

Comparaison 2D-3D des modèles numériques aux éléments finis d'un remblais sur colonnes à module contrôlé (CMC)

Comparison of 2D-3D finite element numerical models of an embankment on controlled modulus columns (CMC)

Fanny MAUCOTEL^{1*}, Daniel GIRAULT¹, Jérôme RACINAIS¹

1 Menard, Orsay, France

**fanny.mauotel@menard-mail.com*

RESUME : Les colonnes à module contrôlé (CMC), appartenant à la famille des inclusions rigides, sont de plus en plus utilisées à l'échelle internationale comme technique d'amélioration des sols. Elles permettent de contrôler les tassements et d'augmenter la capacité portante des sols à faibles caractéristiques. Les inclusions rigides sont couramment mises en œuvre sous des dallages industriels, des remblais routiers et ferroviaires, des bâtiments, des réservoirs ou encore des fondations d'éoliennes. Cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment en France et en Pologne, aboutissant à l'élaboration de recommandations pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur inclusions rigides. Dans ce contexte, le recours à des modèles numériques simplifiés en deux dimensions (2D) pour le dimensionnement des inclusions rigides est souvent considéré comme moins représentatif que les analyses tridimensionnelles (3D), bien que ces dernières soient généralement plus complexes et coûteuses à mettre en œuvre pour les bureaux d'études. L'objectif de cette étude est de présenter et de confronter différentes approches de modélisation numériques (2D versus 3D) des inclusions rigides appliquées à un cas d'ouvrage de remblai. Les calculs montrent que les méthodes simplifiées en 2D et les approches analytiques proposées dans les recommandations ASIRI, peuvent fournir des résultats très similaires à ceux obtenus par la modélisation numérique 3D, tout en réduisant significativement les efforts de modélisation.

ABSTRACT: Controlled Modulus Columns (CMC), part of the rigid inclusion family, are increasingly used worldwide as a ground improvement technique. They help control settlements and enhance the bearing capacity of weak soils. Rigid inclusions are commonly employed beneath industrial slabs, road and railway embankments, buildings, tanks, and wind turbine foundations. This technique has been the subject of extensive research, particularly in France and Poland, leading to the development of guidelines for design, execution, and quality control of structures supported on rigid inclusions. In this context, the use of simplified two-dimensional (2D) numerical models for designing rigid inclusions is often considered less representative than three-dimensional (3D) analyses, although the latter are generally more complex and costly for engineering teams to implement. The objective of this study is to present and compare different numerical modeling approaches (2D versus 3D) for rigid inclusions applied to an embankment case study. The calculations show that simplified 2D methods and analytical approaches recommended by ASIRI can provide results very similar to those obtained through 3D numerical modeling, while significantly reducing modeling effort.

Mots-clés: Inclusions rigides, méthodes numériques, éléments finis, remblais.

1 INTRODUCTION

Les colonnes à module contrôlé (CMC), qui appartiennent à la famille des inclusions rigides, constituent une technique d'amélioration des sols largement utilisée pour réduire les tassements et accroître la capacité portante des sols compressibles, notamment sous les remblais. Bien que la modélisation numérique tridimensionnelle (3D) fournisse la représentation la plus réaliste de l'interaction sol-structure, elle reste complexe, chronophage et exigeante en ressources de calcul. En pratique, des modèles numériques bidimensionnels (2D) et des approches analytiques sont souvent privilégiés, en

particulier lorsque de multiples simulations sont nécessaires, par exemple pour des analyses paramétriques ou en phase de conception préliminaire.

Dans une analyse par éléments finis (EF) en 2D, les inclusions rigides peuvent être représentées selon différentes stratégies de modélisation. Cette étude explore plusieurs de ces approches pour simuler le comportement d'un sol compressible renforcé par inclusions rigides sous remblai. Des modèles locaux, centrés sur une cellule unitaire sous la zone courante du remblai, et des modèles globaux, représentant l'ensemble du remblai, ont été développés et analysés. Les résultats issus de ces modèles 2D, ainsi que ceux des méthodes analytiques, sont comparés aux

simulations numériques 3D afin d'évaluer leur précision dans la prédiction des déplacements du sol et la distribution des contraintes dans les colonnes.

L'objectif de cet article est d'apprécier la capacité des modèles simplifiés en 2D et des approches analytiques à reproduire fidèlement le comportement des remblais renforcés par inclusions rigides. L'étude vise à démontrer leur pertinence et leur fiabilité dans le processus de conception, notamment lorsque l'efficacité et la reproductibilité sont des critères essentiels.

