

Modélisation numérique de l'effet combine de drains verticaux et inclusions rigides sous un remblai ferroviaire

Numerical modeling of the combined effect of vertical drains and rigid inclusions under a railway embankment

Rémi CHABANE¹, Jefferson CUELLAR^{2*}

¹ NGE FONDATIONS, Martignas-sur-Jalles, France

² NGE FONDATIONS, Illkirch-Graffenstaden, France

*jcuellar@ngefondations.fr

RESUME : L'étude concerne le futur remblai ferroviaire de l'Aménagement Ferroviaire Sud Bordeaux destiné à accueillir une nouvelle voie et implantée sur des formations géologiques fortement compressibles. Pour répondre aux contraintes géotechniques, une solution de traitement des sols combinant des inclusions rigides (IR) et drains verticaux (DV) a été retenue. Le présent article est consacré à la modélisation de ces deux techniques de renforcement et de consolidation des sols. L'étude menée dans le cadre de la mission G3 vise à évaluer les tassements résiduels du remblai après la mise en service de la voie future. Des modèles numériques ont été développés à l'aide des logiciels PLAXIS 2D et 3D, et une méthode simplifiée en modèle bidimensionnel axisymétrique est proposée pour intégrer l'effet combiné des IR et DV sans recourir systématiquement à la modélisation 3D.

ABSTRACT: The study focuses on the future railway embankment of the Bordeaux South Rail Development (AFSB), designed to support the new track and located on highly compressible geological formations. To address these geotechnical constraints, a soil improvement solution combining rigid inclusions and vertical drains was adopted. This paper is dedicated to the numerical modeling of these two reinforcement and consolidation techniques. Conducted as part of the G3 design phase, the study aims to evaluate the residual settlements of the embankment after the commissioning of the new track. Numerical models were developed using PLAXIS 2D and 3D, and a simplified axisymmetric 2D approach is proposed to integrate the combined effect of rigid inclusions and vertical drains without systematically resorting to 3D modeling.

Mots-clés : Remblais ; Ferroviaire ; Inclusions rigides ; Drains verticaux ; Modélisation.

1 INTRODUCTION

Le projet analysé s'inscrit dans le cadre de l'Aménagement Ferroviaire Sud Bordeaux (AFSB), dont l'objectif est la réalisation d'une infrastructure ferroviaire à grande vitesse reliant Bordeaux à Toulouse par la création d'une voie nouvelle.

L'emprise du remblai se situe dans une zone marécageuse sujette à des inondations récurrentes. Les investigations géotechniques ont mis en évidence la présence de formations alluvionnaires argileuses à tourbeuses, caractérisées par une forte compressibilité et une faible portance. Compte tenu de ces contraintes, une solution d'amélioration des sols par inclusions rigides combinées à des drains verticaux a été retenue par la maîtrise d'œuvre (SNCF).

2 OBJECTIF DE L'ETUDE

2.1 Profil en travers étudié (PK 7+475)

Le profil en travers étudié dans cet article est celui du PK 7+475.

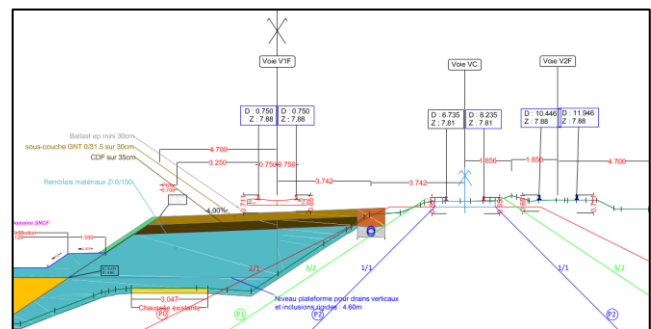


Figure 1. Profil en travers du PK 7+475

2.2 Solution de renforcement de sol

Les travaux envisagés consistent en la mise en œuvre d'inclusions rigides et de drains verticaux sous le futur remblai ferroviaire, représenté en bleu sur la Figure 1. Bien que ces deux techniques puissent être considérées comme conceptuellement opposées, leur combinaison permet à la fois de limiter l'amplitude des tassements et de réduire la durée de consolidation du sol situé entre le maillage des inclusions rigides. Afin de reporter un maximum de charge sur les inclusions rigides, celles-ci sont coiffées d'une dalle de diamètre 1,13m.

