales et deux géogrilles triaxiales) et sont arrivés au même résultat : des valeurs plus faibles de déformation permanente sont observées avec les échantillons stabilisés avec des géogrilles triaxiales par rapport à ceux stabilisés avec des géogrilles biaxiales ayant un module de résistance à la traction similaire.



(a) Experimental test results (b) Predicted trends from DEM simulations

Figure 2.15. Déformation permanente des échantillons de ballast non renforcés et renforcés par des géogrilles (Qian et al., 2013).

Dans le même contexte, Qian et al. (2013) se sont concentrés sur le comportement des échantillons de ballast en termes de déformation permanente (305 mm de diamètre et 610 mm de hauteur) renforcés par une géogrille à ouverture rectangulaire et triangulaire à travers un

dispositif d'essai triaxial à charge répétée à grande échelle en laboratoire, suivi par des simulations numériques de modèle DEM. Les résultats des expériences en laboratoire et des simulations du modèle DEM (Figure 2.15) ont montré une similarité des avantages de l'utilisation des géogrilles, avec une meilleure performance de la géogrille à ouverture triangulaire que de la géogrille à ouverture rectangulaire dans la réduction de la déformation verticale permanente.

Rahman et al. (2014) ont étudié les caractéristiques de déformation permanente des matériaux de construction et de démolition renforcés par des géogrilles biaxiales et triaxiales, afin d'évaluer leur faisabilité en tant que matériaux de construction alternatifs dans les applications de chaussée. L'étude consiste à utiliser un équipement triaxial à charge répétée pour simuler la charge des roues du trafic sur la base/sous-base en appliquant une charge cyclique sur les spécimens conformément à la norme AASHTO T307. La conclusion principale est cohérente avec les résultats des études précédentes telles que Perkins (2004), Nazzal (2007), et Abu-Farsakh et al. (2011) : l'incorporation de géogrilles a des effets significatifs sur la déformation permanente du matériau granulaire. Par ailleurs, l'étude a montré une réduction plus importante des déformations permanentes pour des échantillons stabilisés avec des géogrilles triaxiales par rapport à celles des échantillons stabilisés avec des géogrilles biaxiales.

Pendant que Gu (2015) étudiait l'effet de la position de la géogrille sous chargement cyclique, deux géogrilles triaxiales différentes et une géogrille biaxiale ont été utilisées pour examiner également l'effet de la forme de l'ouverture de la géogrille. Les résultats (Figure 2.16) sont présentés sous la forme d'une « Réduction de la Déformation Plastique » définie comme le quotient de la différence entre la déformation permanente sans géogrille et la déformation permanente avec géogrille par la déformation permanente sans géogrille.

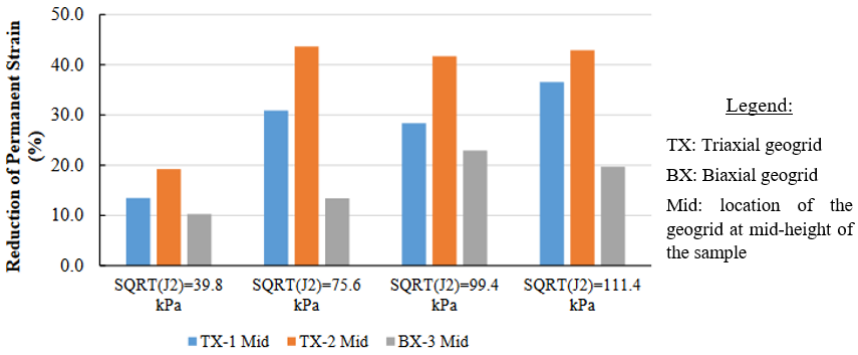


Figure 2.16. Effet du type d'ouverture de la géogrille sur la déformation permanente à différents niveaux de contrainte déviatorique (Gu, 2015).

En comparaison avec la géogrille biaxiale, l'utilisation de la géogrille triaxiale a entraîné une réduction plus importante de la déformation plastique pour tous les états de contrainte. Ainsi, la géogrille à ouvertures triangulaires se révèle plus efficace que la géogrille à ouvertures rectangulaires pour réduire la déformation permanente.

Chen et al. (2018) ont également étudié numériquement (en utilisant le logiciel PFC3D) et expérimentalement la micromécanique de la déformation de la géogrille ainsi que le mécanisme d'enchevêtrement lors d'un essai d'arrachement de deux formes de géogrilles différentes (biaxiale et triaxiale) et d'un milieu granulaire (numériquement formé de clumps). Les résultats expérimentaux et DEM montrent que, dans les conditions d'essais réalisées, la géogrille triangulaire offre une meilleure résistance à l'arrachement que la géogrille carrée.

Donc, la forme et la géométrie de l'ouverture de la géogrille jouent un rôle important dans le comportement du renforcement.

2.2.6.3 *Rigidité de la géogrille*

Les résultats complémentaires obtenus lors des études citées précédemment ont également révélé l'effet du profil des nervures (section transversale) et de la rigidité de la géogrille. Plusieurs géogrilles ont été utilisées et la comparaison a été faite entre des géogrilles identiques en termes de composition et de taille, mais différentes en termes de résistance et de rigidité. Les résultats indiquent que pour un certain emplacement de la géogrille, les géogrilles ayant une plus grande rigidité à la traction ont montré de plus grands avantages (Perkins, 1999; Brown et al., 2007; Nazzal, 2007; Abu-Farsakh et al., 2011). Une illustration de cette affirmation est déjà fournie par Gu (2015) qui a montré que pour la même position de deux géogrilles triaxiales de valeur de rigidité différente, la géogrille TX-2 a une réduction plus élevée de la déformation permanente que la géogrille TX-1, ce qui indique que la géogrille avec une rigidité en traction plus élevée a plus d'avantages de renforcement (Figure 2.16). Kwan (2006) a noté également que l'effet de rigidité de la géogrille est plus important quand une bonne imbrication est réalisée, alors qu'il a peu d'impact quand l'imbrication n'est pas établie efficacement.

2.2.7 Résultats significatifs motivant le présent projet

Le sujet du renforcement des sols granulaires par des géogrilles a déjà été initié dans l'équipe « GéoMécanique » du laboratoire 3SR, par des études numérique et expérimentale.

2.2.7.1 *Numérique sur l'aspect renforcement*

D'un point de vue numérique, Moravia (2020) a étudié le renforcement des sols granulaires par géogrilles par une approche numérique basée sur la modélisation DEM (en utilisant le logiciel YADE), et ce pour améliorer la compréhension des micro-mécanismes de l'interaction entre les géogrilles et les matériaux granulaires.

Il a d'abord proposé un modèle discret de géogrille de forme réaliste en utilisant des éléments déformables dans le cadre de YADE, qui capture la nature continue des éléments qui composent la géogrille. Ensuite, il a réalisé des simulations d'essais d'extraction de géogrille, dans une boite $1m \times 0{,}5m \times 0{,}5m$, pour des géométries variées : ouvertures de maille, forme et tailles des particules du sol granulaire (particules sphériques et non sphériques constituées de clumps de plusieurs sphères interconnectées). Les rôles du frottement des grains sur les éléments de la géogrille et des mécanismes de butée des brins transversaux sur le comportement en ancrage ont été très clairement mis en évidence. De plus, les résultats obtenus ont montré que l'angularité des particules et la taille relative entre les ouvertures de la géogrille et les particules ont une influence significative sur la mobilisation en traction du renforcement. Il a également vérifié que les contraintes mobilisées dans les éléments transversaux de la géogrille lors de son arrachement sont significativement plus faibles que celles des éléments longitudinaux, mais qu'elles sont non négligeables.

2.2.7.2 *Expérimental sur l'aspect stabilisation*

Yaba (2022) a investigué expérimentallement l'efficacité de l'utilisation des géogrilles pour améliorer les plateformes de SNCF Réseau face aux enjeux de maintenance de plus en plus exigeants lors du renouvellement de ses lignes classiques.
Il a réalisé des expérimentations sous chargement cyclique sur des conditions opérationnelles (in situ) avec SNCF Réseau ainsi que des essais à échelle réduite au laboratoire (dans la VisuCuve de dimensions $2m \times 0{,}95m \times 0{,}9m$) pour mesurer les effets des géogrilles en conditions contrôlées. Les résultats indiquent que l'installation de géogrilles à l'interface entre sous-couche et sol support a un impact positif, notamment grâce à une meilleure répartition de la contrainte dans la plateforme et à une réduction du tassement différentiel. In situ, une mobilisation des géogrilles a été observée par la mesure de la déformation de leurs brins transversaux, confirmant ainsi que

les granulats sont confinés latéralement par l'enchevêtrement des grains dans les ouvertures de la géogrille.

Ces études ont montré la capacité de la forme de l'ouverture à bloquer le mouvement des particules dans la direction latérale afin d'obtenir une déformation permanente verticale plus faible. Toutefois, il est difficile de distinguer et de définir l'influence d'un seul paramètre sur l'interaction avec le sol, comme par exemple la forme de l'ouverture, car l'interaction est également influencée par la rigidité de la géogrille et par la forme et les dimensions des nervures. Par conséquent, cette diversité de facteurs et l'interdépendance de ces différents paramètres influençant la réponse des systèmes de renforcement des sols ainsi que les mécanismes impliqués donnent la nécessité de poursuivre les recherches sur ce sujet afin de contribuer à une meilleure compréhension de ces interactions et à fournir des éléments pouvant enrichir les approches existantes pour le dimensionnement des systèmes de renforcement, en tenant compte de ces paramètres de manière plus intégrée.

2.3 Conclusions

Les études présentées dans la littérature mettent en évidence plusieurs aspects clés du renforcement et de la stabilisation des sols granulaires par des géogrilles : l'importance de la position et du nombre de couches de géogrilles, l'influence sur la redistribution des contraintes verticales et latérales, l'existence d'une zone d'influence localisée, ainsi que le rôle majeur de l'imbrication des particules et de la rigidité des géogrilles sur le comportement mécanique global. Ces travaux ont permis de quantifier l'étendue des zones d'influence et de montrer comment le renforcement modifie les mécanismes de déformation, tant en termes de rigidité que de déformations permanentes.

Néanmoins, certaines observations divergent selon les configurations étudiées, la méthodologie expérimentale et l'échelle d'analyse. Bien que plusieurs études aient porté sur le comportement macroscopique des sols renforcés, la compréhension des phénomènes locaux reste limitée à l'échelle microscopique, notamment en ce qui concerne la contribution des mécanismes d'interaction particule-géogrille à la redistribution des contraintes et à la réduction des déformations permanentes. Ainsi, plusieurs questions demeurent ouvertes :

- L'effet combiné de la forme et de la taille des grains sur l'efficacité du renforcement ;
- La variabilité spatiale de la zone d'influence selon les propriétés mécaniques de la géogrille et du matériau granulaire ;
- La quantification précise des mécanismes locaux d'interaction, tels que la butée et le frottement, entre particules et géogrille.

La présente thèse s'inscrit dans ce contexte et propose une approche combinant simulations numériques par éléments discrets et observations expérimentales à l'échelle laboratoire et tomographique pour :

- Étudier le comportement global des matériaux granulaires renforcés et la contribution de la géogrille à la rigidité et à la limitation des déformations permanentes ;
- Quantifier la zone d'influence locale et analyser les mécanismes micromécaniques d'interaction grain-géogrille ;
- Évaluer l'effet des paramètres granulaires, géométriques et mécaniques (forme et taille des grains, élancement des échantillons, rigidité et position des géogrilles) sur le comportement triaxial des sols renforcés.

Cette approche permet de relier de manière cohérente les observations macroscopiques aux phénomènes microscopiques et de lever les verrous identifiés dans les travaux antérieurs, tout en

fournissant des éléments quantitatifs pour l'optimisation du renforcement et la stabilisation des sols granulaires par géogrilles.

3 Méthodologie et caractérisation expérimentales

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale développée pour étudier le comportement des sols granulaires renforcés par des géogrilles. Il débute par une description détaillée des matériaux utilisés, du protocole de préparation des échantillons et du dispositif expérimental, conçu pour simuler des conditions réalistes tout en assurant la représentativité des configurations observées. Cette première présentation est effectuée en s'appuyant sur les dimensions d'échantillon (200 mm de diamètre) correspondant à l'objectif final de cette caractérisation expérimentale et concernant la tomographie à rayons X. Toutefois, afin de vérifier les possibilités de mise en œuvre de cette méthode de préparation ainsi que sa reproductibilité, une première série d'échantillons de taille plus réduite (70 mm de diamètre) ont été produits. Ces derniers ont été avantageusement utilisés pour réaliser des essais triaxiaux afin d'évaluer le comportement mécanique global du système. Cette première campagne a été complétée par deux campagnes tomographiques menées sur des échantillons de taille croissante (tout d'abord des échantillons de 70 mm de diamètre puis de 200 mm de diamètre). L'objectif initial de ces campagnes tomographiques était de de capturer l'évolution de la microstructure interne et les mécanismes d'interaction entre les grains et la géogrille. L'ensemble de cette démarche vise à concilier réalisme expérimental, fiabilité des observations et analyse approfondie du comportement interne du matériau renforcé.

3.1 Matériaux utilisés

La partie expérimentale de cette étude repose sur la tomographie (décrite dans la section 3.3 ci-après), une technique qui permet d'obtenir des informations précieuses sur la structure interne des échantillons. Cependant, le système de tomographie impose certaines limites aux propriétés de l'échantillon en raison des contraintes de résolution et des artefacts potentiels introduits au cours du processus d'imagerie. Ces facteurs peuvent influencer la précision des données capturées, affectant ainsi la représentation de certaines caractéristiques, telles que les interactions grains-géogrilles.

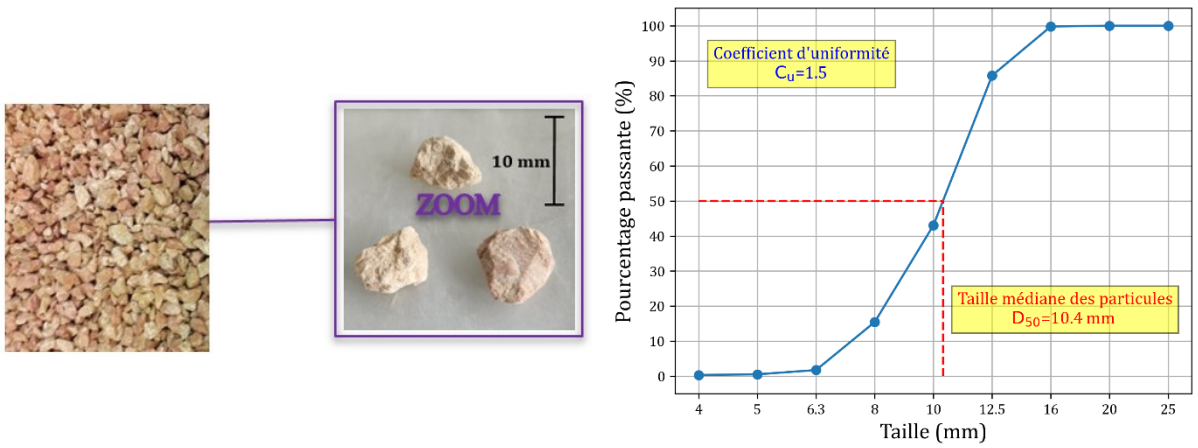
3.1.1 Propriétés du matériau granulaire

3.1.1.1 *Granulométrie*

Plusieurs considérations ont guidé le choix du matériau granulaire utilisé dans cette étude. Tout d'abord, la forme des agrégats exerce une influence significative sur le comportement mécanique des milieux granulaires. Les études indiquent que la forme des grains, notamment leur angularité ou convexitité, influence significativement la densité de compactage, la rigidité et la résistance du matériau (Santamarina et Cho, 2004; Cho et al., 2006). Dans les milieux renforcés, il est établi que les particules anguleuses développent des mécanismes d'imbrication plus marqués que les particules roulées, ce qui accentue leur capacité à mobiliser le renforcement. Ce phénomène est particulièrement critique dans les interactions avec les géogrilles, comme l'ont montré les travaux de Han et al. (2018), voir section 2.2. Ensuite, le choix du matériau a été influencé par les contraintes liées à la tomographie aux rayons X (abordée plus en détail dans la section 3.3), une technique d'imagerie qui repose sur l'atténuation des rayons au sein de la matière. Cette atténuation est gouvernée par le coefficient d'atténuation massique « μ/ρ », lui-même fortement dépendant du numéro atomique effectif « Z_{eff} ». Comme l'ont montré Hubbell (1996) et rappelé

par Ando (2013), l'atténuation augmente globalement avec Z, avec un effet marqué du seuil à certaines énergies. Cette atténuation excessive peut compromettre soit le contraste (dans les matériaux trop peu absorbants), soit la pénétration (dans les matériaux trop absorbants), et générer des artefacts dans les images tomographiques. Afin d'assurer une bonne pénétration des rayons X tout en conservant un contraste suffisant entre les constituants de l'échantillon (grains, vide, géogrille), il convient donc d'éviter les matériaux trop absorbants, notamment ceux contenant des éléments à numéro atomique élevé. Les roches telles que le granite et le basalte, riches en éléments lourds comme le fer (Fe, Z = 26), le potassium (K, Z = 19) et l'aluminium (Al, Z = 13), présentent un Z_{eff} plus élevé (environ 17–20) et une densité souvent plus grande, induisant une atténuation marquée des rayons X. À l'inverse, les roches calcaires, composées principalement de carbonate de calcium ($CaCO_3$), possèdent un Z_{eff} modéré (≈ 15), assurant une atténuation moindre. Cela devrait favoriser une meilleure pénétration des rayons X, un contraste suffisant entre grains, pores et géogrille, et donc une imagerie 3D plus nette et exploitable. Enfin, le calcaire présente aussi l'avantage d'être largement utilisé en pratique dans les couches de forme ou les structures de ballast ferroviaire, ce qui confère un caractère représentatif au matériau testé.

Le matériau granulaire sélectionné se compose ainsi d'agrégats calcaires à granulométrie uniforme. (Figure 3.1). Ces agrégats sont caractérisés par un coefficient d'uniformité « C_u » de 1,5 et une taille médiane des particules « D_{50} » d'environ 10,4 mm (Figure 3.1.b), ce qui les rend relativement représentatifs (taille, étalement, angularité) des matériaux de construction typiques couramment utilisés dans les applications d'ingénierie géotechnique (comme les routes et les voies ferrées). La distribution des tailles de grains du matériau a été déterminée par une analyse granulométrique conformément à la norme NF P 94-056 (AFNOR, 1996).



(a) (b)

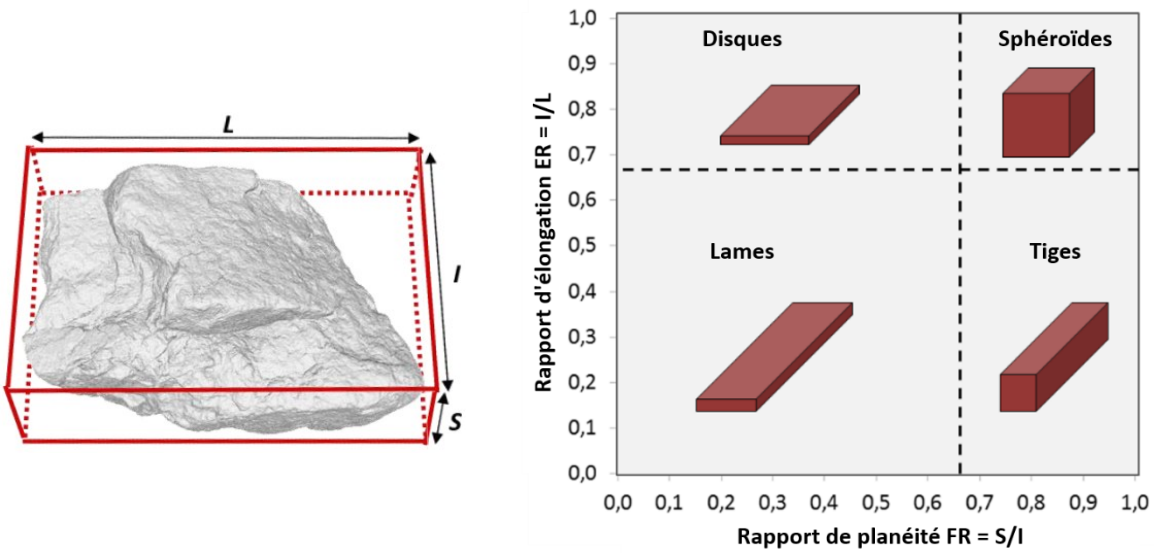
Figure 3.1. (a) Matériau granulaire sélectionné et (b) sa distribution granulométrique.

3.1.1.2 *Paramètres de forme générale*

Les paramètres de forme générale du matériau granulaire ont été évalués à l'aide de la méthode du diagramme de Zingg (1935), comme détaillé dans le travail de Quintanilla I. (2018). Cette approche est largement utilisée pour analyser la géométrie des matériaux granulaires et les classer dans des catégories qui reflètent leurs caractéristiques morphologiques. La méthode comprend plusieurs étapes systématiques pour quantifier la forme tridimensionnelle des grains individuels (Figure 3.2.a) :

1. Inscrire le grain dans un prisme rectangulaire : Chaque grain est entouré d'un prisme rectangulaire minimal, ce qui permet de mesurer avec précision ses proportions géométriques.

2. Déterminer les trois longueurs caractéristiques du grain :
    - Courte distance « S » : l'axe le plus court, représentant la plus petite dimension du grain.
    - Distance intermédiaire « I » : l'axe intermédiaire, qui correspond à la dimension du grain comprise entre la plus grande et la plus petite des trois dimensions caractéristiques.
    - Grande distance « L » : l'axe le plus long, qui correspond à la dimension maximale du grain.



(a) (b)

Figure 3.2. (a) Illustration des longueurs caractéristiques définies à l'aide d'un prisme rectangulaire circonscrit et (b) Diagramme de classification de Zingg (1935), adapté de Quintanilla I. (2018).

En utilisant ces trois longueurs caractéristiques, trois paramètres clés peuvent être définis pour capturer différents aspects de la forme générale d'un grain :

- Sphéricité « Ψ » : ce paramètre indique dans quelle mesure la forme du grain se rapproche d'une sphère. Il est calculé comme suit :

$$\Psi = \sqrt[3]{\frac{S \cdot I}{L^2}} \tag{1}$$

  Une valeur proche de 1 indique une forme plus sphérique, tandis que des valeurs plus faibles représentent des grains allongés ou aplatis.

- Rapport d'élongation « ER » : Ce paramètre mesure le degré d'allongement du grain et est défini comme le rapport entre la distance intermédiaire et la plus grande distance :

$$ER = \frac{I}{L} \tag{2}$$

- Rapport de planéité « FR » : Ce paramètre quantifie la planéité du grain et est calculé comme le rapport entre la plus petite distance et la distance intermédiaire :

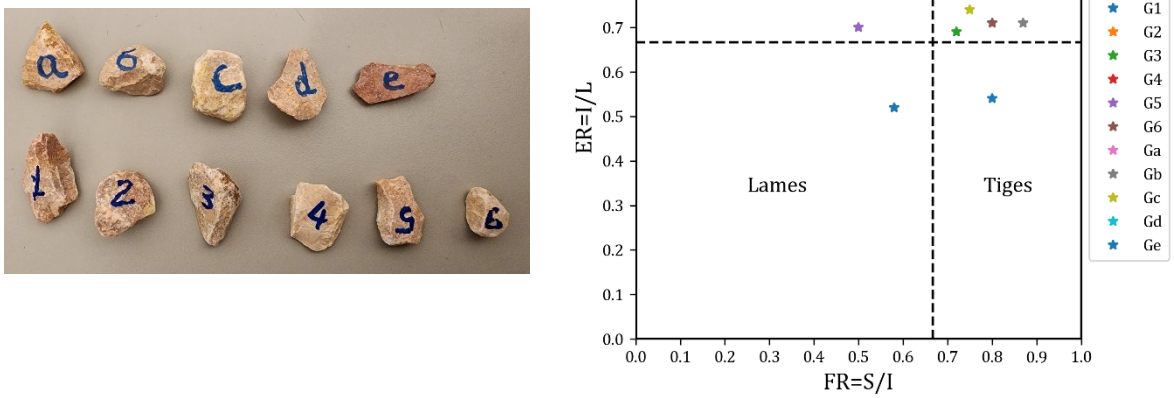
$$FR = \frac{S}{I} \tag{3}$$

A l'aide des paramètres ER et FR, Zingg (1935) a proposé une classification de base des agrégats établissant quatre catégories différentes en fonction d'un seuil fixe égale à 2/3 (Figure 3.2.b) :

- Lames (ER<2/3 ; FR<2/3) : Grains significativement plats et allongés.
- Tiges (ER<2/3 ; FR>2/3) : Grains allongés mais non plats.
- Disques (ER>2/3 ; FR<2/3) : Grains plats mais non allongés.
- Sphéroïdes (ER>2/3 ; FR>2/3) : Grains de forme approximativement sphérique.

Ces caractéristiques de forme jouent un rôle clé dans la modélisation et la simulation du comportement des matériaux granulaires dans diverses applications géotechniques.

Une série de mesures manuelles a été effectuée sur 11 grains distincts afin de caractériser leur forme à l'aide des paramètres de Zingg (Figure 3.3.a).



(a) (b)

Figure 3.3. (a) Les 11 grains sélectionnés pour l'analyse de forme et (b) leur classification Zingg correspondante basée sur les paramètres calculés.

Les résultats (Figure 3.3.b) indiquent que la plupart des grains choisis ont des formes s'approchant de sphéroïdes et de disques, avec une prédominance de formes presque sphériques. Bien que quelques grains présentent des formes plus allongées ou plates, leur fréquence est relativement faible par rapport aux sphéroïdes et aux disques.

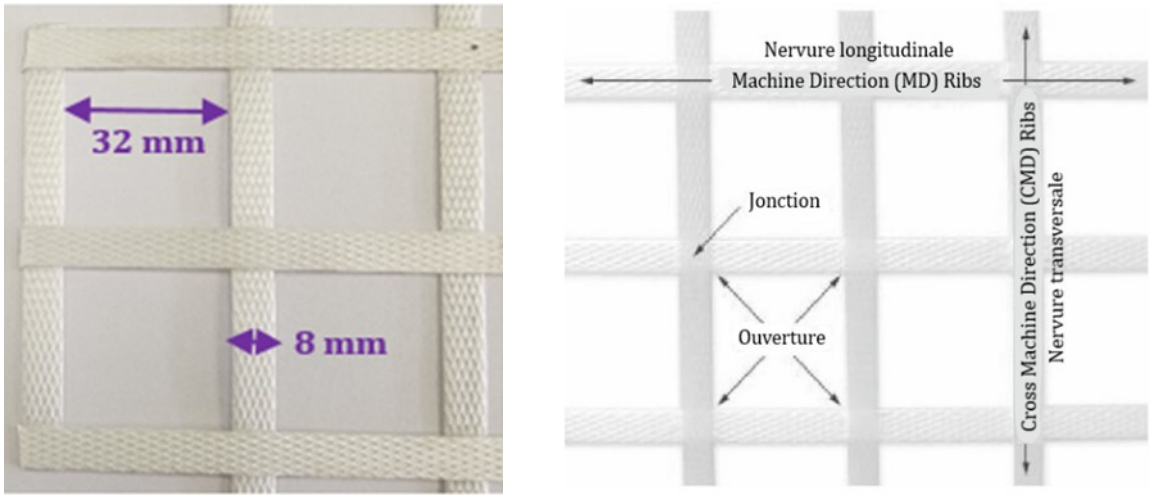
Cette distribution expérimentale des formes sera utilisée comme base de comparaison à deux niveaux ultérieurs : d'abord avec les représentations géométriques numériques utilisées dans le modèle à clumps, puis avec les formes extraites par l'analyse tomographique avancée (Section 5.3.3). L'objectif est de vérifier la représentativité du modèle numérique, en particulier la capacité des clumps — constitués d'agrégats de sphères — à reproduire les morphologies réelles observées, notamment celles correspondant aux formes « a » à « e ».

3.1.2 Propriétés de la géogrille

L'efficacité des géogrilles dépend de plusieurs facteurs, notamment de leurs propriétés physiques, mécaniques et d'interaction avec le sol. Cependant, comme cela a été montré dans l'étude bibliographique, aucune géométrie spécifique de géogrille n'a été prouvée comme étant systématiquement plus performante que les autres dans les applications générales de renforcement des sols. Cette observation souligne l'importance de sélectionner les géogrilles en fonction des conditions spécifiques du projet plutôt que de se reposer sur des géométries prédéfinies.

3.1.2.1 *Sélection de la géogrille*

Dans cette étude, la géogrille de référence choisie est l'un des produits étudiés par Yaba (2022), appelé « Naue Secugrid® 40/40 Q1 », en raison de ses performances bien documentées dans les applications géotechniques. Plus précisément, sa grande rigidité à la traction et sa stabilité mécanique à long terme la rendent particulièrement adaptée au renforcement des voies ferrées, en contribuant à limiter les déformations permanentes, à améliorer la stabilité globale de la plateforme sous charges cycliques, et à réduire les besoins de maintenance. C'est une géogrille biaxiale avec des nervures plates en polymère soudées au niveau des jonctions, formant des ouvertures carrées (Figure 3.4), dont les propriétés sont résumées dans le Tableau 3.1.



(a) (b)

Figure 3.4. Géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1 : (a) présentation réelle de la géogrille et (b) diagramme annoté mettant en évidence les éléments structurels.

Tableau 3.1. Propriétés géométriques et mécaniques de la géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1.

Propriété		Méthode d'essai*	Valeur	Unité
Matières premières		Polypropylène (PP)		
Géométrique	Taille d'ouverture (MD x CMD)	-	32 x 32	mm
	Largeur d'une nervure	-	8	mm
	Epaisseur d'une nervure	-	1	mm
Mécanique	Résistance nominale à la traction RNT (MD x CMD)	EN ISO 10319	$\geq 40 / \geq 40$	kN/m
	Résistance à la traction à 1 % d'allongement (MD x CMD)	EN ISO 10319	8 / 8	kN/m
	Module de traction à 1 % d'allongement (MD x CMD)	EN ISO 10319	800 / 800	kN/m
	Rigidité radiale à 0,5 % de déformation**	EN ISO 10319	≥ 440	kN/m

*Sur la base de ; ** Ce test est effectué par des laboratoires externes et ne fait pas partie du contrôle de qualité standard de Naue.

3.1.2.2 *Propriétés mécaniques*

Les propriétés mécaniques de la géogrille sont détaillées dans cette partie.

Résistance nominale à la traction :

La résistance nominale à la traction « RNT » représente la force de traction maximale (exprimée en force par unité de largeur) que la géogrille peut supporter avant la rupture (Figure 3.5). Pour la Naue Secugrid® 40/40 Q1, cette valeur est de 40 kN/m à 7 % d'allongement (rapport entre l'élongation et la longueur d'origine). Cette valeur est fournie à titre indicatif afin de situer les performances mécaniques de cette géogrille dans le cadre de son utilisation pour des simulations numériques ou des investigations expérimentales. De manière générale, une résistance à la traction élevée est un critère important pour assurer la stabilité à long terme des structures renforcées, en particulier dans des contextes géotechniques sollicitants tels que les remblais, les fondations superficielles ou les infrastructures ferroviaires.

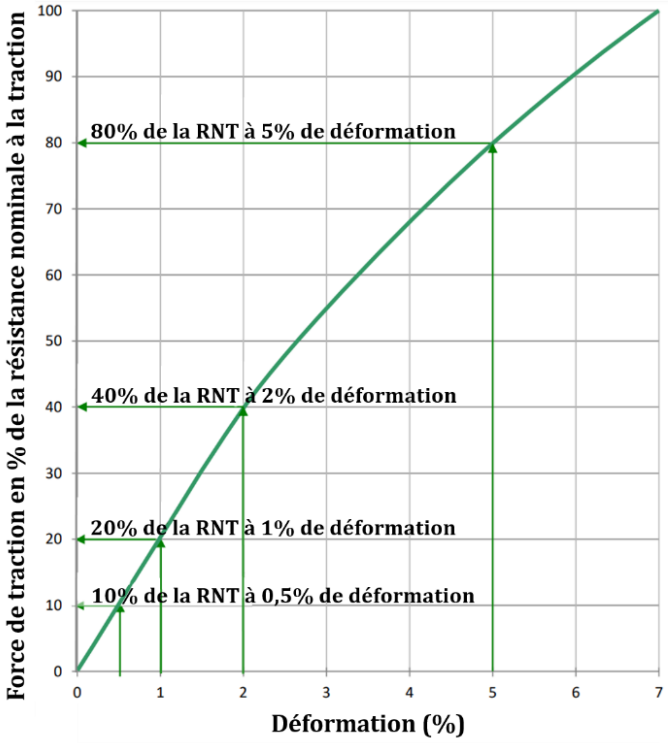


Figure 3.5. Courbe de résistance à la traction en fonction de la déformation de la géogrille fournie par Naue pour Secugrid® 40/40 Q1.

Module de traction :

Le module de traction J de la géogrille est une mesure de la rigidité du matériau sous une charge de traction. Il représente le rapport entre la force de traction appliquée et la déformation correspondante dans le domaine élastique du matériau. Pour la Naue Secugrid® 40/40 Q1, le module de traction est de 800 kN/m à 1 % d'allongement, ce qui signifie que la géogrille peut résister à une force de traction de 800 kN par mètre de largeur avec une déformation de 1%. Un module de traction élevé garantit que la géogrille présente une déformation minimale lorsqu'elle est soumise à une contrainte, une exigence essentielle pour les applications de stabilisation et de renforcement des sols où de faibles déplacements sont souhaités.

Rigidité radiale :

La rigidité radiale est la capacité d'une géogrille à résister à la déformation dans une direction radiale lorsqu'elle est soumise à des forces de traction. Ce paramètre est moins pertinent pour les géogrilles biaxiales, où la rigidité est distribuée uniformément le long de deux directions orthogonales. La rigidité radiale est généralement mesurée comme le module de traction minimal

obtenu à partir d'essais de traction réalisés pour des angles de rotation incrémentaux de 15° par exemple (la méthode détaillée est présentée à la section 4.4.2.2).

La combinaison de la résistance à la traction, du module de traction et de la rigidité radiale détermine l'efficacité globale de la géogrille dans les applications de renforcement des sols. En pratique, la résistance à la traction garantit la capacité de la géogrille à supporter des charges extrêmes sans défaillance, assurant ainsi sa durabilité sous des contraintes importantes. Par ailleurs, le module de traction reflète la rigidité de la géogrille et sa capacité à mobiliser la résistance à la traction à de faibles déformations, ce qui est essentiel pour stabiliser les sols granulaires et minimiser les déformations.

3.1.3 Procédure de préparation

La préparation des échantillons de sol pour cette étude suit une méthodologie systématique pour assurer la reproductibilité et la compatibilité avec le système de tomographie utilisé pour l'analyse.

Contraintes relatives à la taille de l'échantillon :

En raison des limites dimensionnelles des systèmes de tomographie utilisés dans cette étude, des échantillons cylindriques de 200 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur ont été choisis comme norme pour les expériences (Figure 3.6). Cette taille garantit la compatibilité avec la cellule de scan tout en offrant une résolution suffisante pour capturer le comportement micromécanique du système sol-géogrille.

Les échantillons sont préparés dans un tube cylindrique en PMMA (polyméthacrylate de méthyle) extrudé de diamètre intérieur de 194 mm avec une épaisseur de 6 mm. Ce matériau thermoplastique transparent a été choisi pour sa compatibilité avec la tomographie à rayons X, ce qui permet d'obtenir des images claires pendant les essais. Le PMMA est également suffisamment rigide pour conserver la forme de l'échantillon pendant la préparation et l'essai, garantissant ainsi l'absence de déformation des bords.

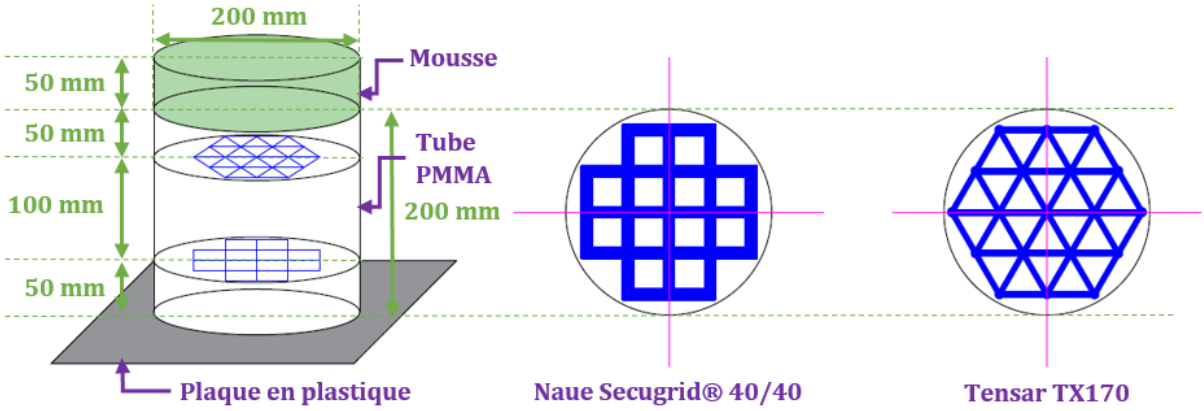


Figure 3.6. Représentation schématique de l'échantillon préparé pour le scan sous rayons X.

L'objectif premier des scans était d'étudier l'évolution de l'arrangement des grains à proximité de la géogrille. A cette fin, deux couches de géogrille ont été intégrées symétriquement dans l'échantillon, chacune positionnée à un quart de la hauteur totale de l'échantillon (c'est-à-dire à 5 cm des bords supérieur et inférieur), afin de capturer l'interaction entre les particules granulaires et la structure de la géogrille à l'intérieur du volume scanné. En raison de la disponibilité limitée du système de tomographie et afin d'optimiser le temps de scan tout en permettant une évaluation comparative des géométries de la géogrille, deux types distincts de géogrille ont été introduits

dans le même échantillon. L'une était la géogrille biaxiale déjà présentée dans la section 3.1.2, tandis que la seconde était une géogrille triaxiale extrudée, la « Tensar TX170 » étudiée également par Yaba (2022). Cette dernière est caractérisée par des ouvertures triangulaires (voir Figure 3.6 et Figure 3.7). L'objectif de ce dispositif expérimental n'étant pas la caractérisation mécanique, les propriétés de la géogrille triaxiale ne sont pas présentées dans cette section. Sa sélection était basée sur des critères géométriques plutôt que sur les performances mécaniques. Cette approche a été choisie pour permettre une comparaison visuelle directe de la façon dont les différentes formes d'ouverture influencent l'arrangement des particules au voisinage de la géogrille.

Préparation du matériau granulaire :

Le matériau granulaire est séché au four à 105°C pour éliminer toute humidité résiduelle. Il est ensuite tamisé pour obtenir la distribution granulométrique souhaitée. Ce processus minimise la variabilité de la granulométrie et permet un meilleur contrôle de la densité de l'échantillon. Le choix du séchage à l'étuve permet de calculer la densité avec précision et d'éviter tout effet indésirable de l'humidité pendant les essais.

Dépôt par gravité en couches et compactage :

Pour obtenir une distribution uniforme du matériau granulaire dans l'échantillon, le sol est déposé en quatre couches égales, chacune d'une masse connue, pesée avant la mise en place. Cette méthode reproduit le dépôt naturel du sol dans les applications d'ingénierie tout en permettant un contrôle précis de la densité de l'échantillon. L'utilisation du dépôt par gravité induit intrinsèquement un certain degré d'anisotropie de contact, avec une tendance à plus de contacts verticaux que de contacts horizontaux en raison de la sédimentation des particules. Toutefois, lorsqu'une géogrille est introduite dans l'échantillon, cette distribution des contacts peut être modifiée, car la géogrille peut agir comme une barrière structurelle influençant la disposition des particules autour de ses ouvertures.

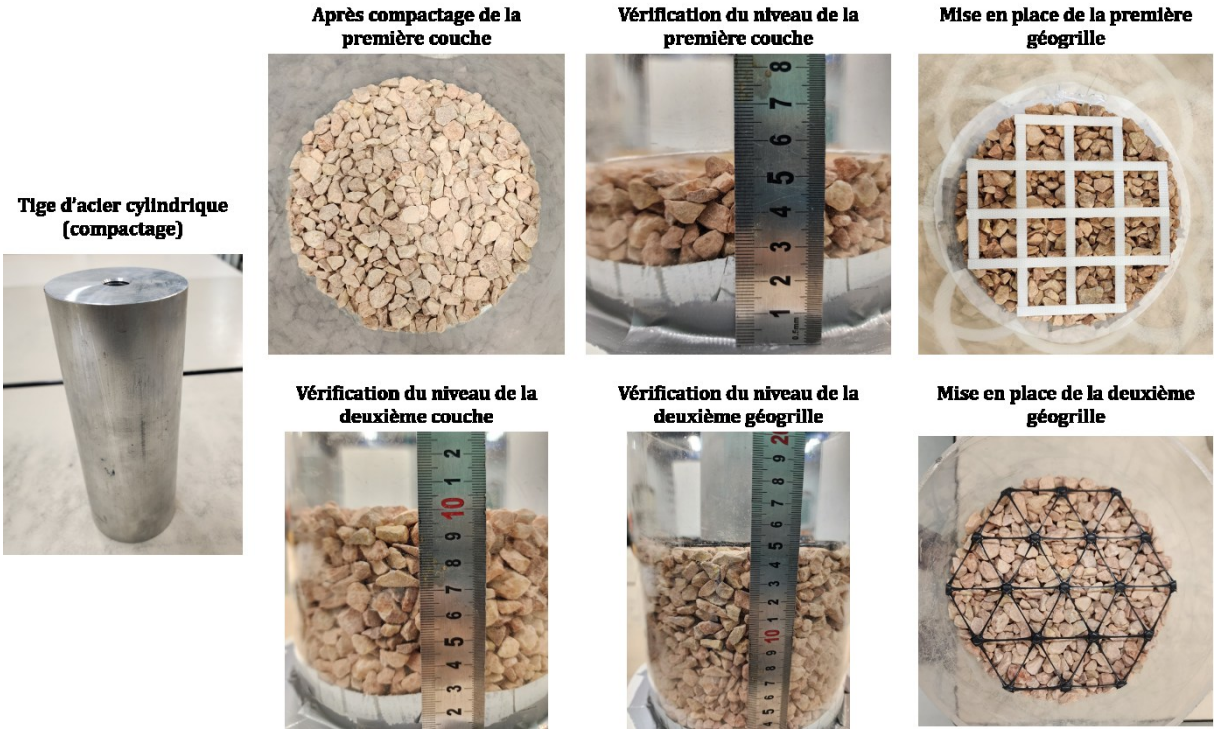


Figure 3.7. Synthèse du processus de préparation des échantillons.

Chaque couche est compactée manuellement à l'aide d'une dame cylindrique en acier. Le compactage est réalisé en appliquant des pressions successives sur l'ensemble de la surface, accompagnées de légers mouvements circulaires dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, en partant des bords vers le centre. Bien que ces mouvements restent superficiels, ils visent à assurer une répartition plus homogène de la pression et à éviter la formation de zones non compactées en périphérie. Le cycle de compactage dure 30 secondes par couche, permettant d'obtenir une densité aussi constante que possible d'une couche à l'autre. Cette procédure, s'inspire de pratiques normalisées en mécanique des sols (par exemple ASTM D4253 et D4254 pour les essais de densité maximale et minimale des sols granulaires) visant à garantir la reproductibilité et l'uniformité des échantillons en laboratoire. Bien que le dépôt par gravité ne permette pas à lui seul d'atteindre un état de compactage optimal, la phase de compactage manuel est nécessaire pour améliorer l'homogénéité de l'échantillon et contrôler la densité plus efficacement. Lorsque les géogrilles sont introduites, elles sont soigneusement coupées pour correspondre à la géométrie cylindrique de l'échantillon et placées à la hauteur prédéterminée, à plat et couvrant entièrement la section transversale (Figure 3.7).

Cette préparation minutieuse est essentielle pour simuler avec précision les conditions de renforcement et garantir des résultats expérimentaux reproductibles et fiables.

Tableau 3.2. Sommaire des conditions de préparation des échantillons scannés.

Configuration	Elancement H / D	Masse volumique sèche ρ_d (Kg/m^3)	Porosité n
Non renforcé	0,94	1599	0,40
Renforcé	0,96	1565	0,41

La masse volumique sèche « ρ_d » mesurée expérimentalement sur les échantillons scannés (voir section 3.3.3.2), est d'environ 1599 kg/m^3 dans le cas non renforcé, et d'environ 1565 kg/m^3 dans le cas renforcé (voir Tableau 3.2). En supposant une masse volumique solide « ρ_s » de 2650 kg/m^3, ces valeurs correspondent respectivement à une porosité « n » de 0,4 et 0,41, selon la relation présentée à l'équation (4). Cette légère augmentation de la porosité observée dans le cas renforcé peut être attribuée à l'effet d'obstruction géométrique induit par la géogrille lors du compactage pour la même masse de grains.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \tag{4}$$

Ces porosités s'inscrivent dans la fourchette généralement rapportée pour un matériau granulaire tel que le ballast ferroviaire sans fines. Suhr et Six (2020), qui ont étudié l'effet de la forme des grains dans des simulations DEM de ballast, notent que, bien que la détermination précise de la porosité en conditions réelles soit complexe, une valeur de 0,405 est rapportée dans la littérature. Par ailleurs, Qian et al. (2018), qui ont étudié le rôle de la disposition initiale des particules dans le comportement mécanique du ballast, mesurent une masse volumique sèche de 1533 kg/m^3 et précisent que des densités similaires avaient été observées dans une étude antérieure (Indraratna et al., 2010). Cette valeur correspond à une porosité d'environ 0,42, en considérant également ρ_s = 2650 kg/m^3, comme dans la présente étude.

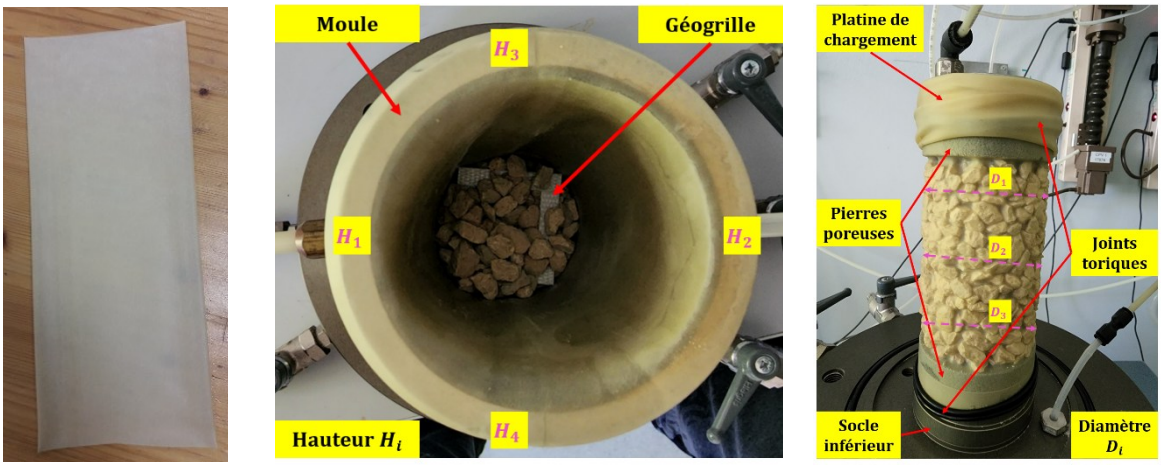
3.2 Essais triaxiaux

Avant la campagne expérimentale impliquant la tomographie à rayons X, une série préliminaire d'essais triaxiaux a été menée sur 34 échantillons granulaires secs à échelle réduite (d'un

diamètre préférentiel de 70 mm et d'une hauteur de 140 mm, ce qui correspond à un élancement de 2). L'objectif principal de cette campagne était de valider la répétabilité et la fiabilité de la méthode de préparation des échantillons proposée et de garantir une uniformité acceptable de la densité sèche obtenue. Ces essais sur des échantillons de taille limitée ont permis d'affiner la procédure de préparation avant de passer à la taille cible et de fournir des données de calibration à l'appui de la modélisation numérique ultérieure. Un résumé des conditions d'échantillonnage et des résultats est présenté dans le Tableau 3.3.

3.2.1 Répétabilité de la méthode de préparation des échantillons

Deux séries d'échantillons ont été testées : des échantillons non renforcés (essais 1 à 20) et des échantillons renforcés par des géogrilles (essais 21 à 34). Etant donné que l'ouverture de la géogrille a une largeur de 40 mm, comparable au diamètre de l'échantillon de 70 mm, une seule maille de géogrille pouvait s'insérer dans la section transversale (Figure 3.8.b et Figure 3.11). Pour répondre à cette contrainte et garantir une meilleure efficacité mécanique, trois couches de géogrille ont été installées à intervalles verticaux égaux sur la hauteur de l'éprouvette.



(a) (b) (c)

Figure 3.8. Préparation de l'échantillon : (a) membrane en latex utilisée (diamètre nominal de 70 mm), (b) installation dans un moule fendu et préparation de l'échantillon en couches, (c) démoulage assisté par une dépression interstitielle.

Chaque échantillon a été préparé à l'intérieur d'une membrane en latex de 70 mm de diamètre nominal et d'environ 0,1 mm d'épaisseur (Figure 3.8.a). La membrane a été positionnée et maintenue en place dans un moule fendu équipé d'une pierre poreuse à la base (Figure 3.8.b). Après le compactage couche par couche du matériau granulaire décrit à la section 3.1.3, une deuxième pierre poreuse et une platine de chargement ont été placées sur la surface supérieure. La membrane est maintenue aux deux extrémités à l'aide de joints toriques, assurant ainsi l'étanchéité entre l'échantillon et son environnement (Figure 3.8.c). Une dépression a ensuite été appliquée à l'intérieur pour préserver la forme de l'échantillon, ce qui a permis de retirer soigneusement le moule avant de placer l'échantillon à l'intérieur de la cellule triaxiale.

Les dimensions de l'échantillon ont été déterminées à partir de plusieurs mesures. Le diamètre « D » a été calculé comme la moyenne de trois mesures prises sur la hauteur de l'échantillon (Figure 3.8.c), tandis que la hauteur « H » a été calculée comme la moyenne de quatre mesures prises sur la circonférence (Figure 3.8.b). L'élancement « H/D » a donc été déterminé comme le rapport entre la hauteur et le diamètre déterminés (Tableau 3.3). Le nombre de particules par échantillon a été également enregistré afin de fournir des paramètres d'entrée pour les simulations par la méthode des éléments discrets (DEM).

Tableau 3.3. Sommaire des conditions de préparation et d'essai des échantillons à taille réduite.

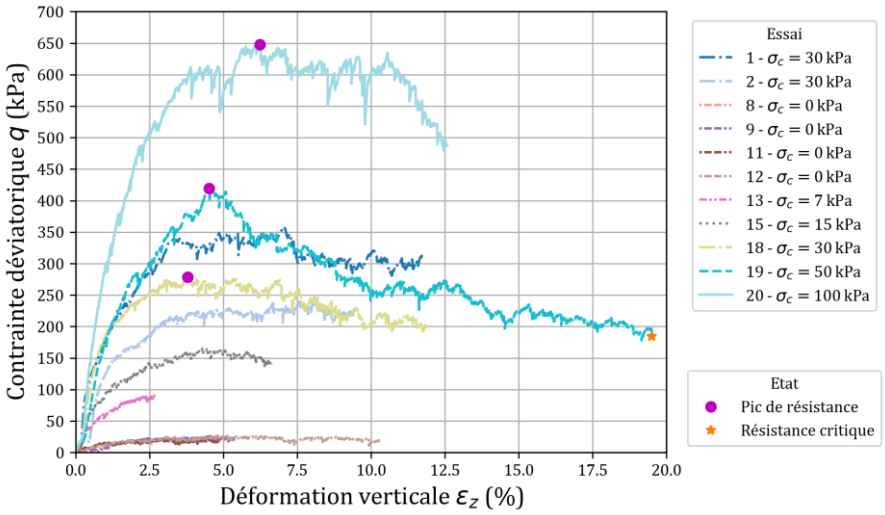
Essai		Elancement H/D	Nombre des grains*	Masse volumique sèche ρ_d (Kg/m^3)	Porosité n	Confinement σ_c (kPa)**	Vitesse de chargement (mm/min)**
Sans géogrille	1	1.50	800	1486	0.44	30	1.0
	2	2.26	1048	1507	0.43	30	0.2
	3	2.18	1048	1463	0.45	-	-
	4	2.02	1054	1530	0.42	-	-
	5	2.06	1252	1610	0.39	-	-
	6	2.02	1252	1584	0.40	-	-
	7	1.90	1252	1611	0.39	-	-
	8	2.03	1252	1560	0.41	0	0.2
	9	2.02	1256	1550	0.42	0	0.2
	10	1.94	1256	1506	0.43	-	-
	11	2.03	-	1514	0.43	0	0.1
	12	2.04	-	1517	0.43	0	0.5
	13	2.06	-	1562	0.41	7	0.1
	14	2.11	-	1551	0.41	-	-
	15	2.12	-	1540	0.42	15	0.1
	16	1.96	-	1535	0.42	-	-
	17	2.16	-	1496	0.44	-	-
	18	2.11	-	1548	0.42	30	0.1
	19	1.87	-	1549	0.42	50	0.1
	20	1.95	-	1561	0.41	100	0.1
Avec géogrille	21	1.61	-	1330	0.50	7	1.0
	22	1.51	-	1409	0.47	-	-
	23	1.53	-	1400	0.47	-	-
	24	1.51	-	1414	0.47	7	1.0
	25	2.12	1252	1474	0.44	-	-
	26	2.13	1252	1495	0.44	-	-
	27	2.12	1252	1478	0.44	-	-
	28	2.14	1252	1472	0.44	-	-
	29	2.12	1252	1478	0.44	0	0.1
	30	2.11	1256	1467	0.45	0	0.1
	31	2.20	-	1426	0.46	0	0.1
	32	2.22	-	1427	0.46	7	0.1
	33	2.18	-	1458	0.45	15	0.1
	34	2.19	-	1434	0.46	30	0.1

*Le nombre de grains n'a pas été compté pour cet échantillon ; **Donnée non disponible dû à la rupture de membrane par poinçonnement durant l'essai.

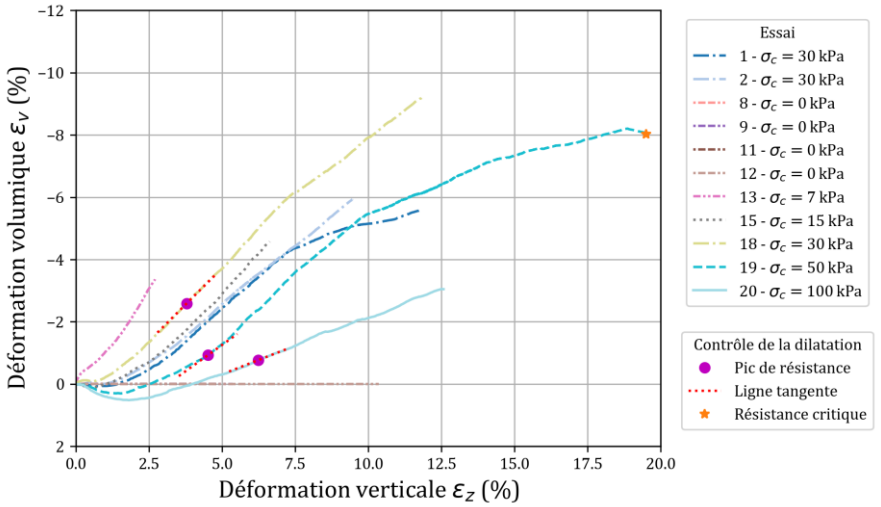
Ensuite, la fraction volumique solide a été estimée en supposant toujours une masse volumique solide ρ_s de 2650 kg/m^3. Dans les échantillons renforcés, le volume de la géogrille a été considéré comme du vide dans le calcul de la porosité n. En conséquence, une porosité apparente plus élevée a été observée (0,46 en moyenne) par rapport aux échantillons non renforcés (0,42 en moyenne). Il est important de noter que l'utilisation d'une membrane introduit une certaine incertitude dans la définition précise du volume de l'échantillon, car la membrane se conforme à la surface granulaire plutôt que d'imposer une limite stricte. Cela contraste avec l'utilisation de tubes transparents rigides (par exemple, PMMA) qui définissent la géométrie avec plus de précision. Cette différence peut expliquer la légère variation de porosité observée entre les petits échantillons et ceux préparés dans des cylindres rigides, voir la section 3.1.3 (environ 0,42 contre 0,4 respectivement pour la configuration non renforcée).

3.2.2 Réponse mécanique des échantillons non renforcés

Les échantillons ont été soumis à des essais de compression triaxiale monotone à sec, sous différentes pressions de confinement « σ_c » et vitesses de chargement, comme indiqué dans le Tableau 3.3. Le confinement a été appliqué à l'aide d'eau remplissant la cellule triaxiale autour de l'échantillon, tandis que le chargement axial était contrôlé en mode déplacement.



(a)



(b)

Figure 3.9. (a) Réponse contrainte-déformation et (b) Déformation volumique des échantillons non renforcés sous six niveaux de confinement : 0 kPa, 7 kPa, 15 kPa, 30 kPa, 50 kPa et 100 kPa.

A noter que certaines éprouvettes ont subi une rupture de membrane par poinçonnement de cette dernière par les grains, entraînant l'absence de données pour ces cas. Les résultats sont présentés en termes de contrainte déviatorique q, définie comme la différence entre les contraintes axiale « σ_1 » et radiale « $\sigma_3 = \sigma_c$ » ($q = \sigma_1 - \sigma_3$), et de déformation volumique « ε_v », toutes deux représentées en fonction de la déformation axiale « ε_1 », soit verticale « ε_z ».

$$\varepsilon_Z = \frac{\Delta H}{H_0};\ \varepsilon_Z > 0 : \text{Contraction} \tag{5}$$

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta V_{Eau} - V_{Piston}}{V_{Ech}} \text{ avec } V_{Ech} = \pi \cdot \frac{{D_0}^2}{4} \times H_0 \text{ et } V_{Piston} = \pi \cdot \frac{{D_{Piston}}^2}{4} \times \Delta H \tag{6}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_r \Rightarrow \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_z}{2};\ \varepsilon_r < 0 : \text{Dilatation} \tag{7}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta D}{D_0} \Rightarrow D_{eff} = (1 - \varepsilon_r) \cdot D_0;\ \varepsilon_r < 0 \tag{8}$$

La déformation verticale n'a pas été mesurée directement sur l'échantillon, mais déduite du déplacement du piston de la cellule triaxiale « ΔH » (voir équation (5)), enregistré à l'aide d'un capteur de déplacement externe « LVDT ». La déformation volumique a été mesurée à partir du volume d'eau expulsé de la cellule triaxiale « ΔV_{Eau} » ($\Delta V_{Eau} > 0$: Dilatation), fournie par la machine, et rapporté au volume initial de l'échantillon « V_{Ech} », comme défini dans l'équation (6)). Ce volume initial est déterminé à partir des mesures de diamètre D_0 et de hauteur H_0 après compactage, tel que décrit dans le section précédente. Cependant, une correction a été appliquée à ce volume afin de tenir compte du volume occupé par le déplacement du piston « V_{Piston} » dans l'eau de confinement. En effet, au cours du chargement, le piston pénètre dans la cellule et déplace lui-même un certain volume d'eau, qui ne correspond pas à une variation réelle du volume de l'échantillon. Ce volume parasite, correspondant à la section du piston (de diamètre D_{Piston} = 25 mm) multipliée par son déplacement est retranché du volume d'eau déplacé. Cette mesure de déformation volumique n'est toutefois pas disponible pour les essais non confinés (σ_c = 0 kPa), où il n'y avait pas d'eau pour permettre cette mesure. Concernant le calcul de la contrainte déviatorique, une correction a été apportée pour prendre en compte la variation de volume de l'échantillon lors du chargement, ce qui implique une variation du diamètre effectif « D_{eff} ». En effet, pour un échantillon sec ou non saturé, sans pression interstitielle, la contraction du matériau sous chargement est physiquement permise. A partir de la relation classique reliant la déformation volumique aux déformations axiale et radiale « ε_r », la déformation radiale a été isolée (voir équation (7)). En exprimant ensuite la variation relative du diamètre à partir de cette déformation radiale, un diamètre effectif a pu être estimé au cours du chargement (voir équation (8)). Ce diamètre corrigé a été utilisé pour recalculer la surface de la section transversale, permettant d'affiner le calcul de la contrainte déviatorique de manière plus représentative du comportement mécanique réel de l'échantillon.

La Figure 3.9 illustre les réponses contrainte-déformation et volumétrique pour des échantillons non renforcés. Comme prévu, l'augmentation de la pression de confinement a conduit à une résistance au cisaillement plus élevée avec une réponse dilatante moins prononcée, en accord avec le comportement typique d'un sol granulaire sous un confinement plus élevé. Les essais 1, 2 et 18 ont été menés à des vitesses de chargement de 1, 0,2 et 0,1 mm/min, respectivement, révélant un comportement mécanique dépendant de la vitesse, avec des vitesses de déformation plus élevées augmentant généralement la résistance maximale et la rigidité (Figure 3.9.a). Les résultats tendent à se stabiliser à partir de 0,2 mm/min, en dessous de laquelle l'influence de la vitesse de chargement semble devenir négligeable. Par conséquent, une vitesse de 0,1 mm/min a été retenue comme valeur de référence pour les essais. En outre, l'essai 1 impliquait un élancement plus faible ($H/D \approx 1{,}5$ par rapport à la valeur de référence de 2-2,2), ce qui a entraîné

un effet de taille limitant probablement le développement des bandes de cisaillement et provoquant une résistance maximale observée légèrement plus élevée.

L'angle de frottement macroscopique apparent a été estimé sur la base de trois essais non renforcés réalisés sous différentes pressions de confinement 30 kPa, 50 kPa et 100 kPa (essais 18, 19 et 20 respectivement), tous effectués à la même vitesse de chargement (0,1 mm/min) et avec un élancement cohérent ($H/D \approx 2{,}0$). Les cercles de Mohr correspondant à chaque essai sont présentés dans la Figure 3.10.

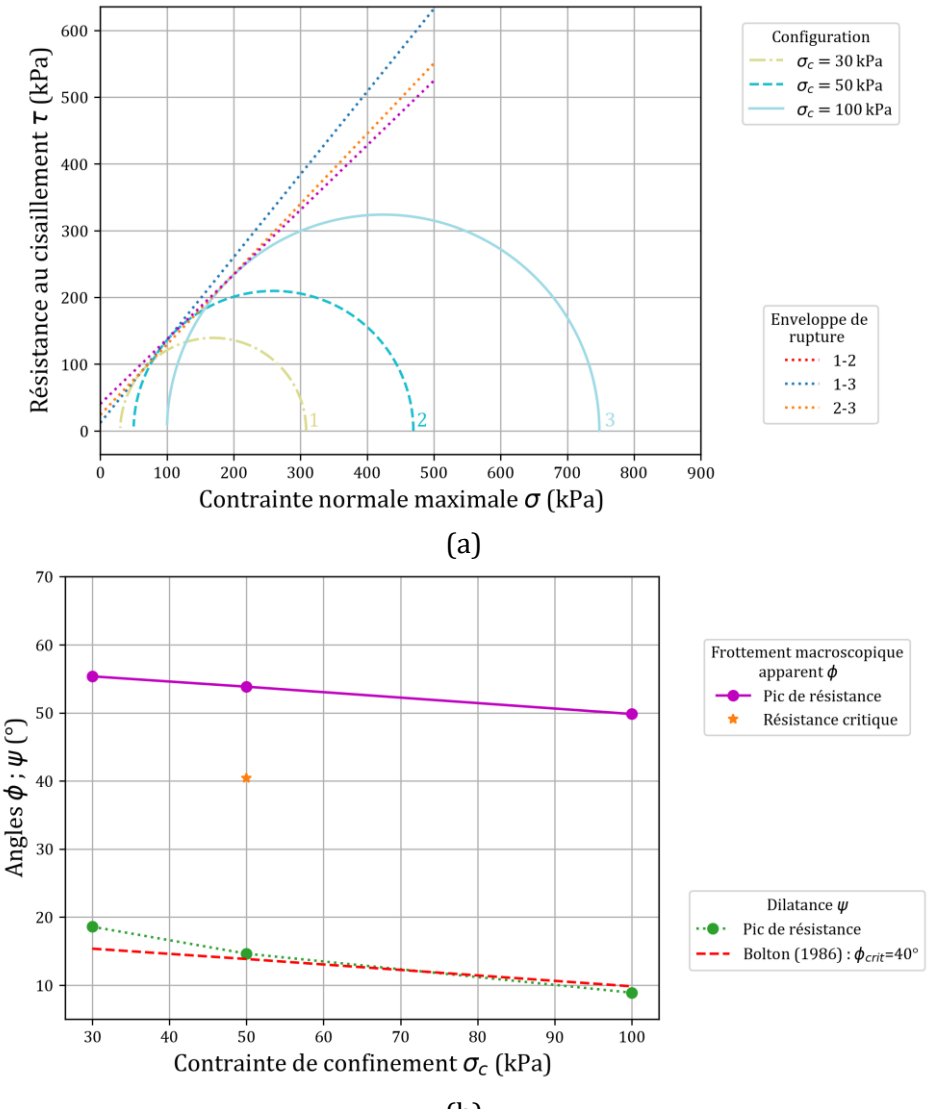


Figure 3.10. (a) Enveloppe de rupture au pic de résistance ; (b) Variation de l'angle de frottement macroscopique individuel et de l'angle de dilatance au pic, obtenues à l'issue des essais de compression triaxiale des échantillons non renforcés sous trois niveaux de confinement : 30 kPa, 50 kPa et 100 kPa.

L'enveloppe de rupture au pic de résistance a été d'abord estimée en ajustant une ligne tangente qui satisfait au critère de Mohr-Coulomb (Equation (28)), comme décrit dans la section 4.4.1.2. En raison de la variabilité expérimentale typique, les cercles de Mohr ne s'alignent pas toujours parfaitement et des enveloppes différentes peuvent être déterminées en fonction des paires sélectionnées (Figure 3.10.a). Les estimations par paires ont donné des angles de frottement allant de 44° à 51° (Enveloppes « 1-2 », « 1-3 », et « 2-3 »), avec des valeurs de cohésion apparente correspondantes entre 40 et 12 kPa. Toutefois, le matériau granulaire étant intrinsèquement non

cohésif, le terme de cohésion a été fixé à zéro. Pour une analyse plus représentative du comportement de chaque éprouvette, un second traitement a été effectué en calculant l'angle de frottement individuel directement à partir de chaque cercle de Mohr, en traçant une tangente issue de l'origine (angle dit "secant"). Cette approche fournit un paramètre conservatif couramment utilisé en conception géotechnique. Les valeurs obtenues varient de 55° à 50° lorsque le confinement passe de 30 kPa à 100 kPa, suggérant une légère diminution quasi-linéaire de l'angle de frottement avec l'augmentation du confinement (Figure 3.10.b).

En parallèle, les déformations volumiques montrent une réponse typique des matériaux granulaires denses, avec une contraction initiale suivie d'une dilatance marquée (Figure 3.9.b). Cette dilatance est d'autant plus prononcée que le confinement est faible : on observe une contraction modérée et une dilatance importante à 7-30 kPa, tandis qu'à 100 kPa, la contraction est plus nette et la dilatance réduite. Cela reflète bien le comportement de dilatance orientée vers l'état critique, principe central dans la compréhension du comportement des sols.

Conformément aux observations de Bolton (1986), le taux de dilatance maximal coïncide généralement avec le pic de résistance. L'angle de dilatance au pic « ψ_{pic} » a donc été estimé à partir de la relation de De Borst et Vermeer (1984), voir équation (27), qui relie la dilatance à la variation des déformations volumique et axiale. Les valeurs obtenues sont de ψ_{pic} = 19° à 30 kPa, 15° à 50 kPa et 9° à 100 kPa (Figure 3.10.b). Ces résultats peuvent être interprétés à la lumière de la relation empirique proposée par Bolton (1986), fondée sur la théorie de la contrainte-dilatance formulée par Rowe (1962).

$$\psi_{pic} = \phi_{pic} - \phi_{crit} \tag{9}$$

Selon cette relation (équation (9)), l'angle de dilatance au pic ψ_{pic} est lié à l'angle de frottement macroscopique apparente au pic « ϕ_{pic} » et celui à l'état critique « ϕ_{crit} » . Ce dernier angle (ϕ_{crit}) est une propriété fondamentale en mécanique des sols et dans l'étude des matériaux granulaires. Il correspond à l'angle de frottement interne du matériau lorsqu'il atteint l'état critique, c'est-à-dire une condition dans laquelle il se déforme de manière continue à contrainte constante, sans dilatance. La littérature suggère des valeurs typiques de ϕ_{crit} = 33° à 40° pour les sables (Bolton, 1986), et vers 44° pour le ballast (Indraratna et Salim, 2003). Dans notre cas, l'essai réalisé sous 50 kPa (essai 19) montre une contrainte déviatorique se stabilisant avec une dilatance quasi-nulle, ce qui suggère qu'un état critique a été atteint (Figure 3.9). On peut ainsi identifier une valeur de ϕ_{crit} = 40°, cohérente avec la plage observée pour les matériaux granulaires grossiers. En projetant les angles de frottements associés au pic de résistance à partir de cette hypothèse, on retrouve des valeurs d'angle de dilatance cohérentes avec les angles calculés. Cela montre que la relation de Bolton fournit une bonne approximation du comportement du matériau dans la plage de confinement étudiée, comme illustré en Figure 3.10.b.

3.2.3 Réponse mécanique des échantillons renforcés

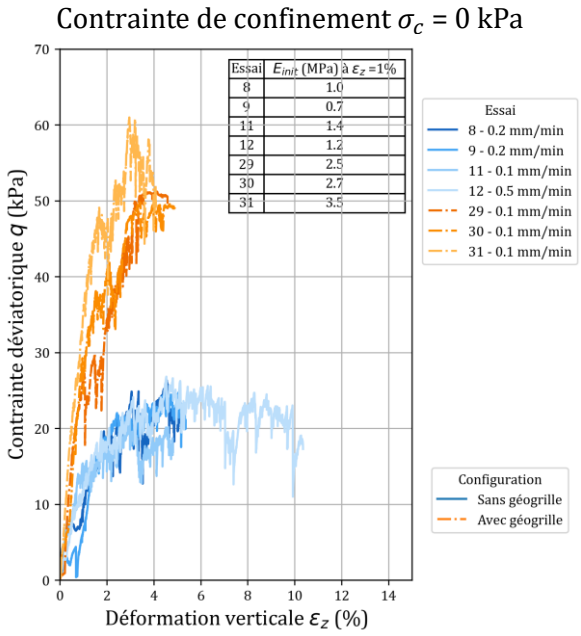
Après avoir examiné le comportement des éprouvettes non renforcées, une attention particulière est portée à la réponse des échantillons renforcés incorporant trois couches de géogrilles. Pour ce faire, trois configurations de géogrilles ont été étudiées (voir Figure 3.11) :

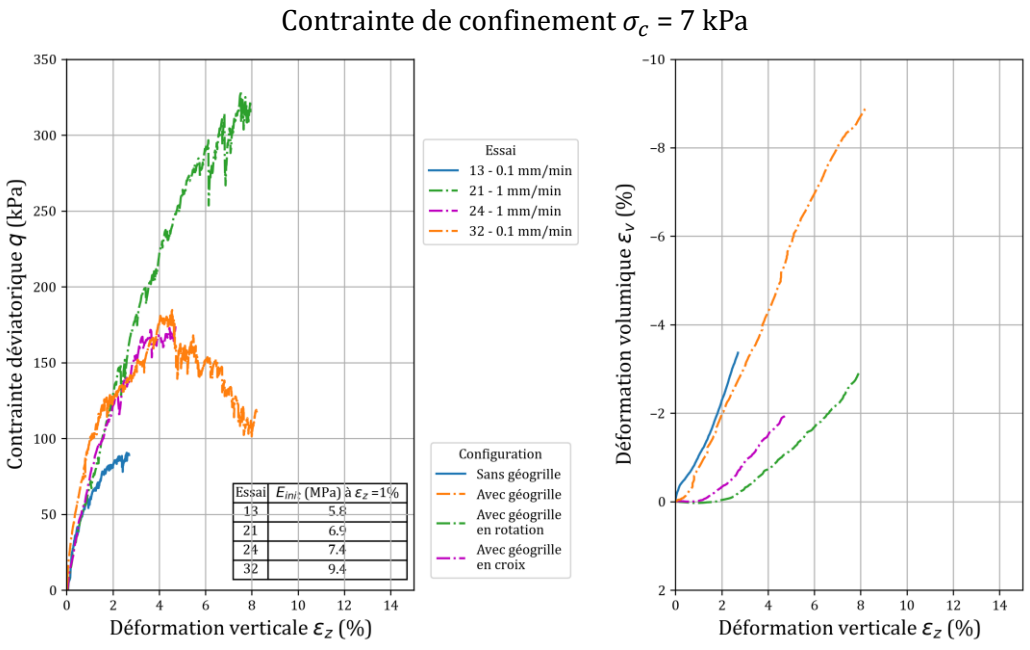
a. Trois ouvertures de la géogrille alignées dans la même orientation (configuration de référence) pour toutes les couches (essais 22, 23, 25-34),
b. Trois ouvertures de la géogrille tournées de 45° entre les couches successives pour évaluer l'effet de l'orientation anisotrope (essai 21), et
c. Géogrille « en croix » modifiée, où les jonctions de la géogrille sont placées au centre de l'échantillon au lieu d'ouvertures (essai 24).



(a) (b) (c)

Figure 3.11. Configurations de géogrilles étudiées : (a) orientation uniforme de l'ouverture, (b) orientation différente de l'ouverture à chaque couche (offset de 45°), et (c) jonction centrale « configuration en croix ».





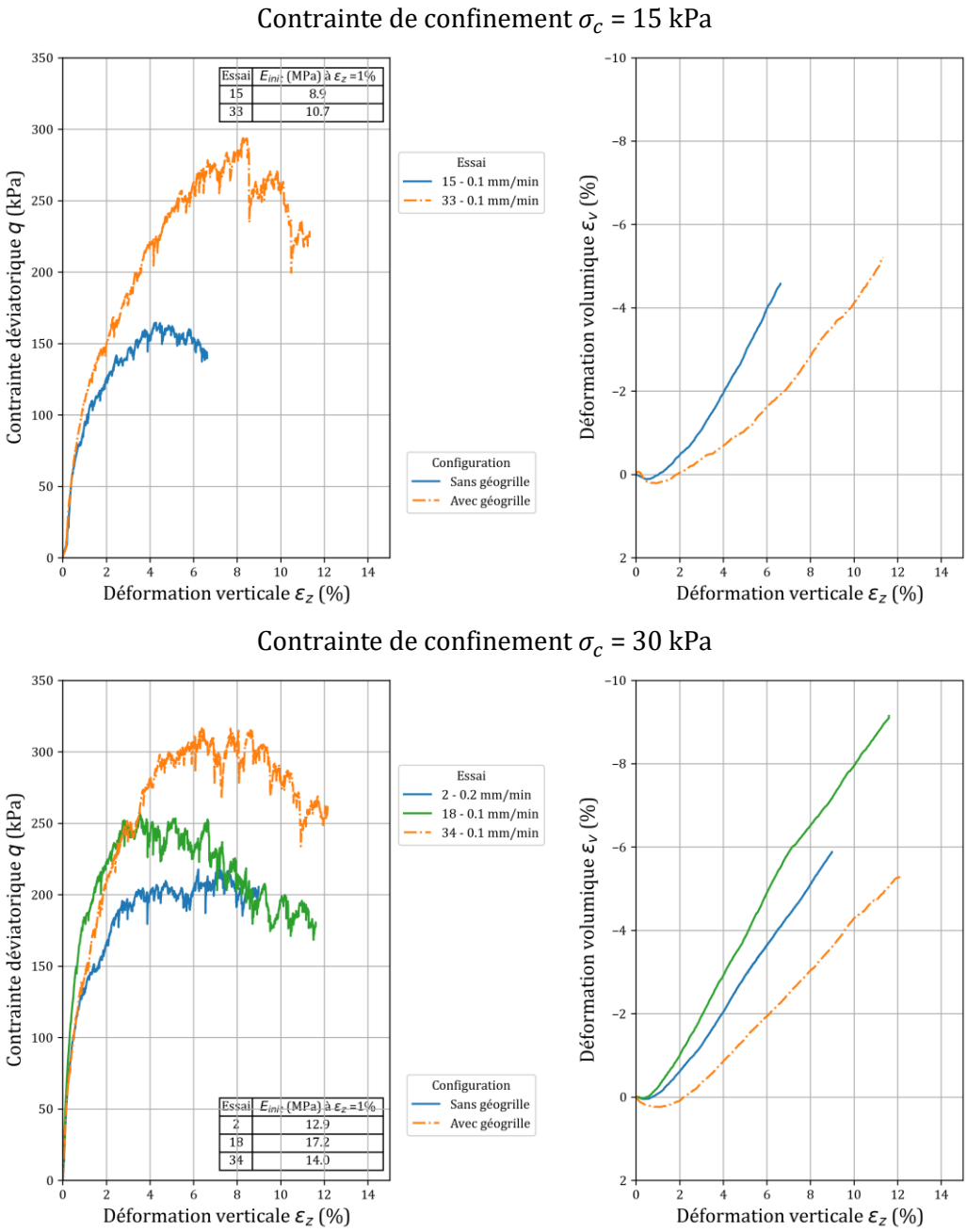


Figure 3.12. Comparaison des réponses contrainte-déformation et des réponses volumiques des échantillons non renforcés et renforcés sous quatre niveaux de confinement : 0 kPa, 7 kPa, 15 kPa et 30 kPa.

L'effet de renforcement de la géogrille a été évalué en comparant l'évolution de la contrainte déviatorique entre des échantillons renforcés et non renforcés soumis à des pressions de confinement identiques (Figure 3.12). Pour tous les niveaux de confinement, y compris les conditions non confinées (σ_c = 0 kPa), l'inclusion de géogrilles a entraîné une amélioration significative de la résistance maximale, la doublant approximativement dans la plupart des cas. Cette amélioration souligne la contribution mécanique de la géogrille, qui est généralement attribuée à l'imbrication entre les particules granulaires et les nervures de la géogrille, ainsi qu'à la restriction de la déformation latérale. Ces mécanismes génèrent un effet de confinement qui contribue à augmenter la résistance au cisaillement et la rigidité initiale.

Par ailleurs, le degré de mobilisation de la géogrille n'est pas uniforme dans l'ensemble des échantillons au cours des essais. Le raidissement induit par le renforcement est le plus évident dans des conditions non confinées ou légèrement confinées. Les rigidités initiales « E_{init} », définies comme la pente de la courbe contrainte-déformation à 1 % de déformation axiale, sont calculées et présentées pour chaque essai dans la Figure 3.12. Lorsque la pression de confinement est nulle (σ_c = 0 kPa), la géogrille contribue de manière significative à la résistance et à la rigidité dès les premiers niveaux de déformation axiale verticale ($\varepsilon_z \approx 1$ %). Un comportement similaire est observé pour un confinement de 7 kPa, en comparant les essais 13 et 32 réalisés à la même vitesse de chargement. Cependant, à mesure que le confinement augmente, l'influence relative de la géogrille sur la rigidité initiale devient moins prononcée. Pour des pressions de confinement plus élevées (15 kPa et 30 kPa), les échantillons renforcés et non renforcés présentent une rigidité initiale similaire. Le gain de résistance dû au renforcement ne devient apparent qu'après l'atteinte d'un certain niveau de déformation axiale ($\varepsilon_z \approx 2$ à 4%), à partir duquel la géogrille commence à se mobiliser plus complètement. Pour une pression de confinement de 30 kPa, une légère différence de rigidité initiale a été observée entre les essais 2 et 18. Cette différence est attribuée aux variations des vitesses de chargement, comme indiqué précédemment. Néanmoins, la comparaison de ces essais avec l'essai 34 montre que l'échantillon renforcé présente un gain de résistance distinct à des niveaux de déformation plus élevés, confirmant ainsi la mobilisation retardée de la géogrille sous un confinement plus élevé.

Sous confinement intermédiaire (σ_c = 7 kPa), trois configurations de géogrilles ont été évaluées. La comparaison entre les essais 22 et 32 - identiques dans la configuration de la géogrille mais différents dans le taux de chargement - a donné des réponses comparables, avec seulement des effets mineurs liés au taux. L'essai 21, impliquant une configuration de géogrille en rotation (offset de 45° entre les couches), a donné lieu à une résistance maximale légèrement plus élevée. Cela suggère que le renforcement multidirectionnel peut améliorer la mobilisation de la résistance latérale et l'efficacité du confinement. Cette observation confirme l'avantage théorique des géogrilles triaxiales, qui fournissent un renforcement dans plus de deux directions principales. L'essai 24, avec des géogrilles modifiées en forme de croix, présentait une rigidité initiale comparable à celle de l'essai 21 et atteint des niveaux de contrainte supérieurs à ceux du cas non renforcé (essai 13). Toutefois, cet essai a été interrompu prématurément en raison de la rupture de la membrane, ce qui a empêché une analyse complète de la contrainte et de la déformation. L'amélioration observée pourrait être attribuée à la rigidité structurelle apportée par les jonctions centrales, qui pourraient agir comme des raidisseurs locaux pendant le chargement.

En complément de la réponse mécanique, le comportement volumique a également été analysé sur la même Figure 3.12. Dans le cas non confiné (σ_c = 0 kPa), la variation volumique n'a pas pu être mesurée, car elle est estimée à partir du volume d'eau expulsé de la cellule. Or, sans pression de confinement, aucun fluide n'est présent dans la cellule triaxiale, ce qui rend la mesure de volume inaccessible. Aucune représentation graphique n'est donc fournie. Pour les essais réalisés sous confinement (σ_c = 7 à 30 kPa), les mesures de volume sont disponibles. Les résultats montrent qu'à niveau de confinement identique, les échantillons renforcés présentent une dilatance moins prononcée que leurs homologues non renforcés. Cette observation suggère que la présence de la géogrille joue un rôle similaire à celui d'un confinement additionnel, en limitant les réarrangements internes et donc la dilatation du matériau au cours du cisaillement.

La Figure 3.13 présente des comparaisons visuelles de la déformation des échantillons avec et sans renforcement par géogrille. Dans les échantillons non renforcés, des bandes de cisaillement claires se sont formées et se sont étendues sur toute la hauteur de l'échantillon (Figure 3.13.a). En revanche, les échantillons renforcés présentaient souvent une déformation localisée près des limites supérieures ou inférieures de l'échantillon, plutôt que le long d'une bande de cisaillement

courant sur toute la hauteur de l'échantillon (Figure 3.13.b). Cette localisation met en évidence la capacité de la géogrille à modifier le mécanisme de rupture interne en redistribuant les contraintes de cisaillement. Les inspections après essai (Figure 3.13.c) ont révélé que les ouvertures proches des plateaux de chargement ont subi des étirements et des déformations notables, indiquant un transfert de contrainte substantiel et une mobilisation du renforcement dans ces régions. A l'inverse, les couches de géogrille situées à mi-hauteur n'ont subi qu'une déformation limitée, ce qui suggère que la mobilisation maximale du renforcement s'est faite principalement au niveau des extrémités.

Ces observations soulignent la nature localisée de l'engagement de la géogrille dans les essais triaxiaux et mettent en évidence l'importance de la configuration du renforcement ainsi que de sa capacité à suivre les déformations du sol environnant pour optimiser les performances mécaniques et l'efficacité du renforcement dans les milieux granulaires.

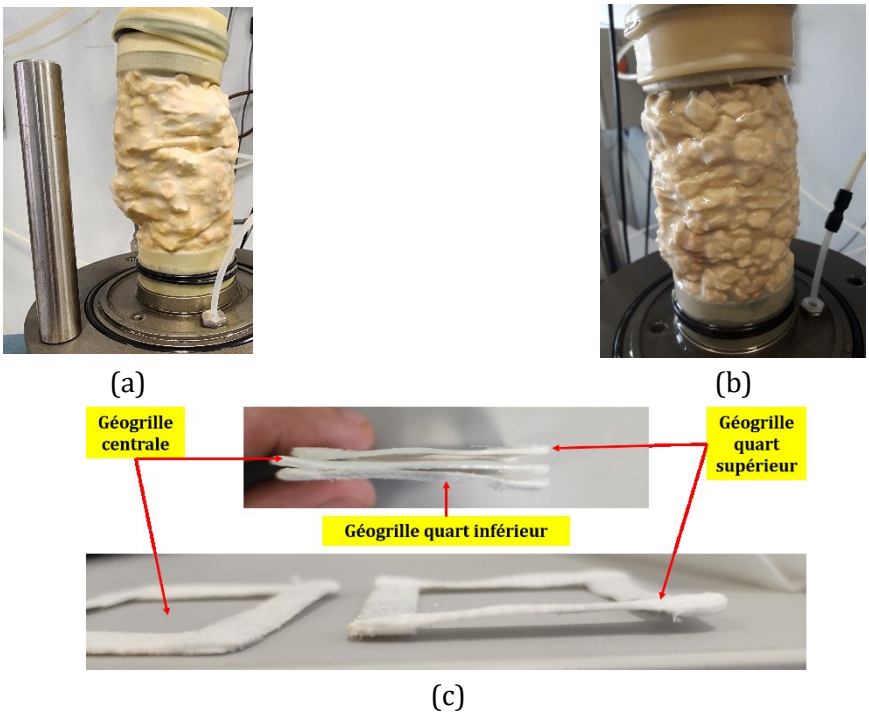


Figure 3.13. Mode de rupture des échantillons : (a) sans géogrille, (b) avec géogrille en configuration de référence ; et (c) Déformation de la géogrille après essai.

3.3 Imagerie 3D par tomographie rayons X

La compréhension des mécanismes internes qui régissent le comportement des sols granulaires renforcés par des géogrilles nécessite une observation détaillée de la microstructure et de son évolution sous charge mécanique. Parmi les techniques d'imagerie avancées, la tomographie par rayons X « XCT » se distingue comme un outil non destructif et informatif. Elle permet la visualisation tridimensionnelle et la quantification des phénomènes à l'échelle du grain en exploitant le contraste d'atténuation des rayons X entre les phases solides et les phases vides. La XCT donne accès à des caractéristiques internes telles que le réarrangement des particules, la déformation locale et les interactions avec les éléments de renforcement, y compris les géogrilles.

Dans la présente étude, la tomographie XCT est utilisée pour faire le lien entre les observations expérimentales et la modélisation numérique. Les scans tomographiques ont donc un double objectif :

1. Acquérir des données à haute résolution décrivant la structure interne d'échantillons granulaires renforcés, en se concentrant particulièrement sur les arrangements et les interactions des particules à proximité de la géogrille ;
2. Valider et calibrer les modèles numériques DEM, leur permettant de reproduire de manière réaliste les comportements observés.

Une fois validés, ces modèles numériques peuvent être étendus pour explorer des configurations plus complexes, telles que des systèmes à grande échelle ou des conditions de limite et de chargement variables, qui restent inaccessibles aux essais expérimentaux en laboratoire. Dans ce contexte, deux campagnes de tomographie ont été menées :

- La première à la cellule tomographie du laboratoire 3SR (Grenoble, France) en utilisant un échantillon de taille plus limitée ;
- La seconde au centre d'imagerie à rayons X µ-VIS (Southampton, Royaume-Uni) sur un échantillon de plus grande taille.

Les principes de la tomographie, les caractéristiques de chaque système de scan et les méthodologies de traitement d'image utilisées sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

3.3.1 Principes de la tomographie à rayons X

Les rayons X sont une forme pénétrante de rayonnement électromagnétique à haute énergie qui ont été découvertes à la fin du 19ème siècle par le professeur de physique allemand Wilhelm Röntgen qui réalisait des expériences sur des tubes à vide. Röntgen W. a constaté que le rayonnement du tube à vide pouvait éclairer un écran fluorescent, même en plaçant des obstacles entre le tube et l'écran. Il les a nommés rayons X, car il ne connaissait pas la nature de ces rayons. Ces rayonnements correspondent à des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 0,01 et 10 nm.

Une radiographie correspond à une mesure bidimensionnelle de l'intensité des photons de rayons X atteignant chaque point d'un détecteur pendant un temps d'exposition donné. Elle résulte de l'intégration de l'atténuation des rayons X au cours de leur passage à travers la matière le long de leur trajet. La première radiographie (Figure 3.15) jamais réalisée était un film de la main de la femme de Röntgen W., avec son alliance, placée entre la source de rayons X et une plaque photographique servant de détecteur (similaire à Figure 3.14).

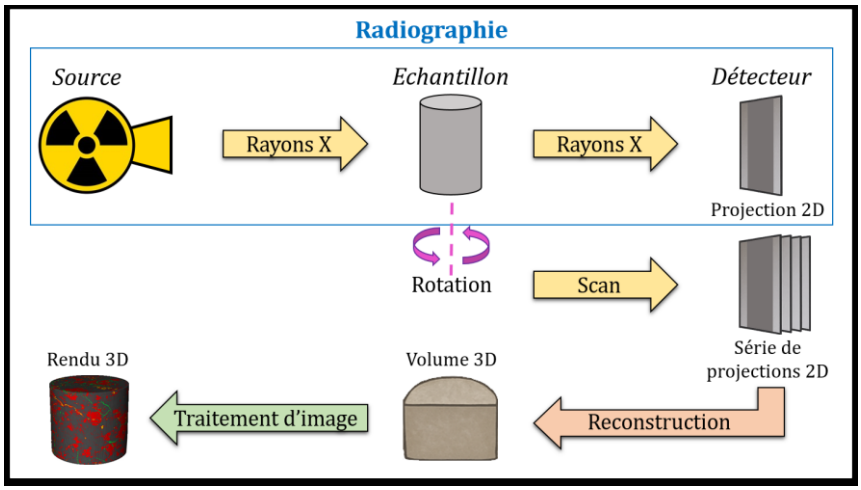


Figure 3.14. Illustration du principe de la tomographie à rayons X.

Les os et l'alliance sont apparus sur l'image car ils absorbent davantage les rayons X que les tissus mous environnants. Par conséquent, moins de photons atteignent le détecteur dans ces zones, qui apparaissent alors plus sombres. Cette découverte a été qualifiée de miracle médical et les médecins ont commencé à utiliser les rayons X dans le domaine médical, ce qui leur a permis de voir l'intérieur du corps humain pour la première fois sans intervention chirurgicale.

Cependant, pour des situations plus complexes, les simples radiographies ne suffisent pas. La tomographie à rayons X a été développée dans les années 1960 afin de répondre à ce besoin. C'est une méthode d'imagerie tridimensionnelle qui permet la reconstruction d'un objet à partir d'une série d'images de projection 2D (radiographies) acquises à différents angles par une rotation relative de l'objet et du système d'acquisition d'images (Figure 3.14). Ces projections sont ensuite traitées à l'aide d'algorithmes, tels que la rétroprojection filtrée ou les méthodes itératives, pour générer une image volumique en trois dimensions.



Figure 3.15. La radiographie historique de la main de la femme de Röntgen W. prise en 1895 (adaptée de Rebellato (2020)).

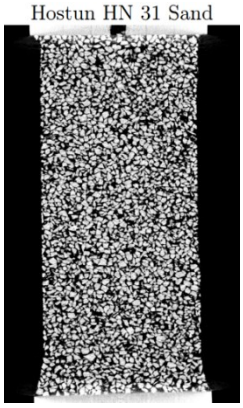


Figure 3.16. Coupe verticale extraite des images tridimensionnelles d'un échantillon de sable de Hostun HN 31 (Ando, 2013).

Ainsi, la science des matériaux a également beaucoup bénéficié du rayonnement X. Il devient un outil révolutionnaire pour étudier les géomatériaux car il constitue une technique de mesure non destructive, qui permet donc d'imager diverses configurations. De plus, les rayons X sont sensibles à la densité atomique (corrélée à la densité massique), ce qui est particulièrement utile pour les milieux granulaires car cela permet de distinguer facilement les phases poreuses et solides. La Figure 3.16 présente un exemple d'utilisation des rayons X pour étudier le comportement de sable d'Hostun HN 31 lors d'un essai triaxial réalisé au laboratoire 3SR. Chaque pixel de l'image acquise représente le coefficient local d'atténuation des rayons X, directement lié à la densité du matériau traversé. Cela permet ensuite, à travers des traitements d'image appropriés, d'extraire des informations quantitatives essentielles telles que la porosité locale, l'orientation des contacts intergranulaires, ainsi que les déplacements individuels des grains.

3.3.2 Traitement d'images tomographiques

Une fois les images tomographiques 3D reconstruites à partir des projections acquises, plusieurs étapes de post-traitement sont nécessaires pour en extraire des informations quantitatives pertinentes relatives à la microstructure du milieu étudié (Figure 3.17). L'image initiale en niveaux de gris est convertie en image binaire à l'aide d'un seuillage global. Un algorithme de type « watershed » est ensuite appliqué pour segmenter les particules individuelles, produisant finalement une image labellisée où chaque particule est identifiée par un code couleur ou un identifiant unique. Chaque étape illustrée dans ce schéma fera l'objet d'une description approfondie dans les paragraphes suivants. Ces étapes visent à interpréter les volumes voxelisés

et à produire des descripteurs exploitables pour l'analyse mécanique et géométrique du milieu granulaire renforcé.

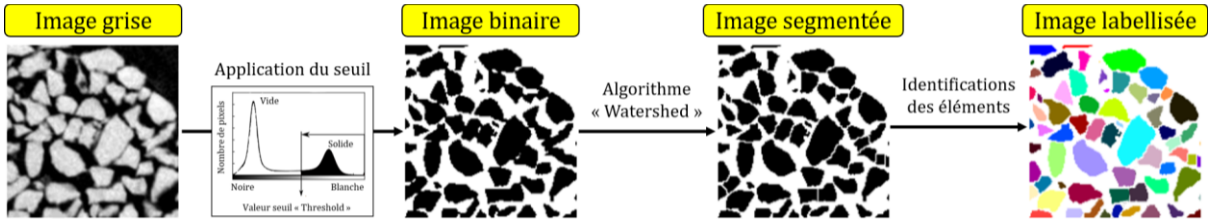


Figure 3.17. Schéma du traitement d'image classique appliqué à une coupe 2D issue d'un volume tomographique 3D (basé sur Ando (2013)).