2 INCLUSIONS RIGIDES CMC

2.1 Technique

La technique des Colonnes à Module Contrôlé (CMC) vise à améliorer le comportement mécanique des sols compressibles en réduisant leur déformabilité par la mise en place d'inclusions rigides. Contrairement aux fondations profondes, les CMC ne tendent pas à traverser les couches compressibles pour les neutraliser, mais à les renforcer. Elles n'assurent pas la reprise intégrale des charges ; leur rôle est de limiter les tassements totaux et différentiels en déchargeant partiellement le sol.

Ces inclusions créent un système composite où la charge est répartie entre les colonnes en béton ou mortier et le sol environnant. La technique, réalisée sans vibration, génère peu de déblais lorsqu'elle est réalisée par refoulement, contribuant ainsi à des chantiers plus propres et moins intrusifs.

Pour les ouvrages uniformément chargés tels que les remblais, le transfert des charges est assuré par une plateforme de transfert de charge (PTC) disposée entre les têtes de colonnes et la structure supérieure. Constituée de matériaux granulaires bien compactés, son épaisseur varie entre 0,3 et 0,8 m selon le type d'ouvrage et les caractéristiques du sol sous-jacent. Elle doit être compactée par couches minces et présenter un module d'Young minimal de 50 MPa (recommandations ASIRI, 2012) afin de garantir une répartition efficace des charges.

2.2 Modélisation

2.2.1 Représentation en éléments finis

En modélisation géotechnique, les inclusions rigides peuvent être représentées par quatre principaux types d'éléments, choisis en fonction des objectifs de calcul et des caractéristiques géométriques :

- Éléments volumiques : Ils reproduisent la géométrie tridimensionnelle complète de l'inclusion et sont définis par des paramètres issus

de la mécanique des milieux continus. Adaptés aux simulations 2D et 3D, ils offrent la représentation la plus réaliste. Toutefois, dans le cadre d'une modélisation 2D en déformations planes (DP), ces éléments sont assimilés à des entités linéaires, alors que les inclusions réelles se comportent comme des éléments discrets. Pour modéliser un réseau d'inclusions rigides, il est nécessaire de leur attribuer un module d'Young équivalent E_{Yeq} et une épaisseur équivalente d_{eq} qui sont eux-mêmes dérivés du module réel du matériau de la colonne, du rayon de celle-ci et de l'espacement hors-plan entre inclusions. Cette approche d'homogénéisation permet au modèle 2D de restituer la rigidité globale du maillage d'inclusions.

- Éléments linéaires : Adaptés aux structures élancées dont deux dimensions sont négligeables par rapport à la troisième, ils sont généralement modélisés sous forme de poutres. Leur comportement mécanique est défini par une aire A , un moment d'inertie I et par le module d'Young E_Y . Ces éléments sont couramment utilisés dans les modèles 2D DP et dans les modèles 3D.
- Éléments surfaciques : Destinés pour les structures minces (plaques, voiles), ils sont caractérisés par leur rigidité axiale $E \cdot A$ et leur rigidité en flexion $E \cdot I$. Ils conviennent particulièrement aux analyses en 2D DP lorsque l'une des dimensions est faible par rapport aux deux autres.
- Modèle de sol équivalent : Utilisé pour l'évaluation des tassements absolus et différentiels du sol. Il n'a pas été retenu dans cette étude, l'objectif étant d'analyser les efforts internes au sein des inclusions rigides.

Bien que les éléments volumiques offrent la représentation la plus précise, l'utilisation d'éléments linéaires ou surfaciques permet de gagner en temps de calcul. Ces représentations simplifiées réduisent significativement la complexité du modèle tout en fournissant des résultats acceptables : efforts verticaux, efforts horizontaux, moments fléchissants. Pour garantir un transfert réaliste des charges et éviter des effets de poinçonnement artificiels, la largeur des éléments linéaires ou surfaciques est ajustée en tête, et, le cas échéant, en pied.

2.2.2 Interaction sol-structure

Une modélisation précise des inclusions rigides dans les ouvrages géotechniques nécessite une représentation robuste de l'interaction sol-structure, généralement sous forme d'une matrice d'interaction dont la configuration dépend de la stratégie de

couplage. Deux approches principales sont couramment utilisées :

- **Éléments d'interface** : Ils offrent une grande flexibilité en permettant le contrôle des conditions de contact et la simulation de comportements non linéaires (glissement, décollement). Les interfaces de type ressort, reliant les nœuds du sol et de la structure via des ressorts élastoplastiques, sont largement utilisées. Un paramètre clé est le facteur de réduction R_{int} (généralement compris entre 0.6 et 1.0), qui définit le rapport entre la résistance au cisaillement de l'interface et celle du sol adjacent. Dans cette étude, ces éléments sont appliqués pour modéliser le frottement latéral, dans les configurations à éléments volumiques et surfaciques, avec R_{int} fixé à 1.
- **Couplage indirect (éléments incorporés type Embedded Beam Row)** : Cette méthode dissocie les maillages de la structure et du sol. L'interaction est modélisée par des ressorts locaux répartis le long de l'élément, reliant les réactions axiales et latérales aux déplacements relatifs. Elle est efficace en termes de calcul et particulièrement adaptée aux modèles 2D DP et aux modèles 3D. Des ajustements peuvent être nécessaires pour prendre en compte les interactions en tête, notamment en présence d'une PTC. Dans cette étude, le couplage indirect est utilisé spécifiquement pour les éléments linéaires.