Les inclusions rigides seront implantées selon une maille carrée sous le remblai de la future voie. Des drains verticaux plats seront également disposés en inter-maille des inclusions suivant la même configuration en maille carrée, comme illustré à la Figure 2.

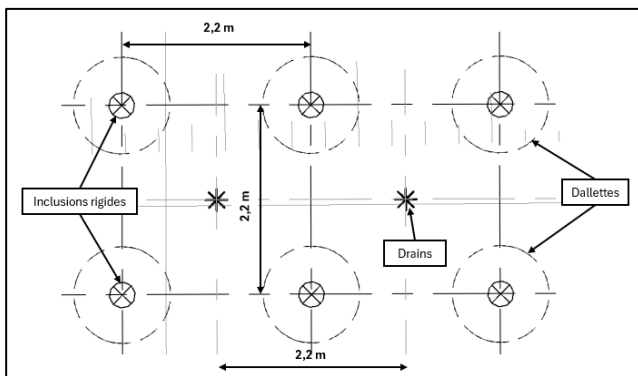


Figure 2: Maillage d'implantation des inclusions et drains

2.3 Tassement sous voies ferrées futures

Dans le présent article, l'analyse est limitée aux tassements primaires. Pour les futures voies ferrées, le critère de tassement admissible est fixé à 20mm. Ainsi, après la pose des rails, le tassement résultant de la consolidation des remblais et de la mise en service de l'infrastructure ferroviaire ne doit pas dépasser cette valeur.

3 CONTEXTE GEOTECHNIQUE

3.1 Lithologie du site

Le linéaire étudié s'étend du PK 7+280 au PK 7+920 et se caractérise par une évolution de la lithologie en termes d'épaisseur de formation et de caractéristiques mécaniques. D'après les données issues des sondages géotechniques, la stratigraphie observée au droit du profil analysé, de haut en bas, est la suivante :

- Des alluvions argileuses et localement tourbeuses ;
- Des alluvions sableuses dont l'épaisseur diminue progressivement jusqu'à disparition aux environs du PK 7+740 ;
- Un substratum marneux.

Les épaisseurs de ces formations présentent des variations significatives le long du linéaire. L'épaisseur maximale des matériaux compressibles atteint environ 9m.

La stratigraphie retenue pour le profil étudié dans le présent article est présentée ci-après :

Tableau 1. Stratigraphie retenue (toit des formations)

Formation	Profondeur [m/TN]	Toit couche [NGF]
Argiles	0,00	4,20
Sables	8,20	-4,00
Marnes	11,70	-7,50

3.2 Modèle géotechnique

Le modèle géotechnique retenu pour le profil étudié dans le présent article est présenté ci-après :

Tableau 2. Modèle géotechnique

Formation	PI* [MPa]	EM [MPa]	α [-]
Argiles	0.2	2.0	0.67
Sables	2.4	20.0	0.33
Marnes	4.0	70.0	0.50

Tableau 3. Modèle géotechnique (suite)

Formation	γ_h [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]
Argiles	16	9	25
Sables	20	0	34
Marnes	20	20	40

3.3 Paramètres œdométriques pour les sols compressibles

Pour caractériser la formation compressible des alluvions argileuses, les paramètres les plus adaptés sont les paramètres œdométriques. Les valeurs retenues sont les suivantes :

Tableau 4. Paramètres œdométriques des alluvions argileuses

Cc [-]	Cs [-]	Cv [m ² /s]	e ₀ [-]
0,660	0,070	1,0 E-07	1,85

Ces valeurs sont issues des essais œdométriques réalisés en laboratoire, dans le cadre de ce projet. Elles ont été confirmées par des ordres de grandeur et des corrélations tels que la relation suivante (Terzaghi et Peck, 1957) :

$$c_c = 0,009(w_L - 13) \quad (1)$$

où c_c est l'indice de compression et w_L (%) est la limite de liquidité.

