

RETRO-ANALYSE DES PAROIS DE SOUTÈNEMENT DES GARES DU GRAND PARIS EXPRESS

BACK ANALYSIS ON THE RETAINING WALLS OF THE GRAND PARIS EXPRESS METRO STATIONS

Nihed BARÇA ¹, Olivier HAYE ¹

¹ *Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France*

RÉSUMÉ – Dans le but d'avoir une meilleure connaissance des paramètres géotechniques des sols de la région parisienne pour permettre d'optimiser de futurs dimensionnements, des rétro-analyses de soutènements sur deux gares du Grand Paris ont été réalisées. Cet article présente les résultats obtenus pour la gare Porte Maillot du projet de prolongement du RER E et pour la gare Vert-de-Maisons de la future ligne 15.

ABSTRACT – With the aim to gain a better understanding of the geotechnical parameters of the soils in the Paris region in order to optimize future designs, back analyses of retaining walls of the Grand Paris stations have been carried out. This article presents the results obtained for the Porte Maillot station of the RER E extension project and for the Vert-de-Maisons station of the future line 15.

1 Introduction

À la suite d'observations faites sur les déplacements de soutènements pendant les travaux d'excavation qui sont souvent moins importants que ceux estimés lors du dimensionnement, des rétro-analyses des données récoltées ont été réalisées. L'enjeu est de déterminer, sur plusieurs chantiers dans le secteur du Grand Paris, quels auraient été les paramètres de sols qui auraient pu conduire à un dimensionnement plus proche de la réalité observée, afin d'estimer le degré de conservatisme inhérent aux méthodes de dimensionnement communément adoptées. A ce stade, deux gares ont été étudiées, la gare Porte Maillot du projet de prolongement du RER E et la gare de Vert-de-Maisons de la future ligne 15.

2 Plateforme DAARWIN

Pour réaliser cette étude, on utilise un logiciel dédié à ce type d'analyses, appelé DAARWIN, permettant de faire le lien entre les mesures d'auscultation et les modèles numériques faits à l'aide du logiciel Plaxis 2D. Cette solution logicielle permet de valider les hypothèses de la modélisation, de détecter les divergences par rapport à celle-ci et d'optimiser le design. DAARWIN fonctionne en deux modes, l'analyse de sensibilité qui permet de visualiser quels sont les paramètres qui influencent le plus le dimensionnement, et la rétro-analyse, qui permet de déterminer un ensemble de paramètres qui produise un résultat le plus proche possible des observations des instruments. Cette rétro-analyse est basée sur un algorithme génétique dans lequel, au fil des générations, les paramètres sélectionnés vont être modifiés afin d'atteindre un objectif : obtenir dans le modèle Plaxis des déplacements (ou autres mesures) ayant les mêmes valeurs ou s'approchant fortement de ceux de la réalité. Tout comme son nom l'indique, l'algorithme génétique s'inspire du principe d'évolution de Darwin. Une population initiale composée d'individus (jeux de paramètres) aléatoires est évaluée et ensuite modifiée au fil des générations via des mutations et des croisements afin d'obtenir le meilleur individu, celui qui s'adapte le mieux

aux données de référence dans le cas de l'étude. L'algorithme s'arrête lorsqu'un de ces trois critères d'arrêt est atteint : le nombre maximal de générations est atteint, l'erreur d'un individu est inférieure à la valeur de tolérance ou bien l'erreur moyenne d'une génération est inférieure à la valeur de la tolérance.

Pour chaque gare, une analyse de sensibilité, à l'aide de DAARWIN, a tout d'abord été réalisée pour déterminer quels paramètres influencent le plus le déplacement des parois et les tassements des avoisinants afin de limiter le nombre de variables de la rétro-analyse. Le choix des paramètres à faire varier repose sur plusieurs critères, notamment leur sensibilité à la variation mais il faut également que les paramètres aient un sens géotechnique et que leur plage de variation soit compatible avec la nature géologique des sols.

En pratique, le modèle aux éléments finis initial est modifié avec les différents jeux de paramètres et le logiciel calcule et extrait les résultats de plusieurs modèles en parallèle jusqu'à ce que l'un des critères d'arrêt de l'algorithme soit atteint. Cela permet d'étudier plusieurs centaines de modèles avec différents paramètres en quelques heures.