3 EXEMPLE DE REFERENCE

La configuration de référence utilisée pour les analyses numériques est illustrée la Figure 1.

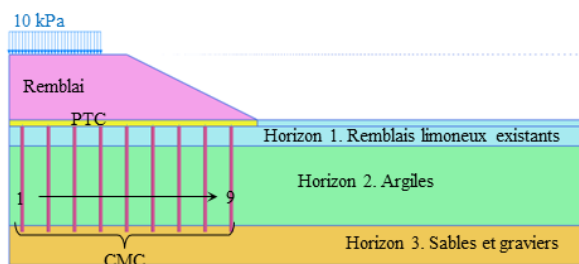


Figure 1. Représentation schématique du remblai étudié

3.1 Conditions géotechniques

La stratigraphie du site présente trois couches, sur lesquelles sera mise en place le remblai :

1. Un remblai limoneux existant jusqu'à 2 m sous le terrain naturel (TN) ;
2. Des argiles jusqu'à 8.1 m / TN ;
3. Des sables et graviers au-delà.

Les propriétés géotechniques retenues pour chaque couche ainsi que les lois de comportement utilisées dans les modèles numériques sont synthétisées dans le Tableau 1. La nappe phréatique se situe au toit de la couche 2.

Tableau 1. Profil de sol

Horizon	1	2	3
Profondeur inf. z_{inf} (m/TN)	2.0	8.1	11.1
Épaisseur Δh (m)	2.0	6.1	3.0
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique		
Critère de rupture	Mohr-Coulomb		
Module pressiométrique E_M (MPa)	5	4	26
Pression limite p_i^* (MPa)	0.50	0.40	2.85
Coefficient rhéologique α	1/2	2/3	1/3
Module de Young E_Y (MPa)	10	6	78
Coefficient de Poisson ν	0.3	0.3	0.3
Poids volumique γ (kN/m ³)	18	18	18
Angle de frottement φ' (°)	28	24	34
Cohésion drainée c' (kPa)	3	5	0
Cohésion non-drainée c_u (kPa)	75	65	-

3.2 Remblai

Le remblai modélisé dans cette étude présente une hauteur totale de 5 m, une largeur en crête de 9 m et une largeur en base de 19 m, correspondant à un talus de pente 1V:2H. Une surcharge de 10 kPa est appliquée en tête, à 2 m du bord, pour simuler des charges routières en condition de service. Une PTC de 0,5 m d'épaisseur est mise en place au-dessus du réseau de CMC, en substitution du sol en place. Les paramètres mécaniques du remblai et de la PTC sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres du remblai et de la PTC

Couche	Remblai	PTC
Épaisseur Δh (m)	5	0.5
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique	
Critère de rupture	Mohr-Coulomb	
Module de Young E_Y (MPa)	40	60
Coefficient de Poisson ν	0.3	0.3
Poids volumique γ (kN/m ³)	18	18
Angle de frottement φ' (°)	35	38
Cohésion drainée c' (kPa)	0	0

3.3 Inclusions rigides

Les hypothèses de dimensionnement des CMC sont :

- Diamètre des colonnes : 360 mm ;
- Configuration du réseau : maillage carré 2 m \times 2 m (taux de substitution d'environ 2,5 %) ;
- Profondeur d'installation : 8,6 m / TN (ancrée de 0,5 m dans l'horizon 3 sableux) ;
- Matériau : mortier ayant une résistance en compression simple de 16 MPa

Les paramètres adoptés pour les inclusions rigides sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres des CMC

Profondeur inf. z_{inf} (m/TN)	8.6
Longueur L (m)	8.1
Diamètre D_c (m)	0.36
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique
Module de Young E_Y (MPa)	6 800
Coefficient de Poisson ν	0.2
Poids volumique γ (kN/m ³)	22

Les inclusions rigides sont modélisées selon quatre approches : en éléments volumiques en configurations 2D axisymétrique (AXI) et 3D, en éléments volumiques équivalents dans un modèle 2D DP, en éléments plaque, ainsi qu'en éléments embedded beam row (EBR) au sein d'un modèle 2D DP.

3.3.1 Représentation par éléments volumiques dans les configurations 2D AXI et 3D

Dans les modèles 2D AXI et 3D, les colonnes sont représentées par des éléments volumiques utilisant les propriétés du Tableau 3.