1. *Image initiale : Tomographie brute à niveaux de gris*

D'après Wiebicke, 2020), qui a analysé expérimentalement l'évolution de la microstructure des sols granulaires soumis à des chargements monotones et à des inversions de charge à l'aide de la microtomographie aux rayons X au laboratoire 3SR, le point de départ de toute analyse d'image correspond à la tomographie reconstruite. Celle-ci est communément appelée « image à échelle de gris », dans laquelle chaque « voxel » (pixel en 3D) se voit attribuer une valeur scalaire, dite « valeur de gris », représentant l'atténuation locale du faisceau de rayons X — une grandeur qui est elle-même indirectement corrélée à la densité du matériau traversé. Cette image contient toutes les informations essentielles sur la distribution spatiale des différentes phases, mais nécessite un traitement complémentaire pour en extraire des entités physiques interprétables.

Une étape de filtrage est généralement appliquée afin de réduire le bruit et améliorer le contraste, notamment pour atténuer les artéfacts liés à la reconstruction (anneaux, projections floues, etc.). Plusieurs filtres peuvent être utilisés selon le type de bruit à corriger, comme par exemple le filtre gaussien ou le filtre médian (Ando, 2013; Wiebicke, 2020), parmi d'autres. Le filtre gaussien applique un flou dont l'intensité est contrôlée par l'écart-type de la fonction gaussienne. En revanche, le filtre médian remplace la valeur de chaque voxel par la médiane des valeurs situées dans une petite sphère centrée sur ce voxel, tout en préservant généralement les contours. Cette opération est cruciale pour assurer la qualité des étapes de seuillage et de segmentation à venir, en améliorant la séparation entre les différentes phases.

2. *Binarisation : Séparation des phases*

La première difficulté dans l'analyse des images est la différenciation des différentes phases. Cela commence par l'application d'un seuillage global sur la valeur de gris des voxels. Tous les voxels dont la valeur dépasse un seuil prédéfini sont convertis en valeur 1 (solide), et les autres en 0 (vide) : c'est le processus de binarisation. Le seuil peut être déterminé automatiquement à l'aide de la méthode d'Otsu (1975), qui identifie le seuil optimal à partir de l'histogramme des niveaux de gris. Toutefois, dans le cas d'échantillons multiphasés (ex. : grains + vide + géogrille), la séparation par seuillage unique devient insuffisante. Dans de telles situations, une approche par seuillage multi-classes ou des techniques basées sur l'apprentissage automatique peuvent s'avérer nécessaires pour distinguer les matériaux aux atténuations similaires.

3. *Segmentation des particules et étiquetage :*

L'image binaire obtenue ne contient encore que des informations de phase, sans identification individuelle des particules. L'étape suivante consiste donc à segmenter les particules individuelles. Cette opération peut être effectuée à l'aide de l'algorithme « watershed » (Beucher, 1979), qui permet d'attribuer une étiquette unique à chaque objet connecté (particule) dans l'image. Le résultat est un volume 3D labellisé, où chaque particule est représentée par une valeur

entière spécifique, facilitant son identification et son extraction. Ce traitement constitue la base pour la caractérisation géométrique (taille, forme, orientation), le calcul des contacts inter-particulaires et leur distribution spatiale.

4. *Extraction des descripteurs microstructuraux :*

Les images segmentées permettent d'extraire une série de descripteurs microstructuraux essentiels à la compréhension du comportement mécanique du matériau étudié. Parmi ces descripteurs figurent la distribution réelle des tailles de particules, la porosité locale estimée par voxelisation, ainsi que les orientations des contacts obtenues par analyse des interfaces entre particules. La méthode de calcul de chaque paramètre varie selon la technique utilisée, et les détails spécifiques à chaque approche seront présentés ultérieurement lors de leur application.

Enfin, il convient de noter que cette procédure n'a pas pu être entièrement appliquée à l'ensemble des images scannées, en raison des difficultés rencontrées lors de la segmentation ainsi que des importantes tailles de données à traiter, comme présenté dans les sections suivantes. Cela étant, bien que ces descripteurs microstructuraux ne soient pas exploités dans ce chapitre, une analyse approfondie est proposée à la section 5.3.3, où ils seront comparés aux résultats des simulations numériques pour une configuration représentative avec géogrille biaxiale.

3.3.3 Tomographies et interprétation des images

La campagne de tomographie a été structurée en deux phases, chacune conçue pour répondre à des contraintes techniques spécifiques qui sont ressorties au fur et à mesure de l'évolution de l'étude. Comme c'est souvent le cas dans la recherche expérimentale, le plan initial a évolué progressivement pour répondre à de nouvelles exigences et pour profiter des équipements d'imagerie disponibles. La sélection des systèmes de scan a donc été guidée par des facteurs tels que la taille de l'échantillon, la résolution spatiale et l'accessibilité à des instruments avancés avec protocoles de scan personnalisés. La première phase s'est concentrée sur des échantillons de taille limitée, tandis que la deuxième phase a étendu l'analyse à un échantillon plus large et plus représentatif. Les sous-sections suivantes présentent les caractéristiques et les avantages des deux systèmes d'imagerie à rayons X utilisés dans cette étude.

3.3.3.1 *Campagne au Laboratoire 3SR : Université Grenoble Alpes, France*

La première campagne de tomographie a été réalisée au laboratoire 3SR à Grenoble, en utilisant un tomographe à rayons X de laboratoire conçu sur mesure pour les applications en géomécanique.

1. *Dispositif expérimental :*

Sur la Figure 3.18, on peut voir la configuration du scanner : un plateau tournant monté sur un chariot mobile permet la translation de l'échantillon dans l'axe du faisceau. La source émet un faisceau conique dirigé vers le détecteur. Lorsque l'échantillon est déplacé vers la source, son image projetée sur le détecteur est agrandie, réduisant en contrepartie le champ de vision – c'est le principe de la magnification géométrique.

Pour cette étude, une résolution de 50 µm a été sélectionnée afin de satisfaire les critères définis par Wiebicke (2020), qui recommande qu'un objet soit représenté par au moins 16 pixels dans sa plus petite dimension – ici, l'épaisseur de la géogrille étant de 1 mm, elle est ainsi représentée par 20 pixels.

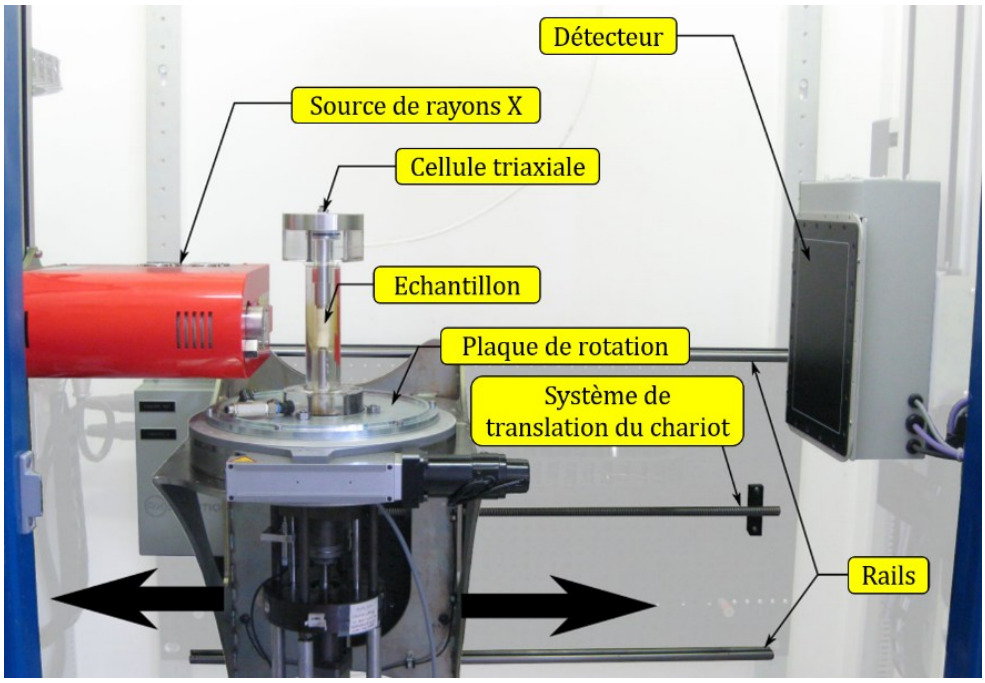


Figure 3.18. Photographie légendée du scanner à rayons X du Laboratoire 3SR (adaptée de Ando E., 2013).

2. *Echantillon étudié :*

Le scanner 3SR propose dispose d'une cellule triaxiale in situ développée pour des échantillons de petite taille (11 mm de diamètre et 22 mm de hauteur). Un prototype pour des échantillons plus grands (70 × 140 mm) est en développement, mais n'est pas encore complètement opérationnel pour les essais sous contrainte (source : fiche descriptive de la plateforme MicroTomoMeca). Il permet néanmoins la réalisation de scans à l'état non sollicité.

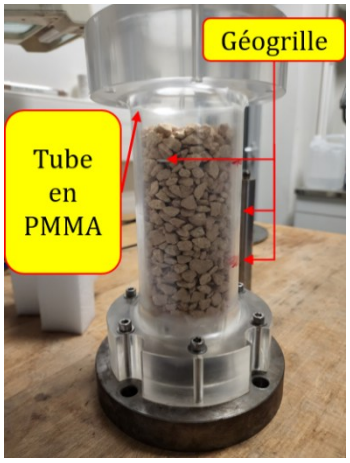


Figure 3.19. Photographie de l'échantillon (70 mm × 125 mm) préparé dans un tube en PMMA, comportant trois mailles de géogrille, destiné au scan tomographique dans la cellule du laboratoire 3SR.

L'échantillon étudié est contenu dans un tube en plexiglas (PMMA) de 70 mm de diamètre intérieur et 5 mm d'épaisseur. Il a été préparé selon le protocole des essais triaxiaux décrit à la section 3.2, en quatre couches de grains séparées par trois couches d'une seule maille, de même orientation, de la géogrille biaxiale étudiée (voir Figure 3.19). En raison de contraintes géométriques liées au dispositif, seule une hauteur utile de 125 mm a été exploitée.

3. *Paramètres de scan et interprétation des résultats :*

Pour atteindre une résolution de 50 µm sur cet échantillon et tenter d'obtenir un bon contraste entre les différentes phases (pore, grain, géogrille), le scan a été effectué à énergie maximale, avec une tension de 150 kV. Le volume reconstruit comporte 1500 × 1500 × 2500 voxels.

Comme décrit dans la section précédente 3.3.2, il faut tout d'abord séparer les différentes phases sur la base d'un seuil sur les valeurs de gris. Cependant, l'analyse de l'histogramme des valeurs de gris d'une tranche représentative de l'image (Figure 3.20), affichant les données brutes en niveaux de gris pour les trois éléments (vide, grains, géogrille), révèle seulement deux pics distincts correspondant aux phases solide et vide. Cela met en évidence un problème de contraste pour la géogrille : son matériau présente une atténuation proche de celle du vide, ce qui rend sa détection automatique difficile.

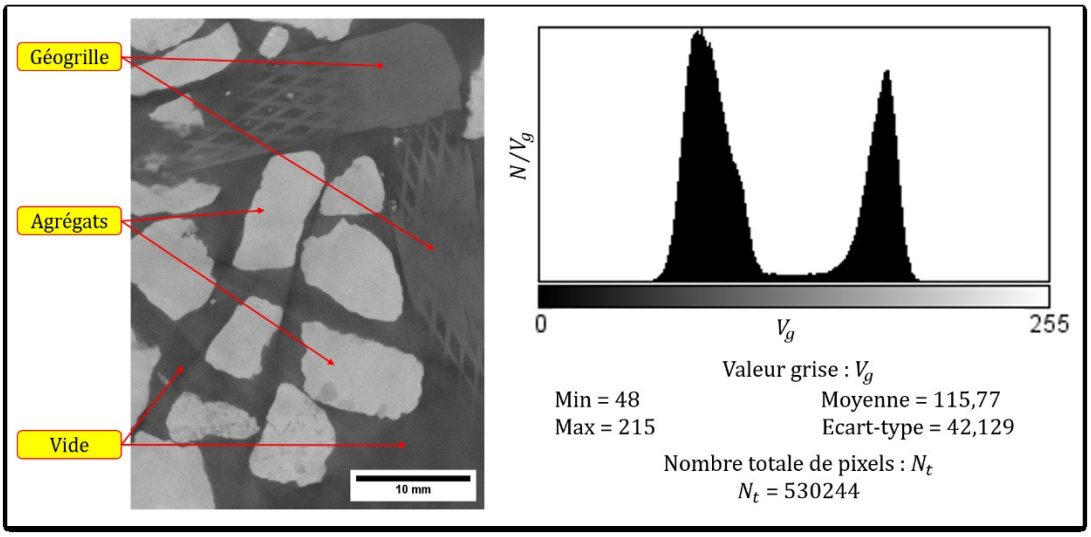


Figure 3.20. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche 3D représentative de l'image à échelle de gris, comportant les trois phases : vides, grains et géogrille.

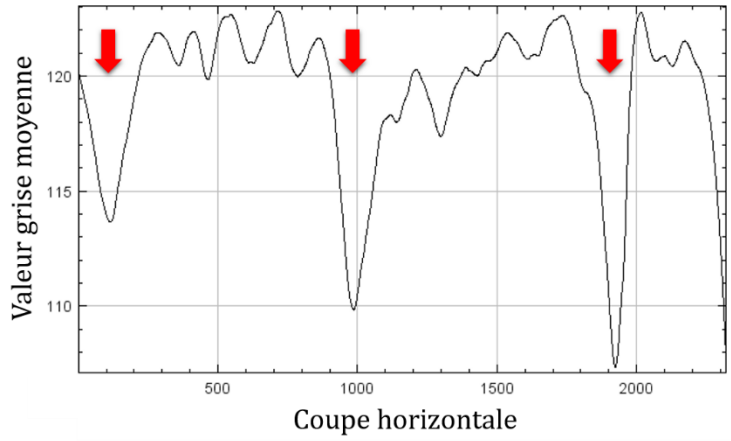
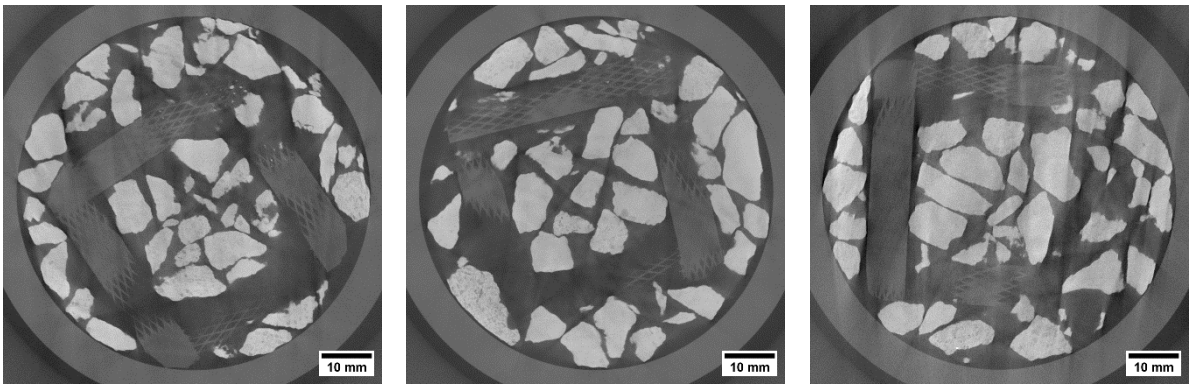


Figure 3.21. Evolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale le long de la hauteur de l'échantillon.

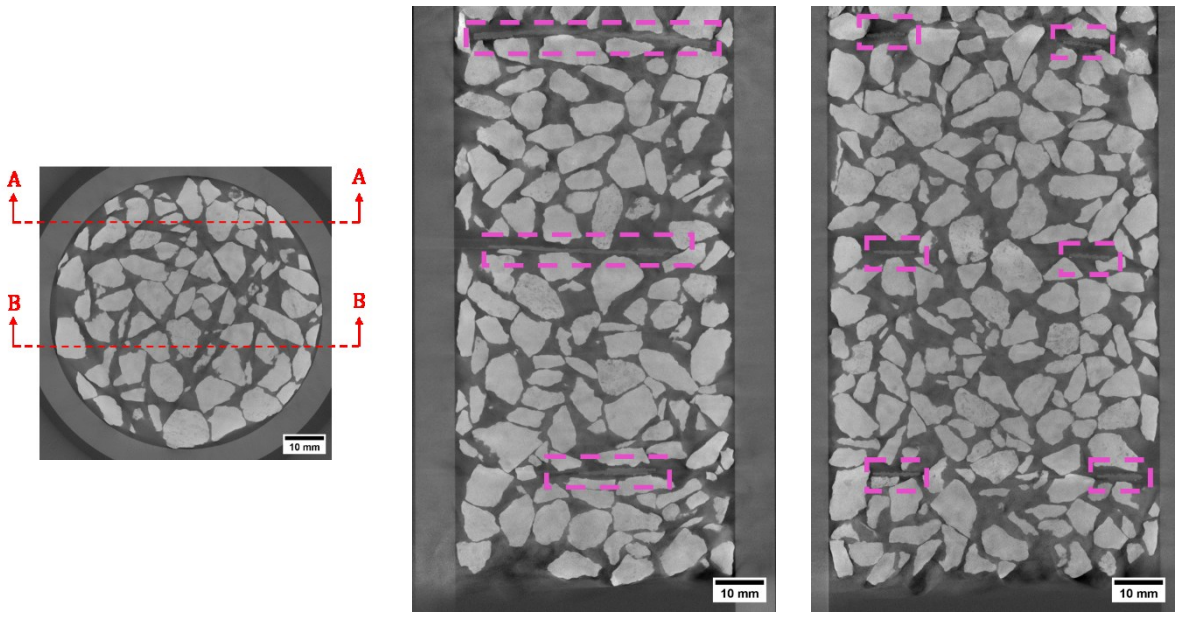
Malgré l'absence de séparation nette entre toutes les phases, certaines interprétations visuelles et analyses quantitatives restent néanmoins possibles. Comme expliqué dans la section 3.3.2, la porosité est déterminée à partir des valeurs attribuées à chaque voxel. La distribution de porosité peut ainsi être évaluée à travers le profil de valeurs moyennes de gris. Le profil selon la hauteur

(Figure 3.21) présente trois chutes nettes de la valeur moyenne de gris par coupe, correspondant aux emplacements des nappes de géogrille. Cela confirme une détection indirecte de la perturbation du champ de densité induite par la présence de la géogrille. Chaque chute s'étend sur environ 100 coupes autour de la position centrale de la nappe, soit une zone d'environ 5 mm = 0,5 D_{50} de part et d'autre, compte tenu de la résolution spatiale de 50 µm. Cette extension reste inférieure à la marge de variabilité des zones d'influence mécanique rapportées dans la littérature, généralement comprises entre 30 et 100 mm (Perkins et al., 2004; Schuettpelz et al., 2009). Néanmoins, elle fournit une indication qualitative de l'influence locale de la géogrille, telle qu'observée à travers l'imagerie utilisée ici.



Quart inférieur Mi-hauteur Quart supérieur

Figure 3.22. Coupes horizontales de l'image en niveaux de gris aux trois niveaux de géogrille, successivement de gauche à droite : quart inférieur, mi-hauteur et quart supérieur de l'échantillon.



Coupe horizontale Coupe verticale A-A Coupe verticale B-B

Figure 3.23. De gauche à droite : coupe horizontale de l'image en niveaux de gris en l'absence de géogrille, suivie des deux coupes verticales associées (A–A et B–B), avec des encadrés mettant en évidence la géogrille.

Les Figure 3.22 et Figure 3.23 présentent respectivement des coupes horizontales et verticales du volume reconstruit. Une inclinaison et une rotation des couches de géogrille sont clairement observées. Les géogrilles située dans le quart inférieur et à mi-hauteur de l'échantillon présentent des variations d'orientation visibles sur la même coupe verticale (Figure 3.22 et Figure 3.23 « Coupe A-A »), tandis que la géogrille située dans le quart supérieur reste bien orientée. Cette

désorientation est probablement due au déplacement de la géogrille pendant le compactage de la couche supérieure, comme c'est souvent le cas pour les couches inférieures. Dans le même contexte, un compactage hétérogène peut entraîner une inclinaison de la géogrille. Ce phénomène peut également être lié à la taille réduite de l'échantillon, dans lequel une seule ouverture de géogrille est présente, limitant ainsi la stabilité de la géogrille.

Par ailleurs, le rapport entre la taille d'ouverture de la maille « b » (longueur libre) et la taille moyenne des grains D_{50}, un indicateur clé de l'efficacité de l'interaction sol-géogrille, peut être évalué. Ce rapport « b/D_{50} » reflète indirectement le nombre de grains par direction dans chaque maille. La Figure 3.22 et Figure 3.23 « Coupe B-B » montrent qu'en moyenne, trois à quatre grains sont visibles le long de chaque direction de l'ouverture, ce qui est proche des observations de Mulabdic et al. (2018), qui ont identifié un rapport optimal de 2 à 3. Avec une ouverture de b = 32 mm et un diamètre moyen de D_{50} = 10,4 mm, le rapport théorique est de 3,08, soit approximativement 3. Pour confirmer cette estimation, le nombre total de grains par ouverture a été compté : 14, 11 et 12 pour les couches inférieure, médiane et supérieure, respectivement. Ces nombres sont comparables au rapport théorique entre la surface de l'ouverture « S^2 » et la section moyenne occupée par les grains « $S^2/(\pi \cdot {D_{50}}^2/4)$ » égale à 12. Ce résultat est donc cohérent avec les observations expérimentales. Il convient toutefois de rappeler que ce calcul théorique repose sur deux hypothèses simplificatrices : il suppose un remplissage optimal des ouvertures ainsi qu'une distribution monodisperse des grains, c'est-à-dire que tous les grains ont un diamètre identique égal à D_{50}. En réalité, la granulométrie présente une certaine variabilité, et certains grains apparaissant dans les ouvertures ne sont visibles que partiellement sur la coupe, avec une section apparente inférieure à leur diamètre réel (Figure 3.22 et Figure 3.23 « Coupe B-B »). Cette représentation partielle peut entraîner une légère sous-estimation ou surestimation du nombre réel de grains par ouverture. Malgré ces limites, l'estimation théorique fournit un ordre de grandeur cohérent avec les observations, renforçant la validité de l'approche employée.

En conclusion, cette campagne a permis d'explorer la faisabilité d'une caractérisation microstructurale 3D sur des échantillons de taille réduite, malgré certaines limitations liées à la résolution et au contraste. Des résultats qualitatifs pertinents ont pu être extraits, notamment en ce qui concerne l'arrangement local des grains et la distribution de porosité autour des éléments de renforcement.

3.3.3.2 *Campagne au Centre d'imagerie à rayons X µ-VIS : Université de Southampton, Royaume-Uni*

Afin de surmonter les difficultés rencontrées lors de la première campagne de tomographie, notamment le faible contraste entre la géogrille et les vides, il a été proposé d'utiliser une imagerie à plus haute énergie tout en maintenant une résolution spatiale équivalente (50 µm). Cette approche visait à améliorer la segmentation de la géogrille et à fournir des informations plus représentatives (plus de mailles) sur les interactions sol–géogrille (par exemple, la typologie de l'arrangement granulaire à proximité de la géogrille, la déformation locale de cette dernière).

1. *Dispositif expérimental :*

Cette deuxième campagne a été réalisée au centre d'imagerie µ-VIS de l'Université de Southampton (Royaume-Uni), qui dispose d'un système de tomographie par rayons X à haute énergie adapté à des échantillons de grande taille. Le dispositif utilisé est le système « Custom 450/225 kVp Hutch » (Figure 3.24), capable de traiter des échantillons allant jusqu'à 1 × 1 × 1,5 m pour un poids maximal de 100 kg dans un espace utilisateur optimisé pour des manipulations complexes. Ce système est équipé de deux sources de rayons X (20–225 kVp et 100–450 kVp) et offre une résolution allant de 3 µm à faible énergie jusqu'à environ 50 µm à 450 kV. Le détecteur

est monté sur un système de translation latérale et verticale, permettant l'acquisition d'images sur de grandes largeurs en plusieurs passes successives, ensuite assemblées numériquement (Figure 3.25), ce qui le distingue du scanner utilisé au 3SR. En effet, pour couvrir une largeur donnée, l'échantillon est scanné en deux moitiés successives : la rotation porte alors uniquement sur la moitié du volume à la fois. Le détecteur est ensuite déplacé pour scanner la seconde moitié, puis les deux volumes obtenus sont assemblés numériquement afin de reconstituer une image complète et cohérente de l'échantillon.

2. *Accès au dispositif et financement :*

Le coût élevé associé à ce type d'équipement a été pris en charge dans le cadre du programme « NXCT Free Beam Time Access Scheme », financé par « EPSRC » (UK Engineering and Physical Sciences Research Council) dans le cadre du programme national britannique NXCT (National X-ray Computed Tomography). Ce dispositif soutient l'innovation expérimentale en offrant un accès gratuit à des chercheurs en début de carrière. Le projet soumis a été sélectionné sur la base de la nouveauté de sa méthodologie et de son apport potentiel à la communauté scientifique en matière d'interactions entre matériaux granulaires et géosynthétiques. Trois journées complètes de scan, soit 72 heures, ont été accordées, incluant la possibilité de scans nocturnes.

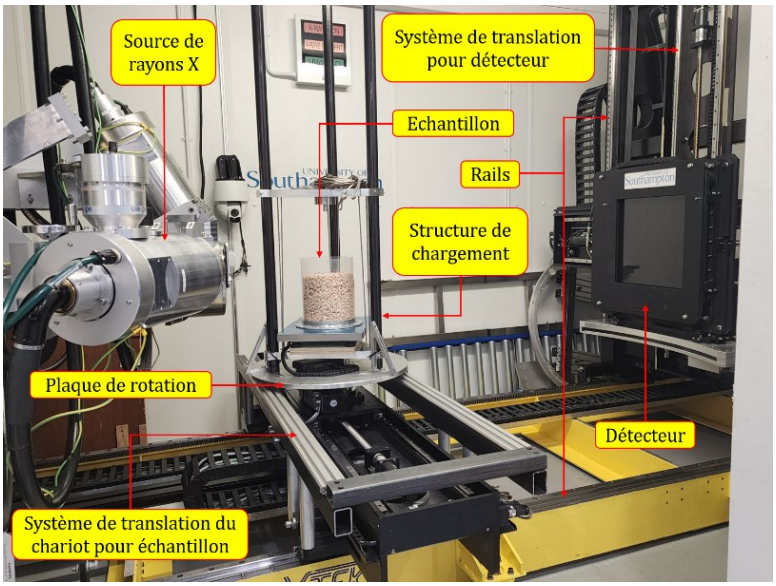


Figure 3.24. Photographie légendée du scanner à rayons X du centre d'imagerie µ-VIS de l'Université de Southampton (Royaume-Uni).

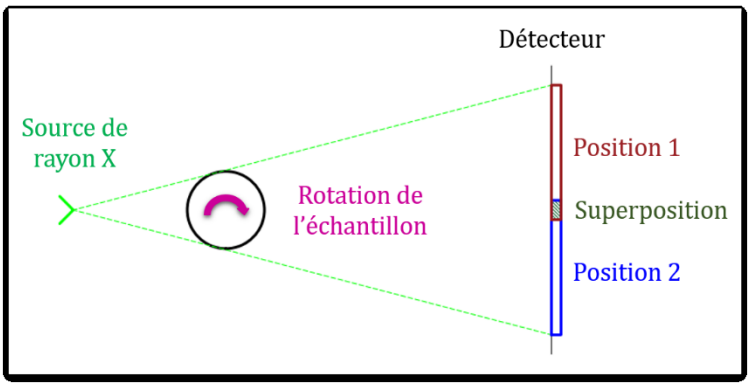


Figure 3.25. Illustration du principe de scan par superposition de deux scans latéraux.

3. *Echantillons et conditions expérimentales :*

Les échantillons utilisés sont ceux décrits précédemment (voir Figure 3.6 et Figure 3.7 à la section 3.1.3 sur la préparation des échantillons). Ils ont été préparés dans des tubes en PMMA d'un diamètre intérieur de 194 mm et d'une hauteur utile de 200 mm, pour une masse totale de 8,6 kg. Le premier échantillon est un matériau granulaire pur sans renforcement, tandis que le second contient deux nappes de géogrille placées à 50 mm des extrémités, soit aux quarts supérieur et inférieur. Ce positionnement repose sur deux considérations. D'une part, selon la littérature, la zone d'influence mécanique d'une géogrille s'étend typiquement entre 30 et 100 mm. D'autre part, pour optimiser l'efficacité du système de scan en divisant l'échantillon en portions verticale de 100 mm, ce qui permet de centrer les nappes de géogrille dans chaque portion scannée.

Les scans ont été effectués avec une puissance élevée de 54,8 W, sous une tension de 435 kV. Compte tenu de la taille de l'échantillon, plusieurs acquisitions ont été nécessaires pour couvrir l'ensemble du volume. Chaque tranche de 100 mm de hauteur a été scannée en deux moitiés latérales, chacune durant environ 4 heures. Ainsi, une largeur complète demande 8 heures de scan pour une tranche de 100 mm de hauteur. Le scan de l'échantillon entier (200 mm de hauteur) pour une configuration prend donc environ 16 heures.

4. *Conditions de chargement et dispositifs d'essai :*

Afin d'exploiter pleinement le temps de scan alloué et de documenter l'état déformé interne du matériau soumis à des sollicitations mécaniques réalistes, chaque échantillon a été scanné dans deux configurations : au repos et sous chargement vertical monotone. L'état au repos, bien que désignant théoriquement l'absence de contrainte appliquée, a nécessité dans la pratique une précharge de 300 N, soit environ 10 kPa. Cette charge modérée avait pour objectif d'éviter tout déplacement intempestif des grains dû à la rotation de l'échantillon pendant le scan. L'état chargé a été obtenu en appliquant une force verticale de 3000 N, soit une contrainte verticale d'environ 100 kPa, valeur choisie pour représenter une situation réaliste de sollicitation ferroviaire. En effet, selon les travaux de Quintanilla I. (2018), une charge maximale d'environ 23 kN est transmise au sol sous un bloc de traverse bi-bloc de 290 mm × 840 mm, soit une contrainte moyenne comparable à celle imposée ici.

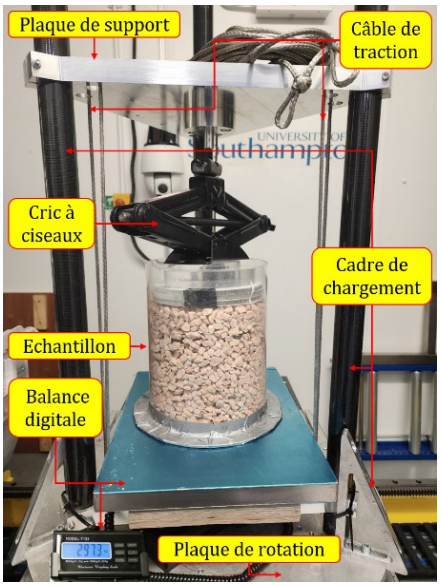


Figure 3.26. Photographie légendée du système de chargement de l'échantillon 200 mm × 200 mm, préparé dans un tube en PMMA, destiné au scan tomographique dans la cellule du centre µ-VIS.

Pour se faire, un système de chargement sur mesure a été conçu afin de permettre l'application d'un effort vertical contrôlé tout en restant compatible avec la rotation de l'échantillon dans le

scanner (Figure 3.26). Ce dispositif, assure une transmission de la charge sans interférer avec la rotation de l'échantillon, et se compose de :

- Trois barres verticales en acier fixées à la plaque de rotation du scanner, servant de cadre du dispositif de chargement,
- Une plaque de support vissée aux barres verticales,
- Un cric à ciseaux permettant la mise en charge manuelle de l'échantillon,
- Une balance numérique, tarée une fois l'échantillon en place, pour contrôler la charge appliquée. Cette balance est supportée par une plaque suspendue via des câbles en Dyneema® de 6 mm de diamètre.

Afin de suivre l'évolution de la charge pendant le scan (Figure 3.27), une caméra « GoPro » a été positionnée face à l'afficheur de la balance. L'analyse des images a révélé une relaxation progressive de la charge au cours de l'acquisition. La force appliquée est passée de 3000 N à environ 2600 N après plusieurs heures de scan. Cette diminution progressive de la contrainte appliquée constitue un paramètre à prendre en compte lors de l'analyse des résultats, notamment pour l'interprétation des déformations internes ou la comparaison entre les deux moitiés scannées d'un même échantillon. En effet, une baisse de la charge peut induire un léger relâchement de l'échantillon, susceptible d'entraîner des micro-déplacements des grains ou de la géogrille pendant le scan. Ces mouvements, bien que faibles, peuvent générer du flou ou des artefacts dans l'image reconstruite, en particulier dans les zones de transition entre les deux moitiés scannées, ce qui complique l'alignement et l'analyse fine des structures internes. Un réajustement manuel à 3000 N a été effectué avant le début du prochain scan restant de l'échantillon.

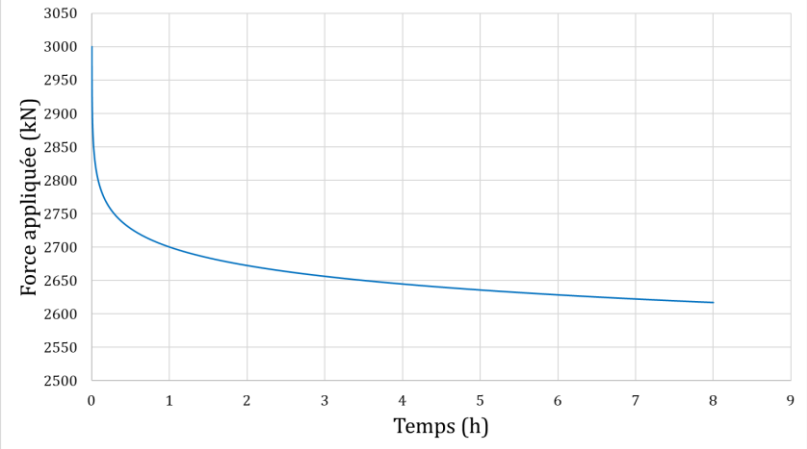


Figure 3.27. Relaxation du chargement pendant le scan.

5. *Reconstruction et traitement d'image :*

Les reconstructions ont été réalisées par le centre d'imagerie µ-VIS à l'aide du script de correction des artefacts de type anneaux développé par Vo et al. (2018). Ce script permet une atténuation efficace des artefacts circulaires souvent observés dans les reconstructions tomographiques, notamment dans les configurations avec échantillons denses ou complexes. Les volumes finaux reconstruits présentent une taille de 3940 × 3940 × 2000 voxels sur une hauteur d'environ 100 mm, correspondant à une résolution spaciale de 50 µm. Les fichiers bruts générés sont encodés en 32 bits « float little-endian » (.raw), et leur taille atteint environ 120 Go par scan, ce qui impose des contraintes significatives en termes de traitement, stockage et visualisation.

Pour permettre des traitements plus accessibles et réduire la charge informatique, une conversion des volumes en images 8 bits a été effectuée. Elle permet d'alléger le codage des niveaux de gris, initialement enregistrés en 32 bits, en les recalant sur une échelle plus réduite (0–255 au lieu de 0–4294967295). Une telle réduction de la profondeur de bits permet une manipulation plus fluide avec les ressources disponibles, mais s'accompagne d'une perte de précision dans les variations d'intensité. Cela peut compromettre la détection de structures à faible contraste, en particulier lorsque les différences de niveau de gris sont faibles. En parallèle, un « binning » a été appliqué lors du post-traitement. Cette opération consiste à regrouper les voxels voisins, ce qui réduit la résolution spatiale du volume et donc le nombre total de voxels à traiter. Cette opération permet également de réduire le bruit de l'image, ce qui peut faciliter certaines étapes du traitement, comme la segmentation, en rendant les niveaux de gris plus homogènes au sein de chaque phase.

Les résultats obtenus après reconstruction ont confirmé les observations précédentes réalisées sur les échantillons scannés au laboratoire 3SR. Les histogrammes d'intensité révèlent deux pics dominants, traduisant la présence de seulement deux phases discernables : les grains solides et le vide (Figure 3.28).

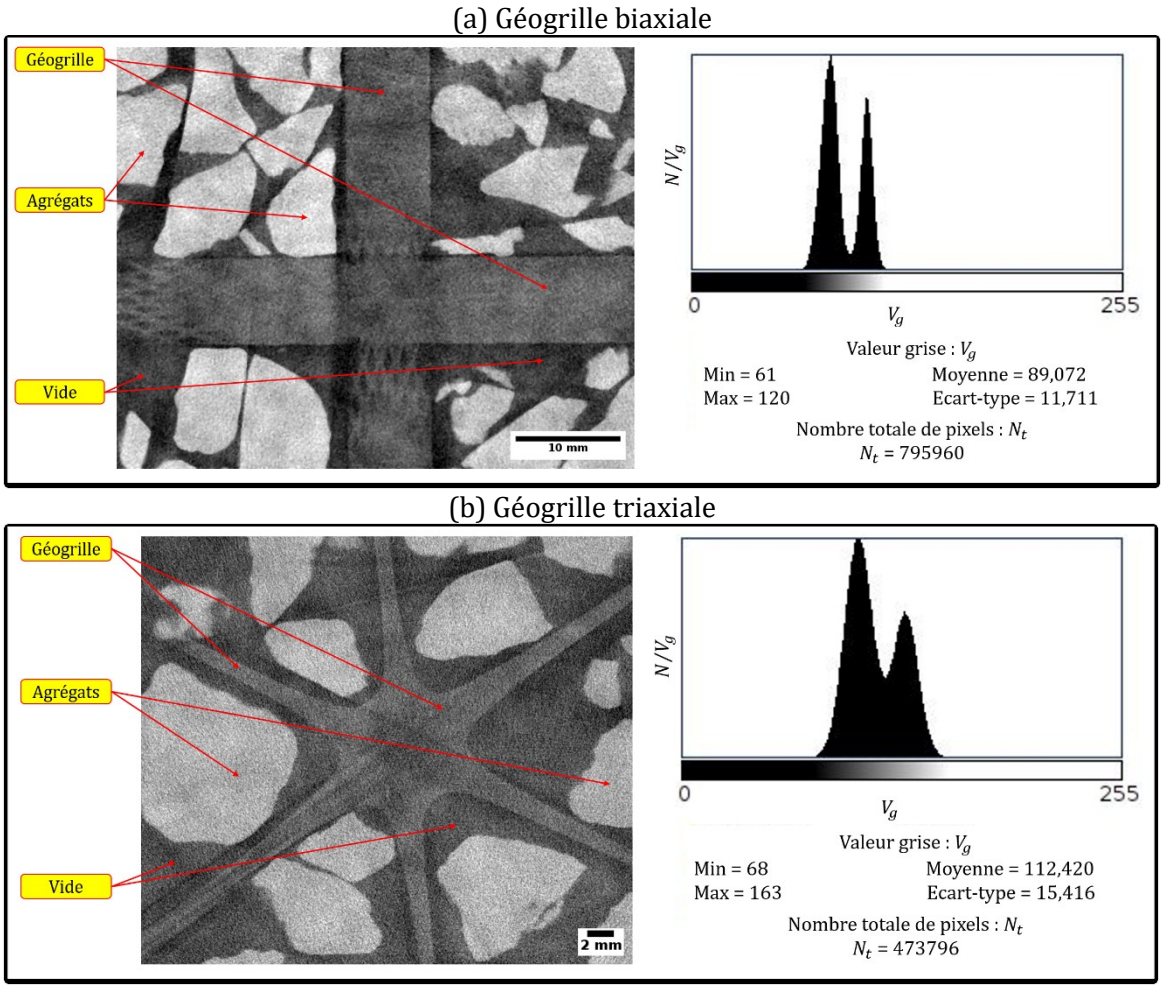


Figure 3.28. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche 3D représentative, montrant les trois phases : vides, grains et géogrille, pour deux géogrilles différentes : (a) biaxiale et (b) triaxiale.

Aucune phase distincte n'a été identifiée pour la géogrille, suggérant que sa réponse radiographique est confondue avec celle du vide. L'hypothèse initiale consistant à utiliser des rayons X à plus haute énergie pour améliorer la discrimination en fonction de la matière n'a donc pas permis d'atteindre l'objectif, ni pour la géogrille biaxiale « Naue Secugrid® 40/40 Q1 », ni pour la triaxiale « Tensar TX170 ». Cette limitation est donc complètement attribuable aux

propriétés intrinsèques des géogrilles, constituées de polypropylène (PP), un polymère léger composé d'atomes à faible numéro atomique (essentiellement C, H et O). Ces éléments possèdent un faible pouvoir d'atténuation des rayons X, ce qui rend leur détection particulièrement difficile, même en conditions de haute énergie. En outre, les effets de volume partiel, dus à l'interaction de voxels englobant à la fois vide et géogrille, atténuent davantage la visibilité des structures minces. La présence de grains denses à proximité immédiate des géogrilles peut également induire un durcissement du faisceau « beam hardening », réduisant encore le contraste local et masquant les structures polymères.

Cependant, plusieurs approches ont été explorées pour surmonter ces limitations et améliorer l'identification des géogrilles dans les volumes tomographiques. A noter que malgré l'application du « binning », la taille des fichiers restait particulièrement volumineuse. Il a donc été recommandé de restreindre à nouveau la zone d'étude à une seule ouverture de la géogrille, notamment biaxiale, afin de limiter les exigences de traitement pendant ces tentatives d'amélioration.

Une première approche manuelle basée sur la géométrie connue a été appliquée (Figure 3.29). Cette méthode a consisté à exploiter les dimensions connues de la géogrille (épaisseur des nervures, géométrie des ouvertures, position planifiée) pour réinterpréter manuellement les zones suspectes dans les coupes 2D en ajustant la valeur de gris de la géogrille. Cette approche s'est révélée partiellement fonctionnelle dans des plans orthogonaux simples, mais s'est avérée inefficace en 3D, notamment en raison de la déformation locale des nervures (flexion, inclinaison) difficile à anticiper sans visibilité claire dans les coupes successives.

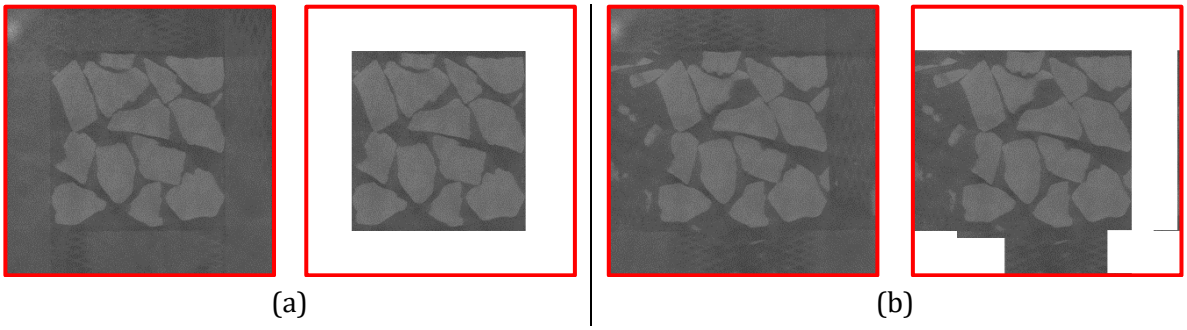


Figure 3.29. Illustration de l'approche de modification manuelle des valeurs de gris associées à la géogrille : (a) vues en plans orthogonaux ; (b) visualisation en inclinaison.

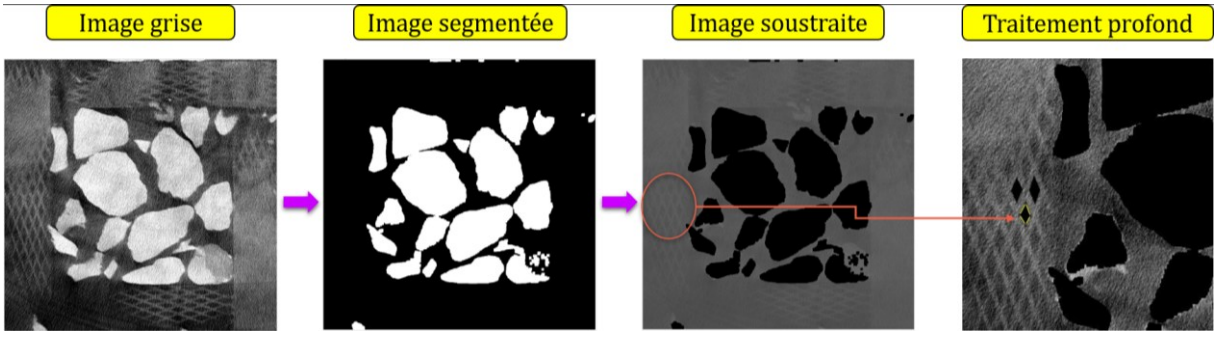
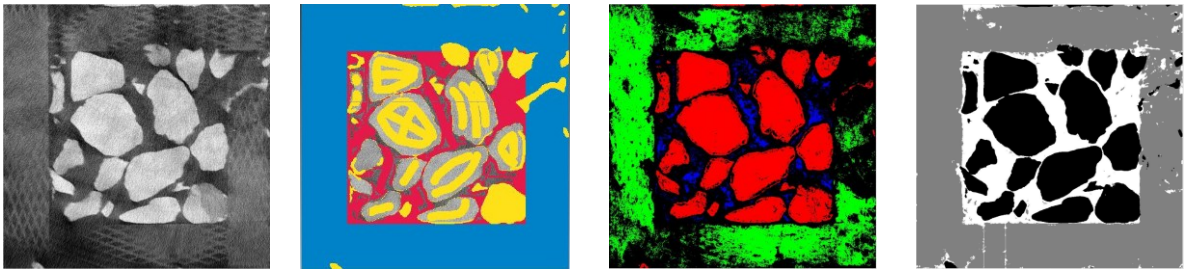


Figure 3.30. Illustration de l'approche de segmentation de la géogrille par soustraction des grains puis des vides.

Une seconde méthode a été tentée, reposant sur la soustraction d'images par traitement morphologique à l'aide du logiciel « Fiji » (ou « ImageJ ») (Figure 3.30). Elle consiste à isoler les grains via une succession d'opérations sélectionnées par essais et erreurs : application de filtres recommandés dans la littérature et décrits dans la section 3.3.2, conversion en image binaire à

partir d'un seuil de segmentation choisi dans l'histogramme entre les deux pics correspondant aux phases grains et vide/géogrille (Figure 3.28), puis une série d'opérations morphologiques (fermeture de trous, érosion, dilatation) visant à améliorer la qualité de la segmentation en affinant la forme et la continuité des grains. La qualité de cette binarisation peut être évaluée par comparaison de la distribution granulométrique extraite des images tomographiques avec celle obtenue par tamisage mécanique, ce qui constitue un critère quantitatif fiable du volume réel de grains présents. Cependant, cette étape n'a pas été réalisée ici pour une coupe 2D. Une fois les grains segmentés, l'image des grains est soustraite de l'image originale pour ne conserver que les zones occupées par le vide et la géogrille. Des polygones ont ensuite été placés manuellement afin de tenter d'identifier les nervures via leur texture. Ce processus, bien que méthodologiquement fondé, s'est avéré extrêmement chronophage, fortement dépendant des paramètres morphologiques, et peu concluant en raison de la complexité des manipulations requises et de la similarité des valeurs de gris entre les phases. Il convient néanmoins de rappeler que cet essai constitue la base — l'isolation des grains sans prise en compte approfondie de la géogrille — de l'analyse plus poussée proposée au à la section 5.3.3.



(a) (b) (c) (d)

Figure 3.31. Illustration de la segmentation assistée par apprentissage supervisé : (a) image grise ; (b) étiquetage des pixels ; (c) probabilités de classification ; (d) segmentation finale.

Une troisième tentative, de segmentation assistée par apprentissage supervisé, a été menée avec « Ilastik », un logiciel basé sur des algorithmes d'apprentissage automatique (Figure 3.31). Cette méthode consiste à entraîner manuellement un classifieur de pixels à partir d'étiquettes définies par l'utilisateur sur plusieurs coupes (Figure 3.31.b). Trois classes ont été introduites : grains, géogrille et vide. Les sorties produites sont de deux types :

- Probabilités de classification (Figure 3.31.c) : Chaque pixel se voit attribuer une probabilité d'appartenance à une catégorie spécifique dans l'image originale, facilitant une première évaluation de la segmentation.
- Segmentation simple (Figure 3.31.d) : Chaque pixel est ensuite classé dans une catégorie spécifique, produisant une image segmentée où chaque région identifiée est étiquetée selon sa catégorie.

Bien que cette approche ait montré un potentiel prometteur, notamment pour la distinction entre grains et vide, la géogrille reste difficile à détecter, en raison de son proche niveau de gris avec le vide, rendant l'entraînement du modèle long et délicat. De plus, cette méthode demande un étiquetage extensif et une validation manuelle fastidieuse, surtout dans des volumes 3D de grande taille (soit l'échantillon entier).

6. *Interprétation des résultats :*

Dans la continuité de l'approche semi-quantitative précédemment appliquée aux essais à petite échelle, une analyse a été menée sur les images brutes issues de la tomographie à grande échelle pour le volume complet. L'objectif était d'extraire des informations directement à partir des niveaux de gris, sans application préalable de filtrage ni de segmentation, afin d'évaluer les effets

microscopiques de la présence de la géogrille sur l'arrangement des grains dans le milieu granulaire.

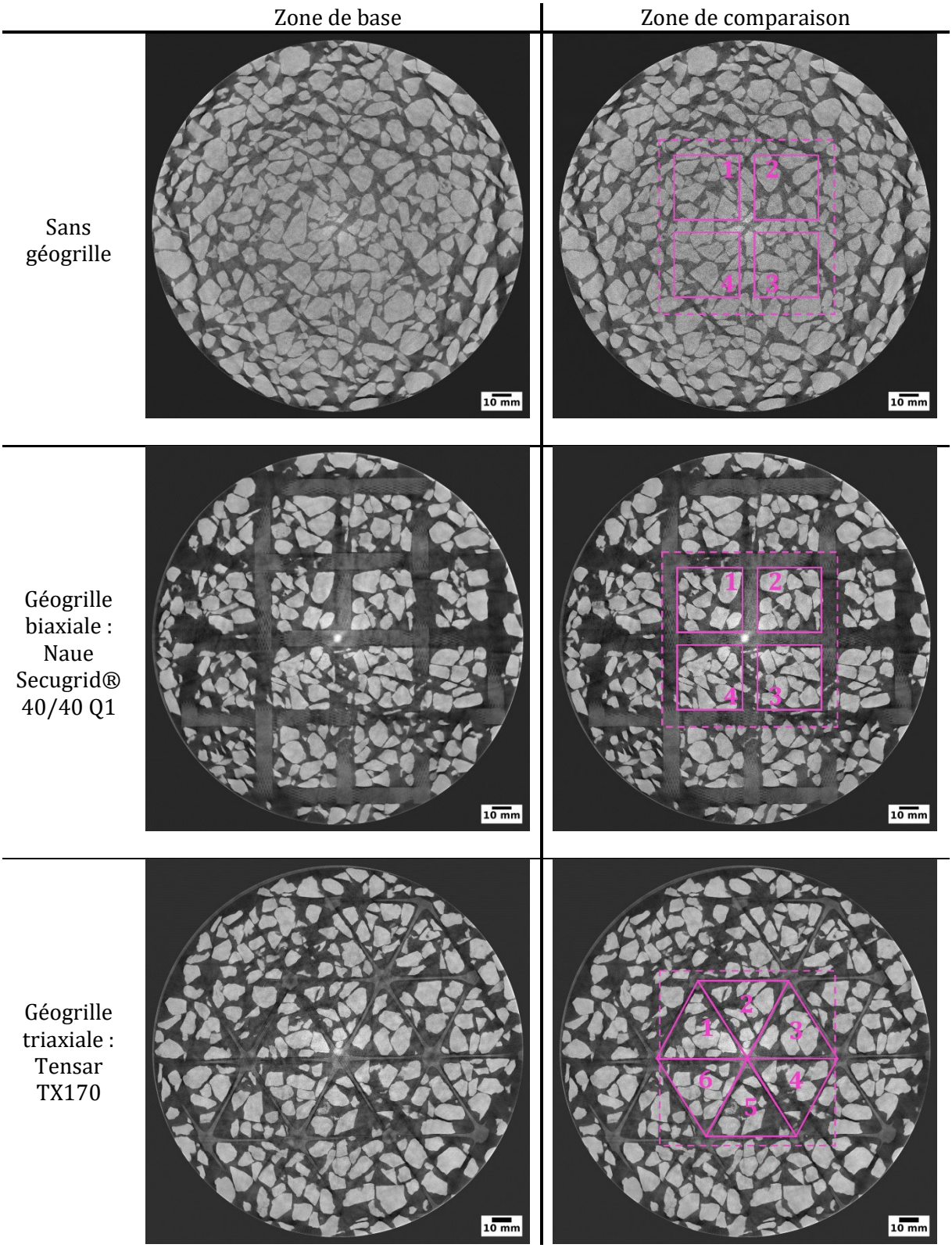


Figure 3.32. Coupes horizontales de l'image en niveaux de gris pour les configurations sans géogrille, avec géogrille biaxiale, et avec géogrille triaxiale (de gauche à droite).

Pour rappel, deux configurations d'échantillons ont été étudiées dans cette étude : la première correspond à un échantillon non renforcé, tandis que la seconde est un échantillon renforcé par

deux géogrilles de types biaxial et triaxial, positionnées à 50 mm des extrémités dans une hauteur totale de 200 mm (soit à un quart de la hauteur de part et d'autre), laissant une zone centrale non renforcée de 100 mm (voir Figure 3.6). Les acquisitions tomographiques présentées ici ont été réalisées à l'état non chargé, afin d'observer la structure interne initiale des échantillons. Pour chacune des configurations, des sections transversales ont été extraites au niveau des géogrilles dans l'échantillon renforcé, et à la hauteur correspondante dans l'échantillon non renforcé, afin de comparer localement la distribution et l'interaction des grains. La Figure 3.32 illustre ainsi trois coupes transversales réalisées à mi-hauteur du scan (soit 50 mm) : une coupe dans l'échantillon non renforcé (configuration 1), et deux coupes dans l'échantillon renforcé (configuration 2), correspondant respectivement à la section au niveau de la géogrille biaxiale et de la géogrille triaxiale. Une zone centrale, marquée en blanc sur les images, correspond à une zone de recouvrement générée par le processus de reconstruction des deux scans latéraux superposés, tel que décrit dans la Figure 3.25 et représenté en coupe verticale sur la Figure 3.33.

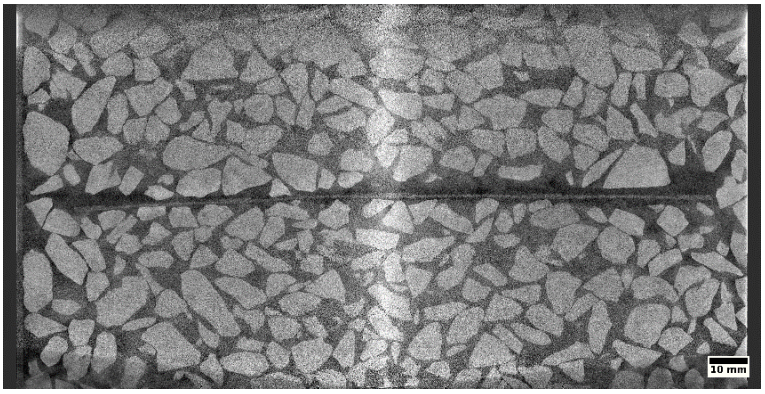


Figure 3.33. Coupe verticale au centre de l'échantillon montrant l'effet de superposition des deux scans latéraux.

D'un point de vue structural, l'orientation initiale des géogrilles est globalement conservée à l'état de repos. La majorité des ouvertures demeurent parallèles aux axes principaux de la tomographie, avec une inclinaison négligeable à l'exception des ouvertures situées proches des bords. Ceci confirme l'intérêt d'une étude à grande échelle comportant plus de mailles, plus représentatives du comportement stable du système.

Bien que la comparaison visuelle directe entre les différentes configurations (sans géogrille, avec géogrilles biaxiale et triaxiale) soit complexe en raison des artefacts de reconstruction et des variations locales de contraste, certaines différences qualitatives peuvent être observées. En particulier, la présence de la géogrille semble influencer localement l'arrangement des grains à proximité immédiate des nervures, où l'on observe des zones d'imbrication plus marquée dans les ouvertures. Cette réorganisation locale suggère une interaction mécanique entre les particules et le renforcement, modifiant ainsi la structure du milieu granulaire.

Le rapport entre la taille des ouvertures de la géogrille et le diamètre moyen des grains « b/D_{50} », paramètre clé dans l'étude des interactions sol-géogrille, a servi de base pour guider une estimation semi-quantitative du nombre de particules présentes dans les ouvertures. Ce comptage a été réalisé manuellement sur des coupes 2D au niveau de la géogrille, en tenant compte de certaines limites liées à la nature tridimensionnelle des grains. Notamment, les grains apparaissant partiellement dans l'ouverture, sans y pénétrer de manière significative (moins de la moitié estimée visuellement), n'ont pas été comptabilisés. En revanche, afin de permettre une comparaison cohérente entre les configurations avec et sans géogrille, l'ensemble des grains présents dans une zone centrale délimitée par un cadran pointillé a été décompté. La surface de ce cadran correspond à la partie centrale couvrant 4 mailles pour la géogrille biaxiale, soit environ

6 mailles pour la géogrille triaxiale (voir Figure 3.32). En considérant une distance entre axes des nervures (centre à centre) de 40 mm pour la géogrille biaxiale et une largeur de nervure de 8 mm, la surface totale étudiée est de 88 × 88 mm².

Tableau 3.4. Tableau récapitulatif du nombre de grains présents dans une zone centrale composée de 4 ouvertures pour la géogrille biaxiale et de 6 ouvertures pour la géogrille triaxiale issue de la Figure 3.32.

	Nombre de grains		
Ouverture	Sans géogrille	Géogrille biaxiale	Géogrille triaxiale
1	15	11	11
2	10	11	11
3	15	15	5
4	12	17	7
5	-	-	6
6	-	-	11
Total par ouvertures	-	54	51
Moyen par ouverture	-	13,5	8,5
Cadre pointillé (88x88 mm²)	+78	+6	+13
Total par cadre pointillé	130	60	64
Total par m²	16787	7748	8264

Le Tableau 3.4 répertorie le nombre de grains observés dans cette zone centrale, en indiquant également le nombre de grains par ouverture. Le comptage aboutit à un total de 130 grains en l'absence de géogrille, 60 grains en présence de la géogrille biaxiale, et 64 grains pour la géogrille triaxiale. Ces valeurs correspondent respectivement à des densités surfaciques de 16787 grains/m², 7748 grains/m² et 8264 grains/m². On constate ainsi une réduction d'environ 50 % de la densité de grains en présence de géogrille, quel que soit son type. Ce résultat met en évidence un effet clair du renforcement géosynthétique sur la compacité locale du matériau, avec une réduction significative de la densité de grains dans les zones renforcées. Cette diminution peut être attribuée à l'encombrement géométrique induit par les nervures, qui limite la liberté d'arrangement des particules. On note toutefois une densité légèrement plus élevée avec la géogrille triaxiale par rapport à la géogrille biaxiale. Cette différence peut s'expliquer à la fois par les incertitudes liées au comptage manuel (notamment en périphérie des ouvertures et effet 3D des grains), mais également par la géométrie propre à la géogrille triaxiale, dont les nervures plus fines laissent potentiellement davantage d'espace disponible pour les grains, à surface d'étude équivalente.

Dans le cas des configurations renforcées, une analyse plus détaillée a été amenée sur les deux types de géogrilles en s'appuyant sur le rapport b/D_{50}. La Figure 3.32 illustre clairement que, pour les deux types de géogrille, on observe en moyenne trois à quatre grains visibles le long de chaque direction de l'ouverture, ce qui est cohérent avec les observations issues de la tomographie au 3SR et donc conforme aux données de la littérature déjà indiquées. En outre, sur la base du comptage manuel effectué à partir des coupes 2D (Tableau 3.4), un total de 54 particules a été identifié dans les 4 ouvertures centrales de la géogrille biaxiale, soit une moyenne de 13,5 grains par ouverture. Pour la géogrille triaxiale, le nombre total est de 51 grains répartis sur 6 ouvertures, ce qui correspond à une moyenne de 8,5 grains par ouverture. Pour la géogrille biaxiale, cette valeur est proche de celle attendue théoriquement (12 grains par ouverture), obtenue à partir du rapport « $S^2/(\pi \cdot {D_{50}}^2/4)$ » avec S^2 la surface de la maille. Pour la géogrille triaxiale, dont le pas

d'ouverture hexagonal correspond à une maille triangulaire équilatérale de hauteur 40 mm, la valeur théorique est de 10,9 grains par ouverture. L'écart entre cette estimation théorique et la valeur observée peut s'expliquer par plusieurs facteurs, comme déjà évoqué lors de l'analyse des données tomographiques obtenues au laboratoire 3SR. En particulier, la présence de grains dont le diamètre est supérieur à D_{50}, utilisé pour le calcul théorique, tend à réduire le nombre de particules pouvant effectivement occuper une ouverture. Ce phénomène est accentué par la variabilité naturelle des tailles de grains et la configuration locale d'imbrication des grains, qui peuvent limiter leur agencement optimal dans certaines ouvertures. Cela est notamment observable dans les ouvertures n° 3, 4 et 5 pour la géogrille triaxiale (voir Figure 3.32), où l'encombrement local semble restreindre la capacité de remplissage par les particules.

Cette réorganisation locale de l'arrangement granulaire, suggérée par les observations visuelles et les comptages semi-quantitatifs précédents, peut également se traduire par des variations de porosité. Afin de mieux caractériser ces effets induits par la présence de la géogrille, une analyse complémentaire a été menée à partir des profils de niveaux de gris issus des images tomographiques. Pour quantifier ces observations, un profil des niveaux moyen de gris a été extrait le long de l'axe vertical comme illustré dans la Figure 3.34. Une perturbation des valeurs aux extrémités est constatée liée notamment à la proximité des parois du bac d'essai et donc à des effets de bord. Toutefois, à la hauteur de la géogrille (soit à 50 mm de hauteur), une chute locale du niveau de gris est visible. Cette réduction est interprétée comme une augmentation locale de la porosité induite par l'imbrication des grains autour des nervures de la géogrille, phénomène déjà identifié lors des essais à plus petite taille. L'épaisseur de la zone affectée par cette densification est estimée à environ ±5 mm (± 0,5 D_{50}) autour du plan de la géogrille, ce qui corrobore les observations antérieures.

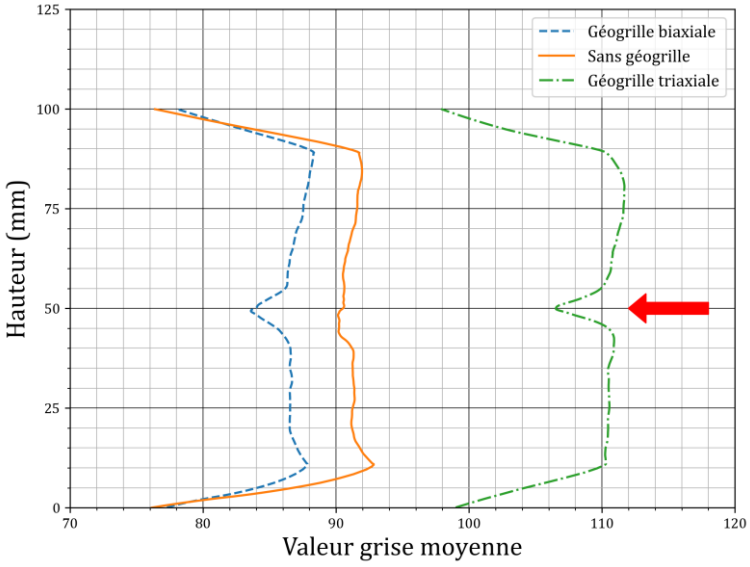


Figure 3.34. Evolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale le long de la hauteur scannée de l'échantillon au repos.

L'analyse se poursuit ensuite en comparant les images de la même configuration à l'état initial et sous un chargement vertical de 100 kPa. Les scans ont été réalisés en conservant la même position initiale et le même trajet de translation afin de couvrir intégralement la zone contenant la géogrille. Cette position initiale a été définie de manière à placer la géogrille exactement à mi-hauteur du champ de scan, comme le montre la Figure 3.34, ce qui garantit la comparabilité entre les états initial et chargé. Cependant, un tassement est attendu sous chargement, ce qui implique que la géogrille puisse se déplacer verticalement. Pour localiser précisément sa nouvelle position,

le profil de valeur moyenne de gris a été tracé (Figure 3.35), révélant un déplacement des géogrilles apparent d'environ 3 mm vers le bas par rapport à la mi-hauteur initiale.

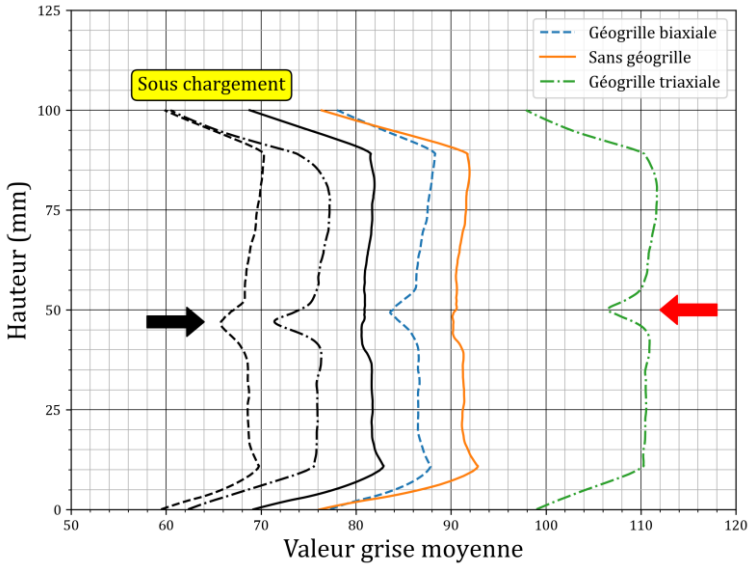


Figure 3.35. Comparaison de l'évolution de la valeur moyenne des niveaux de gris par tranche horizontale entre l'état au repos et l'état sous chargement à 100 kPa.

Toutefois, l'observation d'un déplacement similaire dans toutes les sections observées — y compris celle sans géogrille et dans les zones non directement sollicitées — interroge la validité de cette mesure. Une vérification a été effectuée en comparant la position d'un repère fixe (par exemple un grain facilement identifiable ou un coin de l'échantillon, visibles dans le cercle pointillé pour le cas sans géogrille, ou dans le cadre/triangle pointillé de la Figure 3.36) entre les deux états. Ces comparaisons montrent un déplacement vertical global du volume scanné, suggérant un artefact lié au positionnement du scan plutôt qu'un tassement réel. Le scénario le plus probable est donc un décalage vertical systématique du volume reconstruit, principalement induit par le léger mouvement de la plaque de support, suspendue via des câbles, au moment de l'application de la charge (Figure 3.26). D'autres sources possibles incluent une mauvaise initialisation de la position de scan, une imprécision dans le repositionnement de l'échantillon, ou un décalage introduit lors du post-traitement ou de la reconstruction tomographique. Une légère erreur dans la consigne de position peut en effet induire une fausse impression de tassement généralisé, même en l'absence de sollicitation mécanique.

Les coupes horizontales sont donc présentées au même niveau que dans l'état initial pour assurer une comparaison cohérente (Figure 3.36). En l'absence de géogrille, la structure granulaire reste globalement rigide, avec des déplacements négligeables visibles à l'œil nu (cercle en pointillé). En revanche, en présence de la géogrille biaxiale, bien que son orientation globale reste inchangée, des déformations locales apparaissent aux niveaux des nervures de la géogrille, sous forme de flexion ou d'inclinaison. Le cadre pointillé autour de l'ouverture n°2 (géogrille biaxiale) illustre que cette ouverture reste quasiment intacte, les grains qui l'occupent initialement étant toujours en place. Un comportement similaire est observé pour les ouvertures n° 1 à 4, indiquant une bonne imbrication des grains dans les ouvertures, peu perturbée par ce niveau de chargement. Néanmoins, des déformations localisées sont visibles sur les nervures, notamment à proximité des bords du domaine d'étude, là où le confinement est plus faible. En l'absence de grains suffisamment denses pour maintenir les nervures, leur mobilité relative s'accroît, facilitant leur flexion.

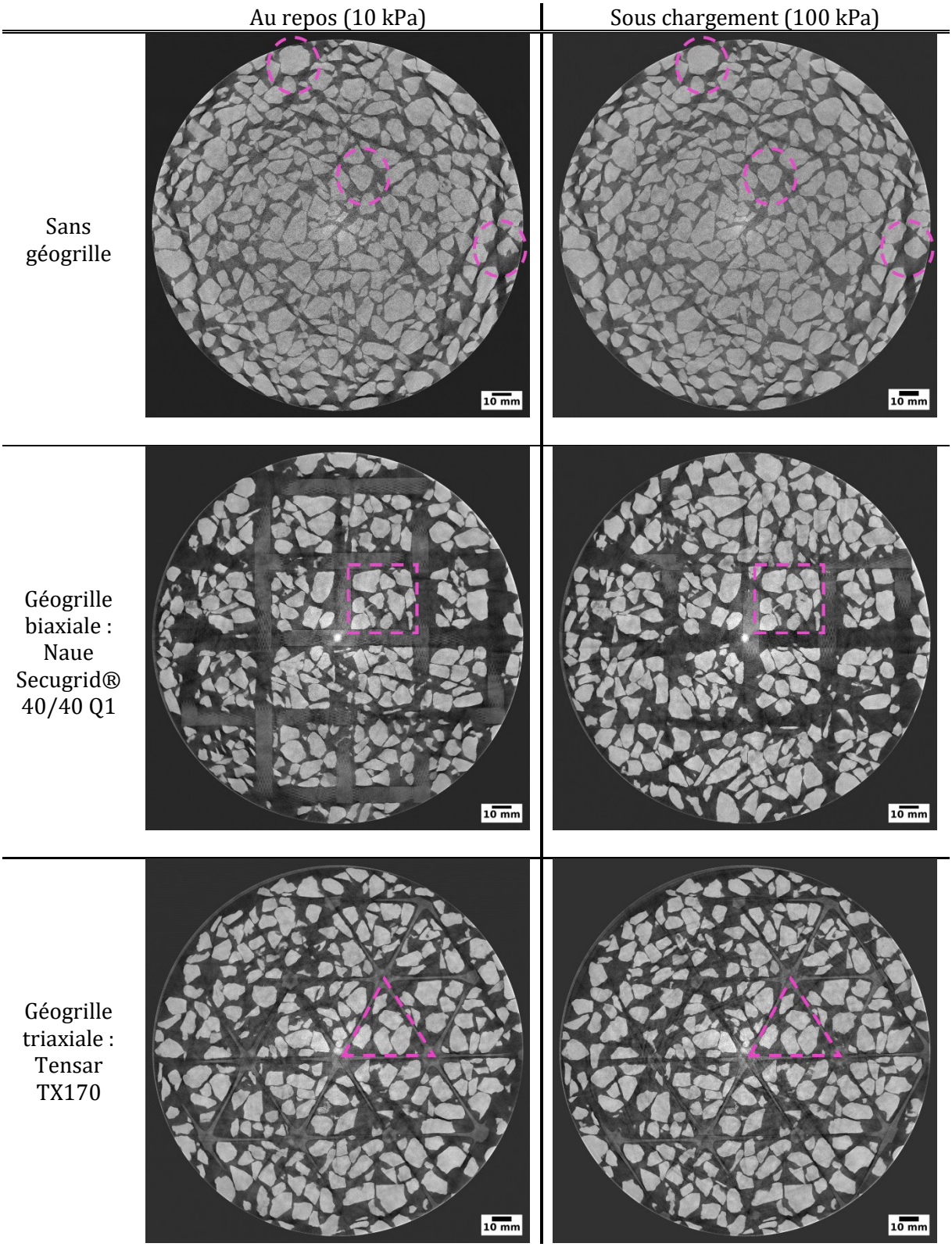


Figure 3.36. Comparaison visuelle des coupes horizontales en niveaux de gris pour les configurations sans géogrille, avec géogrille biaxiale et triaxiale, à l'état au repos (10 kPa) et sous chargement de (100 kPa).

A titre de comparaison, la géogrille triaxiale, bien que placée plus proche de la zone d'application de la charge verticale, présente un verrouillage granulaire plus homogène. La plupart des grains conservent leur position initiale, avec seulement de légers déplacements en périphérie. Les nervures de la géogrille triaxiale montrent très peu de déformation. Ce comportement peut

s'expliquer par leur géométrie plus fine (environ 2 mm), soit quatre fois plus étroites que celles de la géogrille biaxiale (8 mm), une largeur proche du diamètre moyen des grains. Cette finesse favorise une meilleure insertion des grains dans les ouvertures, limitant ainsi leur mobilité. À l'inverse, la largeur plus importante des nervures de la géogrille biaxiale tend à favoriser le repos des grains sur les nervures elles-mêmes, facilitant leur glissement vertical plutôt que leur verrouillage dans les ouvertures (Figure 3.33). Cela expliquerait la stabilité accrue observée avec la géogrille triaxiale.

3.4 Conclusion générale

Ce chapitre a présenté la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour caractériser le comportement mécanique et les interactions à l'échelle granulaire dans les matériaux renforcés par géogrille.

Les essais triaxiaux ont permis de mettre en évidence l'effet du renforcement sur la réponse mécanique globale du matériau. Les échantillons non renforcés, ont permis d'estimer un angle de frottement effectif cohérent avec les valeurs classiques des matériaux granulaires secs, ainsi qu'un angle de dilatance modéré, caractéristiques des agrégats denses à grains anguleux.

Il a été observé que la rigidité initiale est améliorée par le renforcement, surtout dans les conditions de faible ou d'absence de confinement. À confinement élevé, les effets du renforcement se manifestent à des déformations plus importantes, traduisant une mobilisation progressive de la géogrille. Ensuite, la présence de la géogrille augmente la résistance globale (presque le double) et modifie le mode de rupture, avec une localisation préférentielle des déformations dans les zones proches des plateaux de chargement, contrairement aux bandes de cisaillement continues dans les échantillons non renforcés. Le renforcement tend à réduire la dilatance du matériau, suggérant un effet de confinement additionnel dû à l'action mécanique de la géogrille sur les déplacements latéraux des grains. Ces résultats offrent une compréhension approfondie du rôle du renforcement sur la rigidité, la résistance et la déformabilité volumique des sols granulaires sous différents états de confinement.

Deux campagnes de tomographie aux rayons X ont complété cette approche. La première, menée à 3SR (Grenoble) sur de petits échantillons. La seconde, réalisée au µ-VIS (Southampton), visait des échantillons plus grands dans des conditions plus représentative d'interaction grains-géogrille.

L'analyse tomographique des images brutes, quant à elle, met en évidence l'impact direct de la géogrille sur la micro-structure granulaire, notamment au niveau des ouvertures. Les profils de niveaux de gris révèlent une chute marquée au droit des ouvertures, traduisant la moindre densité de matière en ces zones — donc une porosité accrue — dans une zone estimée à ±5 mm de part et d'autre des nervures, soit environ 0,5 D_{50}. Cette valeur reste inférieure à la marge observée dans la littérature. Par ailleurs, les observations qualitatives montrent une bonne conservation de l'imbrication granulaire sous faible chargement. Ces résultats illustrent l'importance de la forme des ouvertures et de la géométrie des nervures sur la capacité de blockage (interlocking) du matériau.

Toutefois, les deux campagnes sur des échantillons de taille différente mettent également en lumière deux types de limitations techniques. D'une part, la nature du matériau constituant la géogrille, faiblement absorbant aux rayons X, complique fortement son identification dans les volumes reconstruits, indépendamment de la résolution utilisée même si elle est élevée. D'autre part, les méthodes de traitement d'image actuellement explorées nécessitent donc des ajustements spécifiques et un temps de traitement considérable. Ces défis soulignent la nécessité

d'optimiser les processus pour les futures analyses, en vue d'une quantification plus fine de la déformation locale des géosynthétiques dans les milieux granulaires. Néanmoins, les résultats obtenus constituent une avancée significative pour la validation du modèle numérique développé. Une analyse quantitative plus poussée de la déformation locale n'a pu être menée que pour un seul cas test, présenté en section 5.3.3. Ce cas a été retenu pour servir d'étape de validation du modèle numérique, par comparaison directe entre l'état initial simulé et les données tomographiques.

En conclusion, l'ensemble des données expérimentales obtenues dans ce chapitre constitue une base solide pour la compréhension des mécanismes de renforcement et servira de fondement à l'analyse numérique développée dans le chapitre 5. L'ensemble des images collectées, bien que partiellement exploitables à ce stade, constitue une base précieuse pour des analyses futures plus approfondies, notamment dans la perspective d'un développement ultérieur du projet de thèse. Une fois les limitations techniques levées, ces données permettront de construire un cadre robuste pour l'analyse multi-échelle des mécanismes de renforcement des sols granulaires par géogrille.

4 Méthodologie numérique

La modélisation numérique d'un matériau granulaire renforcé par géogrille présente une double complexité liée à la nature même des constituants : le sol, constitué de particules discrètes interagissant par frottement et imbrication, et le géosynthétique, de nature continue et déformable. Ces différences fondamentales nécessitent de recourir à des stratégies spécifiques pour représenter fidèlement leur comportement respectif ainsi que leurs interactions.

Dans un premier temps, ce chapitre rappelle les principes de modélisation d'un sol granulaire en tant que milieu discontinu et d'un géosynthétique en tant qu'élément continu, avant de discuter les méthodes numériques existantes et de justifier le choix de la méthode des éléments discrets (DEM) comme cadre de simulation retenu dans cette thèse. L'outil de calcul YADE, développé pour la DEM et permettant une grande flexibilité dans la représentation des matériaux granulaires et des structures associées, est ensuite introduit. Les principaux outils disponibles pour décrire les contacts, calculer les forces d'interaction et suivre les mouvements des particules sont présentés, en mettant en avant leur pertinence pour l'étude du renforcement par géogrille. Enfin, les développements numériques spécifiques réalisés dans ce travail sont exposés. Ils concernent (i) la représentation géométrique et mécanique des particules de sol, (ii) la modélisation de la géogrille en tant que réseau de nœuds et de liaisons, et (iii) la génération et la préparation des échantillons numériques destinés aux simulations. Ces développements constituent la base méthodologique sur laquelle s'appuieront les analyses présentées dans les chapitres suivants.

4.1 Méthode de modélisation

L'interaction sol-renforcement est complexe et joue un rôle déterminant sur le comportement mécanique de la couche renforcée et par conséquent dans la performance globale de la structure, notamment dans des conditions de chargement cyclique (charge/décharge). Cette complexité nécessite l'utilisation de modèles numériques spécifiques capables de prendre en compte la nature granulaire du sol (discontinue) ainsi que les mécanismes de son interaction avec le renforcement.

Dans la pratique, aucun modèle numérique n'est capable de décrire avec précision le comportement complexe des sols, compte tenu des difficultés rencontrées pour reproduire fidèlement l'arrangement complexe des particules. Néanmoins, l'utilisation de modèles capables d'intégrer les caractéristiques principales des matériaux granulaires pour un problème spécifique donné peut conduire à des comportements plus réalistes.

4.1.1 Nature discontinue d'un sol granulaire

Les sols granulaires présentent une nature discontinue, caractérisée par des interactions complexes entre les particules individuelles. Ces interactions, qui font intervenir les forces de contact, le frottement et l'imbrication, jouent un rôle essentiel dans la définition du comportement mécanique du sol.

Au cours des dernières décennies, les méthodes numériques continues, telles que la méthode des éléments finis (FEM), ont démontré leur efficacité dans la modélisation de l'interaction sol-structure à l'échelle macroscopique. Elles ne permettent cependant pas de modéliser correctement l'interaction à l'échelle des particules et ne sont pas appropriées pour prendre en compte les comportements localisés au niveau des contacts ou des discontinuités qui influencent le comportement global (réarrangements granulaires, ruptures, mécanismes d'interaction microscopique à l'interface sol-géogrille, etc.). D'autre part, la méthode des éléments discrets (DEM) s'est avérée particulièrement efficace pour modéliser le comportement des sols

granulaires à l'échelle microscopique. En représentant les sols comme un assemblage de particules individuelles, elle permet d'analyser en détail des phénomènes tels que les mouvements en translation et en rotation des particules, le compactage, le foisonnement, le cisaillement et les transferts de charge. Cependant, cette approche présente des limites lorsqu'il s'agit de modéliser des éléments structurels, car la discrétisation classique en particules élémentaires ne permet pas de reproduire fidèlement leur comportement continu.

4.1.2 Nature continue des géosynthétiques

La modélisation des géosynthétiques de renforcement est un enjeu car leur comportement est lié à leur configuration tridimensionnelle, qui n'est pas simple à reproduire numériquement. Ainsi, des simplifications peuvent impliquer une réponse mécanique moins réaliste de la structure renforcée. Pour analyser le problème de l'interaction entre les particules de sol et les géosynthétiques, deux méthodes de modélisation sont principalement utilisées dans la littérature.

Une de ces méthodes consiste à coupler la DEM à la FEM (Villard et al., 2009; Tran et al., 2013). Dans ce cadre, le géosynthétique est modélisé comme un solide continu discrétisé par des éléments finis, tandis que le matériau granulaire est modélisé par des éléments discrets. Des lois de contact spécifiques sont introduites entre les éléments DEM et FEM pour reproduire le comportement d'interface.

L'autre approche est purement discrète, où le géosynthétique est modélisé soit par un ensemble de particules sphériques (ou circulaires en 2D) liées entre elles (Chareyre & Villard, 2002; Chen et al., 2014, 2018), soit par des éléments cylindriques interconnectés par des nœuds (Effeindzourou et al., 2016; Moravia, 2020). Dans ce dernier cas, les connexions cylindriques peuvent être représentées seules ou recouvertes par des faces planes, afin de générer tout type de renforcement (nappe géosynthétique plane, géogrille de forme quelconque).

La principale différence entre ces deux approches réside dans la définition de l'interface entre le sol et le géosynthétique, qui est localement rugueuse dans le premier cas et plane dans le second (Figure 4.1).

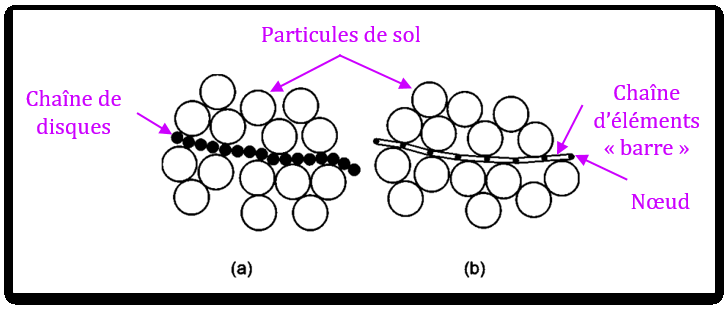


Figure 4.1 : Deux concepts différents pour modéliser les systèmes sol-inclusion avec le DEM : (a) chaîne de disques (b) chaîne d'éléments « barre » articulés entre eux par des nœuds ; les disques représentent les particules du sol (extrait de Chareyre et Villard (2005)).

L'utilisation de sphères jointives pour modéliser le renforcement a été proposé par Chareyre et Villard (2002, 2005), qui ont étudié le comportement de nappes géosynthétiques ancrées dans des tranchées par le biais d'essais d'arrachement réalisés en DEM bidimensionnel. Ils ont indiqué que cette alternative présentait deux limitations importantes. La première concerne la rugosité numérique formée à la surface des éléments géosynthétiques par les disques qui les composent (Figure 4.2). La seconde est liée au comportement en extension du géosynthétique, pour lequel une déformation axiale importante peut créer des vides significatifs entre les disques en contact et modifier les mécanismes d'interaction et la rugosité d'interface.

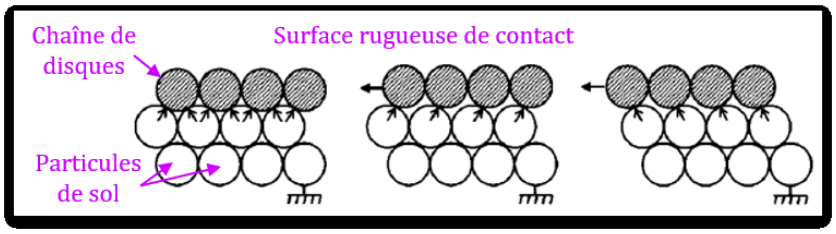


Figure 4.2. Principe de l'évolution périodique des contacts à l'interface sol-inclusion (extrait de Chareyre et Villard (2005)).

L'utilisation d'éléments continus interconnectés a été initialement introduit par Chareyre et Villard (2005) pour représenter le renforcement via un ensemble d'éléments « barre » connectés par des nœuds en 2D (Figure 4.1.b). Par la suite, une extension tridimensionnelle de cette technique a été développée par Bourrier et al. (2013) pour modéliser les sols enracinés à l'aide de cylindres flexibles juxtaposés. Une autre extension a été réalisée par Eiffendzourou et al. (2016) où de nouveaux éléments ont été développés pour modéliser des objets déformables de géométrie quelconque, tels que des grilles, des membranes et des sphères creuses.

Basé sur ces différentes méthodes et types de modélisations des géosynthétiques présentés ci-dessus, il est clair que grâce à cette dernière approche numérique décrite par Effeindzourou et al. (2016), il est possible de capturer la nature continue des éléments qui composent la géogrille sans avoir explicitement à gérer, excepté par la définition d'un paramètre de frottement approprié, le problème de la rugosité de l'interface.

4.1.3 Méthode numérique retenue pour la thèse

L'un des objectifs du travail de thèse est de développer une étude numérique permettant de reproduire un comportement réaliste de l'interaction entre un matériau granulaire et une géogrille. La DEM semble fournir la précision nécessaire pour analyser les interactions micromécaniques entre les particules de sol et les nervures de la géogrille, tout en maintenant une certaine efficacité et soutenabilité en temps des calculs. Ainsi, la modélisation tridimensionnelle retenue est réalisée avec le logiciel open source YADE. Ce choix garantit un cadre robuste pour analyser l'influence de la géométrie des particules et des propriétés de la géogrille sur la performance globale et les mécanismes d'interface des sols renforcés.

4.2 YADE – Définition

YADE est l'abréviation de « Yet Another Dynamic Engine ». C'est un outil évolutif dédié à la modélisation discrète dans différents domaines de la science. Il est développé en 2004 dans le laboratoire 3SR à Grenoble, France Chareyre, 2015 sur la base du logiciel SDEC développé par Frédéric Donzé (Kozicki et Donze, 2008) à la fin des années 1990.

Le code source est écrit en C++ en utilisant un modèle objet (classes et objets) flexible qui permet l'implémentation indépendante de nouveaux algorithmes et interfaces. En complément, le langage de programmation Python, qui possède un large ensemble de ressources mathématiques et graphiques, a été intégré dans Yade. Il permet le développement de scripts spécifiques dédiés au contrôle des simulations, au processus de débogage, et au post-traitement des résultats de simulation.

Il s'agit d'un outil polyvalent et puissant pour les chercheurs et les ingénieurs dans les domaines de la géotechnique, du génie civil et de l'ingénierie des matériaux. Il ne se limite pas aux problèmes mécaniques et prend en charge les simulations multi-physiques, y compris les interactions thermiques, fluidiques et électromécaniques. Il est basé sur la méthode des éléments discrets. Chaque particule peut interagir avec ses voisines grâce à des lois de contact spécifiques, ce qui

permet de simuler des comportements complexes à une micro-échelle. De fait, le logiciel comprend des algorithmes robustes pour détecter et gérer les contacts entre les particules.

Son architecture est très modulaire, ce qui permet aux utilisateurs d'étendre ses capacités en mettant en œuvre des modèles et des algorithmes personnalisés. Des scripts Python sont utilisés pour le contrôle du modèle, ce qui offre une grande flexibilité dans la définition et la modification des paramètres de simulation.

La flexibilité et la puissance de YADE en font un outil bien adapté à la modélisation par éléments discrets en géomécanique et dans les domaines associés. Ses capacités à simuler les interactions entre particules et les processus multi-physiques en font par conséquent une base solide pour l'étude numérique des interactions entre matériaux granulaires et géogrilles dans des conditions de chargement complexes.

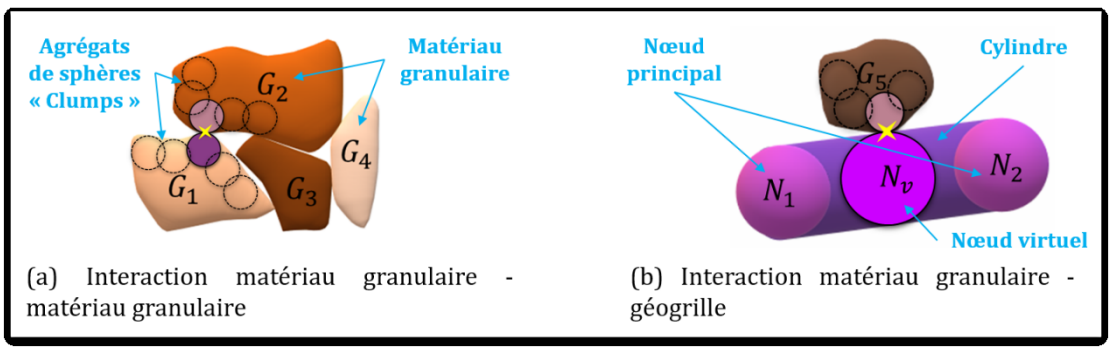
4.3 Simulations dans YADE

La modélisation numérique des matériaux granulaires en interaction avec une géogrille est un processus à multiples facettes qui nécessite une attention rigoureuse. Pour simuler avec précision ces interactions complexes au niveau des particules, une approche détaillée et systématique est nécessaire dans le cadre de YADE. Cette section décrit les principales étapes méthodologiques employées dans l'étude en lien direct avec la modélisation des particules de sol et de la géogrille et de leur interaction. Les informations nécessaires à la compréhension du fonctionnement de YADE sont données en Annexe A.1 : Structure et méthodologie, Pas de temps critique, Amortissement numérique, et Détection des collisions.

4.3.1 Interaction entre les particules de sol et la géogrille

Dans les modèles numériques utilisant la méthode des éléments discrets (DEM), les interactions entre les éléments sont fondamentales pour le comportement du modèle. Dans YADE, chaque cycle de simulation implique une série d'étapes pour gérer ces interactions. Lorsqu'une nouvelle interaction se produit, le modèle détecte d'abord les collisions entre les éléments, puis établit l'interaction et définit ses propriétés en fonction des paramètres des éléments impliqués. Pour les interactions déjà existantes, le modèle analyse les déplacements et les interpénétrations entre particules, calcule les forces d'interaction en fonction de ces déplacements, puis applique ces forces pour déterminer le mouvement des éléments.

Le matériau granulaire est représenté par des agrégats de sphères rigides, appelés « Clumps », tandis que les nervures de la géogrille sont modélisées comme des nœuds « gridNodes » interconnectés par des éléments cylindriques « gridConnections » (Figure 4.3). Le raisonnement qui motive cette représentation est détaillé dans la section 4.4.



(a) Interaction matériau granulaire - matériau granulaire

(b) Interaction matériau granulaire - géogrille

Figure 4.3. Représentation géométrique des éléments modélisés et des types d'interaction.

Compte tenu de ces représentations, les interactions au sein du matériau granulaire se produisent par le biais de contacts sphère-sphère entre les clumps (Figure 4.3.a). De même, l'interaction entre la géogrille et le matériau granulaire est établie exclusivement par le biais des éléments cylindriques (Figure 4.3.b). Cette interaction est modélisée en définissant une sphère virtuelle (ou nœud virtuel) à l'intérieur du cylindre. Le diamètre de cette sphère virtuelle correspond à l'épaisseur du cylindre et son centre est positionné à la projection du point de contact sur le plan passant par les nœuds principaux du cylindre. Par conséquent, le type général d'interaction régissant le système est le contact sphère-sphère.

Dans YADE, une interaction typique (Figure 4.4) est caractérisée par la rigidité normale (K_n), la rigidité de cisaillement ou tangentielle (K_t) et l'angle de frottement inter-particule (ϕ_{int}). Ces propriétés sont calculées pour chaque nouvelle interaction à l'aide du module « yade.wrapper.IPhysFunctor() » qui prend en compte les types de matériaux des deux particules en interaction.

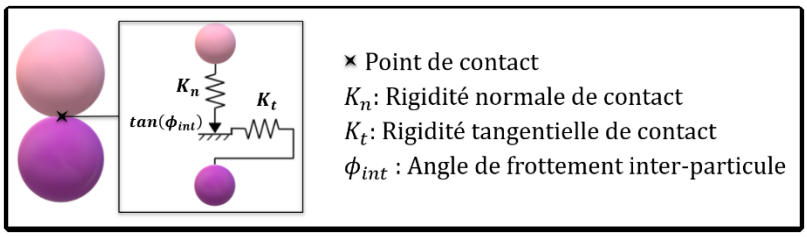


Figure 4.4. Représentation simplifiée du contact entre deux sphères.

YADE utilise généralement un modèle de contact à ressort pour calculer la rigidité normale de l'interaction. Ce modèle traite l'interaction comme deux ressorts en série, avec des longueurs correspondant aux rayons des sphères impliquées (Figure 4.5). Cette approche permet d'établir une relation entre les tailles et les modules d'élasticité de contact des éléments en interaction et la rigidité normale du contact.

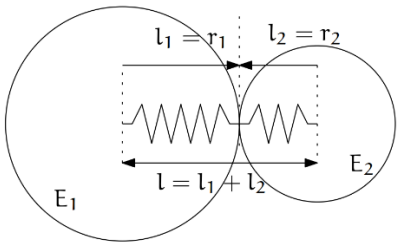


Figure 4.5. Représentation de la rigidité normale dans l'interaction entre deux sphères de (Smilauer et al., 2021).