3 Gare Porte Maillot du projet de prolongement du RER E

3.1 Présentation du projet

Le projet Eole est le prolongement du RER E vers l'Ouest de Paris sur 55km jusqu'à Mantes-la-Jolie. La Gare de Porte Maillot est localisée entre l'Arche de la Défense et l'Arc de Triomphe. Elle se situe dans une zone très urbanisée faisant de cet ouvrage une installation très sensible. Plusieurs avoisinants entourent ce chantier.

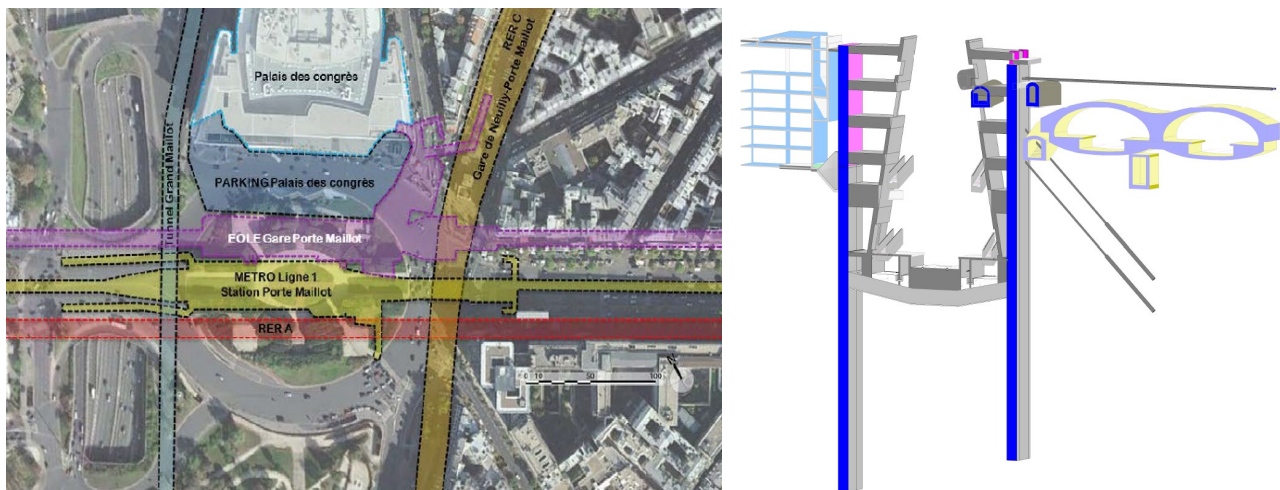


Figure 1 : Plan de situation du projet

Dans une optique de retour d'expérience, il a été décidé d'analyser les déplacements des parois moulées de la gare dans le but d'extraire un comportement global des sols pour les projets du grand Paris

3.2 Contexte géotechnique

Le projet EOLE est implanté au sein de la série tertiaire parisienne et de sa couverture quaternaire. Le tableau ci-après présente les formations géologiques présentes et les paramètres géotechniques retenus pour l'étude, dérivés du cahier B.

Tableau 1 : Paramètres géotechnique de la gare Porte Maillot

Formation géologique	Poids volumique		Résistance au cisaillement				Caractéristiques Pressiométriques			Modules de chargement	Modules de déchargement
	γ_h	γ_d	c'	c_u	ϕ'	ψ	E_m	pl^*	α	E'	E'_{ur}
	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	°	MPa	MPa	-	MPa	MPa
Remblais	18	-	0	-	25	0	6	0,6	1/2	8	
Marnes et Caillasses supérieures	19	16	5	-	30	0	12	1,2	1/2	40	
Marnes et Caillasses moyennes	20	16,5	10	-	30	0	70	4	1/2	210	
Marnes et Caillasses inférieures	21	17	30	-	30	0	160	> 4,7	1/2	360	
Calcaire Grossier supérieur	21	17	50	-	35	0	200	> 4,7	1/2	300	1400
Calcaire Grossier inférieur	21	17	50	-	35	0	240	> 4,7	1/2	400	1600
Sables de Cuise / Sables Supérieurs	18	15	0	-	35	5	80	3,9	1/2	240	720
Fausses Glaises	19	14,5	10	-	20	0	28	1,8	2/3	40	120
Sables d'Auteuil	20	17	5	-	25	0	35	2,5	1/2	40	120
Argiles Plastiques	20	16	35	150	13	0	35	2,3	2/3	70	210
Marnes de Meudon	22	-	-	-	-	-	-	-	-	2000	-