3.3.2 Représentation par éléments volumiques dans le modèle 2D DP

Dans le modèle 2D DP, des propriétés équivalentes sont introduites afin de représenter la géométrie circulaire réelle et l'espace hors-plan des CMC, comme illustré à la Figure 2.

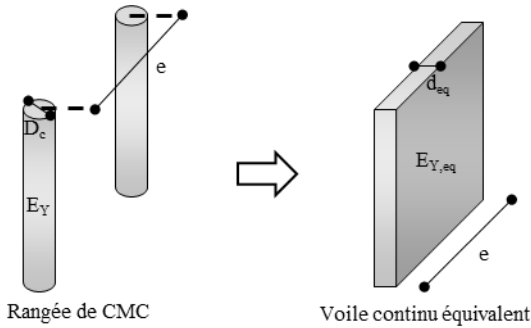


Figure 2. Conversion du modèle en 2D DP

Dans cette approche, les rangées de CMC sont modélisées par un voile continu équivalent, dont la raideur axiale $E \cdot A$ et la rigidité en flexion $E \cdot I$ sont identiques à celles du système initial. Les équations suivantes établissent la conversion :

$$(E \cdot A)_{rangée\ CMC} = E_Y \times \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (1)$$

$$(E \cdot I)_{rangée\ CMC} = E_Y \times \frac{\pi D_c^4}{64} \quad (2)$$

$$(E \cdot A)_{voile} = E_{Y,eq} \times e \times d_{eq} \quad (3)$$

$$(E \cdot I)_{voile} = E_{Y,eq} \times \frac{e \times d_{eq}^3}{12} \quad (4)$$

En imposant l'égalité des raideurs axiales et des rigidités en flexion entre la rangée de CMC et le voile équivalent, on obtient :

$$(E \cdot A)_{rangée\ CMC} = (E \cdot A)_{voile} \quad (5)$$

$$(E \cdot I)_{rangée\ CMC} = (E \cdot I)_{voile} \quad (6)$$

La résolution des équations (1) à (4) dans (5) et (6) conduit aux expressions suivantes pour l'épaisseur et le module équivalent du voile :

$$d_{eq} = \frac{D_c \sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

$$E_{Y,eq} = E_Y \times \frac{\pi D_c}{2e\sqrt{3}} \quad (8)$$

Les paramètres utilisés pour les inclusions rigides dans cette approche sont récapitulés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Paramètres des CMC dans l'approche 2D DP volumique

Profondeur inf. z_{inf} (m/TN)	8.6
Longueur L (m)	8.1
Épaisseur d_{eq} (m)	0.312
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique
Module de Young $E_{Y,eq}$ (MPa)	1 110
Coefficient de Poisson ν	0.2
Poids volumique γ (kN/m ³)	22

3.3.3 Représentation par éléments plaque dans le modèle 2D DP

Dans cette approche, les inclusions rigides sont modélisées par un voile continu équivalent, comme illustré dans la Figure 3, en utilisant des éléments de type plaque. Ils sont caractérisés par une raideur axiale équivalente $(E \cdot A)_{eq}$ et une rigidité en flexion équivalente $(E \cdot I)_{eq}$ exprimées par mètre linéaire.

Tableau 5. Paramètres des CMC dans l'approche 2D DP éléments plaque.

Profondeur inf. z_{inf} (m/TN)	8.6
Longueur L (m)	8.1
Épaisseur d_{eq} (m)	0.312
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique
Raideur axiale $(E \cdot A)_{eq}$ (MN/m)	364
Rigidité de flexion $(E \cdot I)_{eq}$ (MN.m ² /m)	2.8
Coefficient de Poisson ν	0.2

Les propriétés équivalentes sont calculées à partir des relations suivantes :

$$(E \cdot A)_{eq} = \frac{(E \cdot A)_{rangée\ CMC}}{e} = E_Y \times \frac{\pi D_c^2}{4e} \quad (9)$$

$$(E \cdot I)_{eq} = E_Y \times \frac{\pi D_c^4}{64e} \quad (10)$$

Les paramètres adoptés pour les inclusions rigides par éléments plaque sont présentés dans le Tableau 5.

3.3.4 Représentation par EBR dans le modèle 2D DP

Dans le modèle 2D DP, les inclusions rigides peuvent également être représentées sous forme d'EBR superposées au maillage du sol. Ces éléments linéaires interagissent avec le terrain environnant par couplage indirect via des interfaces spécialisées. Leur interaction avec le sol est modélisée par des lois élastoplastiques, intégrant à la fois le frottement latéral le long du fût et la résistance en pointe.

La définition et la mise en œuvre des paramètres EBR suivent les recommandations du Manuel PLAXIS 2D, incluant le traitement des interfaces, la gestion des rigidités et la formulation de la capacité portante.