A partir des sondages au pénétromètre statique (CPT), une contrainte de préconsolidation a été déterminée. Pour cela, la cohésion non drainée a été déterminée à partir de la relation suivante (Cassan, 1988) applicable aux sols argileux :

$$c_u = \frac{q_c}{15} \quad (2)$$

où c_u (kPa) est la cohésion non drainée et q_c (kPa) est la résistance de pointe.

D'après un retour d'expérience sur la LGV Est (Boutonnier et al., 2012), la contrainte de préconsolidation peut se calculer de la manière suivante :

$$\sigma'_p = \frac{c_u}{0,35} \quad (3)$$

où σ'_p (kPa) est la contrainte de préconsolidation.

Cette analyse a permis de définir une surconsolidation de type $\sigma'_p - \sigma'_{v0}$ de l'ordre de 33 kPa.

3.4 Définition des perméabilités des sols

La détermination des coefficients de perméabilité des sols en place a été réalisée à l'aide de plusieurs formulations :

- Le coefficient de consolidation est lié à la perméabilité du sol par la relation suivante (Hubert et al., 2019), (Magnan, 2020) :

$$k_y = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{E_{oedo}} \quad (4)$$

où c_v (m²/s) est le coefficient de consolidation, k_y (m/s) est le coefficient de perméabilité verticale du sol, E_{oedo} (kPa) est le module œdométrique du sol et γ_w (kN/m³) est le poids volumique de l'eau.

- La relation usuelle entre la perméabilité du sol verticale et horizontale est la suivante (Hubert et al., 2019) :

$$k_x = 10 \times k_y \quad (6)$$

où k_x (m/s) est le coefficient de perméabilité horizontale du sol.

4 ELEMENTS DE RENFORCEMENT ET AMELIORATION DU SOL

4.1 Drains verticaux

Les drains mis en œuvre sont des drains plats. Leur diamètre équivalent est de 5cm. Ils sont disposés selon un maillage carré de 2,2m × 2,2m. Ils sont mis en œuvre sur la hauteur des alluvions argileuses compressibles, soit une longueur de drain d'environ 8,20m.

4.2 Inclusions rigides

Les inclusions rigides, de diamètre 30cm, ont été réalisées à l'aide d'une tarière à refoulement. Elles sont constituées d'un béton de classe C35/45 XA2 et ancrées sur une profondeur de 50cm dans les alluvions sableuses compétentes. La tête des inclusions rigides se situent à une cote de 4,60NGF, soit le niveau de la plateforme de travail.

4.3 Dallettes

Les dalles, de diamètre 1,13m, ont été coulées en place avec un béton de classe C35/45 XA2 à l'aide d'un moule métallique de 20cm d'épaisseur. Elles ont été armées d'un treillis soudé de type ST50C.

5 PARAMETRES D'ENTREES DE LA MODELISATION NUMERIQUE

5.1 Méthode de modélisation

La modélisation de l'effet combiné et simultané des inclusions rigides (IR) et drains verticaux (DV) dépasse le cadre classique des méthodes de renforcement des sols. Il a été établi que l'étude individuelle du comportement des IR et des DV dans des modèles classiques distincts, ne permet pas de représenter de manière adéquate le comportement du sol compressible soumis à l'action conjointe de ces deux techniques. Il a ainsi été nécessaire de développer un mécanisme de modélisation intégrant à la fois le rôle des IR dans la réduction des tassements et celui des DV dans l'accélération de la dissipation des surpressions interstitielles induites par l'application d'une surcharge sur un sol fin saturé. Ce mécanisme intègre également une composante temporelle,

permettant d'évaluer le tassement mobilisé au cours des phases de travaux, avant la mise en place des voies de l'ouvrage. Ce tassement consommé est à déduire du tassement total subi par l'ouvrage. Le tassement restant constitue le tassement résiduel qui doit respecter le critère de tassement admissible fixé pour le projet.