3.3 Etude de sensibilité

Les rétro-analyses ont été réalisées aux phases clés des travaux pour plusieurs coupes du projet avec différentes combinaisons de variables pour chacune des gares étudiées. Pour déterminer les paramètres ayant le plus d'impact sur les déplacements des parois moulées, une étude de sensibilité a été réalisée et dont les résultats sont présentés sur la figure ci-après.

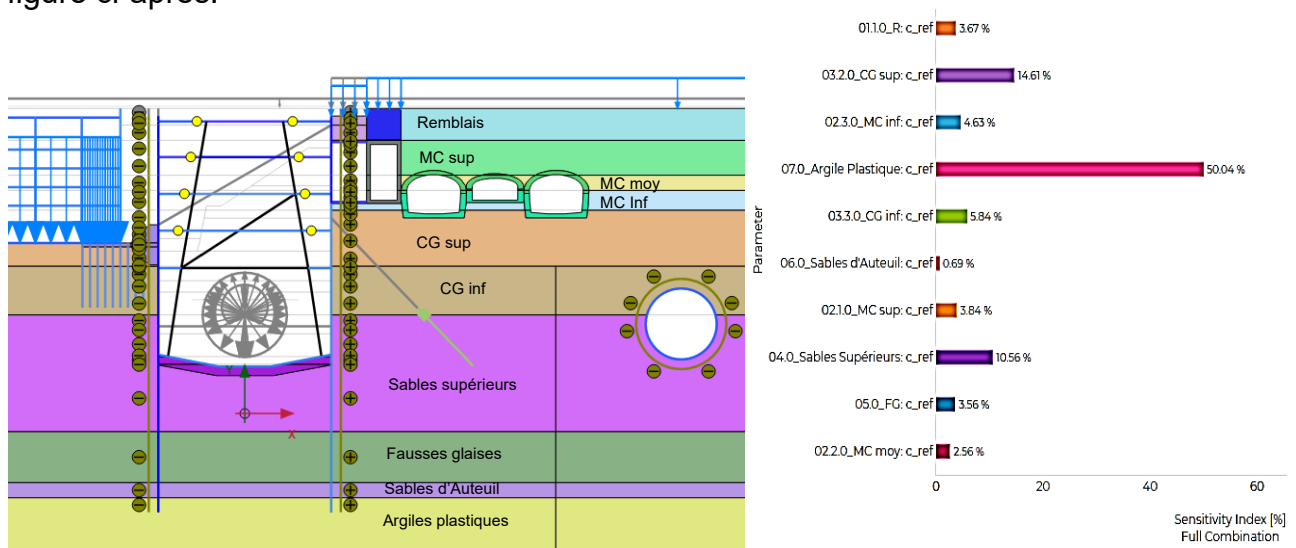


Figure 2 : Modèle Plaxis 2D et résultats de l'étude de sensibilité pour les cohésions

Les histogrammes résultant de l'étude de sensibilité ont permis de lister les paramètres les plus impactant du modèle :

- Le module E_{50} des Calcaires grossiers inférieurs, des Sables Supérieurs et des Fausses Glaises

- La cohésion des Argiles Plastiques, des Sables Supérieurs et des Calcaires grossiers supérieurs