Les paramètres adoptés pour la représentation EBR sont les suivants :

Tableau 6. Paramètres des CMC en embedded beam row

Profondeur inf. z_{inf} (m/TN)	8.6
Longueur L (m)	8.1
Diamètre D_c (m)	0.36
Espacement hors du plan e (m)	2
Loi de comportement	Linéaire élastique parfaitement plastique
Module de Young E_Y (MPa)	6 800
Poids volumique γ (kN/m ³)	22
Frottement axial limite	Dépendant des paramètres de cisaillement des couches
Résistance latérale	Illimitée
Résistance en pointe F_{max} (kN)	621

4 MODELISATION MULTI-ECHELLE DU SYSTEME REMBLAI-INCLUSIONS

Des modèles éléments finis (EF) ont été développés à deux échelles, locale et globale, afin de représenter le système remblai–inclusions rigides. Les simulations ont été réalisées avec les logiciels de référence PLAXIS 2D et PLAXIS 3D, reconnus pour leur robustesse et leur précision dans la modélisation des interactions sol–structure complexes en 2D et 3D.

4.1 Présentation des modèles

4.1.1 Modèles locaux

Les modèles locaux se concentrent sur une cellule unitaire représentative située sous la partie courante du

remblai, permettant une analyse détaillée de la distribution des contraintes, des mécanismes de transfert de charge et de l'interaction sol–colonne à une échelle fine. Les différents modèles locaux, chacun intégrant une représentation spécifique des CMC, sont illustrés dans la Figure 3.

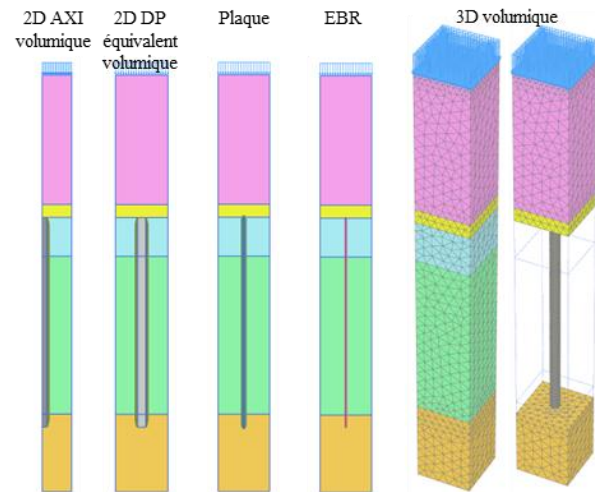


Figure 3. Modèles EF locaux avec diverses représentations des CMC sous le remblai

4.1.2 Modèles globaux

À l'inverse, les modèles globaux représentent l'ensemble du remblai, incluant le terrain environnant et les conditions aux limites, afin de saisir le comportement global du système sous les charges d'exploitation. Cette approche permet d'évaluer les réponses à grande échelle telles que les tassements totaux et différentiels, la stabilité globale et l'efficacité du réseau d'inclusions rigides dans la réduction des déformations. Les différents modèles globaux utilisés dans l'étude sont présentés dans la Figure 4.

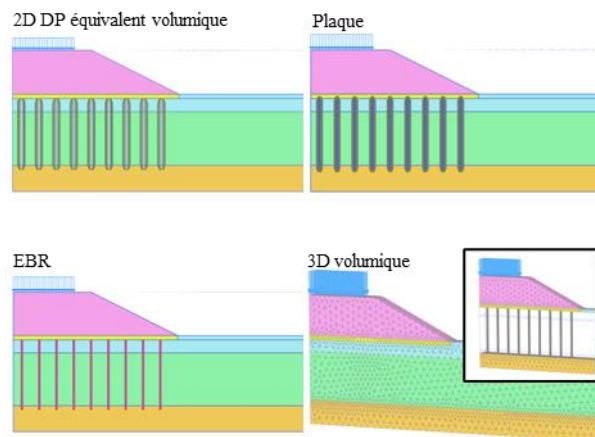


Figure 4. Modèles EF globaux avec diverses représentations des CMC sous le remblai

4.2 Résultats

4.2.1 Modèles locaux

La distribution des tassements obtenue à partir des modèles locaux est présentée dans la Figure 5. La Figure 6 présente la comparaison de plusieurs paramètres clés entre les différents modèles, notamment les tassements du sol, la charge axiale dans les inclusions rigides et le frottement latéral mobilisé. Les résultats montrent que les modèles 3D fournissent des réponses cohérentes avec celles des modèles EBR et 2D AXI volumique, confirmant leur pertinence pour simuler le comportement des sols renforcés.