La complexité du projet nous oriente naturellement vers un modèle tridimensionnel aux éléments finis. Cependant, nous avons également porté notre étude sur un modèle bidimensionnel axisymétrique adapté afin de modéliser le dispositif combiné IR-DV.

5.2 Logiciel aux éléments finis

Le choix s'est porté vers une modélisation aux éléments finis car elle permet une représentation de l'interaction entre les inclusions rigides et les drains verticaux dans un même modèle. La modélisation a été réalisée sur PLAXIS 2D et 3D.

5.3 Lois de comportement

La loi de comportement Hardening Soil permet de prendre en compte l'évolution des caractéristiques du sol suivant son état de contrainte. C'est pourquoi cette loi de comportement a été retenue pour les alluvions sableuses, le substratum marneux et le matelas de répartition.

La loi de comportement Soft Soil est un modèle de type Cam-Clay spécialement conçu pour la compression primaire des sols de type argileux. Bien que les capacités de modélisation de ce modèle soient généralement dépassées par le modèle Hardening Soil, le modèle Soft Soil est plus à même de modéliser le comportement de compression des sols très mous.

C'est pour cette raison que cette loi de comportement a été retenue pour la modélisation des alluvions argileuses, en s'appuyant sur les paramètres issus des essais œdométriques.

Seuls les remblais apportés ont été modélisés avec une loi de comportement Mohr Coulomb.

5.4 Données d'entrées hydrauliques

Les paramètres hydrauliques retenues sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5. Paramètres hydrauliques

Formation	Type de drainage	k_x [m/s]	k_y [m/s]
Remblais	<i>Drained</i>	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Matelas	<i>Drained</i>	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Argiles	<i>Undrained A</i>	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$
Sables	<i>Undrained A</i>	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Marnes	<i>Undrained A</i>	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$

6 MODELISATION NUMERIQUE

6.1 Approche bidimensionnelle

6.1.1 Description du modèle

Afin de modéliser l'inclusion rigide et la dalle, tous deux cylindriques, un modèle axisymétrique 2D a été adopté. Celui-ci permet de prendre en compte le frottement latéral le long de l'inclusion rigide au moyen d'une interface. Dans ce modèle, nous avons autorisé également la définition de conditions aux limites spécifiques pour la simulation des drains verticaux à droite du modèle.

Le modèle de type axisymétrique (*15-Noded*) a une largeur de 1.24 m (équivalent à une maille carrée $2.2m \times 2.2m$) et une hauteur de 16.2 m (Figure 3). La nappe d'eau est fixée à la cote 4.0 NGF (proche du toit des argiles).