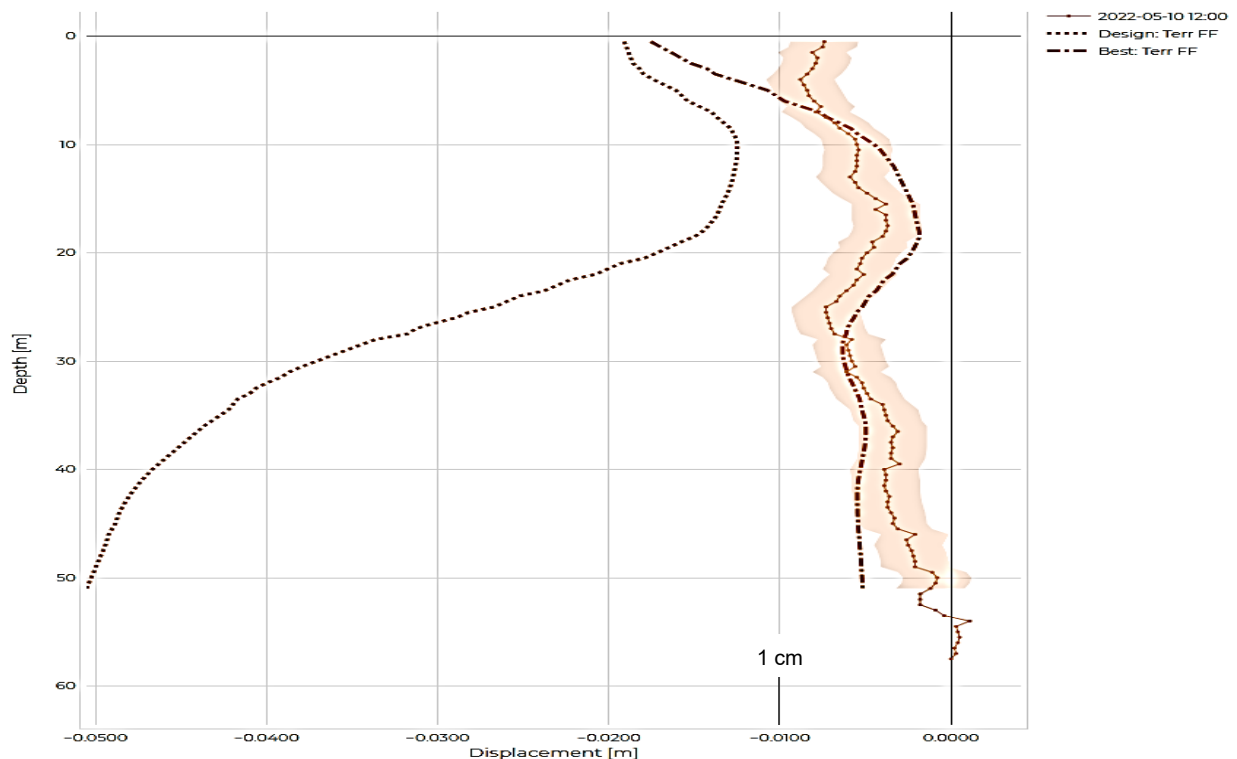
3.4 Rétro-analyses

Quatre rétro-analyses ont été réalisées pour cette gare, chacune permettant de mieux appréhender le comportement du modèle et d'ajuster les paramètres de la suivante.

[1] **Première rétro-analyse** : Les résultats vers lesquels il a été tenté de converger sont ceux de la phase de terrassement du fond de fouille, lorsque tous les déplacements importants ont eu lieu. Il a été décidé :

- De ne pas prendre en compte les modules et cohésions des remblais et des 3 couches de marnes et caillasses.
- De ne pas prendre en compte la cohésion des Sables d'Auteuil
- D'ajouter en paramètre la valeur de EA des parois. En effet, il a été estimé que le module du béton a été sous-estimé dans le modèle Plaxis.

La figure ci-après montre les résultats de cette première rétro-analyse. La courbe en pointillé correspond au déplacement de la paroi moulée du modèle de dimensionnement. La courbe continue orange correspond aux données d'auscultations récupérées, le buffer est représenté autour de cette courbe (à -2mm jusqu'à +2mm). La 3^{ème} courbe représente le modèle Plaxis créé au cours de la rétro-analyse le plus proche des résultats voulus.



On remarque que le meilleur modèle Plaxis est très proche des données d'auscultation, la nouvelle courbe de déplacement est presque tout le temps comprise dans le buffer. Le seul endroit qui présente encore un grand décalage est les 10 premiers mètres de l'inclinomètre.

[2] **Deuxième rétro-analyse** : Afin de comprendre cette forte différence entre le modèle optimisé et la réalité sur les 15 premiers mètres de profondeur, une 2ème rétro-analyse a été réalisée en :

- Prenant en compte des paramètres de cohésion et de module des 4 premières couches de sol ;
- Fixant les autres paramètres testés dans la première rétro-analyse. Ces valeurs correspondent à celle du meilleur individu trouvé précédemment.