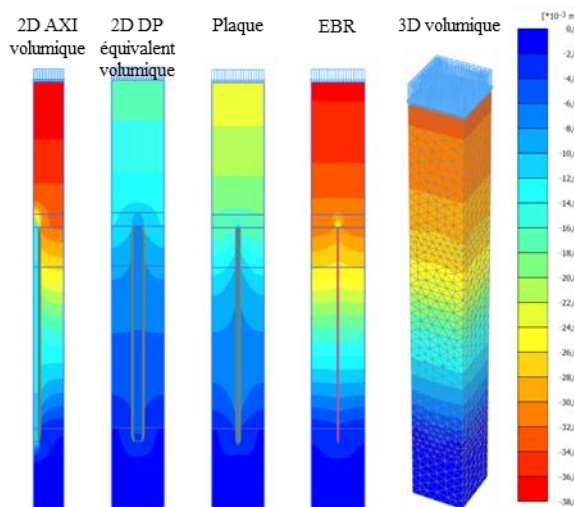


Figure 5. Répartition des tassements dans les modèles locaux

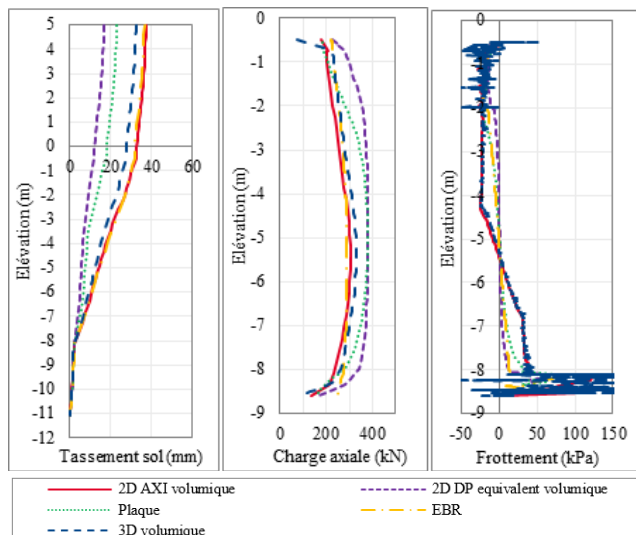


Figure 6. Comparaison des profils de tassement du sol, de charge axiale dans les CMC et de frottement latéral

En revanche, les modèles 2D DP en volume équivalent et ceux utilisant des éléments plaque présentent des écarts significatifs, révélant leurs limites dans la représentation de certains mécanismes

d'interaction, notamment la mobilisation du frottement à l'interface. Dans ces modèles, l'interface apparaît trop rigide, suggérant qu'un ajustement de R_{int} serait nécessaire pour reproduire plus fidèlement le comportement observé dans le modèle 3D. Pour le modèle en éléments plaque, une valeur de $R_{int} = 0.21$ permet d'obtenir une réponse comparable. Toutefois, un tel ajustement n'est pas applicable au modèle volumique équivalent 2D DP en raison de ses limitations intrinsèques.

4.2.2 Comparaison avec une approche analytique

Les recommandations ASIRI (2012) proposent des méthodes analytiques simplifiées pour des configurations courantes de sols renforcés, telles que des réseaux d'inclusions rigides soumis à des charges verticales uniformes dans la partie courante d'un remblai.

Dans cette étude, l'approche retenue est le modèle MV2, qui repose sur approche analytique biphasique distinguant le domaine CMC et le domaine SOL. Le calcul est réalisé par un processus itératif : une répartition initiale des charges est supposée, puis ajustée progressivement jusqu'à atteindre l'équilibre des contraintes sous le remblai.

Les principes fondamentaux régissant l'interaction entre les deux domaines incluent :

- Les lois de comportement d'interface de Frank et Zhao pour l'interaction SOL-CMC.
- La méthode des inclusions fictives de Combarieu (1988), utilisée pour l'évaluation du frottement négatif et la modélisation du transfert de charge au-dessus des têtes d'inclusion.

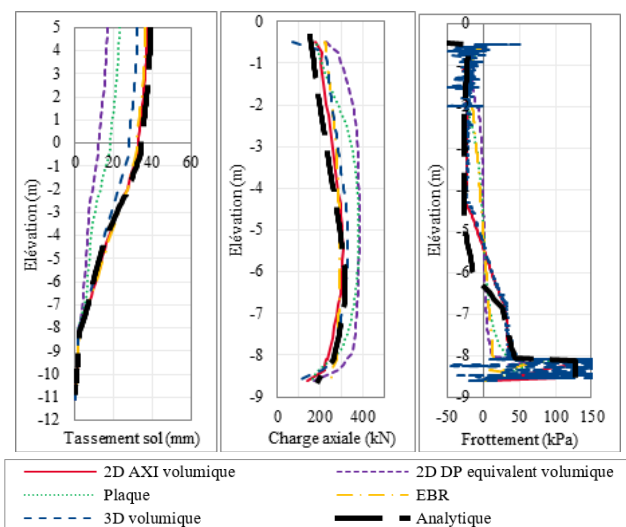


Figure 7. Confrontation des profils obtenus pour le tassement du sol, la distribution de la charge axiale dans les CMC et le frottement latéral, avec les résultats issus du calcul analytique

Les résultats analytiques, illustrés à la Figure 7, sont très proches de ceux obtenus avec le modèle 2D AXI volumique. Les modèles analytiques tels que MV2 offrent une lecture rapide et fiable pour le dimensionnement de configurations locales. Ils présentent une précision suffisante, une mise en œuvre simplifiée et constituent un outil pertinent pour la validation des simulations numériques.