Par exemple, lorsque deux sphères rigides entrent en contact, la force de contact (F_n) agissant sur chaque élément (c'est-à-dire F_{n1} et F_{n2}) est calculée en multipliant la rigidité normale de contact par la somme des interpénétrations des sphères (c'est-à-dire ΔL_1 et ΔL_2), qui est proportionnelle à leurs compliances :

$$F_n = F_{n1} = F_{n2} = K_n(\Delta L_1 + \Delta L_2) \tag{10}$$

La rigidité de chaque sphère est associée à ses propriétés mécaniques, ce qui permet d'exprimer la rigidité normale dans l'équation (10) en fonction des modules de contact E_i et des longueurs associées aux rayons des sphères $\widetilde{l_i}$ avec $i \in \{1, 2\}$ (équation (11)). La formulation complète de cette équation est détaillée dans Smilauer et al. (2021).

$$K_n = \frac{E_1\widetilde{l_1} \cdot E_2\widetilde{l_2}}{E_1\widetilde{l_1} + E_2\widetilde{l_2}} \tag{11}$$

Dans YADE, plusieurs classes sont disponibles pour calculer les propriétés d'interaction. En ce qui concerne les matériaux frictionnels, la classe la plus utilisée pour calculer les propriétés d'interaction est « Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys() ». Elle considère les longueurs $\widetilde{l_i}$ égales aux diamètres respectifs des sphères, c'est-à-dire $\widetilde{l_i} = 2 \cdot r_i$ avec r_i le rayon de chaque sphère et $i \in \{1, 2\}$. La formule de la rigidité de contact utilisée dans cette étude s'écrit par conséquent (équation (12)) :

$$K_n = 2\frac{E_1 r_1 \cdot E_2 r_2}{E_1 r_1 + E_2 r_2} \tag{12}$$

La rigidité de cisaillement ou tangentielle du contact est directement liée à la rigidité normale par un coefficient ν_i défini comme le rapport de ces deux rigidités (Equation (13)). Considérant deux éléments en contact du même matériau ($\nu_1 = \nu_2 = \nu$), la formule sera réduite comme présenté dans l'équation (14).

$$K_t = 2\frac{E_1 r_1 \nu_1 \cdot E_2 r_2 \nu_2}{E_1 r_1 \nu_1 + E_2 r_2 \nu_2} \tag{13}$$

$$K_t = \nu \cdot K_n \tag{14}$$

En ce qui concerne les paramètres d'interaction non élastiques, ils sont généralement définis par les valeurs moyennes des propriétés matérielles des éléments concernés, à l'exception de l'angle de frottement interne, qui est fixé à la valeur minimale trouvée entre les éléments en interaction $\phi_{int} = \min(\phi_{int_1}, \phi_{int_2})$.

Parallèlement, la géogrille est représentée comme un réseau de nœuds connectés par des éléments cylindriques de comportement cohésif-frictionnel. Ceci est essentiel pour assurer la continuité entre les éléments connectés et pour modéliser de manière réaliste les conditions de rupture. Le comportement mécanique interne de la géogrille est régi par les interactions entre les nœuds et contrôlé par la classe « Ip2_CohFrictMat_CohFrictMat_CohFrictPhys() ». Ainsi, le comportement de chaque élément cylindrique dépend directement du comportement mécanique de ses deux nœuds connectés. Cette approche de modélisation permet de simuler des éléments dont le comportement est élastique-plastique parfait (Effeindzourou et al., 2016). Il convient donc de noter que, contrairement aux contacts particule-particule ou particule-géogrille où les rigidités sont définies directement en termes de lois de contact, la rigidité des éléments cylindriques est dérivée de la théorie des poutres continues. Par conséquent, la rigidité normale k_N, la rigidité de cisaillement k_T et la rigidité de flexion k_R sont corrélées aux propriétés mécaniques et géométriques des cylindres à l'aide des équations suivantes (15), (16), et (17) :

$$k_N = \frac{E \cdot A}{L} = \frac{E \cdot (\pi \cdot R^2)}{L} \tag{15}$$

$$k_T = 12\frac{E \cdot I}{L^3} = 12\frac{E \cdot \left(\frac{\pi \cdot R^4}{4}\right)}{L^3} \tag{16}$$

$$k_R = \frac{E \cdot I}{L} = \frac{E \cdot \left(\frac{\pi \cdot R^4}{4}\right)}{L} \tag{17}$$

Où E est le module d'Young du matériau du cylindre, A est la section transversale du cylindre, R est son rayon, L est sa longueur et I est le moment d'inertie.

Enfin, il est important de souligner que le comportement mécanique global d'un milieu dépend intrinsèquement de l'ensemble des propriétés - tant géométriques (longueur et rayon) que mécaniques (module de contact pour le matériau granulaire et module de Young pour la géogrille) - des éléments constitutifs. L'attribution et le contrôle précis de ces propriétés sont donc essentiels pour obtenir des simulations réalistes. YADE permet à l'utilisateur de définir explicitement les lois de contact et les paramètres associés pour chaque interaction par la syntaxe « O.interactions[id1,id2].phys.Variable = Valeur donnée, avec id1 et id2 les identités des éléments en contact» où « Variable » pour l'un des éléments suivants : {kn, ks, kr, tangensOfFrictionAngle}. Cependant, il est crucial de s'assurer que ces paramètres sont appliqués à tous les contacts, qu'ils soient préexistants ou nouvellement formés au cours de la simulation. S'il n'est pas explicitement mis à jour, YADE attribuera automatiquement des valeurs par défaut en utilisant le module « yade.wrapper.IPhysFunctor() », ce qui pourrait conduire à un comportement mécanique incohérent. Ainsi, le maintien d'une affectation cohérente des propriétés tout au long du processus de simulation est une exigence fondamentale pour la fidélité du modèle.

4.3.2 Calculs des forces de contact et mouvements entre particules

YADE calcule les forces aux contacts des particules en utilisant des modèles constitutifs définis par l'utilisateur. Ces lois de contact déterminent les forces normales et tangentielles en fonction du chevauchement entre les particules et des propriétés du matériau. La loi de contact linéaire-élastique parfaitement plastique classique de Cundall et Strack (1979) est largement utilisée pour les matériaux granulaires. Cette loi incorpore un paramètre de rigidité pour modéliser la déformation élastique et un coefficient de frottement de Coulomb pour simuler la résistance au glissement « Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack() ».

Les forces de contact entre deux éléments sont déterminées à partir des déplacements relatifs (u_n et u_t), obtenus en intégrant les composantes de la vitesse relative ($\dot{u}_n$ et $\dot{u}_t$), calculées à partir des points de référence de chaque élément, par rapport au temps. Les variations des forces normales dF_n et tangentielles dF_t peuvent être exprimées comme suit :

$$dF_n = K_n \cdot \dot{u}_n \cdot dt \tag{18}$$

$$dF_t = K_t \cdot \dot{u}_t \cdot dt \tag{19}$$

À chaque pas de temps (dt), les forces normales et tangentielles sont mises à jour en ajoutant respectivement les incréments de force définis par les équations (18) et (19) aux forces calculées au pas de temps précédent. Pour la force tangentielle, un seuil est appliqué sur la base d'une loi de frottement de type Coulomb sans cohésion, en utilisant l'angle de frottement inter-particule « ϕ_{int} » (équation (20)). Si la valeur absolue de F_t dépasse le seuil, l'intensité de la force tangentielle est limitée à ${F_t}^{lim}$.

$${F_t}^{lim} = \|F_n\| \cdot \tan(\phi_{int}) \tag{20}$$

Les forces externes et internes au sein des éléments cylindriques représentant les nervures de la géogrille sont régies par la loi constitutive implémentée dans la classe « Law2_ScGeom6D_CohFrictPhys_CohesionMoment() ». Cette loi étend la formulation de contact classique définie par « Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack() » y incluant à la fois de l'adhésion et des moments de flexion. Comme décrit précédemment, l'interaction externe entre le matériau granulaire et la géogrille est établie via des nœuds virtuels intégrés dans les nervures cylindriques. La force de contact calculée au niveau de la sphère virtuelle est ensuite redistribuée aux nœuds physiques à chaque extrémité du cylindre par le biais de fonctions de pondération. Les efforts internes à l'intérieur des nervures de la géogrille, c'est-à-dire la force normale F_n, la force de cisaillement F_t et le moment de flexion M_r (équation (21)), sont calculées selon des lois élastiques

linéaires sur la base des déplacements relatifs (u_n et u_t) et de la rotation relative (Ω_r) entre les deux nœuds définissant le cylindre.

$$M_r = k_r \cdot \Omega_r \tag{21}$$

Pour introduire la rupture et la plasticité des éléments, le modèle définit des limites élastiques pour les efforts internes (équations (22) et (23)) par le biais de valeurs d'adhésion, correspondant aux forces maximales admissibles normales (a_n) et de cisaillement (a_t). De plus, le moment de flexion maximal autorisé (équation (24)) est lié à la résistance maximale à la traction de l'élément σ_n^{max}, son rayon R ainsi que le moment d'inertie I, ce qui garantit un critère de rupture cohérent pour tous les modes de déformation interne.

$$F_n \leq a_n \tag{22}$$

$$F_t \leq a_t \tag{23}$$

$$M_r \leq \frac{4 \cdot \sigma_n^{max} \cdot I}{R} \tag{24}$$

Le choix entre la rupture fragile et la plasticité parfaite est contrôlé par le paramètre booléen « fragile » attribué lors de la définition des propriétés du matériau. Une fois ces limites dépassées, l'interaction cohésive entre les nœuds est irréversiblement rompue (fragile = True). Par conséquent, les valeurs d'adhésion sont fixées à zéro, l'interaction interne disparaît et la connexion ne contribue plus à la réponse mécanique du système, ce qui revient à modéliser un mécanisme de rupture fragile. Il est également possible de modéliser un comportement parfaitement plastique en maintenant les valeurs d'adhésion après que le seuil d'élasticité a été atteint (fragile = False). Dans ce scénario, les forces et les moments internes restent constants au-delà de la limite élastique, simulant ainsi une plasticité idéale.

L'accès à toutes les forces et à tous les moments de contact est fourni par la syntaxe « O.interactions[id1,id2].phys.Variable, avec id1 et id2 les identités des éléments en interaction», où « Variable » pour l'un des éléments suivants : {normalForce, normalAdhesion, shearForce, shearAdhesion, moment_bending, rollingAdhesion}.

Dans les calculs du mouvement, l'intégration Leapfrog est utilisée en raison de son efficacité dans les simulations dynamiques. Ce schéma explicite de pas de temps met à jour les vitesses des particules à des demi-pas de temps ($t + \Delta t/2$) et les positions à des pas de temps plein ($t + \Delta t$), assurant ainsi la stabilité et la conservation de l'énergie. Sa nature symplectique permet de préserver l'énergie sur de longues simulations, à condition que le pas de temps reste en dessous du seuil critique, ce qui le rend particulièrement efficace dans les simulations par la méthode des éléments discrets (DEM) où l'intégration précise du mouvement est essentielle.

Dans YADE, ce processus d'intégration est mis en œuvre par le moteur « yade.wrapper.NewtonIntegrator() ». En utilisant les forces de contact F_i, les équations du mouvement de chaque élément i de masse m_i sont intégrées indépendamment. La nouvelle position de chaque élément au pas de temps suivant est calculée sur la base de son accélération $\ddot{u}_i$ à partir du pas de temps actuel, en considérant les lois du mouvement de Newton, ce qui garantit des mises à jour précises des états des éléments :

$$\ddot{u}_i = F_i / m_i \tag{25}$$

En résumé, le problème est résolu de manière itérative dans le temps par des phases séquentielles : détection des contacts, calcul des forces d'interaction entre les éléments discrets en contact et mise à jour des positions et des vitesses des particules pour le pas de temps suivant.

4.4 Développements numériques spécifiques au sol renforcé par géogrille

Cette section décrit le modèle numérique développé pendant la thèse concernant les formes et géométries des particules de sol simulées et de la géogrille, la procédure de calibration des paramètres mécaniques de la géogrille, la géométrie de l'échantillon, sa procédure de préparation, ainsi que les outils d'analyse mis en place pour l'interprétation des résultats.

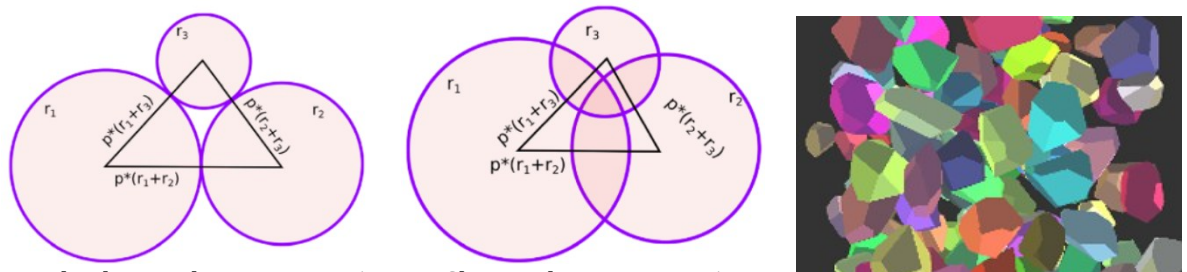
4.4.1 Modélisation des particules de sol

Dans les simulations par la méthode des éléments discrets (DEM), la représentation des particules est cruciale pour comprendre le comportement des matériaux granulaires, en particulier dans le contexte des sols renforcés par des géogrilles. Le choix de la forme des particules, de leur distribution granulométrique et des propriétés des matériaux influence directement la densité du milieu granulaire, la complexité et l'intensité du réseau de forces interparticulaires et, ultimement, les propriétés mécaniques intrinsèques de l'assemblage granulaire. Selon Moravia (2020), les matériaux granulaires composés de particules de forme angulaire ou non convexe ont tendance à présenter une plus grande résistance au cisaillement. Cela s'explique par le fait que ces formes favorisent l'imbrication des particules, ce qui crée des contraintes supplémentaires sur le roulement des particules non convexes, qui contribuent à une augmentation globale de la résistance de l'assemblage granulaire. Cette affirmation s'appuie sur les travaux de (Matsushima et Saomoto, 2002), qui ont observé que des formes de particules plus angulaires ou non convexes entraînent une plus grande résistance au cisaillement dans les matériaux granulaires. Suhr et Six (2020) ont étudié l'influence de la géométrie des particules dans les simulations DEM, en particulier dans le contexte de la modélisation du ballast ferroviaire. Leurs conclusions soulignent l'impact significatif de la forme des particules sur la compacité et la résistance mécanique des matériaux granulaires utilisés dans les applications géotechniques. Ainsi, le choix d'une géométrie appropriée des particules est crucial pour créer des modèles DEM réalistes et précis. Cette section présente les principales considérations relatives à la sélection de la forme des particules, le processus d'analyse de la forme et les techniques de modélisation utilisées pour simuler les matériaux granulaires dans le cadre de cette étude.

4.4.1.1 *Forme des particules*

La modélisation de la forme des particules dans les simulations de DEM a beaucoup évolué depuis ses débuts avec les particules sphériques. Les travaux fondamentaux de Cundall et Strack (1979) ont jeté les bases des modèles discrets en utilisant des éléments sphériques pour représenter les particules granulaires. Cependant, les modèles DEM classiques basés sur des particules sphériques indépendantes ne reproduisent pas avec précision la résistance au cisaillement observée dans les matériaux granulaires du monde réel, notamment lors d'essais triaxiaux sur des sols granulaires (Salot et al., 2009). Ces limitations ont incité les chercheurs à développer des formes de particules plus complexes afin de mieux représenter le comportement mécanique des matériaux granulaires.

Les premières améliorations introduites dans les modèles discrets visaient à mieux reproduire le comportement mécanique des matériaux granulaires en intégrant de manière plus réaliste le comportement de roulement et d'imbrication des grains observé dans les matériaux granulaires réels. Deux approches principales ont été proposées : (1) la définition de géométries non sphériques des particules élémentaires (Cundall, 1988; Lu et McDowell, 2007) et (2) la limitation des rotations des particules via des lois de contact appropriées (Iwashita & Oda, 2000).



Pas de chevauchement : p = 1 Chevauchement : p < 1

(a) (b)

Figure 4.6. Représentation (a) d'un clump formé par trois sphères de rayon ri en fonction du paramètre de chevauchement p (extrait de Suhr et Six, 2020), et (b) d'un ensemble de particules polyédriques.

Une méthode largement utilisée pour modéliser les particules non sphériques consiste à utiliser des assemblages rigides de disques (appelés « Clusters » en 2D) ou de sphères (appelés « Clumps » en 3D) (Figure 4.6.a). Ces clumps sont constitués de plusieurs sphères qui se chevauchent ou non, étant entendu que les clumps qui se chevauchent impliquent des corrections de masse et d'inertie. Au sein d'un même clump, les positions relatives des sphères constitutives restent fixes, ce qui simplifie les calculs mais limite la complexité géométrique des formes de particules qui en résultent. Bien que les clumps soient un outil efficace pour modéliser les matériaux granulaires d'un point de vue informatique - en particulier lorsqu'ils sont composés d'un petit nombre de sphères - ils ne peuvent pas reproduire complètement les arêtes vives ou les caractéristiques angulaires observées dans les vraies particules granulaires. Pour mieux approcher ces formes, des sphères plus petites sont utilisées en plus grande quantité, ce qui augmente considérablement les coûts de calcul. Dans ce cas, les clumps sont conçus pour améliorer la « rugosité de la surface » ou le « frottement géométrique », qui peuvent imiter certains des effets de l'angularité.

Outre les clumps, d'autres représentations de particules ont été explorées dans les simulations DEM, notamment les particules polyédriques, qui sont définies par des faces planes (Figure 4.6.b). Les particules polyédriques offrent une représentation géométrique plus précise des grains anguleux et de forme irrégulière, ce qui les rend particulièrement utiles pour l'étude des matériaux dans lesquels les effets d'imbrication et d'arête jouent un rôle important. Leur capacité à reproduire les arêtes vives et les surfaces planes offre un avantage certain par rapport aux modèles basés sur des sphères pour reproduire des interactions de contact réalistes. Toutefois, cette fidélité géométrique accrue s'accompagne d'un coût de calcul important engendré par la complexité dans la recherche des contacts entre éléments. Dans YADE, il n'y a pas, à l'heure actuelle, de modèle de contact implémenté qui puisse gérer les interactions entre les particules polyédriques et les éléments cylindriques ou plans utilisés pour simuler les géogrilles. Ceci est problématique dans le contexte de cette étude basée sur l'interaction géogrille-grains, où le modèle de contact utilisé pour les particules doit être compatible avec les éléments utilisés pour simuler la structure de la géogrille. L'utilisation de particules polyédriques nécessiterait cependant le développement d'un modèle de contact spécifique, ce qui n'a pas été envisagé dans le cadre de cette étude. Compte tenu de ces contraintes, cette étude utilise des agrégats de sphères qui se chevauchent plutôt que des particules polyédriques, ce qui permet de trouver un équilibre entre l'efficacité des calculs et le réalisme géométrique.

4.4.1.2 *Construction et analyse de la forme des particules*

Comme l'ont mentionné Suhr et Six (2020), l'utilisation de formes simples comme des sphères ou des clumps simples peut conduire à des accords qualitatifs mais pas quantitatifs entre les simulations et les expériences. En revanche, des formes plus complexes, telles que des clumps

avec de multiples sphères qui se chevauchent, peuvent fournir une meilleure représentation des matériaux granulaires réels, améliorant ainsi la précision des simulations.

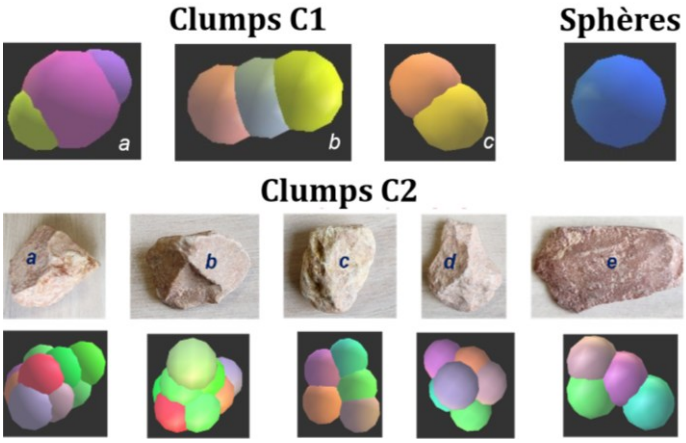


Figure 4.7. Représentation des trois géométries de particules considérées dans cette étude.

Pour comprendre l'effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des sols granulaires renforcés par des géogrilles, trois niveaux de complexité géométrique distinctes de particules ont été introduites dans la modélisation (Figure 4.7) : des assemblages de sphères « S », de clumps simples « C1 » et de clumps complexes « C2 ».

Construction des clumps :

Dans YADE, les clumps sont construits à l'aide de la fonction « yade.utils.clumpTemplate() ». Le processus consiste à définir des modèles de clump constitués de sphères en définissant leurs positions relatives et leurs rayons. Un clump donné est généralement composé de sphères de taille égale r, à l'exception du clump C1a, pour lequel les rapports de taille des sphères sont fixés à $0{,}67r$, r et $0{,}67r$. Pour les clumps C2, les positions relatives des sphères ont été définies pour imiter la géométrie de cinq grains spécifiques issus d'un échantillon granulaire réel.

Le nombre de sphères dans un clump peut varier, ce qui donne lieu à différentes géométries de particules (Figure 4.7). Les clumps simples C1 sont formés de 2 à 3 sphères qui se chevauchent. Ils permettent d'introduire certaines caractéristiques des matériaux non sphériques sans ajouter une complexité de calcul excessive. En revanche, les clumps complexes C2 sont constitués de 4 à 11 sphères qui se chevauchent et ont été conçus pour reproduire certains agrégats réels observés dans l'étude expérimentale. Contrairement aux formes S et C1, directement générées de manière simplifiée, les formes C2 ont été conçues pour mieux représenter les agrégats réels observés expérimentalement. Ces particules ont été développées sur la base de cinq grains distincts notés « a » à « e », choisis pour reproduire les caractéristiques granulaires, selon les paramètres géométriques définis à l'aide du diagramme de Zingg (Section 3.1.1). Les différents échantillons numériques utilisés par la suite sont composés en proportion variable de ces éléments pour conduire à des distributions granulaires relativement uniformes (Tableau 4.1).

L'analyse de la forme des particules implique la caractérisation de la géométrie des particules sur la base de divers descripteurs qui peuvent quantifier des caractéristiques de forme telles que la rondeur, le rapport d'aspect et la sphéricité. Suhr et Six (2020) fournissent une analyse détaillée de la manière dont les descripteurs de forme affectent le comportement du ballast ferroviaire.

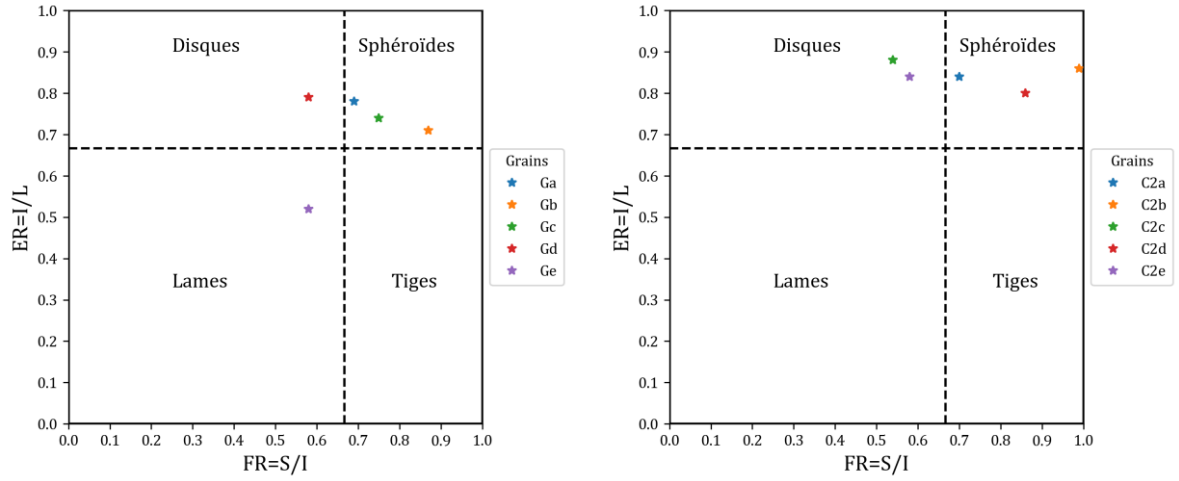
Pour les clumps C2 modélisés dans cette étude, une première validation a été effectuée à l'aide du diagramme de Zingg, comme présenté dans la section 3.1.1. La comparaison entre les agrégats réels et leurs correspondants numériques a montré une concordance satisfaisante, les particules simulées appartenant à la même catégorie de forme (Figure 4.8), à savoir des « Sphéroïdes » et

des « Disques ». Cela confirme que les clumps générés représentent de manière adéquate les morphologies de grains ciblées.

Tableau 4.1. Propriétés de forme des particules simulées et caractéristiques numériques des assemblages numériques de particules.

Grandeur	Sphères S	Clumps C1			Clumps C2				
		C1a	C1b	C1c	C2a	C2b	C2c	C2d	C2e
Nombre de sphères	1	3	3	2	10	11	5	6	4
Proportion dans l'échantillon (%)	100	30	30	40	10	10	25	30	25
Coefficient de rondeur RC	1	0,64	0,75	0,84	0,55	0,57	0,62	0,60	0,67
Porosité n	0,376	0,323			0,339				
Angle de dilatance ψ (°)	14	21			23				
Angle de frottement macroscopique apparent ϕ (°)	30	44			50				

Analyse de la forme des particules :



(a) (b)

Figure 4.8. Classification de Zingg des 5 grains sélectionnés pour les simulations numériques : (a) grains réels et (b) clumps C2 simulés.

Par ailleurs, le coefficient de rondeur « RC » est introduit pour simplifier la comparaison entre les différentes formes. Ce coefficient est défini dans l'équation (26), où R_e est le rayon de la sphère équivalente (volume équivalent à celui du clump) et R_{min} représente le rayon minimum d'une sphère qui enserre le clump.

$$RC = R_{min}/R_e \tag{26}$$

Par définition, RC = 1 pour les sphères parfaites, tandis que pour les clumps 0 < RC < 1 (Tableau 4.1). Cette métrique permet de quantifier et de comparer directement l'écart par rapport à une forme sphérique idéale. Pour les clumps de type C1, les valeurs RC se situent entre 0,64 et 0,84, indiquant une déviation modérée de la sphéricité. En revanche, les clumps de type C2 présentent des valeurs RC comprises entre 0,55 et 0,67, ce qui indique une géométrie plus anguleuse et irrégulière. Par rapport aux matériaux granulaires réels, les graviers naturels présentent

généralement des valeurs RC comprises entre 0,4 et 0,9, en fonction de leur origine géologique (Liu et al., 2021). Les agrégats concassés, souvent utilisés dans les applications de génie civil telles que les voies ferrées ou les couches de base des routes, ont tendance à présenter des valeurs de rondeur plus faibles (typiquement RC < 0,7) en raison de la nature angulaire de leurs particules. Les valeurs RC obtenues pour C1 et C2 sont conformes à celles observées dans les milieux granulaires naturels, ce qui valide la représentativité des particules simulées dans le modèle DEM.

Propriétés mécaniques des particules simulées :

Dans cette étude, les agrégats sont modélisés comme des matériaux purement frictionnels avec des propriétés mécaniques spécifiques, comme le résume le Tableau 4.2. L'implémentation numérique dans YADE est réalisée par le module « yade.wrapper.FrictMat() », qui définit le comportement du matériau. Cette fonction crée un matériau élastique avec frottement de contact, en introduisant des paramètres microscopiques clés tels que la masse volumique, l'angle de frottement de contact inter-particule, le module de contact (appelé également module de Young dans YADE) et le rapport de rigidité K_T/K_N (appelé également coefficient de Poisson dans YADE).

Tableau 4.2. Propriétés mécaniques des agrégats numériques.

Modèle	Paramètre		Valeur	Unité
Agrégats	Matériau « FrictMat »	Masse volumique « density »	2650	kg/m^3
		Module de contact E_c « young »	10^8	N/m^2
		Rapport de rigidité K_T/K_N « poisson »	0,5	-
		Angle de frottement de contact ϕ_{int}	30	°

Ces paramètres régissent les interactions entre les particules dans le cadre de simulation basée sur le modèle de contact élastoplastique linéaire proposé par Cundall et Strack (1979). Ce modèle permet de simuler de manière réaliste le comportement d'un sol granulaire dans différentes conditions de chargement.

Bien que tous les échantillons numériques aient été préparés de manière identique (voir section 4.4.3.2), la porosité initiale varie en fonction de la forme des grains : 0,376 pour les sphères, 0,323 pour les clumps C1 et 0,339 pour les clumps C2 (Tableau 4.1). Cette variabilité est due à l'influence intrinsèque de la géométrie des particules sur l'efficacité du compactage et la formation du réseau de contact, ce qui souligne le rôle de la forme dans la réponse mécanique globale de l'assemblage granulaire.

Le choix de la forme des particules influence de manière significative le comportement mécanique macroscopique du matériau granulaire, en affectant des paramètres tels que l'angle de dilatance « ψ » et l'angle de frottement macroscopique apparent « ϕ » (Tableau 4.1).

L'angle de dilatance ψ décrit la tendance à la variation de volume du matériau au cours de la déformation. Il est calculé sur la base de la déformation volumétrique « ε_v » et de la déformation axiale « ε_1 », soit verticale « ε_z » , à la contrainte maximale (pic de contrainte) lors d'un essai de compression triaxiale réalisé sous une pression de confinement « σ_c » (en suivant la procédure de préparation de l'échantillon détaillée dans la section 4.4.3.2). L'angle de dilatation d'un échantillon de sol soumis à un essai triaxial s'écrit De Borst et Vermeer (1984) :

$$\left.\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right|_{Pic} = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{2\sin\psi}{1-\sin\psi} \Rightarrow \sin\psi = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_v + 2\Delta\varepsilon_1} \quad (27)$$

Où $\Delta\varepsilon_v$ est la variation de la déformation volumétrique et $\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_z$ est la variation de la déformation axiale à la contrainte maximale. L'évolution de ψ donne un aperçu de la contribution de la forme des particules au changement de volume induit par le cisaillement.

Les résultats obtenus à partir des simulations DEM donnent un angle de dilatance de 14° pour les sphères, de 21° pour les clumps C1 et de 23° pour les clumps C2 (pour σ_c = 100 kPa). Les sphères, aptes au roulement et en raison de leur surface lisse, présentent la dilatance la plus faible, tandis que les clumps aux formes plus complexes présentent une résistance accrue au réarrangement, ce qui conduit à des angles de dilatance plus élevés. Dans la pratique, les angles de dilatance des graviers naturels varient généralement entre 10° et 30°, en fonction de la forme des particules, de la densité, et des conditions de contrainte. Les agrégats roulés présentent souvent des angles de dilatance plus faibles (10°-15°), tandis que les agrégats concassés anguleux peuvent présenter des valeurs plus proches de 25°-30°. Les valeurs obtenues suggèrent que les clumps C1 et C2 imitent efficacement le comportement des agrégats naturels anguleux, présentant des caractéristiques de dilatance cohérentes avec les matériaux de granulats concassés utilisés dans les remblais structurels et les applications ferroviaires.

L'angle de frottement macroscopique apparent ϕ représente la résistance globale au cisaillement du matériau granulaire. Il est déterminé à partir du critère de Mohr-Coulomb, qui relie la contrainte de cisaillement « τ » et la contrainte normale « σ » selon l'équation (28) suivante :

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi + c \tag{28}$$

Où c est la cohésion. L'enveloppe de rupture correspond à la droite tangente aux cercles de Mohr obtenus pour différentes conditions de confinement. Dans le cas d'un matériau purement frictionnel sans cohésion, la résistance au cisaillement est alors entièrement gouvernée par l'angle de frottement ϕ, et l'équation de l'enveloppe de rupture se simplifie en une relation linéaire passant par l'origine O (équation (29)):

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi \Rightarrow \tau = \sigma \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \tag{29}$$

Où σ_1 est la contrainte axiale maximale et σ_3 est la contrainte de confinement latérale.

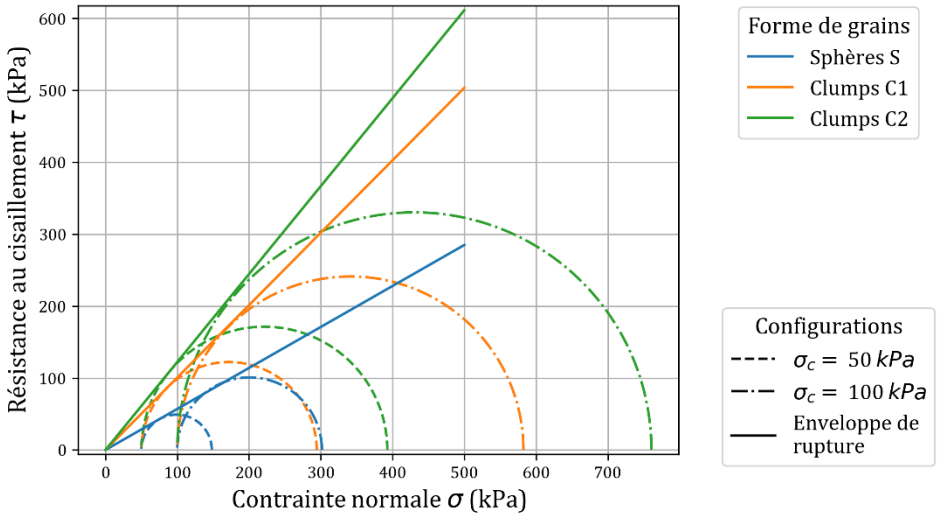


Figure 4.9. Enveloppe de rupture obtenue à l'issue des essais de compression triaxiale des échantillons non renforcés, préparés avec différentes formes de grains (S, C1 et C2) sous deux niveaux de confinement : 50 kPa et 100 kPa.

Les caractéristiques mécaniques des assemblages de sphères et de clumps présentées dans le Tableau 4.1 sont les résultats d'essais triaxiaux de compression menés sous deux contraintes de

confinement différentes : 50 kPa et 100 kPa (Figure 4.9). Les valeurs différences de l'angle de frottement macroscopique ϕ entre les simulations (30° pour les sphères, 44° pour les clumps C1 et 50° pour les clumps C2) sont attribuées aux différentes imbrications et résistances au roulement induites par la forme des particules. Les sphères, dont le potentiel d'imbrication est limité, produisent l'angle de frottement macroscopique apparent le plus faible, qui correspond aux valeurs typiques observées dans les agrégats roulés ($\phi = 28° - 32°$). Les clumps de type C1 et C2, dont l'angularité augmente, présentent des angles de frottement progressivement plus élevés, similaires à celui des agrégats concassés, pour lesquels ϕ varie généralement entre 40° et 55°, principalement en raison des effets d'imbrication et de la rugosité des particules.

4.4.2 Modélisation de la géogrille

Comme indiqué dans la section 4.1.2, différentes méthodes ont été proposées dans la littérature pour modéliser les géosynthétiques et les géogrilles dans le cadre de la DEM. Dans cette étude, une approche simplifiée et efficace en termes de temps de calcul, basée sur la méthodologie proposée par Effeindzourou et al. (2016), a été adoptée pour représenter la géogrille. Cette méthode modélise les nervures de la géogrille comme un réseau de nœuds discrets connectés par des éléments cylindriques (Figure 4.10), capturant efficacement le comportement structurel de la géogrille tout en maintenant la compatibilité avec la nature discrète du milieu granulaire.

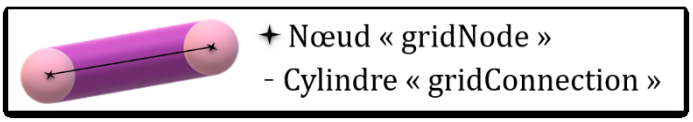


Figure 4.10. Représentation du modèle d'une nervure.

4.4.2.1 *Construction de la géogrille*

La construction de la géogrille commence par la génération de nœuds à l'aide de la fonction « gridNode() », dans laquelle la position spatiale, le rayon et les propriétés matérielles de chaque nœud sont explicitement définis. Ces nœuds servent de points d'ancrage à la structure de la géogrille. Pour assurer la continuité mécanique et permettre la simulation de la rupture ou de la plastification au sein de la géogrille, des interactions cohésives doivent être introduites au niveau des nœuds. Pour ce faire, on affecte à chaque nœud le comportement d'un matériau frictionnel cohésif défini par « yade.wrapper.CohFrictMat() » qui étend le comportement du matériau purement frictionnel en ajoutant de la cohésion et de la résistance à la flexion. Cette amélioration permet de simuler le comportement élastique-plastique et la rupture des éléments de la géogrille par le développement de forces d'adhésion normales et tangentielles et de moments de flexion résistants. Les propriétés des matériaux attribuées aux nœuds sont présentées dans le Tableau 4.3 et sont calibrées pour refléter les caractéristiques mécaniques de la géogrille de référence utilisée dans les expériences (Section 3.1.2). La masse volumique des éléments de la géogrille n'a pas d'impact sur les résultats, car la gravité a peu d'influence pendant la phase de chargement et est fixée arbitrairement à celle des agrégats. Des valeurs de cohésion très élevées sont attribuées pour maintenir la liaison entre les nœuds de la géogrille tout au long de la simulation. Le module d'Young des éléments de la géogrille est choisi à partir d'une calibration visant à reproduire la raideur réelle de la géogrille de référence. L'angle de frottement à l'interface entre les particules du sol et la géogrille est par défaut fixé égal à celui entre les éléments du sol. Toutefois, le module d'Young et l'angle de frottement ont été par la suite modifiés dans le cadre de l'étude paramétrique pour explorer leurs influences respectives sur les résultats.

Il est important de noter que la signification des paramètres du matériau diffère selon la nature de l'interaction. Pour les interactions entre le matériau granulaire et les nervures de la géogrille, « young » fait référence à la rigidité normale du contact, tandis que « poisson » définit le rapport

entre la rigidité tangentielle et la rigidité normale. En revanche, dans la mécanique interne de la géogrille elle-même, c'est-à-dire les connexions nœud à nœud, « young » correspond au véritable module d'Young du matériau de la géogrille. Cette distinction garantit une modélisation précise des interactions de contact externes et du comportement structurel interne de la géogrille dans la simulation DEM.

Tableau 4.3. Propriétés géométriques et mécaniques de la géogrille numérique de référence.

Modèle	Paramètre		Valeur	Unité
Géogrille	Géométrie	Longueur de la nervure	40	mm
		Diamètre de la nervure	8	mm
	Matériau « CohFrictMat »	Masse volumique « density »	2650	kg/m^3
		Module de contact E_c « young »	6.12×10^8	N/m^2
		Rapport de rigidité K_T/K_N « poisson »	0,3	-
		Cohésion normale C_N	∞	N/m^2
		Cohésion tangentielle C_T	∞	N/m^2
		Angle de frottement de contact ϕ_{int}	30	°

Une fois les nœuds créés et stockés dans une liste, les nervures de la géogrille sont construites en connectant les paires de nœuds à l'aide de la fonction « gridConnection() ». Chaque connexion forme un élément cylindrique entre deux nœuds, et sa définition nécessite les identifiants (id) des nœuds connectés, le rayon du cylindre - généralement égal à celui des nœuds - et le matériau associé. La grille qui en résulte préserve la disposition géométrique des ouvertures de la géogrille tout en assurant la cohérence mécanique de la structure (Figure 4.11).

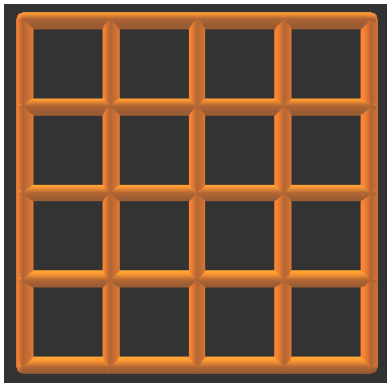


Figure 4.11. Représentation numérique de la géogrille Naue Secugrid® 40/40 Q1 à l'aide de nœuds et de cylindres.

Bien que cette représentation discrète permette de simuler les interactions mécaniques avec le matériau granulaire environnant, elle introduit certaines simplifications géométriques. En particulier, les nervures réelles de la géogrille ont une section rectangulaire plate, alors que les nervures modélisées sont représentées par des cylindres à section circulaire (Figure 4.12). Même si cette différence géométrique ne devrait pas modifier de manière significative les mécanismes d'interaction fondamentaux entre la géogrille et les particules environnantes, un calibrage est nécessaire pour s'assurer que la géogrille simulée présente un comportement mécanique macroscopique équivalent à celui du produit réel.

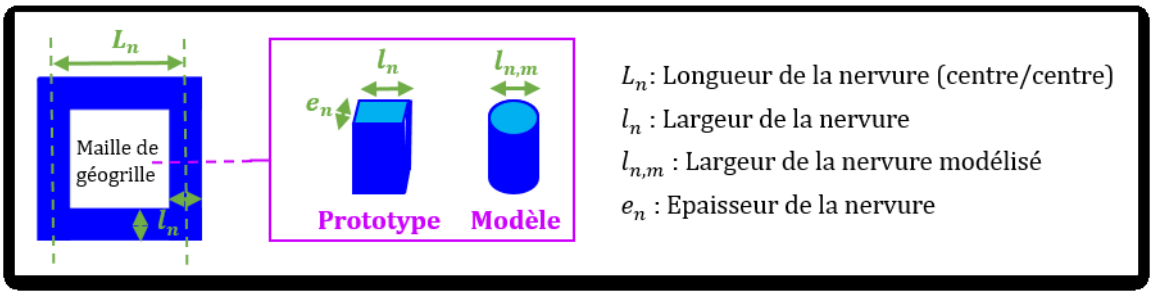


Figure 4.12. Différence de section des nervures de la géogrille réelle et celle modélisée.

4.4.2.2 *Calibration numérique des propriétés mécaniques de la géogrille*

1. *Module d'Young :*

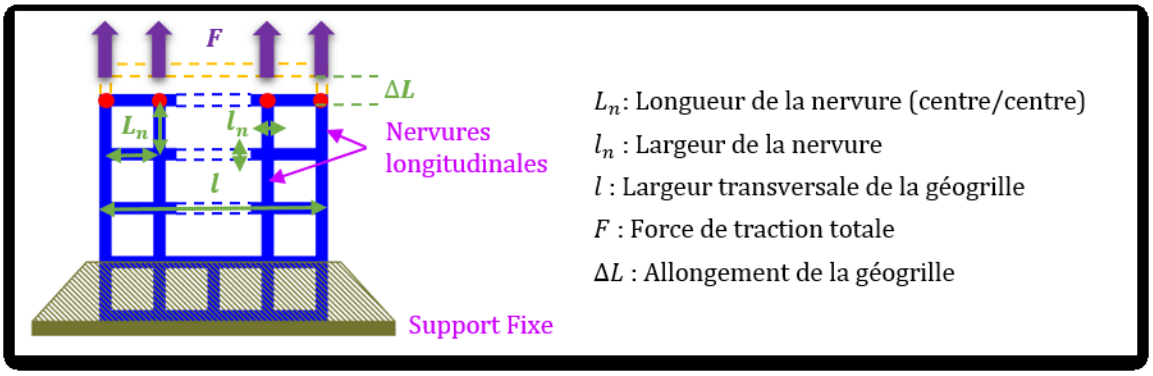


Figure 4.13. Schéma d'un essai de traction sur une géogrille.

La première étape de la calibration consiste à déterminer le module d'Young équivalent de la nervure modélisée. Sur la base de la fiche technique du fabricant (Section 3.1.2), le module d'Young global de la géogrille réelle E_g peut être exprimé en termes de module de traction « J » (défini en KN/m), à partir d'un essai de traction uniaxiale sur un échantillon de géogrille (Figure 4.13), et en fonction de son épaisseur e_n comme indiqué dans l'équation (30).

$$E_g = \frac{J}{e_n} \tag{30}$$

$$E_n = \alpha_1 \cdot E_g \; ; \; \alpha_1 = \frac{l}{N_n \times L_n} \tag{31}$$

$$E_{n,m} = \alpha_2 \cdot E_n \; ; \; \alpha_2 = \frac{S_n}{S_{n,m}} = \frac{l_n \times e_n}{\pi \times {l_{n,m}}^2/4} \tag{32}$$

Pour relier ce module d'Young global au module d'Young d'une nervure individuelle E_n, un premier facteur correctif est introduit pour tenir compte du nombre de nervures longitudinales N_n pour une largeur l de géogrille donnée (équation (31)). Ensuite, un deuxième facteur correctif est appliqué pour tenir compte de la différence de géométrie de la section transversale entre la nervure rectangulaire réelle S_n et la nervure cylindrique modélisée $S_{n,m}$. Ce facteur est défini comme le rapport entre ces deux sections (équation (32)). Le module d'Young ainsi défini $E_{n,m}$ est attribué à chaque connexion cylindrique pour que la rigidité axiale globale de la géogrille modélisée corresponde à celle de la géogrille réelle.

2. *Résistance à la traction :*

Dans YADE, la force maximale T_{max} qu'une connexion cylindrique peut supporter est directement déterminée par ses valeurs de cohésion (normale C_N ou tangentielle C_T) et son rayon R (équation (33)).

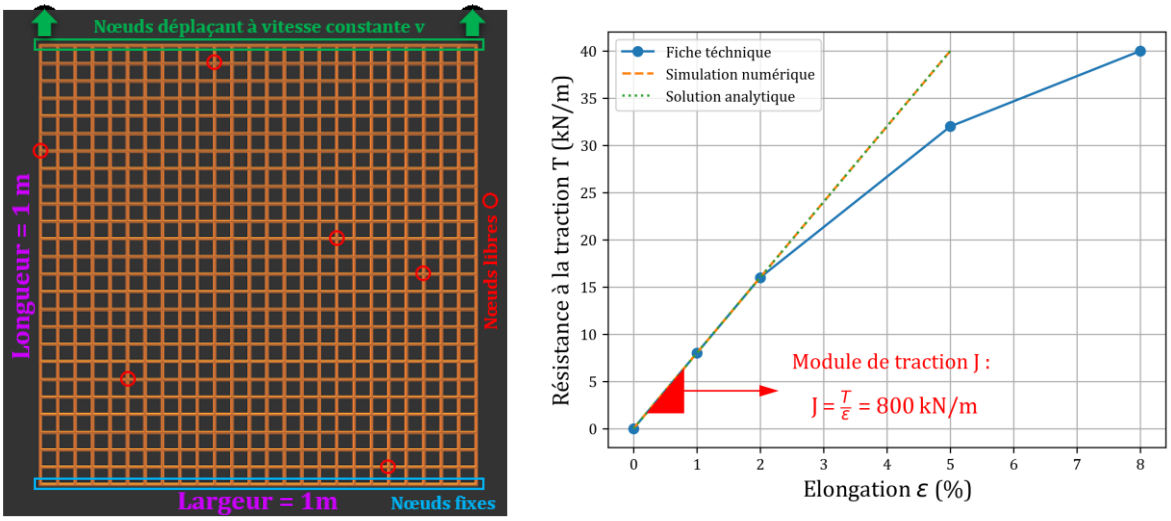
$$T_{max} = C_{N-T}\, R^2 \tag{33}$$

$$C_{N-T} = \frac{T_{max}}{R^2};\; T_{max} = \frac{T_{ultime}}{N_n}, R = \frac{l_{n,m}}{2} \tag{34}$$

Par conséquent, pour reproduire la résistance ultime à la traction de la géogrille réelle T_{ultime}, les valeurs de cohésion attribuées au modèle doivent être calibrées en conséquence. La cohésion requise est obtenue en assimilant la force de traction à la rupture (définie par mètre de largeur) indiquée sur la fiche technique du fabricant à la capacité en force d'un cylindre (équation (34)) et en prenant en compte le nombre N_n de nervure longitudinale par mètre de largeur. Ces paramètres de cohésion servent de base à l'évaluation des conditions de rupture ou de plasticité dans le modèle, selon que l'on choisit un comportement fragile (fragile = True) ou parfaitement plastique (fragile = False). Pour les simulations suivantes, une cohésion arbitrairement élevée est utilisée pour garantir l'intégrité des nervures, comme expliqué dans la section précédente.

3. *Phase préliminaire de calibration :*

Un essai de calibrage a été effectué sur une géogrille de 1 mètre de long et de large ($L = l = 1000\, mm$), maintenue à une extrémité et soumise à un déplacement uniaxial de l'autre (voir Figure 4.14.a). Étant donné que les nervures modélisées présentent un comportement linéaire élastique et parfaitement plastique, le module de traction reste constant tout au long de l'essai. La réponse cible a été choisie sur la base de la partie linéaire initiale de la réponse à la traction de la géogrille réelle, qui reste linéaire jusqu'à une déformation d'environ 2 % avec un module de traction $J = 800\ kN/m$.



(a) (b)

Figure 4.14. (a) Géogrille simulée pour l'essai de calibration et (b) Résultats de l'essai de calibration en traction du modèle de géogrille.

Pour une épaisseur de nervure de géogrille réelle $e_n = 1\, mm$ et une longueur de nervure de $L_n = 40\, mm$, cela correspond à $N_n = 26$ nervures chargées simultanément. Le module d'Young équivalent de la géogrille réelle déterminé à l'aide de l'équation (31) est donc de $E_n = 3.85 \times 10^9\ N/m^2$. En tenant compte de la correction due à la section transversale circulaire des nervures modélisées (avec un diamètre $l_{n,m} = 8\, mm$), le module d'Young calibré attribué à chaque nervure

individuelle dans la simulation, calculé à l'aide de l'équation (32), est $E_{n,m} = 6.12 \times 10^8\ N/m^2$. D'autre part, la résistance ultime à la traction de la géogrille réelle (équation (34) est de $T_{ultime} = 40\ kN/m$, ce qui se traduit par une valeur de cohésion requise d'environ $C_{N-T} = 9.6 \times 10^7\ N/m^2$ dans le modèle numérique. Comme indiqué précédemment, cette valeur n'est utilisée que pour vérifier les conditions de rupture ou de plasticité et elle est le plus souvent fixée à une très grande valeur pendant les simulations, comme décrit précédemment.

Pour réaliser l'essai de calibration, une vitesse constante de 0,001 m/s est appliquée à l'extrémité supérieure (nœuds mobiles ou déplaçants), tandis que l'extrémité inférieure est fixe. Tous les autres nœuds sont libres de se déplacer sans condition imposée. À chaque pas de temps, la force de traction T_{num} est calculée en additionnant les forces internes F_{num_i} sur tous les nœuds situés en partie supérieure (nœuds mobiles ou déplaçants) et en la normalisant par la largeur de la géogrille l (équation (35)).

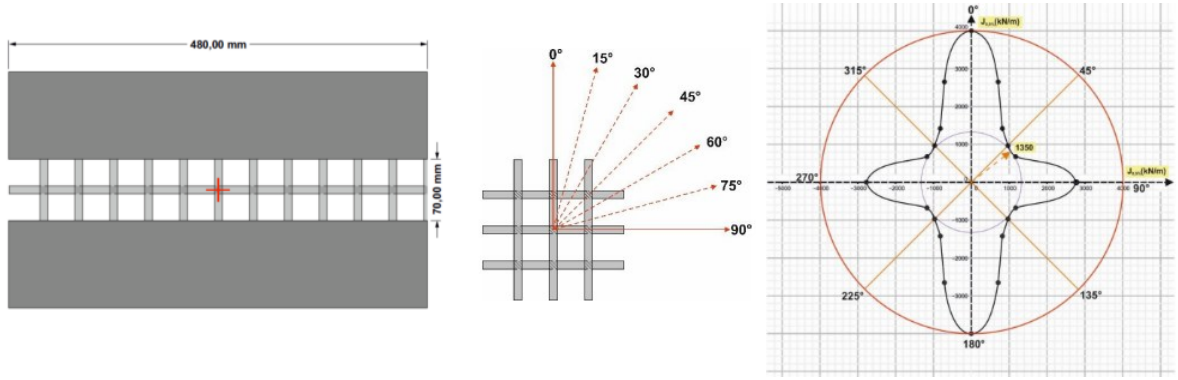
$$T_{num} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_n} F_{num_i}}{l} \tag{35}$$

$$T_{anal} = \frac{E_{n,m} \cdot \sum_{i=1}^{i=N_{n,long}} S_{n,m} \cdot \varepsilon}{l} \tag{36}$$

Les résultats numériques ont ensuite été comparés aux prévisions analytiques (équation (36)), qui sont basées sur le module d'Young, la section transversale totale de toutes les nervures longitudinales $N_{n,long}$ et l'élongation de la géogrille ε, ainsi qu'aux données d'essai de traction fournies dans la fiche technique du fabricant (Figure 4.14.b). Comme attendu d'un modèle numérique avec une loi linéaire, les résultats montrent que le modèle de géogrille est capable, pour de faibles valeurs de déformation (1-2 %), de reproduire les caractéristiques de déformation et de résistance observées dans la géogrille réelle, aboutissant au même module de traction initial. Cependant, en raison de la réponse linéaire idéalisée supposée dans le modèle, la rupture s'est produite à une élongation plus faible (environ 5 %) par rapport aux données du fabricant, qui indiquent une rupture à environ 8 % d'élongation pour la même résistance ultime à la traction de 40 kN/m. Malgré cette limitation, la calibration est considérée comme fiable et l'approche de modélisation simplifiée est jugée efficace pour décrire la réponse mécanique de la géogrille dans une plage de déformation similaire à celle des applications usuelles.

4. *Calibration selon des protocoles d'essai standardisés :*

Après la phase de calibration initiale, une analyse plus complète a été réalisée conformément aux procédures d'essai normalisées. L'union européenne pour l'évaluation technique (ETA) propose un protocole expérimental spécifique pour évaluer les performances mécaniques des géogrilles en fonction de leurs caractéristiques essentielles. Cette méthodologie permet non seulement d'évaluer la rigidité axiale, mais aussi de quantifier la rigidité radiale, une propriété mécanique utilisée pour caractériser le comportement en traction dans le plan d'une géogrille dans des directions autres que ses axes principaux. Elle quantifie la résistance de la géogrille à la déformation dans le plan lorsqu'elle est soumise à une charge de traction appliquée suivant un angle arbitraire θ par rapport à la direction de production de la géogrille (MD) ou à la direction transversale (CMD).



(a) (b) (c)

Figure 4.15. Représentation de : (a) géogrille biaxiale constituée de 11 nervures et fixées aux deux extrémités, illustrant la largeur et la longueur effectives nominales de l'essai (exemple avec une orientation de 0°) ; (b) schéma des directions d'essai avec des incréments angulaires de 15° ; et (c) exemple de caractérisation de la rigidité sécante radiale pour une géogrille biaxiale (adaptée de ETA, 2018).

L'approche consiste en une série d'essais de traction réalisés conformément aux normes EN ISO 10319 et ASTM D6637. Le protocole d'essai comprend les étapes suivantes:

- **Géométrie et conditions limites :**

Selon les spécifications de la norme EN ISO 10319, les deux extrémités de l'échantillon doivent être maintenues dans des mors pour assurer une transmission uniforme de la charge. Un dispositif d'essai de grande largeur est utilisé, avec une largeur effective de géogrille de 480 mm et une longueur effective de 70 mm (Figure 4.15.a). Cette configuration garantit une meilleure reproductibilité des résultats en engageant un plus grand nombre de nervures longitudinales ou transversales dans le processus de chargement en traction.

- **Orientation de la géogrille :**

L'échantillon de géogrille est incliné dans le sens horaire par incréments d'angle $\theta = 15°$, couvrant toute la gamme des directions dans le plan (Figure 4.15.b). Cette étape permet d'évaluer la dépendance directionnelle de la rigidité dans le plan de la géogrille.

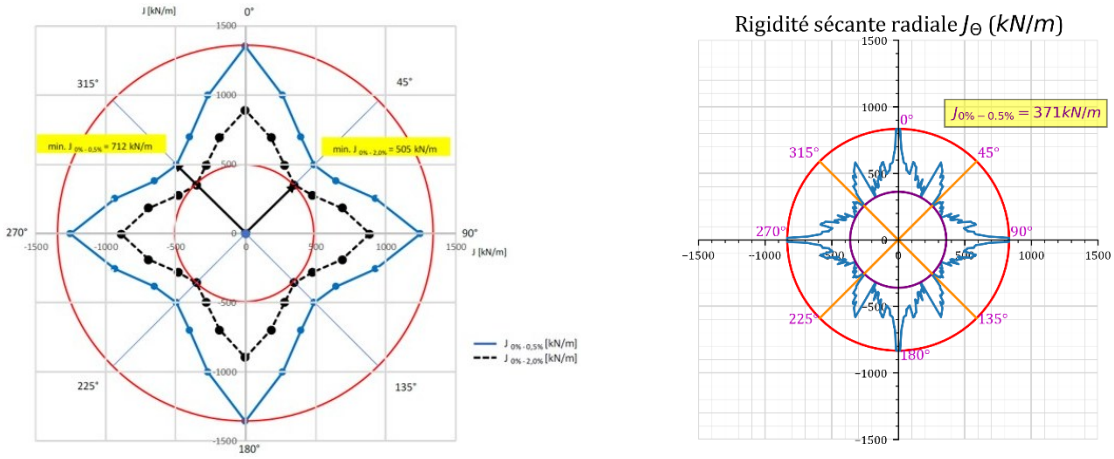
- **Détermination de la rigidité radiale sécante J_θ :**

Pour chaque direction, la rigidité radiale sécante est calculée à partir de la résistance à la traction T_θ mesurée dans la direction θ et de la déformation appliquée ε (Equation (37)). Les valeurs de rigidité sont généralement extraites à des niveaux spécifiques de faible déformation, à savoir 0,5 % et 2 %, comme le précisent les normes.

$$J_\theta = \frac{T_\theta}{\varepsilon} \; [kN/m] \tag{37}$$

- **Détermination du profil de rigidité radiale :**

Les résultats des essais de traction dans toutes les directions sont utilisés pour définir la rigidité radiale en fonction de l'angle de rotation (Figure 4.15.c). Ce tracé polaire donne une idée de l'anisotropie du matériau de renforcement dans le plan de la grille. La rigidité radiale minimale est identifiée comme la plus petite tangente du tracé polaire, correspondant généralement à la direction bissectrice des principaux axes porteurs (par exemple, $\theta = 45°$ pour les géogrilles biaxiales).



(a) (b)

Figure 4.16. Définition de la rigidité sécante radiale de Secugrid® 40/40 Q1 : (a) résultats expérimentaux fournis par Naue pour deux niveaux de déformation (0,5% et 2%) avec un incrément directionnel de 15° ; et (b) résultats numériques de la géogrille simulée à une déformation de 0,5% avec un incrément directionnel de 1°.

Le fabricant Naue fournit des résultats de référence pour la géogrille Secugrid® 40/40 Q1 obtenus en suivant ce protocole (Figure 4.16.a). Il est important de noter que ces mesures de rigidité radiale sont effectuées par des laboratoires externes et ne font pas partie des procédures habituelles de contrôle de la qualité de Naue. Les valeurs rapportées comprennent les résultats moyens de cinq tests indépendants par orientation, avec des mesures prises à des incréments de 15°. Les résultats indiquent une rigidité axiale d'environ 712 kN/m à 0,5% de déformation dans la direction des nervures, alors que la valeur seuil minimale spécifiée dans la fiche technique (voir section 3.1.2) obtenue dans la direction la plus déformable est de à 440 kN/m.

Pour reproduire cette procédure avec le modèle numérique, une série de simulations a été réalisée sur la base du protocole expérimental (Figure 4.17). Les résultats simulés à une déformation de 0,5 % sont présentés à la Figure 4.16.b. Pour la modélisation numérique, la rigidité de la géogrille a été calculée avec des accroissement angulaires faibles (tous les degrés) plutôt que par incréments de 15°.

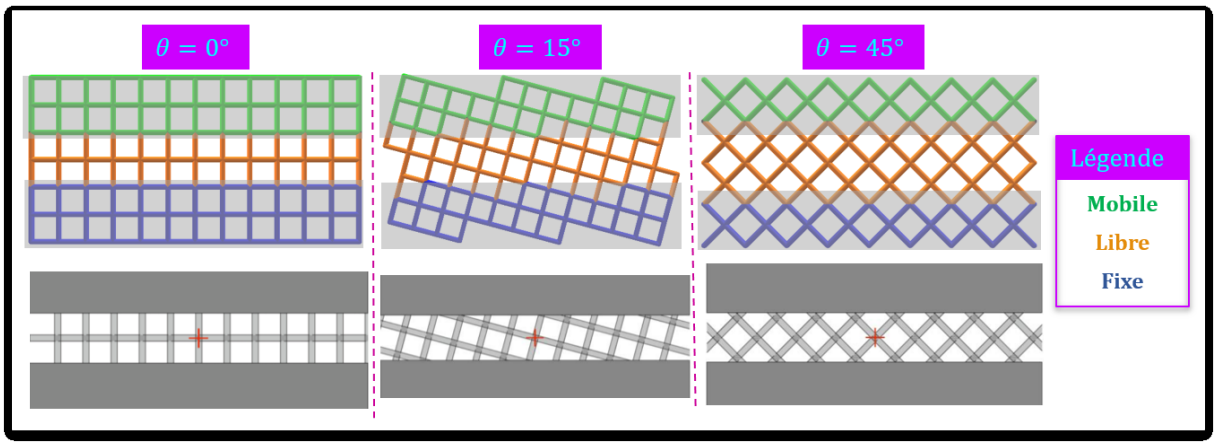
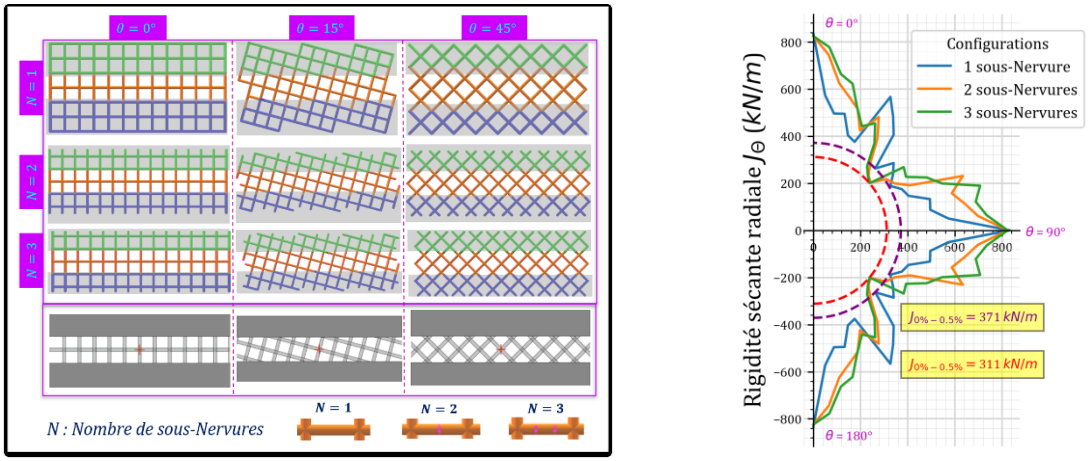


Figure 4.17. Représentation de la méthode de mise en traction numérique de la géogrille pour 3 inclinaisons différentes (0°, 15°, et 45°) selon ETA (2018).

Comme on peut le voir sur la Figure 4.16, le modèle numérique a réussi à rendre compte de la réponse mécanique attendue de la géogrille biaxiale modélisée. La rigidité axiale cible ($J = 800\ kN/m$) a été reproduite le long des deux directions principales ($\theta = 0°$ et $\theta = 90°$), tandis

que la rigidité radiale minimale a été observée à $\theta = 45°$, avec une valeur d'environ 371 kN/m. Bien que cette valeur soit inférieure à la référence expérimentale (440 kN/m), elle reste dans une marge acceptable compte tenu de la simplicité de l'approche de modélisation.

Comme on peut le voir sur la Figure 4.16.b, les profils de rigidité axiale numérique et expérimental présentent quelques divergences. L'une des explications possibles est la prise en compte dans le modèle numérique de nervures totalement rigides en flexion, alors qu'en réalité, une certaine flexibilité existe sur la longueur de la nervure. Pour analyser l'influence de cette hypothèse, une autre configuration de modélisation a été testée, dans laquelle chaque nervure a été discrétisée en plusieurs segments, appelés sous-Nervures, connectés en série (Figure 4.18.a). Cet ajustement introduit une flexibilité supplémentaire le long de l'axe de la nervure.



(a) (b)

Figure 4.18. (a) Discrétisation de la géogrille en sous-nervures pour trois inclinaisons (0°, 15° et 45°); et (b) résultats numériques correspondants à 0,5 % de déformation avec un incrément directionnel de 5°.

Les courbes de rigidité axiale qui en résultent (Figure 4.18.b) montrent une tendance claire : à mesure que le nombre de nervures secondaires augmente, le profil de rigidité axiale déterminé numériquement se rapproche de celui obtenu expérimentalement. L'augmentation du nombre de discrétisation au-delà de 3 ne semble plus apporter d'amélioration. Parallèlement, la rigidité axiale minimale diminue de 371 kN/m à 311 kN/m avec le plus haut niveau de discrétisation testé.

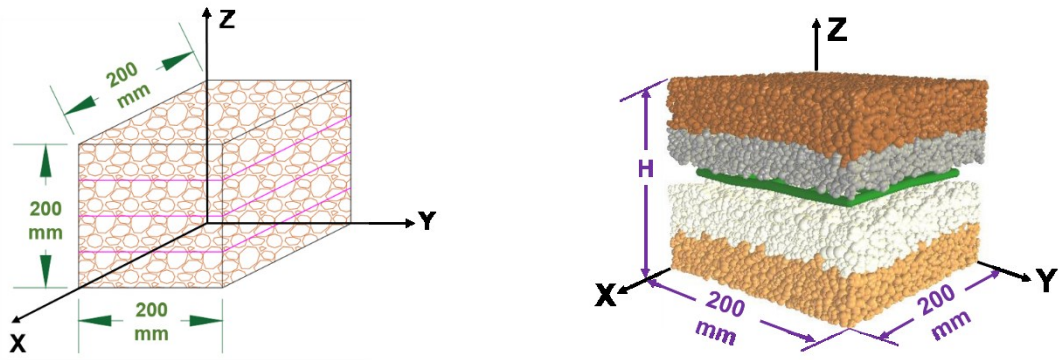
Néanmoins, étant donné que la fonction principale de la géogrille dans les cas étudiés est de fournir un renforcement le long de ses directions principales, et étant donné que la rigidité axiale a été reproduite avec précision, il a été jugé acceptable de retenir la configuration la plus simple pour la suite de ce travail. De plus, cette stratégie de modélisation simplifiée offre l'avantage de réduire les coûts de calcul tout en maintenant une précision adéquate. La même approche numérique peut être facilement étendue aux géogrilles triaxiales, ce qui permet une modélisation cohérente et efficace des différentes configurations de géogrilles.

4.4.3 Géométrie et préparation de l'échantillon

4.4.3.1 *Représentation du domaine numérique*

En raison des conditions aux limites proposées dans YADE, l'échantillon est généré dans un parallélépipède délimité par six parois rigides plutôt que dans un cylindre. Afin de conserver la même surface effective de la géogrille que dans les essais expérimentaux, l'échantillon numérique

est défini avec une longueur et une largeur de 200 mm. La hauteur est également fixée à 200 mm, générant ainsi un cube de 200 mm de côté (Figure 4.19).



(a) (b)

Figure 4.19. (a) Vue schématique de l'échantillon non renforcé composé de 4 couches de particules et (b) Échantillon constitué de quatre couches de clumps C2 et d'une géogrille placée à mi-hauteur.

La distribution granulométrique des particules et leurs formes étant complexes, il est difficile d'obtenir une hauteur parfaitement reproductible à masse constante. Pour garantir une correspondance précise avec les conditions expérimentales, la masse volumique cible est fixée à 1590 kg/m^3, correspondant à une porosité de 0,4 en supposant une masse volumique de la matrice solide de 2650 kg/m^3. Le nombre total de particules a été déterminé par itérations successives, sur la base de la masse équivalente de sol nécessaire et en respectant la granulométrie cible, à environ 10400 particules pour l'échantillon simulé.

4.4.3.2 *Préparation numérique de l'échantillon*

La préparation numérique de l'échantillon suit la même procédure que celle décrite expérimentalement dans la section 3.1.3, soit un dépôt gravitaire suivi d'un compactage de chaque couche. Le processus détaillé est le suivant :

1. *Création de la boîte :*

La première étape consiste à créer à l'aide de la fonction « yade.utils.aabbWalls() » une boîte rigide (Figure 4.20), constituée de six parois qui enserrent l'échantillon, en définissant son origine (0,0,0) ses dimensions (Longueur, Largeur, Hauteur), et l'épaisseur des parois (zéro pour ce modèle). La hauteur théorique est la hauteur cible de l'échantillon, la hauteur initiale est celle assignée lors de la création de la boîte et considérée comme 3 fois la hauteur cible pour pouvoir créer un nuage de particules initial sans recouvrement (voir la section suivante pour plus de détails), et la hauteur finale est celle obtenue après le compactage.

Les parois sont modélisées comme un matériau purement frictionnel, avec des propriétés mécaniques (module de contact et rapport de rigidité) similaires à celles des particules granulaires (voir le Tableau 4.4). L'angle de frottement des parois est fixé à zéro pour limiter les forces de friction entre les particules de sol et les parois (le frottement de contact est déterminé par la valeur de frottement la plus faible au contact, comme décrit dans la section 4.3.1). Par ailleurs, la masse des parois est négligée en fixant leur densité à zéro.

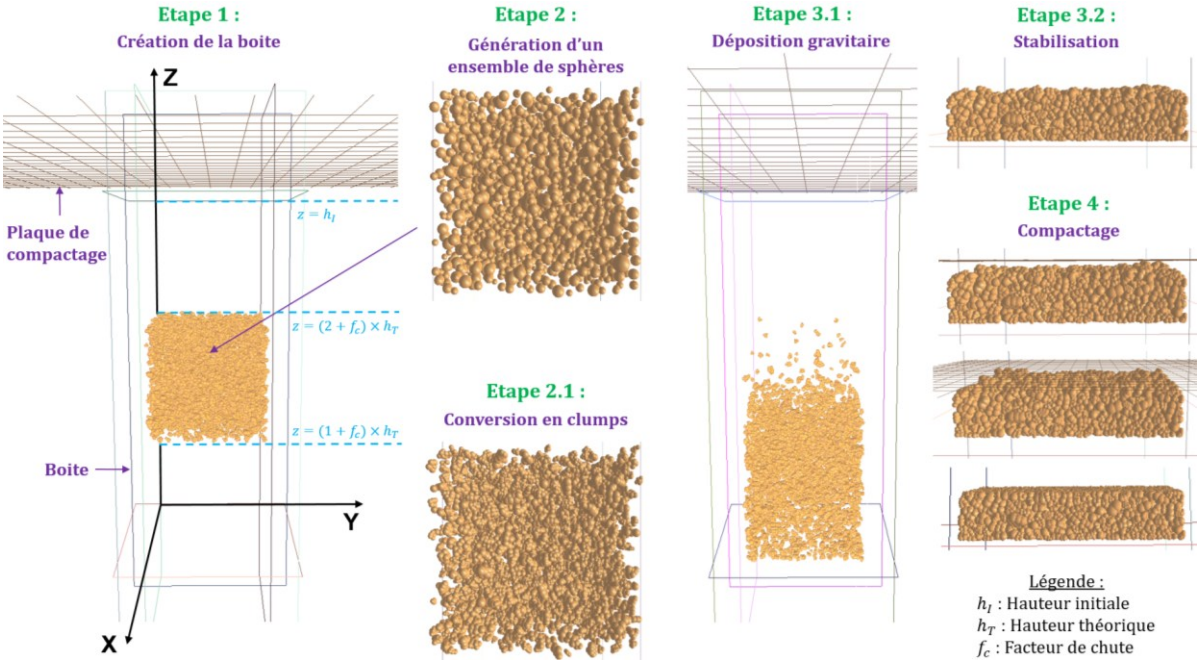


Figure 4.20. Procédure de préparation d'une couche de l'échantillon numérique.

Tableau 4.4. Propriétés géométriques et mécaniques de l'échantillon numérique.

Modèle	Paramètre			Valeur	Unité
Boite	Géométrie	Longueur		200	mm
		Largeur		200	mm
		Hauteur	Théorique h_T	200	mm
			Initiale h_I	3×200	mm
			Finale h_F	167	mm
	Matériau « FrictMat »	Masse volumique « density »		0	kg/m^3
		Module de contact E_c « young »		10^8	N/m^2
		Rapport de rigidité K_T/K_N « poisson »		0,5	-
		Angle de frottement de contact ϕ_{int}		0	°

2. *Génération des particules :*

La deuxième étape consiste à générer le premier ensemble de particules (Figure 3.1) via la fonction « yade._packSpheres.SpherePack.makeCloud() ». Cette fonction génère un nuage aléatoire de num sphères sans contact (num=2600 pour une couche), à partir d'un nombre aléatoire (seed=1 de base) et d'une distribution massique prédéfinie des particules (fonction « psdSizes, psdCumm, distributeMass=True »). La hauteur de chute des particules est maintenue constante d'une couche à l'autre.

Les propriétés du matériau des sphères sont ensuite attribuées comme décrit dans la section 4.4.1. Initialement, les particules ont un angle de frottement de contact faible (ϕ_{int} = 1°) pour faciliter le processus de dépôt en minimisant la résistance au mouvement, ce qui leur permet de se réarranger plus efficacement et d'atteindre un état plus dense.

Conversion des particules en aggrégats de sphères « Clumps » :

L'utilisation de clumps nécessite une étape supplémentaire. Étant donné que YADE ne fournit pas de méthode directe pour générer des clumps suivant une distribution granulométrique précise. Les particules sont initialement créées sous forme de sphères, puis converties en clumps à l'aide de la fonction « yade.wrapper.BodyContainer.replaceByClumps() » (Figure 4.20). Cette fonction remplace les sphères par des clumps de géométrie et de proportion données (Tableau 4.1) sur la base d'une liste prédéfinie de modèles de clumps (voir la section 4.4.1.2) Cette liste est composée de tuples, chaque tuple étant constitué d'un identifiant pour chaque clump et pour chacune des sphères individuelles qui le composent : [(clumpId1, [memberId1, memberId2, ...]), (clumpId2, [memberId1, memberId2, ...]), ...]. Le nombre de clumps par couche est de 2600 pour l'échantillon de référence ce qui représente un nombre total de sphères d'environ 16 000 par couche dans le cas de clumps complexes C2.

Chaque nouveau clump formé a le même volume total que la sphère qu'il remplace. Les masses et l'inertie des clumps sont calculés par intégration numérique.

3. *Déposition gravitaire et stabilisation :*

Une fois les particules générées, la troisième étape consiste à les laisser se déposer sous l'effet de la gravité. Cette étape est réalisée en appliquant une accélération gravitationnelle de $g_z = -9{,}81\ m/s^2$ (Figure 4.20). Initialement, les particules sont en suspension, sans contact. Au fur et à mesure de la simulation, elles tombent et s'accumulent sous leur propre poids pour former une couche compacte.

Sans un amortissement suffisant, les particules présenteraient des oscillations prolongées et des rebonds irréalistes, ce qui retarderait la stabilisation de l'échantillon. Une valeur d'amortissement proche de 1 supprimerait trop rapidement le mouvement des particules, empêchant le système de s'auto-organiser correctement en un paquet granulaire stable. Par ailleurs, dans le cas d'un compactage en couches, chaque couche doit se compacter de manière adéquate sans effets cinétiques excessifs. Un amortissement trop faible entraînerait un réarrangement excessif des particules, tandis qu'un amortissement trop important pourrait empêcher une transmission correcte de la force entre les particules. En règle générale, des valeurs d'amortissement comprises entre 0,5 et 0,7 sont utilisées dans les simulations DEM pour le dépôt et le compactage des granulats, afin de garantir à la fois la stabilité numérique et des structures représentatives. Sur cette base, un coefficient d'amortissement « NewtonIntegrator.damping » de 0,6 a été choisi pour la phase de préparation de l'échantillon.

La vitesse de chute des particules est calculée implicitement, le pas de temps étant déterminé par le moteur « GlobalStiffnessTimeStepper() », comme expliqué dans l'annexe A.1.2. Le pas de temps étant directement influencé par la masse et la rigidité des éléments, l'introduction de composants à forte rigidité entraîne un pas de temps plus petit. En présence d'une géogrille, constituée d'éléments de petite taille et de module de rigidité élevé, la période propre minimale du système diminue, ce qui nécessite un pas de temps plus faible pour préserver la stabilité.

De plus, le nombre total d'éléments dans la simulation affecte le pas de temps calculé de par la complexité des interactions induites. Par conséquent, les différentes configurations de particules présentent des exigences distinctes en matière de pas de temps :

- Les sphères conduisent au pas de temps le plus grand en raison de leur complexité minimale de contact.
- Les clumps simple de type C1 imposent un pas de temps plus faible, en raison de leur distribution de masse et de leurs interactions accrues.
- Les clumps complexes de type C2 présentent le pas de temps le plus faible en raison de leur géométrie complexe et du nombre nettement plus élevé d'éléments constitutifs.

D'autre part, des erreurs de segmentation dans les simulations par éléments discrets (DEM) peuvent se produire lorsque les calculs numériques dépassent les limites de la mémoire du système ou lorsque des pas de temps instables entraînent des vitesses excessives des particules, ce qui conduit à des interactions non physiques. Les principales causes d'erreurs de segmentation dans ce contexte sont :

- Pas de temps trop importants : Si le pas de temps est trop grand par rapport à la période propre minimale du système, une instabilité numérique se produit, provoquant l'acquisition par les particules de vitesses non physiques élevées, ce qui entraîne une divergence et, éventuellement, l'arrêt du programme.
- Contrastes de rigidité élevée : Lorsque des éléments à forte rigidité sont présents à côté de particules plus souples, des déséquilibres de force soudains peuvent se produire, entraînant des comportement irréalistes et l'arrêt de la simulation.
- Nombre élevé de particules et surcharge de la mémoire : En augmentant le nombre d'éléments dans le système, la demande de calcul augmente fortement, dépassant potentiellement les limites de la mémoire du système.

Pour éviter tous ces problèmes tout en maintenant l'efficacité des calculs, le pas de temps critique est réduit par un coefficient réducteur. Une valeur de 0,4 s'est avérée adéquate pour assurer la stabilité numérique du modèle, l'intervalle de mise à jour du pas de temps étant fixé à 100 itérations.

Après le dépôt, la stabilisation de la couche granulaire est évaluée à l'aide de la fonction « yade._utils.unbalancedForce() ». Cette fonction est définie comme le rapport entre la valeur moyenne de la somme des forces sur chaque objet et la valeur moyenne de l'amplitude de forces d'interaction.

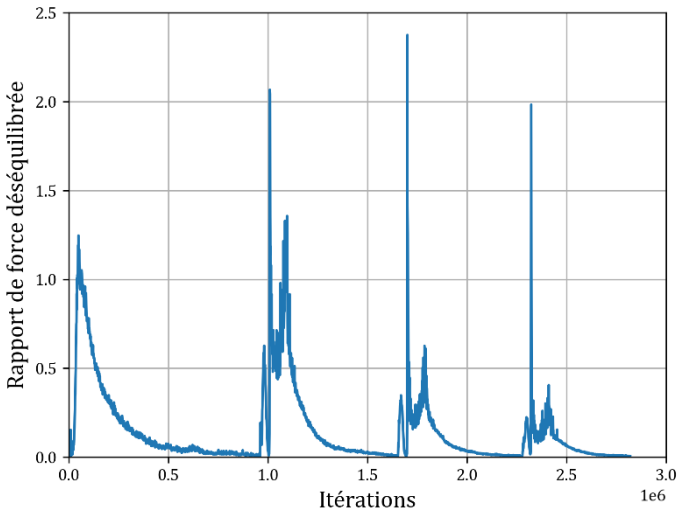


Figure 4.21. Processus de stabilisation lors de la mise en place des couches : Évolution du rapport de force déséquilibrée avec les itérations.

Pour un système en état d'équilibre statique parfait, la somme des forces sur tous les corps devrait être nulle, car les forces d'interaction s'annulent mutuellement et n'induisent aucune accélération des particules, ce qui empêche tout mouvement ultérieur de ces dernières. Pour des raisons purement numériques, cette condition idéale n'est jamais totalement atteinte d'où le choix d'un critère seuil de stabilisation de 0,005. Cette valeur garantit que les forces résiduelles de déséquilibre sont négligeables, ce qui indique que les particules ont atteint une configuration stable à chaque étape de la simulation (Figure 4.21).

4. *Procédure de compactage :*

Après la stabilisation de la couche granulaire, une plaque de compactage est appliquée au niveau le plus élevé de l'assemblage de particules (Figure 4.20). Cette plaque a les mêmes propriétés mécaniques que les parois de la boîte afin d'assurer des conditions limites cohérentes.

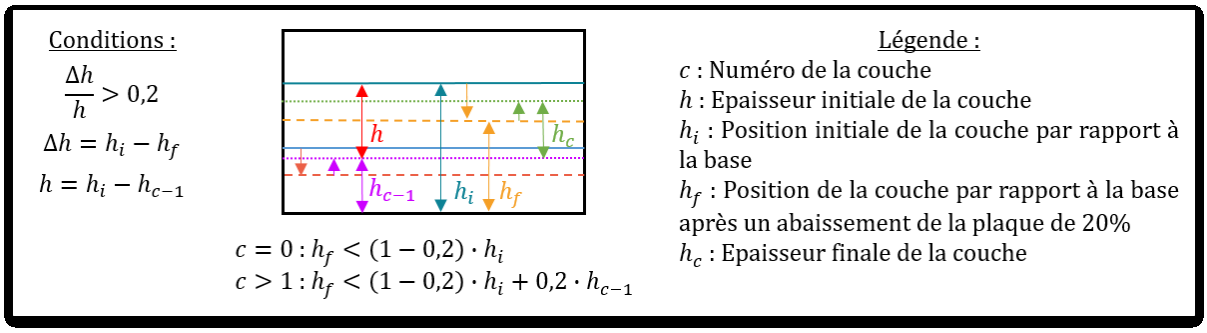
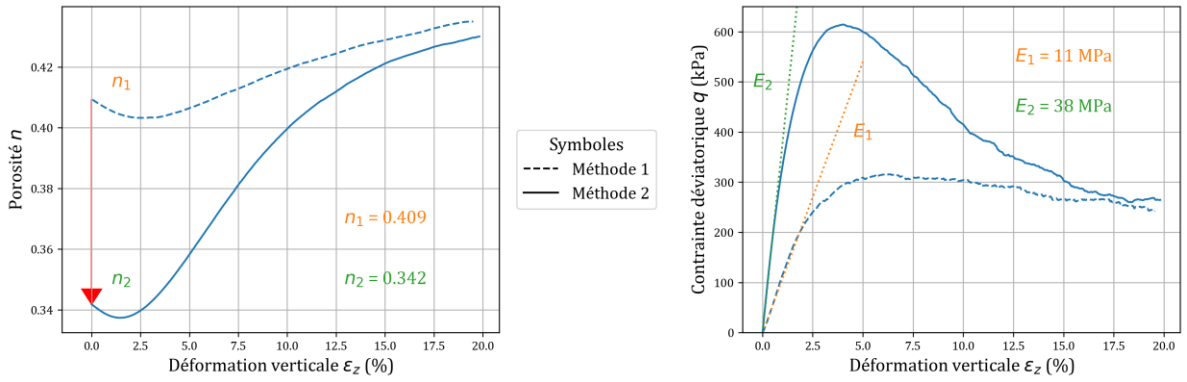


Figure 4.22. Schéma du processus de compactage par abaissement de la plaque de contrôle.

Le compactage est ensuite appliqué en imposant à la plaque une vitesse de 0,05 m/s jusqu'à ce qu'une réduction de 20 % de l'épaisseur de la couche soit atteinte (Figure 4.22). Une fois que ce niveau de compression prédéfini est atteint, le mouvement de la plaque est inversé, jusqu'à ce que la plaque ne soit plus en contact avec l'assemblage de particules. Cette approche permet d'obtenir une couche uniforme et bien compactée avec une surface relativement plane, optimisant ainsi l'état initial de la densité de l'échantillon.



(a) (b)

Figure 4.23. Influence de la méthode de compactage sur (a) la porosité initiale et (b) la réponse en contrainte-déformation de l'échantillon non renforcé, préparé avec les clumps C2, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa.

Des méthodes de compactage différentes ont été testées préalablement qui ont conduit à des variations significatives de la densité initiale, entraînant une incohérence de la réponse mécanique et de la résistance au cisaillement. La méthode actuelle utilisée dans cette étude garantit la reproductibilité de l'échantillon tout en favorisant une plus grande efficacité du compactage. En contrôlant systématiquement le processus de compactage, on obtient un assemblage granulaire plus dense avec des propriétés mécaniques plus proches de celles des matériaux granulaires réels.

Par exemple, en améliorant la procédure de compactage, et ce en l'absence de géogrille et en utilisant les clumps C2, la porosité de l'échantillon a diminué de 0,41 (valeur proche de celle obtenue expérimentalement) à 0,34. Ceci s'est traduit par une augmentation par un facteur de quatre du module d'élasticité et un doublement de la résistance au cisaillement de l'échantillon. La valeur ainsi obtenue est similaire à celle observée lors d'un essai de compression triaxiale sous

un confinement de 100 kPa (Figure 4.23). Ces constatations soulignent l'importance d'un compactage contrôlé pour obtenir des résultats fiables et reproductibles dans la modélisation par éléments discrets des matériaux granulaires.

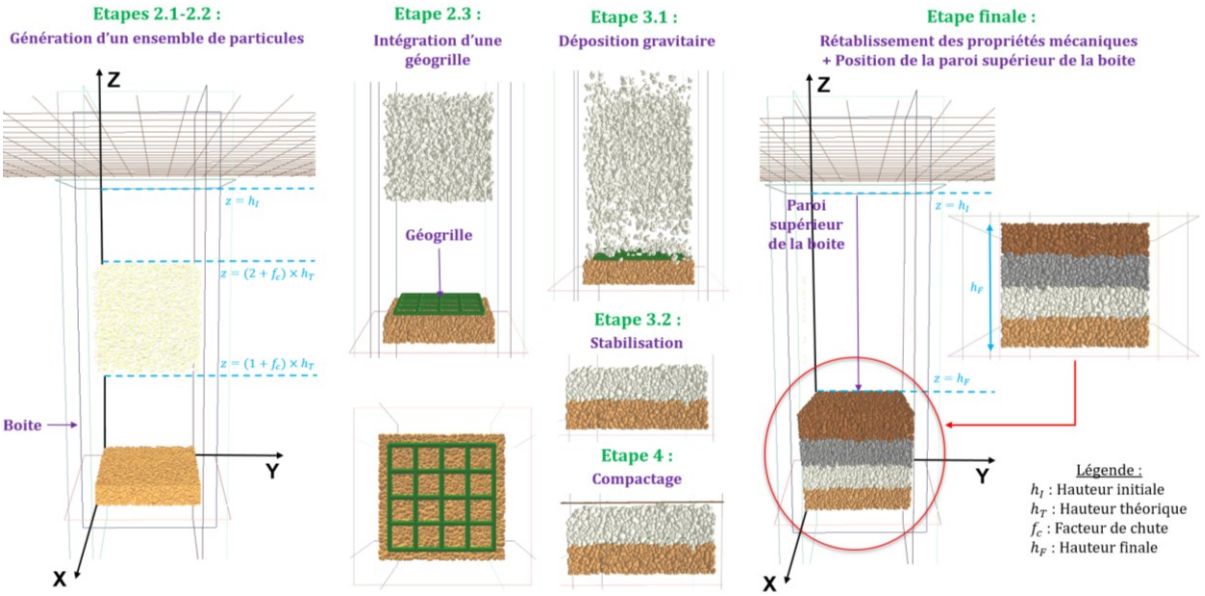


Figure 4.24. Procédure de préparation de l'échantillon numérique : Intégration d'une géogrille et configuration finale de l'échantillon après mise en place des couches successives.

Une fois la phase de compactage terminée pour une couche donnée, la simulation génère la couche granulaire suivante, en intégrant la géogrille si elle est présente (Figure 4.24). Ce processus séquentiel de mise en œuvre de l'échantillon par couches successives garantit un échantillon homogène et bien structuré pour les analyses ultérieures.

Enfin, la position verticale de la paroi supérieure de la boîte est ajustée à la hauteur finale atteinte par les particules (Figure 4.24), garantissant ainsi une configuration cohérente pour les étapes suivantes de la simulation. Parallèlement, l'angle de frottement est réinitialisé pour refléter le comportement mécanique réel du matériau (ϕ_{int} = 30°). D'autre part, alors qu'un coefficient d'amortissement de 0,6 a été utilisé pendant la phase de préparation de l'échantillon pour assurer une stabilisation rapide et la formation d'une structure granulaire réaliste, une stratégie d'amortissement sensiblement différente est nécessaire pendant la phase suivante. En particulier, dans des conditions de chargement quasi-statiques ou monotones, telles que celles appliquées pendant la compression triaxiale, le maintien d'un niveau d'amortissement élevé n'est pas approprié. Un amortissement excessif attenue fortement le mouvement des particules au point d'affecter artificiellement la réponse mécanique naturelle de l'assemblage granulaire. Plus précisément, il peut inhiber le développement de chaînes de force et empêcher les réarrangements locaux des grains, qui sont tous deux essentiels pour capturer un comportement de contrainte-déformation réaliste. Pour permettre au système d'évoluer plus naturellement sous des charges appliquées de l'extérieur, tout en atténuant les effets dynamiques non physiques, le coefficient d'amortissement doit être réduit. D'après les pratiques dans la littérature DEM, des valeurs d'amortissement de l'ordre de 0,1 à 0,3 sont généralement recommandées pour les simulations de chargement quasi-statiques. Par conséquent, dans cette étude, un coefficient de 0,2 a été adopté pour les phases de confinement et de chargement. Ce choix offre un compromis équilibré entre la stabilité numérique, l'efficacité du calcul et le réalisme physique, permettant une reproduction fidèle de la réponse mécanique du matériau granulaire.

La densité volumique finale obtenue est d'environ 1650 kg/m^3 avec les sphères, 1790 kg/m^3 avec les clumps C1 et 1750 kg/m^3 avec les clumps C2, soit des valeurs supérieures à celle mesurée

expérimentalement (1590 kg/m^3). Cette différence s'explique par la méthode de compactage qui favorise une densification plus homogène de l'échantillon pour un même type de particules, ainsi que par la discrétisation numérique des particules sous forme d'éléments discrets pouvant partiellement se chevaucher. Ce chevauchement réduit le volume total occupé tout en conservant la masse initiale, entraînant ainsi une densité apparente plus élevée que celle mesurée expérimentalement. Par ailleurs, la variation de densité entre les différentes formes de particules découle de leur capacité à s'agencer de manière plus ou moins compacte : les sphères, en raison de leur géométrie simple, présentent un empilement moins dense, tandis que les clumps C1 et C2, constitués de plusieurs sphères interconnectées, améliorent l'imbrication des particules et conduisent à une densité plus élevée.

L'approche numérique retenue permet d'assurer un contrôle rigoureux de la densité et des conditions de compactage pour un même type de particules utilisé. Elle permet une meilleure reproductibilité et réduit la variabilité des résultats des simulations numériques en garantissant la valeur de la porosité initiale et l'homogénéité du matériau. Cette modélisation permet ainsi d'évaluer de manière plus robuste l'effet du renforcement par géogrille dans les matériaux granulaires sous sollicitations mécaniques.

4.5 Synthèse

Ce chapitre a présenté le cadre méthodologique retenu pour la modélisation numérique des sols granulaires renforcés par géogrille. La prise en compte du caractère discontinu du sol, du comportement continu de la géogrille et de leurs interactions a conduit à l'adoption de la méthode des éléments discrets et à l'utilisation de la plateforme YADE. Les outils et développements spécifiques mis en œuvre permettent de générer des échantillons numériques réalistes et de simuler le comportement couplé sol/géogrille sous chargement.

Toutefois, le modèle ainsi construit doit être paramétré et calibré à partir des résultats expérimentaux. Cette étape repose sur la confrontation des simulations numériques avec les essais triaxiaux réalisés en laboratoire, afin d'évaluer la capacité du modèle à reproduire le comportement mécanique observé. Elle constitue un passage essentiel pour valider la méthodologie développée et préparer l'analyse détaillée des mécanismes d'interaction. Cette étape fait l'objet du Chapitre 5.

5 Paramétrage du modèle numérique et confrontation expérimentale

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la validation du modèle numérique développé pour modéliser le comportement mécanique des milieux granulaires renforcés par géogrille. Il s'inscrit dans la continuité du chapitre précédent dédié à la méthodologie numérique (Chapitre 4), dans lequel ont été détaillées les stratégies de modélisation, la génération des particules, ainsi que l'intégration des éléments de renforcement. L'objectif principal est ici double : (1) affiner le paramétrage du modèle numérique, en explorant l'influence des différentes hypothèses d'entrée, et (2) confronter les résultats issus des simulations aux données expérimentales disponibles.

Dans un premier temps, la démarche numérique adoptée est décrite, en particulier les différentes phases successives du chargement triaxial (compactage, confinement isotrope, chargement axial), conçues pour reproduire fidèlement les conditions expérimentales. Une attention particulière est portée à la sensibilité aux conditions initiales, notamment la distribution granulométrique, le nombre de particules et le paramètre aléatoire de génération de celles-ci. La seconde partie du chapitre est dédiée à une comparaison approfondie entre simulations numériques et essais triaxiaux expérimentaux. Cette confrontation inclut : une analyse de la représentativité géométrique des échantillons (granulométrie, taille d'échantillon, élancement), une phase de calibration mécanique du modèle par comparaison des courbes contrainte-déformation et des réponses volumiques, et une validation microstructurale fondée sur une comparaison des états initiaux obtenus soit numériquement soit expérimentalement par tomographie aux rayons X. Cette analyse, structurée en plusieurs volets, s'appuie sur des traitements avancés des données tomographiques permettant d'évaluer, de manière quantitative et localisée, la porosité, la géométrie des grains, ainsi que les réseaux de contact (nombre de coordination et orientation des contacts). Ces analyses microstructurales contribuent à évaluer la représentativité et la pertinence du modèle, en particulier dans la zone d'interaction critique entre les grains et la géogrille.

5.1 Description de l'outil de chargement triaxial

Les simulations numériques sont réalisés à l'aide de la routine « yade.wrapper.TriaxialStressController() » de YADE. Cet outil offre la possibilité de contrôler les conditions aux limites en appliquant aux parois d'un échantillon prismatique soit des contraintes constantes « σ », soit des taux de déformation « $\dot{\varepsilon}$ » imposés (voir section 4.4.3.2). A chaque pas de temps, les contraintes exercées sur chaque paroi $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ ainsi que les déformations associées dans les trois directions principales $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ sont calculées. À partir de ces données, la contrainte déviatorique « q » et la déformation volumique « ε_v » sont déterminées selon les équations (38) et (39).

$$q = \sigma_z - \sigma_x \quad (\text{avec } \sigma_x = \sigma_y) \tag{38}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{39}$$

L'un des avantages majeurs du processus utilisé réside dans la possibilité d'enregistrer l'état du modèle à une étape donnée (via « yade.wrapper.Omega.save() ») puis de le réutiliser ultérieurement, par exemple après avoir compacté un échantillon pour tester différentes conditions de confinement ou de chargement axial. Cette fonctionnalité est cruciale pour l'étude paramétrique, car elle garantit des états initiaux identiques entre simulations comparées. La Figure 5.1 présente un schéma représentatif de l'évolution des contraintes au cours d'un essai de compression triaxiale.