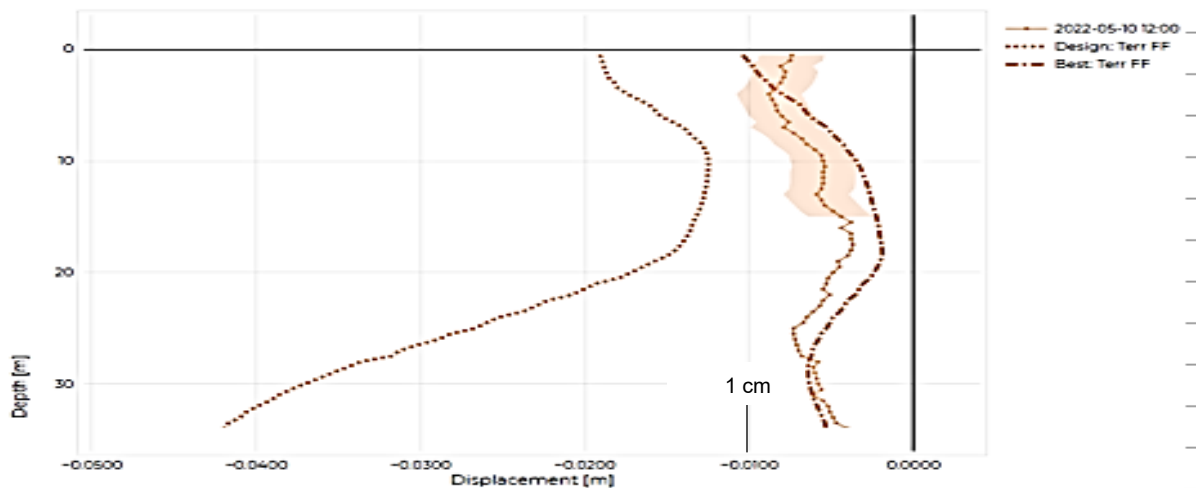


Figure 4 : Courbes des résultats de la deuxième rétro-analyse (Phase fond de fouille)

Les résultats montrent que la tête de paroi s'est fortement rapprochée des déplacements réels trouvés sur la courbe d'auscultation. Néanmoins, tout comme la première rétro-analyse, aucune valeur optimale n'a été trouvée et les paramètres de cohésion des remblais et des marnes et caillasses supérieures ont atteint leurs limites prédéfinies tandis que les cohésions des Marnes et Caillasses moyennes et inférieures sont restées identiques.

[3] Troisième rétro analyse

Pour cette étape, il a été décidé de prendre plus de paramètres pour l'analyse ainsi qu'étudier 3 phases travaux afin de créer un modèle qui fonctionne au mieux sur plusieurs phases.