4.2.3 Modèles globaux

La distribution des tassements et des déformations latérales obtenue à partir des modèles globaux est illustrée respectivement dans les Figure 8 et Figure 9.

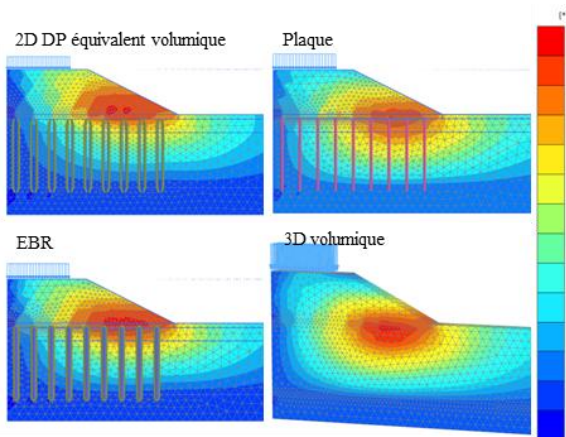


Figure 8. Distribution des tassements dans les modèles globaux

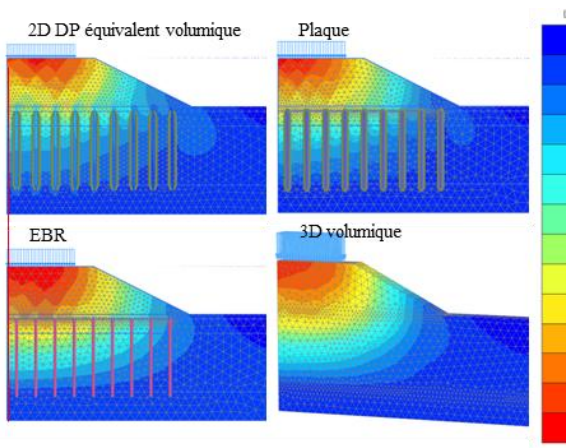


Figure 9. Distribution des déplacements horizontaux dans les modèles globaux

La Figure 10 présente la comparaison des principaux résultats : les tassements en surface du remblai, les déplacements horizontaux à la base du remblai, ainsi que les efforts axiaux et moments fléchissants dans les inclusions rigides 1, 5 et 9.

Les résultats montrent que l'ensemble des modèles fournit des valeurs du même ordre de grandeur. Pour les tassements, le modèle 2D DP en volume équivalent prédit des valeurs légèrement inférieures à celles du

modèle 3D, tandis que les approches par éléments plaque et EBR tendent à fournir des valeurs légèrement supérieures. Concernant les déplacements horizontaux, le modèle 3D présente les valeurs les plus faibles, ce qui suggère que les approches 2D sont conservatrices pour l'estimation des mouvements latéraux. Contrairement aux modèles locaux, aucun ajustement du paramètre R_{int} n'est nécessaire pour les modèles 2D DP en volume équivalent et en éléments plaque dans la configuration globale.