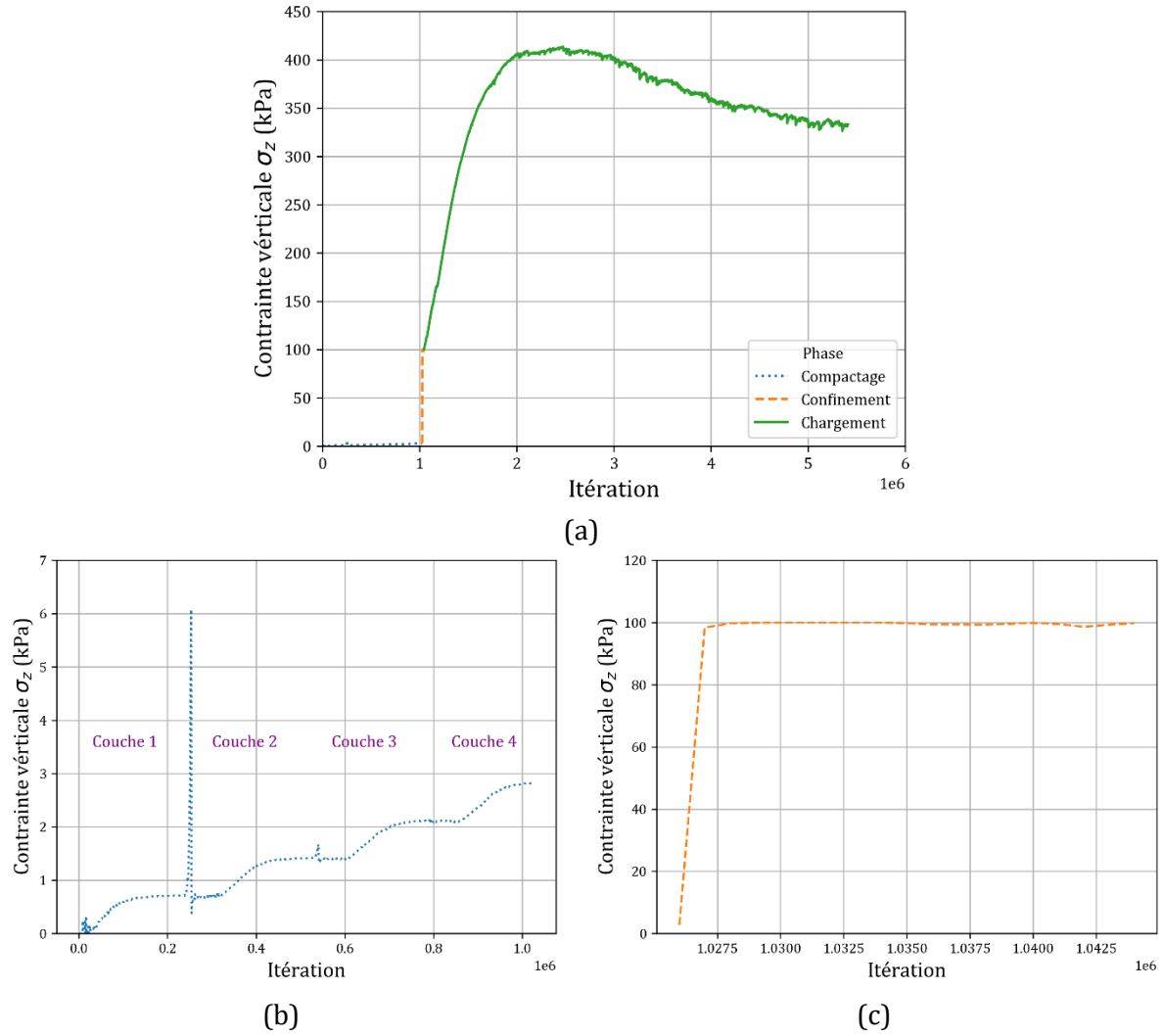


Figure 5.1. Evolution usuelle de la contrainte verticale au cours d'un essai de compression triaxiale (en fonction du nombre d'itérations) : (a) ensemble des phases du processus de compression triaxiale ; (b) détail de la phase de compactage ; (c) détail de la phase de confinement.

1. *Analyse de la phase de préparation et de compactage :*

Une méthode classique pour densifier les milieux granulaires est la méthode « REFD » (Radius Expansion - Friction Decrease) largement utilisée pour générer des échantillons denses à porosité contrôlée (Chareyre & Villard, 2005; Salot et al., 2009). Cette méthode, intégrée actuellement dans YADE pour les particules sphériques, n'a toutefois pas pu être utilisée dans le cadre de la thèse. En effet, le modèle numérique considéré dans notre étude inclut à la fois des éléments de géogrille composés de nœuds sphériques et de connexions et des clumps constitués d'agrégats de sphères. L'application de cette méthode à notre problématique induirait une augmentation du recouvrement entre les sphères formant les clumps, altérant ainsi leur angularité apparente. De plus, les nœuds de la géogrille étant eux aussi représentés par des sphères, leur taille serait

également modifiée. Pour éviter ces effets indésirables, une procédure alternative de mise en place par pluviation (décrite en section 4.4.3), s'inspirant directement du protocole expérimental, a été utilisée.

Lors de cette procédure de préparation, toutes les parois du modèle sont fixes, sans application de contrainte ni de déformation. La Figure 5.1.b illustre la phase de compactage de chaque couche, mise en œuvre selon la procédure de stabilisation décrite précédemment. Si cette procédure est en accord avec la procédure expérimentale, il est cependant difficile de contrôler avec précision l'état de densification du matériau granulaire qui peut varier d'un échantillon à l'autre.

2. *Analyse de la phase de confinement :*

Après compactage, une phase de confinement isotrope est appliquée par déplacement simultané des parois pour atteindre une valeur cible σ_c. La stabilisation de l'échantillon est ensuite vérifiée par deux critères : la force non équilibrée (unbalancedForce), comme utilisé pour le compactage ; et la stabilisation de la contrainte moyenne globale p (Figure 5.1.c).

3. *Analyse de la phase de chargement :*

Une fois le confinement stabilisé, l'essai triaxial est réalisé par déformation axiale contrôlée. Les contraintes latérales σ_x et σ_y sont maintenues constantes, tandis qu'un taux de déformation $\dot{\varepsilon}_z$ constant est imposé en direction verticale z.

a. Conditions de chargement et effet de la gravité :

Par défaut, les conditions de chargement sont appliquées symétriquement, c'est-à-dire que les parois opposées se déplacent simultanément et de façon symétrique, que ce soit en mode de contrainte ou de déformation imposée. Néanmoins, la routine de calcul utilisée permet de fixer certaines parois en fonction du scénario étudié (le déplacement des parois pouvant de fait ne plus être symétrique).

Dans le cadre de cette étude, les simulations triaxiales ont été réalisées sans gravité. Ce choix repose sur le fait que la contrainte verticale induite par le poids propre des grains est largement inférieure au niveau de confinement appliqué (≥ 30 kPa), rendant son influence négligeable sur la réponse mécanique globale. Afin de valider cette hypothèse, une première analyse comparative a été réalisée sur un échantillon renforcé par une grille de renforcement (voir Figure 4.19) afin d'évaluer l'influence de la gravité dans ce contexte. Un échantillon compacté et confiné à 100 kPa a été soumis à un chargement axial monotone sous deux conditions : avec gravité et sans gravité.

L'analyse a été menée sur un échantillon, renforcé par une géogrille positionnée à mi-hauteur, qui permet d'évaluer directement l'effet du renforcement sur le comportement du milieu granulaire ainsi que les interactions locales avec la géogrille à cette échelle. Les résultats indiquent (pour le niveau de confinement retenu) que la présence de la gravité n'influence pas de manière significative la réponse mécanique globale : les courbes de contrainte-déformation obtenues avec et sans gravité sont quasiment confondues (Figure 5.2). En conséquence, la gravité n'a pas été prise en considération pour l'ensemble des simulations triaxiales menées dans le cadre de la thèse. Par ailleurs, cette simplification permet de limiter les mouvements parasites des particules, de stabiliser numériquement les simulations, et de réduire légèrement le temps de calcul sans altérer la validité des résultats.

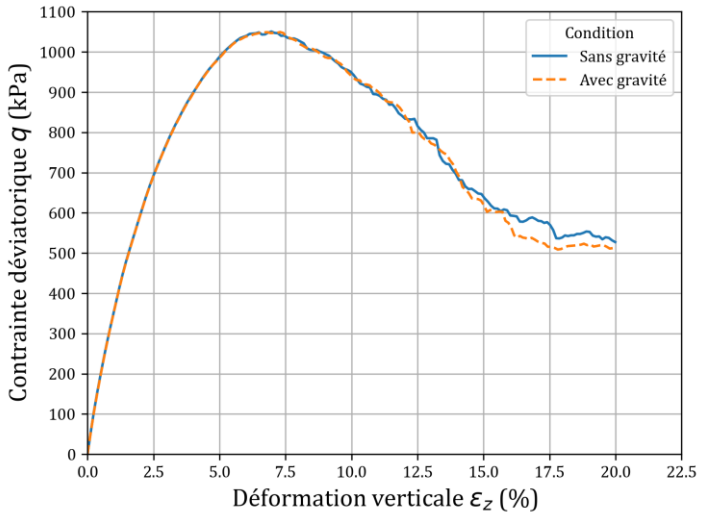
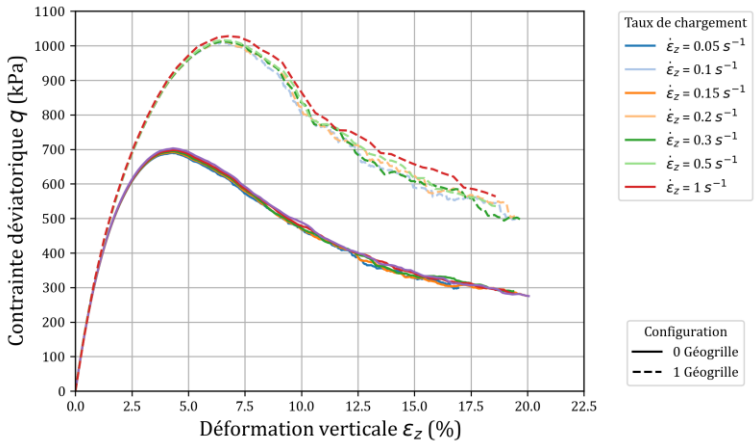
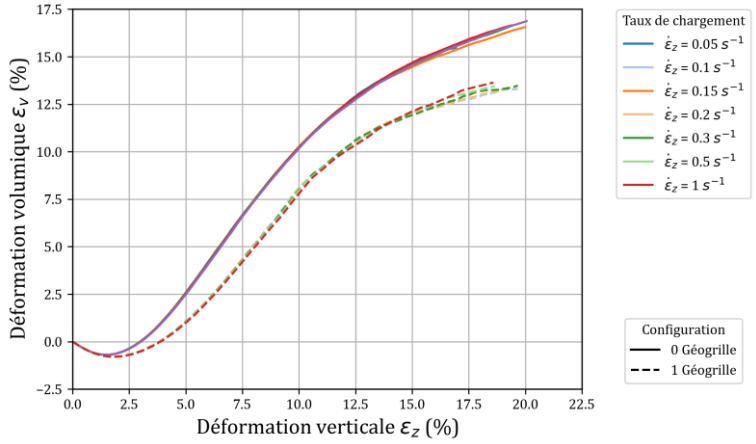


Figure 5.2. Influence de la gravité sur la réponse mécanique d'un échantillon, de section carrée de 200 mm, renforcé à mi-hauteur : comparaison des courbes contrainte-déformation avec et sans gravité, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa.

b. Choix du taux de déformation :



(a)



(b)

Figure 5.3. Influence du taux de déformation sur la réponse mécanique d'échantillons avec et sans géogrille : (a) contrainte déviatorique et (b) déformation volumique fonction de la déformation verticale, en compression triaxiale sous un confinement de 100 kPa.

Une deuxième analyse comparative a été conduite afin de déterminer un taux de déformation $\dot{\varepsilon}_z$ adapté, assurant un compromis entre précision numérique et temps de calcul, et ce sans introduire de biais dans les résultats. Des taux de déformation compris entre 0,05 s^{-1} et 1,0 s^{-1} ont été appliqués à des échantillons sollicités en compression triaxiale, sans et avec géogrille (placée à mi-hauteur), sous un confinement de 100 kPa. Les résultats (voir Figure 5.3) indiquent que les réponses mécaniques, en termes de contrainte déviatorique et de variation volumique, restent stables jusqu'à un taux de déformation de 0,5 s^{-1}. Au-delà, notamment pour un taux de 1.0 s^{-1} en présence de la géogrille, de légers écarts apparaissent. En conséquence, un taux de déformation de 0,5 s^{-1} a été retenu pour l'ensemble de la campagne numérique, garantissant une bonne représentativité du comportement mécanique tout en optimisant les temps de simulation. En élargissant l'analyse, il apparaît clairement que l'introduction d'une géogrille dans le milieu granulaire améliore le comportement mécanique de l'échantillon, en augmentant sa résistance et en limitant sa dilatance. Ce résultat sera approfondi dans les sections suivantes.

5.2 Effet des caractéristiques de la répartition initiale des particules

La méthode de mise en place des particules dans les simulations numériques est une étape cruciale qui influence la compacité, la distribution des contacts et par conséquent la réponse mécanique de l'échantillon. Comme détaillé dans la section 4.4.3, cette étape repose sur une fonction intégrée à YADE permettant de générer initialement un assemblage aléatoire de particules sphériques non chevauchantes à l'intérieur d'un domaine donné, en respectant une distribution granulométrique cible et sur la base d'une variable aléatoire « seed ». Cette section a pour objectif d'évaluer l'influence de la répartition initiale des particules générées, à travers trois aspects complémentaires : (1) la vérification du nombre total de grains, (2) la comparaison de la distribution granulométrique obtenue par simulation avec celle mesurée expérimentalement, et (3) l'étude de la robustesse du modèle vis-à-vis des variations de l'état initial induites par l'utilisation d'une variable aléatoire (seed) qui génère la position initiale des particules, en analysant l'influence de cette dernière sur la réponse mécanique des échantillons simulés.

1. *Estimation du nombre de grains :*

Les mesures expérimentales menées sur des échantillons cylindriques de 194 mm de diamètre et 200 mm de hauteur (cf. sections 3.1.3 et 3.2.1) ont permis d'estimer une masse moyenne de 8,64 kg. Dans les simulations numériques, le domaine de calcul adopté est un cube de 200 mm de côté, soit un volume supérieur de 28 % au volume expérimental. En supposant la même densité apparente que celle mesurée expérimentalement ($\rho_d \approx 1590$ kg/m^3), la masse équivalente du modèle numérique serait de 12,75 kg. Toutefois, comme indiqué dans la section 4.4.3, cette valeur n'est pas directement applicable car la densité finale d'un assemblage numérique dépend fortement de la méthode de compactage adoptée pour le modèle. Dans ce contexte, nous avons retenu arbitrairement une valeur cible de 11 kg.

Afin d'estimer le nombre de particules à intégrer dans les simulations, on se base sur les observations expérimentales issues de petits échantillons cylindriques de diamètre 70 mm, analysés pour deux élancements (H/D = 1,5 et 2,0), comme rapporté dans le Tableau 3.3. Pour un élancement H/D = 1,5 et une masse d'environ 600 g, le nombre de grains observé est de 800, soit un nombre moyen de grains de ≈ 1,33 grain/g. Pour un élancement H/D = 2, avec une masse augmentée à 780 g, le nombre de grains varie entre 1048 et 1256. Une simple estimation théorique (780 g × 1,33 grain/g) conduit à 1040 grains, ce qui est très proche de la borne inférieure mesurée. La variabilité observée peut être attribuée à l'hétérogénéité des grains, notamment en termes de forme et de masse unitaire.

En utilisant ce nombre moyen de grains de 1,33 grain/g, le nombre de grains attendu pour une masse de 11 kg est estimé à environ 14 600. Toutefois, afin de limiter le temps de calcul, tout en conservant une représentativité suffisante et en maintenant la stabilité numérique, un compromis a été établi avec un total de 10 400 grains. Ce choix permet de reproduire de manière fiable les caractéristiques mécaniques globales de l'assemblage granulaire, sans introduire une complexité numérique excessive, et en restant cohérent avec les observations expérimentales à l'échelle du grain. Ce nombre de particules correspond à un élancement H/D de 0,83 dans le modèle prismatique, dont l'impact sera discuté plus en détail dans une section suivante.

2. *Distribution granulométrique numérique :*

Dans la continuité de l'analyse précédente, une vérification de la distribution granulométrique « PSD » des particules générées numériquement s'impose, afin de s'assurer que l'assemblage simulé reproduit fidèlement les caractéristiques granulométriques cibles, dites théoriques. Cette étape est essentielle pour s'assurer que la réponse mécanique obtenue n'est pas altérée par une mauvaise représentation des tailles de grains.

La Figure 5.4 présente la comparaison entre la distribution granulométrique cible et celles obtenues numériquement pour les trois types de particules introduits en section 4.4.1.2 : sphères S, clumps simples C1 et clumps complexes C2. Bien que les bornes granulométriques aient été respectées (4 mm – 16 mm), un léger décalage de la taille moyenne est observé : la taille moyenne expérimentale est 10,4 mm alors que la taille moyenne simulée est 8,9 mm, soit un écart de 14 %. Cette différence s'explique par la manière dont la fonction de génération utilisée dans YADE reproduit la distribution granulométrique, indépendamment de la forme des particules. En effet, la Figure 5.4 montre que les courbes de distribution obtenues pour les trois formes de grains (S, C1, C2) sont pratiquement confondues. Cela confirme que l'écart observé sur la taille moyenne est directement lié à la fonction de génération utilisée, et non à la forme des particules. Ce biais (difficile à éviter avec les fonctions actuelles de YADE) reste toutefois acceptable compte tenu que la densité des assemblages générés demeure réaliste.

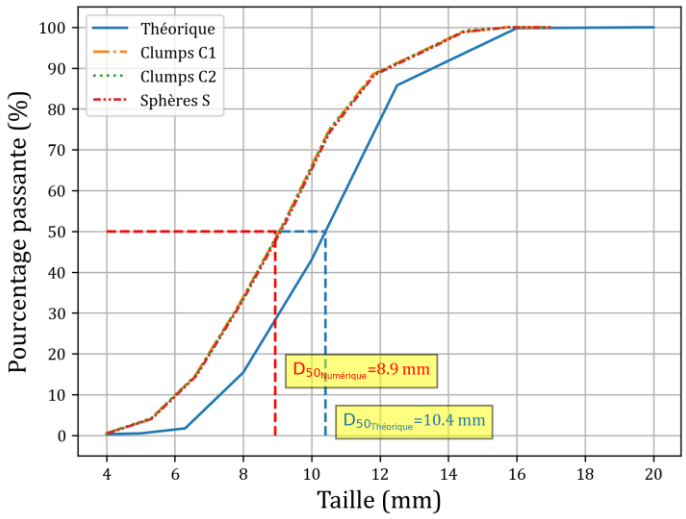


Figure 5.4. Comparaison entre la distribution granulométrique cible et celles obtenues numériquement pour les différentes formes de particules (S, C1, C2).

3. *Influence de la variable aléatoire « seed » sur l'état initial et la réponse mécanique :*

Après avoir vérifié le réalisme de la distribution granulométrique dans les différentes configurations de forme, il convient maintenant d'analyser l'influence de la répartition aléatoire des particules sur la sensibilité du modèle (utilisation de la variable aléatoire « seed »). Cette

dernière, utilisée dans le processus de génération des particules de YADE, influe sur la position et l'orientation initiales aléatoires des grains, sans affecter leur forme ni leur taille. Toutefois, ces variations peuvent engendrer des différences locales de compacité ou de structure, susceptibles d'influencer la réponse mécanique globale, notamment à proximité d'éléments structurants tels que la géogrille. Pour quantifier cet effet, cinq simulations triaxiales différentes ont été menées en utilisant des particules de type C2, sous un confinement isotrope de 100 kPa. Deux types de modélisations ont été étudiées : l'une sans renforcement, l'autre avec une géogrille positionnée à mi-hauteur. L'analyse porte à la fois sur la porosité globale « n » après compactage et sur la réponse mécanique déviatorique.

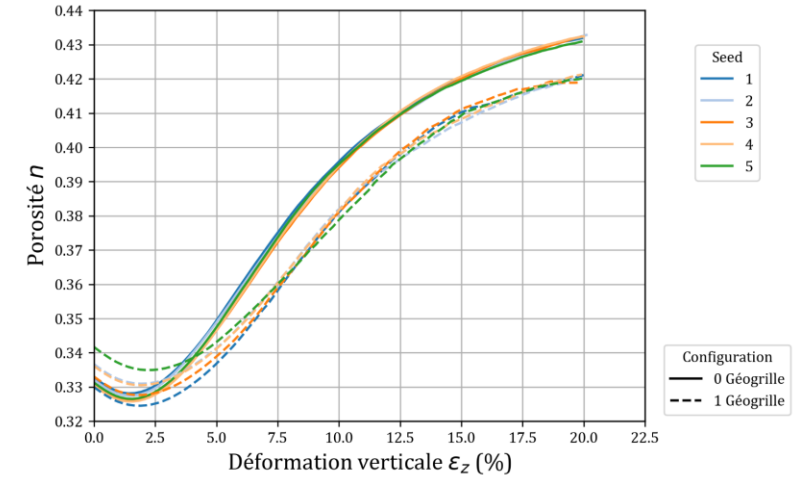
Deux méthodes distinctes ont été employées pour le calcul de la porosité initiale. En absence de géogrille, la porosité « n_{SG} » est déterminée en rapportant le volume total des grains V_{grains} au volume global de l'échantillon V_{boite} (cf. équation (40)). Cependant, en présence de géogrille, le volume occupé par cette dernière $V_{géogrille}$ est soustrait au volume total, afin d'obtenir une porosité « n_{AG} » plus représentative de l'espace effectivement occupé par les grains (cf. équation (41)). Ce choix permet d'évaluer la compacité relative du squelette granulaire, indépendamment de la présence du renforcement.

$$n_{SG} = 1 - \frac{V_{grains}}{V_{boite}} \tag{40}$$

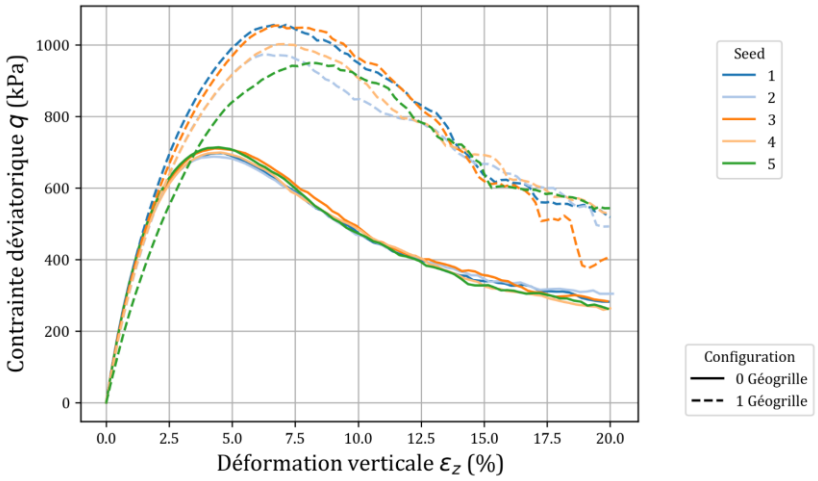
$$n_{AG} = 1 - \frac{V_{grains}}{V_{boite} - V_{géogrille}} \tag{41}$$

Les figures Figure 5.5 et Figure 5.6 examinent l'effet de la variable aléatoire seed sur l'état initial et la réponse mécanique des échantillons simulés. Sans géogrille, les échantillons générés présentent une porosité initiale au voisinage de 0,33 (Figure 5.5.a) et une réponse mécanique quasi similaire (Figure 5.5.b), confirmant la robustesse du modèle vis-à-vis de la procédure de mise en place utilisée.

En revanche, l'introduction d'une géogrille à mi-hauteur modifie cette stabilité numérique. La porosité initiale varie légèrement, de 0,33 à 0,342 (écart de 3 %), ce qui influence à la fois la rigidité initiale et la valeur maximale de la contrainte déviatorique. Cette variabilité s'explique par la discontinuité locale introduite par la géogrille, qui perturbe les conditions de contact dans sa zone d'influence immédiate. En conséquence, l'échantillon devient plus sensible à l'agencement initial des grains, en particulier autour de la géogrille, et ces différences locales se répercutent à l'échelle macroscopique. La Figure 5.6 met en évidence cette sensibilité en présentant la contrainte déviatorique maximale atteinte en fonction des déformations latérales correspondantes pour différentes valeurs de la variable aléatoire en classant les échantillons par ordre de porosité croissante. On observe que la contrainte maximale peut varier jusqu'à 10 %, tandis que les déformations latérales restent comparables (≈ 5,5 %). Cette réponse est cohérente avec le comportement classique des matériaux granulaires : une porosité plus élevée conduit généralement à une résistance au cisaillement plus faible. Toutefois, le fait que ces variations de résistance apparaissent pour des niveaux de déformation latérale similaires suggère que d'autres facteurs, en particulier des effets localisés autour de la géogrille, peuvent également entrer en jeu. En effet, la présence de la géogrille peut perturber le champ de contrainte local à proximité de l'inclusion, et ces perturbations, combinées aux variations de compacité locale, sont susceptibles d'influencer le développement du pic de contrainte. Bien que ces mécanismes ne soient pas quantifiés directement ici, cette hypothèse sera explorée plus en détail dans le chapitre suivant à travers une analyse locale.



(a)



(b)

Figure 5.5. Variation de (a) la porosité globale de l'échantillon et (b) de la contrainte déviatorique en fonction de la déformation verticale pour différentes valeurs de la variable aléatoire (seed de 1 à 5), pour des échantillons préparés avec des clumps C2 sous un confinement isotrope de 100 kPa.

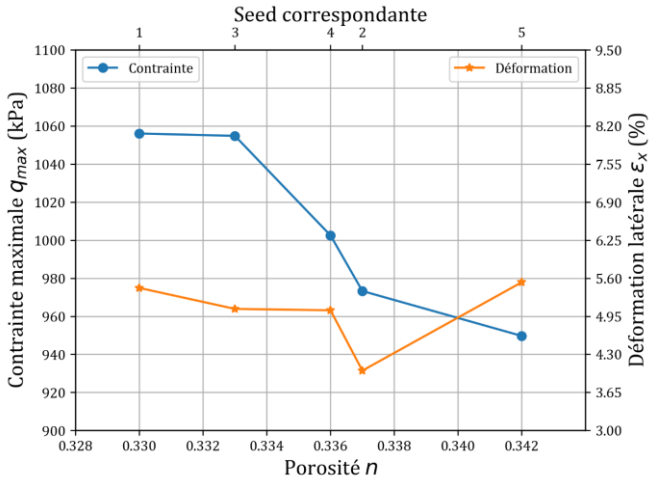


Figure 5.6. Variation de la contrainte déviatorique maximale et de la déformation latérale correspondante en fonction de la porosité et de la variable aléatoire correspondante, pour des échantillons renforcés par géogrille et préparés avec des clumps C2 sous un confinement isotrope de 100 kPa.

En résumé, les résultats obtenus montrent que, les échantillons non renforcés se montrent peu sensibles à la procédure de mise en place, ce qui valide la robustesse et la fiabilité du modèle numérique dans ce cas. A l'inverse, pour les échantillons renforcés, la variabilité introduite par la procédure de génération (seed) affecte plus significativement la résistance au cisaillement. Cette sensibilité accrue peut s'expliquer par le rôle perturbateur de la géogrille, qui agit comme une discontinuité dans le processus de préparation et modifie localement la compacité autour de l'inclusion. Ainsi, bien que la porosité globale demeure comparable, de faibles variations locales de densité peuvent suffire à influencer le développement du pic de contrainte, conformément au comportement attendu des matériaux granulaires. Cette observation ouvre des perspectives intéressantes pour une analyse plus fine de l'effet des hétérogénéités locales induites par le renforcement sur la réponse mécanique globale.

5.3 Comparaison entre données expérimentales et simulations numériques

La présente section constitue l'un des volets essentiels de l'analyse numérique : elle combine le processus de calibration du modèle numérique à partir des résultats expérimentaux, et l'exploitation de ses données pour nourrir le modèle numérique. Elle vise à s'assurer que les simulations permettent de rendre compte du comportement réel observé expérimentalement, tout en assurant une cohérence entre les paramètres géométriques et mécaniques introduits dans le modèle.

5.3.1 Représentativité des échantillons triaxiaux étudiés

Les simulations numériques de calibration ont été menées sur des échantillons de section carrée de coté 70 mm et de hauteur 140 mm, soit un élancement H/D = 2 (Figure 5.7). Cet élancement correspond à celui des essais triaxiaux réalisés en laboratoire sur les granulats secs (voir section 3.2). Pour reproduire cet échantillon dans les simulations, un total de 1200 particules a été utilisé, ce qui a permis d'obtenir une hauteur d'échantillon après compactage très proche de celle mesurée expérimentalement. Ce nombre de particules est compris dans l'intervalle de 1048 à 1256 observé expérimentalement pour cette taille d'échantillon (voir Tableau 3.3). Dans le prolongement de cette analyse, des simulations sur des échantillons de plus grande taille, de section carrée de coté 200 mm et de hauteur 200 mm (voir Figure 4.19), ont également été réalisées. Il paraît donc pertinent d'aborder dès à présent la question de leur représentativité.

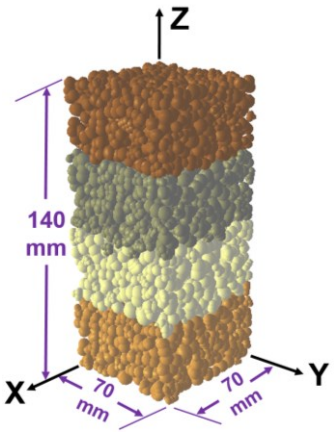


Figure 5.7. Echantillon numérique (70 mm × 70 mm × 140 mm) utilisé pour la simulation triaxiale, constitué de quatre couches de particules de type clump C2.

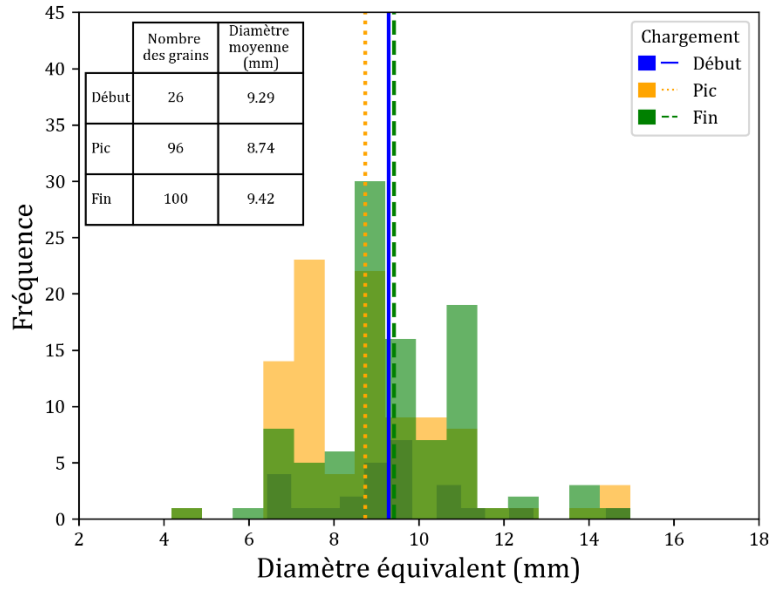
5.3.1.1 *Granulométrie et adéquation des dimensions de l'échantillon*

La représentativité d'un échantillon triaxial est conditionnée, entre autres, par un rapport adéquat entre la taille maximale des grains « $D_{\max}$ » et le diamètre de l'éprouvette « D ». Cette relation vise à limiter les effets d'échelle et à garantir que le comportement mécanique observé puisse être extrapolé de manière fiable à une échelle plus grande. À cet égard, plusieurs recommandations sont formulées dans la littérature et les normes techniques. Selon la norme NF P 94-074 (1994), le diamètre de l'échantillon doit être au minimum égal à cinq fois le diamètre maximal des grains $D_{\max}$ pour un sol à granulométrie étalée (ou bien graduée), et à dix fois $D_{\max}$ pour un sol à granulométrie uniforme. Lade (2016), pour sa part, indique des seuils similaires bien que légèrement plus stricts : il recommande un diamètre d'échantillon correspondant à au moins six fois $D_{\max}$ pour les matériaux à granulométrie uniforme, et huit fois $D_{\max}$ pour ceux à granulométrie étalée. Dans les deux cas, c'est bien le diamètre maximal des grains, et non la taille moyenne, qui sert de référence pour ces exigences dimensionnelles.

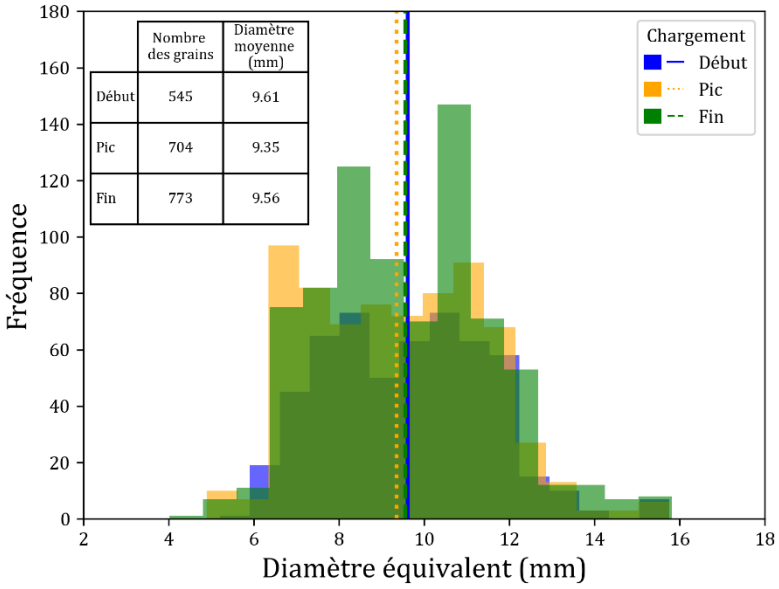
Dans le cadre de cette étude, le matériau présente une granulométrie comprise entre 4 mm et 16 mm ($D_{\max}$ = 16 mm), avec un diamètre moyen D_{50} de 10,4 mm (ou 8.9 mm dans la version numérique), et un coefficient d'uniformité C_u = 1,5. Cette faible valeur de C_u traduit une distribution granulométrique relativement étroite, ce qui correspond, selon les classifications (C_u < 2), à un sol à granulométrie uniforme. En appliquant les recommandations citées à un échantillon de 70 mm de diamètre, on obtient un rapport D/D_{max} égal à 4,38, ce qui est inférieur aux seuils requis pour un sol uniforme. Cette configuration ne satisfait donc ni la norme NF P 94-074 (1994), ni aux recommandations de Lade (2016). Si l'on considère le diamètre moyen plutôt que maximal, le rapport D/D_{50} atteint 6,73, soit une valeur supérieure à 6. Bien qu'un tel ratio ne soit pas prévu dans les textes normatifs, il donne une indication intéressante sur la représentativité moyenne des échantillons considérés dans la suite de cette partie.

Pour approfondir cette analyse et vérifier que le rapport D/D_{max} retenu pour la modélisation numérique est acceptable, une évaluation du nombre et des tailles des grains en contact direct avec la plaque supérieure « D_{cont} » a été réalisée à différents stades du chargement : au début de l'essai, au pic de résistance et à la fin du chargement, à 20 % de déformation axiale, dans le cas d'un échantillon soumis à une pression de confinement de 100 kPa (utilisation des clumps C2). Les résultats montrent une évolution notable du nombre de grains sollicités au contact avec la plaque. Initialement, 26 particules participent à la transmission d'efforts, avec un diamètre moyen équivalent de 9,29 mm. Ce nombre augmente sensiblement au moment du pic de résistance, atteignant 96 particules avec un diamètre moyen légèrement inférieur, de 8,74 mm. En fin de chargement, le nombre de particules en contact reste élevé (100 particules), tandis que leur diamètre moyen remonte à 9,42 mm. Ces valeurs sont illustrées par l'histogramme de distribution des diamètres équivalents présenté à la Figure 5.8.a.

Cette augmentation du nombre de grains en contact avec la plaque s'accompagne d'une légère réduction de leur taille moyenne au pic de contrainte, ce qui reflète une mobilisation progressive d'un plus grand nombre de particules, y compris les plus petites, au fur et à mesure de l'avancement de la déformation. On note cependant que, même au pic de contrainte, les diamètres moyens des grains en contact restent voisins de 9 mm, soit une valeur sensiblement inférieure à D_{max}, qui coïncide avec la fraction dominante de la distribution granulométrique. Le côté de la plaque supérieure étant de 70 mm, le rapport D/D_{cont} se situe donc entre 7,4 et 8,0, selon les états de chargement. Ces valeurs, bien que proches du minimum requis selon Lade (2016), pour un sol uniforme, se situent légèrement en dessous des recommandations de la norme française, qui préconise un rapport d'au moins 10 pour ce type de sol.



(a)



(b)

Figure 5.8. Distribution des diamètres équivalents des particules (clumps C2) en contact avec la plaque supérieure à différents stades de l'essai triaxial (début, pic, fin de chargement) pour un échantillon numérique de section carrée de (a) 70 mm et (b) 200 mm, sous 100 kPa de confinement.

En revanche, pour les échantillons de 200 mm de côté, ce problème est levé. Le rapport D/D_{max} = 12,5 satisfait pleinement les deux recommandations, assurant ainsi une représentativité granulométrique conforme aux standards. Par ailleurs, une analyse similaire à celle menée sur les petits échantillons a été conduite pour les grandes éprouvettes afin de caractériser la population de grains sollicités au contact avec la plaque de chargement. Les résultats confirment une évolution du nombre de grains mobilisés en fonction de l'avancement du chargement, mais la distribution de leurs tailles reste stable. Les diamètres moyens équivalents mesurés sont respectivement de 9,61 mm au début, 9,35 mm au pic, et 9,56 mm à la fin du chargement (Figure 5.8.b), soit des valeurs très proches de celles obtenues sur les petits échantillons. Ce constat permet d'estimer un rapport D/D_{cont}, plus grand, compris entre 20,8 et 21,4, renforçant la

conformité de l'échantillon aux critères normatifs et assurant une représentativité suffisante de la population de grains en interaction directe avec les éléments de chargement.

En résumé, les éprouvettes de 70 mm de côté utilisées dans cette phase de calibration numérique ne satisfont pas pleinement aux exigences normatives en matière de représentativité granulométrique basées sur $D_{\max}$, qu'il s'agisse des prescriptions de la norme NF P 94-074 (1994) ou de celles proposées par Lade (2016). Néanmoins, elles restent pertinentes dans le cadre d'une étude préliminaire, notamment en raison de leur facilité de mise en œuvre, de la rapidité de calcul résultant d'un nombre réduit de particules, et de la bonne maîtrise de la compacité initiale. L'utilisation d'échantillons de plus grandes dimensions, en particulier ceux de 200 mm analysés dans les sections suivantes, permet de lever ces limitations et d'atteindre une représentativité granulométrique plus conforme aux critères techniques attendus pour les études de comportement mécanique des matériaux granulaires.

5.3.1.2 *Elancement des échantillons*

L'élancement H/D ou le rapport entre la hauteur H et le diamètre D de l'échantillon est, également, un paramètre important dans les essais triaxiaux, car il influe sur la distribution des contraintes et l'homogénéité de la déformation au sein de l'échantillon.

Selon la norme française NF P 94-074 (1994), les éprouvettes cylindriques de diamètre supérieur ou égal à 35 mm doivent présenter un élancement compris entre 1,9 et 2,2. De son côté, Lade (2016) indique que, dans la pratique des essais triaxiaux classiques, un rapport H/D compris entre 2 et 2,5 est généralement adopté. Dans le cadre de cette étude, les échantillons expérimentaux présentent un rapport d'élancement compris entre 1,9 et 2,3, conforme à la norme. De même les échantillons numériques utilisés dans les simulations ont une dimension de 70 mm × 70 mm × 140 mm, soit un rapport H/D = 2, également en accord avec les recommandations en vigueur.

Par ailleurs, Lade (2016) souligne que des élancements plus faibles peuvent être envisagés, en particulier lorsque les frottements aux extrémités sont réduits grâce à l'utilisation d'embouts lubrifiés. Dans ce contexte, il rapporte des essais menés avec succès sur des échantillons très courts, jusqu'à un rapport H/D = 0,36, présentant des réponses mécaniques comparables à celles d'échantillons plus élancés, notamment en termes de courbes contrainte-déformation et d'adoucissement post-pic. Dans les simulations numériques menées dans cette étude, les parois latérales sont modélisées sans frottement, ce qui supprime l'effet parasite induit par les frottements aux interfaces et autorise, en conséquence, l'usage d'échantillons à faible élancement sans altérer significativement la réponse mécanique globale. Ce constat justifie ainsi l'exploration, dans les sections suivantes, de configurations à élancement réduit, notamment avec H/D = 0,83.

Afin de quantifier l'effet de ce paramètre sur la réponse mécanique des assemblages granulaires, une série de simulations numériques a été réalisée sur des échantillons de section carrée de 200 mm de côté, avec différentes hauteurs, correspondant à plusieurs élancements : 0,45, 0,83, 1,64 et 2,42. Les tailles des particules ayant été conservées d'un échantillon à l'autre, le nombre de grains varie en même temps que la taille des échantillons (N_{grains} = 5200, 10400, 20800, et 31200 respectivement). De même, une analyse des états initiaux révèle que les échantillons de petite taille présentent une porosité initiale plus élevée, qui diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon (n_{init} = 0,361, 0,335, 0,325, 0,319 respectivement). Cette différence de porosité résulte vraisemblablement d'une efficacité de compactage moindre dans les échantillons de faible hauteur et des effets de bords, pour lesquels le nombre total de particules est plus faible. Dans ce contexte, le processus de génération et de stabilisation atteint plus rapidement un état de pseudo-équilibre, sans permettre une réorganisation granulaire aussi efficace que dans les

volumes plus importants. Ce phénomène limite la densification, induisant un squelette plus lâche et mécaniquement plus déformable.

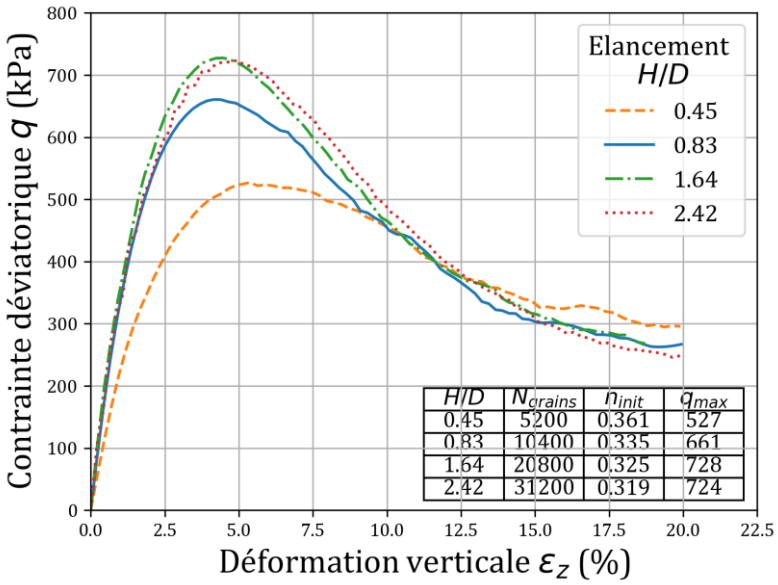


Figure 5.9. Influence de l'élancement sur la réponse contrainte-déformation d'échantillons numériques de 200 mm de section carrée sous 100 kPa de confinement.

La Figure 5.9 présente les courbes contrainte-déformation pour chacun de ces cas. Il apparaît que pour les élancements H/D = 1,64 et H/D = 2,42, les réponses mécaniques sont quasiment superposables, tant en termes de rigidité initiale que de résistance maximale et d'adoucissement post-pic. Ce comportement indique que, dans cette plage, l'élancement n'influence pas significativement la réponse mécanique, validant ainsi le caractère représentatif des échantillons. Lorsque l'élancement est réduit à H/D = 0,83, une légère réduction du pic de contrainte est observée (liée probablement à l'augmentation de porosité) : la contrainte maximale atteint environ 660 kPa, contre 725 kPa pour les échantillons plus élancés, soit une baisse relative d'environ 9 %. En revanche, la phase post-pic demeure très similaire, suggérant que l'instabilité induite par les effets de bord ou le confinement latéral reste limitée dans ce cas.

Pour un élancement encore plus faible (H/D = 0,45), une réduction significative de la résistance maximale est constatée, indiquant une influence encore plus significative de la géométrie sur le comportement mécanique (porosité et nombre de particules). La contrainte déviatorique atteint un maximum de 527 kPa, soit une diminution de près de 27 % par rapport à la valeur obtenue pour les échantillons plus élancés (H/D = 1,64 et H/D = 2,42). Cette baisse s'accompagne également d'une réduction notable de la rigidité initiale.

En conclusion, les résultats montrent que pour les échantillons simulés sans frottement latéral, un rapport $H/D \geq 0{,}83$ permet de reproduire de manière fiable le comportement mécanique observé avec des élancements plus importants. En revanche, des élancements trop faibles altèrent fortement la réponse, et doivent être évités. Un compromis acceptable est donc atteint pour H/D = 0,83, qui offre un bon compromis entre représentativité mécanique et compacité du modèle numérique.

5.3.2 Paramètres de calibration et validation du modèle

La calibration repose sur l'ajustement progressif des paramètres micromécaniques du matériau numérique, présentés au Tableau 4.2, afin de reproduire fidèlement le comportement global

observé expérimentalement par des essais de compression triaxiale, sous différents niveaux de confinement : 30, 50 et 100 kPa. Comme déjà indiqué au chapitre 3, les essais triaxiaux expérimentaux ont été réalisés à sec (absence d'eau interstitielle), ce qui permet une analyse directe en termes de contraintes effectives. Toutefois, cette condition a présenté des implications pratiques, notamment pour la mesure de la variation de volume liée au comportement dilatant du matériau, un aspect qu'il convient de reproduire fidèlement dans les simulations. La méthode retenue pour cette mesure expérimentale reposait sur le suivi du volume de fluide de confinement, en supposant une cellule triaxiale indéformable.

Une attention particulière a d'abord été portée à la forme des grains, facteur déterminant dans le comportement macro-mécanique des assemblages granulaires. Comme indiqué à la section 4.4.1.2, trois géométries de particules ont été étudiées : sphériques (S), clumps simples (C1) et clumps complexes (C2). Les résultats synthétisés dans le Tableau 4.1 montrent que le matériau C2, dont les formes de particules sont les plus proche de celles du matériau réel, est également celui qui développe un angle de frottement macroscopique apparent le plus élevé (ϕ = 50°) pour un angle de frottement interparticulaire de ϕ_{int} = 30°. Cette valeur est très proche de celle mesurée expérimentalement (ϕ = 51° sous une contrainte de confinement de 100 kPa, voir section 3.2.2). Ce bon accord justifie l'utilisation exclusive du matériau C2 pour les étapes ultérieures de calibration et pour les analyses paramétriques.

5.3.2.1 *Réponse contrainte-déformation*

L'évaluation de la réponse contrainte-déformation constitue une étape fondamentale dans la phase de calibration du modèle discret. Les résultats obtenus numériquement sont analysés en parallèle avec les données expérimentales correspondantes. Avant de faire cette analyse, il convient toutefois de s'assurer que les conditions de sollicitation numérique appliquées permettent d'effectuer les simulations à un régime quasi-statique, c'est-à-dire un état dans lequel le système demeure en équilibre mécanique à tout instant. A cette fin, le nombre inertiel « I », grandeur adimensionnelle caractéristique de la dynamique des milieux granulaires, est utilisé. Il quantifie le rapport entre les forces d'inertie associées au mouvement des grains et les forces imposées par la contrainte de confinement. Une faible valeur de I ($I \to 0$) correspond à un régime quasi-statique, tandis qu'une valeur plus élevée traduit un comportement inertiel ou dynamique.

$$I = \dot{\varepsilon} \cdot \frac{D_{50}}{\sqrt{P/\rho_s}} \tag{42}$$

Ce paramètre, défini par l'équation (42) selon GDR MiDi (2004) et Radjaï et Dubois (2011), dépend du taux de déformation axial $\dot{\varepsilon}$, du diamètre moyen des particules D_{50}, de la pression de confinement $P = \sigma_c$, et de la masse volumique des grains ρ_s. Dans cette étude, les simulations sont menées avec $\dot{\varepsilon}$ = 0,5 s^{-1}, D_{50} = 8,9 mm, et ρ_s = 2650 kg/m^3. Étant donné que le nombre inertiel est inversement proportionnel à la racine carrée de la pression de confinement, des valeurs plus faibles de P induisent des régimes plus proches du seuil inertiel.

En calculant I pour les deux valeurs extrêmes de confinement utilisées, soit 30 kPa et 100 kPa, on obtient respectivement I = 1,32 × 10^{-3} et I = 7,24 × 10^{-4}. Le seuil classiquement admis pour caractériser la limite du régime quasi-statique est $I \approx 10^{-3}$. Ainsi, bien que la valeur associée à 100 kPa confirme un régime clairement quasi-statique, la valeur obtenue sous 30 kPa se situe légèrement au-dessus de ce seuil, suggérant un régime légèrement inertiel ou transitionnel. Par conséquent, les résultats issus des simulations à haut confinement (100 kPa) peuvent être interprétés comme représentatifs d'un comportement lent sans influence notable des effets dynamiques. En revanche, à faible confinement, une certaine prudence est de mise : les effets d'inertie, bien que faibles, pourraient légèrement affecter l'amplitude du pic de contrainte ou la localisation des déformations.

1. *Rigidité initiale – Module d'Young :*

Une attention est portée au comportement initial du matériau, généralement caractérisé par le module d'Young. Ce paramètre dépend fortement de la manière dont les interactions entre particules sont modélisées à l'échelle microscopique. En particulier, la loi de contact utilisée pour représenter les forces normales entre les grains constitue un facteur déterminant.

Dans le cadre de ce travail, la loi de contact utilisée pour modéliser la rigidité normale entre les grains repose sur une formulation linéaire équivalente, définie par l'équation (10). Par ailleurs, cette rigidité normale est constante pour un contact donné et est déterminée selon l'équation (12). Elle correspond à une moyenne harmonique des rigidités des deux particules en contact, fondée sur leurs modules de contact respectifs E_{c_i} et leurs rayons r_i. Sur le plan numérique, le choix de cette loi linéaire présente l'avantage de réduire la complexité du calcul, notamment en limitant la variation du pas de temps critique, fortement influencé par la rigidité des contacts (voir Annexe A.1.2). Un module de contact entre particules E_c = 100 MPa a ainsi été retenu dans ce travail, valeur modérée permettant de reproduire un comportement macroscopique réaliste tout en garantissant une efficacité de calcul acceptable. Ce choix est conforme à ceux rencontrés dans la littérature, où des rigidités comprises entre 0,8 MPa et 80 GPa sont généralement utilisées en fonction des objectifs de l'étude (Aboul Hosn et al., 2017; Moravia, 2020; Sibille et al., 2019).

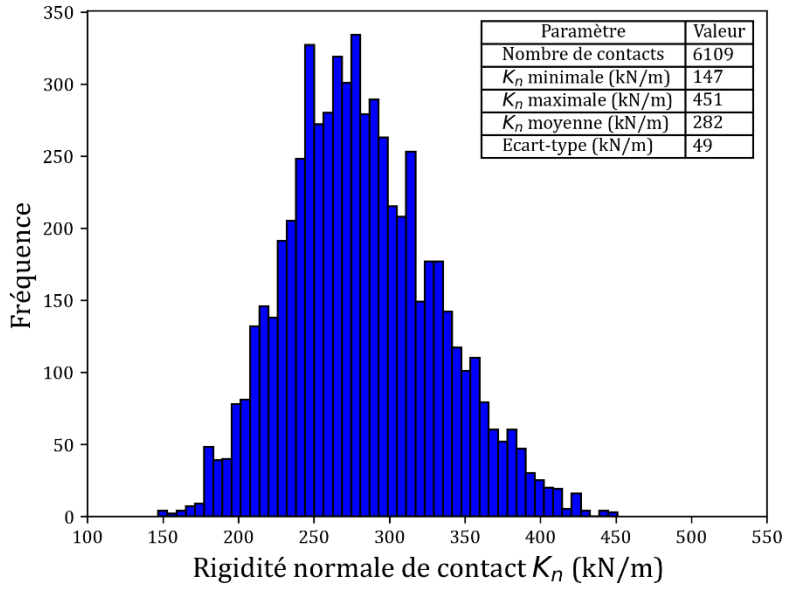
Il convient toutefois de noter que ce n'est pas la valeur absolue du module de contact qui est déterminante, mais son rapport au niveau de contrainte appliqué. Cette relation est capturée par le paramètre adimensionnel « κ », défini par l'équation (43) (en 3D) selon Aboul Hosn et al. (2016).

$$\kappa = \frac{E_c}{2 \cdot \sigma_c} \tag{43}$$

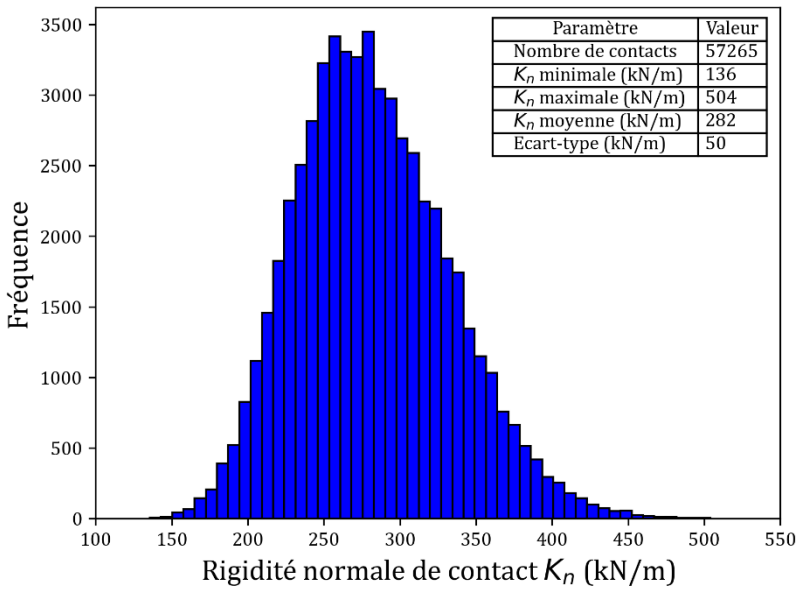
Dans le cadre de ce travail, avec des pressions de confinement variant σ_c entre 30 et 100 kPa, κ prend des valeurs comprises entre 500 et 1 667. Ces valeurs traduisent un comportement de grains modérément rigides vis-à-vis de la contrainte, contribuant à une modélisation numérique stable et à une réduction du temps de calcul. Cependant, des valeurs plus élevées de κ (souvent supérieures à 10^4) sont généralement nécessaires pour approcher fidèlement le comportement d'un assemblage de grains véritablement rigides.

Dans les simulations réalisées, où tous les grains sont constitués d'un même matériau, cette formulation conduit à une variabilité des rigidités de contact uniquement liée aux tailles des particules. Les histogrammes des rigidités normales après compactage initial (Figure 5.10), pour les échantillons de sections carrées 70 mm et 200 mm, font apparaître des distributions gaussiennes, comprises respectivement entre 147–451 kN/m et 136–504 kN/m, avec une moyenne de 282 kN/m et un écart-type de 50 kN/m. Cette hétérogénéité locale est cohérente avec les interactions naturelles entre grains de tailles diverses.

Cette loi constitue une approximation indépendante de la déformation des particules au point de contact, souvent utilisée dans les modèles DEM pour sa simplicité numérique. Contrairement à la loi de Hertz-Mindlin, qui introduit une dépendance non-linéaire de la rigidité au recouvrement « δ » ($K_n \propto \delta^{1/2}$) et donc à la contrainte normale, la formulation utilisée ici suppose que la rigidité normale de contact « K_n » reste constante pour un couple donné de particules, et ce indépendamment du confinement. Autrement dit, cette rigidité ne varie ni avec le recouvrement local, ni avec la pression de confinement appliquée, ce qui représente une simplification par rapport au comportement réel des sols granulaires.



(a)



(b)

Figure 5.10. Distribution des rigidités normales de contact après compactage initial pour un échantillon numérique de section carrée de (a) 70 mm et (b) 200 mm.

Tableau 5.1. Synthèse des modules d'Young et des valeurs de contraintes et de déformations obtenus numériquement aux pics, selon le niveau de confinement.

Confinement (kPa)	Module de Young apparent E (MPa)		Résistance maximale q_{max} (kPa)		Déformation axiale verticale ε_z (%)	
	E_{Exp}	E_{Num}	$q_{max,\ Exp}$	$q_{max,\ Num}$	$\varepsilon_{z,\ Exp}$	$\varepsilon_{z,\ Num}$
30	18,7	15,1	259	209	3,53	3,91
50	19,1	21,2	400	350	4,24	4,33
100	29,2	29,3	626	691	6,02	5,23

Après avoir vérifié l'indépendance de la rigidité de contact vis-à-vis du confinement, il est désormais possible d'évaluer la réponse mécanique globale du matériau simulé. La rigidité initiale, ou module de Young apparent, est ensuite estimée à partir de la pente de la courbe

contrainte-déformation axiale dans la zone linéaire élastique, soit à environ 1 % de déformation axiale. La Figure 5.11 présente les courbes contrainte-déformation simulées, comparées aux résultats expérimentaux. Les modules d'Young ainsi que les pics de contrainte atteints à chaque niveau de confinement avec les déformations axiales correspondantes sont synthétisés dans le Tableau 5.1.

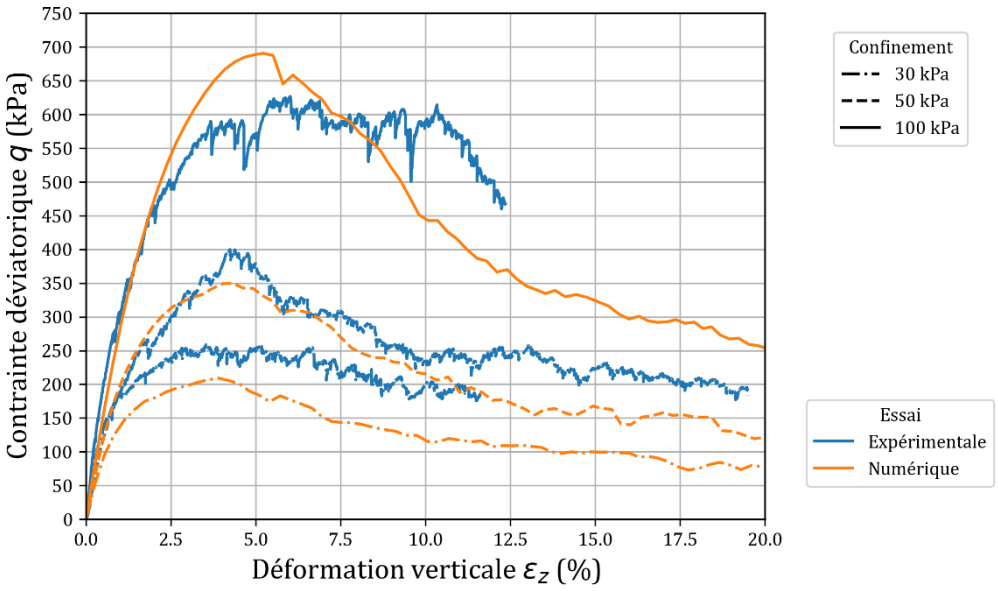


Figure 5.11. Comparaison des courbes contrainte déviatorique–déformation axiale issues des essais expérimentaux et numériques (échantillons de 70 mm, clumps C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa).

Les résultats obtenus (Figure 5.11) mettent en évidence une tendance générale correctement restituée par le modèle : la rigidité initiale ainsi que la contrainte maximale augmentent avec le niveau de confinement, conformément aux observations expérimentales. Cette évolution reflète le comportement usuel des matériaux granulaires, pour lesquels la compaction du squelette granulaire et l'accroissement du nombre des contacts intergranulaires sous confinement contribuent à une augmentation de la réponse globale.

Cependant, une analyse plus fine des valeurs numériques révèle certains écarts notables à faible confinement. A 30 kPa, le module d'Young estimé à partir de la simulation est inférieur de près de 20 % par rapport à la valeur mesurée expérimentalement (15,1 MPa contre 18,7 MPa). A 50 kPa, ces écarts restent présents, bien que réduits, le module d'Young est surestimé cette fois d'environ 11 % (21,2 MPa contre 19,1 MPa). En revanche, à 100 kPa, la réponse simulée est en bon accord avec les résultats expérimentaux, avec un écart négligeable pour la pente initiale (29,3 MPa contre 29,2 MPa). Ces écarts aux faibles confinements peuvent s'expliquer par la nature de la loi de contact utilisée dans le modèle DEM, qui repose sur une formulation linéaire indépendante de la contrainte normale. En l'absence de dépendance de la rigidité des contacts aux charges normales, le module global du matériau simulé reste constant, et ne bénéficie pas de l'effet de « raideur croissante » observé expérimentalement avec l'augmentation du confinement. Par conséquent, selon le point de calibration choisi, le modèle peut surestimer ou sous-estimer les modules à faible ou fort confinement, ce qui constitue une limitation typique des modèles à rigidité constante (Radjaï et Dubois, 2011).

Malgré ces écarts obtenus aux faibles confinements, la tendance générale est correctement reproduite et les valeurs simulées restent dans une gamme d'erreur acceptable, notamment sous

σ_c = 100 kPa, où la correspondance entre simulation et expérimentation est bonne. L'ajustement des rigidités initiales est donc jugé satisfaisant pour la suite de l'étude.

2. *Pic de résistance :*

Après l'analyse de la rigidité initiale, l'évaluation du pic de résistance constitue une étape essentielle pour valider la capacité du modèle à reproduire le comportement mécanique complet du matériau. Le pic de contrainte déviatorique « q_{max} » et la déformation axiale correspondante, obtenus à partir des courbes simulées, sont confrontés aux mesures expérimentales pour les trois niveaux de confinement étudiés (voir Figure 5.11 et Tableau 5.1 correspondant).

Les résultats obtenus mettent en évidence une bonne capacité du modèle numérique à reproduire l'évolution de la résistance maximale avec l'augmentation de la pression de confinement. Les pics de contrainte déviatorique simulés suivent la même tendance croissante que ceux mesurés expérimentalement aux trois niveaux de confinement considérés (30, 50 et 100 kPa). A 100 kPa, la contrainte maximale expérimentale atteint 626 kPa, contre 691 kPa pour la simulation, soit un écart relatif de 10 %. Cette légère surestimation reste satisfaisante et confirme la fiabilité du modèle à ce niveau de chargement, tant sur le plan de l'amplitude que pour la tendance générale. Cependant, a plus faible confinement (30 et 50 kPa), les simulations sous-estiment les pics de contrainte. A titre d'exemple, à 30 kPa, la valeur expérimentale de 259 kPa est comparée à 209 kPa en numérique, soit un écart plus marqué de ≈ 19 %. A 50 kPa, le pic est de 400 kPa en laboratoire contre 350 kPa dans la simulation, ce qui représente un écart de ≈ 12,5 %.

Ces écarts décroissants à mesure que la pression de confinement augmente traduisent une sous-estimation systématique du pic de résistance par le modèle DEM, particulièrement notable à faibles confinements. Cela peut être attribué, comme discuté précédemment, à la loi de contact utilisée dans la simulation, qui ne permet pas une augmentation progressive de la rigidité avec la contrainte normale ni une variation de l'angle de frottement microscopique avec le niveau de confinement. Cette limitation restreint la capacité du modèle à reproduire les effets de renforcement progressif observés expérimentalement à faibles confinements.

Concernant la déformation axiale au pic, une analyse comparative entre les essais expérimentaux et les simulations numériques révèle des écarts significatifs à deux des trois niveaux de confinement. A 50 kPa, la correspondance est remarquable : la déformation au pic atteint 4,24 % dans les essais contre 4,33 % dans le modèle numérique, soit un écart très faible de seulement ≈ 2,1 %. Ce résultat indique une excellente calibration du comportement à l'approche du pic pour ce niveau de confinement, aussi bien en termes de résistance que de cinématique de déformation. En revanche, les divergences sont plus marquées aux confinements de 30 et 100 kPa. D'après les tableaux issus du traitement des données (valeurs maximales dans les tableaux expérimentaux et numériques), le pic est atteint à 3,53 % expérimentalement et à 3,91 % numériquement à 30 kPa, soit un écart relatif de ≈ 10 %. A 100 kPa, la déformation au pic est de 6,02 % en laboratoire, contre 5,23 % dans la simulation, ce qui représente un écart encore plus important. Toutefois, il est important de noter que, dans les essais expérimentaux à 30 et 100 kPa, la contrainte déviatorique maximale est précédée de petites fluctuations et n'est pas toujours associée à un pic net. Des pics locaux sont souvent observés à des niveaux de déformation plus faibles. Ce constat suggère que les valeurs extraites à partir des maximas globaux peuvent surestimer la déformation réelle à laquelle la rupture initiale se manifeste. En revanche, le modèle numérique présente des pics bien définis, atteints plus rapidement, traduisant un comportement plus homogène.

Ces écarts reflètent une mobilisation plus rapide des mécanismes de rupture dans le modèle DEM, conséquence d'une structure granulaire plus régulière, d'une absence de zones faibles, et d'un réseau de contacts relativement uniforme. Dans l'échantillon numérique, la transmission des

efforts se fait de manière plus directe, sans retard lié à des réarrangements internes ou à la formation de bandes de localisation complexes. Ce phénomène est typique des milieux numériques discrets calibrés avec des lois de contact simples, où les redistributions localisées d'énergie sont peu développées. En conséquence, la rupture s'amorce à des déformations plus faibles que dans le matériau réel, où l'hétérogénéité favorise une dissipation plus étalée dans le temps et une plus grande résistance à la localisation initiale.

3. *Comportement post-pic :*

La phase post-pic constitue un indicateur essentiel de la capacité d'un modèle à représenter fidèlement le comportement résiduel des matériaux granulaires soumis au cisaillement. Les essais expérimentaux réalisés montrent des réponses différenciées selon le niveau de confinement (Figure 5.11). A 50 kPa, un adoucissement net est observé après l'atteinte du pic de contrainte déviatorique, traduisant une perte progressive de portance typique d'un comportement ductile. En revanche, pour les confinements de 30 et 100 kPa, la courbe contrainte-déformation présente une phase de stabilisation relative après le pic, sans réelle chute marquée. Toutefois, cette observation est à nuancer, car les essais expérimentaux correspondants ont été parfois interrompus prématurément en raison de déchirures de la membrane, limitant ainsi l'analyse complète de la phase post-pic. Dans les deux cas, la contrainte semble se maintenir autour de la valeur maximale pendant un certain intervalle de déformation, suggérant une possible transition vers un comportement résiduel sans effondrement immédiat de la structure granulaire.

A l'inverse, dans les simulations numériques, un comportement systématiquement adoucissant est enregistré quelle que soit la pression de confinement. Après le pic de contrainte, la résistance déviatorique décroît de manière continue et relativement progressive, indiquant une transition douce vers un état résiduel. Ce comportement est caractéristique des milieux granulaires simulés à l'aide d'un modèle discret avec géométrie régulière et contacts homogènes. L'absence de défauts localisés, d'anisotropies structurales marquées limite la formation de zones de blocage, de dilatance structurale ou de localisation de déformation, éléments qui participent en général à la rétention temporaire de la résistance après le pic dans les matériaux réels.

Ces différences entre les réponses expérimentales et numériques se traduisent également par l'évolution du rapport de contrainte « q/p », défini comme le rapport entre la contrainte déviatorique « q » et la contrainte moyenne « p » (voir équation (44)).

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \tag{44}$$

Ce paramètre est couramment utilisé comme indicateur de la mobilisation du cisaillement relativement à l'état de contrainte isotrope (Aboul Hosn et al., 2016 ; Sibille et al., 2018). Dans les essais expérimentaux, les valeurs maximales du rapport q/p atteignent 2,23 à 30 kPa, 2,18 à 50 kPa, et 2,03 à 100 kPa, traduisant une forte mobilisation du cisaillement en phase de pic (Figure 5.12). Dans les simulations, ces valeurs maximales sont légèrement inférieures, autour de 2.09 pour les trois niveaux de confinement. La tendance d'évolution est cependant bien reproduite dans les modèles numériques, avec une croissance progressive de q/p jusqu'au pic, suivie d'une décroissance continue en post-pic.

Il est important de noter que la phase post-pic dans le modèle converge systématiquement vers une valeur asymptotique de $q/p \approx 1{,}37$, bien inférieure à la valeur expérimentale résiduelle estimée autour de 1,65. Cet écart s'explique très probablement par la forme des grains utilisée dans la modélisation numérique (agrégats de sphères), contrairement au matériau réel composé de grains anguleux. Or, la morphologie des grains joue un rôle majeur dans la résistance au cisaillement à l'état résiduel, comme l'ont montré notamment Aboul Hosn et al. (2016) et Sibille

et al. (2018). L'absence d'angularité des grains numériques conduit ainsi à une résistance résiduelle plus faible.

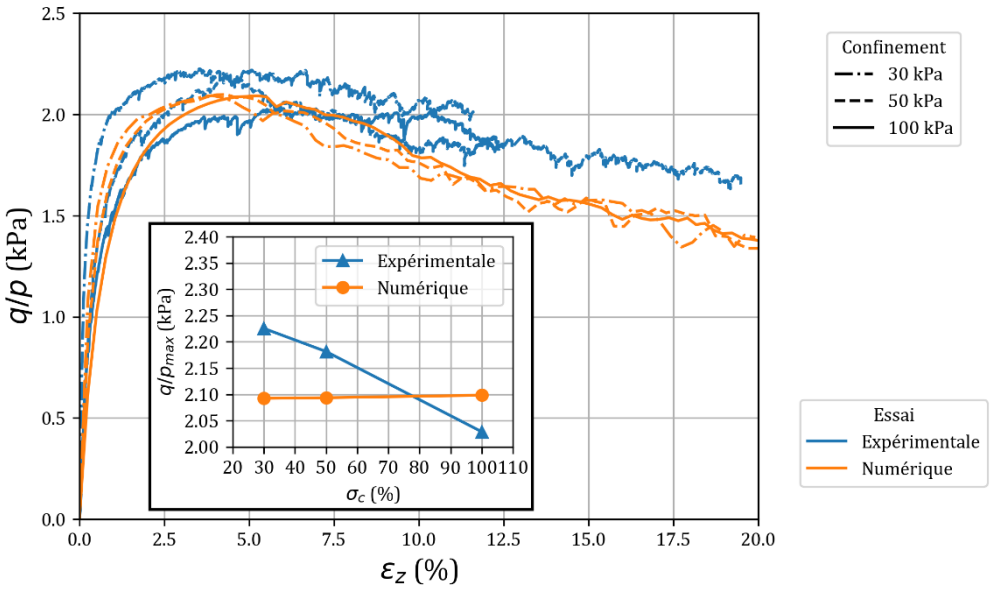


Figure 5.12. Evolution du rapport de contraintes q/p issue des essais expérimentaux et des simulations numériques (échantillons de 70 mm, particules clump C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa).

En résumé, les simulations reproduisent fidèlement la tendance générale du comportement post-pic, mais avec un radoucissement plus prononcé et une capacité résiduelle sous-estimée, révélant certaines limitations du modèle de contact linéaire en termes de frottement résiduel et de dépendance à la pression moyenne.

5.3.2.2 *Réponse volumétrique*

Après avoir analysé la réponse contrainte-déformation, cette section se concentre sur le comportement volumétrique des échantillons simulés et expérimentaux. L'évolution des variations volumiques permet ici d'évaluer la capacité du modèle DEM à reproduire les phases de contractance et de dilatance caractéristiques des sols granulaires denses sous chargement triaxial.

La déformation volumique a été obtenue numériquement en sommant les trois déformations principales (équation (39)), alors qu'expérimentalement, elle a été mesurée à partir de la différence du volume d'eau expulsé de la cellule triaxiale « ΔV_{Eau} » du dispositif d'essais et du volume occupé par le déplacement du piston « V_{Piston} », ramené au volume initial de l'échantillon « V_{Ech} » déterminé à partir des mesures de diamètre D et de hauteur H après compactage (voir équation (6)). Malgré des méthodes de mesure différentes, le comportement volumétrique des échantillons, illustré à la Figure 5.13, met en évidence un phasage classique de contractance initiale suivie d'une dilatance, avec une intensité variable selon le niveau de confinement. Cette évolution, caractéristique des sols granulaires denses soumis à un cisaillement, est reproduite de manière cohérente à la fois par les essais expérimentaux et les simulations numériques, tant sur le plan qualitatif que sur la chronologie des phases de déformation. Toutefois, les résultats numériques révèlent une amplitude nettement plus marquée des variations volumétriques, indépendamment du niveau de confinement appliqué.

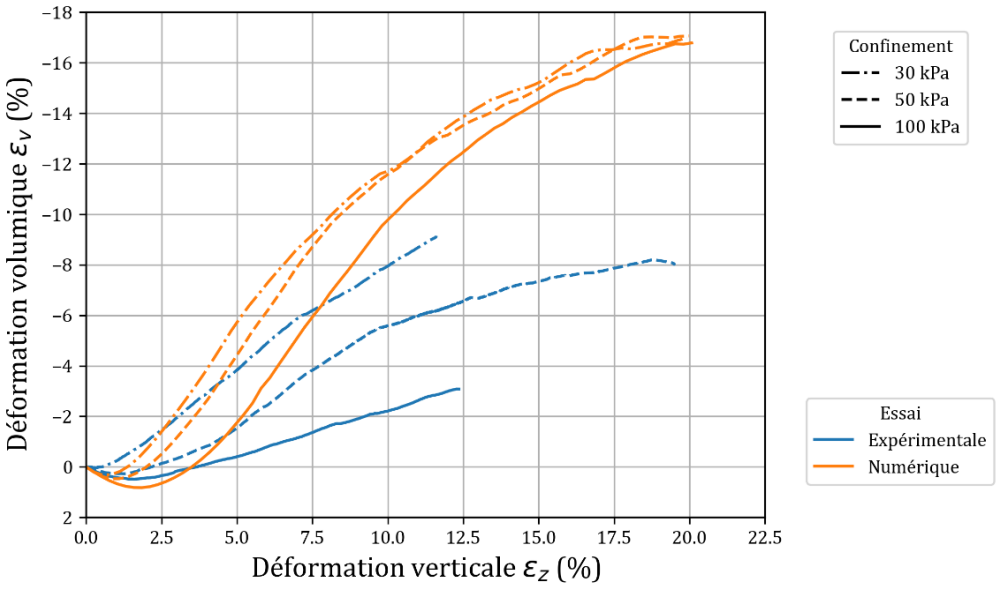


Figure 5.13. Evolution de la déformation volumique issue des essais expérimentaux et des simulations numériques (échantillons de 70 mm, particules clump C2, confinements de 30, 50 et 100 kPa).

L'angle de dilatance, calculé au pic de résistance à partir de la formulation (équation (27)), conforte cette observation. Dans les essais expérimentaux, l'angle de dilatance diminue avec l'augmentation du confinement, passant de 19° à 30 kPa à 9° à 100 kPa (déjà interprété à la section 3.2.2), en cohérence avec la diminution progressive du taux de dilatance sous effet de la contrainte moyenne. Toutefois, le modèle numérique surestime cet angle dans tous les cas : il atteint 28,1° à 30 kPa, 28,5° à 50 kPa, et reste encore élevé à 25,2° pour 100 kPa.

Ces résultats suggèrent que, bien que le modèle numérique restitue fidèlement l'évolution qualitative du comportement volumique, il tend à surestimer la dilatance en raison de la nature idéalisée de la microstructure simulée. Ils soulignent les limites de ce modèle DEM basé sur des particules de type C2, notamment en ce qui concerne la représentation des mécanismes réels de dissipation par frottement et blocage local. Ces écarts doivent être interprétés non comme une limitation du modèle numérique, mais comme les conséquences prévisibles de l'idéalisme géométrique et de l'homogénéité granulaire du modèle. Il est par ailleurs possible d'améliorer l'accord avec les données expérimentales en ajustant certains paramètres du modèle, tels que l'angle de frottement intergranulaire ou la densité initiale. Des améliorations futures, telles que l'introduction de particules aux formes plus irrégulières ou de lois de contact non linéaires, pourraient permettre de mieux encadrer la réponse volumique simulée, en restituant plus fidèlement l'équilibre entre contraction initiale et dilatance post-pic observée expérimentalement.

5.3.2.3 *Synthèse sur la calibration et validation du modèle*

En résumé, bien que fondé sur une loi de contact linéaire à rigidités constantes, le modèle numérique calibré présente un comportement global satisfaisant, en particulier sous un confinement de 100 kPa qui a servi de référence pour la calibration. À ce niveau de contrainte, la réponse contrainte-déformation obtenue restitue avec fidélité la rigidité initiale, le pic de résistance ainsi que l'évolution du rapport q/p. À plus faibles niveaux de confinement (30 et 50 kPa), des écarts apparaissent, notamment une sous-estimation de la rigidité initiale et une surestimation du pic, imputables à l'absence d'amplification progressive de la rigidité des contacts sous l'effet des sollicitations normales croissantes et à la non prise en compte de la valeur de l'angle de frottement microscopique entre les particules en fonction du confinement. Cette

limitation structurelle du modèle linéaire influe également sur le comportement post-pic, dont l'évolution simulée diffère sensiblement de celle observée expérimentalement. Par ailleurs, la résistance résiduelle reste sous-estimée, principalement en raison de la morphologie simplifiée des grains simulés, moins anguleux que ceux du matériau réel.

L'analyse du comportement volumétrique confirme ces observations. Le modèle DEM reproduit bien la succession des phases de contractance et de dilatance propres aux matériaux granulaires denses soumis au cisaillement. Toutefois, l'amplitude de la dilatance est nettement surestimée dans les simulations, en raison de la géométrie idéalisée des grains, de la faible rugosité intergranulaire, et de l'invariance des rigidités de contact. Ces facteurs favorisent une mobilité accrue des particules et accélèrent les réarrangements après le pic de contrainte, entraînant des variations volumiques excessives par rapport aux mesures expérimentales, notamment sous faible confinement. Cette réponse pourrait être corrigée, en partie du moins, par une calibration plus poussée de l'angle de frottement au contact combiné à l'état de densité initial.

Ces résultats montrent que le modèle, bien que limité sur certains aspects micromécaniques, restitue correctement les tendances globales et les paramètres clés du comportement mécanique du matériau étudié. L'adoption d'une loi de contact non linéaire, de type Hertz-Mindlin, permettrait d'introduire une dépendance réaliste entre la rigidité de contact et la charge normale, améliorant ainsi la description des effets de confinement et de la réponse post-pic. Une telle amélioration, bien qu'exigeante en temps de calcul, constituerait une avancée pertinente pour l'étude de comportements complexes sous grandes déformations ou fortes pressions.

Compte tenu de sa capacité à reproduire fidèlement l'angle de frottement apparent, la rigidité initiale et les contraintes maximales observées sous 100 kPa de confinement, le modèle basé sur l'utilisation de clumps C2 calibré dans ces conditions est retenu pour les analyses numériques approfondies des sections suivantes portant essentiellement sur les interactions sol-géogrille et sur le rôle de la géogrille sur le renforcement. Ce choix constitue un compromis acceptable entre représentativité physique et efficacité numérique.

5.3.3 Analyse comparative des états initiaux : validation du modèle numérique à partir d'imagerie 3D

Cette section vise à évaluer la cohérence entre les états observés expérimentalement par tomographie aux rayons X et ceux reproduits numériquement à l'aide du modèle DEM, pour les échantillons de dimensions 200 mm × 200 mm × 200 mm. L'analyse se concentre spécifiquement sur la zone d'interaction entre le squelette granulaire et la géogrille, où la distribution locale des grains, les porosités initiales et la configuration dans les ouvertures jouent un rôle déterminant dans la réponse mécanique du système. La confrontation des données issues des reconstructions tomographiques aux états initiaux générés dans les simulations permet de valider la représentativité géométrique du modèle et d'identifier les éventuelles divergences structurelles susceptibles d'influencer l'initiation des mécanismes d'interaction sol–renforcement. La distribution locale de la porosité, déjà analysée expérimentalement dans les sections précédentes, est ici revisitée à proximité immédiate de la géogrille afin d'identifier les effets d'organisation initiale induits par la présence du renforcement dans le modèle numérique.

5.3.3.1 *Procédure retenue pour l'étude de la microstructure*

La simple exploitation des profils de niveaux de gris, bien qu'utilisés dans les sections précédentes pour identifier les zones de variation locale de porosité, demeure insuffisante pour caractériser finement la microstructure. En effet, ces profils reflètent essentiellement des contrastes globaux d'absorption des rayons X, sans permettre l'identification individuelle des grains ni une quantification précise de la structure interne. La chute locale du niveau de gris à proximité de la

géogrille témoigne d'une désorganisation locale du squelette granulaire, mais reste une indication qualitative. Une analyse plus poussée, fondée sur la segmentation explicite des grains, s'avère donc nécessaire pour confirmer et quantifier ces observations.

Toutefois, comme indiqué au chapitre 3, le volume des acquisitions tomographiques étant très important, une réduction ciblée du domaine analysé a été opérée. Deux configurations représentatives ont été retenues : l'une avec géogrille biaxiale, l'autre sans géogrille, toutes deux extraites sur la totalité de la section horizontale. L'analyse des profils de niveau de gris (Figure 3.35) a montré que les effets de bord deviennent négligeables au-delà de 22 à 25 mm de part et d'autre de la géogrille. Cela justifie la réduction de la hauteur du volume considéré à environ 44 à 50 mm, en centrant la géogrille dans cette zone d'intérêt. Ce découpage permet de conserver l'essentiel de la structure d'interaction tout en réduisant significativement la taille des données et le temps de traitement.

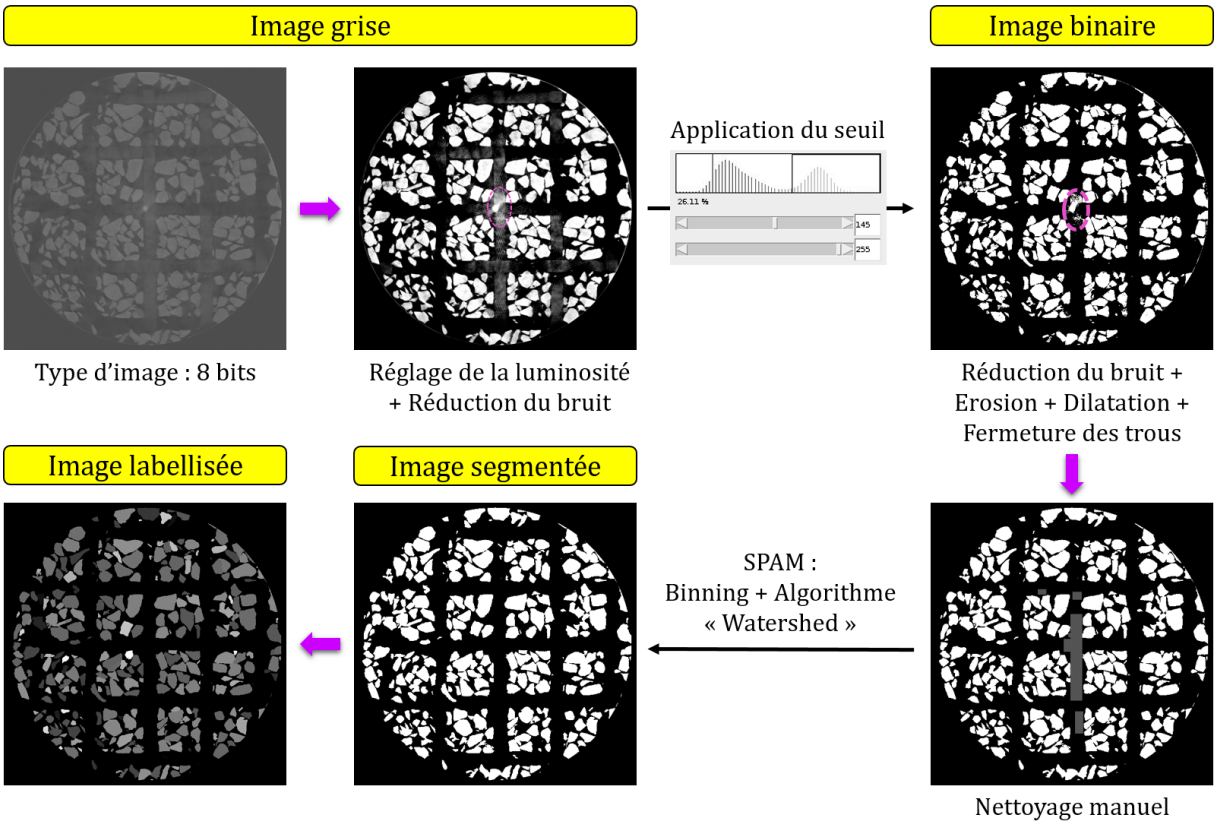


Figure 5.14. Illustration du processus de segmentation des grains sur une coupe 2D extraite du volume tomographique réduit.

Les étapes de traitement d'image ont ensuite été appliquées (Figure 5.14) conformément à la méthodologie décrite dans les sections 3.3.2 et 3.3.3.2. Le volume extrait a d'abord été converti de 32 bits à 8 bits, puis prétraité dans Fiji selon la procédure suivante : réglage automatique de la luminosité, application de l'algorithme de réduction du bruit « Despeckle », puis seuillage de l'image « Threshold ». Le réglage automatique de la luminosité permet d'optimiser l'affichage de l'image en ajustant automatiquement l'échelle des niveaux de gris afin de mieux faire ressortir les contrastes entre les différentes phases. Ensuite, l'algorithme de réduction du bruit, appliqué à trois reprises, sert à éliminer les éléments indésirables et parasites présents dans l'image, ce qui améliore la qualité du signal et facilite la segmentation. Enfin, le seuillage sur la plage [145–255] consiste à convertir l'image en binaire (noir et blanc) en conservant uniquement les pixels dont l'intensité se situe dans cette plage, permettant ainsi d'isoler les grains du reste du volume (vides,

géogrille et autres éléments moins denses). La segmentation visait ici uniquement les grains, la géogrille n'étant pas détectable, elle a été assimilée à du vide. L'image binaire obtenue a été affinée par une série d'opérations morphologiques : réduction du bruit par Despeckle (×3), érosion (×3), dilatation (×2) et comblement des trous (×2). Ces opérations ont pour but de renforcer la continuité des contours, éliminer les particules parasites, rétablir la forme des grains érodés, et garantir la fermeture des volumes internes, assurant ainsi une meilleure qualité de segmentation et une représentation plus fidèle de la structure granulaire. Cependant, comme déjà mentionné dans l'analyse expérimentale, les artefacts de reconstruction liés à la géométrie du scanner ont induit une superposition locale de matière, visible sous forme de zones de densité anormalement élevée au centre de l'échantillon (cercle en pointillé). Ces zones, interprétées comme des artéfacts, ont été éliminées manuellement pour ne pas biaiser l'analyse.

Cette procédure a pu être appliquée aux deux configurations (avec et sans géogrille), en conservant une méthodologie identique. Des ajustements mineurs ont été nécessaires, notamment dans les opérations morphologiques, afin de s'adapter aux variations de niveau de gris entre les deux cas.

Un binning (réduction de résolution) par un facteur 2 a ensuite été appliqué sur les images binaires à l'aide de la bibliothèque SPAM « Software for Practical Analysis of Materials » (Stamati et al., 2020), développée au laboratoire 3SR (Université Grenoble Alpes). Il s'agit d'un paquetage Python qui couvre les besoins d'analyse de données provenant de travaux de tomographie 3D à rayons X et de champs aléatoires corrélés avec des applications mécaniques. Le binning, réalisé avec la fonction « spam.DIC.binning() », permet de réduire la taille des images tout en lissant les contours des objets segmentés. Étant donné que les images sont binaires (valeurs 0 et 255), une seconde binarisation a été effectuée pour ramener les valeurs à 0 (vide) et 1 (grain), facilitant le traitement numérique ultérieur. La segmentation finale a été réalisée à l'aide de la fonction « spam.label.watershed() » appliquée sur l'image binaire. Cette méthode repose sur un algorithme de séparation topographique qui permet d'identifier individuellement les grains même lorsqu'ils sont faiblement séparés, en simulant un remplissage progressif des bassins de distance locale.

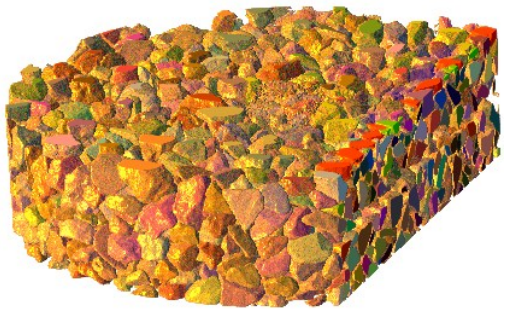


Figure 5.15. Volume tomographique 3D segmenté et labellisé au voisinage de la géogrille, représentée ici avec une coupe verticale (à droite) afin d'illustrer son traitement comme un volume vide à mi-hauteur.

Afin d'illustrer visuellement le résultat de cette procédure de traitement, la Figure 5.15 présente un extrait du volume segmenté et labellisé. Chaque grain y est identifié par une étiquette unique, mettant en évidence la capacité de l'algorithme à reconstruire efficacement la structure discrète du squelette granulaire à partir des données tomographiques. Cet état labellisé constitue la base des analyses quantitatives développées dans la section suivante, où les propriétés géométriques locales des grains seront extraites et comparées avec les simulations numériques.

5.3.3.2 *Evaluation de la représentativité géométrique des grains*

Maintenant que les grains ont été identifiés individuellement grâce à la procédure de segmentation et de labellisation, il est possible d'extraire des grandeurs caractéristiques liées à leur géométrie. La bibliothèque SPAM propose pour cela une série de fonctions dédiées aux mesures basées sur les étiquettes.

1. *<u>Analyse des formes – classification de Zingg :</u>*

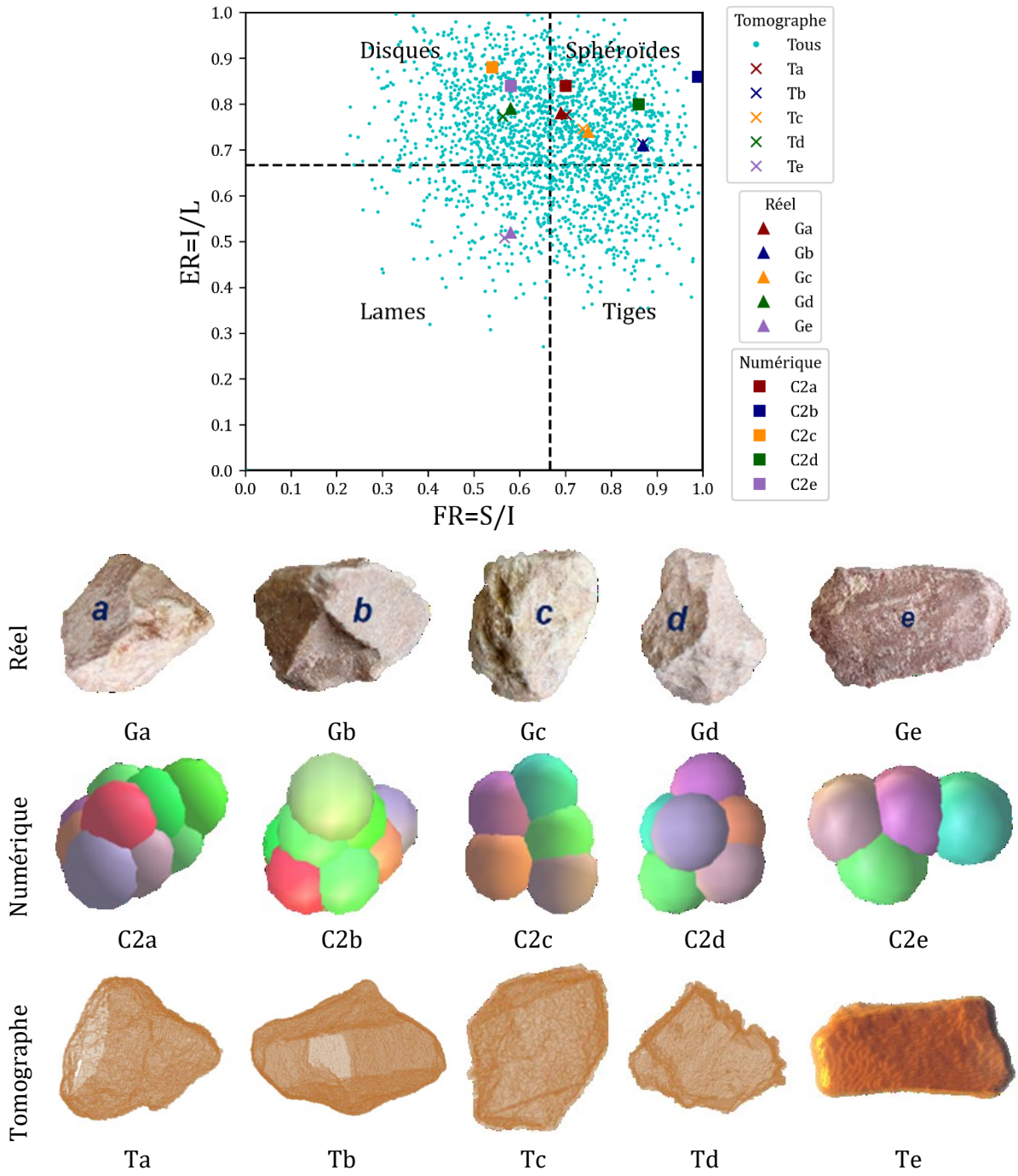


Figure 5.16. Analyse de forme des grains segmentés selon la classification de Zingg, et comparaison avec des grains réels, numériques et segmentés pour les cas de référence « a » à « e ».

La première propriété géométrique analysée concerne la forme des grains segmentés à partir des données tomographiques. L'objectif est d'évaluer leur distribution morphologique et de la

comparer aux observations expérimentales (section 3.1.1) ainsi qu'aux représentations numériques développées dans le cadre du modèle de clumps (section 4.4.1) notamment pour les grains de référence notés « a » à « e » (voir Figure 4.7 et Figure 5.16).

Conformément à la méthode de Zingg, la forme d'un grain est caractérisée à partir des trois longueurs principales d'un prisme rectangulaire inscrit. Dans cette étude, ces longueurs sont approximées par un ajustement ellipsoïdal, réalisé à l'aide de la fonction « spam.label.ellipseAxes() », qui calcule les longueurs des demi-axes principaux $a \geq b \geq c$. Les deux rapports géométriques en sont déduits : le rapport d'élongation ($ER = b/a$) et le rapport de planéité ($FR = c/b$), permettant ensuite de classer la forme de chaque grain, selon les seuils standards.