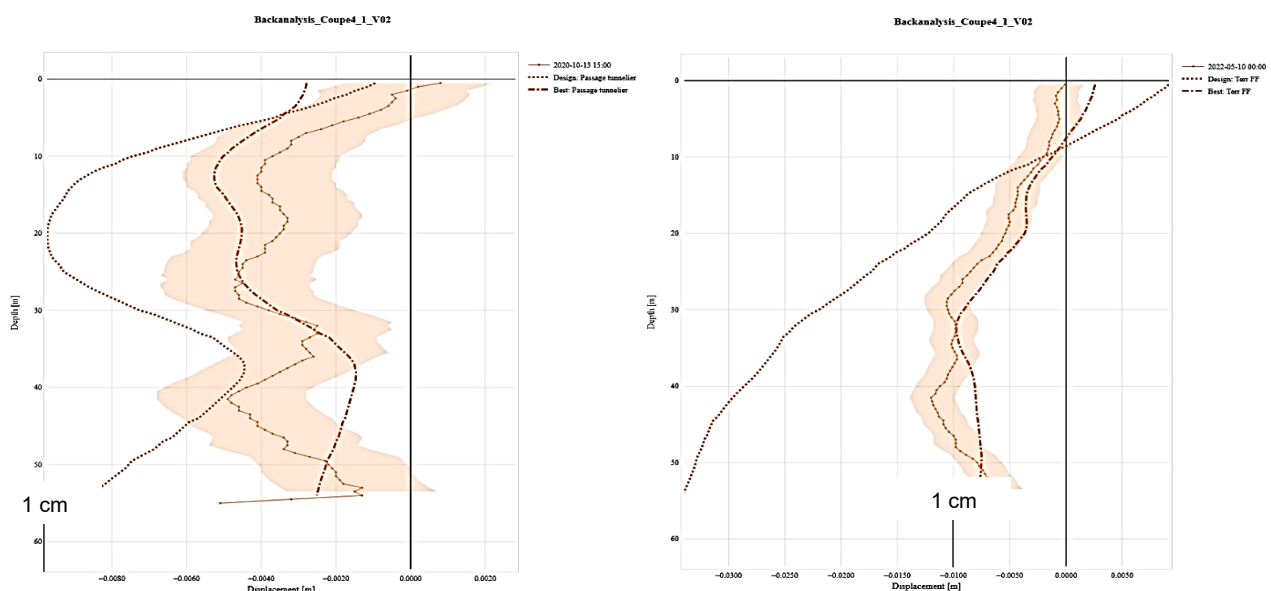


Figure 5 : Courbes des résultats de la troisième analyse pour 2 phases (passage TBM et FF)

Cette rétro-analyse a donnée des résultats assez concluants. Un décalage important est visible entre 35 et 50m de profondeur qui est à analyser en considérant la possibilité que le tube inclinomètre ait pu être endommagé à cet endroit. Les résultats ont été jugés acceptables sauf pour la tête de paroi où un décalage important est toujours présent (~4mm).

[4] **Quatrième rétro-analyse** : une dernière rétro-analyse sur cet ouvrage a été réalisé afin de vérifier si les ratios E_{ur}/E_{50} pris sont corrects pour les couches modélisées. Afin de limiter le nombre de paramètres, un jeu de paramètres a été créé sur la base des résultats des analyses précédentes.

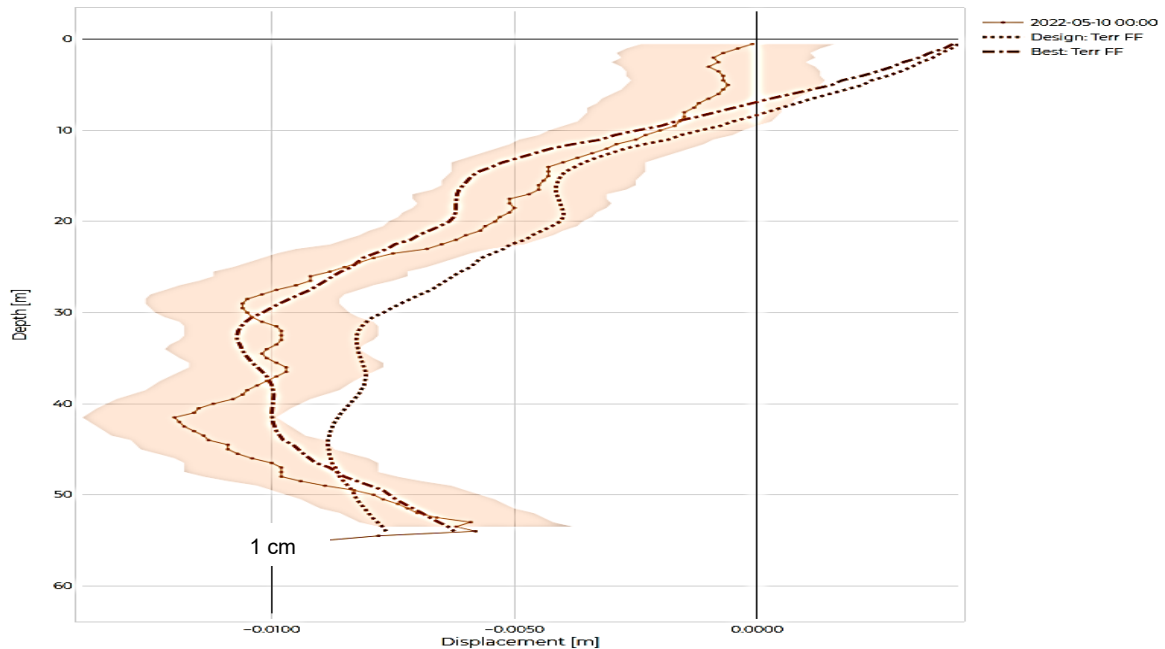


Figure 6 : Courbes des résultats de la quatrième rétro-analyse (Phase fond de fouille)