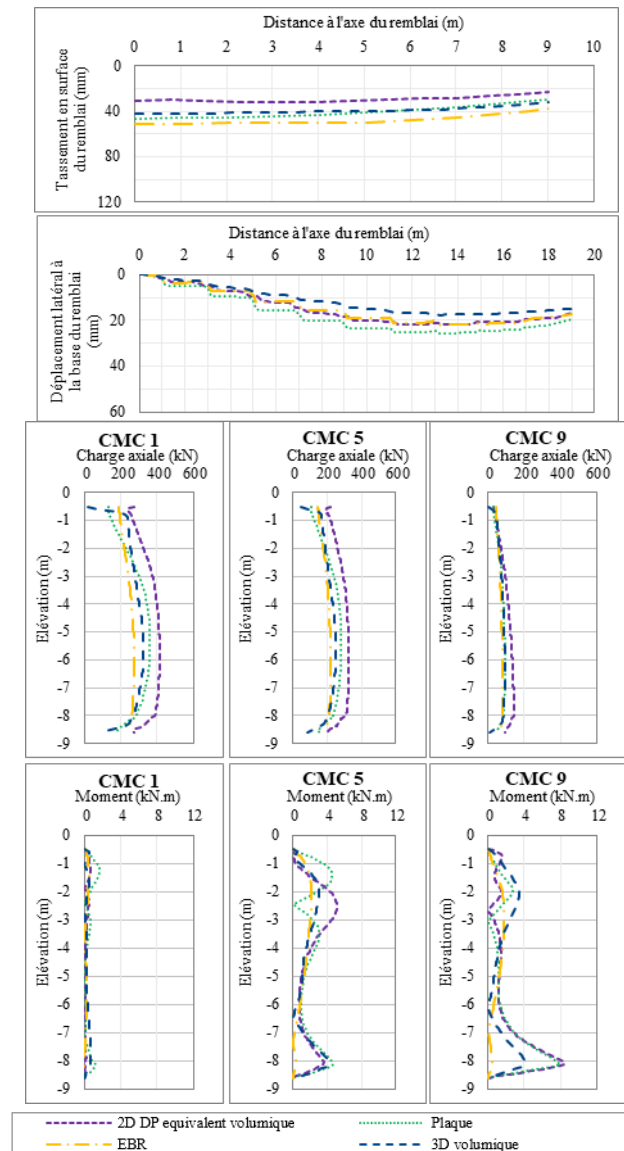


Figure 10. Confrontation des profils obtenus pour les déplacements, la distribution des efforts axiaux et des moments fléchissants dans les inclusions rigides

En ce qui concerne les efforts internes dans les inclusions rigides, les modèles 2D DP en volume équivalent et en éléments plaque ont tendance à surestimer les efforts axiaux et les moments fléchissants par rapport au modèle 3D. À l'inverse, le modèle EBR fournit des résultats comparables pour les

charges axiales mais sous-estime les moments fléchissants, en particulier à l'interface avec la couche d'ancrage. Cette limitation pourrait être corrigée en ajustant le facteur de raideur latérale dans le modèle EBR.

5 CONCLUSIONS

L'analyse comparative des différentes approches de modélisation des CMC met en évidence les avantages et les limites propres à chaque configuration.

Le modèle 3D constitue la représentation la plus réaliste du comportement des sols renforcés, offrant des prévisions fiables des tassements, des déplacements horizontaux et des efforts internes. Il représente une référence robuste pour la validation des autres approches de modélisation.

Le modèle 2D AXI volumique présente également de bonnes performances, reproduisant étroitement les résultats du modèle 3D en configuration locale, tout en offrant une efficacité numérique nettement supérieure.

A l'inverse, le modèle 2D DP en volume équivalent ne peut pas être calibré à partir des modèles axisymétriques ou 3D en raison de sa géométrie simplifiée et des hypothèses associées à la représentation en voile. Pour obtenir une réponse proche du modèle 3D global, des valeurs de facteur de réduction d'interface R_{int} proches de 1 semblent nécessaires. Ce modèle tend à sous-estimer les tassements, de manière marquée en configuration locale et plus modérée en configuration globale, tout en surestimant les déplacements latéraux. De plus, l'extraction des efforts internes dans les inclusions demeure complexe et peut nécessiter l'ajout d'un élément plaque fictif, ce qui limite son adéquation pour une représentation précise des inclusions rigides.

Le modèle en éléments plaque nécessite des valeurs de R_{int} variables selon l'objectif de calibration, avec des valeurs plus faibles pour la cellule unitaire et plus

élevées (0.85–1) pour la configuration globale. L'élément de type voile induit des discontinuités dans les déplacements du sol de part et d'autre de la plaque. Malgré ces limitations, cette approche demeure pertinente pour représenter les inclusions rigides dans des configurations globales axisymétriques, telles que les fondations de réservoirs.

Le modèle EBR présente une concordance satisfaisante avec les modèles 3D, tant en configuration locale que globale. Il fournit des prédictions cohérentes des tassements et des efforts internes, ce qui en fait l'approche la plus adaptée pour représenter les inclusions rigides, sous réserve d'un paramétrage approprié.

Par ailleurs, les modèles analytiques, tels que MV2, constituent une alternative rapide et fiable pour les configurations locales. Ils offrent une précision suffisante pour les études préliminaires et les cas standard, tout en étant simples à mettre en œuvre et efficaces sur le plan numérique. Leur capacité à reproduire les comportements clés observés dans les mécanismes essentiels en fait également un outil pertinent pour la validation croisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASIRI (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales. Presse des Ponts, Paris, France.
- Bentley (2024). *PLAXIS 2D 2024.2 Reference Manual*. Last Updated: May 07, 2024.
- Combarieu, O. (1988). Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue Française de Géotechnique*, 44, pp. 55-79.
<https://doi.org/10.1051/geotech/1988044057>
- CFMS (2023). Recommandations pour la modélisation numérique des ouvrages géotechniques.