La Figure 5.16 présente la répartition des grains segmentés dans le diagramme de Zingg, où sont également présentées les classifications des formes typiques pour les grains de référence. Les résultats indiquent que la majorité des grains est localisée autour du point $ER = FR = 0{,}67$, correspondant à l'intersection des quatre classes morphologiques. Cette distribution traduit une morphologie globalement équilibrée, avec une tendance majoritairement orientée vers des formes sphéroïdes ou aux disques plutôt que des lames et des tiges, ce qui corrobore les observations expérimentales du Chapitre 3.

Les valeurs obtenues pour les grains sélectionnés « a » à « e », sont également comparés, selon trois approches : (1) les mesures manuelles effectuées sur les grains réels, (2) les modèles numériques de clumps utilisés dans les simulations (type C2), et (3) les dimensions issues de la segmentation tomographique. Les résultats révèlent un bon accord entre les grains réels et les grains segmentés. Bien que les clumps numériques ne reproduisent pas précisément la géométrie des grains réels (ceux-ci n'ayant pas encore été scannés au moment de leur modélisation), ils appartiennent à la même catégorie morphologique dominante, à savoir les sphéroïdes et les disques. Cette observation valide rétrospectivement la représentativité morphologique du modèle numérique de clumps et confirme la cohérence globale entre les différentes approches.

2. *Vérification de la distribution granulométrique équivalente :*

Une fois la validité morphologique des grains segmentés confirmée, l'analyse peut se poursuivre avec l'évaluation de la distribution de taille des particules, obtenue à l'aide de la fonction « spam.label.equivalentRadii() ». Cette fonction calcule, pour chaque grain, le rayon d'une sphère équivalente ayant le même volume que la particule réelle segmentée.

Les distributions de taille ainsi obtenues sont représentées sous forme de courbes de masse cumulative à l'aide de la fonction « spam.plotting.plotParticleSizeDistribution() ». La Figure 5.17 illustre les résultats issus des deux volumes tomographiques (avec et sans géogrille) comparés à la distribution granulométrique expérimentale obtenue par tamisage ainsi qu'à celle du modèle numérique à clumps C2.

Comme discuté en section 5.2, un léger écart est observé entre la courbe du modèle DEM et celle du tamisage expérimental. Cet écart s'explique principalement par la méthode de génération numérique des particules. En ce qui concerne les deux acquisitions tomographiques, la segmentation portant sur les grains solides en présence ou en l'absence de géogrille n'affecte pas la distribution de taille. Cette hypothèse est confirmée par la superposition quasi parfaite des courbes associées aux deux configurations scannées.

La comparaison entre les courbes issues des volumes tomographiques et celle du modèle numérique met en évidence une bonne cohérence, notamment en termes de diamètre moyen des grains. En revanche, un écart plus significatif est observé avec la courbe expérimentale de

tamisage. Celui-ci peut s'expliquer par la nature des méthodes de mesure : la méthode tomographique considère comme taille de particule le diamètre d'une sphère de même volume que la particule considérée, tandis que le tamisage repose sur le passage de particules à travers des mailles carrées normalisées, ce qui introduit une dépendance à l'orientation et à la forme des grains. En effet, pour des particules anguleuses ou irrégulières, le tamisage peut soit surestimer la taille (si des particules longues se coincent dans les mailles), soit la sous-estimer (si certaines passent à travers une orientation favorable). À l'inverse, le rayon équivalent issu de la segmentation d'image tend à lisser ces effets en supposant une forme sphérique, ce qui peut conduire à des écarts d'interprétation sur les classes granulométriques les plus fines ou les plus grossières.

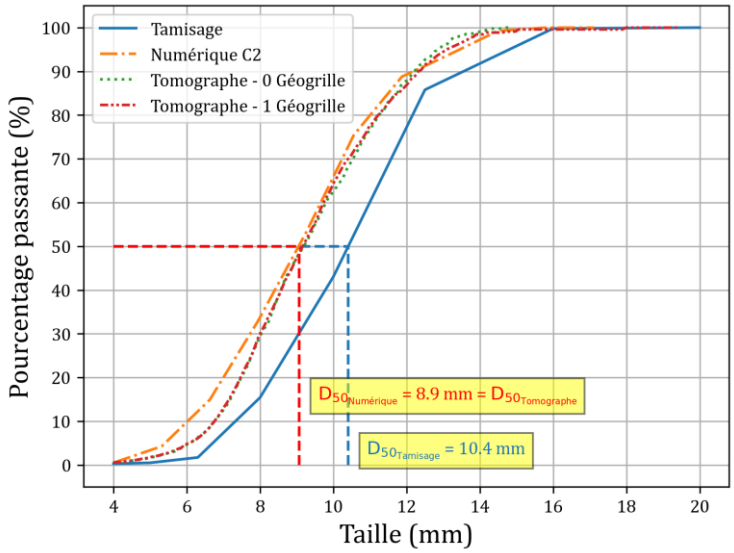


Figure 5.17. Distribution granulométrique : comparaison entre volumes tomographiques, simulation numérique (clumps C2) et courbe de tamisage.

5.3.3.3 *Analyse quantitative de la porosité locale*

Après la vérification de la distribution granulométrique, l'analyse se poursuit avec l'étude de la porosité locale, qui constitue un indicateur clé de la structure interne des matériaux granulaires. Cette section vise à comparer les résultats issus des mesures tomographiques et numériques, en exploitant une approche commune de discrétisation volumique.

1. *Méthodologie de calcul de la porosité :*

La porosité globale a déjà été estimée expérimentalement à environ 0,41, à partir de la masse volumique apparente de l'échantillon (voir équation (4)), tandis qu'une valeur d'environ 0,33 a été déterminée numériquement, en utilisant le rapport entre le volume des particules et celui du volume total (équations (40) et (41)). Dans cette partie, une analyse plus fine est proposée en s'appuyant sur la cartographie de la porosité et sur son évolution le long de la hauteur de l'échantillon. Pour cela, on s'appuie sur un calcul local de la porosité, à partir des images segmentées ou des volumes numériques discrétisés.

Traitement des données tomographiques :

Étant donné que les volumes reconstruits par tomographie sont composés de voxels binaires (valeurs 0 pour les vides, 1 pour les solides), de dimension 0.05 mm × 0.05 mm × 0.05 mm, il est possible de calculer la porosité locale à partir du rapport entre le nombre de voxels solides et le nombre total de voxels dans un sous-volume donné. Cette méthode repose sur le même principe

que l'équation (40), mais ici le volume des grains est estimé par la somme des voxels inclus dans les grains labellisés, en excluant les fractions extérieures au sous-volume analysé. Un script Python a été développé à cet effet, basé sur une discrétisation établie sur la hauteur qui permet de déterminer, pour chaque tranche horizontale, la porosité moyenne de celle-ci.

Traitement des données numériques :

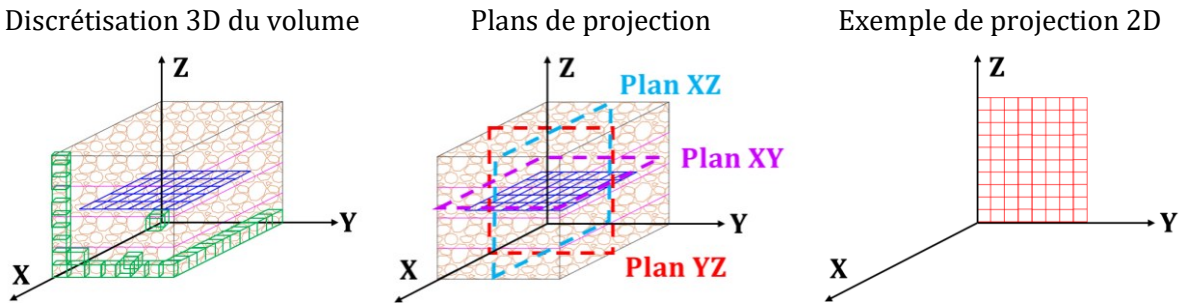


Figure 5.18. Méthodologie d'estimation locale de la porosité : discrétisation 3D du volume, sélection du plan de projection et projection 2D par moyenne dans la direction orthogonale.

De manière équivalente, le volume du modèle numérique a été discrétisé en cubes (voxels) de 5 mm × 5 mm × 5 mm (Figure 5.18) une taille choisie en cohérence avec la plus petite taille de particule (D_{min} = 4 mm). Cette taille, désignée « Discrétisation 1 », permet de garantir qu'au moins une particule est contenue dans chaque cube, tout en limitant les effets de discrétisation. Pour chaque cube, la porosité est évaluée à l'aide de la fonction intégrée dans YADE « yade._utils.voxelPorosity() », qui détermine le rapport entre le volume de vide et le volume total du cube. Bien que la nature des données diffère (grains voxelisés dans le cas tomographique, particules sphériques simulées dans le cas numérique), cette méthode d'estimation locale de la porosité repose sur le même principe volumétrique que le script développé pour les données de tomographes, assurant ainsi une base cohérente de comparaison entre les deux approches. Dans un second temps, un plan de projection est sélectionné, et une moyenne est effectuée dans la direction orthogonale à ce plan pour construire la carte 2D de porosité.

Format des résultats :

Dans les deux cas, une cartographie 2D de porosité est obtenue par une moyenne dans la direction orthogonale au plan d'analyse (projection), incluant les bords du volume, ce qui permet une comparaison visuelle et quantitative entre les deux résultats. Ensuite, un profil vertical de porosité est construit à partir d'une moyenne des valeurs obtenues pour chaque tranche horizontale.

2. *Interprétation des résultats :*

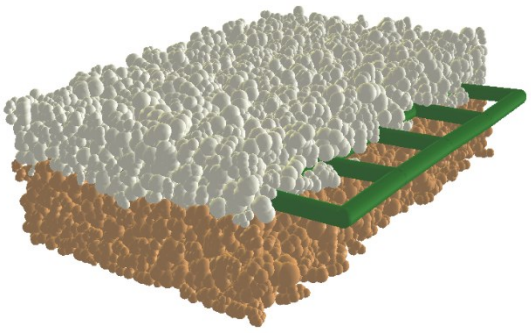


Figure 5.19. Configuration du modèle numérique avec géogrille biaxiale localisée dans le quart inférieur de l'échantillon.

Afin d'assurer une comparaison rigoureuse, les résultats tomographiques de l'échantillon intégrant une géogrille biaxiale située dans le quart inférieur (Figure 5.15) ont été confrontés aux simulations numériques réalisées dans une configuration équivalente (Figure 5.19). Pour les configurations sans géogrille, seules les zones correspondant à la position qu'occuperait la géogrille ont été analysées.

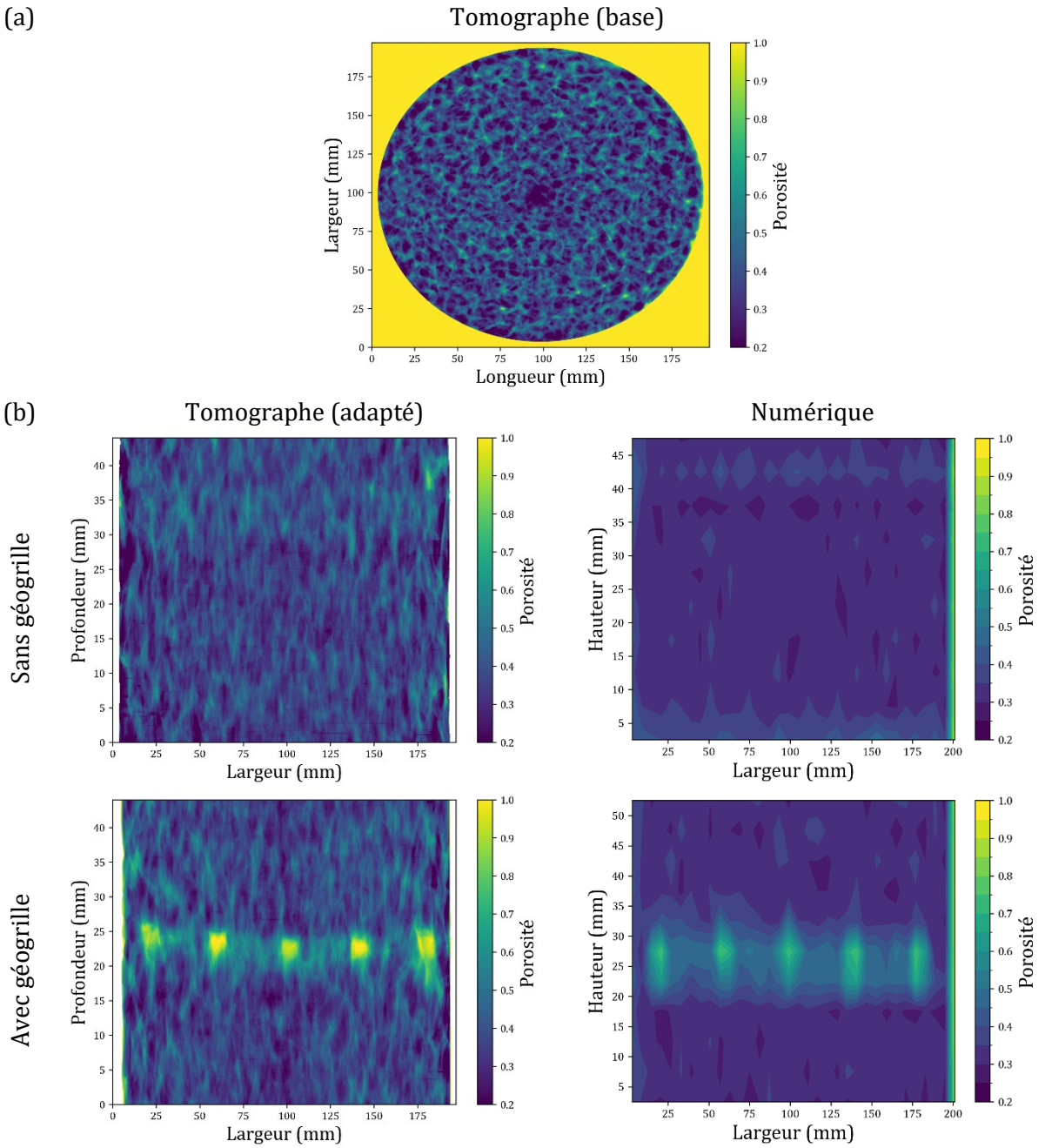


Figure 5.20. Cartes 2D de porosité locale pour les configurations avec et sans géogrille : (a) données tomographiques projetés dans le plan XY ; (b) comparaison entre les données tomographiques et les résultats numériques projetés dans le plan YZ.

Pour rappel, l'échantillon expérimental analysé présente une géométrie cylindrique, contenu dans un tube en PMMA. Le diamètre extérieur de ce cylindre est de 200 mm, tandis que le diamètre intérieur effectif réellement rempli par le matériau granulaire est de 194 mm. En revanche, le modèle numérique repose sur un échantillon de section carrée de 200 mm de côté. Les données tomographiques résultent ainsi en un volume cubique incluant le cylindre expérimental. Ce

décalage géométrique crée une zone annulaire vide, située entre le matériau et le bord du tube (et donc du cube), qui apparaît dans les coupes tomographiques sous forme de régions de porosité égale à 1, correspondant à l'absence de matière. Cet aspect est clairement visible sur la Figure 5.20.a.

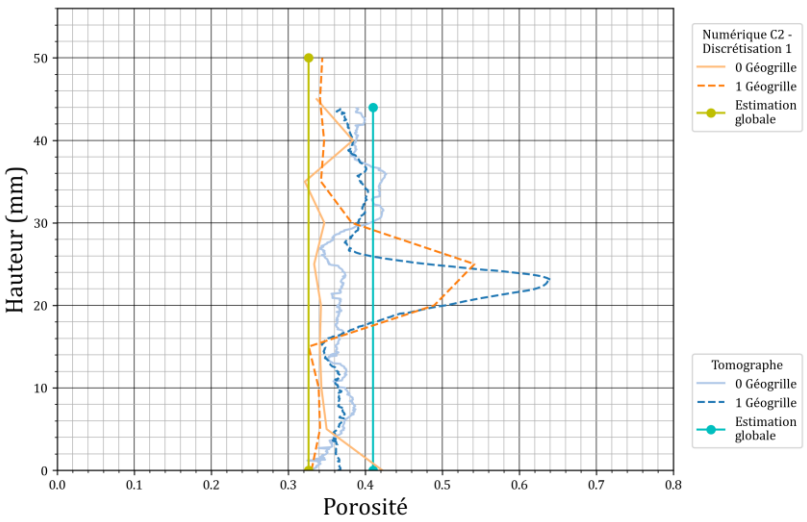
Si l'on calculait la porosité de chaque section sans tenir compte de cette forme cylindrique, les résultats seraient mécaniquement biaisés vers le haut, en raison de la contribution des pixels situés en dehors du matériau. Pour corriger cet effet, une méthode de traitement adaptatif a été développée. Celle-ci repose sur une détection automatique des bords du cylindre dans chaque coupe horizontale, via l'analyse des profils de porosité le long des axes X et Y. Cette détection permet d'estimer dynamiquement le centre et le rayon effectif du cylindre, et de construire un masque circulaire limitant le calcul de porosité aux seules zones réellement remplies de matériau. Cette approche, plus rigoureuse, est utilisée dans la suite de l'analyse.

La Figure 5.20.b présente les cartes de porosité locale pour les cas avec et sans géogrille, projetées sur le plan vertical « YZ », aussi bien pour les données tomographiques (traitées par cette méthode) que pour les données numériques. On note que, dans le cas du modèle numérique, la discrétisation étant initiée à partir d'un coin du volume, l'effet de bord est ainsi limité à une seule extrémité. Ces effets restent localisés et n'influencent pas le comportement global, comme le montre la figure.

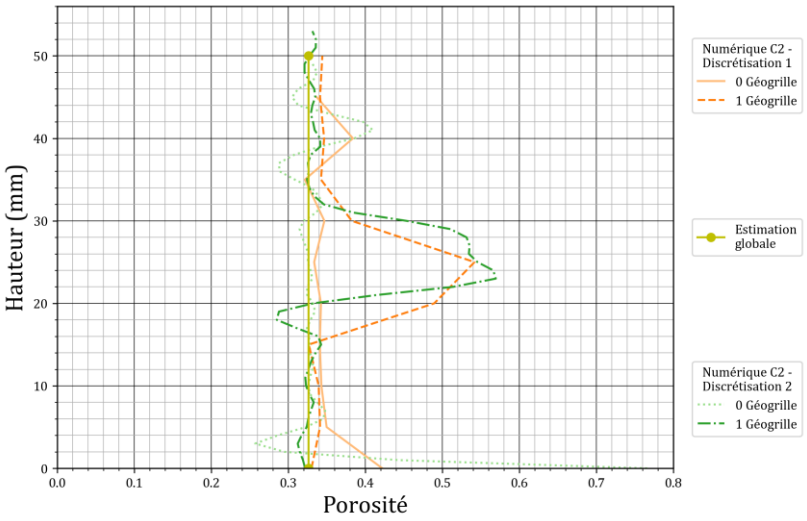
De manière générale, une bonne cohérence est observée entre les deux approches. Les cartes de porosité révèlent une augmentation marquée et localisée de la porosité dans la zone occupée par la géogrille. Ce résultat est attendu, la géogrille étant assimilée à du vide dans les reconstructions tomographiques. Ce comportement est également reproduit par le modèle numérique, ce qui confirme la pertinence du schéma de modélisation retenu.

En dehors des zones directement affectées par la géogrille, la porosité reste relativement homogène, avec des valeurs comprises entre 0,3 et 0,4 aussi bien pour les données tomographiques que pour le modèle numérique. Ces plages sont cohérentes avec la porosité globale numérique, évaluée à 0,33, mais légèrement inférieures à la porosité globale expérimentale, mesurée à 0,41. Cet écart peut s'expliquer par le fait que la porosité globale expérimentale inclut l'effet de la géogrille assimilée à une zone vide, ce qui augmente la valeur moyenne sur l'ensemble du volume. En revanche, les valeurs locales rapportées ici sont calculées hors de la zone influencée par la géogrille, et reflètent donc plus directement la porosité du matériau granulaire lui-même. Par ailleurs, une autre source peut aussi provenir de la différence de compacité induite par les méthodes de mise en place : un empilement contrôlé dans le modèle numérique contre un compactage manuel plus hétérogène dans les échantillons expérimentaux, soumis à des effets de paroi ainsi qu'à la forme, à l'angularité et à la rugosité des grains réels. Ces facteurs peuvent contribuer à une porosité légèrement plus élevée ou plus variable dans l'échantillon expérimental.

Afin de renforcer l'analyse et de quantifier plus précisément l'influence spatiale de la géogrille, des profils verticaux de porosité ont été tracés (Figure 5.21). Malgré des différences initiales dans les niveaux de gris entre les scans avec et sans géogrille (voir Figure 3.35), le traitement par seuillage aboutit à des distributions de porosité comparables, ce qui valide la reproductibilité du protocole de compactage expérimental. La reproductibilité est également confirmée numériquement, avec des profils de porosité convergeant autour de la valeur globale de 0,33.



(a) Comparaison tomographe - numérique



(b) Comparaison entre discrétisation numérique

Figure 5.21. Profils verticaux de porosité dans la zone centrale de l'échantillon : comparaison entre les configurations avec et sans géogrille, issues de la tomographie et de la simulation numérique.

En comparant les zones d'influence de la géogrille, définie comme la largeur totale de la zone affectée par une augmentation de la porosité à proximité de la géogrille, on constate des écarts notables. Dans le modèle numérique, la zone affectée s'étend jusqu'à environ 8 mm de part et d'autre de la géogrille, contre environ 5 mm dans les données expérimentales. Cette dernière valeur est en bon accord avec les observations issues de l'analyse des niveaux de gris (voir section 3.3.3). Deux facteurs principaux peuvent expliquer cet écart :

- ***La géométrie de la géogrille :*** dans le modèle numérique, les nervures sont représentées par des cylindres de 8 mm de diamètre, tandis que dans l'échantillon réel, les nervures sont fortement aplaties (8 mm de large pour seulement 1 mm d'épaisseur). Cette simplification géométrique entraîne une surestimation du volume numérique occupé par la géogrille, amplifiant ainsi localement l'effet sur la porosité.
- ***La résolution de la discrétisation spatiale :*** pour évaluer l'influence du maillage, une discrétisation plus fine (désignée « Discrétisation 2 ») a été testée, avec des sous-volumes numériques de 4 mm × 4 mm × 1 mm. Bien que cette résolution ne respecte pas entièrement le critère de D_{min} dans la direction verticale, elle permet une meilleure détection des variations locales de porosité. Cette maille affinée réduit l'étendue de la zone

affectée, à environ 6 mm, tout en maintenant la localisation de l'effet, ce qui la rapproche de l'étendue expérimentale observée (5 mm). Ainsi, la réduction de la maille de discrétisation permet une meilleure définition de la porosité au voisinage des brins de la géogrille, sans en modifier les valeurs au centre de la maille, confirmant ainsi l'influence combinée de ces deux facteurs.

En résumé, les résultats montrent que l'influence directe de la géogrille sur la porosité locale s'étend sur une bande d'environ 5 à 8 mm de part et d'autre des nervures, soit approximativement 0,5 D_{50} à 0,8 D_{50}.

5.3.3.4 *Investigation des contacts intergranulaires : nombre et orientation des contacts*

Pour aller plus loin dans l'analyse, des indicateurs plus précis sont nécessaires à l'échelle locale, tels que les distributions d'orientation des contacts qui sont largement utilisées pour décrire la microstructure à l'échelle du grain des matériaux granulaires. Cette approche permet non seulement de décrire l'organisation interne de l'assemblage granulaire, mais également de mieux comprendre les mécanismes locaux d'interaction, en particulier dans les zones influencées par la présence d'une géogrille.

1. *Détermination des points de contact et de leur orientation :*

Détermination à partir des données tomographiques :

La fonction « spam.label.labelledContacts() » du module SPAM permet d'analyser l'image 3D labellisée afin d'identifier les contacts entre grains. Chaque étiquette unique représente un grain distinct. L'analyse consiste à détecter, dans le volume étiqueté, les grains voisins partageant une interface commune, c'est-à-dire possédant des voxels adjacents. Pour chaque grain, la fonction comptabilise le nombre d'étiquettes voisines différentes auxquelles il est connecté, indépendamment du nombre de voxels en contact ou du morcellement de ces zones de contact. Ce décompte représente le nombre de voisins par grain, dans le sens où plusieurs régions de contact séparées entre deux mêmes grains sont considérées comme un seul contact. La fonction retourne, pour chaque grain, son nombre de voisins « N_v », ainsi qu'un tableau répertoriant l'ensemble des paires de grains en contact.

L'orientation des vecteurs de contact est ensuite extraite à l'aide de la fonction « spam.label.contactOrientationsAssembly() ». Celle-ci utilise comme entrée l'image labellisée et la liste des paires de grains en contact, préalablement identifiées, pour déterminer les plans de contact et les directions normales aux surfaces d'interaction entre les grains.

Détermination à partir du modèle numérique :

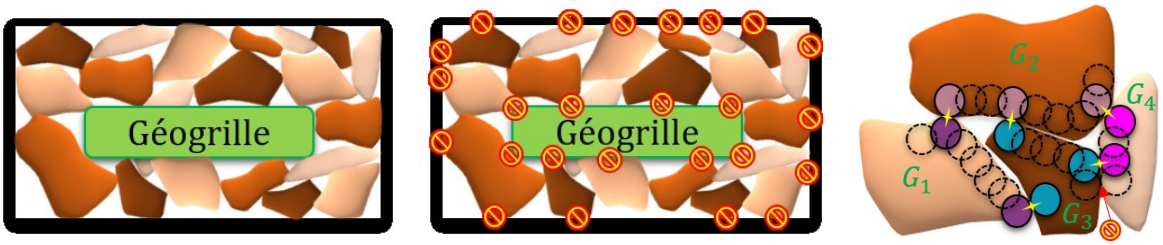
Dans le modèle numérique, chaque élément (grain, mur, géogrille) est explicitement défini et possède une identité propre. Dans le cas des clumps, ils sont modélisés par des assemblages de sphères, chacune disposant également de sa propre identité. Les interactions entre un clump et d'autres entités — qu'il s'agisse d'un autre clump, d'un mur ou d'un élément de géogrille — s'effectuent exclusivement via les sphères constitutives du clump. Il est important de rappeler que les contacts internes entre sphères appartenant au même clump ne sont pas pris en compte, puisque le clump est considéré comme un corps rigide. Ainsi, le nombre de contacts d'un clump, retenu pour l'analyse, est déterminé à partir du nombre total de contacts externes détectés entre ses sphères et les autres éléments du milieu.

Le nombre de coordination « Z » (caractéristique du nombre de contacts moyens par grains) est classiquement déterminé par l'équation (45), où « C_{Grains} » désigne le nombre de contacts entre

grains, « C_{Mur} » le nombre de contacts grain-mur, « $C_{Géogrille}$ » le nombre de contacts grain-géogrille et « N_{Grains} » le nombre des grains (voir Figure 5.22.a).

$$Z = \frac{2 \cdot C_{Grains} + C_{Mur} + C_{Géogrille}}{N_{Grains}} \tag{45}$$

A ce stade, il est important d'apporter une clarification terminologique entre le nombre de voisins N_v et le nombre de coordination Z. Dans le cadre de cette étude, le nombre de contacts par grain est évalué à la fois à partir des simulations numériques DEM et des données tomographiques. Toutefois, les méthodes d'identification diffèrent fondamentalement entre les deux approches. En simulation DEM, le nombre de coordination Z est un concept mécanique classique, qui désigne le nombre moyen de contacts mécaniquement actifs qu'un grain entretient avec ses voisins. Il s'agit de connexions effectives entre grains à travers lesquelles des forces (normales ou tangentielles) sont transmises via la loi de contact. En revanche, en traitement d'images, le nombre de voisins N_v, tel que défini ci-dessus, traduit le nombre d'interfaces détectées entre grains, sur la base de critères géométriques ou topologiques. Cette méthode d'identification, appliquée sur les images 3D issues de la segmentation tomographique, permet de détecter les contacts potentiels mais ne permet pas d'accéder à la nature mécanique ou à la force transmise à travers ces interfaces. Ainsi, deux grains peuvent être considérés comme voisins sans qu'une interaction mécanique soit réellement effective, notamment en cas d'erreurs de segmentation ou de bruit d'acquisition. Malgré cette distinction conceptuelle, les deux grandeurs peuvent être quantitativement comparées lorsqu'on se limite aux contacts intergranulaires, pour lesquels le nombre de coordination correspond à la moyenne du nombre de voisins par grain.



(a) (b) (c)

Figure 5.22. Stratégie d'identification et de sélection des contacts des grains dans le modèle numérique : (a) catégorisation des types de contacts, (b) filtrage des contacts avec les éléments non granulaires, (c) regroupement des multi-contacts entre clumps.

Néanmoins, les clumps étant constitués de plusieurs sphères, il est fréquent que deux clumps distincts soient en contact par plusieurs points. Pour conserver la cohérence avec la méthodologie employée sur les données tomographiques — dans laquelle une paire de grains est comptabilisée une seule fois dans le décompte du nombre de voisins quel que soit le nombre de zones de contact — il a été décidé d'appliquer la même règle aux résultats numériques. Ainsi, entre deux clumps, un seul contact est retenu et un seul vecteur normal est sélectionné pour l'analyse de l'orientation des contacts (voir Figure 5.22.c, illustrant le cas des grains G3 et G4, en contact en deux points, mais comptabilisés une seule fois). Le choix du vecteur normal associé à chaque zone de contact est fait de manière arbitraire parmi l'ensemble des contacts existants entre les deux clumps. Pour évaluer l'influence de ce choix sur les résultats, deux hypothèses ont été testées : (1) ne retenir qu'un seul vecteur au hasard par paire de clumps, et (2) considérer tous les vecteurs de contact. Les résultats obtenus pour ces deux options sont discutés ci-dessous, afin de vérifier la robustesse des tendances observées. De plus, sont exclus de l'analyse les contacts entre les clumps et les murs et les clumps et la géogrille (comme illustré en Figure 5.22.b) — ces éléments étant considérés comme vides dans l'analyse tomographique.

Enfin, pour respecter l'ensemble de ces conditions et garantir une comparaison cohérente entre les données tomographiques et les simulations numériques, l'approche basée sur l'équation (46) a été retenue comme forme simplifiée de l'équation (45), en excluant les contacts avec les parois et la géogrille, c'est-à-dire en posant $C_{Mur} = 0$ et $C_{Géogrille} = 0$.

$$Z = \frac{2 \cdot C_{Grains}}{N_{Grains}} = N_{v_{moyen}} = \frac{1}{N_{Grains}} \sum_{i=1}^{N_{Grains}} N_{v_i} \tag{46}$$

Méthode de visualisation des orientations de contact :

Un assemblage granulaire présente généralement un nombre élevé de contacts, ce qui rend nécessaire une représentation statistique de la distribution des orientations des vecteurs de contact pour pouvoir en tirer des conclusions.

Une fois les vecteurs normaux aux contacts extraits, différentes formes de visualisation — principalement des histogrammes — sont couramment utilisés dans la littérature pour représenter ces distributions (Ando, 2013; Wiebicke, 2020). Dans le cadre d'une analyse en 2D, les vecteurs de contact tridimensionnels sont projetés sur un plan d'observation, et l'orientation de chaque contact est alors décrite par un unique paramètre angulaire, généralement l'angle « φ » mesuré dans ce plan par rapport à un axe de référence dans le plan. La Figure 5.23 illustre ce principe de projection : un vecteur 3D est projeté orthogonalement sur le plan XY, et l'angle φ_z correspondant est mesuré par rapport à l'axe de référence dans le plan (axe X).

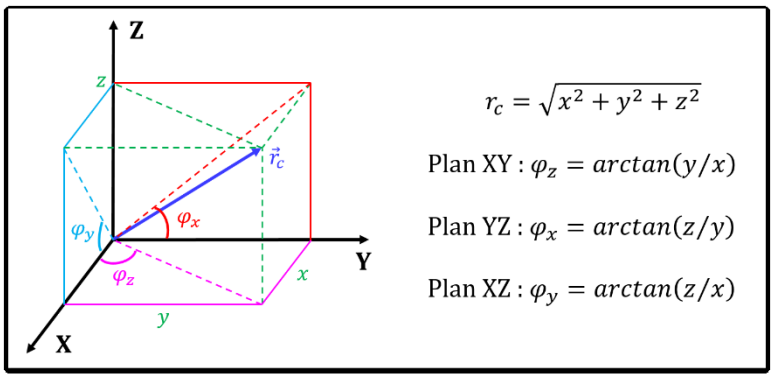


Figure 5.23. Principe de projection d'un vecteur sur un plan 2D et détermination de son orientation angulaire.

Ces orientations sont ensuite représentées sous forme de distributions angulaires. Pour cela, des histogrammes polaires sont utilisés : le domaine angulaire est divisé en n tranches égales (ici 36 tranches, soit une résolution angulaire de 10°). Chaque contact projeté contribue à augmenter le compteur dans la tranche correspondant à sa direction.

2. *Analyse comparative des résultats :*

Les interactions intergranulaires jouent un rôle fondamental dans le comportement mécanique des matériaux granulaires. Après avoir présenté les méthodologies de détermination des contacts et de leurs orientations à partir des données tomographiques et des simulations numériques, cette section vise à interpréter les résultats obtenus, en comparant les distributions du nombre de contact et de leurs orientations entre les approches expérimentale et numérique.

Analyse du nombre de contacts intergranulaires (nombre moyen de voisins) :

Le nombre de contacts représenté ci-dessus, équivalent au nombre moyen de voisins en contact par grain, constitue un indicateur clé de la compacité et de la stabilité mécanique d'un assemblage

granulaire. Il est influencé par plusieurs paramètres tels que la densité, la distribution granulométrique, la forme des particules, ainsi que la méthode de préparation de l'échantillon.

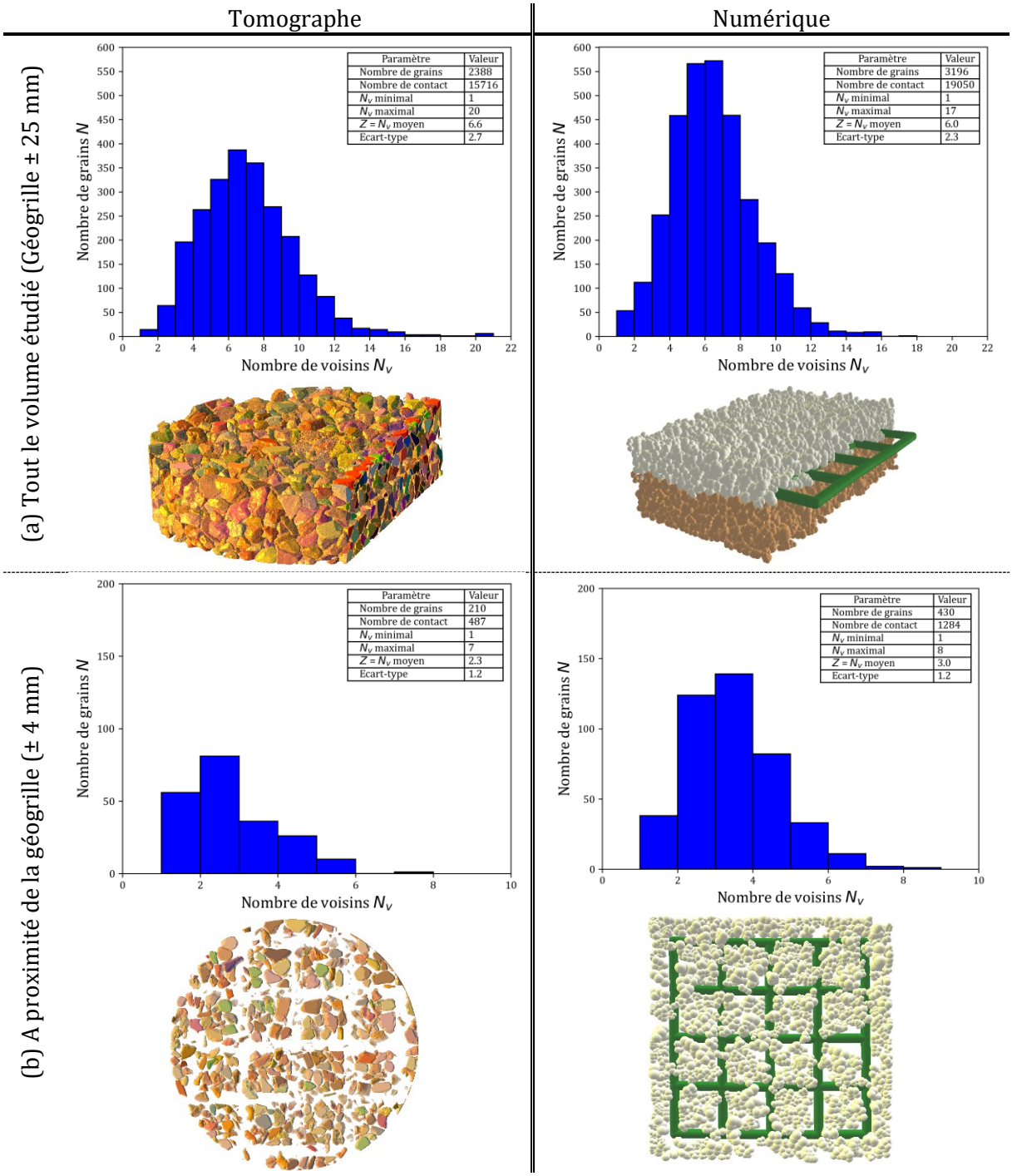


Figure 5.24. Distributions du nombre de voisins issu des données tomographiques et numériques : (a) sur l'ensemble du volume étudié ; (b) dans la zone locale autour de la géogrille.

La Figure 5.24 présente les distributions des nombres de voisins, mesurées dans les deux approches, à l'état compacté. L'ensemble du volume analysé (Figure 5.24.a) porte sur une zone centrale d'épaisseur 50 mm (soit 25 mm de part et d'autre de la géogrille). En nombres absolus, les données tomographiques révèlent un total de 15 716 contacts pour 2 388 grains, tandis que les données numériques comptent 19 050 contacts pour 3 196 grains.

Les deux distributions sont centrées autour de leur valeur moyenne, avec une prédominance de grains présentant entre 5 et 7 voisins, et une faible proportion de grains faiblement coordonnés (1 à 2 contacts). La valeur moyenne obtenue expérimentalement (6,6) est très proche de celle issue des simulations numériques (6,0), traduisant une bonne cohérence globale entre les deux approches. Ce nombre de coordination intergranulaire observé (proche de 6) est en accord avec les valeurs typiquement rapportées pour des assemblages réguliers de particules sphériques de même taille. Cette cohérence est renforcée par la morphologie des grains, majoritairement sphéroïdes à discoïdes, comme établi dans la section 5.3.3.2.

Il convient toutefois de noter la présence de grains avec un seul voisin, notamment en bordure de la zone analysée. Ce phénomène s'explique principalement par deux facteurs : (1) les contacts avec les parois et la géogrille ont été volontairement exclus, ces éléments étant considérés comme absents dans l'analyse tomographique ; (2) les grains situés à proximité des limites du volume étudié (haut, bas ou latéralement) peuvent ne présenter qu'un seul contact.

Par ailleurs, certaines particules identifiées dans les données tomographiques présentent un nombre de coordination supérieur à 20, ce qui est peu vraisemblable d'un point de vue mécanique. Une vérification ciblée a permis d'attribuer ces valeurs anormalement élevées à des artefacts de sous-segmentation, localisés dans la zone centrale de l'échantillon, affectée par une superposition de niveaux de gris lors de la reconstruction volumique. La Figure 5.25 illustre ce phénomène à travers une coupe verticale faisant apparaître des grains de grande taille résultant de la fusion de plusieurs éléments. Comme décrit à la section 5.3.3.1, cette zone centrale a déjà été traitée dans le cas de l'analyse locale autour de la géogrille, mais un traitement complet à l'échelle du volume total aurait nécessité un temps de calcul prohibitif.

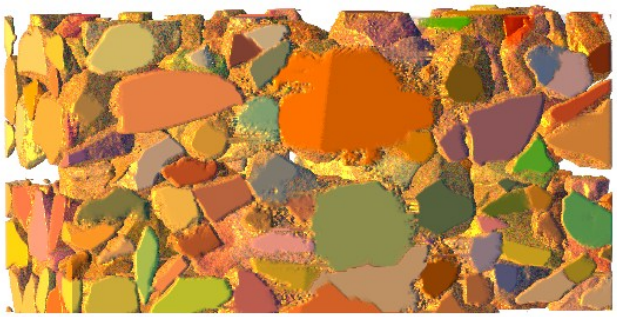


Figure 5.25. Illustration de sous-segmentation dans la zone centrale de l'échantillon tomographique : coupe verticale faisant apparaître deux grains surdimensionnés.

Une seconde analyse a été menée au voisinage de la géogrille (Figure 5.24.b). Dans cette configuration, bien que le nombre total de grains reste différent entre les deux approches, les résultats montrent également une convergence : un nombre de coordination intergranulaire de 2,3 pour les données tomographiques, contre 3,0 pour les simulations, avec des distributions de forme similaire. Bien que ces valeurs soient nettement inférieures à celles mesurées sur l'ensemble du volume (de l'ordre de 6), elles restent cohérentes avec la disposition géométrique induite par la géogrille. En effet, dans les mailles, les grains sont généralement confinés entre deux nervures successives et sont principalement en contact avec un ou deux voisins alignés suivant l'axe de l'ouverture, ce qui conduit à des zones localement faiblement coordonnées, comme le reflètent les statistiques présentées. Ce schéma est en accord avec le rapport entre la taille des ouvertures et celle des grains, de l'ordre de trois, et confirme les mesures semi-quantitatives ainsi que les observations visuelles présentées au chapitre 3, où il avait été conclu qu'en moyenne, trois à quatre grains étaient visibles le long de chaque direction de l'ouverture.

Il est important de rappeler que les résultats ci-dessus sont obtenus selon une condition spécifique de décompte des contacts intergranulaires, désignée ici comme « Condition 1 ». Dans ce cadre, une paire de grains n'est comptabilisée qu'une seule fois, quel que soit le nombre de zones de contact, et seuls les contacts entre grains tous deux situés dans le domaine analysé sont pris en compte. Cette condition reflète fidèlement les contraintes imposées par les données tomographiques, où la géogrille est assimilée à du vide et les grains situés hors domaine ne sont pas détectables. Afin d'assurer une comparaison équitable, les contacts numériques avec des grains extérieurs ont donc été exclus (tant en nombre qu'en orientation). Sur cette base de référence, deux conditions supplémentaires ont été introduites dans le cadre du modèle numérique, afin d'évaluer l'impact de ces hypothèses sur les résultats :

- « Condition 2 » : semblable à la condition 1, mais incluant les contacts avec des grains situés hors domaine, à condition que l'un des deux grains appartienne au domaine étudié.
- « Condition 3 » : la plus générale, considérant l'ensemble des contacts des grains du domaine, qu'ils soient avec d'autres grains, les parois ou la géogrille, et en comptabilisant tous les points de contact.

Les résultats obtenus sous ces différentes conditions sont présentés à la Figure 5.26, pour deux zones d'analyse : le volume entier autour de la géogrille (± 25 mm) et la zone locale restreinte (± 4 mm) , dans les deux configurations, avec et sans géogrille.

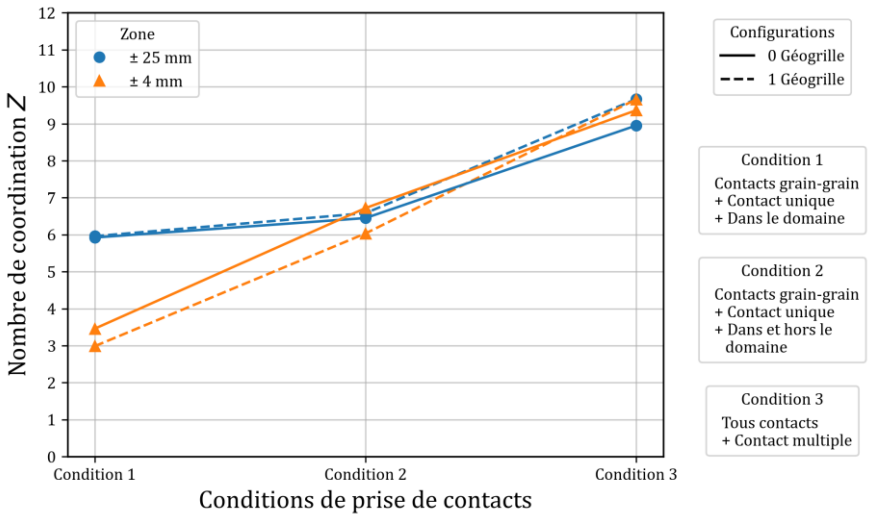


Figure 5.26. Analyse numérique de la connectivité des grains selon les conditions de prise de contact pour les deux configurations avec et sans géogrilles.

Dans le cas de la configuration avec géogrille, pour le volume complet, l'inclusion des contacts avec des grains hors domaine (Condition 2) entraîne une augmentation modérée du nombre de coordination, de 6,0 à 6,7, ce qui reste cohérent compte tenu du grand nombre de grains impliqués. En revanche, en Condition 3, où tous les contacts sont pris en compte, ce nombre s'élève à 9,7, traduisant une contribution significative des contacts multiples ou indirects, notamment avec les parois et la géogrille. Dans la zone restreinte autour de la géogrille, l'effet de ces hypothèses est encore plus marqué. Le nombre de coordination initialement observé (3,0) en Condition 1 augmente fortement dès que les contacts avec des grains hors domaine sont intégrés (Condition 2), pour atteindre une valeur proche de celle mesurée sur le volume global (6,0). Cette convergence est encore accentuée en Condition 3, suggérant que, dans cette région critique, la prise en compte des interactions périphériques est essentielle pour une estimation réaliste du réseau de contacts.

Ensuite, afin d'évaluer si cette chute initiale du nombre de coordination en Condition 1 est imputable à la présence de la géogrille ou bien à la limitation géométrique de la tranche analysée (épaisseur 8 mm, comparable à la taille moyenne des grains), une analyse complémentaire a été menée sur une zone éloignée de la géogrille (soit à 10 cm) mais soumise à des conditions géométriques identiques. Les résultats obtenus montrent une évolution similaire : pour une tranche de 8 mm, le nombre de coordination en Condition 1 atteint 3,5 dans la zone sans géogrille, contre 3,0 dans la zone avec géogrille. En Condition 2, les valeurs convergent vers 6,7 (sans géogrille) et 6,0 (avec géogrille). Pour une épaisseur de 50 mm, les deux configurations présentent des valeurs quasi identiques, proches de 6 en Condition 1 comme en Condition 2. Ces résultats démontrent que la réduction du nombre de coordination observée dans les zones fines provient principalement de l'exclusion géométrique des contacts hors domaine étudié. L'effet de la géogrille reste perceptible, mais moins déterminant que ne le laissait penser l'analyse initiale. La configuration géométrique induite par la maille explique partiellement la diminution de coordination, mais celle-ci est accentuée par la limitation du domaine d'étude.

Cette dernière analyse montre que l'hypothèse restrictive (Condition 1), bien qu'adaptée au cadre expérimental, peut conduire à une sous-estimation locale de la connectivité intergranulaire, en particulier en bordure du domaine analysé. L'introduction des Conditions 2 et 3 dans le modèle numérique permet ainsi de mieux cerner les limites des observations tomographiques et de valider la cohérence des résultats dans la zone de la géogrille, tout en soulignant l'importance d'une définition rigoureuse du domaine d'analyse pour tirer des conclusions fiables sur la structure de contact entre grains.

En synthèse, les tendances générales observées montrent une bonne convergence entre les approches expérimentale et numérique, aussi bien à l'échelle de l'ensemble du volume analysé que dans la zone restreinte autour de la géogrille. Dans cette région critique, où le traitement des données a été plus rigoureux et les effets parasites mieux maîtrisés, la cohérence des résultats est particulièrement marquée. Bien que les valeurs locales du nombre de contacts y soient plus faibles, cette diminution est désormais attribuée principalement à la limitation volumique imposée par les données tomographiques, et dans une moindre mesure à la géométrie de la maille de géogrille. Ainsi, ces résultats confortent la représentativité du réseau de contacts simulé dans cette région critique, et soulignent l'importance d'une analyse localisée et d'un traitement rigoureux des zones perturbées pour permettre une comparaison fiable entre données expérimentales et numériques.

Analyse de l'orientation des contacts :

L'orientation des vecteurs normaux aux plans de contact permet en particulier d'identifier d'éventuelles anisotropies induites par les conditions de préparation de l'échantillon ou par l'application de chargements mécaniques.

Dans cette étude, les orientations ont été évaluées par projection des vecteurs normaux aux contacts sur les trois plans principaux : XY, XZ et YZ. Cette méthode permet une lecture visuelle directe de la répartition angulaire des contacts, facilitant ainsi la comparaison entre les données tomographiques et les résultats issus des simulations numériques.

La Figure 5.27 présente ces distributions, pour les deux approches et pour deux cas distincts après compactage : (a) l'ensemble du volume étudié (soit 25 mm de part et d'autre de la géogrille) et (b) la zone locale autour de la géogrille (soit 4 mm de part et d'autre).

Pour l'ensemble du volume étudié (Figure 5.27.a), les deux approches montrent globalement une répartition isotrope des directions de contact. Toutefois, les données tomographiques révèlent une légère surconcentration des orientations le long des axes principaux X, Y et Z.

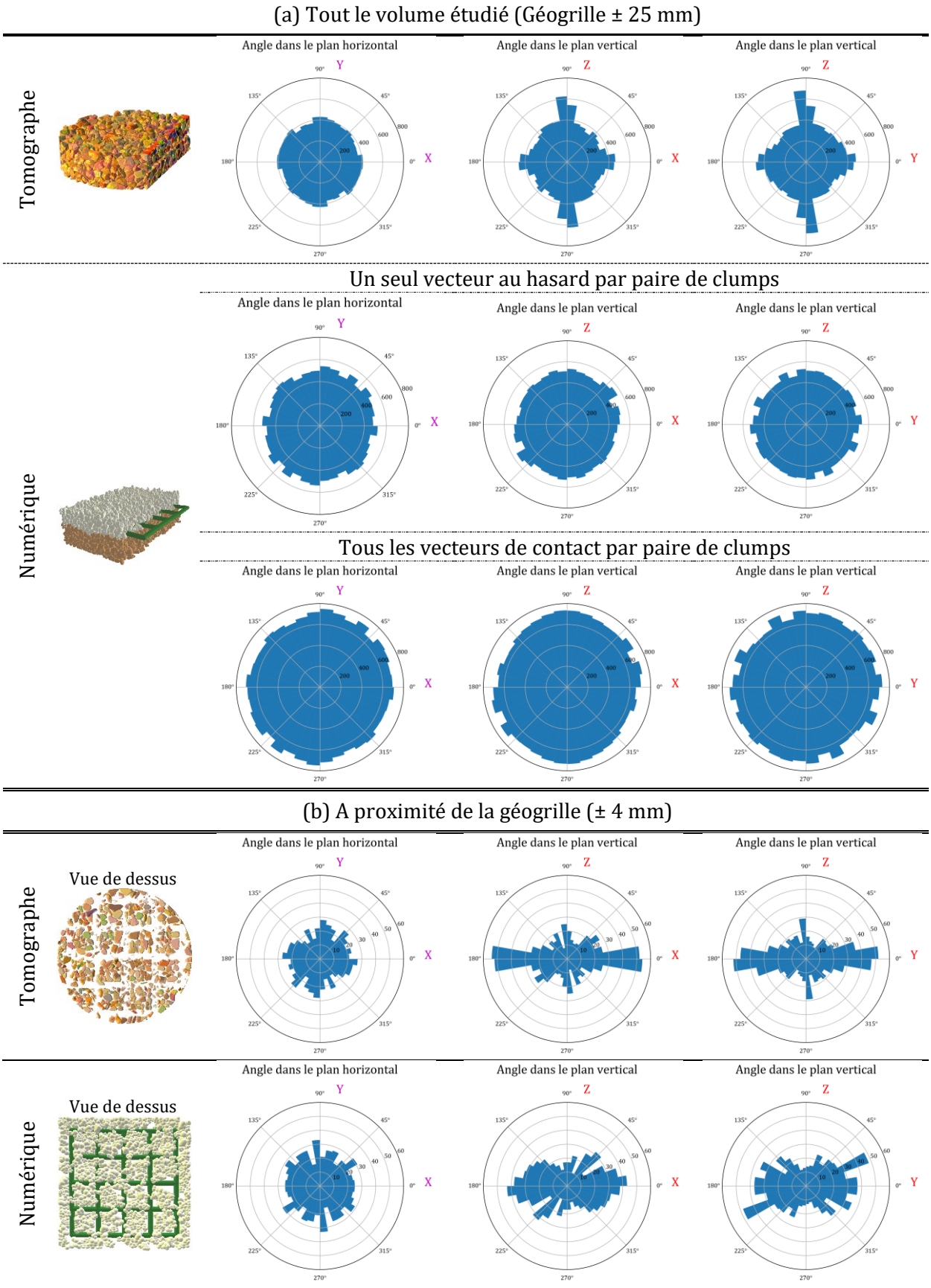


Figure 5.27. Distributions angulaires des orientations de contact obtenues par tomographie et simulation numérique : (a) ensemble du volume étudié ; (b) zone locale autour de la géogrille, selon la Condition 1.

Afin de limiter l'influence des artefacts de segmentation, les contacts impliquant des grains situés dans la zone centrale de l'échantillon – identifiée comme potentiellement inappropriée (N_v > 20, voir Figure 5.25) – ont été exclus de l'analyse. Malgré cette précaution, une anisotropie apparente persiste, avec une surreprésentation plus marquée des directions alignées selon l'axe Z. Cette tendance peut être attribuée à la méthode de mise en place de l'échantillon par compactage manuel utilisée lors de la préparation expérimentale, susceptible d'introduire une orientation préférentielle des grains selon la direction verticale.

En revanche, la distribution issue de la simulation numérique présente une répartition plus régulière, sans direction dominante. Or, deux hypothèses ont été considérées pour le traitement des vecteurs de contact : (1) la sélection d'un seul vecteur par contact, et (2) la prise en compte de l'ensemble des vecteurs dans le cas de contacts multiples entre paires de clumps. Les deux hypothèses conduisent à des distributions de forme similaire, mais l'option (2) génère une amplitude angulaire plus marquée, ce qui est attendu en raison du plus grand nombre de vecteurs projetés. En conséquence, nous avons retenu pour l'analyse des résultats ultérieurs, l'emploi de l'hypothèse simplifiée basée sur la sélection arbitraire d'un vecteur par contact multiple. Néanmoins, dans les deux cas, ce comportement suggère une absence de polarisation directionnelle marquée, ce qui est cohérent avec un état de compactage homogène, malgré la compression verticale modérée appliquée à ce stade de préparation (compactage).

En restreignant l'analyse à la zone périphérique de la géogrille (± 4 mm), les deux distributions obtenues sous Condition 1 (Figure 5.27.b) présentent une très bonne concordance, aussi bien en termes de forme que d'orientation. On observe une isotropie modérée avec une légère concentration des contacts dans le plan XY, principalement selon les directions X et Y. Cette organisation reflète directement l'influence géométrique de la maille de la géogrille sur l'agencement local des grains. Les plans XZ et YZ révèlent également cette concentration, indiquant une imbrication horizontale des grains dans les ouvertures de la géogrille (bien qu'un certain nombre de contacts dans la direction verticale puissent être exclus de fait par la limitation de l'épaisseur de la section d'échantillon considérée). Cette similitude entre les deux approches dans cette zone valide la capacité du modèle numérique à reproduire fidèlement l'organisation spatiale locale du réseau de contacts autour du renforcement.

Toutefois, une sous-représentation notable des contacts verticaux peut être observée, vraisemblablement liée aux conditions de traitement des résultats, qui conduisent à exclure artificiellement des interactions intergranulaires réelles. Comme discuté précédemment, la Condition 1 omet un grand nombre de contacts entre grains situés de part et d'autre des limites de la tranche, ce qui biais à la fois le nombre de coordination et la distribution des orientations de contact. Pour mieux évaluer cet effet, la Condition 2, qui intègre les contacts avec les grains situés hors du domaine, a été appliquée sur la même zone locale autour de la géogrille (± 4 mm). Les résultats (Figure 5.28) montrent une augmentation nette du nombre de contacts, en cohérence avec l'évolution du nombre de coordination de 3 à 6. La répartition des orientations dans le plan XY reste globalement isotrope, avec une concentration persistante le long des axes X et Y. Mais contrairement à la Condition 1, une composante verticale marquée apparaît désormais dans les plans XZ et YZ, révélant la présence effective de contacts selon la direction Z, jusqu'alors largement sous-estimés.

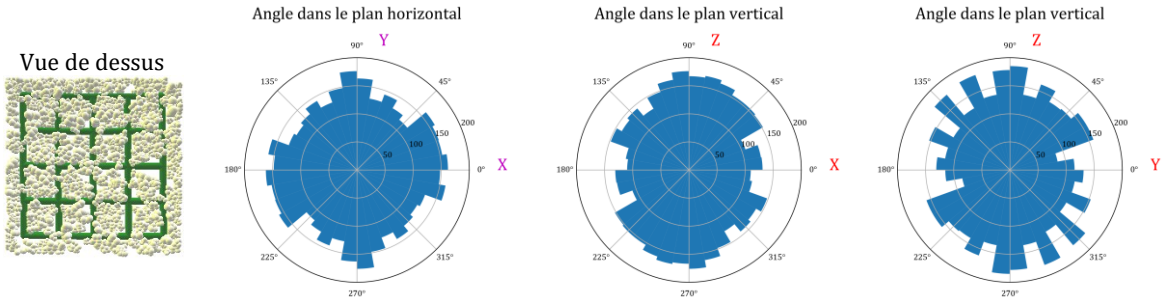


Figure 5.28. Distributions angulaires des orientations de contact dans la zone locale autour de la géogrille (± 4 mm), obtenues par simulation numérique selon la Condition 2.

Cette évolution confirme que l'exclusion géométrique imposée par la Condition 1 altérait sensiblement la représentation du réseau de contacts, en particulier pour les interactions verticales. La Condition 2 permet ainsi une représentation plus fidèle et physiquement réaliste des orientations de contact dans les zones fines, en restituant les interactions intergranulaires pertinentes au voisinage immédiat du domaine étudié. Ces résultats renforcent l'idée que, contrairement à ce que la Condition 1 pouvait laisser supposer, les contacts verticaux sont bien présents et significatifs dans cette région. Ils participent pleinement à l'organisation spatiale du matériau autour de la géogrille. Cette analyse souligne l'importance cruciale d'une définition rigoureuse du domaine d'étude, et d'une prise en compte méthodologique appropriée des contacts à l'interface du volume d'analyse, pour garantir une interprétation fiable du comportement mécanique du matériau granulaire.

Enfin, la Figure 5.29 présente l'orientation des vecteurs normaux pour les contacts entre les grains et les brins de la géogrille, extraits uniquement des résultats numériques. On observe une nette concentration des orientations dans le plan XY, principalement selon les axes X et Y. Cette distribution est directement liée à la géométrie carrée de la maille, où les brins orientés horizontalement induisent des contacts préférentiellement alignés avec les directions de la géogrille. Une composante verticale apparaît également dans la direction Z, traduisant la présence de contacts verticaux entre les grains et les nervures de la géogrille. Cette composante peut résulter du contact direct des grains sur et sous les nervures du renforcement.

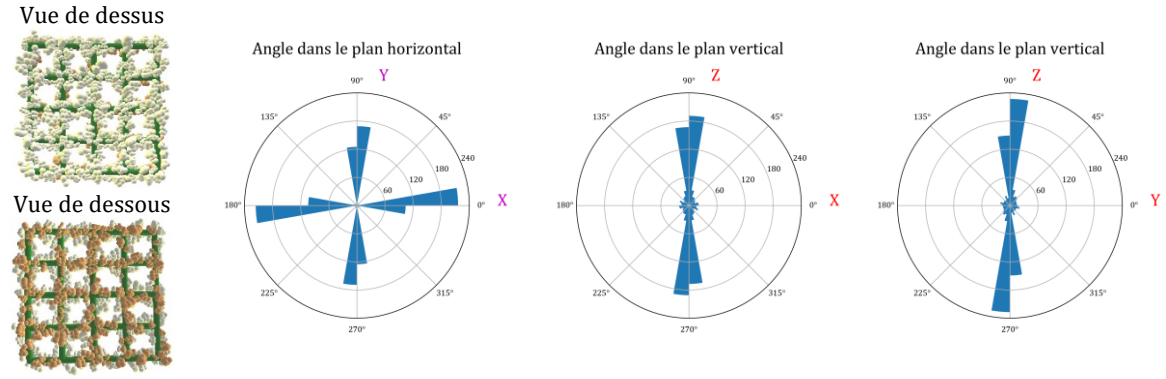


Figure 5.29. Distributions angulaires des orientations de contacts grain–géogrille obtenues par simulation numérique.

5.3.3.5 *Synthèse sur la cohérence entre données tomographiques et modèle numérique*

L'objectif principal de cette partie était d'évaluer la capacité du modèle numérique à reproduire fidèlement l'état initial d'un matériau granulaire renforcé par géogrille, en le confrontant à des observations expérimentales issues de la tomographie aux rayons X. L'analyse s'est appuyée sur une série d'indicateurs microstructuraux essentiels, permettant une validation multi-échelle de la représentativité géométrique et mécanique du modèle DEM.

Tout d'abord, le protocole de traitement d'image avancé mis en place a permis d'extraire de manière robuste les propriétés géométriques des grains à partir des volumes tomographiques. L'analyse conjointe des distributions de taille et des morphologies individuelles (classification de Zingg) a mis en évidence une très bonne concordance entre les deux approches, malgré les simplifications géométriques inhérentes à la modélisation numérique (grains représentés par des clumps de sphères). Cette première étape valide la capacité du modèle à reproduire la diversité géométrique des grains observée expérimentalement.

L'étude de la porosité locale a ensuite révélé une bonne correspondance dans la distribution spatiale des vides, avec des zones localement plus lâches identifiées autour de la géogrille, aussi bien dans les données expérimentales que numériques. Si des écarts subsistent sur la valeur moyenne de porosité (0,33 pour la simulation contre 0,41 pour les données expérimentales), ils peuvent être attribués à la différence de géométrie des grains et de compacité induite par les méthodes de mise en place : un empilement contrôlé dans le modèle numérique contre un compactage manuel plus hétérogène dans les échantillons expérimentaux, soumis à des effets de paroi et à la rugosité des grains réels.

Concernant les contacts intergranulaires, la comparaison des nombres de voisins met en évidence une bonne cohérence entre les approches expérimentale et numérique, aussi bien à l'échelle globale que dans la zone critique située au voisinage de la géogrille. À l'échelle du volume central, les valeurs moyennes obtenues (6,6 pour les données tomographiques et 6,0 pour les simulations numériques) restent proches et s'inscrivent dans les plages attendues pour un matériau granulaire dense. Localement, autour de la géogrille, des valeurs plus faibles sont observées, traduisant à la fois une organisation géométrique contrainte par la maille et un effet méthodologique lié à la définition restreinte du domaine d'analyse (Condition 1). L'analyse complémentaire menée sur des zones sans géogrille mais soumises à des conditions géométriques similaires a permis de distinguer l'effet propre de la géogrille de celui, plus systématique, induit par la limitation volumique. Il apparaît ainsi que la sous-estimation du nombre de coordination est principalement liée à l'exclusion artificielle de contacts avec les grains situés en dehors du domaine. Les résultats obtenus sous Condition 2 montrent que le réseau de contacts est significativement plus connecté que ce que suggérait l'approche initiale, renforçant la validité du modèle numérique dans ces zones localisées.

Enfin, l'analyse des orientations de contact confirme une répartition globalement isotrope dans les deux approches. Des directions préférentielles apparaissent toutefois localement dans la zone d'interaction avec la géogrille, principalement selon les axes X et Y, en cohérence avec l'orientation des mailles carrées du renforcement. Les résultats numériques reproduisent fidèlement ces tendances, aussi bien pour les contacts intergranulaires que pour les contacts grain–géogrille, traduisant une organisation spatiale des interactions en bon accord avec la géométrie du renforcement. Cependant, les composantes verticales (axe Z) sont fortement sous-représentées sous Condition 1, en raison des restrictions géométriques imposées par l'analyse de tranches fines. Avec la Condition 2, des orientations verticales significatives apparaissent, révélant que ces contacts, bien présents, étaient masqués par le découpage du domaine d'étude. Cette correction méthodologique permet ainsi une représentation plus fidèle et complète de l'organisation du réseau de contacts.

Dans l'ensemble, ces comparaisons mettent en évidence une bonne cohérence entre le modèle numérique développé et les données tomographiques, en particulier dans les zones non affectées par les artefacts de reconstruction. Le modèle par éléments discrets retranscrit de manière satisfaisante les propriétés géométriques, la distribution des vides et l'organisation du réseau de contacts autour de la géogrille. Cette validation structurelle renforce la crédibilité du modèle pour

l'étude des mécanismes d'interaction sol–géogrille, et justifie son utilisation pour les simulations mécaniques présentées dans la suite.

5.4 Conclusion générale

Ce chapitre a été consacré à la validation et à l'analyse de la pertinence du modèle numérique développé pour simuler le comportement mécanique de milieux granulaires renforcés par géogrille à l'aide de la méthode des éléments discrets. Il s'appuie sur une approche multi-échelle combinant des simulations triaxiales, des analyses paramétriques et une confrontation méthodique avec des résultats expérimentaux, notamment les données tomographiques issues de la microtomographie aux rayons X.

Concernant les simulations des essais triaxiaux, le taux de déformation fixé à 0,5 s^{-1}, validé par l'évaluation du nombre inertiel, permet de maintenir les simulations dans un régime quasi-statique tout en assurant une durée de calcul raisonnable. Le compromis retenu pour le nombre de grains (~10 400), couplé à un élancement H/D = 0,83, a permis de préserver la représentativité mécanique du matériau simulé, tout en maintenant une maîtrise acceptable des temps de calcul.

La phase de calibration, menée principalement sous confinement de 100 kPa, a permis d'ajuster efficacement les paramètres du modèle numérique de contact. A ce niveau de contrainte, la réponse contrainte-déformation obtenue reproduit fidèlement la rigidité initiale, le pic de résistance, et l'évolution du rapport q/p. Des écarts subsistent cependant pour des confinements plus faibles, en raison des limitations intrinsèques du modèle à rigidité de contact constante. Ces écarts concernent principalement la sous-estimation de la rigidité initiale et la surestimation du pic, de même qu'une dilatance excessive liée à l'idéalisation géométrique des grains et à l'invariance des paramètres de contact. Malgré ces limites, le modèle restitue correctement les tendances globales du comportement triaxial et offre une base robuste pour l'étude des échantillons de sol renforcé. Des améliorations futures pourraient inclure l'intégration d'une loi de contact non linéaire de type Hertz-Mindlin, afin d'introduire une dépendance réaliste entre la rigidité et les sollicitations normales.

La validation structurelle du modèle par confrontation aux données tomographiques constitue un volet fondamental de ce chapitre. Elle a mis en évidence une bonne concordance sur les propriétés géométriques des grains (via les distributions de forme selon Zingg), la distribution spatiale de la porosité, le nombre de voisins et l'organisation des réseaux de contacts. Les écarts de porosité (0,33 en DEM contre 0,41 en tomographie) ont été expliqués par la différence dans les méthodes de mise en place, tandis que les légers écarts sur le nombre moyen de voisins (6,0 contre 6,6) restent dans la plage attendue pour des matériaux denses. En outre, les orientations de contacts, notamment autour de la géogrille, montrent une organisation directionnelle cohérente dans les approches numérique et expérimentale, confirmant l'influence géométrique du renforcement sur l'architecture locale du matériau.

Ces résultats confirment la vraisemblance et la robustesse du modèle numérique développé pour simuler les interactions complexes entre particules et géogrille, dans un contexte de sollicitations triaxiales. Le modèle ainsi calibré avec les clumps complexes (C2), combiné à une approche de validation multi-échelle, constitue une base fiable pour l'analyse mécanique approfondie des effets du renforcement. En conséquence, ce modèle sera utilisé dans le chapitre suivant pour explorer plus en détail les mécanismes d'interaction sol–géogrille.

6 Analyse numérique du comportement triaxial d'un matériau granulaire renforcé par géogrille

Fort de la validation structurelle du modèle numérique obtenue par confrontation avec les données tomographiques, il est désormais possible d'exploiter cet outil de simulation pour analyser en détail le comportement mécanique d'un matériau granulaire renforcé par géogrille. L'étude porte ici sur l'échantillon numérique de grande taille, de section carrée 200 mm × 200 mm (voir Figure 4.19). L'objectif de cette section est d'examiner la réponse du milieu sous chargement triaxial, en portant une attention particulière aux interactions entre les grains et la géogrille, afin de mieux identifier les mécanismes de renforcement mis en jeu. Les résultats obtenus permettent également d'évaluer l'influence de la géogrille sur la résistance globale, et d'étudier le comportement volumique de l'échantillon et l'évolution microstructurale du matériau au cours du chargement.

6.1 Comportement global du matériau : influence de la géogrille

L'analyse du comportement global vise à évaluer l'effet du renforcement par géogrille sur la réponse mécanique macroscopique d'un matériau granulaire soumis à une compression triaxiale. Cette section repose sur une comparaison directe entre plusieurs échantillons numériques de même nature – avec et sans géogrille. L'objectif principal est de mettre en évidence et de quantifier l'influence de la géogrille sur la résistance au cisaillement, sur l'évolution de la dilatance et sur le comportement post-pic du matériau.

Les simulations sont menées sur les échantillons de grande taille (200 mm × 200 mm × 167 mm) présentant un élancement H/D = 0,83, initialement confinés sous une pression isotrope σ_c = 100 kPa. Un chargement axial monotone est ensuite appliqué à un taux de déformation $\dot{\varepsilon}$ = 0,5 s^{-1}, assurant un régime quasi-statique. Le modèle est exploré à travers six configurations distinctes, variant selon le nombre et la position des nappes de géogrille (voir Figure 6.1) :

- 0G : cas de référence non renforcé ;
- 1G : une nappe unique située à différentes hauteurs de l'échantillon :
  - au quart inférieur,
  - à mi-hauteur,
  - au quart supérieur ;
- 2G : deux nappes placées symétriquement aux quarts de la hauteur ;
- 3G : trois nappes positionnées de manière symétrique aux quarts et à mi-hauteur de l'échantillon.

Ces différents agencements permettent d'évaluer l'efficacité du renforcement en fonction de la position et de la densité des nappes de renforcement au sein de la structure. Les résultats sont présentés en termes de courbes contrainte–déformation et de comportement volumique, et complétés par une analyse comparative des gains de résistance au pic de chargement et des angles

de dilatance. Il est à noter que, l'effet de la gravité étant négligé (comme établi en section 5.1), les deux parois horizontales se déplacent simultanément, assurant ainsi un chargement symétrique.

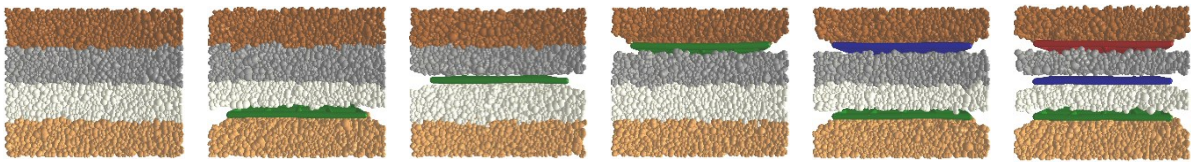


Figure 6.1. Configurations testées pour l'analyse du comportement global : répartition des nappes de géogrille selon leur nombre et leur position dans un échantillon de section carrée (200 mm) et d'élancement H/D = 0,83.

6.1.1 Effet global du renforcement

Les courbes contrainte–déformation présentent simultanément la déformation axiale ε_z (positive pour la contraction) et la déformation latérale « ε_h » (négative pour l'extension). Étant donné la symétrie du système, la déformation latérale est estimée à partir de la moyenne des déplacements des parois selon les directions horizontales x et y ($\varepsilon_h = [\varepsilon_x + \varepsilon_y]/2$). On observe que la pente initiale de la courbe contrainte–déformation latérale est plus raide que celle de la déformation axiale et que l'amplitude da la déformation latérale est en fin d'essai moins importante que celle de la déformation verticale – un comportement caractéristique des matériaux à dilatance modérée.

Comme attendu, la présence d'une géogrille induit une amélioration significative de la résistance maximale, quelle que soit sa position (Figure 6.2.a). Le cas non renforcé se caractérise par un pic de contrainte déviatorique de 661 kPa à ε_z = 4 %, alors que toutes les configurations renforcées dépassent ce seuil. Cette amélioration peut être attribuée à la capacité de la géogrille à retarder les mécanismes de localisation de la déformation, en mobilisant des efforts de frottement et de butée aux interfaces grain–géogrille, ce qui se traduit par une capacité portante globale accrue. En revanche, la rigidité initiale (≈ 36 GPa à ε_z = 1 %) reste peu affectée par la présence de la géogrille, ce qui suggère que le renforcement n'est activement sollicité qu'à partir d'un certain seuil de déformation, lorsque les déplacements relatifs entre la grille et les grains deviennent significatifs.

En termes de comportement volumique (Figure 6.2.b), l'échantillon renforcé présente une contraction initiale plus marquée, suivie d'une dilatance moins prononcée que celle du cas non renforcé. Ce comportement s'explique par l'entrave aux déplacements horizontaux des grains à proximité de la géogrille, qui agit comme une barrière mécanique. Ainsi, l'efficacité du renforcement se manifeste non seulement par une augmentation de la résistance maximale, mais également par une influence notable sur l'évolution de la déformation volumique du matériau.

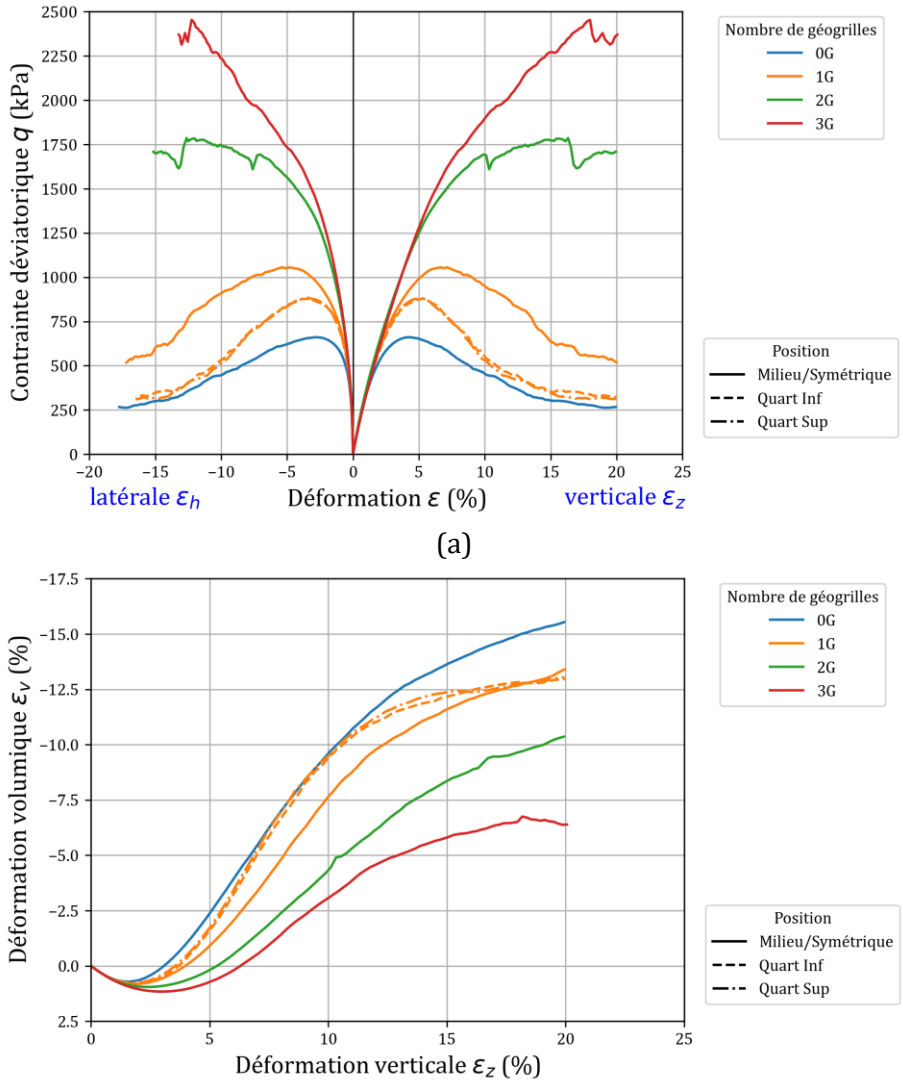


Figure 6.2. (a) Courbes contrainte–déformation axiale et latérale ; (b) Évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale, pour les différentes configurations testées (0G à 3G), sous un confinement de 100 kPa.

6.1.2 Influence de la position de la nappe de géogrille

L'effet du renforcement est fortement dépendant de sa position dans l'échantillon. La comparaison entre les différentes simulations comportant une nappe seule met en évidence l'importance de son positionnement dans l'échantillon.

Lorsque la géogrille est placée à mi-hauteur, la résistance maximale atteint 1056 kPa à ε_z = 7 %, soit un gain de plus de 60 % par rapport au cas non renforcé (Figure 6.2.a). La résistance post-pic, qui diminue progressivement, reste élevée, atteignant une contrainte résiduelle de l'ordre de 500 kPa à partir de ε_z = 20 %, traduisant la capacité du renforcement à maintenir une cohésion interne durable. Ce comportement suggère une contribution significative à la stabilisation mécanique du matériau. Comparativement aux essais non renforcés, l'évolution post-pic progressive et moins prononcée pourrait être attribuée à la symétrie géométrique du système, favorisant une répartition plus homogène des déformations latérales et une contribution plus équilibrée des contacts entre les grains et la géogrille. Par ailleurs, la déformation volumique reste globalement plus faible, traduisant une dilatance moins marquée.

A l'inverse, lorsque la géogrille est placée au quart inférieur ou au quart supérieur de l'échantillon, les résistances au pic et post-pic sont plus faibles: la résistance maximale atteint environ 880 kPa à ε_z = 5 %. Les résultats obtenus pour les deux configurations testées sont logiquement très similaires compte tenu de la symétrie de la géométrie de l'échantillon et des conditions de chargement. Bien que l'effet de la gravité soit négligé, une analyse complémentaire a été menée pour évaluer l'influence des conditions limites de chargement dans ces deux configurations. Les résultats sont présentés dans la Figure 6.3, qui compare deux cas : un chargement symétrique (où les deux parois horizontales se déplacent), et un chargement unilatéral (où seule la paroi supérieure se déplace, la paroi inférieure étant fixe). Il apparaît clairement que les courbes obtenues sont quasiment confondues, ce qui suggère que le mode de sollicitation de l'échantillon n'affecte pas significativement la réponse mécanique pour les cas étudiés.

Par ailleurs, les configurations 1G pour lesquelles la géogrille est placée aux quarts supérieurs et inférieurs montrent un comportement post-pic plus fragile, avec une décroissance rapide de la contrainte jusqu'à une valeur résiduelle d'environ 320 kPa à ε_z = 20 %, relativement proche de celle du cas non renforcé (250 kPa), contre 500 kPa pour la géogrille placée à mi-hauteur. Cette convergence vers le comportement du cas non renforcé souligne une perte d'efficacité du renforcement lorsque la nappe est éloignée de la zone critique de cisaillement.

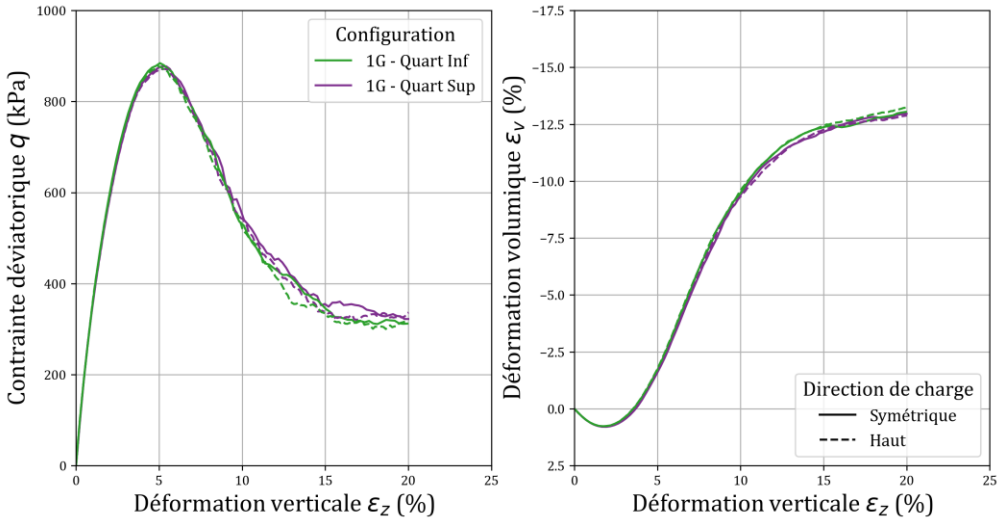


Figure 6.3. Influence du mode de chargement sur les configurations avec une géogrille placée aux quarts de l'échantillon : évolution de la contrainte déviatorique et de la déformation volumique sous un confinement de 100 kPa.

Cette tendance est également observable au niveau de la déformation volumique post-pic (Figure 6.2.b). En effet, bien que les configurations avec une géogrille positionnée aux quarts supérieur et inférieur présentent initialement un comportement légèrement plus contractant, les courbes de variation de volume de ces échantillons convergent progressivement vers celle du cas non renforcé et ce même après le pic. Toutefois, une divergence de comportement entre les deux configurations apparaît à partir de ε_z = 10 %, et les courbes de variation de volume des échantillons renforcés aux quarts supérieur et inférieur tendent alors à converger vers celle du cas avec géogrille à mi-hauteur, menant à un état de dilatance nulle atteint pour une déformation volumique d'environ 13 % à ε_z = 20 %, soit plus tôt que pour le cas non renforcé (15,5 %).

Ces résultats confirment le rôle clé du positionnement de la géogrille et de la proximité avec la zone de cisaillement dominante. Parmi les configurations avec une seule nappe de géogrille, celle placée à mi-hauteur apparaît comme la plus efficace, probablement en raison de sa position

centrale qui permet de mieux restreindre les déplacements latéraux et d'agir directement sur la zone généralement soumise aux sollicitations maximales.

6.1.3 Influence du nombre de nappes de géogrille

Bien que la position de la nappe de géogrille affecte le comportement global, l'effet du nombre de nappes est également particulièrement notable. La comparaison des résultats obtenus avec une ou plusieurs géogrilles montre que, pour une charge donnée, la déformation de l'échantillon est davantage réduite à mesure que l'on ajoute des nappes. L'ajout de nappes supplémentaires conduit à une augmentation graduelle de la résistance maximale, sans adoucissement apparent dans la plage de déformation étudiée.

La configuration 2G atteint un pic de 1786 kPa à ε_z = 15 %, suivi d'une stabilisation progressive, tandis que la configuration 3G fait apparaître une augmentation croissante de la résistance jusqu'à 2453 kPa à ε_z = 18 %, sans signe d'adoucissement marqué jusqu'à ε_z = 20 % (Figure 6.2.a). Cette augmentation progressive de résistance résulte d'une synergie entre les nappes, qui agissent simultanément pour entraver les déplacements granulaires, répartir les contraintes et retarder l'instabilité.

Parallèlement, la dilatance globale diminue : plus le nombre de nappes augmente, plus le matériau tend à devenir moins dilatant, suggérant un verrouillage progressif de la structure interne (Figure 6.2.b). Ce comportement est caractéristique d'un matériau dont les possibilités de réarrangement granulaire sont fortement restreintes par l'architecture du renforcement. Le matériau devient mécaniquement plus homogène et moins sujet à des localisations de déformation.

Ce verrouillage structurel peut également être interprété à travers l'évolution du nombre de coordination global Z_{Global}, qui désigne la moyenne pondérée du nombre de contacts par grain dans l'ensemble de l'échantillon (équation (45)). Comme déjà indiqué à la section 5.3.3.4, cette formulation tient compte à la fois des contacts entre grains, et des contacts entre grains et éléments de frontière (parois ou géogrille).

Durant la phase de compactage et le confinement isotrope, le matériau est soumis à une pression qui a pour conséquence de réduire les vides et d'augmenter la densité de l'échantillon, ce qui se traduit par une augmentation du nombre de contacts. Les valeurs initiales après confinement de Z_{Global} sont relativement proches pour les configurations 0G et 1G (~7,4), tandis qu'une légère diminution est observée pour les configurations 2G et 3G, avec des valeurs atteignant respectivement 7,3 et 7,1. Cette diminution apparente ne traduit pas une perte de structure, mais résulte du fait qu'une partie des grains interagissent dans des proportions différentes avec la géogrille au lieu d'entrer en contact avec d'autres grains, ce qui diminue mécaniquement le nombre de contacts intergranulaires, sans nécessairement réduire la compacité globale.

Au cours de la phase de chargement triaxial, l'échantillon est d'abord soumis à une phase de contractance (réduction volumique), qui entraîne une augmentation provisoire du nombre de contacts par un mécanisme de rapprochement des grains. Cette phase est suivie, à partir d'un certain seuil, d'une phase de dilatance où les grains s'écartent, entraînant une diminution du nombre de coordination. L'évolution de Z_{Global} au cours du chargement (Figure 6.4) montre que les valeurs, bien que proches initialement, tendent à diverger légèrement en fin d'essai : environ 4,1 pour la configuration non renforcé, 4,3 pour les configurations avec 1G, 4,7 pour la configuration 2G, jusqu'à 5,0 pour la configuration 3G.

Ces résultats indiquent que, malgré une diminution du nombre de contacts due à la dilatance, les échantillons renforcés conservent un niveau de coordination plus élevé, traduisant un maintien de la cohésion granulaire – notamment grâce aux interactions avec les nappes de géogrille. Ce

phénomène corrobore l'observation d'un matériau plus stable, moins dilatant, et mieux structuré dans les configurations multi-nappes.

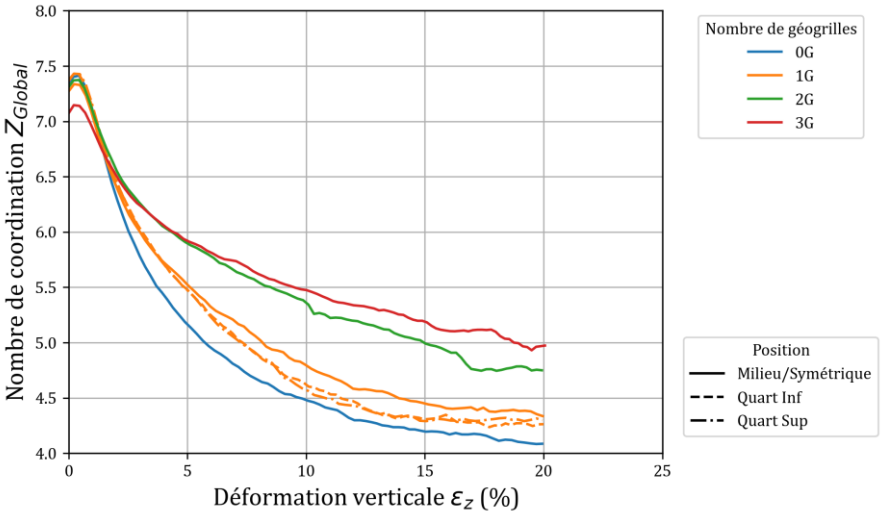


Figure 6.4. Evolution du nombre de coordination global au cours du chargement triaxial pour les différentes configurations testées (0G à 3G).

Cette analyse microscopique complète et conforte les tendances macroscopiques, synthétisées dans la Figure 6.5. Celle-ci présente deux indicateurs majeurs au pic de chargement : le gain de résistance « $\delta q/\sigma_c$ » et l'angle de dilatance « ψ_{pic} ». Le gain de résistance « δq » est défini comme l'augmentation de la contrainte maximale par rapport au cas non renforcé ($\delta q = [q_{XG} - q_{0G}]_{pic}$), normalisée par le confinement σ_c.

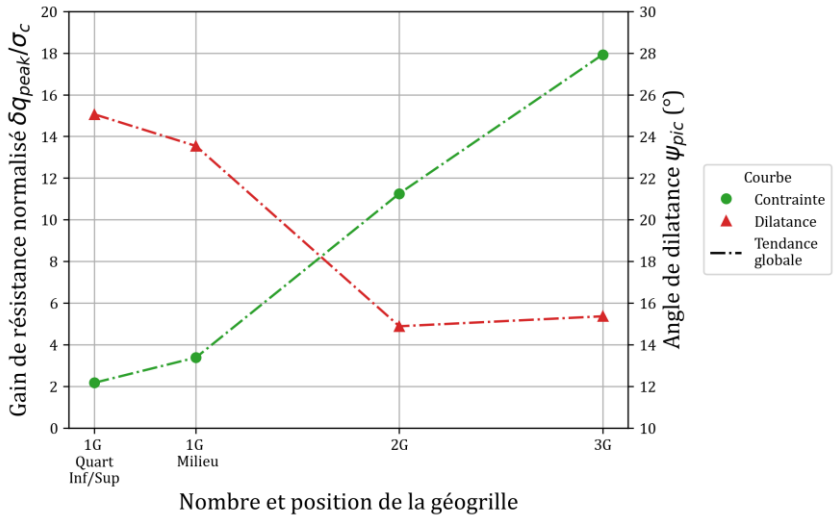


Figure 6.5. Effet de la configuration de renforcement sur le gain de résistance normalisé et l'angle de dilatance au pic, lors d'un essai triaxial sous 100 kPa de confinement.

Il apparaît que les configurations avec géogrille aux quarts (supérieur ou inférieur) présentent un gain modéré de résistance (×2), associé à un angle de dilatance élevé (25°). En revanche, la géogrille à mi-hauteur procure un gain de résistance plus important (×4), avec un angle de dilatance légèrement inférieur (24°). Enfin, les cas à deux et trois nappes atteignent des gains de résistance de 11 et 18 fois supérieurs, mais avec des angles de dilatance plus faibles (~15°).

Ce décalage entre gain de résistance et dilatance souligne l'efficacité du renforcement: le matériau devient plus résistant et plus stable, tout en limitant les déformations volumétriques. Ces observations rejoignent celles issues des études précédentes (sections 3.2 et 5.3), et confirment l'hypothèse selon laquelle la géogrille restreint par blocage les mouvements granulaires, et modifie fortement la microstructure du matériau.

6.1.4 Influence conjointe de l'élancement et du nombre de nappes de géogrille sur le comportement triaxial d'un matériau granulaire

L'objectif de cette section est de comparer entre elles, pour différents élancements, les réponses triaxiales d'un échantillon granulaire renforcé par une ou plusieurs nappes de renforcement. Dans cette optique, et en complément de l'analyse sur l'élancement des échantillons non renforcés présentée à la section 5.3.1, une étude complémentaire a été conduite sur des échantillons renforcés par une seule nappe positionnée à mi-hauteur et ce pour des élancements de : H/D = 0,45, 0,83, 1,64 et 2,42. Pour rappel, le nombre de grains est ajusté pour chaque élancement de manière à conserver une densité constante : N_{grains} = 5 200, 10 400, 20 800 et 31 200, respectivement. Ce protocole garantit une comparabilité directe entre les échantillons, en isolant l'effet de l'élancement sur l'efficacité relative d'un renforcement.

L'analyse comparative des contraintes au pic « q_{max} » et de l'angle de dilatance ψ correspondant, présentée à la Figure 6.6, met en évidence l'influence conjointe de l'élancement et du nombre de nappes de géogrille sur le comportement triaxial du matériau granulaire.

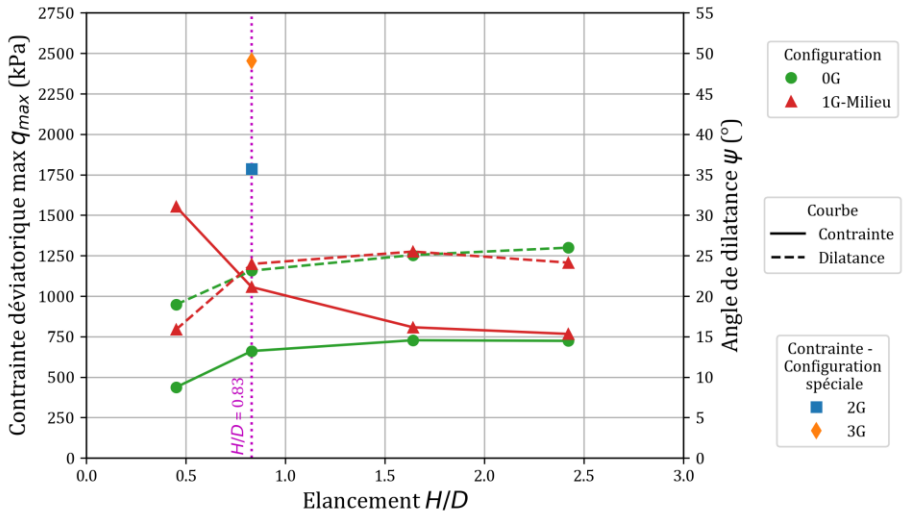


Figure 6.6. Evolution de la contrainte maximale et de l'angle de dilatance correspondant en fonction de l'élancement pour les échantillons renforcés et non renforcés par géogrille.

Pour les échantillons renforcés par une seule nappe positionnée à mi-hauteur, l'efficacité du renforcement décroît avec l'augmentation de l'élancement. Pour le plus faible élancement (H/D = 0,45), la contrainte maximale atteint 1 553 kPa, contre seulement 436 kPa pour l'échantillon non renforcé, correspondant à un gain de résistance normalisé par le confinement de 11. Ce gain illustre l'efficacité maximale de la position optimale de la géogrille pour des couches de sol de faible hauteur. En revanche, pour des élancements plus élevés ($H/D \geq 1{,}64$), la contrainte maximale se stabilise autour de 750 kPa, traduisant une perte progressive de l'efficacité du renforcement spatial. Cette diminution peut être expliquée par l'hétérogénéité croissante de la distribution des contraintes internes dans les échantillons élancés, où une seule nappe, même placée à mi-hauteur, ne suffit pas à mobiliser pleinement le renforcement.

Concernant les variations de volume, pour les échantillons de faible hauteur, la nappe limite efficacement la dilatance, contribuant à stabiliser le volume. À l'inverse, pour les élancements plus élevés, la capacité de la géogrille à contrôler la dilatation diminue, traduisant un affaiblissement du contrôle volumétrique lié à la perte d'efficacité mécanique.