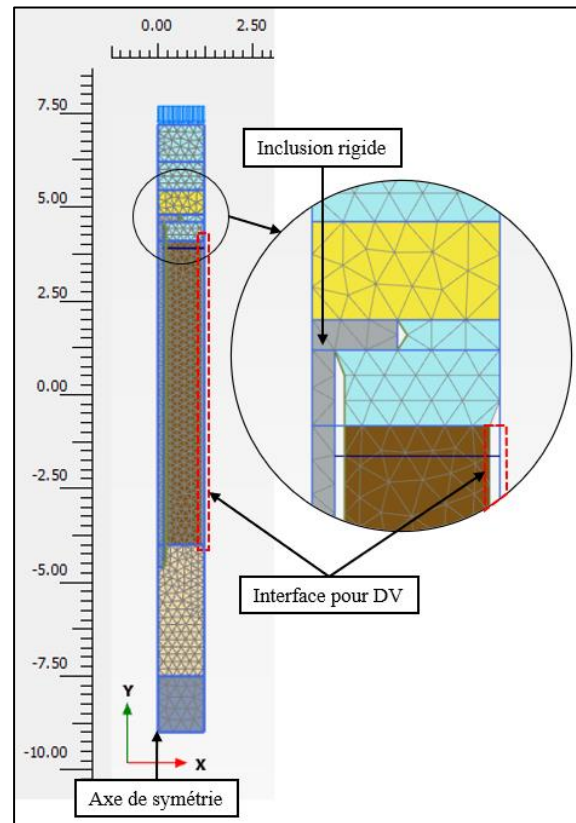


Figure 3: Détail du modèle bidimensionnel

6.1.2 Phasage du calcul

Le phasage retenu pour les calculs est le suivant :

- Mise en place du remblai d'apport entre le niveau TN à +4.2 NGF et le niveau fini à +7.2 NGF et réalisation des inclusions rigides avec dalles (durée de 28 jours)
- Temps de consolidation pendant la durée des travaux (durée de 75 jours)

- Mise en place de voies par une surcharge de 30 kPa (durée de 7 jours)
- Consolidation à long terme pour obtention du tassement résiduel.

6.1.3 Conditions limites

Pour l'ensemble des calculs, nous avons fixé des conditions limites pour le comportement hydraulique du flux de l'eau à travers les bords du modèle (*GroundwaterFlow*). Sur les bords latéraux une condition « fermé » (*Closed*) et sur les bords supérieur et inférieur une condition « ouverte » (*Open*).

De façon additionnelle, la fonctionnalité de contrôle du flux de l'eau à travers un contour spécifique (*Groundwater flow boundary conditions*) a été activée le long du côté droit du bloc d'argiles (zone entourée en rouge dans la Figure 3). Deux types d'options ont été retenues pour cette condition limite :

- Cas 1 : Option fermé (*Closed*). Ce cas est équivalent à l'annulation de la présence des drains, soit un calcul classique d'inclusions rigides.
- Cas 2 : Option ouverte (*Seepage*). Ce cas propose une approche opposée, dans laquelle les DV créent une surface parfaitement drainante le long du périmètre extérieur du cylindre axisymétrique.

L'approche du cas n°2 est certes trop favorable, mais il permet d'apprécier l'influence des conditions limites de drainage dans le temps de consolidation du calcul.

6.1.4 Résultats des calculs bidimensionnels

Les résultats des calculs sont synthétisés dans le Tableau 6. Une attention particulière est portée à l'évolution de la surpression interstitielle et du tassement du modèle en fonction du temps.

Tableau 6. Résultat des cas axisymétriques n°1 et 2

Cas	Temps [jours]	P _{excess} [kPa]	Tassement [cm]
1	28	-41.6	1.5
	103	-23.2	2.2
	110	-43.2	2.9
	987	>-1.0	4.8
2	28	-2.6	3.3
	103	-0.1	3.4
	110	-9.8	4.9
	116	>-1.0	5.1

Il a été observé que la condition limite de drainage ouvert du cas n°2 permet au modèle de dissiper très rapidement la surpression interstitielle cumulée pendant les phases de chargement, ce qui correspond à un temps de 13 jours à partir de la mise en place de la

surcharge liée aux voies et un tassement résiduel de 1.7 cm (entre t_{116} et t_{103}). Au contraire, le cas n° 1, qui représente l'absence des drains, nécessite un temps de 884 jours à partir de la mise en place de la surcharge liée aux voies afin de finir le processus de consolidation.

Cette analyse comparative a permis d'évaluer la nécessité de choisir correctement la condition limite liée aux DV. La réponse réelle du système se situant vraisemblablement entre les deux configurations étudiées.

6.2 Approche tridimensionnelle

Une modélisation tridimensionnelle s'est avérée nécessaire afin de modéliser correctement le comportement de consolidation de la solution combinée des IR et DV.

6.2.1 Description du modèle

Afin de profiter de la symétrie du système, il a été modélisé un volume de sol parallélépipède de dimensions 2.2m×2.2m et une hauteur de 16.2 m. Un DV est modélisé au centre de ce volume, et les IR sont modélisées dans les 4 arêtes du volume. Ainsi, les IR sont représentés par 4 quarts de cylindre aux sommets du volume comme illustré dans la Figure 4.

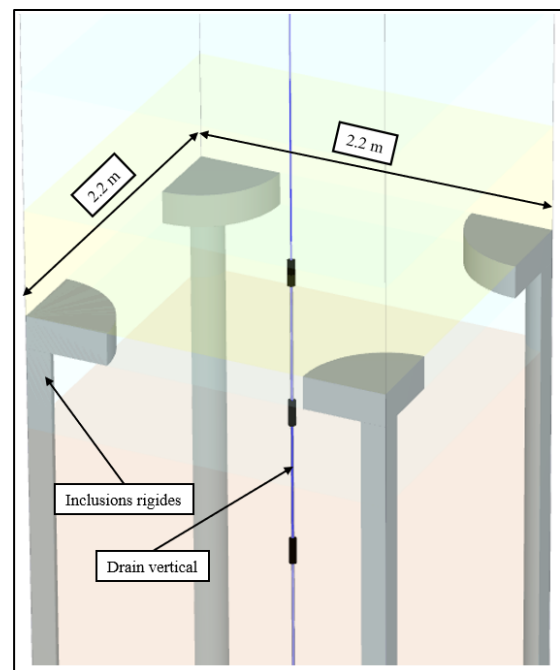


Figure 4. Schéma de principe de la modélisation 3D

6.2.2 Conditions limites

De manière similaire à l'approche bidimensionnelle, nous avons fixé des conditions limites hydrauliques (*GroundwaterFlow*) fermées (*Closed*) sur les faces

latérales et ouvertes (*Open*) sur les faces supérieures et inférieures du volume.

6.2.3 Résultats du calcul tridimensionnel

Les résultats des calculs sont synthétisés dans le Tableau 7. Une attention particulière est portée à l'évolution de la surpression interstitielle et du tassement du modèle en fonction du temps.

Le résultat du cas tridimensionnel n°3 montre qu'il faut un temps de 33 jours à partir de la mise en place de la surcharge liée aux voies pour dissiper la surpression interstitielle due aux charges et au remblai.

Tableau 7. Résultat du cas tridimensionnel n°3

Cas	Temps [jours]	P _{excess} [kPa]	Tassement [cm]
3	28	-10.3	2.6
	103	-0.1	3.1
	110	-14.6	4.0
	136	>-1.0	4.8

Ce modèle, considéré comme le calcul de référence, montre que la consolidation du sol n'est pas aussi rapide que modélisé dans le cas n°2, toutefois, le tassement résiduel de 1.7 cm (entre t_{136} et t_{103}) est compatible avec celui retrouvé dans le cas n°2.

6.3 Modélisation des drains et des inclusions rigides dans un modèle axisymétrie (2D)

A partir des conclusions obtenues à l'aide des calculs 2D et 3D cités ci-dessus, une nouvelle approche de calcul a été conçue afin de faciliter l'étude complète du projet, qui se compose en réalité de plusieurs profils de calcul entre les PK 7+280 et PK 7+920. La difficulté de proposer un calcul 3D pour l'ensemble de profils du projet était liée à la disponibilité limitée de la licence Plaxis 3D qui est très couteuse et nécessite également de plus de temps de manipulation pour adapter la géométrie d'un calcul en comparaison avec un temps moins important pour un calcul 2D.

6.3.1 Description du modèle

Il a été repris le modèle bidimensionnel décrit dans la section 6. L'objectif de cette modélisation était de simuler correctement le comportement des drains en imposant une consolidation radiale vers l'extérieur du modèle comme illustrée dans la Figure 5.