L'analyse des configurations à 2 et 3 nappes, pour l'élancement de base (H/D = 0,83), confirme l'effet cumulatif du nombre de nappes sur la résistance. Les contraintes maximales atteignent respectivement 1 786 kPa et 2 453 kPa, illustrant un renforcement significatif par rapport à la nappe unique et ce quel que ce soit l'élancement de l'échantillon. Cependant, pour les échantillons de faible épaisseurs (H/D = 0,45), la contrainte maximale obtenue avec une seule nappe à mi-hauteur (q_{max} = 1 553 kPa) reste comparable à celle de la configuration à deux nappes positionnées de manière symétrique. Cette observation souligne que, dans certains cas, la position de la géogrille peut compenser l'ajout de nappes supplémentaires, tant que l'épaisseur de la couche reste modérée.

En résumé, les résultats indiquent que, lors d'un essai de compression triaxiale :

- Pour des couches de faible épaisseur, l'efficacité spatiale (placement optimal d'une seule nappe) peut permettre d'atteindre des performances proches de configurations multi-nappes.
- Pour des couches plus épaisses, l'efficacité quantitative (nombre de nappes) devient déterminante pour mobiliser un renforcement suffisant et maintenir la stabilité mécanique du matériau.
- Le contrôle volumétrique par la géogrille est optimal pour les faibles élancements et s'atténue progressivement pour les échantillons élancés, ce qui complète l'analyse mécanique.

6.2 Comportement local et interactions microscopiques

Après avoir analysé le comportement global du matériau granulaire renforcé par géogrille, il est essentiel d'explorer les phénomènes locaux qui sous-tendent les observations macroscopiques. La réponse du sol et l'efficacité du renforcement ne peuvent être pleinement comprises qu'en examinant la réponse locale. L'approche adoptée combine l'analyse des champs de contraintes à l'échelle locale, le suivi des efforts dans la géogrille et l'examen des interactions fines entre grains et éléments de renfort, offrant ainsi une compréhension complète du comportement triaxial du matériau renforcé. Les résultats présentés dans cette section permettent de justifier et d'interpréter les tendances observées dans la section 0 et d'éclairer les critères d'optimisation pratique des géogrilles dans les sols granulaires.

6.2.1 Zone d'influence mécanique de la géogrille

L'étude et l'analyse de la zone d'influence s'attache à délimiter spatialement les variations induites par la présence de la géogrille et fournir des informations sur son efficacité. Pour examiner plus finement l'effet de la géogrille sur le matériau, cette sous-section est divisée en deux analyses complémentaires : la distribution de la porosité locale et la distribution des contraintes locales dans le sol. L'étude des champs de porosité permet de visualiser l'impact de la géogrille sur la microstructure granulaire, tandis que les champs de contraintes renseignent sur la redistribution des efforts induite par le renforcement. Ensemble, ces analyses offrent une compréhension détaillée des mécanismes locaux qui sous-tendent les observations macroscopiques.

6.2.1.1 *Champs de porosité locale*

L'analyse de la variation locale de porosité constitue un outil pertinent pour identifier les zones compactées ou dilatées, et ainsi caractériser l'influence de la géogrille sur la microstructure granulaire. La méthodologie appliquée reprend celle détaillée à la section 5.3.3.3, où des cartes 2D de porosité locale sont établies par projection sur un plan donné (ici le plan YZ). Pour rappel, la discrétisation est initiée à partir d'un coin du volume (coin supérieur droit), ce qui explique les effets de bord observables à cette extrémité. L'interprétation du comportement global demeure cependant représentative, comme illustrée à la Figure 6.7. Les cartes de porosité correspondent à l'état compacté de l'échantillon, stabilisé avant l'application du confinement.

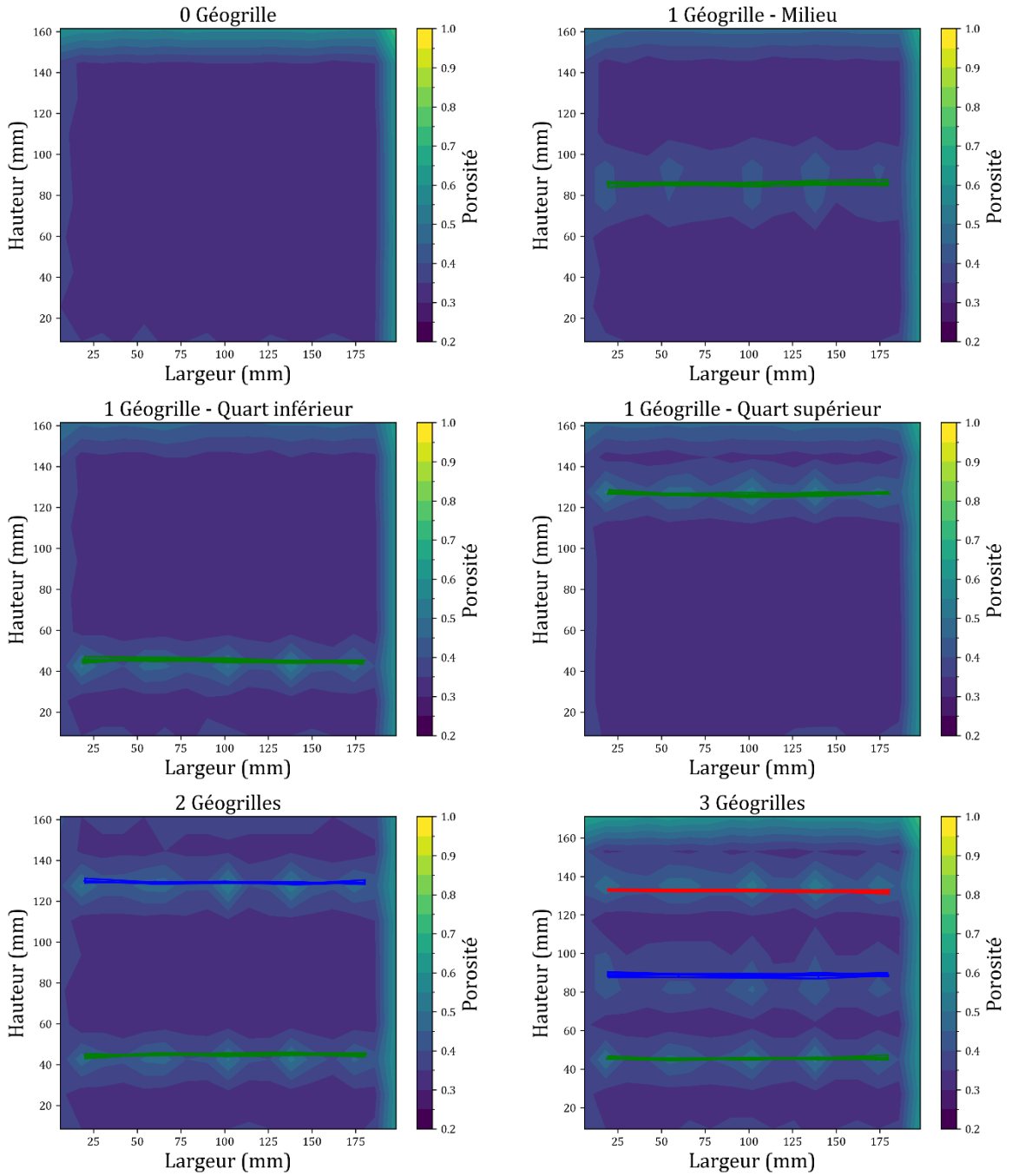


Figure 6.7. Cartes 2D de porosité locale dans le plan YZ à l'état compacté, pour les configurations sans et avec géogrille (résultats numériques).

La représentation de la géogrille suit le même code couleur que celui adopté pour la Figure 6.1, ce qui assure une continuité visuelle dans l'ensemble du chapitre. D'un point de vue technique, les géogrilles apparaissent sur ces cartes sous forme de points et de lignes, correspondant aux positions de leurs centres géométriques extraits de la simulation. Il est important de souligner que, dans le modèle numérique, chaque élément de géogrille possède une épaisseur de 8 mm, alors que la représentation 2D ne rend compte que de leur axe médian. Cette simplification explique l'écart visuel entre le tracé des éléments et l'extension réelle des zones où la porosité est modifiée. Concrètement, les zones de porosité accrue observées autour des géogrilles sont en cohérence avec leur dimension réelle.

Ces résultats confirment les premières observations de la section 5.3.3.3, où l'analyse avait porté sur la seule zone centrée autour de la géogrille placée au quart inférieur, avec une comparaison entre simulation numérique et tomographie. Ici, l'élargissement de l'étude permet d'observer systématiquement le comportement autour de différentes configurations de géogrilles, et ce sur l'ensemble de la hauteur de l'échantillon. Les cartes mettent en évidence une augmentation marquée et localisée de la porosité dans la zone immédiatement occupée par la géogrille, dont la valeur est typiquement comprise entre 0,40 et 0,50. Cette augmentation de porosité traduit physiquement le fait que l'introduction d'un élément dans le squelette granulaire perturbe localement l'arrangement des particules. On peut l'interpréter comme une zone de relâchement, où les grains se réorganisent autour de la géogrille, laissant apparaître des volumes vides supplémentaires. Cette observation est cruciale puisqu'elle met en évidence que le rôle de la géogrille ne se limite pas à un effet de frottement ou de butée : elle agit également comme un générateur d'hétérogénéités locales dans la structure porale.

En revanche, en dehors des zones directement influencées par la présence de la géogrille, la porosité reste relativement homogène, avec des valeurs comprises entre 0,30 et 0,35. Ces valeurs sont parfaitement cohérentes avec la porosité globale de l'échantillon, évaluée à 0,33, ce qui atteste de la fiabilité de la méthodologie adoptée pour le calcul et la représentation. Autrement dit, l'introduction de la géogrille induit des effets très localisés, mais n'altère pas l'équilibre poral à l'échelle macroscopique.

En complément des cartes 2D, des profils verticaux de porosité ont été tracés dans la zone centrale de l'échantillon, de manière à éviter les effets de bord. Ces profils ont été établis pour les différentes configurations de renforcement et pour quatre états représentatifs de l'essai : compacté, confiné, pic de chargement et état chargé à 20% de déformation axiale (Figure 6.8).

De manière générale, les résultats montrent à nouveau qu'à tous les états étudiés, la porosité reste relativement homogène dans la masse, avec toutefois une augmentation nette dans la zone occupée par la géogrille. Cette augmentation s'étend sur une largeur de l'ordre de 10 à 15 mm de part et d'autre de la géogrille, ce qui correspond approximativement à un intervalle compris entre D_{50} et 1,4 D_{50}. Cette valeur apparaît légèrement supérieure à celle mise en évidence à la section 5.3.3.3 (soit 5 à 8 mm), où une discrétisation plus fine avait été appliquée au voisinage immédiat de la géogrille. Cette différence peut s'expliquer par l'échelle d'analyse adoptée : une discrétisation globale, comme c'est le cas ici, tend à lisser les gradients locaux et à élargir la zone influencée. Un autre point notable est que le profil de porosité de la configuration avec une géogrille placée au quart (supérieur ou inférieur) de la hauteur reste proche de celui obtenu sans renforcement, ce qui confirme la proximité de comportement global mise en évidence dans la section 6.1.2.

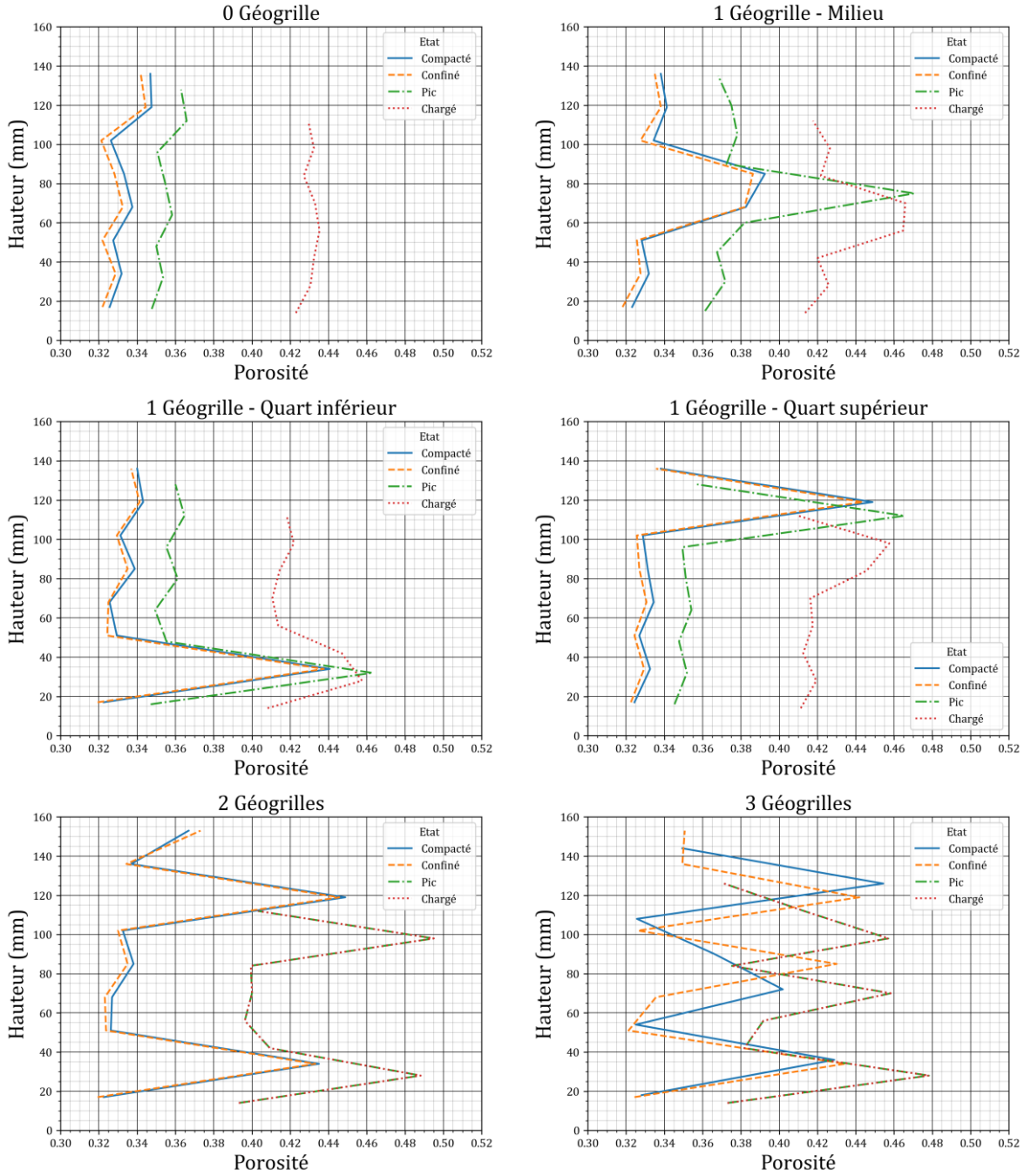


Figure 6.8. Profils verticaux de porosité numérique dans la zone centrale de l'échantillon pour les différentes configurations avec et sans géogrille, à différents états de l'échantillon : compacté, confiné, au pic de chargement et chargé à 20 % de déformation axiale.

A l'état compacté, pour toutes les configurations et en dehors de la zone influencée par la géogrille, les valeurs des profils de porosité se situent entre 0,32 et 0,34, en accord avec la porosité globale de 0,33. Au niveau de la géogrille, une augmentation locale est systématiquement observée, atteignant 0,39 dans le cas d'une nappe placée à mi-hauteur et 0,44 dans celui d'une nappe positionnée au quart inférieur ou supérieur. Cette différence reflète l'influence des gradients de déformation plus marqués dans les zones proches des plateaux de chargement. L'ampleur de l'augmentation locale de porosité apparaît ainsi principalement gouvernée par la position de la géogrille dans l'échantillon plutôt que par le nombre de nappes installées. En effet, dans les configurations à plusieurs nappes (2G et 3G), les valeurs de porosité restent cohérentes avec celles relevées pour les configurations à une seule nappe : chaque géogrille induit une perturbation

localisée caractéristique de sa position, sans effet cumulatif sur l'intensité du phénomène. C'est l'effet conjugué de la superposition et de l'extension verticale des zones modifiées qui entraîne le mécanisme de renforcement global de l'échantillon. Ceci souligne néanmoins le caractère fortement localisé de l'effet de la géogrille, essentiellement régi par les contraintes cinématiques imposées par les plateaux de chargement et par la réorganisation des contacts dans son voisinage immédiat. Ainsi, les champs de porosité confirment que la présence de la géogrille agit comme une perturbation ponctuelle, dont l'effet global résulte de la répétition et de la distribution verticale des zones affectées plutôt que d'une intensification locale.

A l'état confiné, l'application d'un chargement isotrope induit une contraction modérée de l'échantillon, se traduisant par une diminution généralisée de la porosité pour l'ensemble des configurations, renforcées comme non renforcées. Malgré cette réduction globale, l'effet local de la géogrille demeure identifiable, confirmant que son influence structurelle persiste au-delà du simple ajustement volumique lié au confinement.

Une fois l'échantillon chargé, l'échantillon tend à se déformer. L'échantillon étant sollicité de manière symétrique (les deux parois horizontales se déplaçant à un taux de déformation constant), la géogrille, qui se déforme légèrement, conserve globalement sa position relative, et c'est principalement la variation de hauteur de l'échantillon qui pilote la réponse globale de l'échantillon. Au pic de résistance, une dilatance nette se manifeste. Dans la configuration non renforcée ainsi que dans les configurations renforcées par une seule géogrille (hors zone de la nappe), la porosité augmente jusqu'à environ 0,35. Au voisinage immédiat de la géogrille, cette valeur atteint même 0,46, ce qui traduit la création d'une zone de relâchement local accentuée par la déformation différentielle entre le sol et la géogrille. A noter que pour les configurations 2G et 3G, aucun pic véritable n'est observé : la réponse mécanique de l'échantillon fait apparaître un plateau de résistance, de sorte que l'état de pic correspond pratiquement à l'état final dans la plage de déformations étudiée (ε_z = 20 %).

Au-delà du pic de résistance, la dilatance se poursuit dans les configurations non renforcées ainsi que dans celles comportant une seule nappe, conduisant à une porosité de 0,42 au sein de l'échantillon à la fin du chargement. En revanche, dans les configurations 2G et 3G, la porosité maximale hors zone de géogrille est limitée à 0,40 et 0,38, respectivement. Cette différence confirme le rôle des géogrilles comme éléments de confinement, qui réduisent la mobilité des grains et donc la dilatance globale de l'échantillon, en cohérence avec les observations macroscopiques de la Figure 6.5. Fait remarquable, la porosité locale au niveau des géogrilles reste quasi constante entre le pic et la fin du chargement, avec une valeur stabilisée autour de 0,46. Ce résultat montre que l'essentiel de la perturbation porale induite par la géogrille se produit au moment de la mobilisation du renfort, et que cette perturbation ne s'accroît pas significativement au-delà, même lorsque la sollicitation globale se poursuit. Cette stabilité est observée aussi bien pour les configurations 1G que 2G et 3G, malgré des niveaux de contrainte plus élevés dans ces dernières.

Enfin, les résultats obtenus mettent en évidence la cohérence de l'effet localisé, stable et reproductible induit par l'installation de la géogrille, indépendamment du nombre de nappes introduites. Cet effet ne s'amplifie pas au-delà du pic de chargement, mais contribue indirectement à la réduction de la dilatance globale dans les configurations multi-nappes. Autrement dit, qu'il s'agisse d'une ou de plusieurs géogrilles, l'impact observé dans la zone de contact reste similaire en termes d'augmentation de porosité. Les différences entre configurations résident davantage dans la superposition et l'extension verticale des zones perturbées que dans la nature de l'effet lui-même. Cette observation ouvre une piste d'interprétation importante : si une seule géogrille modifie localement la porosité sans altérer la structure globale, l'ajout de plusieurs nappes peut créer une succession de zones spécifiques qui contribue indirectement à l'amélioration des

performances macroscopiques (résistance et dilatance), comme décrit à la section 6.1. Ainsi, les champs de porosité apportent un lien direct entre l'effet local de la géogrille et l'évolution des propriétés globales du matériau renforcé.

6.2.1.2 *Champs de contraintes locales*

L'introduction d'une géogrille induit une redistribution marquée des efforts dans son voisinage immédiat, sur une certaine étendue spatiale. L'analyse des champs de contraintes locales constitue une étape essentielle, qui vise ainsi à caractériser cette zone d'influence mécanique en quantifiant l'intensité de la perturbation et son étendue dans les directions verticale et horizontale. Contrairement à la porosité, qui renseigne sur la réorganisation volumétrique des grains, la contrainte traduit directement l'intensité des interactions mécaniques transmises par les contacts. La cartographie de ces contraintes autour de la géogrille permet ainsi de visualiser la redistribution des efforts et d'établir un lien avec les performances macroscopiques du matériau renforcé.

1. *Principe général :*

Dans un milieu granulaire simulé par DEM, les contraintes ne sont pas diffusées dans les vides mais uniquement via les particules, où elles résultent de la somme des forces appliquées aux contacts. Le calcul des contraintes locales repose donc sur la projection de ces forces dans des volumes représentatifs. L'approche la plus courante utilisée pour les matériaux continus s'appuie sur la formulation de Cauchy qui définit la contrainte moyenne « σ_{ij} » dans un volume « V » par :

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} \, dV \tag{47}$$

2. *Développements méthodologiques :*

Les travaux fondateurs de Potyondy et Cundall (2004) et Li et al. (2009) ont établi comment, à partir des contraintes individuelles par particule « ${\sigma_{ij}}^p$ », définir une contrainte moyenne sur un sous-volume du milieu. Cette approche repose sur l'idée que la contrainte moyenne d'un domaine contenant « N_p » particules est égale à la somme des contributions de chaque particule pondérées par son volume « V_p » :

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \sum_{p=1}^{N_p} {\sigma_{ij}}^p \, V_p \tag{48}$$

Comme le volume total occupé par les grains dans un sous-domaine ne correspond pas au volume géométrique effectif (du fait de la porosité), une correction est nécessaire. Potyondy et Cundall (2004) proposent d'introduire un facteur basé sur la porosité globale n du domaine, de manière à assurer la cohérence entre le volume solide et le volume total du sous-volume considéré :

$$V \approx \frac{\sum_{p=1}^{N_p} V_p}{1 - n} \tag{49}$$

ce qui conduit à l'expression finale :

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1 - n}{\sum_{p=1}^{N_p} V_p} \sum_{p=1}^{N_p} {\sigma_{ij}}^p \, V_p \tag{50}$$

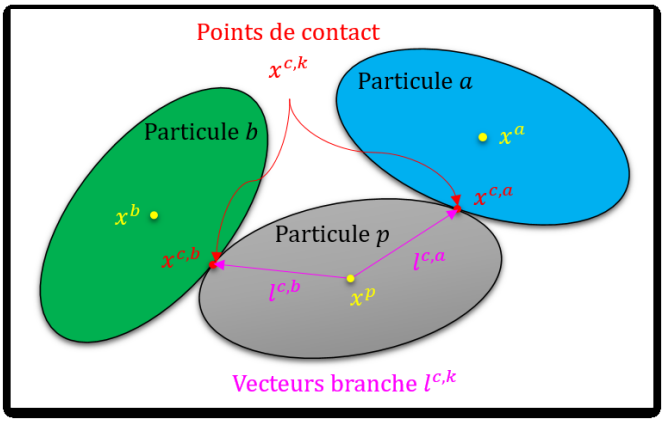


Figure 6.9. Illustration des interactions entre particules et définition du vecteur branche (adapté de Catherine O'Sullivan (2011)).

A l'échelle d'une particule p, le tenseur de contrainte est calculé selon la formulation classique de Love–Weber (équation (51)), exprimée comme la somme, sur l'ensemble des contacts de la particule c, des produits entre le vecteur branche « ${l_i}^c$ » (qui relie le centre de la particule x^p au point de contact $x^{c,k}$, k étant l'identifiant des particules en contact) et la force de contact correspondante « ${f_j}^c$ », normalisée par le volume de la particule V_p (voir Figure 6.9).

$$ {\sigma_{ij}}^p = \frac{1}{V_p} \sum_{c=1}^{N^{c,p}} {l_i}^c {f_j}^c \qquad (51) $$

Dans YADE, cette grandeur est directement accessible pour les sphères via la fonction « bodyStressTensor() ». En revanche, elle n'est pas implémentée pour les clumps, ce qui a nécessité le développement d'un script spécifique basé sur les équations (50) et (51). La validité de ce script a été vérifiée en comparant les résultats avec ceux obtenus par la fonction implémentée dans YADE (bodyStressTensor()) dans le cas des sphères, les deux approches donnant des résultats identiques.

3. *<u>Représentation graphique :</u>*

De manière équivalente à l'étude de porosité, une fois les tenseurs de contraintes calculés pour chaque particule (équation (51)), le volume du modèle numérique a été discrétisé en cubes de 5 mm × 5 mm × 5 mm (Figure 5.18). Chaque particule est projetée dans le plan vertical ou horizontal choisi (Figure 6.10), puis le tenseur moyen de chaque cube est obtenu selon l'équation (50). Cette approche permet de représenter spatialement les zones de redistribution des contraintes autour de la géogrille.

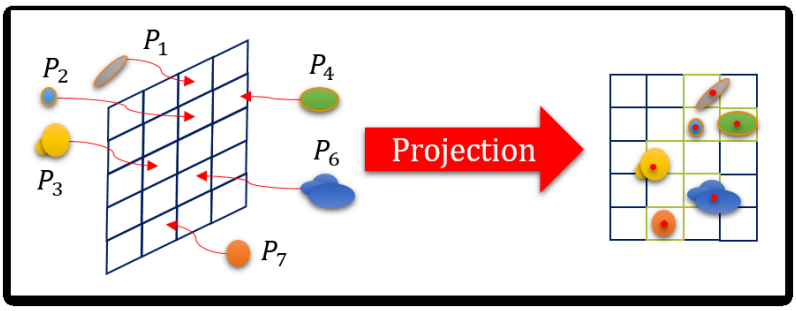


Figure 6.10. Méthodologie d'estimation locale de la contrainte moyenne : sélection du plan de projection, discrétisation 2D du volume et calcul de la moyenne par particule projetée dans la direction orthogonale.

4. *Application au cas étudié :*

L'analyse des champs de contraintes locales a été menée en comparant les configurations renforcées et non renforcées. Une attention particulière a été portée à la contrainte horizontale moyenne (composante « σ_{yy} » du tenseur), évaluée dans le plan YZ. Ce choix se justifie par le rôle attendu des ouvertures de la géogrille, qui tendent à limiter les déplacements latéraux des particules et à modifier ainsi localement l'état de contrainte.

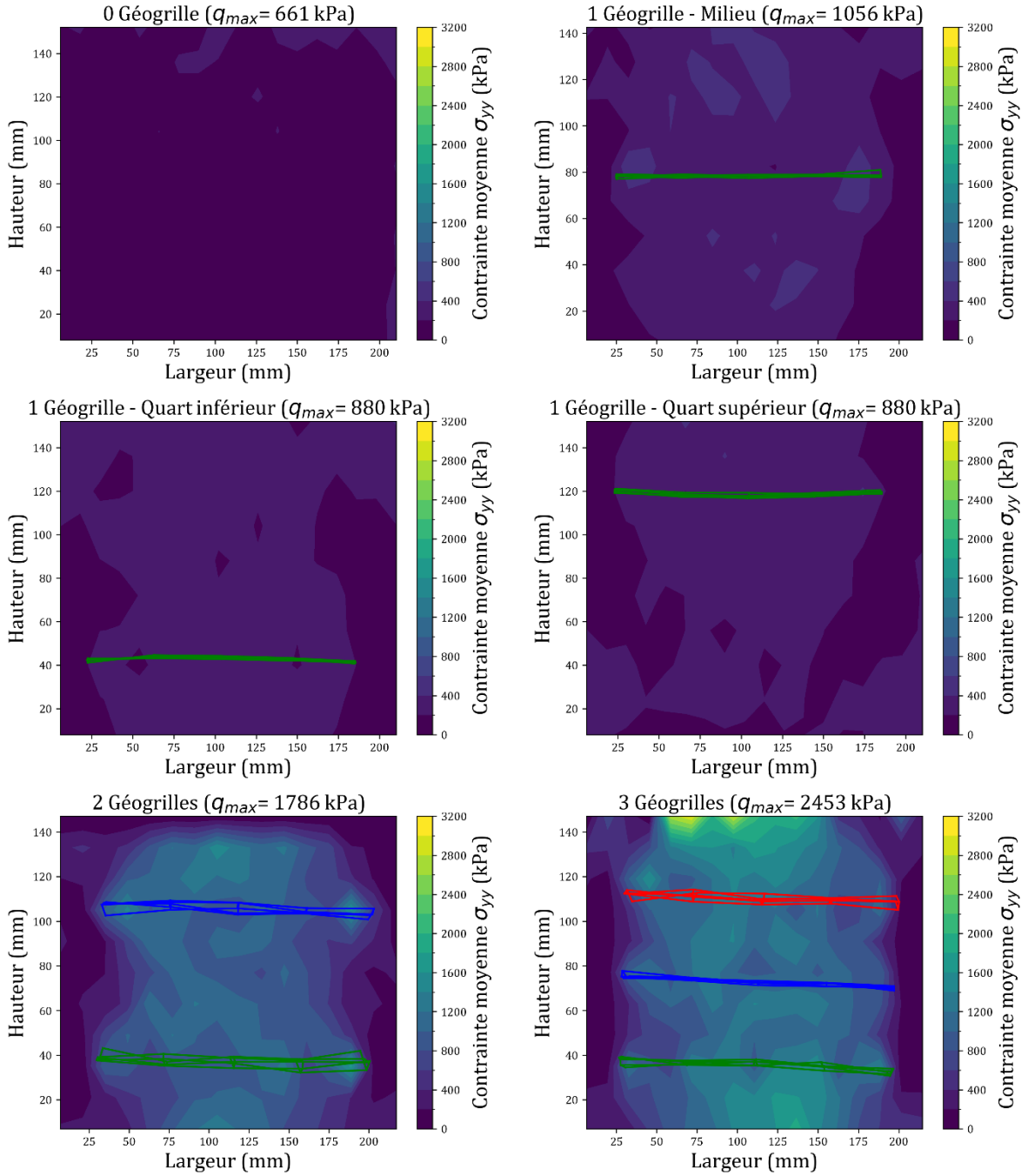


Figure 6.11. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne σ_{yy} dans le plan YZ au pic de chargement, pour les configurations sans et avec géogrille (résultats numériques).

Pour limiter le volume de données, les contraintes locales n'ont été enregistrées qu'au pic de résistance de chaque configuration (Figure 6.11). Bien que ces pics correspondent à des niveaux

différents de contrainte et déformation axiale, ils constituent des états représentatifs permettant d'interpréter et de comparer les comportements.

Les cartes obtenues montrent que, sans géogrille, la distribution de la contrainte horizontale est globalement homogène, avec une valeur moyenne voisine de 200 kPa. L'introduction d'une géogrille modifie significativement cet état : une partie du sol environnant est soumise à un accroissement marqué de contrainte horizontale, traduisant un effet de confinement induit par la nappe de renfort.

Dans la configuration 1G, la distribution révèle un maximum localisé au voisinage de la géogrille, qui décroît progressivement avec la distance verticale avant de réaugmenter près des parois de chargement. Cette valeur particulièrement élevée observée aux extrémités n'apparaît pas dans le cas sans géogrille, ce qui suggère qu'elle est liée à l'interaction entre la nappe et à la taille de l'échantillon. L'hypothèse la plus probable est une redistribution locale des contraintes, la géogrille canalisant partiellement les efforts horizontaux vers les parois. Toutefois, dans les configurations multi-nappes (2G et 3G), cet effet secondaire tend à disparaître : la densification induite par la superposition des nappes — proches entre elles et également proches des parois — pilote la réponse globale et masque l'influence des bords.

Quant aux valeurs maximales atteintes, la contrainte horizontale atteint localement environ 400 kPa lorsque la géogrille est placée aux quarts de l'échantillon, tandis qu'elle s'élève jusqu'à 560 kPa lorsqu'elle est positionnée à mi-hauteur. La similitude des réponses observées pour les configurations aux quarts valide la cohérence avec les résultats obtenus sur la porosité et la résistance au pic. Dans les configurations multi-nappes, l'intensité de cet effet de confinement s'accroît nettement : la contrainte horizontale moyenne atteint environ 1500 kPa pour la configuration 2G et jusqu'à 2000 kPa pour la configuration 3G. Cette augmentation de la contrainte horizontale, pour les différentes configurations testées, se traduit par une élévation concomitante de la contrainte verticale moyenne, qui aboutit à l'amélioration de la résistance au cisaillement observée à l'échelle macroscopique.

Ainsi, l'analyse spatiale montre que l'effet de confinement est principalement concentré au voisinage immédiat des nappes et décroît progressivement avec la distance verticale. La zone d'influence associée à chaque géogrille s'étend sur environ 30 mm (3 D_{50}), de part et d'autre, ce qui correspond à une décroissance de 15 à 25 % de la contrainte horizontale par rapport à sa valeur maximale au contact de la géogrille.

5. *Influence de l'élancement de l'échantillon sur les contraints horizontales :*

Afin de consolider les observations précédentes et de vérifier leur robustesse vis-à-vis de l'effet d'échelle, une analyse complémentaire a été menée sur des échantillons plus élancés (H/D = 1,64 et 2,42). Ces simulations, réalisées avec une seule géogrille placée à mi-hauteur, visent à confirmer la persistance et l'ampleur des mécanismes identifiés pour l'échantillon de référence (H/D = 0.83).

Les cartes de contraintes présentées à la Figure 6.12, présentant la même échelle de couleur pour assurer une comparaison fiable, montrent que le comportement local observé dans l'échantillon de référence se maintient qualitativement pour les échantillons plus élancés. Une concentration maximale des contraintes est toujours observée au niveau de la géogrille, celles-ci diminuant progressivement verticalement et latéralement, formant ainsi un dôme de contraintes. La distribution des contraintes dans le reste de l'échantillon devient plus homogène pour les échantillons élancés, et l'effet de forte contrainte près des bords disparaît. Ces observations valident l'hypothèse selon laquelle les fortes contraintes observées aux extrémités des

échantillons de faible élancement sont induites par l'interaction entre la géogrille et les dimensions limitées de l'échantillon.

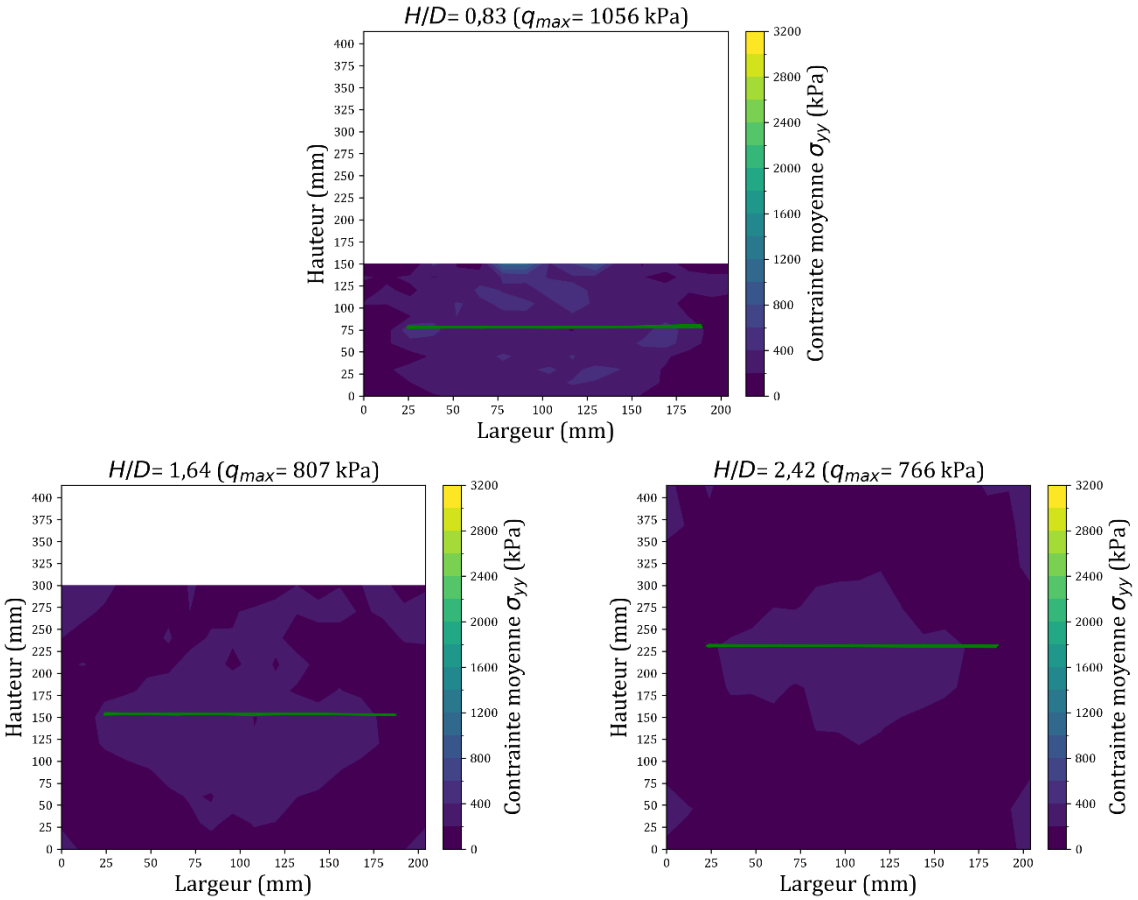


Figure 6.12. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne σ_{yy} dans le plan YZ au pic de chargement, pour des échantillons renforcés par une géogrille placée à mi-hauteur, pour trois élancements (H/D = 0,83, 1,64 et 2,42).

Comme déjà présenté, pour l'échantillon de faible élancement (H/D = 0,83), la contrainte horizontale maximale au voisinage de la géogrille atteint 560 kPa. Cette valeur diminue à 300 kPa et 250 kPa pour H/D = 1,64 et 2,42, respectivement, expliquant la baisse de résistance macroscopique observée avec l'augmentation de l'élancement. Par ailleurs, les valeurs similaires observées pour les grands élancements sont cohérentes avec la tendance macroscopique, qui tend à converger en augmentant H/D.

L'analyse quantitative de la zone d'influence autour de la géogrille montre que celle-ci reste localisée à environ 30 mm de part et d'autre de la nappe, ce qui se traduit par une décroissance de 15 à 25 % de la contrainte horizontale par rapport à sa valeur maximale. Au-delà de 100 mm, l'effet induit par la géogrille devient négligeable, confirmant une portée limitée de la redistribution des contraintes. A noter que cette valeur se situe dans la plage de variation (30–100 mm) rapportée dans la littérature, confirmant la cohérence des résultats obtenus.

En conclusion, la concentration des contraintes autour de la géogrille persiste quelle que soit la taille de l'échantillon, mais son intensité diminue avec l'augmentation de H/D. Les fortes contraintes près des bords sont un effet de la taille de l'échantillon dans les configurations à faible élancement. La zone d'influence effective de la géogrille est confinée à ±30 mm (3 D_{50}) autour de la nappe et devient négligeable au-delà de ±100 mm (10 D_{50}), conformément aux observations

rapportées dans la littérature, fournissant ainsi un critère fiable pour comprendre les mécanismes de renforcement.

6.2.1.3 *Analyse de l'état de déformation des échantillons*

Paraview est un outil de post-traitement spécialisé pour la visualisation de données scientifiques, reposant sur la bibliothèque « VTK ». Dans YADE, l'enregistrement des résultats peut être réalisé à l'aide du moteur « yade.wrapper.VTKRecorder() », qui génère des fichiers directement exploitables dans Paraview, facilitant ainsi l'analyse tridimensionnelle des résultats DEM. Cet outil, largement utilisé et validé dans de nombreuses études, constitue une référence fiable pour confronter les méthodes de post-traitement développées dans le cadre de ce travail à un outil reconnu, afin de garantir la robustesse des interprétations.

Dans ce contexte, l'étude du champ de déformation déviatorique, avec un outil existant, apparaît particulièrement pertinente, en complément direct des champs de contraintes horizontales. La classe « yade.wrapper.TesselationWrapper() » (TW) gère la triangulation des particules sphériques, permettant d'obtenir des informations localisées sur le volume, la porosité et l'évolution des déformations. Elle permet par la suite d'enregistrer la position actuelle des particules pour la comparaison entre un état initial et un état déformé après l'enregistrement des données issues de plusieurs étapes de calcul. En comparant ces états, la fonction « TW.defToVtk() » calcule et exporte dans un format VTK les champs de déformation, notamment le champ de déformation déviatorique :

$$\varepsilon_d = \varepsilon_z - \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \tag{52}$$

Ce paramètre reflète l'évolution de la structure interne des matériaux induite par le cisaillement, indépendamment des variations de volume, et constitue un indicateur couramment employé pour l'analyse des sols granulaires soumis à des essais triaxiaux.

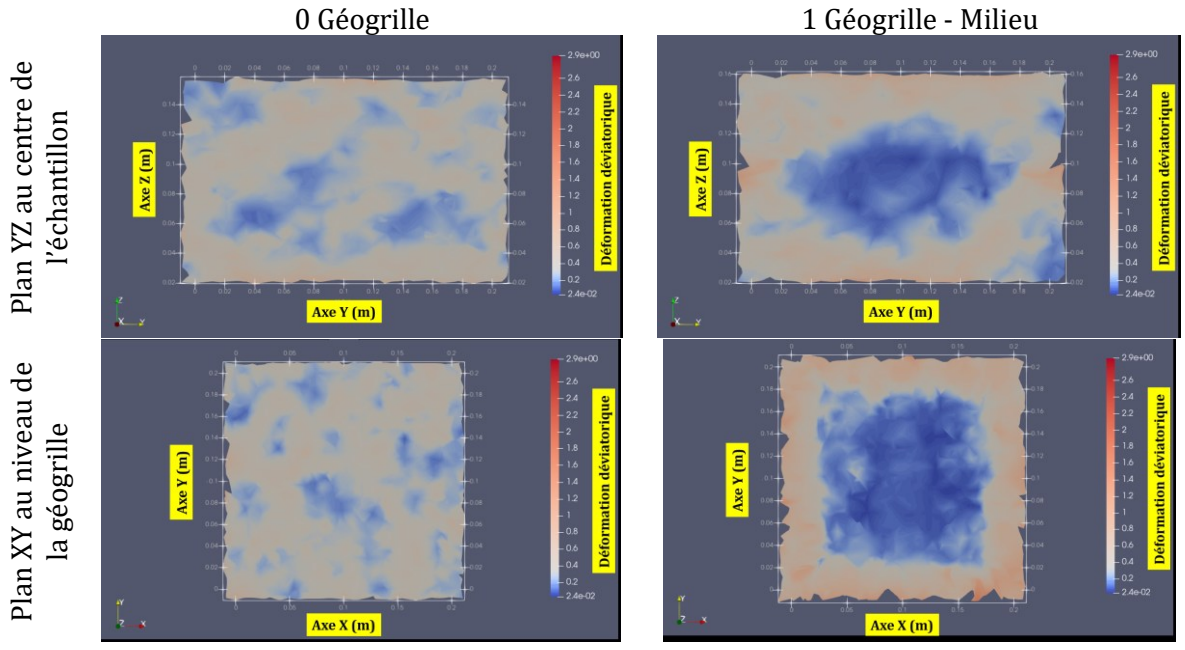


Figure 6.13. Distributions de la déformation déviatorique au pic de chargement, représentées dans les plans YZ et XY au centre de l'échantillon, pour les configurations sans et avec géogrille placée à mi-hauteur (particules sphériques, confinement 100 kPa).

La validation a été menée en comparant deux configurations : (i) un échantillon sans géogrille, et (ii) un échantillon avec une géogrille placée à mi-hauteur. La tessellation ne prenant pas en charge

les clumps, ces simulations ont été réalisées avec des particules sphériques indépendantes. Les résultats (Figure 6.13) mettent en évidence que :

- Sans géogrille, la déformation déviatorique apparaît globalement homogène et uniforme dans l'ensemble de l'échantillon au moment du pic de chargement, ce qui traduit un comportement isotrope caractéristique d'un milieu granulaire, où les particules sont libres de se déplacer sans entrave.
- Avec géogrille, une diminution des déformations apparaît au voisinage immédiat du renforcement, tandis que les déformations augmentent de manière significative dans les zones plus éloignées, en particulier en périphérie. Cela illustre clairement l'effet de confinement local exercé par la géogrille, qui restreint la mobilité des particules et concentre les déformations en dehors de sa zone d'influence immédiate.

Plus en détail, la zone de faible déformation autour de la géogrille est clairement identifiable sur le plan horizontal XY au niveau de la nappe. Cette zone s'étend longitudinalement (axe X) de 25 mm à 175 mm et transversalement (axe Y) de 20 mm à 180 mm, correspondant à la taille effective de la géogrille de 160 mm × 160 mm. Sur le plan vertical YZ, la forme en dôme se maintient avec une étendue de 20 à 30 mm. La réduction de cette zone, par rapport à celle observée dans les champs de contraintes (30 à 100 mm), peut être attribuée à l'utilisation de particules sphériques, dont la géométrie limite la connectivité entre grains et atténue l'efficacité du confinement, contrairement à des particules anguleuses. Cette observation ouvre la perspective d'une analyse plus approfondie de l'effet de la forme des grains sur le comportement global, qui sera traitée dans une section ultérieure.

Néanmoins, ces résultats confirment les tendances mises en évidence par l'analyse des contraintes horizontales et des champs de porosité : la géogrille agit comme un perturbateur local de la répartition des contraintes et des déformations, renforçant la stabilité dans sa zone d'influence directe tout en contribuant à l'accroissement de la résistance globale de l'échantillon.

6.2.2 Efforts et déformations dans la géogrille

Après avoir caractérisé la zone d'influence de la géogrille à travers la réponse du sol, il est essentiel d'analyser la manière dont la géogrille est sollicitée et redistribue les sollicitations. Cette approche permet de mettre en correspondance la réaction du sol à la réponse mécanique de la nappe de renfort.

6.2.2.1 *Suivi des efforts internes dans les éléments de géogrille*

Comme précisé dans la section 4.4.2, la géogrille est modélisée à l'aide de nœuds appelés « *gridNodes* », reliés entre eux par des cylindres dénommés « *gridConnections* », dont le comportement est linéaire élastique parfaitement plastique. Cette connexion permet aux *gridNodes* d'échanger des forces via la *gridConnection*. Ainsi, les efforts internes mobilisés dans la géogrille résultent directement des interactions entre ces nœuds.

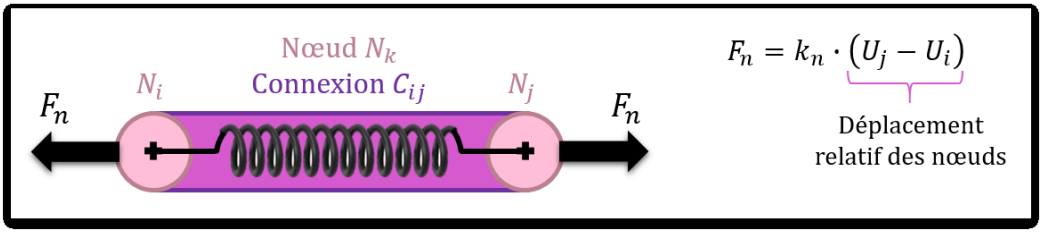


Figure 6.14. Force normale interne induite dans les éléments de la géogrille.

En pratique, l'effort normal dans une nervure correspond à la force normale « F_n » transmise entre chaque paire de nœuds connectés. Cette force est fonction de l'allongement de la nervure ΔL, défini comme le déplacement relatif des nœuds, et à la rigidité normale k_N, selon la formulation introduite aux équations (10) et (15) (voir Figure 6.14). Ces efforts de traction dans les nervures constituent ainsi un indicateur direct de la réponse mécanique interne de la nappe de renfort et permettent d'évaluer sa contribution effective au confinement du sol environnant.

1. *Extraction et visualisation des résultats :*

Dans YADE, les efforts normaux développés dans les nervures sont accessibles à travers les interactions entre nœuds connectés, via la fonction « O.interactions[node1Id, node2Id]. phys.normalForce.norm() ». Cette extraction fournit une valeur instantanée de la force normale dans chaque connexion. Afin de rendre ces informations exploitables, la bibliothèque VTK permet leur enregistrement dans des fichiers compatibles avec ParaView. Cette approche offre une visualisation claire de la distribution spatiale de l'intensité des efforts normaux dans la géogrille à un instant donné de la simulation. Elle met en évidence les zones de concentration d'efforts et fournit une base solide pour l'interprétation des mécanismes de renforcement. Elle reste toutefois limitée, car elle ne renseigne pas sur l'évolution temporelle des efforts mobilisés au cours du chargement.

Pour remédier à ce manquement, un algorithme spécifique a été développé. Celui-ci permet à la fois d'exporter les efforts internes pour une analyse instantanée et de suivre leur évolution dans le temps, offrant ainsi une lecture plus complète de l'action du renforcement. L'approche combinée - visualisation spatiale et suivi temporel - garantit une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de charges au sein de la géogrille.

Les résultats issus de cet algorithme ont été systématiquement confrontés aux visualisations obtenues avec ParaView. La Figure 6.15 illustre un exemple représentatif pour une simulation avec une géogrille placée à mi-hauteur, à la fin de la sollicitation. Les nervures y sont représentées en projection 2D dans le plan de la géogrille (XY), chacune étant colorée en fonction de son niveau de mobilisation. La comparaison montre une concordance parfaite : les distributions reproduites par l'algorithme coïncident avec celles de ParaView, ce qui valide la fiabilité de l'outil développé et confirme sa pertinence pour l'analyse détaillée des résultats.

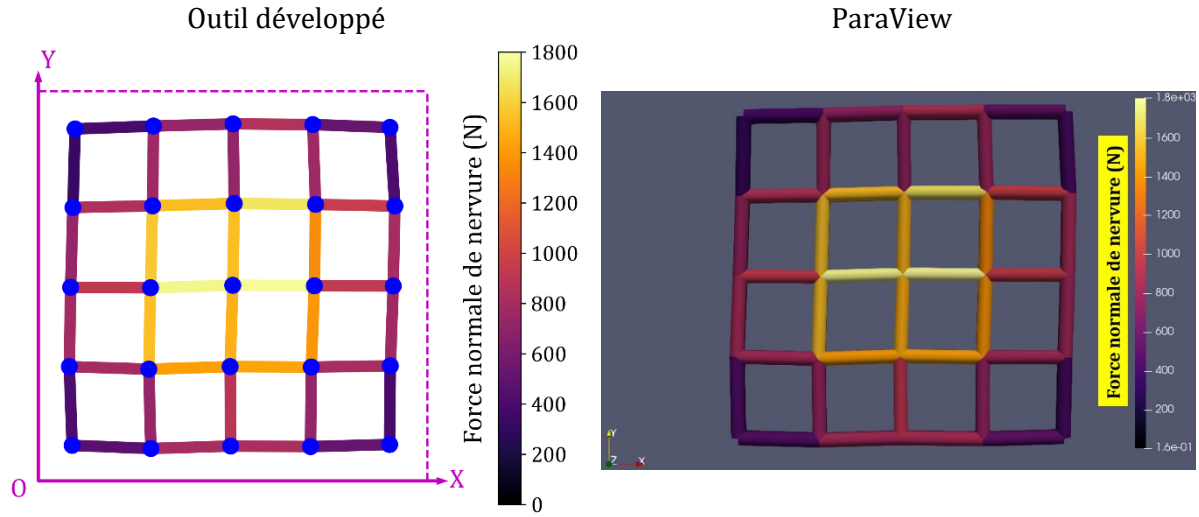


Figure 6.15. Illustration des forces normales mobilisées dans une géogrille placée à mi-hauteur, à la fin de la sollicitation : comparaison entre l'algorithme développé et ParaView.

2. *Evaluation des forces de traction et localisation des zones de sollicitation dans les nervures :*

L'étude vise à quantifier les forces de traction mobilisées dans les nervures, ainsi que leur évolution au cours de la sollicitation. Étant donné que la position à mi-hauteur de la géogrille dans la configuration 1G a montré la meilleure efficacité, ce cas est retenu comme référence. La variation de la contrainte déviatorique q de l'échantillon est tracée conjointement avec celle des forces normales mobilisées F_n dans les nervures centrales le long de l'axe X, en fonction de la déformation latérale de l'échantillon ε_x (Figure 6.16). Le choix de ces nervures repose sur l'analyse préliminaire de la Figure 6.15, qui a mis en évidence une mobilisation plus importante des nervures dans la zone centrale. Comme l'échantillon est symétrique par rapport à l'axe Z, le choix de l'axe X ou Y est équivalent.

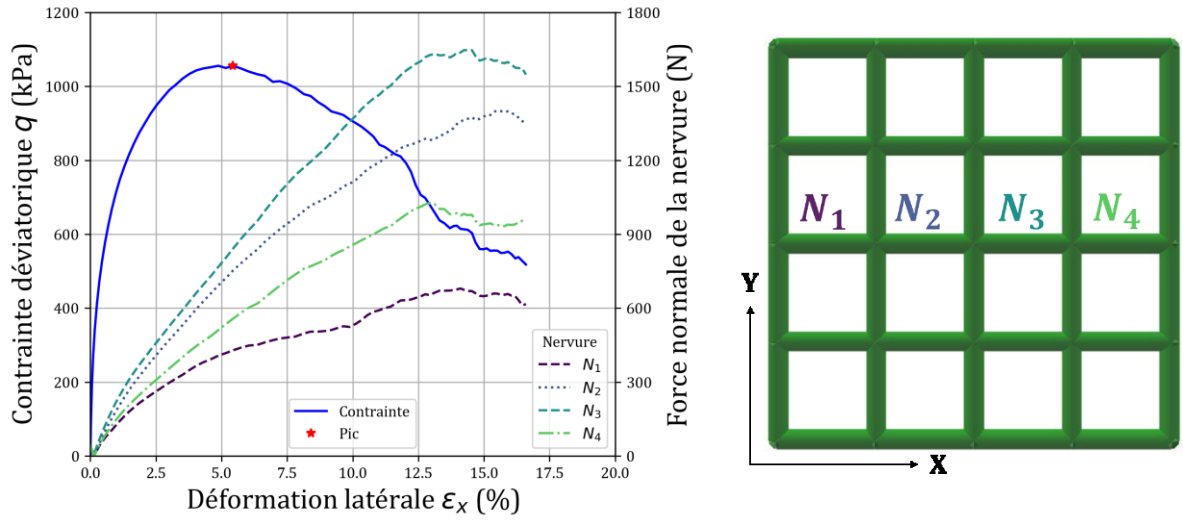


Figure 6.16. Évolution conjointe de la contrainte déviatorique et des forces normales dans les nervures centrales de la géogrille en fonction de la déformation latérale.

En termes de réponse mécanique, il apparaît clairement qu'une fois l'échantillon soumis à la charge, des efforts de traction sont mobilisés de manière proportionnelle à la déformation latérale de l'échantillon.

En phase post-pic, bien que le déviateur diminue, les efforts internes dans les nervures continuent de croître. Ce comportement caractérise le mécanisme de redistribution progressif des sollicitations du sol vers la géogrille, les particules de sol prenant progressivement appui sur les nervures de la géogrille. La géogrille assure ainsi un confinement accru du sol même lorsque la résistance macroscopique du matériau diminue. Une fois le régime résiduel atteint, les efforts internes dans la géogrille se stabilisent, consécutivement au des-enchevêtrement progressif et au mouvement entre les grains du sol et la géogrille.

La distribution des forces normales dans la grille met en évidence une hétérogénéité importante entre nervures centrales (N_2, N_3) et périphériques (N_1, N_4). Pour les faibles sollicitations, les nervures centrales mobilisent des efforts supérieurs à ceux observés en périphérie. Cet écart s'accentue en phase post-pic : toutes les nervures voient leurs efforts augmenter, mais l'augmentation est particulièrement marquée au centre, traduisant un transfert de charge préférentiel vers la zone centrale de la géogrille lorsque le matériau granulaire perd de sa résistance.

Plus quantitativement, la Figure 6.17 présente la distribution spatiale des forces normales mobilisées dans la géogrille, au pic et en fin de chargement. Les positions des nœuds correspondent à leur géométrie réelle dans la simulation, ce qui permet également de visualiser le mode de déformation de la nappe dans le plan XY. Comparativement aux efforts au pic de contraintes, les augmentations des efforts post-pic sont nettes pour toutes les nervures (N_1 : +43,9

%, N_2 : +79,9 %, N_3 : +84,0 %, N_4 : +70,2 %). Au pic, la moyenne des efforts dans les nervures centrales (796,5 N) est environ 1,62 fois plus élevée que celle en périphérie (492,5 N), et ce ratio atteint 1,85 en fin de chargement (1450 N contre 782 N). Ces résultats confirment le rôle majeur de la zone centrale et l'intensification de son rôle en phase post-pic.

Enfin, un point notable concerne la symétrie de la réponse de la géogrille. Bien que la géométrie soit globalement symétrique, une asymétrie se développe progressivement dans la mobilisation des nervures, aussi bien le long de l'axe X que de l'axe Y. La réponse reste globalement symétrique avant le pic, mais une dérive apparaît près du pic et s'accentue en phase post-pic (par exemple, N_1 comparativement à N_4 : +26,2 % au pic, +42,5 % en fin de chargement). Cette évolution suggère que des effets locaux, liés à la microstructure et à la réorganisation des particules lorsque le matériau perd de la résistance, introduisent des déséquilibres dans la répartition des efforts. Autrement dit, dans le cas d'une seule nappe, toute la charge est concentrée dans une zone unique, ce qui amplifie l'influence de la microstructure sur l'apparition d'hétérogénéités.

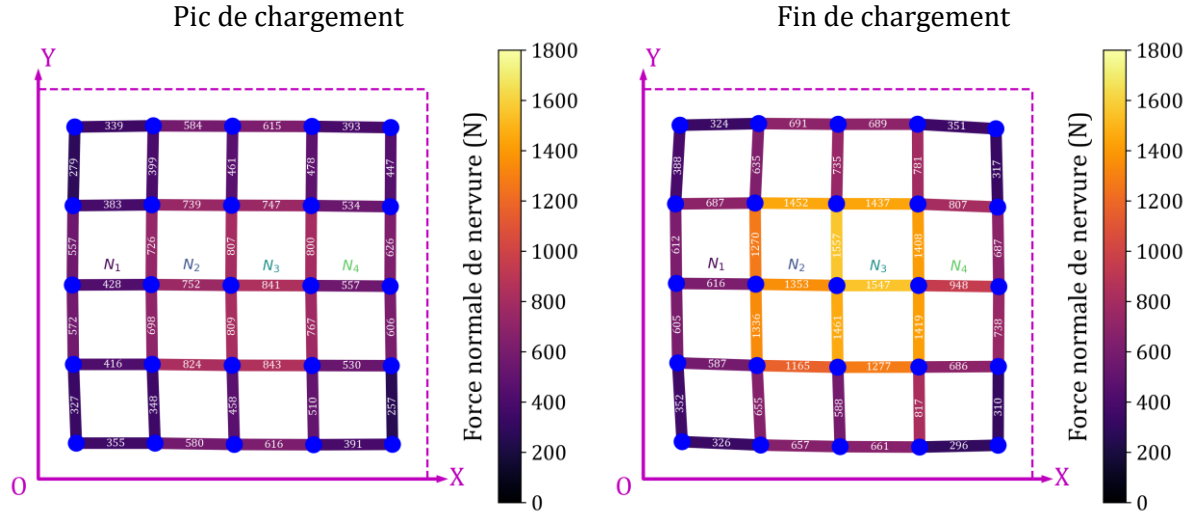


Figure 6.17. Distribution spatiale des forces normales mobilisées dans les nervures de la géogrille, au pic et en fin de chargement (configuration 1G, mi-hauteur).

Après la configuration de référence 1G, l'analyse est étendue à la configuration 2G, où deux nappes sont placées aux quarts de l'échantillon. La Figure 6.18.a présente l'évolution conjointe du déviateur des contraintes et des forces normales dans les nervures en fonction de la déformation latérale.

En termes de comportement global, les deux géogrilles se mobilisent de manière quasi-identique, confirmant la tendance observée avec la configuration 1G : les forces croissent proportionnellement au déviateur. Toutefois, contrairement au cas 1G à mi-hauteur, la phase post-pic n'est pas atteinte dans la plage étudiée (ε_z = 20 %). Les forces dans la géogrille continuent de croître sans stabilisation, en cohérence avec l'absence d'adoucissement du comportement macroscopique.

La distribution spatiale des efforts à la fin du chargement est illustrée en Figure 6.18.b. Comme pour la configuration 1G, les nervures centrales de la géogrille restent les plus sollicitées, alors que les extrémités mobilisent moins d'effort, en raison du moindre confinement par le sol environnant. Cette concentration d'efforts dans la zone centrale traduit le rôle de la géogrille comme structure de renforcement qui rigidifie localement le matériau et limite les déplacements relatifs des particules.

Un fait marquant concerne la symétrie de mobilisation des nervures, qui persiste tout au long du chargement. La présence de deux nappes disposées de manière symétrique répartit équitablement les sollicitations dans l'échantillon, ce qui atténue l'influence des déséquilibres locaux mis en évidence dans la configuration 1G. De plus, l'augmentation croissante du déviateur des contraintes, sans relâchement post pic, s'accompagne d'une mobilisation progressive et régulière des nervures. Autrement dit, l'augmentation de la résistance globale est intimement liée à la mobilisation simultanée des efforts internes dans les deux nappes, qui retardent l'apparition du pic de contraintes observé dans la configuration 1G.

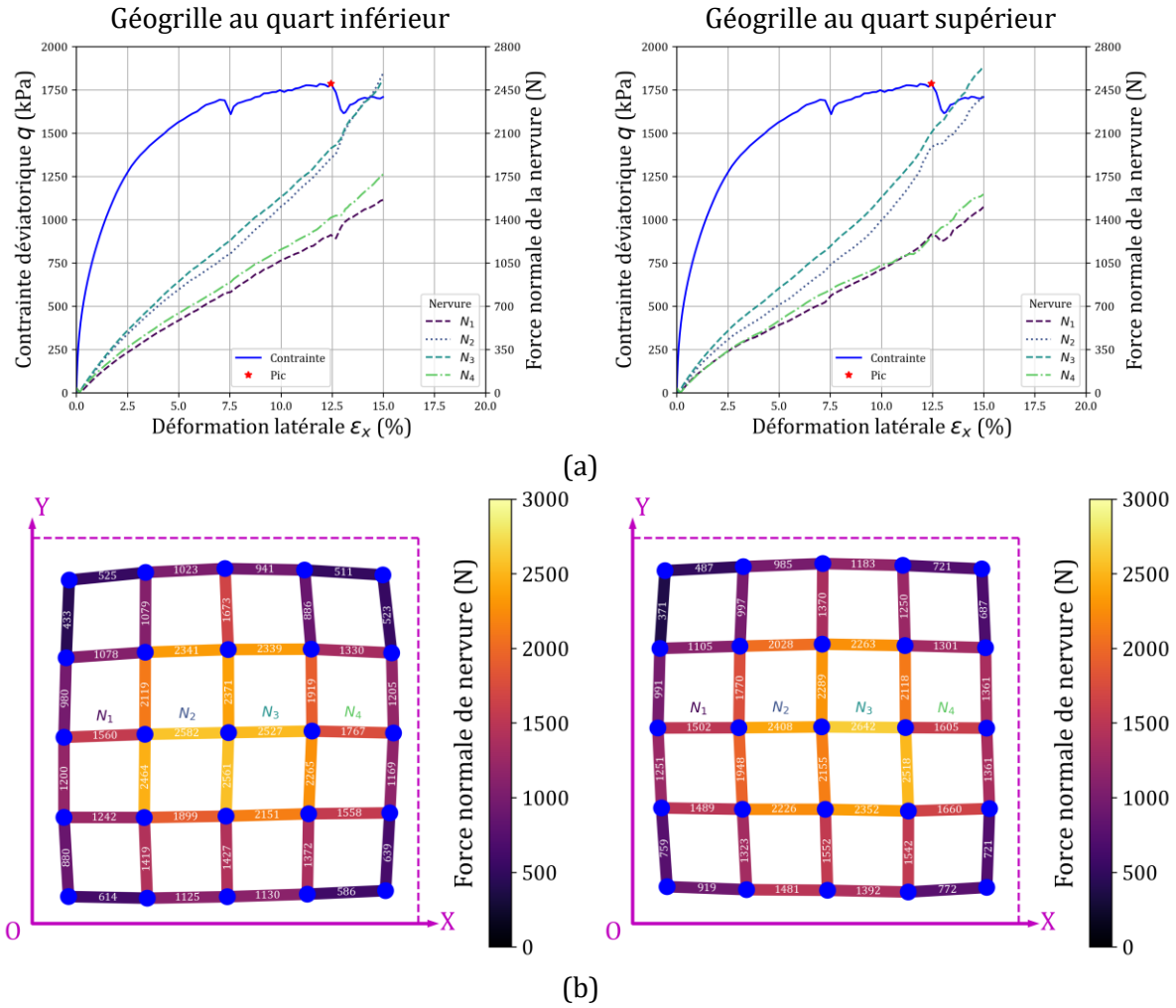


Figure 6.18. Forces normales dans les nervures de la géogrille pour la configuration 2G : (a) évolution conjointe des forces dans les nervures et du déviateur de contraintes en fonction de la déformation latérale, (b) distribution spatiale en fin de chargement.

Ces résultats corroborent les observations de la section 6.2.1, où la présence de la géogrille favorise le développement de contraintes horizontales, modifie la porosité locale et limite les déformations à proximité immédiate des nappes. La configuration 2G confirme donc le rôle de la géogrille comme répartiteur des efforts internes et de stabilisation du squelette granulaire. Cette approche de suivi continu des efforts apporte ainsi une lecture fine des mécanismes d'interaction sol-géogrille et constitue une base solide pour l'évaluation de la performance des géogrilles dans des conditions de chargement réelles.

6.2.2.2 *Déformation de la géogrille et corrélations avec le comportement global*

En complément de l'étude des efforts internes dans les nervures de la géogrille, il est essentiel d'analyser la manière dont la nappe elle-même se déforme au cours du chargement. Cette analyse permet de quantifier le rôle du renfort dans la limitation des déplacements du sol et d'évaluer sa contribution à la résistance globale.

Comme mentionné précédemment, les nervures sont modélisées par des éléments assimilables à des poutres dont le comportement est linéaire élastique parfaitement plastique. La relation linéaire entre l'allongement et la force mobilisée est vérifiée sur la Figure 6.19. Ces courbes montrent que toutes les nervures, ayant la même rigidité normale, se comportent de manière superposable : plus une nervure s'allonge, plus la force qu'elle mobilise est élevée. L'allongement global de la géogrille correspond donc à la somme des allongements des nervures (N_1 à N_4) le long de chaque axe (Axe 1, Axe 2, etc.) dans une direction donnée (X ou Y).

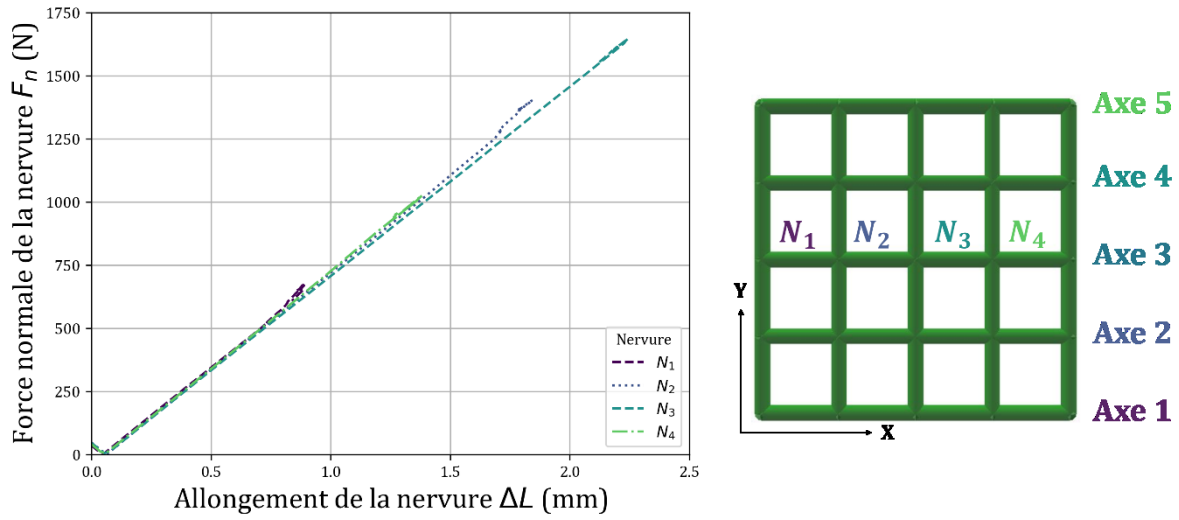


Figure 6.19. Courbes force – allongement des nervures centrales de la géogrille (configuration 1G à mi-hauteur).

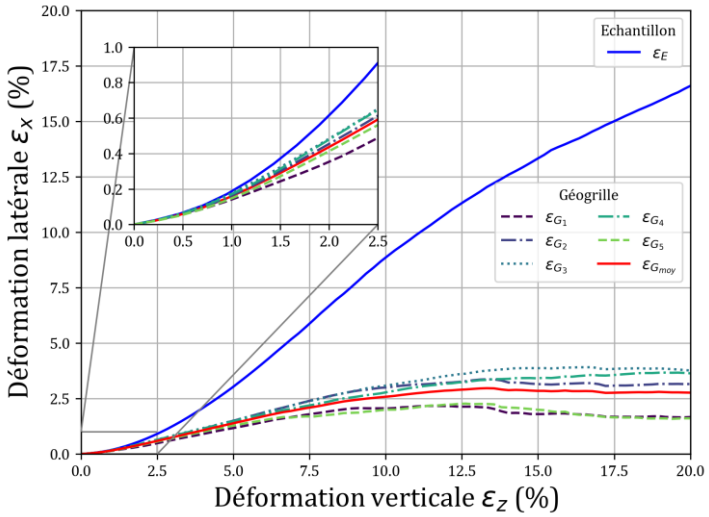


Figure 6.20. Déformation de la géogrille et déformation latérale de l'échantillon en fonction de la déformation verticale de l'échantillon (configuration 1G à mi-hauteur).

L'évolution de la déformation moyenne de la géogrille « ε_G » est comparée à la déformation latérale globale de l'échantillon ε_x (Figure 6.20), afin d'évaluer si le renfort suit fidèlement la

déformation du sol. Étant donné que la mobilisation de la géogrille est plus marquée au centre et s'atténue vers les bords, sa déformation a été analysée le long de différents axes ε_{G_i} (Axe 1 à Axe 5, Figure 6.19). Contrairement à la déformation globale de l'échantillon, directement extraite de YADE, la déformation moyenne de la géogrille est calculée à posteriori à chaque instant de la simulation comme le rapport entre l'allongement mesuré le long d'un axe et sa longueur initiale.

Jusqu'à environ 1 % de déformation verticale, les courbes de l'échantillon et de la géogrille sont quasi-superposées, indiquant un mouvement couplé entre le sol et le renfort (pour une déformation latérale d'environ 0,2 %). Cette étape correspond à la phase de densification du matériau granulaire, comme l'illustre l'évolution de la déformation volumique (Figure 6.2.b). Autrement dit, tant que le squelette granulaire se réorganise et se densifie, la géogrille suit fidèlement la déformation du sol environnant sans décalage perceptible. Au-delà, l'échantillon se déforme plus rapidement que la géogrille, ce qui engendre un décalage dans la réponse du renfort par rapport au squelette granulaire. Ce décalage coïncide avec l'entrée en phase dilatante de l'échantillon et traduit un mécanisme de mise en tension progressif de la géogrille par mobilisation du frottement à l'interface et par butée des grains de sol avec les renforts transversaux.

La déformation de la géogrille continue de croître avec celle de l'échantillon, mais se stabilise à partir de 12,5 % de déformation verticale suite à une dés-imbrication et au mouvement des grains du sol par rapport à la grille, et ce conformément à la stabilisation des forces internes observée dans la section 6.2.2.1. En fin de chargement, la géogrille présente une déformation moyenne $\varepsilon_{G_{moy}}$ de 2,8 %, contre 16,6 % pour l'échantillon, ce qui atteste de son rôle de confinement local et de limitation des déplacements relatifs des particules environnantes.

Pour consolider les observations précédentes, la configuration à deux géogrilles (2G) a également été étudiée. Étant donné que la déformation de la géogrille suit la même tendance que les efforts mobilisés (plus importante au centre qu'aux bord), l'analyse s'appuie ici sur la déformation moyenne calculée sur l'ensemble des axes de la géogrille. La Figure 6.21 présente l'évolution comparée de la déformation moyenne des géogrilles (1G et 2G) en fonction de la déformation latérale globale de l'échantillon, en référence à la configuration non renforcée (0G).

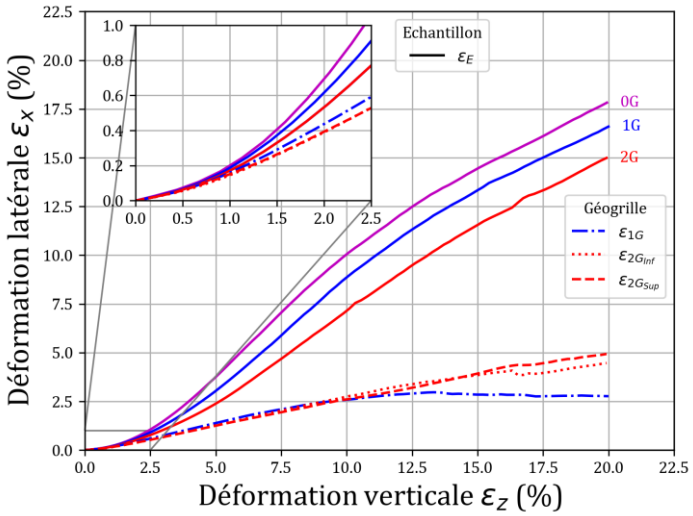


Figure 6.21. Comparaison de la déformation moyenne des géogrilles et de la déformation latérale de l'échantillon pour les configurations : 0G, 1G (Mi-hauteur), et 2G.

Comme déjà observé pour la configuration 1G, on constate que, jusqu'à environ 1 % de déformation verticale, les courbes de la géogrille et de l'échantillon restent quasi superposées, que

l'échantillon soit renforcé ou non, traduisant un comportement similaire correspondant à la limite de contractance. La comparaison met en évidence que l'échantillon non renforcé se déforme plus rapidement et plus intensément que les configurations renforcées, atteignant plus précocement la phase de contractance puis de dilatance. La présence d'une ou deux géogrilles permet de retarder cette évolution. Une fois le pic de résistance atteint ($\varepsilon_z \approx 7{,}1$ % pour 1G et $\varepsilon_z \approx 15$ % pour 2G, cf. Figure 6.2.a), les courbes de déformation latérale tendent à évoluer avec une pente similaire, indépendamment de la configuration. Toutefois, la présence de renforts réduit significativement les amplitudes atteintes : à la fin du chargement ($\varepsilon_z = 20$ %), les déformations latérales maximales sont de 17,8 % (0G), 16,6 % (1G) et 15 % (2G), montrant que la géogrille limite efficacement les déplacements transversaux, même à des niveaux de chargement avancés.

Concernant le renfort, l'analyse de la configuration 2G révèle une symétrie dans la déformation des deux géogrilles, dont les courbes se superposent à celles obtenues pour la configuration 1G durant la première phase de sollicitation. Cependant, une divergence apparaît une fois que le pic de la configuration 1G est atteint : la géogrille seule tend alors à se stabiliser autour de $\varepsilon_{1G} = 2{,}8$ % de déformation, tandis que dans la configuration 2G, les déformations continuent de croître, en cohérence avec l'augmentation progressive du déviateur, pour atteindre près de $\varepsilon_{2G} = 5$ % en fin de chargement, traduisant une mobilisation prolongée et cumulative. Cette observation indique que la capacité de la géogrille à se déformer de manière contrôlée contribue directement à limiter les déplacements latéraux de l'échantillon.

En résumé, ces résultats confirment et complètent l'analyse des efforts internes présentée précédemment, en montrant que la déformation de la géogrille accompagne et influe directement sur le comportement latéral du sol. Ils mettent en évidence le rôle actif de la géogrille dans le contrôle de la déformation latérale de l'échantillon. L'ajout d'un second renfort ne se limite pas seulement à un gain de résistance au pic, mais assure également une redistribution plus homogène des déformations et une augmentation de confinement, traduisant ainsi une interaction sol–géogrille optimisée à l'échelle globale. La capacité de déformation de la géogrille permet une interaction soutenue avec le sol environnant, traduite macroscopiquement par une réduction des déplacements latéraux de l'échantillon.

6.2.3 Analyse micromécanique des interactions grain-géogrille

L'analyse des efforts et des déformations de la géogrille a permis d'évaluer sa capacité à accompagner la déformation du sol et à exercer un confinement efficace. Afin d'approfondir ce rôle, cette section s'intéresse aux interactions entre grains et géogrille. L'objectif est de relier la distribution des forces et des déformations internes aux mécanismes microscopiques de transfert d'efforts, qui gouvernent la stabilité globale du matériau granulaire renforcé.

6.2.3.1 *Identification des mécanismes locaux d'interaction grain–géogrille*

Deux principaux mécanismes d'interaction entre le sol granulaire et la géogrille sont identifiés dans la littérature : (i) l'imbrication des grains dans les ouvertures de la géogrille, et (ii) le frottement entre les grains et la surface des nervures. Ils constituent une condition ultime pour assurer la fonction de stabilisation des géogrilles.

Lors de la mise en place et du compactage d'une couche granulaire, les agrégats pénètrent partiellement dans les ouvertures (Figure 6.22.a). Sous chargement, les grains se bloquent dans ces ouvertures et les forces de butée deviennent effectives (Figure 6.22.b). Les grains adjacents contribuent également au verrouillage mécanique par les forces de contact, ce qui confère une rigidité accrue et limite les déplacements latéraux au voisinage de la géogrille.

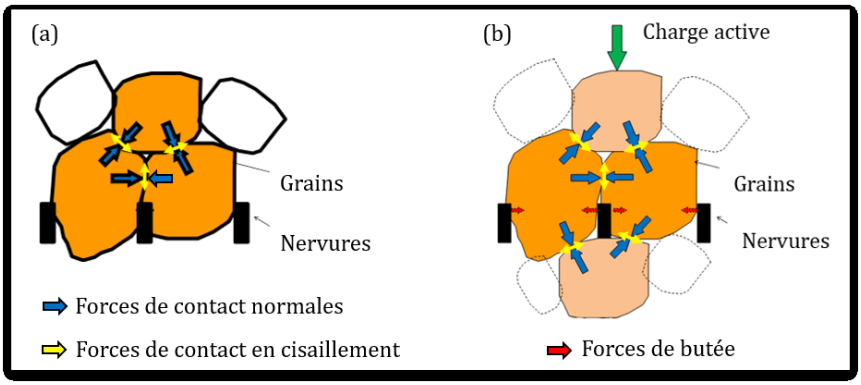


Figure 6.22. Imbrication des grains dans les ouvertures de la géogrille : (a) après compactage et (b) au cours du chargement (adaptée de Rakowski, 2017).

Les deux mécanismes d'interaction agissent de manière conjointe : le frottement contribue à la transmission d'efforts tangents au plan de la géogrille, tandis que la butée engendre des efforts normaux aux nervures de la géogrille et qui contribue au confinement des grains. L'illustration schématique en Figure 6.23 présente le cas idéalisé d'un contact latéral grain–nervure (a), et le cas plus général d'une interaction inclinée (b), tous deux représentatifs des sollicitations réelles au sein des nervures longitudinales.

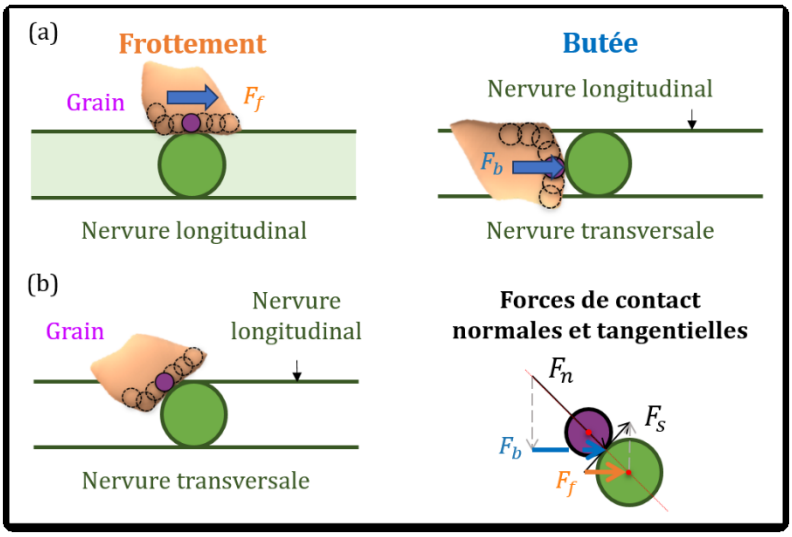


Figure 6.23. Illustration schématique des forces d'interaction grain–géogrille : (a) cas idéalisé, (b) cas général.

Dans le modèle numérique, le contact grain–géogrille est représenté par l'interaction entre une sphère constituant le clump et une sphère virtuelle à l'intérieur du cylindre représentant la nervure (cf. Figure 4.3) :

- La force de contact « F_c » est la somme vectorielle d'une composante normale et d'une composante tangentielle.
- La force de butée « F_b » correspond à la composante horizontale de la force normale, s'exerçant dans le plan de la géogrille et traduisant l'imbrication des grains dans les ouvertures.
- La force de frottement « F_f » correspond à la composante horizontale de la force tangentielle, s'opposant au glissement relatif entre les grains et la nervure, et dépendant de l'angle de frottement d'interface.

Ainsi, l'analyse des forces de contact permet d'identifier et de quantifier la contribution respective de la butée et du frottement dans la stabilisation du squelette granulaire par la géogrille. Pour cela, il est nécessaire d'isoler les particules en interaction directe avec la géogrille. La Figure 6.24 illustre ces interactions pour la configuration 1G à mi-hauteur, en considérant trois états caractéristiques : confiné, pic de résistance et fin de chargement.

Au cours du chargement, les grains se déplacent et certains contacts avec la géogrille se perdent. Pour représenter cette évolution, un code couleur a été adopté : les clumps sont colorés selon leur appartenance à une couche ; les sphères en contact permanent avec la géogrille apparaissent en jaune, tandis que celles ayant perdu le contact apparaissent en magenta. Cette représentation met en évidence que les grains de la zone centrale conservent leurs contacts avec la géogrille, traduisant un ancrage stable, tandis qu'aux bords, les grains moins imbriqués se déplacent plus librement et s'éloignent de la géogrille.

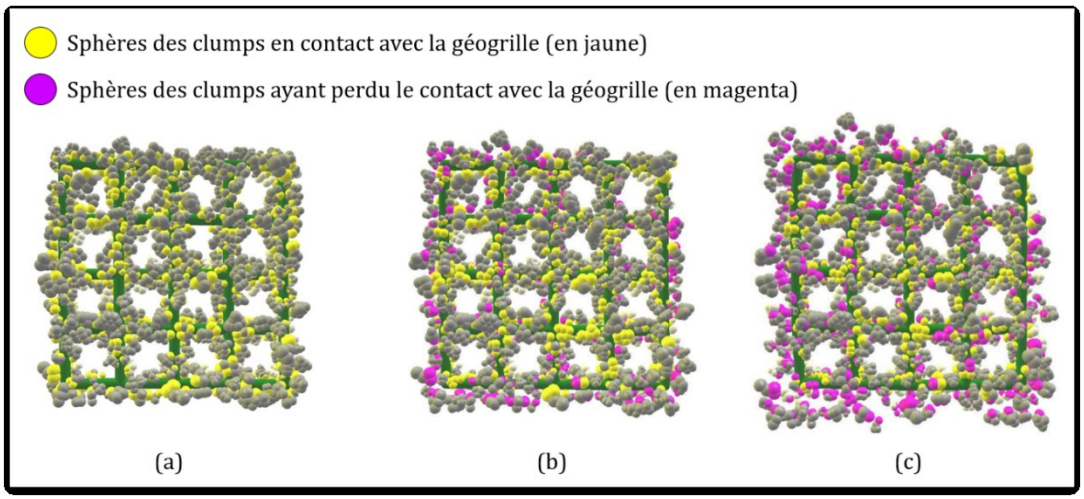


Figure 6.24. Illustration de l'évolution des interactions grain–géogrille pour la configuration 1G à mi-hauteur : états confiné (a), pic (b) et fin de chargement (c).

6.2.3.2 *Contribution de la butée et du frottement dans la mobilisation de la géogrille*

Pour étudier la contribution de la butée et du frottement dans la mobilisation de la géogrille, l'analyse est menée sur la totalité de la nappe. La symétrie de la réponse de la géogrille ayant déjà été mise en évidence, seule la direction X est considérée ici. La méthode consiste à effectuer des coupes virtuelles dans la géogrille et à comparer, le long de chaque coupe, les forces de butée et de frottement issues des contacts grains–géogrille avec la somme des forces mobilisées par les nervures correspondantes. La Figure 6.25 illustre les différentes coupes retenues à l'état de pic de chargement.

Pour simplifier la visualisation, seules les sphères des clumps en contact avec la géogrille sont représentées. Un code couleur distingue les directions de contribution des forces de contact : les nervures étudiées apparaissent en rouge ; les particules contribuant dans la direction X positive (droite) sont en jaune, avec leur nervure associée en vert ; celles contribuant dans la direction X négative (gauche) sont en violet, avec leur nervure associée en bleu. Au niveau de chaque coupe, la somme des forces de contact F_c dans les deux sens devrait, idéalement, être équilibrée avec les efforts internes F_n mobilisés dans les nervures. En pratique, une valeur moyenne est considérée, censée correspondre à la somme des efforts totaux mobilisés par les nervures le long de la coupe.

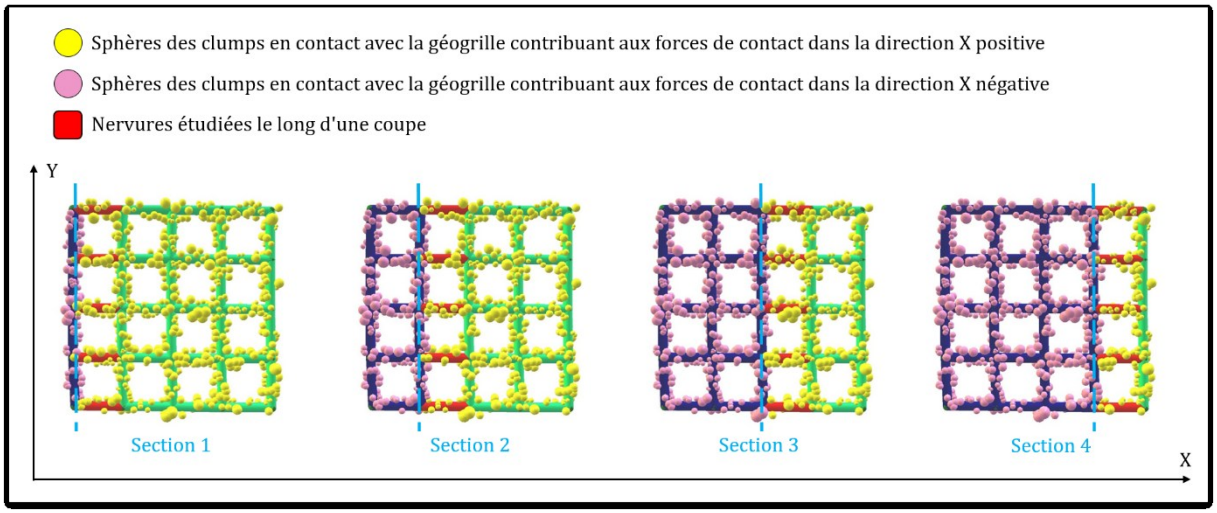


Figure 6.25. Illustration des coupes réalisées dans la géogrille pour l'analyse des interactions grain–géogrille au pic de chargement (configuration 1G à mi-hauteur).

Le cas de référence correspond à une simulation avec un angle de frottement interne entre particules $\phi_{grains-grains}$ = 30°, et un frottement d'interface géogrille–grains également fixé à $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°. L'évolution comparée des forces totales dans les nervures et des forces de contact horizontales, ainsi que leur décomposition en composantes de butée et de frottement, est présentée en Figure 6.26 pour la section 3 (axe central de la géogrille).

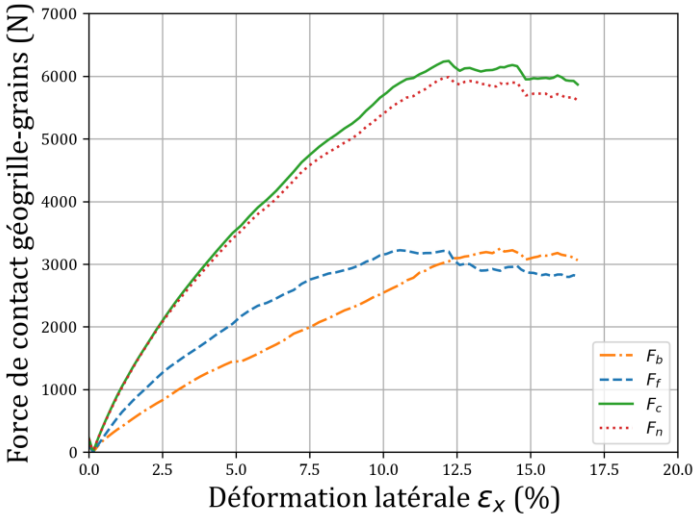


Figure 6.26. Evolution des forces mobilisées dans la section 3 : forces normales dans les nervures et forces de contact horizontales ; décomposition en butée et frottement (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

Les résultats montrent que l'équilibre entre les forces de contact et les forces internes dans les nervures est globalement respecté : les deux courbes sont quasi superposables sur l'ensemble du chargement, avec un écart maximal limité à 4,5 % en phase post-pic. Ce constat confirme la pertinence de la décomposition proposée et valide la capacité du modèle à restituer correctement les transferts d'efforts entre sol et géogrille en régime quasi statique.

En ce qui concerne les contributions relatives, le frottement domine durant la majeure partie de l'essai (phase de mobilisation initiale et montée vers le pic), indiquant que la résistance initiale est principalement assurée par la composante tangentielle des contacts. Ce comportement traduit

une interaction encore limitée en termes d'imbrication granulaire. En post-pic, la composante de butée progresse et tend à rejoindre, voire à dépasser légèrement, la contribution du frottement au régime résiduel. Cette évolution traduit une transition mécanique : d'un mécanisme initialement contrôlé par le déplacement relatif grain–nervure (frottement), le système évolue vers un verrouillage croissant des grains dans les mailles (butée), assurant ainsi le confinement durable de la nappe alors même que la résistance macroscopique du massif diminue. Ainsi, l'efficacité du renfort résulte donc d'une mobilisation séquentielle et complémentaire des deux mécanismes, plutôt que de la prédominance permanente de l'un d'entre eux.

Après cette analyse initiale menée sur la zone centrale (section 3), il est nécessaire d'étendre l'étude à l'ensemble des coupes afin d'évaluer la répartition spatiale des contributions de butée et de frottement dans la géogrille. Cette démarche permet de vérifier si les tendances observées localement au centre sont représentatives de l'ensemble de la nappe, ou si des hétérogénéités apparaissent en fonction de la position dans l'échantillon. Elle offre ainsi une vision plus complète des mécanismes locaux d'interaction grain–géogrille et de leur évolution au cours du chargement. Les résultats correspondants sont présentés et discutés à la Figure 6.27.

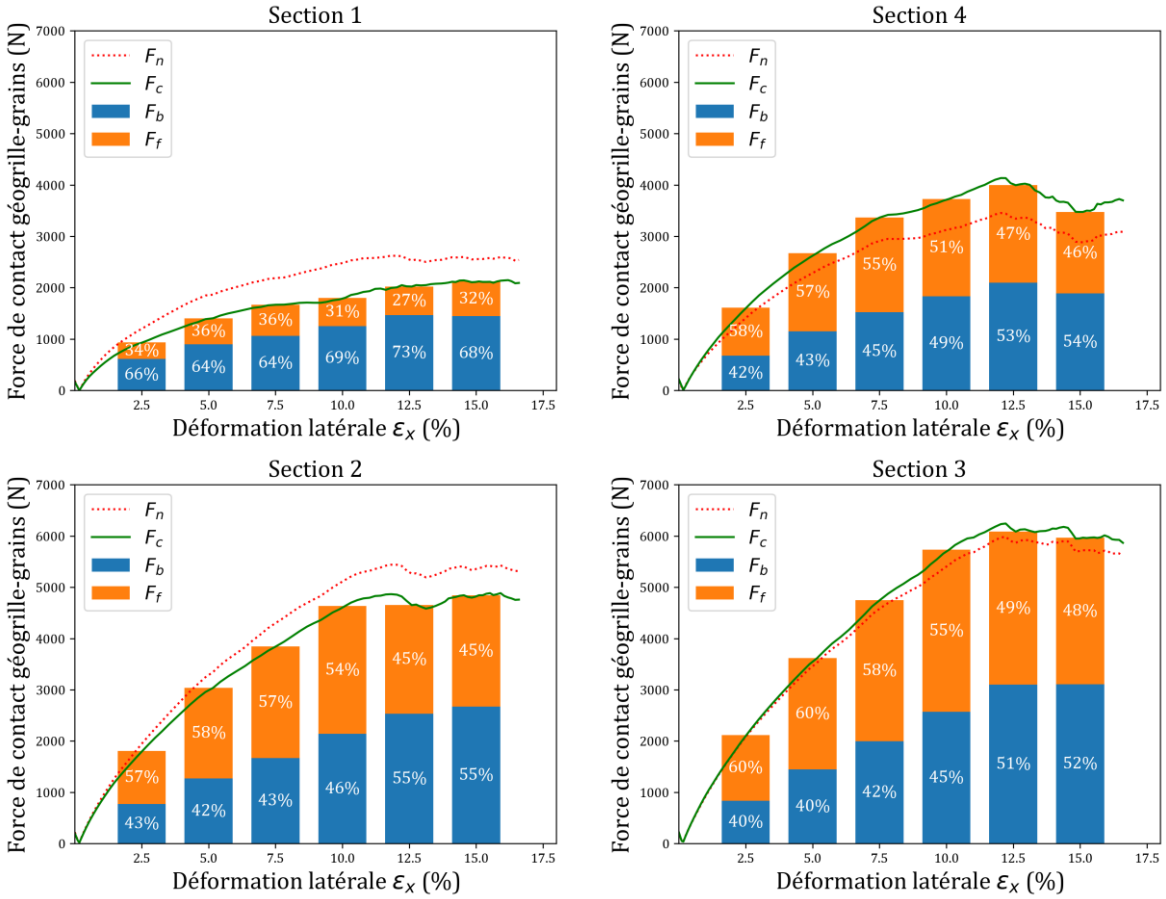


Figure 6.27. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long des différentes sections et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

L'analyse des coupes latérales révèle que, si les forces normales mobilisées dans la géogrille restent globalement symétriques entre coupes opposées, des écarts notables apparaissent entre les forces de contact horizontales et les forces internes dans les nervures. Alors que cet écart reste limité à 4,5 %, en phase post-pic, pour la coupe centrale (section 3), les coupes 1, 2 et 4 affichent des écarts plus marqués (18 %, 10 % et 20 % respectivement). Cette divergence ne reflète pas une anomalie mécanique mais est directement liée à la méthode de partitionnement des sections qui

ne sont pas totalement symétriques selon la direction X (Figure 6.25) : en effet, la définition géométrique des zones de gauche et de droite inclut différemment les particules en contact avec les nervures verticales et horizontales, ce qui introduit une dissymétrie artificielle :

- **Section 1 et Section 4 :**
  Ces deux sections présentent des forces de butée comparables (≈ 650 N à ε_x = 2,5 %), mais une contribution en frottement nettement différente (935 N pour la coupe 1 contre 1620 N pour la coupe 4). Cette différence provient de la prise en compte des nervures horizontales dans la coupe 4, qui, ne pouvant pas fonctionner en butée dans cette direction, se mobilisent principalement par frottement.
- **Section 1 vs Section 2 :**
  Pour ces deux sections, une divergence plus marquée est observée dans les contributions de butée. Pour ε_x = 2,5 %, la section 2 mobilise environ 770 N contre seulement 650 N pour la section 1 ; cette différence croît ensuite pour atteindre 2680 N contre 1450 N pour ε_x = 15 %. Cette évolution s'explique par la présence de nervures verticales supplémentaires dans la coupe 2, qui favorisent le développement de mécanismes de butée. Les nervures intérieures contribuent ainsi jusqu'à deux fois plus efficacement en butée que les nervures externes.