6.3.2 Conditions limites

Une interface spécifique a été rajoutée le long du côté droit du bloc d'argiles (zone entourée en rouge dans la Figure 3). Cette interface permettra ensuite de modéliser un comportement plus réaliste des DV disposés en intermaille des IR. Sur Plaxis 2D, l'option

Active in flow est activée afin de maîtriser les conditions de flux de l'eau à travers de l'interface qui est censée représenter les DV.

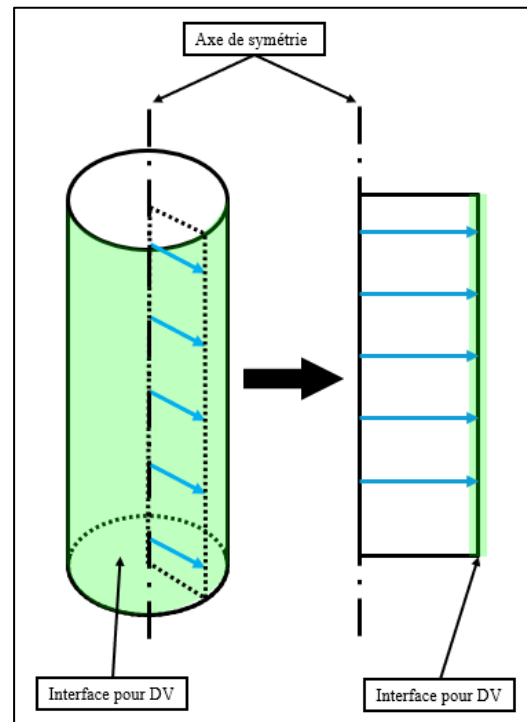


Figure 5 : Sens du drainage de l'eau vers l'extérieur

La maîtrise du comportement hydraulique de l'interface est accompagnée par la mise en place d'une valeur de perméabilité équivalente dans les propriétés hydrauliques du matériau composant l'interface. Cette perméabilité équivalente est gérée par le paramètre de conductivité de drainage (*Drainage conductivity*) dk présenté à la Figure 6.

Groundwater		
Cross permeability	Fully permeable	▼
Drainage conductivity, dk	$m^3/day/m$	1.000E-3

Figure 6. Paramètre de conductivité de drainage de l'interface.

L'introduction d'une valeur de conductivité de drainage convenable à l'interface représentant le drain, permet d'obtenir un comportement équivalent à celui observé dans la modélisation tridimensionnelle.

Ainsi, la valeur retenue de $dk = 1.10^{-3} m^3/d/m$ a été obtenue à la suite d'une recherche itérative jusqu'à l'obtention d'un résultat compatible avec le modèle 3D.

6.3.3 Résultat du cas de calcul n°4

Les résultats des calculs sont synthétisés dans le Tableau 8 pour la surpression interstitielle et le tassement en fonction du temps.

Tableau 8. Résultat du cas bidimensionnel n°4

Cas	Temps [jours]	P _{excess} [kPa]	Tassement [cm]
4	28	-12.8	2.7
	103	-0.1	3.4
	110	-19.3	4.3
	136	>-1.0	5.1

Le résultat du cas bidimensionnel n°4 présente un résultat équivalent au modèle tridimensionnel, soit un temps de 33 jours à partir de la mise en place de la surcharge liée aux voies pour dissiper la surpression interstitielle due aux charges et au remblai et un tassement résiduel de 1.7 cm (entre t_{136} et t_{103}).

6.4 Réflexions pour la suite du projet

L'approche de calcul n°2, bien que favorable, reste pertinente pour les résultats recherchés, soit la validation du tassement résiduel après la mise en place de la surcharge liée aux voies de l'ouvrage. La pertinence de cette méthode est possible grâce à un temps de consolidation suffisamment long entre la mise en place du remblai et la mise en service des voies. Dans le cas de ce projet, le temps de consolidation de 75 jours était une hypothèse sécuritaire car le phasage réel du projet a conduit à des temps de consolidation plus longs, ce qui a apporté une sécurité additionnelle à l'utilisation de l'approche du cas n°2.

6.5 Proposition d'une méthode pour obtention du facteur dk

La valeur de conductivité de drainage dk peut varier en fonction des conditions spécifiques du modèle (perméabilité du sol, épaisseur de la couche compressible et maillage). Ainsi, une variation dans les paramètres cités ci-dessus conduirait à une valeur de conductivité de drainage différente. Ceci rend difficile l'utilisation de l'approche du cas n°4 pour d'autres cas de calcul sans faire préalablement une modélisation 3D afin de caler ce paramètre.

Une méthode d'approximation du paramètre dk est proposée sur la base d'un calcul bidimensionnel réalisé en deux phases.

Dans un premier temps, nous procédons à la réalisation d'un calcul de consolidation radiale classique : modèle axisymétrique avec un DV à l'axe du modèle.

Ensuite, nous reprenons ce modèle avec l'activation de l'interface drainante extérieure (Figure 5) à la place du DV à l'axe et les conditions limites décrites à la section 6.3.2. La valeur de conductivité de drainage dk devra être ensuite être approximé jusqu'à ce que le temps de consolidation obtenu dans ce

modèle soit proche ou égale à celui réalisé dans la première phase.

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de cette méthode approximative de calage a conduit à l'obtention d'une valeur de $dk = 0.25^{-3} m^3/d/m$, soit un rapport de 4 par rapport à la valeur obtenue au cas n°4 dans le sens de la sécurité.

7 CONCLUSION

Bien que la modélisation tridimensionnelle sous PLAXIS 3D constitue la solution la plus complète pour représenter l'interaction DV-IR, son coût élevé et la complexité de mise en œuvre limitent son usage systématique pour les calculs courants de consolidation. Dans ce contexte, la méthode proposée en section 6.5, fondée sur un modèle axisymétrique 2D avec interface drainante calibrée, offre une alternative pertinente. Elle permet de reproduire de manière fiable les effets conjoints des DV-IR, en intégrant la dissipation des surpressions interstitielles et la réduction des tassements, sans recourir à un modèle 3D pour chaque profil étudié.

L'analyse démontre que l'effet combiné des DV-IR ne peut être appréhendé par une simple juxtaposition des méthodes classiques dédiées à chaque technique. La présence des IR modifie significativement la distribution des contraintes et réduit les surpressions interstitielles par rapport à un remblai sans inclusions. Par conséquent, les conditions d'application d'un calcul de consolidation radiale par drains classique sont altérées, et seule une approche intégrée permet de quantifier correctement les gains en termes de tassements et de vitesse de consolidation. Cette synergie justifie pleinement le développement de méthodes spécifiques, telles que celle proposée dans cet article.

Enfin, afin de confirmer les hypothèses de modélisation et d'assurer le bon fonctionnement du dispositif combiné DV-IR, un programme de suivi des tassements et des pressions interstitielles a été mis en place. Les résultats de cette campagne, disponibles ultérieurement, permettront de réaliser des contre-calculs de validation et d'affiner le calage des paramètres hydrauliques et mécaniques. Cette étape est indispensable pour valider la robustesse des méthodes proposées et garantir leur applicabilité à des contextes géotechniques variés.

8 BIBLIOGRAPHIE

Boutonnier, L., Hajouai, F., Bacar, F. N., & Gandille, D. (2012). *LGV EST lot 41 : tassements calculés*

puis mesurés sous remblais. Actes des Congrès / Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur ou Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Paris.

Cassan (1988), *Les essais in situ en mécanique des sols – Volume 1 Réalisation et interprétation*, 2^{ème} éd., Editions EYROLLES, Paris, France.

Hubert & al (2019). *Fondations et ouvrages en terre*, 2^{ème} éd., Editions EYROLLES, Paris, France.

Magnan (2020) Déformabilité des sols. Tassements. Consolidation, *Techniques de l'Ingénieur*

Terzaghi et Peck (1957), *Mécanique des sols appliquée*, Editions DUNOD