Malgré ces hétérogénéités locales dues à une limitation méthodologique, l'ensemble des coupes confirme la tendance observée en coupe centrale : le frottement domine aux faibles déformations et jusqu'au pic de résistance, tandis que la butée augmente progressivement jusqu'à être majoritaire en phase post-pic résiduelle. La section 3, située dans l'axe de symétrie de la nappe, apparaît comme la plus représentative du comportement global. Elle présente un équilibre satisfaisant entre forces internes et forces de contact, et traduit clairement la transition d'une répartition 60 % frottement – 40 % butée au pic, vers une répartition inverse en fin de chargement (≈ 48 % frottement – 52 % butée).

En résumé, l'étude spatiale à travers les différentes coupes confirme que la coupe centrale (section 3) fournit des informations fiables et représentatives des mécanismes d'interaction grain–géogrille. Elle met en évidence un mécanisme de mobilisation séquentielle et complémentaire : une domination initiale du frottement, traduisant le rôle du déplacement relatif grain–nervure, suivie d'une montée progressive de la butée, associée à l'imbrication granulaire et au verrouillage dans les mailles. Ces résultats, obtenus pour la configuration de référence ($\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°), font clairement apparaître les mécanismes qui influent sur la résistance globale de l'échantillon. Ces constats invitent toutefois à examiner dans quelle mesure cette répartition frottement–butée dépend des propriétés des matériaux et d'interface. En particulier, l'angle de frottement à l'interface géogrille–grains et la rigidité de la géogrille, deux paramètres clés du transfert d'efforts, qui sont susceptibles de modifier la contribution relative de chacun des mécanismes identifiés. La compréhension séquentielle de leur mobilisation s'avère ainsi essentielle, non seulement pour interpréter les phénomènes observés en phase post-pic, mais également pour orienter le dimensionnement des renforts, en tenant compte du choix de l'interface, de la géométrie des mailles et de la rigidité du matériau constitutif.

6.3 Etude paramétrique

L'analyse micromécanique conduite dans la section précédente a permis d'identifier les mécanismes fondamentaux de l'interaction sol–géogrille, à savoir la contribution séquentielle et complémentaire du frottement et de la butée. Ces mécanismes expliquent la manière dont la géogrille accompagne la déformation du squelette granulaire et assure un confinement progressif, particulièrement marqué en phase post-pic. Toutefois, ces résultats restent associés à une

configuration de référence définie par un choix précis de paramètres géométriques et mécaniques (forme des grains, angle de frottement imposé, rigidité donnée de la géogrille, géométrie carrée des ouvertures).

Afin d'élargir la portée de l'analyse et d'évaluer la robustesse des conclusions, une étude paramétrique est menée. Celle-ci examine successivement : (i) l'effet de la contrainte de confinement appliquée, (ii) l'élancement de l'échantillon, (iii) la forme des grains, (iv) le frottement à l'interface grain–géogrille, (v) la rigidité de la géogrille, et (vi) la taille et la forme de ses ouvertures. L'objectif est de déterminer l'influence de ces facteurs clés, que ce soit pour le matériau granulaire ou le renfort, sur la mobilisation des mécanismes de frottement et de butée, et plus largement sur la réponse triaxiale du système renforcé.

6.3.1 Effet du confinement appliqué

Dans le chapitre précédent, il a été montré que la présence de la géogrille apporte à l'échantillon de sol un confinement additionnel local, qui permet d'augmenter la capacité portante globale du matériau et de stabiliser le sol. Avant d'analyser l'influence des paramètres micromécaniques liés aux grains et à la géogrille, il convient de vérifier le rôle de la contrainte de confinement σ_c sur les mécanismes d'interaction sol/géogrille et ce pour différents niveaux de confinement (1, 30, 50 et 100 kPa). Cette étape préliminaire permet de préciser dans quelle mesure l'efficacité du renforcement dépend du niveau de confinement, notamment dans le domaine des faibles contraintes, particulièrement représentatif des conditions de service dans certaines applications (couches de ballast, sols faiblement confinés).

La Figure 6.28 présente les résultats obtenus pour les échantillons renforcés par une nappe de géogrille (1G à mi-hauteur) et non renforcés (0G). Ils permettent de calculer le gain relatif de résistance « $\delta q/q_{0G}$ » au pic, défini comme le rapport entre le gain de résistance et la contrainte δq au pic de la configuration sans géogrille q_{0G}.

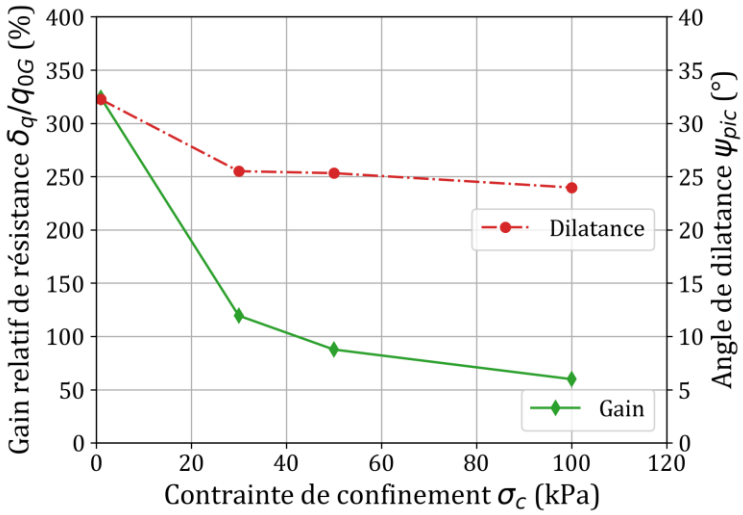


Figure 6.28. Gain relatif de résistance et angle de dilatance au pic en fonction de la contrainte de confinement pour la configuration (1G à mi-hauteur).

Ce gain est de 324 % à 1 kPa, 119 % à 30 kPa, 88 % à 50 kPa et 60 % à 100 kPa. Ces valeurs montrent clairement que l'efficacité du renforcement est maximale dans les faibles confinements et diminue progressivement lorsque le confinement augmente. Cette tendance confirme que la géogrille compense la faiblesse intrinsèque du matériau peu contraint en apportant un confinement additionnel.

Parallèlement, les mesures de l'angle de dilatance au pic montrent une évolution également cohérente : il atteint 32° à 1 kPa, puis chute à environ 25° pour les confinements de 30, 50 et 100 kPa. La réduction progressive de la dilatance traduit une diminution de la mobilité volumique relative lorsque le confinement croît, ce qui atténue mécaniquement l'effet bénéfique de la géogrille.

Ces observations confirment que l'efficacité des renforcements par géogrilles est d'autant plus marquée que le confinement est faible, et qu'elle tend à décroître à mesure que la résistance propre du sol non renforcé augmente.

L'influence de la contrainte de confinement sur la mobilisation des mécanismes locaux – butée et frottement – a été également étudiée le long de la section centrale (section 3) de l'échantillon pour ces différents niveaux de confinement (Figure 6.29). Cette analyse permet de vérifier dans quelle mesure la géogrille agit comme un confinement additionnel en fonction des conditions externes.

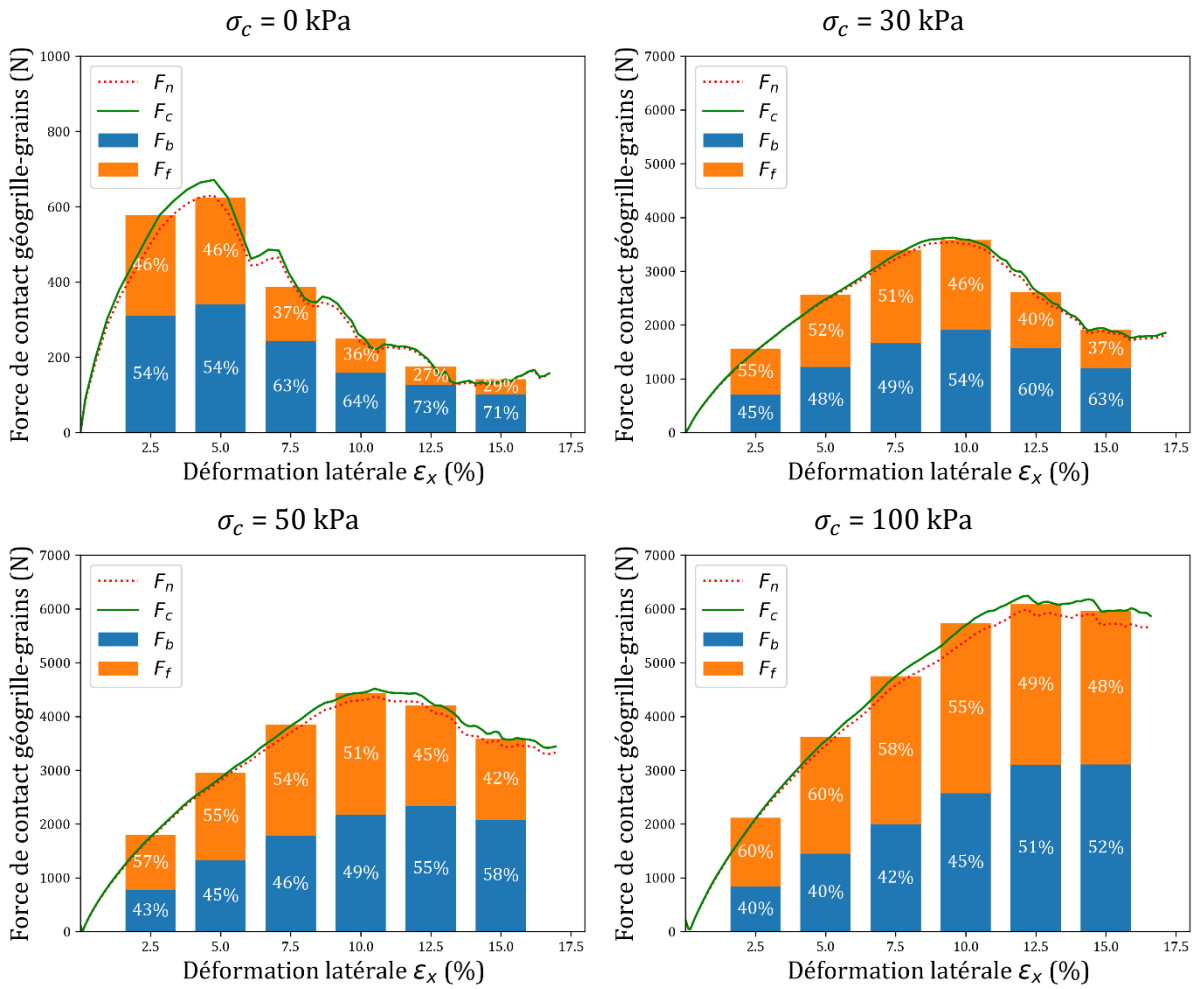


Figure 6.29. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon pour différents niveaux de confinement : 1, 30, 50 et 100 kPa (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

Les observations précédentes (Section 6.2.3.2) ont montré que sous un confinement élevé (100 kPa), le frottement domine la phase initiale et la montée vers le pic, traduisant une interaction principalement contrôlée par le glissement relatif grain–nervure. En phase post-pic, la contribution de la butée augmente progressivement tandis que le frottement se stabilise ou diminue légèrement, illustrant un mécanisme de verrouillage progressif des grains dans les mailles de la géogrille. Lorsque la contrainte de confinement diminue à des niveaux intermédiaires

(50 et 30 kPa), la même tendance générale est observée. Cependant, la part relative de la butée est plus importante qu'à 100 kPa, traduisant une transition relative plus rapide vers un verrouillage mécanique efficace des grains.

Sous faible confinement (1 kPa), la butée devient le mécanisme dominant tout au long du chargement. L'absence de confinement externe réduit l'effet initial du frottement, et l'imbrication mécanique des grains dans les ouvertures de la géogrille assure le transfert principal des efforts. La butée augmente continuellement avec la déformation, tandis que le frottement diminue vers la fin du chargement.

Ces observations permettent de conclure que :

- Les mécanismes de frottement et de butée se mobilisent de manière séquentielle et complémentaire pour tous les niveaux de confinement.
- La contribution de la butée augmente à mesure que le confinement diminue, mettant en évidence le rôle clé de la géogrille dans les sols faiblement contraints.
- Ces résultats montrent que pour des sols faiblement confinés (couches superficielles, ballast), le dimensionnement des géogrilles devrait privilégier des caractéristiques optimisant l'imbrication mécanique (taille des mailles, rigidité des nervures) afin de maximiser la contribution de la butée. En revanche, pour des sols fortement confinés, le frottement reste un mécanisme prépondérant, et l'effet de la géogrille se concentre sur la redistribution des efforts plutôt que sur le verrouillage mécanique.

6.3.2 Effet de l'élancement de l'échantillon sur les mécanismes locaux

Dans la section 6.1.4, l'influence conjointe de l'élancement des échantillons et du nombre de nappes de géogrille a été analysée à l'échelle globale, en termes de résistance déviatorique et de comportement volumétrique. Il a été montré que, sous un confinement de 100 kPa, pour des échantillons de faible élancement, le positionnement optimal (mi-hauteur) d'une nappe unique pouvait suffire à générer un renforcement significatif, tandis que pour des échantillons plus élancés, l'efficacité dépendait surtout du nombre de nappes mobilisées.

Dans cette section, l'objectif est de compléter cette analyse en s'intéressant à l'effet de l'élancement sur les mécanismes locaux d'interaction sol–géogrille. En particulier, il s'agit d'examiner comment les contributions conjointes des forces de butée et de frottement évoluent lorsque la hauteur de l'échantillon augmente, et de déterminer dans quelle mesure la géométrie globale de l'échantillon conditionne l'efficacité du transfert d'efforts au niveau de la nappe de géogrille (Figure 6.30).

Pour l'échantillon de faible élancement (H/D = 0,45), le renforcement est principalement marqué par une croissance continue du déviateur de contrainte, sans atteindre un état de pic dans la plage de déformation étudiée.. Pour des élancements allant jusqu'à H/D = 1,64, les contributions respectives du frottement et de la butée restent relativement proches de celles du cas de référence (H/D = 0,89), avec des valeurs d'environ 40–45 % attribuées à la butée et de 60–55 % au frottement jusqu'au pic de contrainte. Au-delà du pic, la butée peut même surpasser le frottement.

En revanche, pour des échantillons plus élancés (H/D = 2,42), le comportement diffère sensiblement : en effet, le frottement reste dominant tout au long du chargement, alors que la butée, bien qu'en légère croissance, demeure marginale. Cette évolution s'explique par la cinématique de déformation de l'échantillon fortement élancé pour laquelle la nappe se trouve moins contrainte par les zones de concentration de cisaillement, d'où un effet de butée fortement restreint. Le transfert d'efforts repose donc presque exclusivement sur le frottement, ce qui réduit la capacité globale de la géogrille à stabiliser le matériau.

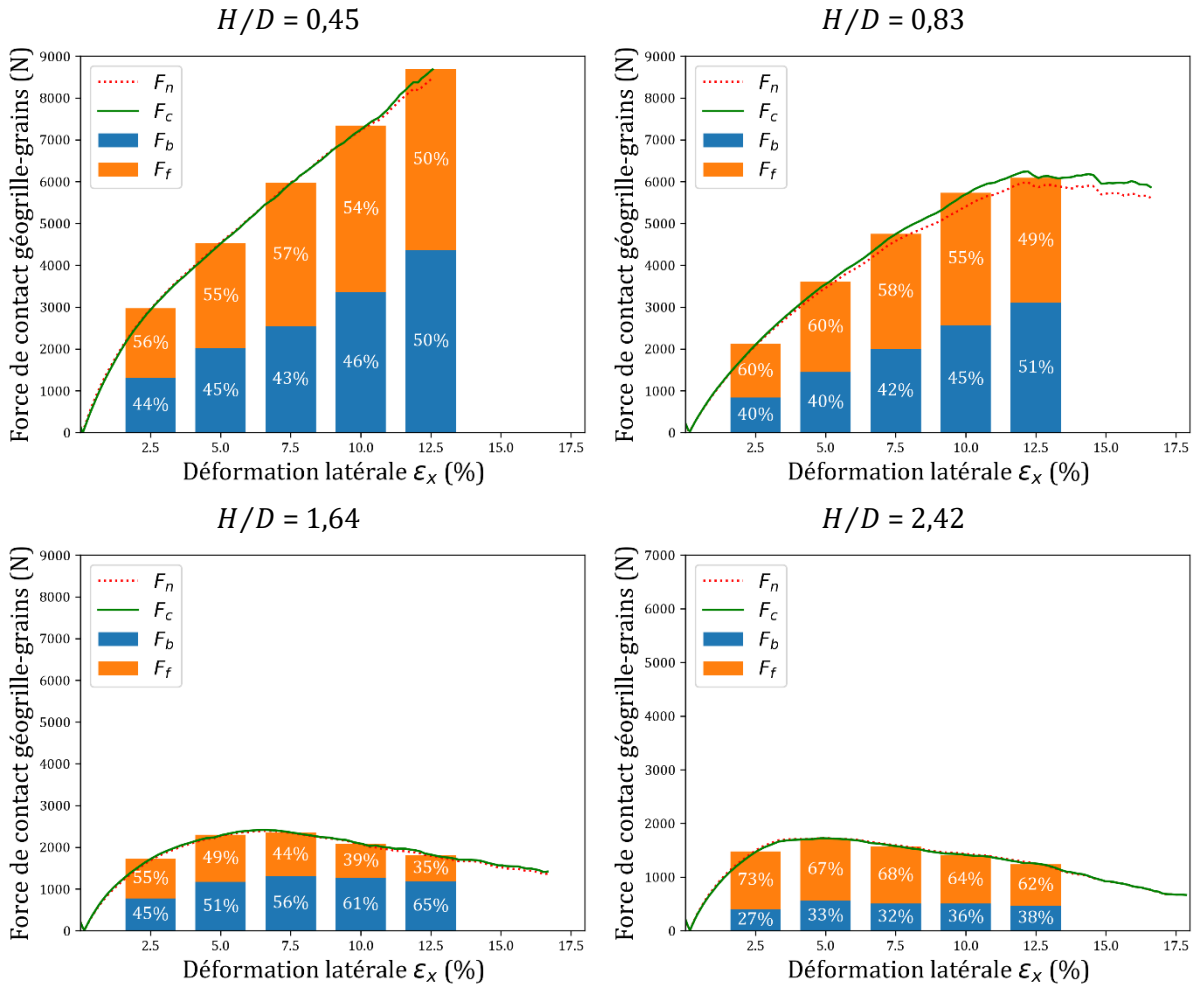


Figure 6.30. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon pour différents élancement de l'échantillon : 0,45, 0,89, 1,64 et 2,42 (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

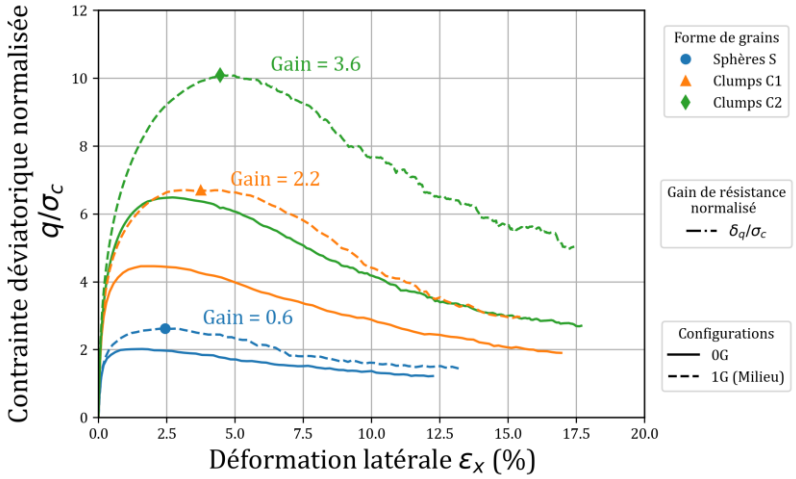
En conclusion, l'élancement conditionne directement la nature des mécanismes locaux mobilisés. Pour des échantillons de hauteur modérée, la géogrille bénéficie d'un équilibre entre frottement et butée, optimisant son efficacité. A l'inverse, pour des échantillons élancés, la prédominance du frottement et la marginalisation de la butée traduisent une perte d'efficacité mécanique, suggérant que des configurations multi-nappes deviennent souhaitables pour compenser cette limitation.

6.3.3 Effet de la forme des grains

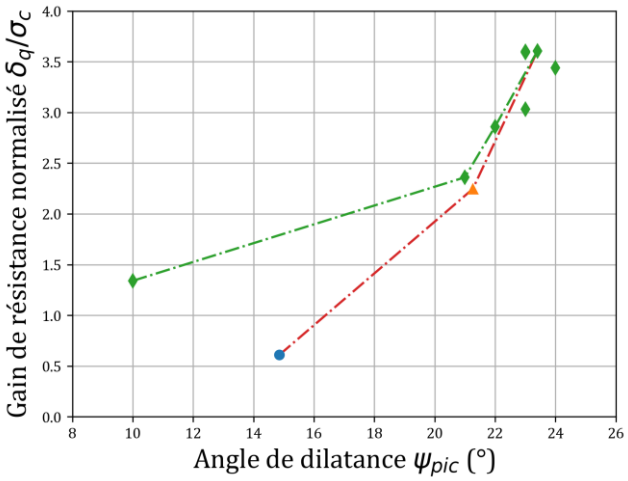
La forme des grains constitue un paramètre fondamental du comportement des matériaux granulaires. Elle conditionne à la fois la stabilité du squelette granulaire, la capacité d'imbrication naturelle et la transmission des efforts internes, indépendamment de la présence d'un renfort.

Des essais numériques ont été conduits dans les deux configurations, sans (0G) et avec géogrille placée à mi-hauteur (1G-Milieu) de l'échantillon, afin d'évaluer l'influence combinée de la forme du grain et du renforcement sur la réponse déviatorique. Les formes de grains étudiées (sphères S, clumps C1 et clumps C2), déjà présentées à la Figure 4.7 et dont les propriétés géométriques sont synthétisées au Tableau 4.1, sont considérées. Les résultats sont analysés en termes de contrainte déviatorique normalisée « q/σ_c » par la pression de confinement, tracée en fonction de la déformation latérale ε_x (Figure 6.31.a). En parallèle, le gain de résistance normalisé « $\delta q/\sigma_c$ »

attribué à la présence de la géogrille est évalué au pic de contrainte en fonction de l'angle de dilatance ψ_{pic} (Figure 6.31.b).



(a)



(b)

Figure 6.31. Evolution (a) de la contrainte déviatorique normalisée en fonction de la déformation latérale de l'éprouvette et (b) du gain de résistance normalisé au pic de contrainte en fonction de l'angle de dilatance pour les différentes formes de grains (S, C1, et C2).

En absence de renfort, les sphères présentent les valeurs de résistance au pic les plus faibles, suivies des clumps simples C1, alors que les clumps complexes C2 atteignent des niveaux de contraintes nettement plus élevés. Cette tendance est directement liée à l'imbrication mécanique plus efficace des grains anguleux, favorisant la transmission des efforts et le blocage relatif entre particules. Ces observations confirment les travaux antérieurs sur l'effet de l'angularité des grains, qui soulignent une augmentation notable de la raideur et de la résistance des échantillons lorsque les particules s'écartent de la sphéricité (Matsushima & Saomoto, 2002).

Dans toutes les configurations, la présence de la géogrille accroît la résistance maximale. Cet effet est plus marqué pour les clumps que pour les sphères, traduisant une interaction plus efficace lorsque la forme des particules favorise le blocage des grains dans les mailles. Les clumps complexes C2 montrent systématiquement des valeurs plus élevées de dilatance et de résistance maximale, soulignant l'importance de la forme des grains sur le renforcement.

Le gain en résistance fourni par la géogrille dépend non seulement de la forme des particules, mais aussi de l'état initial de densité, qui varie lui-même en fonction de la forme (Figure 6.31.b). Ainsi,

un accroissement rapide et marqué du gain de résistance est observé lors du passage d'une géométrie simple (sphères) à des formes plus complexes (clumps). Les variations de porosité initiale accentuent également cette tendance : pour les clumps C2, par exemple, l'amélioration du gain en résistance passe de 1,34 à 3,6 lorsque la densité initiale est augmentée. Bien que cette amélioration reste moins spectaculaire que l'effet de la morphologie seule, elle confirme que plus l'angle de dilatance est élevé, plus le gain normalisé de résistance de l'échantillon renforcé devient important. Autrement dit, l'effet bénéfique de la géogrille est amplifié par la dilatance, les matériaux plus dilatants exerçant des sollicitations supplémentaires sur le renfort et mobilisant ainsi davantage sa contribution.

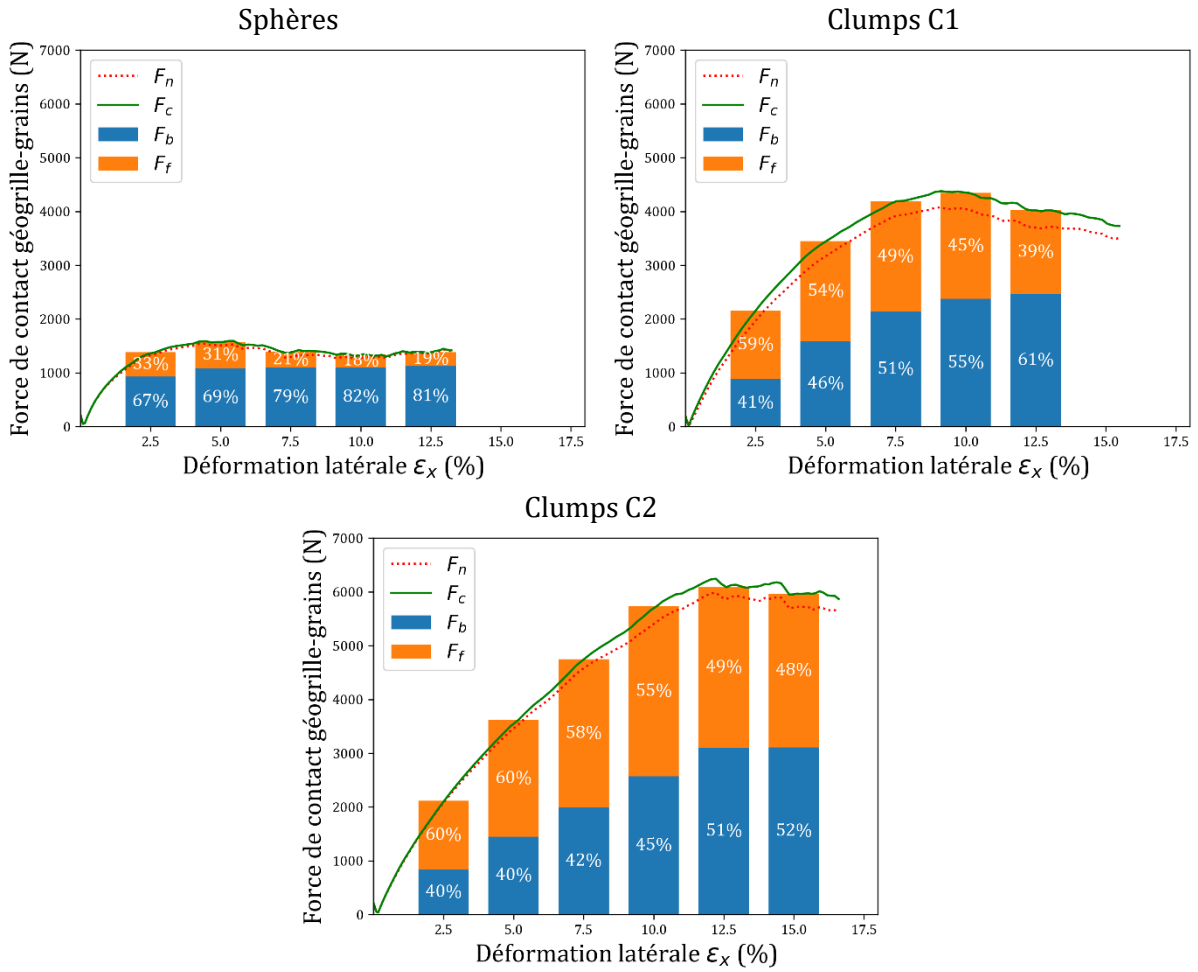


Figure 6.32. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long de la section centrale (3) et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon, pour les trois formes de grains : S, C1 et C2 (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°).

Par ailleurs, l'analyse des mécanismes locaux révèle que la contribution relative du frottement et de la butée à l'interface est également affectée par la morphologie des grains. Les simulations, réalisées avec un angle de frottement intergranulaire fixé à 30°, identique à celui de l'interface sol–géogrille ($\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°), mettent en évidence des comportements différenciés (Figure 6.32).

Pour les sphères, la contribution dominante provient de la butée, qui représente environ 67 % des forces mobilisées dès les faibles déformations et croît jusqu'à 81 % en fin de chargement. Pour les clumps C1, la complexification de la forme engendre une part accrue de frottement, traduisant l'effet d'une imbrication plus marquée. Cette tendance se confirme avec les clumps complexes C2,

où la contribution frictionnelle reste plus importante, même si la butée continue de croître et finit par surpasser le frottement à grandes déformations. Ces résultats mettent ainsi en évidence un effet couplé de la forme des grains sur la mobilisation des mécanismes locaux, avec une augmentation du frottement relatif lorsque la géométrie des particules s'éloigne de la sphéricité.

En résumé, cette étude montre que la forme des grains influence simultanément la réponse globale (résistance et dilatance) et la répartition locale des mécanismes d'interaction avec la géogrille (frottement et butée). Les particules anguleuses, plus dilatantes, optimisent le blocage des grains et la transmission des efforts, renforçant l'efficacité du renfort et améliorant significativement la capacité portante de l'échantillon. Toutefois, si la morphologie granulaire conditionne l'imbrication naturelle et la dilatance, le rôle du frottement d'interface entre sol et géogrille reste déterminant pour la mobilisation effective du renfort.

6.3.4 Effet du frottement d'interface grain-géogrille

L'angle de frottement à l'interface géogrille–grains joue un rôle déterminant dans la mobilisation du renfort, car il conditionne la part relative des mécanismes de glissement/frottement et d'imbrication (butée). Après avoir montré que, pour un cas de référence avec $\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°, la contribution du frottement domine en phase initiale tandis que la butée progresse en post-pic, il est pertinent d'examiner comment une variation de l'angle de frottement d'interface affecte ces tendances avec les clumps C2. L'objectif de cette section est donc de comparer les répartitions butée–frottement obtenues pour différentes valeurs de l'angle de frottement d'interface ($\phi_{grains-géogrille}$ = 0°, 15°, 30°, 45° and 89°), afin de déterminer si le schéma de mobilisation séquentielle et complémentaire des deux mécanismes observés précédemment est robuste ou au contraire fortement dépendant des conditions locales d'interface. Cette analyse vise à apporter ainsi des éléments de compréhension supplémentaires sur le rôle spécifique de la géogrille dans le confinement du sol et oriente les choix de conception en termes de caractéristiques d'interface.

À l'échelle de l'échantillon, il apparaît que même en l'absence totale de frottement d'interface ($\phi_{grains-géogrille}$ = 0°), la présence de la géogrille procure un gain relatif significatif de résistance, de l'ordre de 40 % (Figure 6.33). Ce résultat confirme que le mécanisme de butée peut, à lui seul, assurer une part essentielle de la mobilisation du renfort.

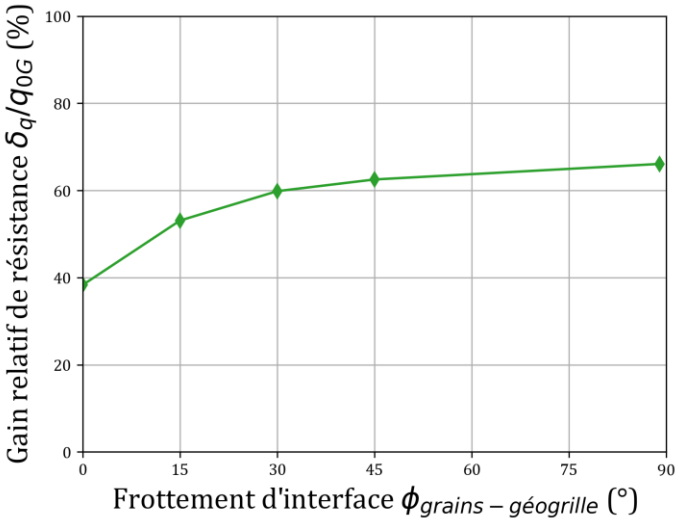


Figure 6.33. Influence de l'angle de frottement à l'interface grain–géogrille sur le gain relatif de résistance (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains}$ = 30°).

Lorsque l'angle de frottement d'interface augmente, ce gain s'accroît également, traduisant la contribution croissante du frottement au transfert d'efforts. Toutefois, cette amélioration tend à se stabiliser dès que l'angle de frottement d'interface atteint celui des contacts intergranulaires ($\phi_{grains-grains}$ = 30°), pour lequel le gain de résistance se situe autour de 60 %. Dans le cas extrême d'un frottement quasi parfait ($\phi_{grains-géogrille}$ = 89°), qui reste une hypothèse irréaliste en pratique (hypothèse d'une géogrille parfaitement adhérente avec le sol environnent), une augmentation supplémentaire est observée, mais limitée, portant le gain de résistance à environ 66 %.

L'étude des mécanismes de répartitions des efforts d'interaction entre la géogrille et le sol montre que la répartition relative entre butée et frottement confirme que l'effet de confinement local induit par la géogrille reste opérant même sans frottement d'interface, la contribution du frottement étant directement conditionnée par la valeur de l'angle d'interface (Figure 6.34).

En l'absence de frottement d'interface ($\phi_{grains-géogrille}$ = 0°), la mobilisation repose exclusivement sur la butée (force de frottement nulle), qui domine tout au long du chargement. Dès qu'un frottement est introduit ($\phi_{grains-géogrille}$ ≥ 15°), une composante de glissement apparaît. Pour $\phi_{grains-géogrille}$ = 15°, la butée demeure prépondérante du début à la fin de l'essai, avec une réduction relative de la contribution du frottement après le pic, compensée par une croissance continue de la butée. Lorsque l'angle de frottement à l'interface atteint la valeur du frottement intergranulaire ($\phi_{grains-géogrille}$ = 30°), le mécanisme de frottement domine en phase initiale et jusqu'au pic, mais diminue par la suite, alors que la butée croît et s'impose en phase post-pic. Pour des valeurs de frottement d'interface plus élevées ($\phi_{grains-géogrille}$ = 45° et 89°), le mécanisme de frottement devient nettement prédominant, même si la butée continue de croître. Ainsi, le frottement grain–géogrille modifie le mode de transfert des efforts au sein du système sol–géogrille.

Plus précisément, à l'état résiduel (ε_x = 15 %), le mécanisme de butée domine pour de faibles valeurs de l'angle d'interface ($\phi_{grains-géogrille}$ ≤ 30°). Lorsque l'angle d'interface dépasse la valeur intergranulaire, la contribution du frottement croît progressivement, entraînant une réduction relative de la part de la butée. Toutefois, cette évolution n'a que peu d'influence sur l'intensité des efforts totaux mobilisés dans la géogrille. Cette tendance reste cohérente avec le comportement global de l'échantillon, où la contrainte déviatorique au pic croît de manière modérée avec l'augmentation du frottement d'interface. La stabilité de la réponse de la géogrille face aux variations du frottement, notamment dans les cas réels où le frottement entre grains est égal ou inférieur à celui de l'interface, met en évidence une rigidité structurale largement conditionnée par l'imbrication mécanique. Ce constat rejoint les conclusions de Mulabdic et al. (2018), qui soulignent la prédominance du mécanisme d'imbrication (interlocking) sur le frottement dans l'interaction sol–géogrille.

En résumé, l'analyse révèle un schéma robuste de mobilisation des efforts dans la géogrille :

- Pour de faibles angles de frottement d'interface, la butée demeure le mécanisme dominant;
- Pour des angles intermédiaires, proches de la valeur intergranulaire, le frottement est principalement mobilisé en phase initiale et ce jusqu'au pic, tandis que la butée prédomine en phase post-pic ;
- Pour des angles d'interface élevés, le frottement conserve une prédominance, sans pour autant modifier significativement l'intensité globale des efforts transférés.

Il en résulte que l'efficacité du renforcement repose avant tout sur l'imbrication mécanique entre grains et géogrille, confirmant que ce mécanisme joue un rôle incontournable et structurant, indépendamment des conditions de frottement.

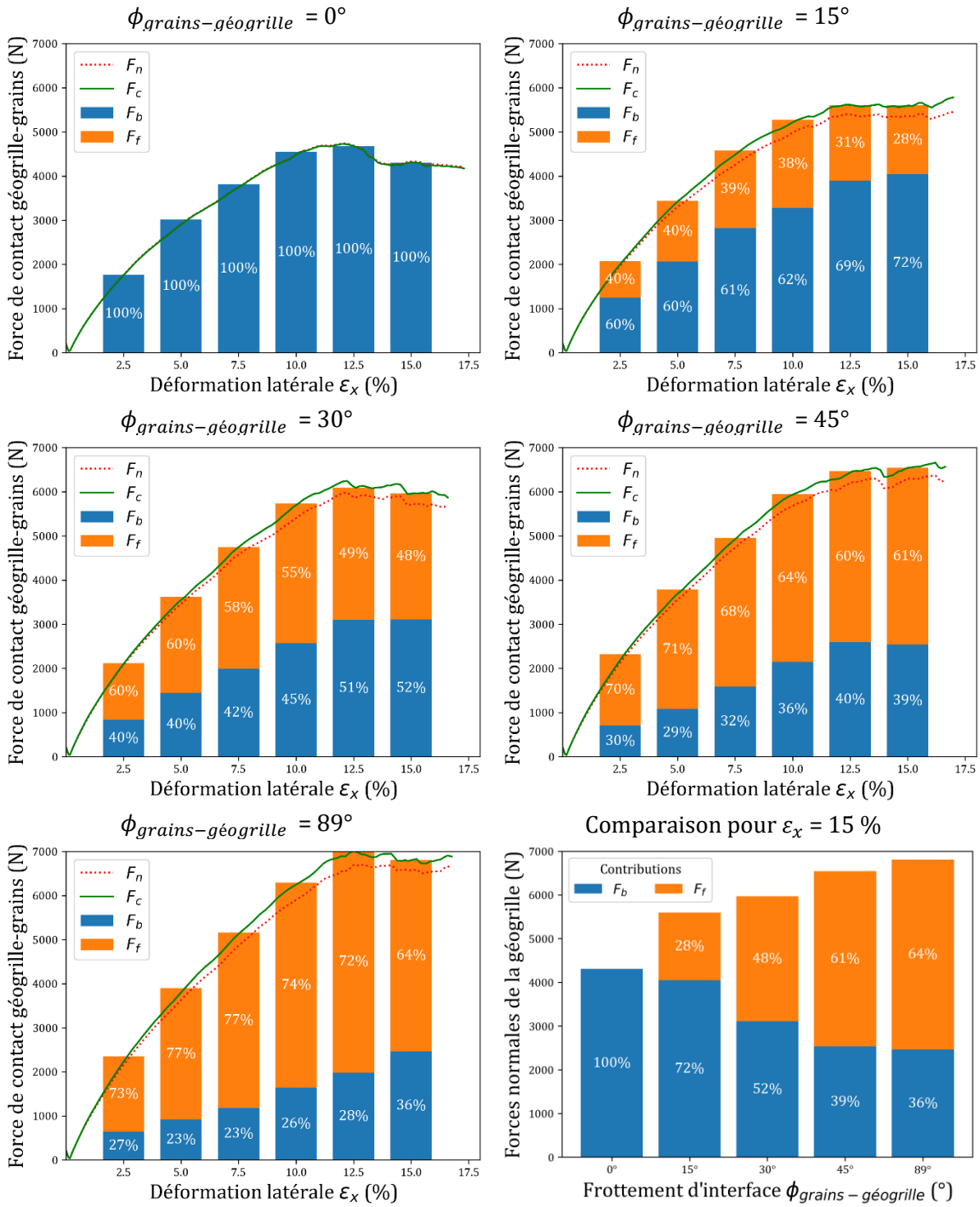


Figure 6.34. Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille, le long de la section centrale (3) et en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon, pour différents angles de frottement d'interface : 0°, 15°, 30°, 45° et 89° (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains}$ = 30°).

6.3.5 Effet de la rigidité de la géogrille

La rigidité du renfort constitue un paramètre déterminant dans la mobilisation des mécanismes d'interaction sol–géogrille, puisqu'elle conditionne directement la capacité de la nappe à transmettre et redistribuer les efforts et confiner l'échantillon de sol. Dans cette étude, l'influence du module de traction de la géogrille « J » a été analysée en faisant varier sa valeur entre 100 et 10 000 kN/m, autour de la configuration de référence fixée à J = 800 kN/m.

1. *Comportement global :*

L'évolution du gain relatif de résistance $\delta q/q_{0G}$ en fonction de J est présentée à la Figure 6.35. On observe une amélioration nette des performances mécaniques de l'échantillon avec l'augmentation de la rigidité de la géogrille. L'accroissement de résistant est particulièrement marqué dans la partie initiale de la courbe, passant d'un gain de 20 % pour J = 100 kN/m à environ 60 % pour la valeur de référence (J = 800 kN/m). Au-delà, la progression du gain de résistance se poursuit de manière plus modérée, atteignant environ 76 % pour J = 5000 kN/m, avant de se stabiliser pour une valeur de 80 %. Pour un niveau de confinement donné, ces résultats mettent en évidence l'existence d'un seuil au-delà duquel l'augmentation du module de traction de la géogrille n'a plus d'effet significatif sur l'augmentation de résistance de l'échantillon.

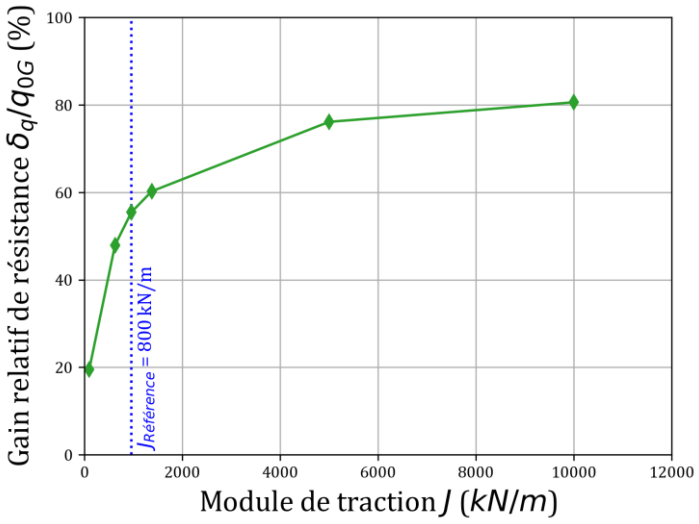


Figure 6.35. Evolution du gain relatif de résistance en fonction du module de traction (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

La Figure 6.36 compare l'évolution de la déformation latérale de l'échantillon ε_x et de la déformation moyenne de la géogrille ε_{1G} pour des valeurs de rigidités de : J = 100, 800 et 5000 kN/m. Pour J = 100 kN/m, le gain relatif de résistance de l'échantillon reste faible, traduisant une efficacité proche du cas sans renforcement (0G). Cette tendance se retrouve dans la réponse en déformation, les courbes de l'échantillon renforcé et non renforcé étant quasiment superposées. Dans ce cas, la géogrille se déforme fortement, atteignant environ 11 % en fin de chargement, contre seulement 2,5 % pour la rigidité de référence. Pour J = 5000 kN/m, la déformation latérale de l'échantillon est similaire à celle obtenue pour J = 800 kN/m, confirmant la cohérence avec les résultats obtenus pour le gain résistance. Néanmoins, la géogrille se déforme beaucoup moins (moins de 1 %).

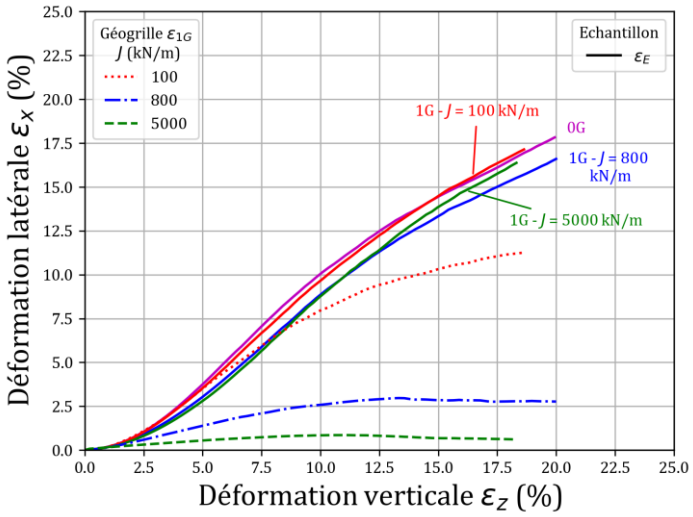


Figure 6.36. Comparaison de la déformation latérale de l'échantillon et de la déformation moyenne de la géogrille pour trois modules de traction : 100, 800 et 5000 kN/m (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains} = \phi_{grains-géogrille} = 30°$).

2. *Comportement local :*

La Figure 6.37.a illustre la répartition des contributions de la butée et du frottement pour les deux rigidités extrêmes (J = 100 et 5000 kN/m). Pour J = 100 kN/m, la faible mobilisation des efforts se traduit par une domination constante de la butée, bien que les valeurs absolues restent limitées. Pour J = 5000 kN/m, on retrouve le schéma séquentiel observé pour la configuration de référence : le frottement prédomine en phase initiale, tandis que la butée s'impose progressivement en phase post-pic. Cette analyse suggère que la contribution relative entre frottement et butée dépend peu du module de traction de la géogrille, alors que l'intensité des efforts d'interaction reste fortement influencée par la rigidité de la géogrille.

L'analyse des forces mobilisées au niveau des nervures (Figure 6.37.b) met en évidence une distribution contrastée. Pour J = 100 kN/m, les efforts atteignent environ 150 N dans l'axe de l'échantillon et 100 N en périphérie, soit 33 % de réduction. Pour J = 5000 kN/m, les forces mobilisées dans les nervures culminent à 1300 N au centre, puis décroissent progressivement jusqu'à 600 N aux extrémités, soit 54 % de réduction. Ces résultats illustrent la capacité d'une géogrille rigide à mobiliser et redistribuer efficacement les efforts dans sa structure.

Enfin, la Figure 6.38 présente la distribution des contraintes horizontales moyennes dans le plan YZ au pic de chargement. Pour J = 5000, une zone d'influence marquée apparaît de part et d'autre de la géogrille, sur une épaisseur d'environ 30 mm, avec une dissipation radiale progressive similaire à celle observée pour la rigidité de référence (dôme de contrainte). En revanche, pour J = 100 kN/m, aucune amélioration directe n'est observée au voisinage de la géogrille : les contraintes horizontales restent faibles, même si une légère augmentation de contraintes est perceptible à partir d'une distance de 10 à 20 mm en dessus et en dessous de la géogrille. Bien que l'effet de butée reste dominant, la faible mobilisation du renfort indique une efficacité globale limitée dans la stabilisation de l'échantillon.

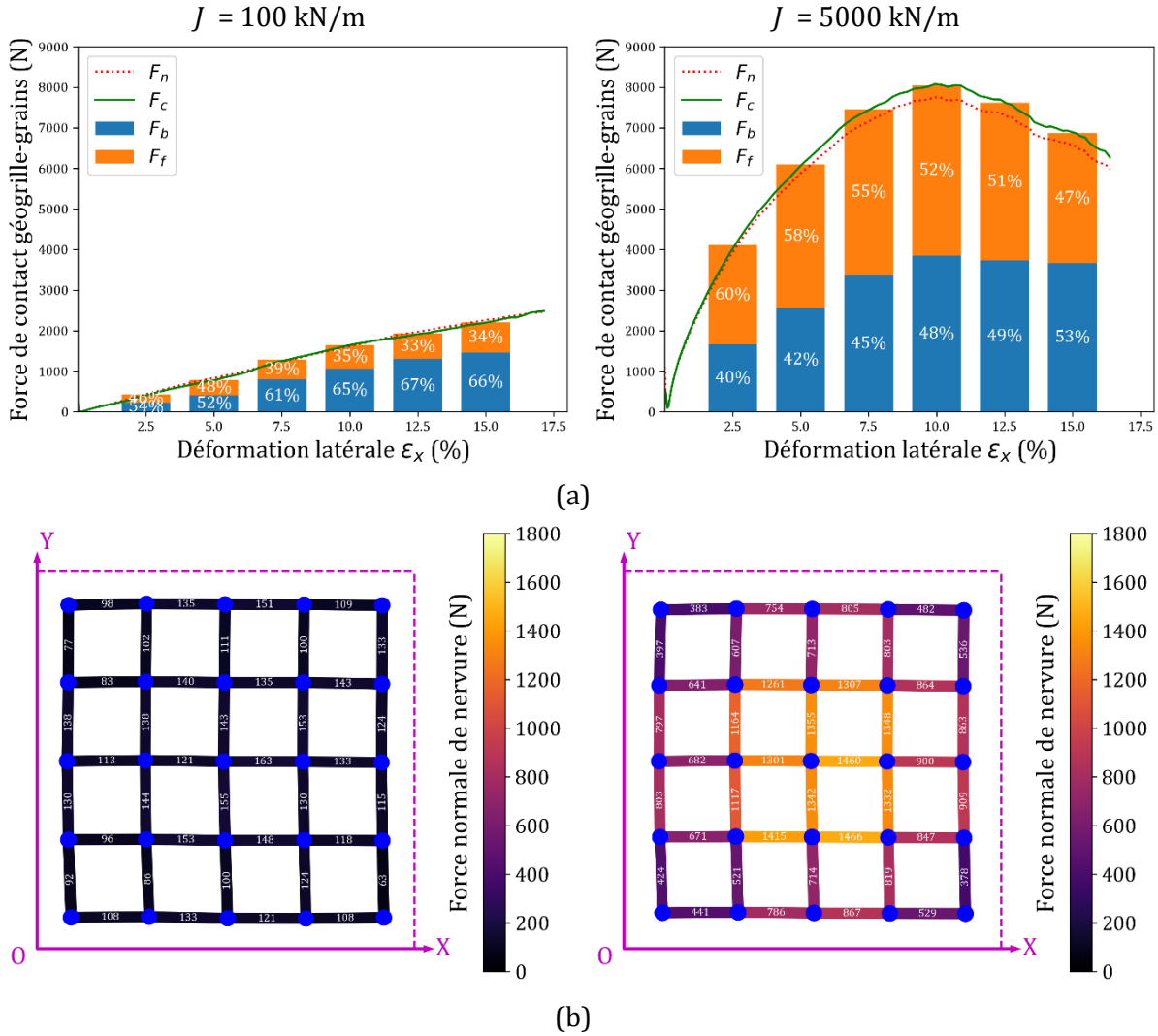


Figure 6.37. (a) Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille (section centrale) en fonction de la déformation horizontale de l'échantillon ; (b) Distribution spatiale des forces mobilisées dans les nervures au pic de chargement, pour deux modules de traction : 100 et 5000 kN/m *(configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°).*

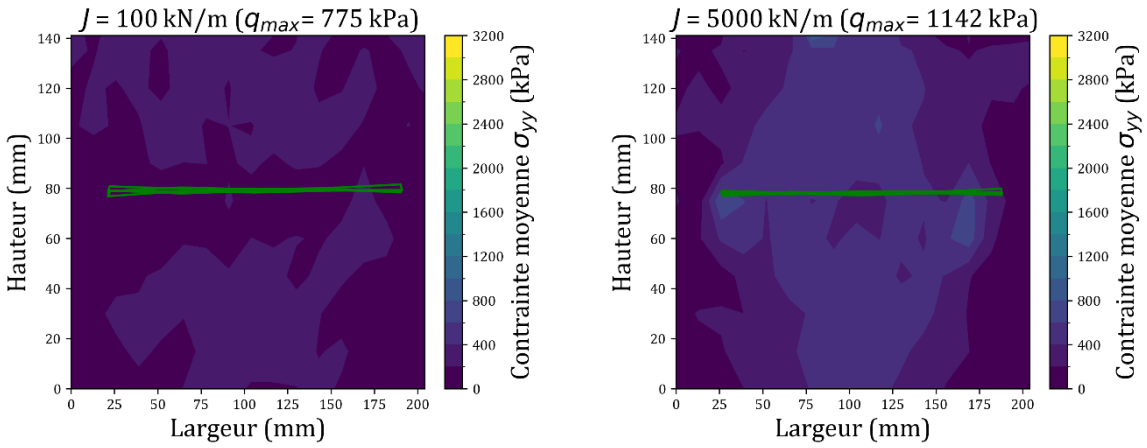


Figure 6.38. Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne dans le plan YZ au pic de chargement, pour deux modules de traction : 100 et 5000 kN/m (configuration 1G à mi-hauteur, $\phi_{grains-grains}$ = $\phi_{grains-géogrille}$ = 30°).

3. *Conclusion partielle :*

Cette analyse confirme que la raideur de la géogrille joue un rôle clé dans son efficacité, et ce jusqu'à un certain seuil de rigidité. Une faible rigidité conduit à un gain de résistance faible malgré une déformation importante du renfort et une mobilisation essentiellement par butée. A l'inverse, une rigidité élevée favorise un transfert d'efforts plus marqué et une redistribution spatiale plus prononcée des contraintes. Dans une perspective de conception, la sélection d'une rigidité optimale doit donc rechercher un compromis entre performance mécanique et coût, les avantages supplémentaires en termes de gain de résistance liés à des rigidités très élevées demeurant marginaux au-delà d'un certain seuil.

6.3.6 Effet de la taille et de la forme de la géogrille

L'analyse menée dans cette section porte sur l'influence des caractéristiques géométriques de la géogrille, en particulier la taille et la forme des ouvertures. L'échantillon de sol étudié présente une section de 200 mm × 200 mm, dans laquelle la surface effective de la géogrille de référence *B40×40* est de 160 mm × 160 mm, correspondant à 16 mailles carrées. Cinq configurations de géogrilles ont été générées (Figure 6.39), différant principalement par la taille des ouvertures (géogrilles biaxiales carrées). En complément, une géogrille triaxiale à mailles triangulaires a également été retenue. Toutes ces configurations ont été établies en conservant la même surface effective, la même rigidité globale des brins de la grille (J = 800 kN/m) et la même épaisseur de nervure (8 mm) que la géogrille de référence *B40×40*. Les différentes géométries sont identifiées par leur type (« *B* » pour biaxial, « *T* » pour triaxial), suivi de la longueur de nervure (c/c) exprimée en millimètres dans les directions *XY*.

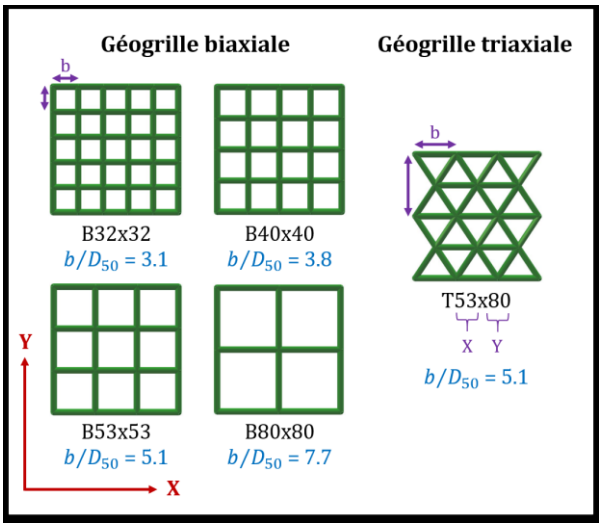
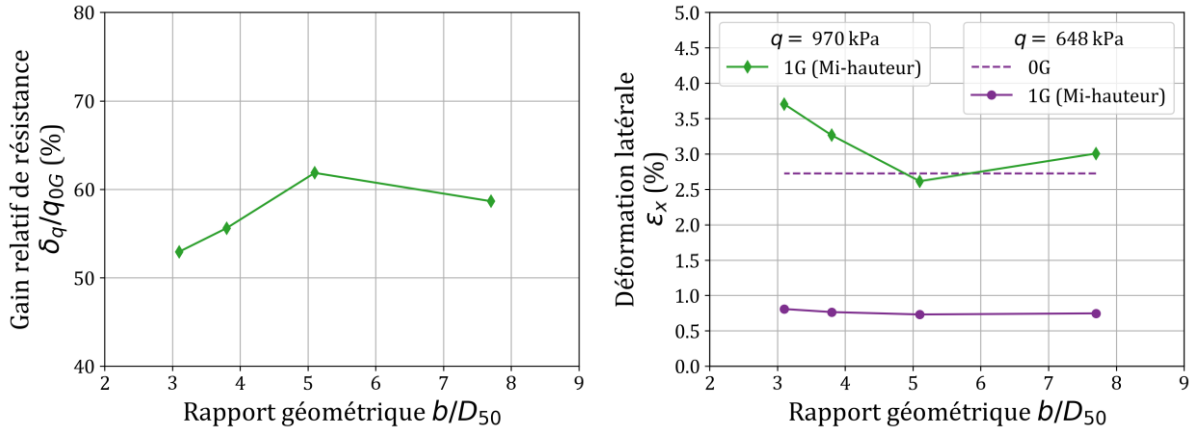


Figure 6.39. Géométries des géogrilles étudiées : configurations biaxiales et triaxiale conservant la même surface effective.

1. *Influence de la taille des ouvertures carrées :*

Quatre longueurs de nervure ont été retenues : 32, 40, 53 et 80 mm, respectant la surface effective totale imposée (soit des nombres de mailles différents d'une configuration à l'autre). Ces dimensions correspondent à des rapports entre ouverture et taille moyenne de grain b/D_{50} compris entre 3,1 et 7,7. Les résultats principaux sont présentés à la Figure 6.40 sous forme de gain relatif de résistance et de déformations latérales ε_x mesurées à deux niveaux de contrainte déviatorique (q = 648 kPa et q = 970 kPa). Les gains en résistance obtenus sont respectivement de 53 %, 56 %, 62 % et 58 % pour les rapports 3,1, 3,8, 5,1 et 7,7 (Figure 6.40.a). Les performances mécaniques de ces différentes configurations apparaissent globalement proches, avec un

optimum faiblement marqué pour la taille 53 mm. Ainsi, bien que peu l'apport de la géométrie des mailles soit peu prononcé, l'ouverture de maille correspondant à un rapport $b/D_{50} \approx 5{,}1$ semble la plus efficace.

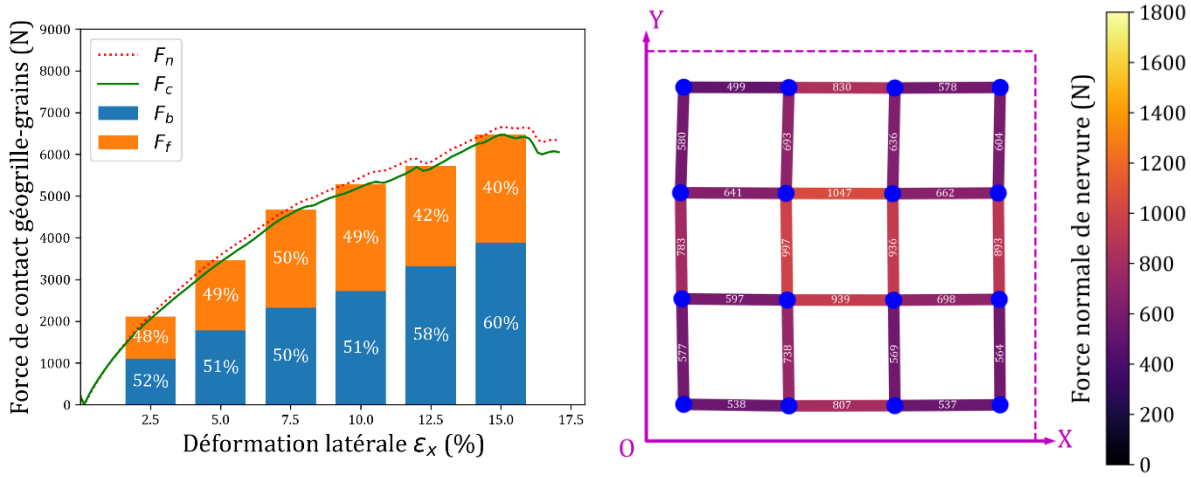


(a) (b)

Figure 6.40. Evolution (a) du gain relatif de résistance et (b) de la déformation latérale de l'échantillon en fonction du rapport géométrique b/D_{50}.

Concernant les déformations latérales (Figure 6.40.b), au niveau de contrainte q = 648 kPa (correspondant au pic de l'échantillon non renforcé), la géogrille réduit significativement les déformations. Sans renforcement, celles-ci atteignent 2,7 %, tandis qu'avec géogrille elles se limitent à 0,75 % en moyenne, soit une réduction d'environ 3,6 fois. A un niveau de contrainte plus élevé (q = 970 kPa, proche du pic de l'échantillon renforcé par géogrille), la configuration *B53×53* se singularise à nouveau avec la plus faible valeur de déformation latérale (2,6 %), confirmant son rôle d'optimum pour le matériau granulaire retenu. Ce résultat corrobore les observations de Saleh Ahmadi et Nikbakht Moghadam (2017), qui indiquaient des valeurs optimales pour des rapports b/D_{50} compris entre 7 et 12.

Afin de préciser les mécanismes mis en jeu pour cet optimum (*B53x53*), la contribution de la butée et du frottement, ainsi que la distribution des efforts dans les nervures au pic, ont été analysées (Figure 6.41).



(a) (b)

Figure 6.41. (a) Contribution relative de la butée et du frottement aux efforts mobilisés dans la géogrille ; (b) Répartition des efforts dans les nervures pour la géogrille biaxiale optimale B53x53.

Les résultats montrent toujours une concentration des forces au centre de l'échantillon, décroissant vers les bords. On observe une nette prédominance du mécanisme de butée par rapport au frottement dès les premières phases, ce qui confirme que, pour des surfaces effectives et des rigidités identiques, l'augmentation de l'efficacité de l'échantillon est principalement liée au rôle de butée du renforcement.

La zone d'influence associée à la configuration optimale *B53×53* est présentée à la Figure 6.42. Celle-ci se traduit par une zone de concentration de contraintes horizontales en forme de dôme, s'étendant sur environ 40 mm de part et d'autre de la géogrille, tant verticalement que latéralement, avec une expansion plus large que celle observée pour la géogrille de référence *B40×40*.

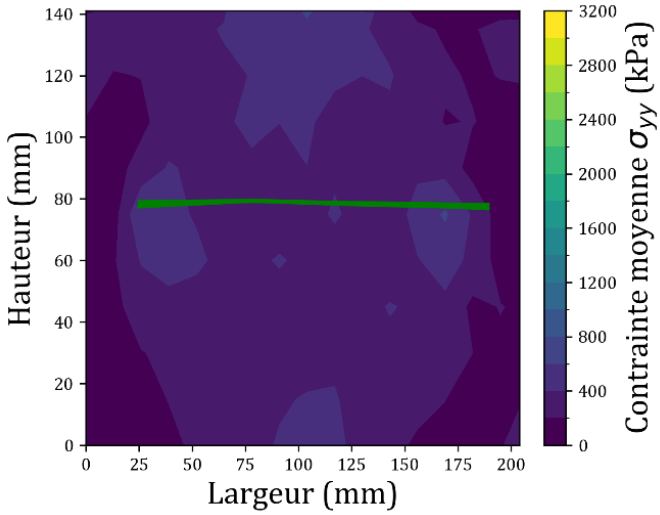


Figure 6.42. Zone d'influence en termes de contraintes horizontales pour la géogrille biaxiale optimale B53×53.

2. *Influence combinée de la rigidité et de la forme des géogrilles :*

L'effet de la forme de la géogrille a été étudié en parallèle avec celui de la rigidité. Pour l'ensemble des géogrilles sélectionnées (biaxiales et triaxiale), différentes valeurs du module de traction de la géogrille ont été retenues : de 100 à 10 000 kN/m (Figure 6.43).

Les résultats confirment les tendances mises en évidence dans la section 6.3.5 : l'augmentation de la rigidité s'accompagne d'une amélioration des performances, traduite par une hausse du gain relatif de résistance. Toutefois, au-delà de 5000 kN/m, l'amélioration tend à se stabiliser, indiquant une saturation du bénéfice apporté par le module de traction de la géogrille.

A faible rigidité (J = 100 kN/m), les géogrilles biaxiales apportent un gain de résistance d'environ 20 %, contre 30 % pour la géogrille triaxiale. Pour des rigidités intermédiaires ($J \approx 800$ kN/m), des gains de résistance d'environ 60 % ont été obtenus pour toutes les configurations. Au-delà, bien que les performances mécaniques de l'échantillon renforcé continuent de croître, les gains de résistance convergent progressivement vers un palier d'environ 80 %, avec des valeurs légèrement plus élevées pour la configuration *B53×53*. A l'inverse, la géogrille triaxiale, bien que plus efficace à faible rigidité, tend à présenter des performances similaires à celles de la géogrille biaxiale (*B32×32*) pour des rigidités élevées (≈ 74 % pour J = 10 000 kN/m). Globalement, les écarts de performance entre géométries (carrées ou triangulaires) restent limités, de l'ordre de 10 % pour une rigidité donnée.

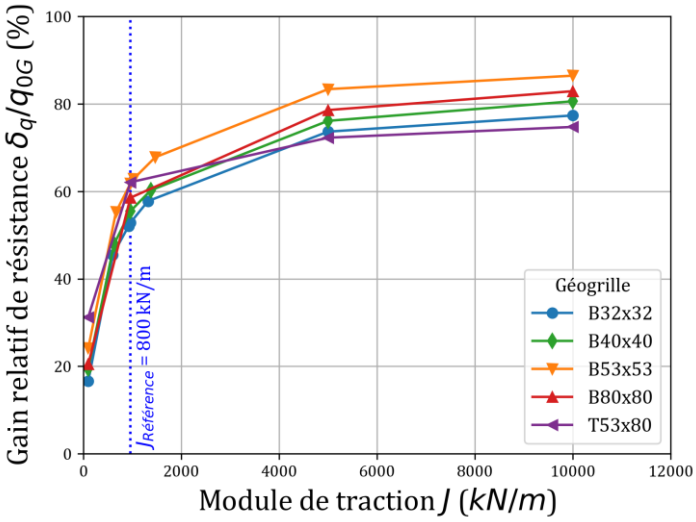
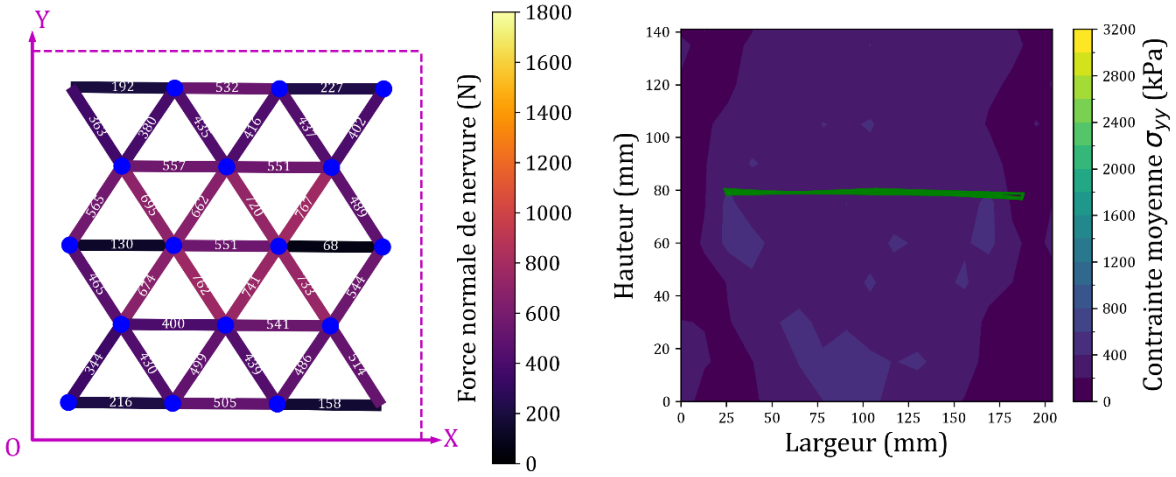


Figure 6.43. Influence de la rigidité de la géogrille sur le gain relatif de résistance pour différentes formes et tailles de mailles de la géogrilles.

Enfin, la répartition des efforts dans les nervures et des contraintes latérales au pic a été analysée pour la géogrille triaxiale *T53×80* pour la rigidité de référence (Figure 6.44). Les résultats montrent, comme pour les géogrilles biaxiales, une concentration des forces dans les zones centrales, avec une sollicitation plus élevée dans les nervures diagonales (≈ 700 N) par rapport aux nervures orientées dans la direction X (≈ 500 N). Les zones périphériques sont moins mobilisées (≈100 N pour les nervures horizontales – direction X), ce qui traduit l'effet des conditions de bord limitant le confinement du sol. La zone d'influence associée présente un comportement similaire à celui de la configuration *B53×53*, avec une extension verticale de l'ordre de 40 mm.



(a) (b)

Figure 6.44. (a) Répartition des efforts dans les nervures de la géogrille ; (b) Distribution bidimensionnelle de la contrainte horizontale moyenne dans le plan YZ au pic de chargement (géogrille triaxiale T53×80).

3. *<u>Conclusion partielle :</u>*

Cette étude met en évidence que la taille des ouvertures influence la performance de la géogrille, avec un optimum observé pour un rapport b/D_{50} ≈ 5,1 (*B53×53*), traduisant un compromis favorable entre mécanisme de butée et capacité de confinement. La forme de la géogrille (carrée

ou triangulaire) exerce une influence secondaire : pour une rigidité donnée, les écarts de performance restent limités (≈10 %), bien que la géogrille triaxiale montre un avantage à faible rigidité. Enfin, l'effet de la rigidité demeure déterminant même si au-delà d'un seuil de 5000 kN/m, les gains de performance se stabilisent, indiquant une saturation des mécanismes de renforcement.

6.3.7 Conclusion générale

L'étude paramétrique a permis d'évaluer l'influence combinée de plusieurs facteurs relatifs à l'échantillon, au matériau granulaire et aux propriétés du renfort sur la réponse triaxiale d'un sol renforcé par géogrille.

Il apparaît en premier lieu que le niveau de confinement appliqué conditionne fortement la réponse globale du matériau et les mécanismes de renforcement. A faible confinement, l'apport du renforcement est particulièrement marqué en termes de résistance et de dilatance, tandis qu'à confinement élevé la différence avec le sol non renforcé tend à se réduire. Les mécanismes de frottement et de butée se mobilisent de manière séquentielle et complémentaire pour tous les niveaux de confinement. La contribution des phénomènes de butée augmente lorsque le confinement diminue, mettant en évidence le rôle clé de la géogrille dans les sols faiblement contraints. À l'inverse, pour des sols fortement confinés, le frottement reste le mécanisme prédominant et l'effet du renfort se porte principlaement sur la redistribution des efforts plutôt que sur le verrouillage mécanique.

L'élancement de l'échantillon, quant à lui, influence directement la mobilisation des mécanismes locaux : pour des échantillons de hauteur modérée, un équilibre entre frottement et butée est observé, tandis que pour des échantillons élancés, la prédominance du frottement d'interface et la marginalisation de la butée réduisent l'efficacité du renfort suggérant le recours à des configurations multi-nappes.

Concernant le matériau granulaire, la forme des grains s'avère déterminante. Elle conditionne simultanément la réponse globale (résistance et dilatance) et la distribution locale des mécanismes d'interaction avec la géogrille. Les particules anguleuses, plus dilatantes, optimisent le blocage des grains et la transmission des efforts, renforçant l'efficacité du renfort.

De manière complémentaire, le frottement d'interface grain–géogrille joue un rôle direct dans la mobilisation relative des mécanismes de frottement et de butée : pour des angles d'interface faible, la butée prédomine ; pour des angles intermédiaires proches de l'angle intergranulaire, le frottement agit principalement en phase initiale jusqu'au pic, au-delà, le mécanisme de buté devient prépondérant ; pour des angles élevés, le mécanisme de frottement est celui qui prédomine mais sans influence significative sur le transfert global d'efforts. Ces observations soulignent que l'efficacité du renforcement repose sur la combinaison de la contribution de l'interface et avant tout de l'imbrication mécanique entre grains et géogrille, notamment dans les cas réels où le frottement entre grains est égal ou inférieur à celui de l'interface.

Concernant les propriétés intrinsèques du renfort, la rigidité de la géogrille apparaît comme un paramètre central. Une faible rigidité conduit à une déformation excessive et à une efficacité limitée du renfort, tandis qu'une rigidité élevée améliore significativement la performance mécanique de l'échantillon, mais seulement jusqu'à un seuil au-delà duquel les gains de résistance deviennent mineurs ($J \approx 5000$ kN/m dans le cas étudié). Enfin, l'analyse des aspects géométriques montre que la taille et la forme des ouvertures influencent les modes d'interaction entre la géogrille et le sol : une ouverture optimale est identifiée pour un rapport $b/D_{50} \approx 5{,}1$ (configuration *B53×53*), traduisant un compromis favorable entre frottement et butée. La forme

de la géogrille (carrée ou triangulaire) exerce une influence secondaire, les écarts de performance restant limités (≈ 10 %) pour une rigidité donnée.

L'efficacité d'un renforcement résulte de l'interaction simultanée de tous ces paramètres. Le confinement et l'élancement de l'échantillon de sol renforcé influent significativement sur les mécanismes locaux (frottement vs butée), la forme des grains favorise l'imbrication mécanique et la dilatance, le frottement d'interface le mode de sollicitation de la géogrille, tandis que la rigidité et la géométrie de la géogrille régulent le transfert et la redistribution des efforts. La performance optimale est donc obtenue lorsque ces facteurs sont combinés de manière équilibrée : une géogrille suffisamment rigide avec des ouvertures adaptées et des conditions d'interface appropriées, associée à un matériau granulaire anguleux et un confinement modéré, permet la mobilisation conjointe des mécanismes de frottement et de butée.

Dans l'ensemble, cette étude confirme que la performance et l'efficacité d'un renforcement par géogrille repose sur la contribution conjointe et séquentielle du frottement et de la butée, modulée par les caractéristiques du sol, les conditions de chargement et les propriétés mécaniques et géométriques du renfort. Cette analyse fournit des éléments essentiels pour l'optimisation du dimensionnement, en soulignant l'importance d'un compromis entre performance mécanique, conditions de mise en œuvre et coûts des matériaux.

6.4 Analyse préliminaire du comportement cyclique

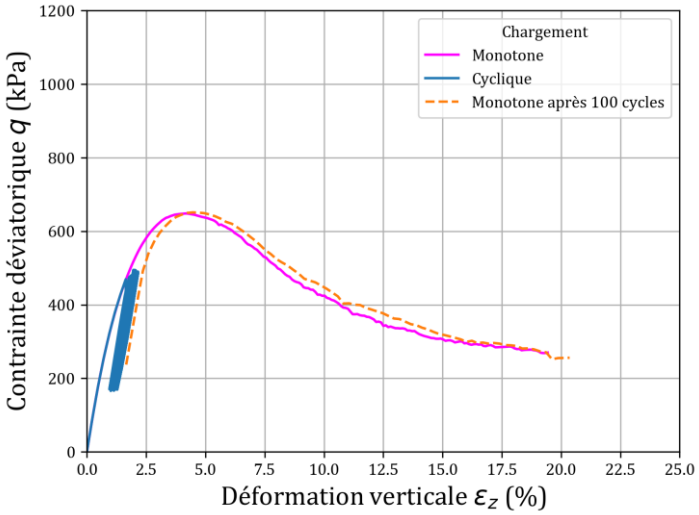
Les investigations précédentes ont permis de caractériser la réponse triaxiale monotone d'échantillons granulaire renforcés par géogrille et de quantifier l'influence des principaux paramètres mécaniques et géométriques sur la mobilisation des mécanismes de frottement et de butée. Toutefois, dans le contexte des voies ferrées, le sol est exposé à des sollicitations cycliques. L'analyse du comportement cyclique constitue donc une étape essentielle pour évaluer la durabilité et la performance à long terme des sols renforcés. La présente section propose une étude préliminaire du comportement cyclique des sols granulaires renforcés, en s'appuyant sur le modèle numérique développé. Cette approche préalable vise à identifier les tendances générales et les paramètres clés influençant la performance cyclique des sols renforcés, ouvrant la voie à des analyses plus approfondies et à des études paramétriques dans les travaux futurs.

6.4.1 Comportement contrainte–déformation sous chargement cyclique

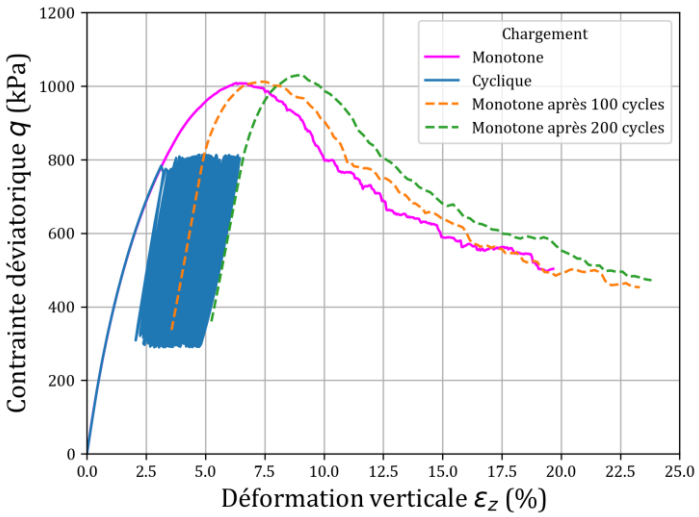
La Figure 6.45 montre l'évolution de la courbe contrainte-déformation en fonction des déformations verticales. Lors de l'essai triaxial monotone initial, les échantillons renforcés à mi-hauteur et non renforcés ont atteint des résistances maximales respectives de 1056 kPa et 648 kPa, correspondant à la limite de capacité portante avant rupture. Pour évaluer le comportement cyclique de l'échantillon renforcé, des essais triaxiaux cycliques ont été réalisés en appliquant des contraintes déviatoriques comprises entre 30 % et 80 % du pic, soit 180–430 kPa pour le cas non renforcé (Figure 6.45.a) et 300–800 kPa pour le cas renforcé (Figure 6.45.b). Ce choix a été retenu afin d'exclure, d'une part, les faibles niveaux de contrainte (< 30 %), où la réponse demeure quasi-élastique et peu représentative, et d'autre part, les niveaux trop élevés (> 80 %), qui conduiraient rapidement à la rupture sans permettre d'analyser l'accumulation progressive des déformations.

Au cours des cycles, on constate une accumulation des déformations permanentes dans l'échantillon. Cette dérive régulière souligne que, bien que le matériau ait une certaine résilience, il subit des évolutions progressives de sa structure à chaque cycle de chargement. Après les 100 cycles et 200 cycles effectués, l'échantillon est sollicité par un chargement monotone, pendant lequel on observe l'apparition d'un pic de résistance avec une montée en charge plus forte (pente de la courbe contrainte déformation plus élevée). Malgré les cycles, la résistance n'a pas été

altérée, ce qui suggère que les particules du sol et la géogrille n'ont pas subi de réarrangements majeurs.



(a)



(a)

Figure 6.45. Courbes contrainte-déformation sous charge cyclique pour les deux configurations (a) 0G et (b) 1G à mi-hauteur après 100 cycles de charge.

Cette invariance du pic de contraintes après les cycles suggère que les cycles appliqués n'ont pas induit de modifications majeures dans la structure granulaire ou dans l'agencement interne des particules, susceptibles de modifier les mécanismes d'interaction entre les grains de sol ou entre le sol et la géogrille lors du rechargement, et ce que ce soit dans le cas avec géogrille ou sans. Si un réarrangement significatif des particules ou une dégradation interne avait eu lieu, on aurait pu observer à une réduction du pic, indiquant une perte de résistance, ou inversement, une légère augmentation si une compaction interne ou une meilleure imbrication des particules s'était produite.

Le maintien du pic laisse penser que les cycles de chargement/déchargement ont probablement entraîné des glissements et de légers réarrangements locaux des particules, mais sans modifier fondamentalement l'organisation générale ou la densité de l'échantillon. En conséquence, on peut penser que les cycles sont restés dans une plage de déformation principalement élastique ou faiblement plastique, sans générer de réorganisation structurelle importante.

L'absence de variation du pic montre également que la géogrille, bien que stabilisant localement la structure, n'améliore pas l'imbrication des grains et la résistance à long terme de l'échantillon après cycles. La rigidité locale fournie par la géogrille biaxiale empêche les déformations excessives autour de sa position, mais n'induit pas un serrage progressif des grains à l'échelle globale du matériau. Dans le cas non renforcé, ce comportement pourrait être lié à une densité initiale suffisamment élevée, qui limite naturellement les réarrangements sous l'effet de cycles de charge modérés.

De plus, l'augmentation de la pente de la courbe contrainte-déformation indique que l'échantillon a gagné en rigidité lors du rechargement de l'échantillon.

En résumé, ces résultats préliminaires montrent que, pour des amplitudes modérées, le comportement cyclique ne modifie pas significativement la structure interne ni la capacité portante du matériau. Des essais supplémentaires avec des amplitudes plus élevées seraient nécessaires pour évaluer les conditions menant à des réarrangements internes significatifs ou à une évolution du pic de résistance.

6.4.2 Déformation permanente sous chargement cyclique

Pour comparer efficacement les comportements, il est nécessaire de se référer à un même niveau relatif de chargement. L'échantillon non renforcé, caractérisé par une résistance maximale de 648 kPa — inférieure à celle de l'échantillon renforcé — constitue ainsi une base de comparaison pertinente pour évaluer l'effet du renforcement. Les cycles de contrainte retenus pour cette étude s'étendent entre 180 et 480 kPa.

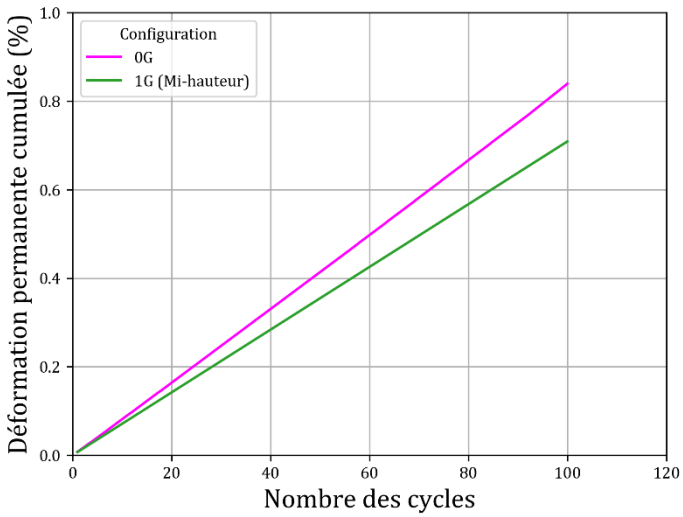


Figure 6.46. Evolution de la déformation permanente accumulée au cours de 100 cycles de charge pour les deux configurations (a) 0G et (b) 1G à mi-hauteur.

Les résultats montrent que l'échantillon renforcé par la géogrille présente une accumulation de déformations permanentes plus limitée que l'échantillon non renforcé (Figure 6.46). Après 100 cycles, la déformation permanente cumulée atteint 0,70 % pour l'échantillon renforcé contre 0,83 % pour le non renforcé, soit une réduction de 15,5 %. Cette différence s'explique par le rôle stabilisateur de la géogrille, qui freine la dérive cumulative des déformations au cours des cycles.

En l'absence de renfort, la matrice granulaire se caractérise par une plus grande liberté de déplacement des particules, favorisant leur réorganisation et leur glissement sous l'effet du chargement cyclique. A l'inverse, la présence de la géogrille élève la résistance globale à environ 1056 kPa et introduit une contrainte additionnelle localisée, qui limite la propagation des

mouvements granulaires. La stabilisation fournie par le renfort confine les particules dans sa zone d'influence, réduisant ainsi l'amplitude des réarrangements internes et maintenant l'échantillon dans un domaine de réponse moins plastique.

La baisse constatée de 15,5 % dans l'accumulation des déformations permanentes est significative, même pour des niveaux de charge modérés. Elle montre que l'effet de la géogrille ne se limite pas à une action locale immédiate, mais s'étend à l'ensemble de l'échantillon en ralentissant la progression des déformations permanente au cours des cycles.

Ces résultats confirment que l'ajout d'une géogrille contribue à améliorer la stabilité à long terme sous chargements répétés, en particulier dans des contextes où l'accumulation de déformations peut compromettre la durabilité des infrastructures. Toutefois, le comportement global de dérive reste similaire dans les deux cas, à ce stade du nombre de cycles, ce qui suggère que le renfort n'empêche pas totalement la réorganisation granulaire, mais en atténue l'intensité en limitant les déformations autour de sa position.

En perspective, des investigations complémentaires avec des niveaux de contrainte plus proches du pic permettraient de déterminer les limites de cette stabilisation et d'évaluer la robustesse du renfort en conditions extrêmes. Cette étape est indispensable pour caractériser pleinement la durabilité des sols renforcés soumis à des chargements répétés, notamment dans le contexte ferroviaire.

6.5 Synthèse générale

Ce chapitre a permis d'analyser en détail, par approche numérique, le comportement triaxial d'un matériau granulaire renforcé par géogrille. L'étude a été menée à plusieurs échelles, depuis la réponse globale en contrainte–déformation jusqu'aux mécanismes locaux d'interaction, complétée par une investigation paramétrique et une première évaluation du comportement cyclique.

Sur le plan global, l'ajout de la géogrille améliore significativement la résistance au pic et limite les déformations latérales. L'efficacité du renforcement dépend toutefois fortement de la position et du nombre de nappes : Pour un échantillon de sol peu élancé, une géogrille placée à mi-hauteur semble être un bon compromis en termes de gain de résistance et de confinement, alors que pour des échantillons élancés, l'ajout de plusieurs nappes est nécessaire à une optimisation de l'efficacité globale.

L'analyse microscopique a mis en évidence la formation d'une zone d'influence autour de la géogrille, caractérisée par une augmentation locale de la porosité et une concentration de contraintes horizontales en forme de dôme. Le suivi des efforts dans les nervures a montré que la mobilisation de la géogrille s'effectue de manière hétérogène (nervures centrales plus sollicitées que celles situées en périphérie). Les observations confirment également que l'efficacité du renforcement repose sur deux mécanismes principaux, frottement et butée, mobilisés de manière séquentielle et complémentaire. Dans les phases initiales et jusqu'au pic, le frottement joue un rôle prépondérant, alors que la contribution de la butée augmente en phase post-pic, participant au maintien de la résistance et au retardement de l'instabilité.

L'étude paramétrique a précisé l'influence des facteurs clés :

- Le confinement conditionne la répartition entre frottement et butée, la contribution de cette dernière étant d'autant plus marquée que le confinement est faible.
- L'élancement de l'échantillon modifie la nature des mécanismes mobilisés : les échantillons de faible hauteur favorisent une meilleure complémentarité entre frottement

et butée, tandis que les échantillons élancés privilégient le frottement, au prix d'une perte d'efficacité mécanique.

- La forme des grains influence directement sur la résistance et la dilatance : les particules anguleuses renforcent l'imbrication et la transmission des efforts, alors que les particules arrondies réduisent les capacités de verrouillage mécanique.
- Le frottement d'interface influe sur les mécanismes d'interaction entre la géogrille et le sol : faible, il favorise la butée; intermédiaire, les mécanismes de frottement et de butée sont équilibrés ; élevé, il favorise le frottement tout en maintenant une part de butée active.
- L'accroissement de la rigidité de la géogrille favorise les performances mécaniques jusqu'à un certain seuil (≈ 5000 kN/m), au-delà duquel les gains de résistance sont peu significatifs.
- Enfin, la taille et la forme des ouvertures conditionnent l'activation des mécanismes d'interaction : une ouverture optimale de maille est identifiée pour un rapport $b/D_{50} \approx 5{,}1$, correspondant à un compromis favorable entre frottement et butée. La forme des ouvertures (carrée ou triangulaire) a un effet secondaire, limité à environ 10 % de différence de performance.

L'analyse conjointe de ces paramètres montre que l'efficacité du renforcement ne dépend pas d'un facteur isolé mais de l'équilibre entre les propriétés du sol (forme des grains, frottement intergranulaire), la géométrie de l'échantillon et son niveau de sollicitation (élancement, confinement) et les caractéristiques de la géogrille (rigidité, ouverture, interface). C'est la combinaison harmonieuse de ces éléments qui garantit une performance optimale et durable.

Enfin, l'étude préliminaire du comportement cyclique a révélé que, pour des amplitudes de charge comprises entre 30 et 80 % du pic de contrainte obtenu sous chargement monotone, l'action des cycles se traduit par une augmentation des déformations plastiques des échantillons renforcés et non renforcés sans toutefois influer sur la résistance au pic même après 100 à 200 cycles. Néanmoins, le renforcement par géogrille permet de réduire significativement l'amplitude des déformations permanentes (≈ –15,5 %). Ces résultats indiquent que la géogrille agit comme un élément stabilisateur limitant la dérive des déformations plastiques, bien que la tendance globale à l'accumulation de déformations reste présente. Des investigations complémentaires avec des amplitudes de charge plus élevées seront nécessaires pour caractériser pleinement la durabilité du renforcement sous sollicitations extrêmes.

Dans l'ensemble, ce chapitre confirme que la performance des sols granulaires renforcés par géogrille repose sur une synergie entre frottement et butée, dont la mobilisation dépend des propriétés mécaniques et géométriques du système. Les résultats obtenus fournissent des bases solides pour le dimensionnement des structures renforcées et ouvrent la voie à des optimisations ciblées en fonction des conditions d'application, notamment dans le domaine ferroviaire.

7 Conclusions et perspectives

7.1 Conclusions et discussions générales

A ce jour, les géogrilles sont largement utilisées pour améliorer la portance et la stabilité des structures de génie civil, en particulier dans les infrastructures de transport. De nombreuses recherches ont été conduites pour étudier leur efficacité et les mécanismes qu'elles mobilisent. Toutefois, les interactions mécaniques entre un milieu granulaire et une géogrille demeurent complexes et encore partiellement élucidées. Elles prennent naissance à l'échelle locale, au niveau des particules, des différents éléments constitutifs de la géométrie de la géogrille, et des contacts entre ces objets.

La présente thèse a été consacrée à l'étude micromécanique de l'interaction sol–géogrille sous chargement complexe, avec pour finalité de mieux comprendre les mécanismes de renforcement et de stabilisation des sols granulaires. L'objectif principal poursuivi était double : (i) comprendre les rôles distincts mais complémentaires de renforcement et de stabilisation à l'échelle micromécanique à travers les interactions locales entre grains de sol et éléments de la géogrille, et (ii) identifier les paramètres déterminants pour la performance du système sol–géogrille, en vue de fournir des bases scientifiques solides pour le dimensionnement et l'optimisation des assises granulaires. La démarche adoptée a reposé sur une approche intégrée combinant expérimentations triaxiales, campagnes de tomographie à rayons X, et simulations numériques par la méthode des éléments discrets (DEM) dans le code YADE. Cette approche multi-échelle a permis de relier les observations locales aux réponses globales, en assurant une cohérence entre analyses expérimentales et numériques.

Principaux apports expérimentaux :

Les essais triaxiaux ont été menés sur des échantillons secs de sols granulaires anguleux, avec et sans renfort, pour un diamètre de 70 mm et différents élancements. Ils ont mis en évidence :

- Une augmentation significative de la rigidité initiale due à la présence de la géogrille, particulièrement marquée à faible confinement ;
- Un accroissement de la résistance au pic, pouvant atteindre près du double de celle des échantillons non renforcés ;
- Un décalage du pic de contrainte déviatorique vers des déformations plus élevées à fort confinement ;
- Une réduction de la dilatance globale, traduisant l'effet de confinement local exercé par la géogrille.

Les campagnes de tomographie à rayons X, menées sur des échantillons de 70 mm et 200 mm de diamètre, ont permis d'accéder à la microstructure interne et aux interactions locales grains–géogrille. Elles ont montré notamment :

- Une porosité locale accrue dans une zone de ±5 mm autour des nervures (≈ 0,5 D_{50}) ;
- Une imbrication granulaire conservée à faibles charges, soulignant l'importance de la géométrie des ouvertures et des nervures dans la mobilisation du verrouillage mécanique (interlocking) ;
- Des limitations techniques liées à la faible absorption de la géogrille et au temps de traitement des données, restreignant l'analyse quantitative des déformations locales, mais fournissant une base solide pour la calibration du modèle numérique.

Principaux apports de la calibration numérique :

La modélisation DEM, développée sous YADE, a permis de reproduire les conditions expérimentales. Les grains ont été simulés sous forme de clumps (agrégats de sphères) et une représentation simplifiée de la géogrille par un réseau de nœuds reliés par des éléments cylindriques a été adoptée. La calibration réalisée sur la base des courbes contrainte–déformation, du comportement volumique et des observations tomographiques a conduit aux constats suivants:

- Une reproduction fidèle de la rigidité initiale, de la résistance au pic et de l'évolution du rapport q/p pour l'échantillon calibré ;
- Une bonne concordance microstructurale avec les données tomographiques, incluant les distributions de forme des grains, la porosité locale, le nombre de voisins (coordination) et les orientations de contacts autour de la géogrille ;
- Des écarts à faible confinement, attribués à l'hypothèse de rigidité de contact constante et à la simplification géométrique des grains, suggèrent l'intérêt futur d'intégrer une loi de contact non linéaire (Hertz–Mindlin).

Analyse numérique approfondie du comportement triaxial :

Le cœur de la recherche a consisté en une analyse numérique avancée sur des échantillons de grande taille (200 × 200 mm), soumis à des essais triaxiaux principalement sous confinement de 100 kPa et régime quasi-statique. Cette étude a permis :

- D'identifier les rôles principaux de la géogrille :
    - Renforcement : augmentation de la résistance par interlocking, frottement à l'interface et redistribution des contraintes ;
    - Stabilisation : augmentation des contraintes horizontales, réduction des déplacements relatifs, limitation des déformations permanentes sous chargement cyclique, maintien de la porosité et conservation de la microstructure.
- De démontrer que la position du renfort joue un rôle déterminant, la performance maximale étant obtenue pour une géogrille placée à mi-hauteur de l'échantillon ;
- De mettre en évidence une mobilisation hétérogène de la géogrille, les nervures centrales étant plus sollicitées que les périphériques ;
- De quantifier la zone d'influence mécanique, associée à la redistribution des contraintes horizontales, délimitée à environ 30–40 mm (≈ 3 à $4\ D_{50}$) de part et d'autre de la géogrille;
- De confirmer que la géogrille agit comme limiteur de localisation des déformations, stabilisant la structure granulaire et assurant une meilleure durabilité du massif.

Résultats de l'étude paramétrique :

L'efficacité du renforcement ne dépend pas d'un facteur isolé mais de l'équilibre entre les propriétés du sol, la géométrie de l'échantillon et son niveau de sollicitation et les caractéristiques de la géogrille. L'étude paramétrique a apporté des éclairages complémentaires sur les facteurs gouvernant l'efficacité globale :

- Le confinement conditionne la répartition entre frottement et butée, la contribution de cette dernière étant d'autant plus marquée que le confinement est faible.
- L'élancement de l'échantillon conditionne à son tour la mobilisation de ces mécanismes : les échantillons de faible hauteur favorisent la complémentarité frottement–butée, tandis que les échantillons élancés privilégient le frottement au détriment de l'efficacité globale;

- La forme des grains influence directement la résistance et la dilatance : les grains anguleux favorisent l'interlocking et la transmission des efforts, alors que les grains arrondis limitent ces mécanismes ;
- Le frottement d'interface module le partage initial des efforts : faible, il favorise la butée; intermédiaire, les mécanismes de frottement et de butée sont équilibrés ; élevé, il favorise le frottement tout en maintenant une part de butée active ;
- La rigidité de la géogrille améliore les performances jusqu'à un seuil d'environ 5000 kN/m, au-delà duquel les gains de résistance sont peu significatifs ;
- La taille et la forme des ouvertures modulent la mobilisation des mécanismes : une ouverture optimale a été identifiée pour un rapport $b/D_{50} \approx 5{,}1$; la forme (carrée ou triangulaire) n'a qu'un effet secondaire, dans ces configurations testées ;

Synthèse :

Cette thèse apporte une compréhension multi-échelle des mécanismes de renforcement et de stabilisation des sols granulaires par géogrilles. Elle a permis :

- D'identifier les zones d'influence locales et les mécanismes microscopiques dominants ;
- De valider un modèle numérique robuste, capable de reproduire à la fois la réponse globale et la réponse locale ;
- De mettre en évidence les paramètres clés pour le dimensionnement et l'optimisation des géogrilles.

En conclusion, cette recherche propose un cadre scientifique et méthodologique intégré, combinant essais triaxiaux, analyses tomographiques 3D et simulations DEM. L'approche développée permet de caractériser et de prédire le comportement mécanique global et local du système sol–géogrille, mais aussi d'apporter une compréhension approfondie des mécanismes gouvernant sa performance et sa durabilité. Ces résultats ouvrent des perspectives concrètes pour l'optimisation des dispositifs de renforcement et de stabilisation dans les infrastructures de transport.

7.2 Perspectives

7.2.1 Recommandations issues du modèle numérique et pistes de développement

Les simulations numériques menées dans ce travail ont permis de dégager des conclusions solides quant aux facteurs déterminants de l'efficacité du renforcement par géogrille : forme des particules, rigidité et géométrie de la géogrille (taille et ouverture de maille), ainsi que sa position et le nombre de nappes. L'analyse micromécanique conduite a en outre permis de mettre en évidence les interactions locales (frottement, butée, redistribution des contraintes, évolution de la porosité), confirmant le rôle multi-échelle de la géogrille dans le renforcement et la stabilisation. Ces acquis ouvrent désormais la voie à plusieurs pistes de développement destinées à affiner et étendre le modèle actuel :

- Amélioration des lois de contact : introduction de lois non linéaires (type Hertz–Mindlin) afin de mieux représenter la rigidité des contacts intergranulaires et les interactions sol–géogrille, en particulier lors des phases initiales de chargement.
- Validation expérimentale approfondie : confrontation plus fine du comportement initial de la géogrille triaxiale simulée avec les observations issues de la tomographie RX.
- Exploitation avancée de la tomographie : développement de méthodes plus puissantes pour extraire des indicateurs quantitatifs de la microstructure, malgré les limites actuelles

de résolution. L'optimisation des protocoles de scan et du choix des matériaux (absorption contrastée de la géogrille) constitue une perspective prometteuse.

- Etude du comportement cyclique et dynamique : approfondissement de l'analyse sous sollicitations répétées, afin de confirmer le rôle stabilisateur du renfort dans la limitation des déformations permanentes.
- Prise en compte de l'épaisseur de la géogrille : la modélisation actuelle, basée sur des cylindres, ne permet pas d'évaluer cet effet. Une approche plus représentative, par l'utilisation d'éléments plans ou par le modèle proposé par Moravia (2020), pourra être mise en œuvre (un premier prototype de modèle a déjà été développé).
- Flexion et torsion des nervures : la décomposition des nervures en sous-nervures, déjà explorée lors de la calibration (section 4.4.2.2), pourrait être exploitée pour mieux représenter la flexibilité et le comportement local de la géogrille.
- Etude paramétrique étendue : exploration de différentes configurations de géogrilles (uniaxiales, biaxiales rectangulaires, triaxiales de tailles variées), afin de couvrir un spectre plus large de géométries et propriétés mécaniques. Le modèle développé permet déjà d'intégrer ces variantes, ce qui facilitera la réalisation de simulations systématiques.

Ces développements contribueront à une compréhension plus fine des mécanismes multi-échelles d'interaction sol–géogrille et renforceront la fiabilité des outils numériques de conception. A terme, ils permettront d'optimiser le dimensionnement des géogrilles en intégrant de manière cohérente les effets couplés de la microstructure granulaire, de la géométrie du renfort et des conditions de sollicitation.

7.2.2 Extension du modèle numérique à des configurations réalistes de grande dimension

Le modèle numérique actuel développé dans YADE permet une simulation réaliste de l'interaction locale entre les particules de sol et la géogrille dans des configurations simplifiées. Dans ce travail, une extension a été introduite pour faire évoluer le modèle vers des simulations à plus grande échelle représentant des sections de voies ferrées renforcées, dans le but de reproduire les conditions expérimentales décrites dans la littérature.

Cet effort de mise à l'échelle nécessite une puissance de calcul importante. Néanmoins, il ouvre la possibilité de valider l'approche numérique développée au cours de la thèse en comparant ses prédictions à la fois aux résultats expérimentaux existants et aux données collectées au cours de la campagne expérimentale à grande échelle décrite dans la section 7.2.3 suivante.

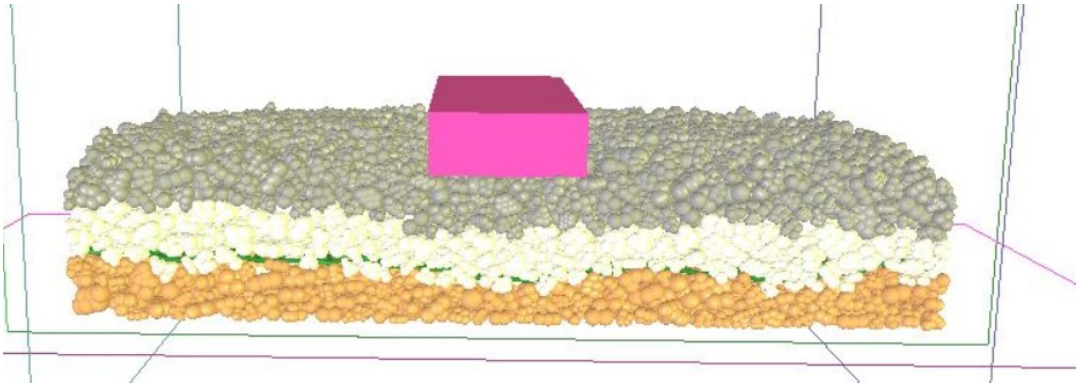


Figure 7.1. Modèle numérique d'une traverse reposant sur un sol granulaire renforcé par une géogrille placée au tiers inférieur de la hauteur de la couche granulaire.

Par exemple, la Figure 7.1 illustre un essai représentatif réalisé avec des granulats de dimensions 22/61 mm, renforcés par la même géogrille étudiée dans ce travail de thèse (*B40x40*), pour un échantillon de 1400×700×300 mm. La traverse, d'une largeur de 250 mm et de hauteur de 100 mm, est placée sur toute la largeur de l'échantillon.

Comme illustration préliminaire, un essai de chargement monotone a été appliqué à travers la traverse. La Figure 7.2 présente la distribution des efforts normaux mobilisés dans les nervures de la géogrille placée au tiers inférieur de la hauteur de la couche granulaire. On observe que la mobilisation est concentrée principalement dans la zone située directement sous la traverse, traduisant le transfert des charges verticales vers la géogrille. Les nervures orientées perpendiculairement à l'axe longitudinal de la traverse sont particulièrement sollicitées, puisqu'elles contribuent directement au confinement des particules de sol et à la redistribution des charges vers les zones latérales adjacentes.

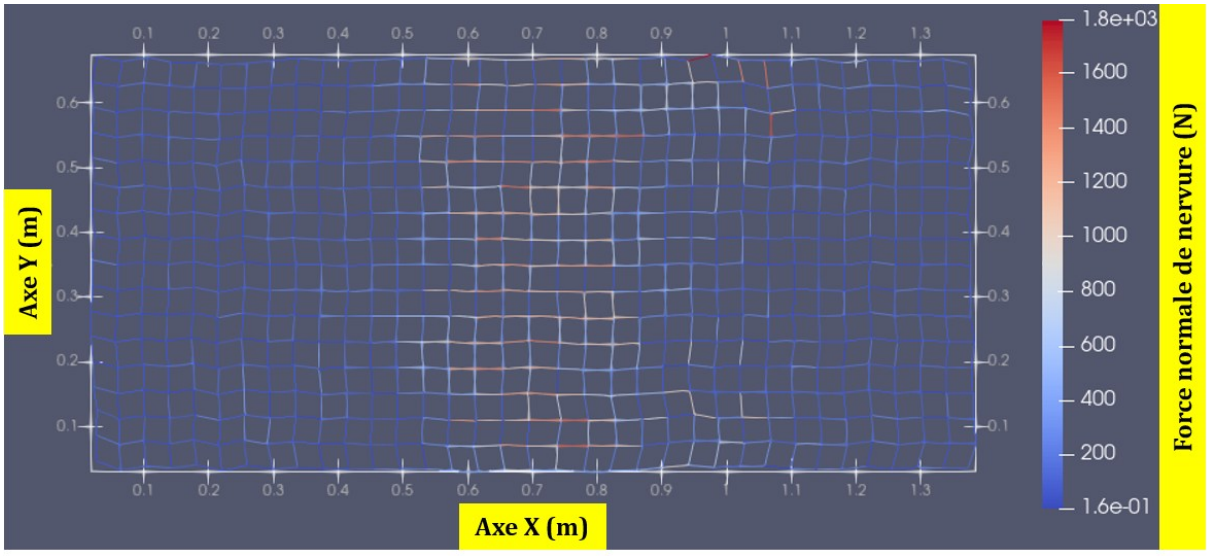


Figure 7.2. Distribution des efforts normaux mobilisés dans la géogrille placée au tiers inférieur de la couche granulaire, à la fin du chargement monotone appliqué par la traverse.

Cette réponse est en accord avec les observations expérimentales rapportées par Perkins (1999) et Yaba (2022a), qui montrent que, sans géogrille, les déformations en traction se développent sous les blocs de traverses tandis que des déformations en compression apparaissent dans les zones latérales. La présence de la géogrille modifie donc ce schéma en mobilisant ses nervures pour stabiliser la structure granulaire.

Outre une validation, cette phase permet de tester la robustesse du modèle dans des conditions de chargement plus réalistes, telles que le chargement cyclique avec et sans renforcement, et en incorporant les effets induits par la construction. Elle permet également d'évaluer la capacité du modèle à prédire le comportement à long terme des infrastructures ferroviaires renforcées par des géogrilles.

7.2.3 Etude expérimentale à grande échelle « CyLo RT » : vers un couplage avec la simulation

Une campagne expérimentale à grande échelle a été menée dans le cadre de la proposition de recherche intitulée « Chargement cyclique des voies ferrées avec et sans stabilisation par géogrille – CyLo RT », menée par SNCF Réseau (gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire nationale française) dans le cadre du projet GEOLAB, financé par le programme de recherche et d'innovation

Horizon 2020 de l'Union européenne. L'étude s'inscrit dans le cadre du troisième appel à propositions de GEOLAB, axé sur : « Expériences pour valider les progrès de la modélisation numérique et de la science des données conduisant à une meilleure conception technique ».

Cette campagne à grande échelle est actuellement en phase de traitement et d'analyse des données, en collaboration avec les partenaires du projet. Elle offre une opportunité unique de comparer et de valider les prédictions numériques dans des conditions réalistes, en particulier celles obtenues à partir du modèle DEM développé dans ce travail de thèse. Au-delà de sa contribution à la recherche actuelle, cet effort expérimental constitue une base solide pour les investigations futures, y compris la calibration des modèles numériques, le développement de lois constitutives affinées, et la définition des meilleures pratiques pour l'utilisation des géogrilles dans les infrastructures ferroviaires.

J'ai participé activement à ce projet à côté des représentants du laboratoire 3SR (Orianne Jenck et Fabrice Emeriault) ainsi que des partenaires de SNCF Réseau (Olatounde Yaba plus particulièrement). Le travail expérimental a été réalisé au laboratoire d'essais géotechniques de l'Université technique de Darmstadt (TUDa) en Allemagne. Ses installations techniques offrent des capacités d'essais in situ à grande échelle dans des conditions de charge contrôlées. Les systèmes de chargement et de mesure disponibles à la TUDa ont été complétés par :

- Des équipements géotechniques et géophysiques fournis par SNCF Réseau et l'UGA (Université Grenoble Alpes).
- Des capteurs à fibre optique fournis par l'UGE (Université Gustave Eiffel) et SHM System.
- Une géogrille instrumentée fournie par NAUE, fabricant allemand de géosynthétiques.

7.2.3.1 *Contexte et objectifs*

L'infrastructure ferroviaire est essentielle à l'économie française et européenne pour plusieurs raisons. Elle constitue un moyen sécurisé, efficace et abordable de transporter les passagers et le fret. Elle joue également un rôle vital en reliant les principaux centres économiques et régions et en soutenant le commerce international, générant ainsi d'immenses bénéfices sociaux. Ces avantages sont la raison pour laquelle SNCF Réseau et le gouvernement français ont investi massivement dans la modernisation de l'infrastructure ferroviaire existante au cours des dernières années. Comme le souligne cette thèse, l'une des méthodes permettant de limiter les impacts environnementaux de la rénovation des voies consiste à utiliser la stabilisation par géogrille pour réduire l'épaisseur des voies tout en conservant des performances similaires à celles des voies standard.

La viabilité et l'efficacité des plates-formes stabilisées par géogrilles, par rapport aux besoins de SNCF Réseau, ont été démontrées par des essais de charge cyclique en laboratoire et validées sur des sections de voie instrumentées (Yaba, 2022). Ces expériences ont conduit à l'élaboration de directives de conception rudimentaires et de modèles numériques simplifiés. Cependant, leur utilité est limitée par l'échelle du banc d'essai de laboratoire existant (boîte relativement petite, avec des effets de bord non quantifiés) et les paramètres non contrôlés de la voie instrumentée (comportement du conducteur, conditions météorologiques, etc.). Il est possible de remédier à ces deux faiblesses en reproduisant les essais de charge cyclique dans un banc d'essai plus grand avec des mesures plus étendues. Le projet CyLo RT vise donc à évaluer le comportement à long terme des plates-formes ferroviaires sous charge cyclique, avec et sans stabilisation par géogrille, dans des conditions contrôlées. Cette approche contribuera à l'évolution des politiques de la SNCF en matière de conception et de durée de vie des voies.

Conformément aux objectifs de cette thèse, le projet CyLo RT vise à améliorer la compréhension des interactions entre les granulats concassés de la couche de sous-ballast, la géogrille et la couche

de fondation sous-jacente. Il cherche également à quantifier l'influence d'une géogrille sur les propriétés mécaniques d'une plate-forme soumise au trafic ferroviaire. Pour ce faire, une modélisation physique à grande échelle est réalisée dans des conditions de laboratoire contrôlées, à l'aide d'un modèle de chargement réaliste dans une fosse d'essai suffisamment grande pour minimiser les effets de bord.

7.2.3.2 *Description générale du dispositif expérimental*

1. *Configuration expérimentale :*

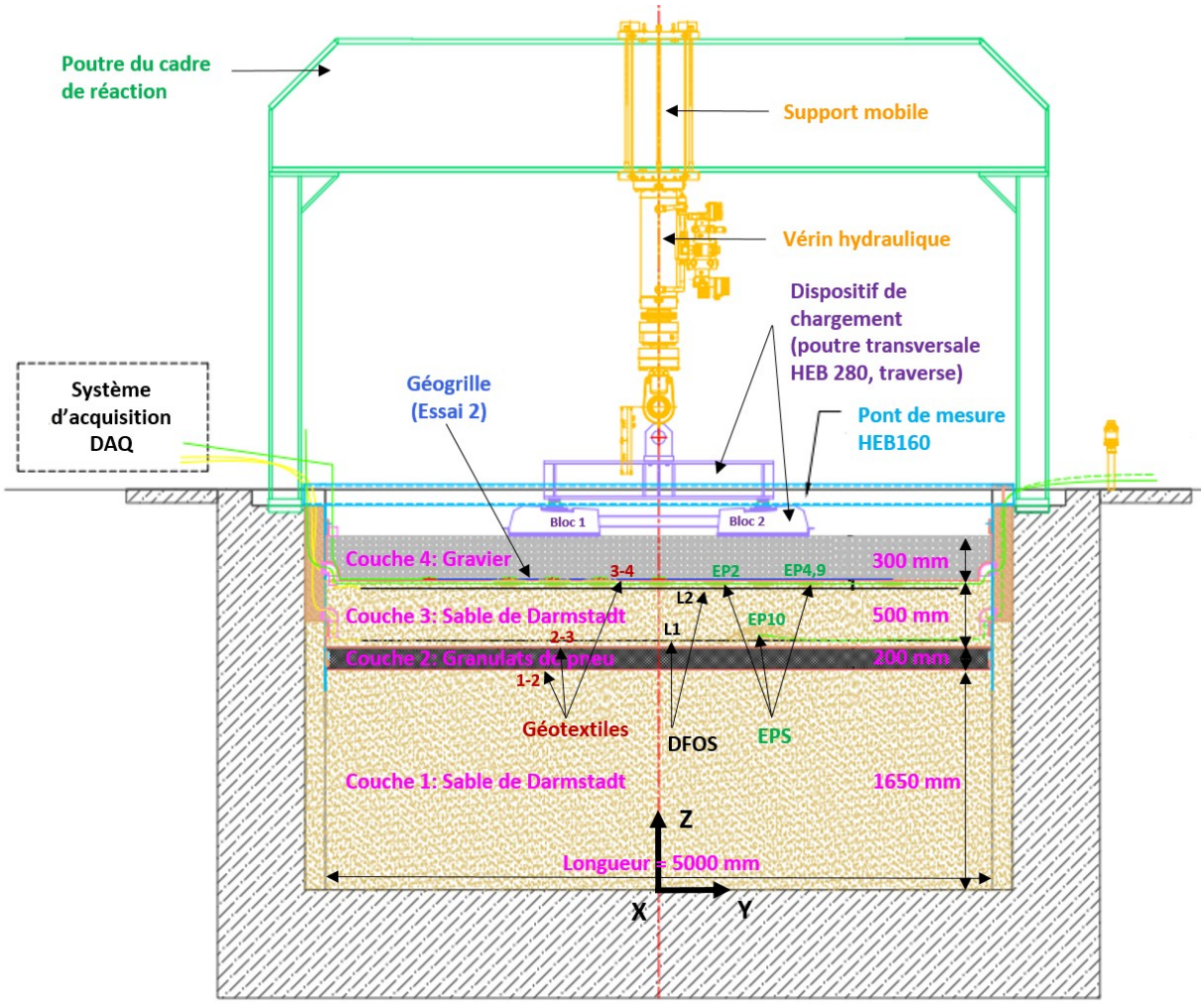


Figure 7.3. Vue de côté de la fosse d'essais géotechniques de la TUDa contenant le modèle de voie ferrée.

Le modèle est construit dans un compartiment de la fosse d'essai géotechnique de la TUDa, mesurant 5000 mm de long, 5435 mm de large et 3000 mm de profondeur. Il est composé d'une sous-couche (grave répondant aux critères SNCF Réseau) de 300 mm d'épaisseur, placée sur une couche de fondation souple de 700 mm d'épaisseur (constituée de sable de Darmstadt et de granulats de pneu). Sous cette fondation souple, une couche de sable dense de Darmstadt de 1650 mm d'épaisseur a été ajoutée pour s'ajuster au plus près à la position du vérin de chargement. La séparation entre les différentes couches du modèle est assurée par un géotextile non tissé sans fonction mécanique. Lors du deuxième essai, la séparation entre la sous-couche et la fondation souple est assurée par un géocomposite constitué d'une géogrille associée au même géotextile non tissé que celui utilisé lors du premier essai (voir Figure 7.3).

Après la mise en place, la structure de voie est chargée verticalement à l'aide d'un dispositif de chargement relié à un vérin hydraulique de 500 kN, positionné au centre de gravité du dispositif. Le système de chargement a été conçu pour reproduire l'empreinte de pression exercée par une traverse bi-bloc, et le modèle a été construit à l'échelle 1:1 afin d'assurer des conditions de contrainte réalistes. Ce choix est soutenu par l'étude de Sadeghi et Youldashkhan (2005), qui propose de nouvelles recommandations pour améliorer l'analyse des traverses en béton pour voies ferrées. Le dispositif de chargement est constitué d'une traverse bi-bloc reliée par une poutre transversale sur sa face supérieure, et est centré dans la fosse. Le vérin est fermement fixé sur une poutre de réaction rigide, assurant un chargement stable et précis.

De nombreux capteurs (force, déplacement, déformation et pression) ont été intégrés dans la structure de voie, comme décrit dans les sections suivantes. L'originalité de l'instrumentation réside dans l'utilisation de capteurs à fibre optique distribuée « DFOS » intégrés dans le sable afin d'obtenir des informations précises sur les déformations sous la sous-couche.

2. *Préparation du modèle :*

Une illustration détaillée de chaque phase est présentée en annexe A.2 et référencée ci-dessous.

Le sable de Darmstadt utilisé est un sable fluvial à grains moyens, avec un diamètre moyen D_{50} de 0,48 mm et un coefficient d'uniformité C_u de 2,41 (voir Figure A.4). Ses propriétés mécaniques ont été rigoureusement caractérisées par des essais de laboratoire standards (Beroya-Eitner et al., 2024). Le sable a été déposé et nivelé sans compactage, afin de constituer des couches uniformes ayant une densité sèche moyenne de 1735 kg/m^3, correspondant à une densité relative D_r de 81 % (voir Figure A.5).

Une couche de granulats de pneus recyclés (couche 2, voir Figure 7.3 et Figure A.6), a été utilisée pour modéliser la première partie de la fondation souple. Cette couche a été placée au-dessus de la première couche de sable (couche 1), avec une épaisseur cible de 200 mm après compactage des couches inférieures et avant le début de la phase de chargement. Le matériau utilisé est le produit « super coarse » de l'entreprise Genan (https://www.genan.eu/products/granulate/), constitué de granulés homogènes et libres de couleur noire, de taille comprise entre 1,5 et 5 mm, avec une densité spécifique de 1160 kg/m^3.

L'essai nécessitait un granulat concassé bien étalé avec une taille maximale de 31,5 mm pour constituer la sous-couche. Ce matériau devait correspondre à un sol de type D2 ou D3 selon le guide GTR 2000, avec une composition minéralogique calcaire. Pour répondre à ces critères, un gravier calcaire 0/20 a été sélectionné. Ses propriétés mécaniques ont été caractérisées en laboratoire. La granulométrie fournie par l'entreprise « Egis » à SNCF Réseau est présentée en annexe (voir Figure A.7). Le diamètre moyen D_{50} est de 5,5 mm, avec un module de finesse de 4,78, ce qui traduit un sol très bien étalé, donc très hétérogène en taille de grains. Le gravier a été mis en place en quatre sous-couches de 75 mm chacune sur la base d'une densité humide cible de 2002 kg/m^3, de la teneur en eau optimale issue de l'essai Proctor (5,2 %) après compactage (voir Figure A.8 et Figure A.9).

Deux types de géosynthétiques ont été utilisés : un géotextile et une géogrille. Trois couches de géotextile non tissé de type Naue Secutex AS 401 ont été utilisées pour séparer les différentes couches du modèle (voir Figure A.10). Il s'agit d'une nappe en polypropylène de masse surfacique 400 g/m^2, épaisseur 3,9 mm, avec une résistance à la traction maximale de 30 kN/m dans le sens machine et 34 kN/m dans le sens transversal (à 60 % de déformation), et une résistance à la perforation de 2500 N. Une géogrille a également été placée sous la couche de gravier lors du deuxième essai uniquement (voir Figure A.11). Il s'agit du modèle Naue Secugrid 40/40 Q1, dont les propriétés sont détaillées à la section 3.1.2.

3. *Instrumentation :*

Pour chaque essai, deux nappes de capteurs à fibre optique distribuée « DFOS » ont été intégrées dans la deuxième couche de sable (couche 3, voir Figure 7.3), afin de surveiller le développement des déformations sous la sous-couche. Les capteurs (un module d'élasticité de 3 GPa, plage de mesure atteint 4 %, avec une résolution de 1 με) sont répartis selon deux capteurs dans la direction X et un dans la direction Y (voir Figure A.12). La distribution des pressions verticales dans cette même couche a été mesurée à l'aide de 14 capteurs de pression de sol « EPS », d'une capacité nominale de 100 kPa (voir Figure A.13).

La charge verticale a été appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique d'une capacité nominale de 500 kN, équipé de capteurs de force et de déplacement intégrés et complété par quatre capteurs de force « LC » d'une capacité nominale de 20 kN, positionnés entre la poutre transversale et les deux blocs de la traverse (voir Figure A.14). Les déplacements verticaux de ces blocs ont été mesurés par six capteurs LVDT « DT » disposés symétriquement et fixés sur des poutres rigides ancrées aux bords de la fosse (voir Figure A.15).

Enfin, lors du deuxième essai, neuf jauges de déformation ont été collées sur la géogrille afin de mesurer les déformations dans les deux directions principales (machine et transversale), voir Figure A.11. La déformation maximale mesurable (en valeur absolue) par ces jauges est de 50 000 μm/m (5 %).

4. *Dispositif de chargement :*

Les essais simulent le passage d'un train sur des rails supportés par des traverses. Le dispositif de chargement est composé d'une traverse bi-bloc avec une poutre transversale en partie supérieure reliant les deux blocs, sur laquelle la charge est appliquée en son centre (voir Figure 7.3).

La traverse utilisée est de type B 244 NP, composée de deux blocs de 290 mm de large, 680 mm de long et 170 mm d'épaisseur sous les rails, espacés de 1563 mm entre leurs axes. Des accessoires supplémentaires, comme 4 plaques en acier entre la traverse et la poutre, 2 plaques collées sous les blocs et des ponts de mesure (voir Figure A.14), ont été installés pour positionner correctement les capteurs de déplacement (LVDT). Une fois la traverse installée, le vérin hydraulique de 500 kN a été connecté (voir Figure A.15).

7.2.3.3 *Séquence de chargement*

Après la construction, le modèle de plateforme ferroviaire a été soumis à une séquence de chargement accélérée de 250 000 cycles de chargement, correspondant à 50 000 passages de train sur 5 jours, soit 10 000 trains par jour. Le schéma de chargement pour chaque train correspond à un train de voyageurs de quatre voitures (5 cycles de chargement appliqués par les 5 boggies du train), avec des charges variant de 15 à 85 kPa (soit des forces appliquées par le vérin comprises entre 3,54 et 31,15 kN ; voir Figure 7.4).

La charge minimale constante de 15 kPa représente le poids statique du ballast, des traverses et des rails sur la sous-couche. Toutefois, dans le présent montage expérimental, la charge est appliquée directement au niveau du sol de fondation à l'aide d'un système de chargement à l'échelle réelle reproduisant l'empreinte d'une traverse bi-bloc. La force minimale correspondante (3,54 kN) inclut le poids propre de la poutre transversale (2,70 kN) et celui de la traverse bi-bloc avec ses accessoires (2,48 kN).

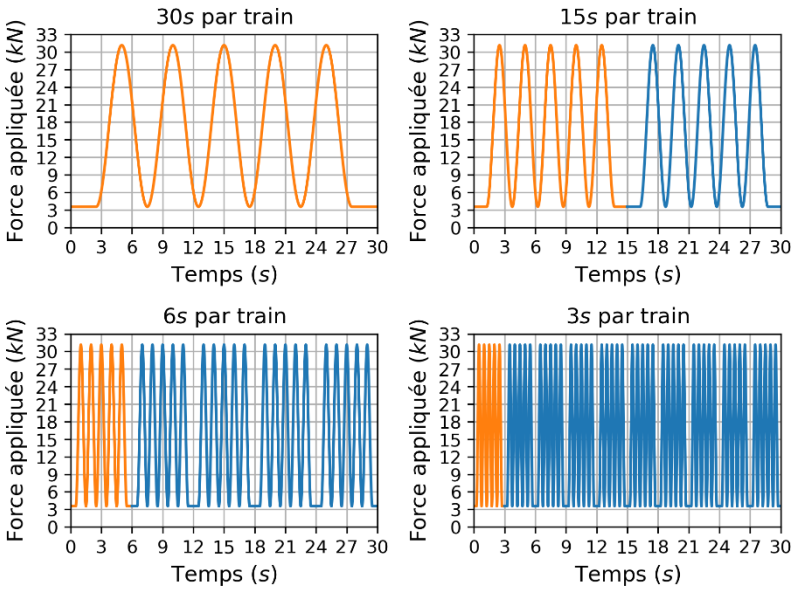


Figure 7.4. Schémas de chargement de la sous-couche pour un train de voyageurs à quatre voitures à différentes vitesses, de la basse vitesse (30 s/train) à la haute vitesse (3 s/train).

La charge était appliquée sur plusieurs jours. Le Jour 1, les séquences de chargement augmentent progressivement en termes de nombre de trains et de leurs vitesses. L'objectif de cette procédure est de gérer les plus grandes déformations avec les premiers trains, car les charges augmentent graduellement, permettant une évaluation précise du comportement du sol sous des conditions de chargement variables. Initialement, une série de trains à basse vitesse est appliquée, commençant par 10 trains (30 secondes par train), suivie de 20 trains (15 secondes par train) et 70 trains (6 secondes par train). Ensuite, des séquences plus intenses sont appliquées avec 4 900 trains à pleine vitesse (3 secondes par train), et 5 000 trains à pleine vitesse. Ensuite, du Jour 2 au Jour 5, deux séquences de 5 000 cycles à pleine vitesse sont effectuées chaque jour pour évaluer la réponse du sol sous des charges répétées à grande vitesse.

7.2.3.4 *Résultats préliminaires*

Ce projet est actuellement en cours et les résultats complets ne sont pas encore accessibles au public. L'analyse et l'interprétation des données sont toujours en cours en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des données, y compris les essais géotechniques supplémentaires tels que les essais statiques et dynamiques de charge de plaque et les essais PANDA, sera mis à la disposition du public dans deux ans (Yaba et al., 2025). Cet ensemble de données constituera une ressource précieuse pour mieux comprendre les effets de la stabilisation par géogrille et servira de base solide pour la modélisation numérique. Cependant, certains résultats préliminaires sont présentés ici pour l'Essai 1 (sans géogrille), non pas dans l'objectif d'une analyse détaillée du comportement de la plate-forme ferroviaire, mais plutôt afin de démontrer l'efficacité de l'instrumentation mise en place pour capter ce comportement.

La Figure 7.5 illustre une accumulation progressive de tassements en surface au niveau du dispositif de chargement au fil des cycles répétés, avec une accumulation plus marquée au début de l'essai.

Les données issues du système DFOS, installé horizontalement dans la sous-couche, montrent la réactivité de l'instrumentation vis-à-vis du chargement, comme le présente la Figure 7.6. Les résultats mettent en évidence des déformations en traction sous les blocs de traverses et des

déformations en compression dans les zones latérales adjacentes. Cette distribution des déformations est cohérente avec les observations de Perkins (1999) et Yaba et al. (2022a).

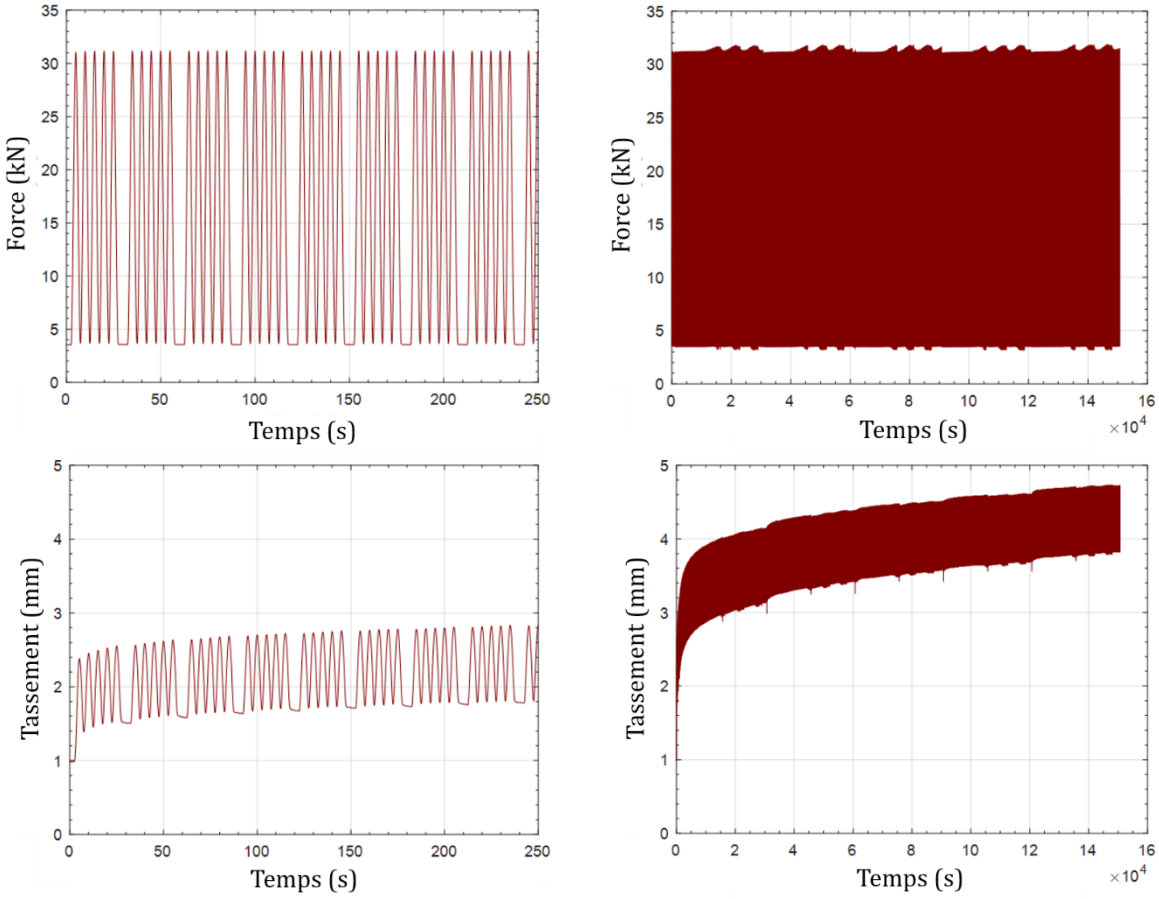


Figure 7.5. Evolution de la force appliquée et du déplacement vertical correspondant pendant les cycles initiaux (a) et pendant toute la durée (b) de l'essai 1 (sans géogrille).

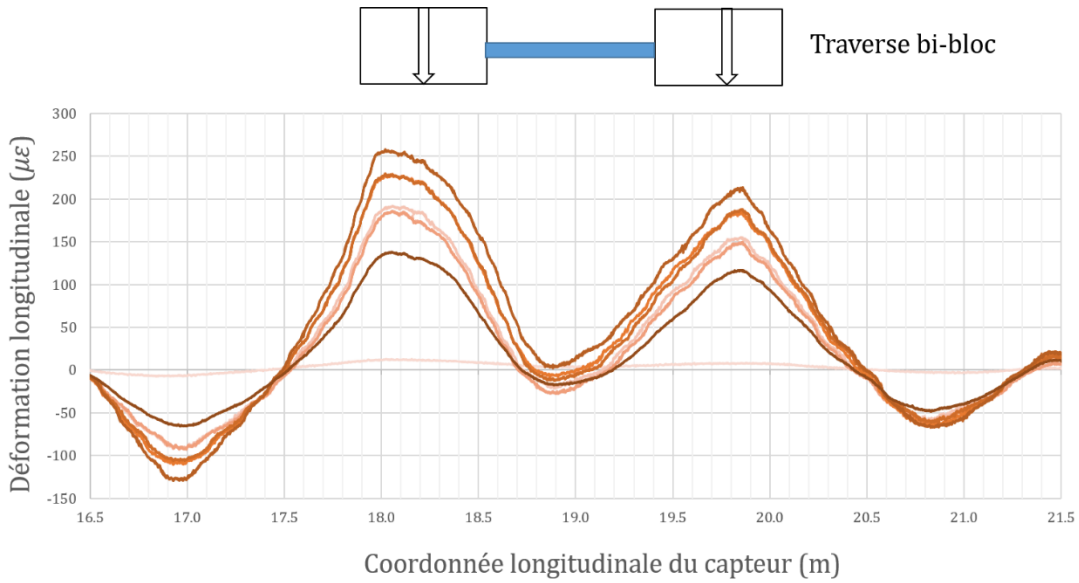


Figure 7.6. Répartition des déformations dans le DFOS sous la traverse, à différents stades de chargement cyclique pendant l'essai 1 (sans géogrille).

7.2.3.5 *Synthèse*

La campagne expérimentale à grande échelle visait à analyser l'efficacité du renforcement par géogrille dans une configuration réaliste de plate-forme ferroviaire soumise à un chargement cyclique représentatif du trafic régional. En mobilisant une configuration en vraie grandeur et des matériaux conformes aux conditions de terrain, le projet a permis de dépasser les limites habituelles des essais à échelle réduite en laboratoire. La comparaison entre les deux essais — l'un avec géogrille et l'autre sans — doit permettre de mettre en évidence le rôle de la géogrille dans la réduction des déplacements verticaux et la redistribution des contraintes au sein de la sous-structure, ainsi que d'évaluer son potentiel de stabilisation dans des sols de capacité portante faible à modérée.

Par ailleurs, le recours à un système d'instrumentation étendu et innovant, incluant des capteurs à fibre optique distribuée (DFOS), offre un niveau d'analyse inédit de la mécanique interne du système renforcé. Cette richesse de données à haute résolution permet une compréhension approfondie de l'interaction entre la géogrille et le sol environnant, et constitue une référence précieuse pour les futurs travaux de modélisation numérique et d'optimisation des conceptions.

Références

Aboul Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., & Chareyre, B. (2017). Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction. *Granular Matter*, *19*(4), 4. https://doi.org/10.1007/s10035-016-0687-0

Abu-Farsakh, M. Y., & Chen, Q. (2011). Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. *International Journal of Pavement Engineering*, *12*(3), 275-288. https://doi.org/10.1080/10298436.2010.549565

AFNOR. (1996). *NF P 94-056 : Sols—Reconnaissance et essais—Analyse granulométrique—Méthode par tamisage à sec après lavage*. AFNOR. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p94-056/soil-investigation-and-testing-granulometric-analysis-dry-sieving-method-af/fa026936/11075

Ahmadi, M. S., & Moghadam, P. N. (2017). *Effect of Geogrid Aperture Size and Soil Particle Size on Geogrid-Soil Interaction under Pull-Out Loading*. *5*(1).

Ando, E. (2013). *Experimental investigation of microstructural changes in deforming granular media using x-ray tomography* [Phdthesis, Université de Grenoble]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01144326

Bender, D. A., & Barenberg, E. J. (1978). DESIGN AND BEHAVIOR OF SOIL-FABRIC-AGGREGATE SYSTEMS. *Transportation Research Record*, *671*. https://trid.trb.org/view/86128

Beroya-Eitner, M. A., Machaček, J., Viggiani, G., Dastider, A. G., Thorel, L., Korre, E., Agalianos, A., Jafarian, Y., Zwanenburg, C., Lenart, S., Wang, H., Zachert, H., Stanier, S., & Liaudat, J. (2024). *GEOLAB Material Properties Database [Data set]*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.12697903

Beucher, S. (1979). Use of watersheds in contour detection. *Proc. Int. Workshop on Image Processing, Sept. 1979*, 17-21.

Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, *36*(1), 65-78. https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.1.65

Bonaparte, R., & Christopher, B. R. (1987). DESIGN AND CONSTRUCTION OF REINFORCED EMBANKMENTS OVER WEAK FOUNDATIONS. *Transportation Research Record*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107961426

Bourrier, F., Kneib, F., Chareyre, B., & Fourcaud, T. (2013). Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering*, *61*, 646-657. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.05.002

Brecciaroli, F., & Kolisoja, P. (2006). *Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading : Literature review*. Ratahallintokeskus. https://www.doria.fi/handle/10024/146386

Brown, S. F., Kwan, J., & Thom, N. H. (2007). Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, *25*(6), 326-335. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.06.003

Chareyre, B. (2015). Yade-DEM:(not so) recent advances and steps toward multiphase couplings. *Grenoble Geomechanics Group*, 299.

Chareyre, B., & Villard, P. (2002). *Discrete element modeling of curved geosynthetic anchorages with known macro-properties.* 197-203.

Chareyre, B., & Villard, P. (2005). Dynamic Spar Elements and Discrete Element Methods in Two Dimensions for the Modeling of Soil-Inclusion Problems. *Journal of Engineering Mechanics*, *131*(7), 689-698. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:7(689)

Chen, C., McDowell, G. R., & Thom, N. H. (2014). Investigating geogrid-reinforced ballast : Experimental pull-out tests and discrete element modelling. *Soils and Foundations*, *54*(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.001

Chen, C., McDowell, G., & Rui, R. (2018). Discrete element modelling of geogrids with square and triangular apertures. *Geomechanics and Geoengineering*, *16*, 495-501. https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.5.495

Cho, G.-C., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength : Natural and crushed sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *132*(5), 591-602.

Christopher, B. R., Schwartz, C. W., Boudreaux, R., & Ryan R. Berg & Associates, Inc. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements* (No. FHWA-NHI-05-037). https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40767

Cundall, P. A. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, *25*(3), 107-116.

Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, *29*(1), 47-65.

Das, B. M. (2016). Use of geogrid in the construction of railroads. *Innovative Infrastructure Solutions*, *1*(1), 15. https://doi.org/10.1007/s41062-016-0017-8

De Borst, R., & Vermeer, P. (1984). Possibilites and limitations of finite elements for limit analysis. *Geotechnique*, *34*(2), 199-210.

Deiros Quintanilla, I. (2018). *Multi-scale study of the degradation of railway ballast* [These de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE)]. http://www.theses.fr/2018GREAI025

Effeindzourou, A., Chareyre, B., Thoeni, K., Giacomini, A., & Kneib, F. (2016). Modelling of deformable structures in the general framework of the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, *44*(2), 143-156. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.015

GDR MiDi. (2004). On dense granular flows. *The European Physical Journal E*, *14*(4), 341-365. https://doi.org/10.1140/epje/i2003-10153-0

Gu, F. (2015). *Characterization and performance prediction of unbound granular bases with and without geogrids in flexible pavements* [PhD Thesis].

Haas, R., Walls, J., & Carroll, R. (1988a). Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements. *Transportation research record*, *1188*(1), 19-27.

Haas, R., Walls, J., & Carroll, R. G. (1988b). Geogrid reinforcement of granular bases in flexible pavements. *Transportation Research Record*, *1188*(1), 19-27.

Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., & Huang, B. (2018). Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aggregate-geogrid interface. *Construction and Building Materials*, *158*, 1015-1025. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.045

Hubbell, J. H. (1996). Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. *http://physics. nist. gov/PhysRefData/XrayMassCoef/*.

Hussaini, S. (2013). An experimental study on the deformation behaviour of geosynthetically reinforced ballast. *University of Wollongong Thesis Collection 1954-2016*. https://ro.uow.edu.au/theses/3799

Indraratna, B., Oliveira, D., & Brown, E. (2010). A shear-displacement criterion for soil-infilled rock discontinuities. *Géotechnique*, *60*(8), 623-633.

Indraratna, B., & Salim, W. (2003). Deformation and degradation mechanics of recycled ballast stabilised with geosynthetics. *Soils and foundations*, *43*(4), 35-46.

Iwashita, K., & Oda, M. (2000). Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method. *Powder Technology*, *109*(1), 192-205. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00236-3

Jewell, R., Milligan, G., & Dubois, D. (1984). Interaction between soil and geogrids. In *Polymer grid reinforcement* (p. 18-30). Thomas Telford Publishing.

Knighton, J. T. (2015). *Investigation of laboratory test procedures for assessing the structural capacity of geogrid-reinforced aggregate base materials*. Brigham Young University.

Konietzky, H., te Kamp, L., Groeger, T., & Jenner, C. (2004). Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading. *Numerical modeling in micromechanics via particle methods*, *3*, 12.

Kozicki, J., & Donze, F. V. (2008). A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *197*(49-50), 4429-4443.

Kwan, C. C. J. (2006). *Geogrid reinforcement of railway ballast* [PhD Thesis]. University of Nottingham Nottingham, UK.

Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils* (1st éd.). John Wiley & Sons, Ltd.

Li, X., Yu, H. S., & Li, X. S. (2009). Macro–micro relations in granular mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, *46*(25-26), 4331-4341. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.09.001

Liu, Y., Gao, R., & Chen, J. (2021). A new DEM model to simulate the abrasion behavior of irregularly-shaped coarse granular aggregates. *Granular matter*, *23*(3).

Love, J., & Love, J. (1984). *Model testing of geogrids in unpaved roads* [PhD Thesis]. University of Oxford.

Lu, M., & McDowell, G. (2007). The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. *Granular matter*, *9*(1), 69-80.

Matsushima, T., & Saomoto, H. (2002). Discrete element modeling for irregularly Y-shaped sand grains. *NUMGE 2002. 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 239-246.

Moravia, M. G. (2020). *Geogrid-reinforced layer approach using DEM modeling* [Phdthesis, Université Grenoble Alpes [2020-....] ; Instituto tecnólogico de aeronáutica (São José dos Campos, Brésil)]. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02926970

Mulabdic, M., Minažek, K., & Kaluđer, J. (2018). *Geogrids—What is important*. 215-221. https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2018.934

Nazzal, M. D. (2007). *Laboratory characterization and numerical modeling of geogrid reinforced bases in flexible pavements*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.

NF P 94-074. (1994). *Sols : Reconnaissance et essais—Essais à l'appareil triaxial de révolution—Appareillage, Préparation des éprouvettes, Essai (UU) non consolidé non drainé, Essai (CU+u) consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle, Essai (CD) consolidé drainé*. AFNOR.

Otsu, N. & others. (1975). A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, *11*(285-296), 23-27.

Palmeira, E. M., & Góngora, I. A. G. (2015). Assessing the Influence of Some Soil–Reinforcement Interaction Parameters on the Performance of a Low Fill on Compressible Subgrade. Part I : Fill Performance and Relevance of Interaction Parameters. *International Journal of*

Geosynthetics and Ground Engineering, *2*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s40891-015-0041-3

Perkins, S. W. (1999). *Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements : Laboratory Based Pavement Test Sections* (No. FHWA/MT-99-001/8138). https://doi.org/10.21949/1518204

Perkins, S. W., Christopher, B. R., Cuelho, E., Eiksund, G., Hoff, I., Schwartz, C., Svanø, G., & Watn, A. (2004). Development of design methods for geosynthetic reinforced flexible pavements. *Final Report, Montana State University, MT*.

Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *41*(8), 1329-1364. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011

Qian, Y., Han, J., Pokharel, S. K., & Parsons, R. L. (2013). Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *25*(8), 1013-1021.

Qian, Y., Lee, S. J., Tutumluer, E., Hashash, Y. M., & Ghaboussi, J. (2018). Role of initial particle arrangement in ballast mechanical behavior. *International Journal of Geomechanics*, *18*(3), 04017158.

Radjaï, F., & Dubois, F. (2011). *Discrete-element Modeling of Granular Materials*. Wiley-ISTE.

Rahman, M. A., Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., & Imteaz, M. A. (2014). Resilient Modulus and Permanent Deformation Responses of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *26*(3), 512-519. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000824

Rakowski, Z. (2017). An attempt of the synthesis of recent knowledge about mechanisms involved in stabilization function of geogrids in infrastructure constructions. *Procedia Engineering*, *189*, 166-173. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.027

Rebellato, J. (2020). *Miroirs interférentiels efficaces dans l'extrême ultraviolet pour la physique solaire* [PhD Thesis]. Université Paris-Saclay.

Rowe, P. W. (1962). The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, *269*(1339), 500-527.

Sadeghi, J. M., & Youldashkhan, M. (2005). Investigation on the accuracy of the current practices in analysis of railway track concrete sleepers. *International Journal of Civil Engineering*, *3*(2), 111-120.

Salot, C., Gotteland, P., & Villard, P. (2009). Influence of relative density on granular materials behavior : DEM simulations of triaxial tests. *Granular matter*, *11*(4), 221-236.

Santamarina, J. C., & Cho, G.-C. (2004). Soil behaviour : The role of particle shape. *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004*, 604-617.

Schneider, H. R., & Holtz, R. D. (1986). Design of slopes reinforced with geotextiles and geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, *3*(1), 29-51. https://doi.org/10.1016/0266-1144(86)90013-0

Schuettpelz, C., Fratta, D., & Edil, T. B. (2009). Evaluation of the Zone of Influence and Stiffness Improvement from Geogrid Reinforcement in Granular Materials. *Transportation Research Record*, *2116*(1), 76-84. https://doi.org/10.3141/2116-11

Shin, E., Kim, D., Das, B., & Lee, K. (2001). Stress distribution in reclaimed land under a geogrid-reinforced granular pad. *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*, ISOPE-I.

Sibille, L., Villard, P., Darve, F., & Hosn, R. A. (2019). Quantitative prediction of discrete element models on complex loading paths. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, *43*(5), 858-887. https://doi.org/10.1002/nag.2879

Smilauer, V., Angelidakis, V., Catalano, E., Caulk, R., Chareyre, B., Chıfmmode\gravee\elseè\fivremont, W., Dorofeenko, S., Duriez, J., Dyck, N., Elias, J., Er, B., Eulitz, A., Gladky, A., Guo, N., Jakob, C., Kneib, F., Kozicki, J., Marzougui, D., Maurin, R., … Yuan, C. (2021). Yade Documentation (3rd edition). *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.5705394

Stamati, O., Andò, E., Roubin, E., Cailletaud, R., Wiebicke, M., Pinzon, G., Couture, C., Hurley, R. C., Caulk, R., Caillerie, D., Matsushima, T., Bésuelle, P., Bertoni, F., Arnaud, T., Laborin, A. O., Rorato, R., Sun, Y., Tengattini, A., Okubadejo, O., … Birmpilis, G. (2020). `spam` : Software for Practical Analysis of Materials. *Journal of Open Source Software*, *5*(51), 2286. https://doi.org/10.21105/joss.02286

Suhr, B., & Six, K. (2020). Simple particle shapes for DEM simulations of railway ballast : Influence of shape descriptors on packing behaviour. *Granular Matter*, *22*(2), 43. https://doi.org/10.1007/s10035-020-1009-0

Tran, V., Meguid, M., & Chouinard, L. (2013). A finite–discrete element framework for the 3D modeling of geogrid–soil interaction under pullout loading conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, *37*, 1-9.

Villard, P., Chevalier, B., Le Hello, B., & Combe, G. (2009). Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetic. *Computers and Geotechnics*, *36*(5), 709-717. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.11.005

Vo, N. T., Atwood, R. C., & Drakopoulos, M. (2018). Superior techniques for eliminating ring artifacts in X-ray micro-tomography. *Opt. Express*, *26*(22), 28396-28412. https://doi.org/10.1364/OE.26.028396

Wiebicke, M. (2020). *Analyse expérimentale de l'évolution de la microstructure des sols granulaires lors de charges monotones et d'inversions de charges* [PhD Thesis]. Université Grenoble Alpes.

Yaba, O. (2022a). *Amélioration des plateformes ferroviaires par géogrilles—Analyse du fonctionnement, de la limitation des déformations et du gain de portance* [These de doctorat, Université Grenoble Alpes]. https://www.theses.fr/2022GRALI050

Yaba, O. (2022b). *Improvement of Railway Trackbeds using Geogrids-Analysis of Mechanical Behavior, Settlement Reduction and Increase in Effective Bearing Capacity* [PhD Thesis]. Université Grenoble Alpes [2020-....].

Yaba, O., Liaudat, J., Kochnev, A., Ayoubi, A. E., Jenck, O., Emeriault, F., Vollmert, L., Szymkiewicz, F., & Zachert, H. (2025). *GEOLAB - Transnational Access Project CyLo-RT: Cyclic loading of railway trackbeds with and without geogrid stabilisation [Data set]*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.15422965

Zingg, T. (1935). *Beitrag zur schotteranalyse* [PhD Thesis]. ETH Zurich.

A Annexes

A.1 Structure et fonctionnement du logiciel YADE

A.1.1 Structure et méthodologie

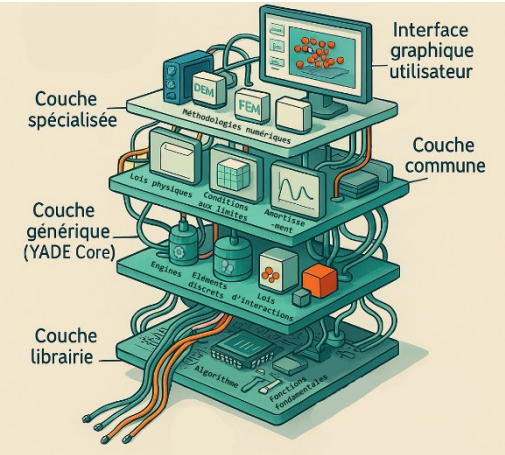


Figure A.1. Représentation de la structure hiérarchique des cinq couches de l'environnement YADE.

L'architecture de YADE est organisée selon une structure hiérarchique en 5 couches, où chaque couche encapsule des fonctionnalités spécifiques et peut dépendre des fonctionnalités fournies par les couches inférieures (Figure A.1). Une représentation simplifiée de la structure de YADE a été fournie par Moravia (2020) :

a. *Couche librairie :* À la base de l'architecture se trouve la couche librairie. Ce niveau fondamental fournit un ensemble de fonctions et de méthodes fondamentales qui sont rendues accessibles au reste du système. Elle agit comme le noyau de calcul et d'algorithme sur lequel sont construites les opérations de la couche supérieure.
b. *Couche générique (YADE Core) :* Située directement au-dessus de la couche librairie, la couche générique constitue le noyau central de YADE. Elle définit les principales interfaces nécessaires aux tâches de simulation, y compris les moteurs « Engines », les éléments discrets (ou corps) et les lois d'interaction régissant leur comportement. Cette couche permet essentiellement de définir et d'exécuter des simulations en offrant des blocs de construction essentiels.
c. *Couche commune :* Cette couche contient des composants qui sont largement applicables à différents types de simulation. Elle comprend des lois physiques (par exemple, la mécanique newtonienne, l'élasticité de Hooke), des schémas d'intégration numérique, des formulations d'amortissement, des algorithmes de détection des collisions et des définitions de conditions aux limites (par exemple, déplacements imposés, gravité). De plus, il fournit des utilitaires pour générer des géométries communes et traiter les données relatives aux particules et aux interactions.
d. *Couche spécialisée :* Au-dessus de la couche commune se trouve la couche spécialisée, qui contient des ensembles de codes adaptés à des méthodologies numériques spécifiques. Ces paquets sont modulaires et prennent en charge plusieurs approches, telles que la DEM et la FEM. Cette séparation permet aux utilisateurs de cibler des besoins de modélisation spécifiques sans modifier l'infrastructure commune sous-jacente.

e. *Couche de l'interface utilisateur graphique (GUI) :* Au sommet de la hiérarchie se trouve la couche d'interface utilisateur graphique. Cette couche facilite l'interaction de l'utilisateur avec l'environnement de simulation grâce à des outils de visualisation et des commandes conviviales. Elle constitue un point d'entrée plus accessible pour la configuration, l'exécution et la surveillance du modèle, en particulier pour les utilisateurs moins familiarisés avec les cadres de simulation basés sur le code.

Dans YADE, les simulations DEM sont structurées comme des processus itératifs qui progressent à travers une série de pas de temps. Chaque boucle de la simulation opère sur deux types de composants :

- *Composants de données :*
  Il s'agit d'objets qui stockent les propriétés physiques et géométriques du système :
  - **Corps discrets :** Ce sont les particules de la simulation. Chacune d'entre elles est caractérisée par : Forme « Shape » (forme géométrique, telle qu'une sphère ou un mur), Matériau « Material » (propriétés mécaniques telles que la densité et le module de contact, indépendantes de la forme et pouvant être partagées entre différents éléments), État « State » (informations dynamiques telles que la position, la vitesse, l'accélération et la rotation, mises à jour à chaque pas de temps), Délimitation « Bound » (représentation spatiale simplifiée utilisée pour la détection du contact initial).
  - **Interactions :** Contacts entre paires d'éléments. Chaque interaction comprend « IGeom » (description géométrique du contact, basée sur la forme des corps en interaction), « IPhys » (propriétés physiques du contact, telles que la rigidité ou la friction, généralement calculées en utilisant les propriétés moyennes des deux corps en contact).
  - **Forces généralisées :** Un vecteur qui contient les forces et les couples totaux agissant sur chaque élément au cours d'un pas de temps, y compris les forces de contact et les forces externes.

- *Composants de fonction :*
  Ces composants effectuent les calculs nécessaires à la mise à jour de l'état de la simulation. Un concept clé ici est le répartiteur « dispatcher », qui n'est pas une fonction en soi mais agit comme un contrôleur qui sélectionne et active les fonctions appropriées en fonction des types d'objets impliqués. Par exemple, si un contact est détecté entre une sphère et un mur, le répartiteur appelle le foncteur spécifique qui calcule l'IGeom et l'IPhys pour cette configuration de contact.

À chaque boucle, une séquence d'actions, définie par des moteurs, est exécutée pour simuler le comportement mécanique d'un système de particules discrètes. La Figure A.2 présente une boucle de simulation typique utilisée dans YADE. Chaque pas de temps de la simulation suit ce processus général :

1. *Réinitialisation de la force :* À partir du deuxième cycle, toutes les forces et tous les couples agissant sur les particules sont réinitialisés au début du cycle.
2. *Détection des interactions :* La simulation vérifie les contacts potentiels entre les éléments. Chaque interaction potentielle est classée en fonction des types d'éléments impliqués (par exemple, sphère-sphère, sphère-paroi).
3. *Résolution des contacts géométriques :* La simulation calcule précisément si les éléments sont en contact et identifie les caractéristiques géométriques de ce contact.
4. *Conditions aux limites :* Les conditions externes, telles que la gravité ou les déplacements imposés, sont appliquées.

5. *Calcul des forces :* Les forces de contact entre les particules en interaction sont calculées à l'aide de lois physiques et de modèles de contact.
   Intégration du mouvement : Les positions et les vitesses des particules sont mises à jour sur la base des forces et des couples agissant sur chaque particule, en intégrant numériquement les équations du mouvement de Newton.

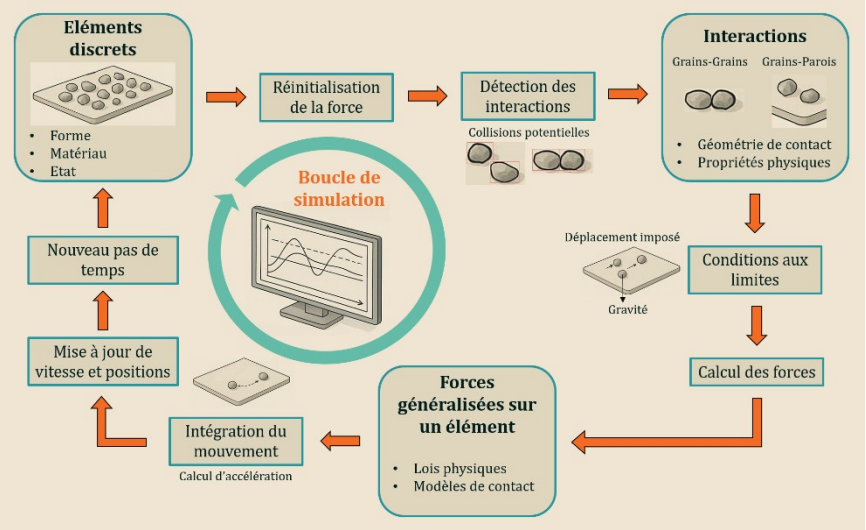


Figure A.2. Schéma du cycle typique d'une simulation DEM dans YADE.

Cette structure, basée sur des données et des composants de fonction bien définis, permet à YADE de simuler des systèmes discrets complexes avec un niveau de détail et de contrôle élevé, ce qui le rend particulièrement adapté à l'étude du comportement micromécanique des matériaux granulaires.

A.1.2 Pas de temps critique

Dans les simulations DEM, le choix d'un pas de temps approprié est crucial, car des pas de temps excessivement grands peuvent conduire à l'instabilité et à un comportement irréaliste, tandis que des pas de temps très petits augmentent le coût de calcul sans améliorer de manière significative la précision.

Par conséquent, le pas de temps critique (Δt_{cr}) est un paramètre fondamental qui garantit la stabilité et la précision numériques. Il représente l'incrément de temps maximal admissible (Δt) pour lequel l'intégration des équations de mouvement reste stable pendant la simulation. Le pas de temps critique est étroitement lié à la fréquence naturelle la plus élevée du système ω_{max}, généralement régie par les propriétés des contacts les plus rigides entre les éléments. Dans un système général masse-ressort, pour les interactions élastiques linéaires, il est calculé sur la base des propriétés des matériaux et des conditions de contact à l'aide de l'équation (53) :

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{max}} = \min \sqrt{2} \cdot \sqrt{M \cdot K^{-1}} \tag{53}$$

Où M et K sont les matrices de masse et de rigidité généralisées (qui dépendent de la rigidité des interactions de chaque élément). Le choix d'un pas de temps inférieur à cette valeur critique garantit que les interactions dynamiques sont résolues avec précision, évitant ainsi toute divergence numérique.

Le moteur « yade.wrapper.GlobalStiffnessTimeStepper() » de YADE simplifie cette approche en ne considérant que les termes de translation de la matrice de rigidité. Il définit le pas de temps de

la simulation comme une fraction de la période propre minimale du système, garantissant ainsi la stabilité numérique. Le calcul du pas de temps repose sur deux paramètres essentiels :

- timeStepUpdateInterval : Spécifie la fréquence à laquelle le pas de temps est recalculé au cours de la simulation.
- timestepSafetyCoefficient : Coefficient de sécurité « s_t » appliqué à la période propre minimale afin de déterminer le pas de temps final. Ce coefficient, nécessairement inférieur à 1, permet de réduire le pas de temps critique $\Delta t_{cr,mod}$ (équation (54)) afin d'éviter toute instabilité numérique.

$$\Delta t_{cr,mod} = s_t \cdot \Delta t_{cr} \tag{54}$$

Cependant, les utilisateurs doivent toujours s'assurer que le pas de temps choisi capture avec précision la dynamique de leur système spécifique, en particulier dans les simulations impliquant une rigidité élevée, des particules de petite taille ou des taux de chargement rapides (voir la section 4.4.3.2). Dans les cas où il n'y a pas de contacts entre les éléments, la fréquence propre maximale du système est nulle (c'est-à-dire $\omega_{max} = 0$), ce qui entraîne un pas de temps critique infini. Ainsi, pour éviter les erreurs numériques dans ces conditions, le moteur GlobalStiffnessTimeStepper estime la rigidité sur la base des interactions futures potentielles (Šmilauer et al., 2015a).

A.1.1 Amortissement numérique

Dans les simulations par la méthode des éléments discrets (DEM), l'amortissement numérique joue un rôle essentiel dans la stabilisation du système et la dissipation de l'énergie indésirable, en particulier lors de simulations quasi-statiques ou fortement dynamiques où la dissipation naturelle de l'énergie est souvent insuffisante pour assurer la stabilité. Cette approche est particulièrement importante lors de la simulation des forces de contact qui impliquent intrinsèquement une dissipation d'énergie, telles que les interactions frictionnelles ou inélastiques.

YADE implémente l'amortissement numérique additionnel à travers le moteur « yade.wrapper.NewtonIntegrator() ». Ce moteur est utilisé pour intégrer les équations du mouvement newtonien. Il permet de contrôler plusieurs paramètres essentiels à la simulation, notamment la gravité et l'amortissement. La gravité est définie via le paramètre « NewtonIntegrator.gravity », tandis que l'amortissement est réglé à l'aide du coefficient d'amortissement « NewtonIntegrator.damping », qui contrôle l'étendue de l'amortissement appliquée aux vitesses des particules. Cependant, cette méthode n'est pas sans limites, car elle introduit un aspect non physique dans la simulation en modifiant les forces et les vitesses des particules en fonction de leurs directions de mouvement relatives.

Cet amortissement numérique artificiel est appliqué sous la forme d'une force proportionnelle à la vitesse de la particule, dans le but de réduire les composantes des forces qui augmentent la vitesse des particules. Cette formulation (équation (55)) est basée sur l'approche initialement décrite par :

$$\frac{(\Delta F)_{d\omega}}{F_\omega} = -\lambda_d \, sgn\, F_\omega \left(\dot{u}_\omega^{\ominus} + \frac{\ddot{u}_\omega^0 \, \Delta t}{2} \right) \cong -\lambda_d \, sgn(F_\omega \dot{u}_\omega^0) \, , \omega \in \{x, y, z\} \tag{55}$$

Où $(\Delta F)_{d\omega}$ est la composante de réduction de la force, F_ω est la composante de la force agissante sur l'élément, λ_d est le coefficient d'amortissement adimensionnel, $\dot{u}_\omega^{\ominus}$ est la composante de la vitesse de l'élément définie au point de mi-étape de l'étape précédente (c'est-à-dire $t - \Delta t/2$), $\ddot{u}_\omega^0$

est la composante de l'accélération de l'élément au pas de temps de calcul actuel et $\dot{u}_{\omega}^{0}$ est la composante de la vitesse de l'élément au pas de temps de calcul actuel.

L'amortissement agit directement sur les forces (ou de manière équivalente sur les accélérations), sans contraindre le mouvement uniforme des particules. Cela garantit que les particules peuvent continuer à se déplacer naturellement pendant que l'énergie se dissipe avec le temps. L'amortissement est indépendant des fréquences propres des particules ou des contacts. Par conséquent, toutes les particules sont amorties de la même manière, indépendamment de leur rigidité, de leur taille ou de leur fréquence propre. Cela simplifie la mise en œuvre et garantit une dissipation uniforme de l'énergie dans l'ensemble du système.

Le coefficient d'amortissement est un paramètre adimensionnel, compris entre zéro (pas d'amortissement) et un (pas d'accélération), qui définit la quantité d'énergie dissipée par unité de vitesse. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à une mise à l'échelle complexe du coefficient d'amortissement en fonction des propriétés des matériaux ou de la taille du système, ce qui rend le paramètre facile à configurer. Bien que l'implémentation de l'amortissement dans YADE soit robuste, les utilisateurs doivent choisir soigneusement le coefficient d'amortissement en fonction des objectifs de la simulation. Dans les simulations quasi-statiques, un coefficient d'amortissement plus élevé peut-être utilisé pour accélérer la convergence vers un état stable. Inversement, dans les simulations dynamiques, un amortissement excessif peut perturber les mécanismes d'interactions entre les particules, réduisant ainsi la fiabilité des résultats. Pour relever ces défis, YADE fournit un cadre flexible dans lequel l'amortissement peut être ajusté et vérifié en fonction des exigences spécifiques de la simulation.

En conclusion, l'amortissement numérique dans YADE fournit un moyen pratique et efficace de stabiliser les simulations DEM, garantissant des résultats précis et fiables. Cependant, les utilisateurs doivent soigneusement ajuster les paramètres d'amortissement pour répondre à leurs besoins spécifiques de simulation, en équilibrant la stabilité avec le réalisme de la dynamique des particules. Dans cette étude, son paramétrage joue un rôle clé pour assurer une convergence rapide tout en préservant la dynamique des interactions entre les grains et la géogrille. Ainsi, les valeurs retenues ont été calibrées de manière à maintenir un équilibre optimal entre stabilité numérique et fidélité du comportement mécanique simulé (voir section 4.4.3.2).

A.1.3 Détection de collision

Un algorithme de détection de contact est une méthode de calcul utilisée pour identifier et gérer les interactions entre des éléments discrets au sein d'une simulation. L'algorithme détecte le moment où deux éléments ou plus entrent en contact, ce qui est crucial pour le calcul des forces et des mouvements ultérieurs dans le système. Il s'agit généralement de déterminer si les éléments se chevauchent ou sont suffisamment proches pour exercer une influence l'un sur l'autre, puis d'établir une nouvelle interaction ou de mettre à jour les propriétés d'une interaction existante sur la base du contact détecté. La précision et l'efficacité de cet algorithme sont essentielles pour la performance et la fiabilité globales de la simulation.

YADE utilise un algorithme performant de recherche de voisins, tel que les listes de Verlet, pour identifier les contacts potentiels entre les éléments. Cette approche divise le domaine de simulation en cellules discrètes, ce qui permet à l'algorithme de concentrer les vérifications d'interaction uniquement dans les cellules voisines et de réduire ainsi les coûts de calcul. Chaque élément est associé à un rayon d'interaction, qui détermine la distance à partir de laquelle l'élément peut interagir avec d'autres éléments. Ce paramètre est crucial notamment pour capturer avec précision les interactions locales dans la structure.

YADE, par le biais de la classe « yade.wrapper.InsertionSortCollider() », utilise l'algorithme Sweep-And-Prune « SAP » pour détecter les collisions entre éléments discrets de différentes formes (Smilauer et al., 2015a). Cet algorithme utilise des boîtes de délimitation alignées sur les axes (Axis-aligned bounding box « Aabb ») pour détecter les chevauchements, qui se produisent si et seulement si les boîtes se croisent le long de tous les axes. La création d'Aabb pour différentes formes de particules, telles que les sphères, les facettes et les murs, est simple et gérée par des classes appropriées.

Le processus de détection des collisions est scindé en deux étapes pour améliorer l'efficacité des calculs : la détection des collisions potentielles et la détection des collisions exactes. Pour définir ces deux étapes, considérons une paire générique de corps discrets, dont les formes géométriques sont représentées par les ensembles de points P_i et P_j. Leurs espaces géométriques moins raffinés représentent les limites de YADE (Bounding Volume incluant le volume de toute particule depuis l'extérieur), $\widetilde{P_i}$ et $\widetilde{P_j}$.

1. Détection rapide des collisions : Cette étape initiale utilise les prédicats $\widetilde{P_i}$ et $\widetilde{P_j}$ pour identifier rapidement les collisions potentielles. Une caractérisation approximative de l'espace occupé par les éléments et la formulation de l'équation (56) définissent ces ensembles de points.

$$\forall\, x \in \mathbb{R}^3 : x \in P_n \Rightarrow\ x \in \widetilde{P_n}\ ; n \in \{i, j\} \tag{56}$$

   Ces prédicats approximatifs suivent les implications des équations (57) et (58) :

$$(P_i \cap P_j) \neq 0 \Rightarrow (\widetilde{P_i} \cap \widetilde{P_j}) \neq 0 \tag{57}$$

$$(\widetilde{P_i} \cap \widetilde{P_j}) = 0 \Rightarrow (P_i \cap P_j) = 0 \tag{58}$$

2. Détection exacte des collisions : Après avoir filtré les cas où les collisions ne peuvent pas se produire (c'est-à-dire selon l'équation (58)), l'algorithme effectue un contrôle des collisions plus détaillé et plus intensif en termes de calcul. Cette deuxième étape affine les collisions potentielles en utilisant la condition décrite dans l'équation (59) pour déterminer les collisions réelles, en filtrant les collisions fictives.

$$(\widetilde{P_i} \cap \widetilde{P_j}) \neq 0 \wedge (P_i \cap P_j) = 0 \tag{59}$$

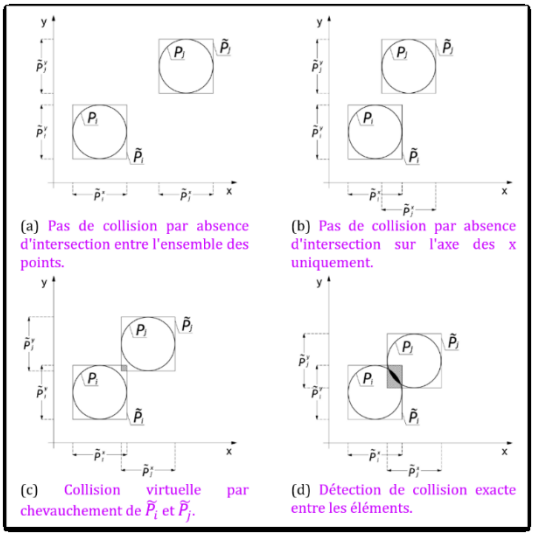


Figure A.3. Exemple d'algorithme Sweep-And-Prune « SAP » impliquant les scénarios de détection de collision bidimensionnels (de Moravia (2020), adapté de Smilauer et al. (2015a)).

Moravia (2020) a illustré les scénarios possibles de la procédure décrite dans un exemple bidimensionnel adapté de Smilauer et al. (2015a), comme le montre la Figure A.3. Dans cet exemple, deux disques sont représentés par les ensembles de points P_i et P_j, leurs volumes limites moins raffinés étant représentés par des carrés circonscrits $\widetilde{P}_i$ et $\widetilde{P}_j$. Il n'y a collision que si la représentation géométrique des éléments se chevauche sur tous les axes (c'est-à-dire collisions potentielles pour l'intersection de $\widetilde{P}_i$ et $\widetilde{P}_j$, et collisions exactes pour l'intersection de P_i et P_j). Par exemple, la Figure A.3.b montre un chevauchement uniquement sur l'axe des x, ce qui indique qu'il n'y a pas de collision réelle. Dans la Figure A.3.c, l'étape de détection rapide identifie une collision potentielle en raison du chevauchement de $\widetilde{P}_i$ et $\widetilde{P}_j$; cependant, les points qui représentent précisément la géométrie des éléments ne se chevauchent pas (c'est-à-dire, $P_i \cap P_j = 0$).

A.2 Projet CyLo RT

Cette section rassemble toutes les photos illustratives de la structure des essais, des matériaux, de l'instrumentation détaillée, de la préparation du modèle et des essais géotechniques réalisés sur les couches de sol.

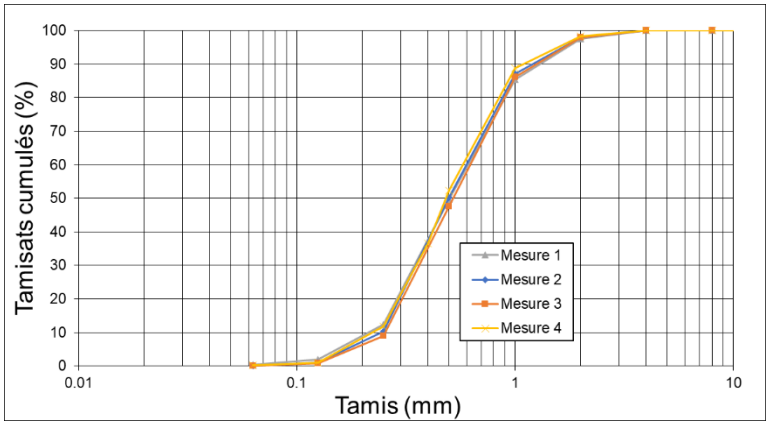


Figure A.4. Distribution granulométrique du sable de Darmstadt (adaptée de Beroya-Eitner et al., 2024).



Figure A.5. Mise en place de sous-couches de sable et répartition uniforme sans compactage.



Figure A.6. Couche de granulats de pneu.

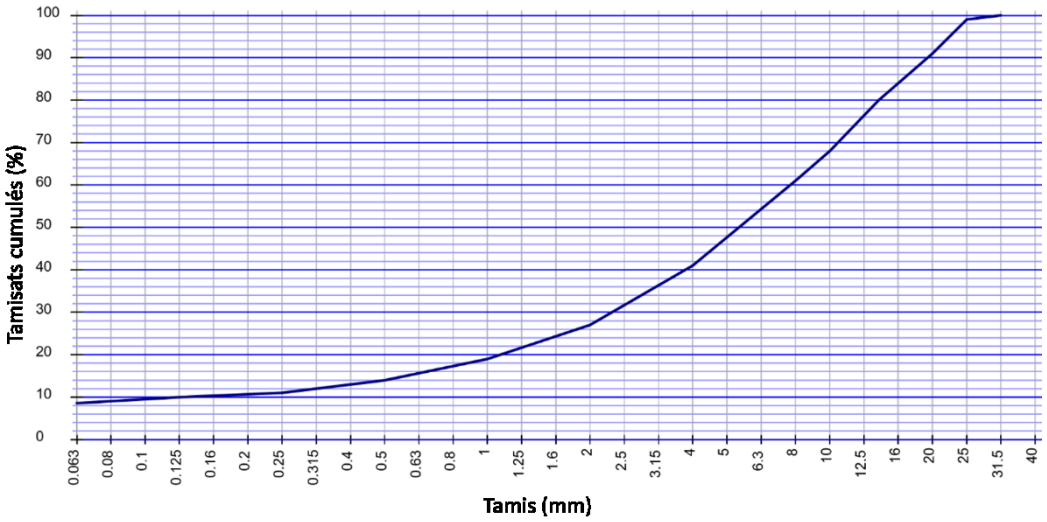
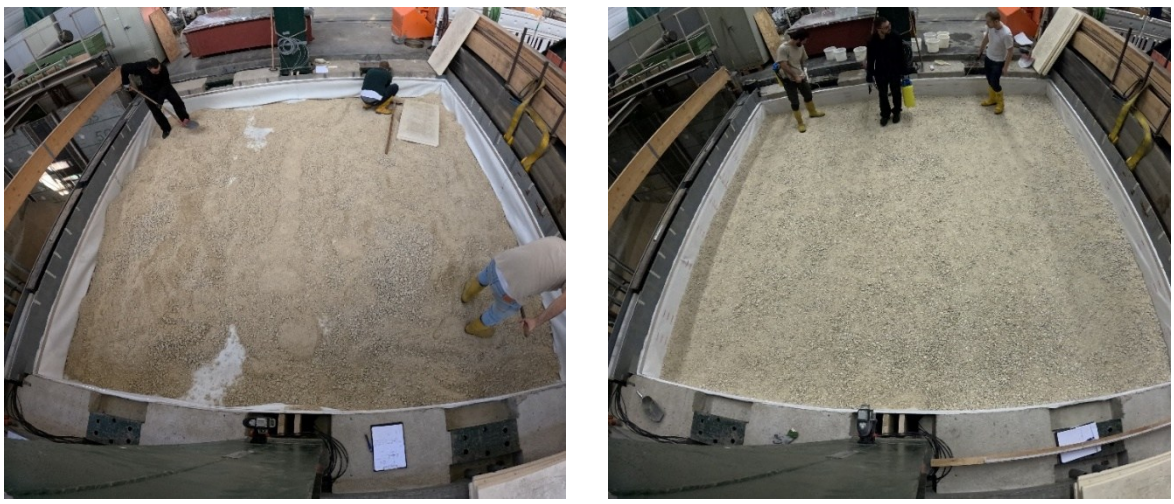
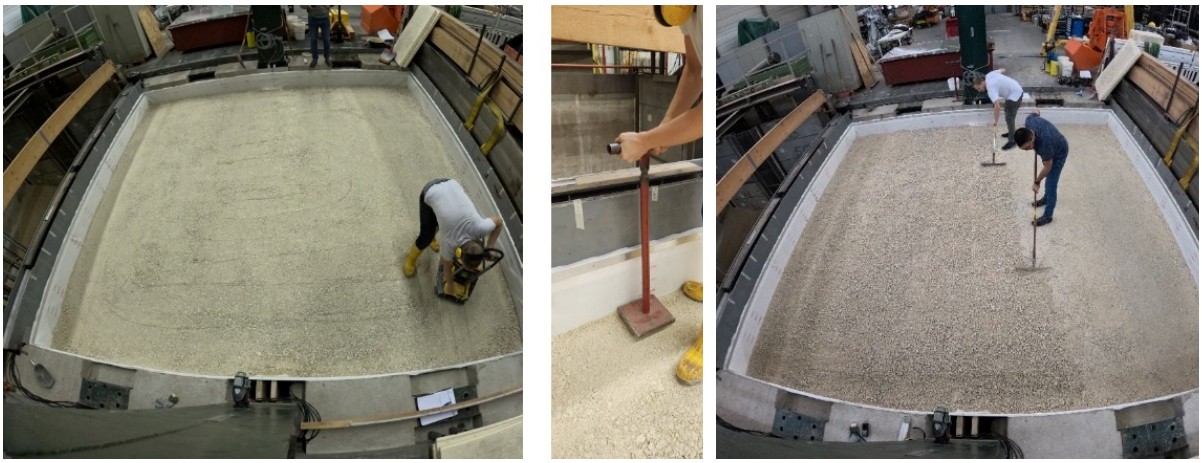


Figure A.7. Distribution granulométrique du gravier (rapport d'essai interne).



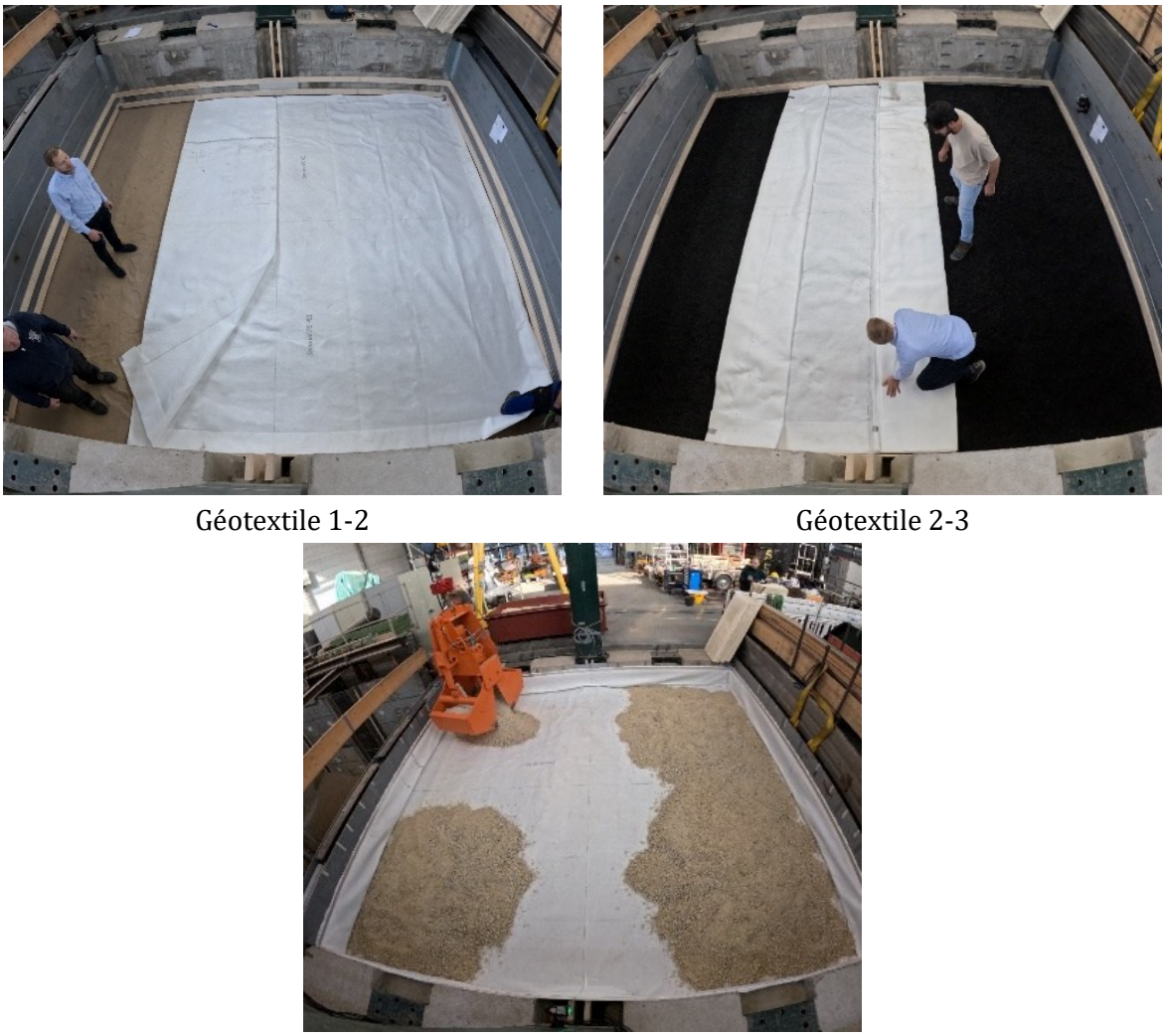
(a) (b)

Figure A.8. (a) Répartition uniforme du gravier avant l'ajout d'eau et (b) Ajout d'eau à l'aide de réservoirs pneumatiques pour atteindre la teneur en eau optimale avant de commencer le compactage.



(a) (b)

Figure A.9. (a) Compactage de la sous-couche de gravier à l'aide d'une plaque vibrante BOMBAG BP 10/36e et d'un compacteur manuel pour les bords de la fosse et (b) Rugosité de la surface de la sous-couche de gravier actuelle pour améliorer l'imbrication des grains.



Géotextile 1-2 Géotextile 2-3

Géotextile 3-4

Figure A.10. Mise en place des géotextiles entre les couches du modèle.

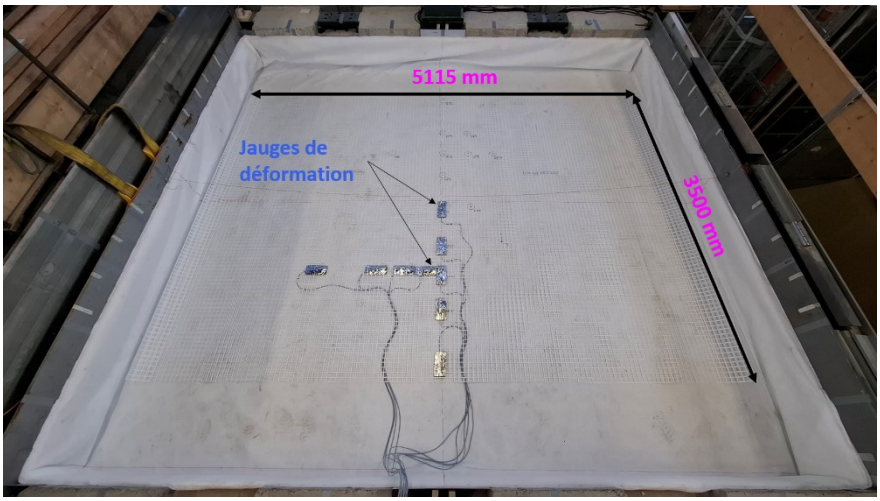


Figure A.11. Mise en place du « Géotextile 3-4 » sur la deuxième couche de sable (couche 3) et installation de la géogrille instrumentée par jauge de déformation pour l'essai 2.

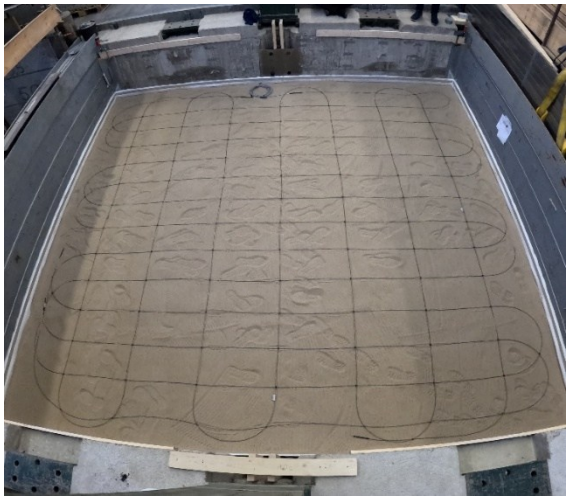


Figure A.12. DFOS installé dans la deuxième couche de sable.

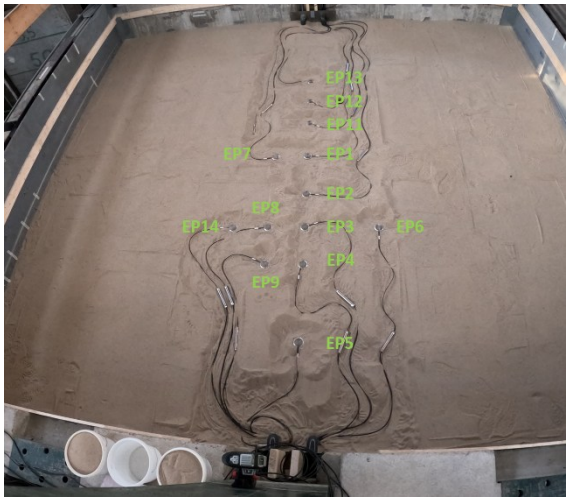


Figure A.13. Mise en place des capteurs de pression de terre (EP1-9, EP11-14) dans la deuxième couche de sable.

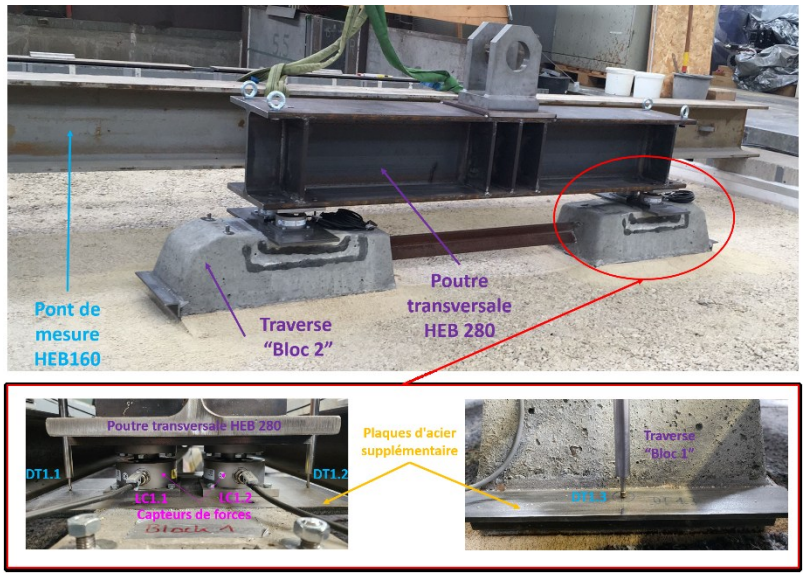


Figure A.14. Assemblage du système de chargement (poutre transversale + traverse) avec capteurs instrumentés.

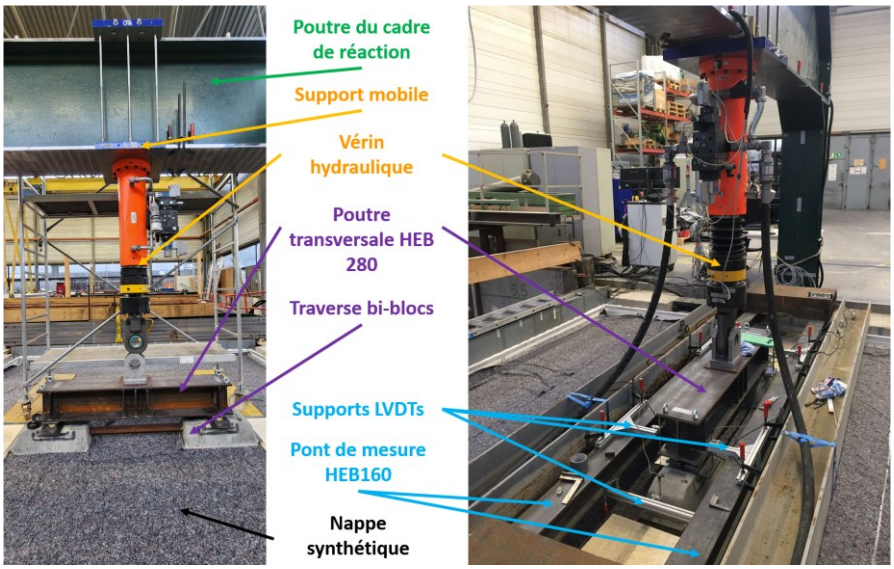


Figure A.15. Branchement du vérin hydraulique au dispositif de chargement et installation des LVDT sur la traverse.