Pour cette analyse, on note que la courbe se rapproche grandement des données d'auscultation et que, à l'exception des 5 premiers mètres où un décalage subsiste, l'ensemble de celle-ci se trouve au sein du buffer créé. Le tableau suivant présente les résultats des paramètres optimisés.

Tableau 2 : Résultats de la quatrième rétro-analyse

Formation	Variable	Valeur de design	Valeur min	Valeur max	Valeur optimale	Pourcentage optimale / design
03.2.0_CG sup	E_{ur} (kN/m ²)	1400000	1400000	3006416	2007898	+30%
03.3.0_CG inf	E_{ur} (kN/m ²)	1600000	1600000	3623968	2362100	+32%
04.0_Sables supérieur	E_{ur} (kN/m ²)	720000	720000	2455936	1600797	+55%
05.0_FG	E_{ur} (kN/m ²)	120000	120000	1022376	349104	+66%
06.0_Sables d'Auteuil	E_{ur} (kN/m ²)	120000	120000	897512	570544	+79%
04.0_Sables supérieur	c' (kN/m ²)	13,5	0,2	59	0,62	-95%
05.0_FG	c' (kN/m ²)	43	10	122	13,2	-69%
07.0_Argile Plastique	c' (kN/m ²)	58,1	35	154	80,05	+38%

On remarque que les modules E_{ur} ont tous augmenté. Cette augmentation signifie que les rapports E_{ur}/E_{50} pris lors du dimensionnement sont conservateurs et sont en réalité plus importants.

4 Gare de Vert-de-Maisons de la future ligne 15

Le projet du tronçon 2 de la ligne 15 Sud est la création d'une partie de la nouvelle ligne 15 du Grand Paris. La Gare de Vert de Maisons est située dans la commune de Maisons-Alfort dans le département du Val de Marne. Cette gare se trouve dans une zone moyennement urbanisée faisant de cet ouvrage une installation sensible. Plusieurs avoisinants entourent ce chantier.



Figure 7 : Localisation des avoisinants de la Gare de Vert de Maisons

4.1 Contexte géotechnique

Le tableau ci-après présente les formations géologiques présentes et les paramètres géotechniques retenus pour l'étude

Tableau 3 : Paramètres géotechniques retenus par formations

Formation géologique	Poids volumique		Résistance au cisaillement				Caractéristiques Pressiométriques			Modules de chargement	Modules de déchargement
	γ_h	γ_d	c'	c_u	ϕ'	ψ	E_M	pl^*	α	E'	E'_{ur}
	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°	°	MPa	MPa	-	MPa	MPa
Remblais	18	-	5	15	30	30	5	0,6	1/2	30	90
Alluvions modernes	20	-	5	40	25	20	5	0,5	1/2	30	90
Alluvions anciennes	20	-	0	0	35	35	30	3,5	1/3	273	819
Calcaire de St-Ouen	17	-	20	90	30	20	35	4	1/2	210	630
Sables de Beauchamp	21	-	20	80	30	27	25	2,5	1/2	150	450
Marnes et Caillasses altérées	20	-	15	90	35	25	30	3,5	1/2	180	540
Marnes et Caillasses saines	19	-	40	180	35	30	150	6,5	1/2	900	2700
Calcaire grossier	21	-	100	100	40	40	330	7	1/2	1980	5940
Sables Supérieurs et de Cuise	20	-	0	-	38	38	55	4	1/2	110	330
Fausses Glaises	18	-	5	-	30	10	61	4,2	2/3	122	366
Argiles Plastiques	20	-	40	-	15	0	69	2,5	1	69	207

4.2 Etude de sensibilité

Pour déterminer les paramètres ayant le plus d'impact sur les déplacements des parois moulées, une étude de sensibilité a été réalisée et dont les résultats sont présentés sur la figure ci-après.

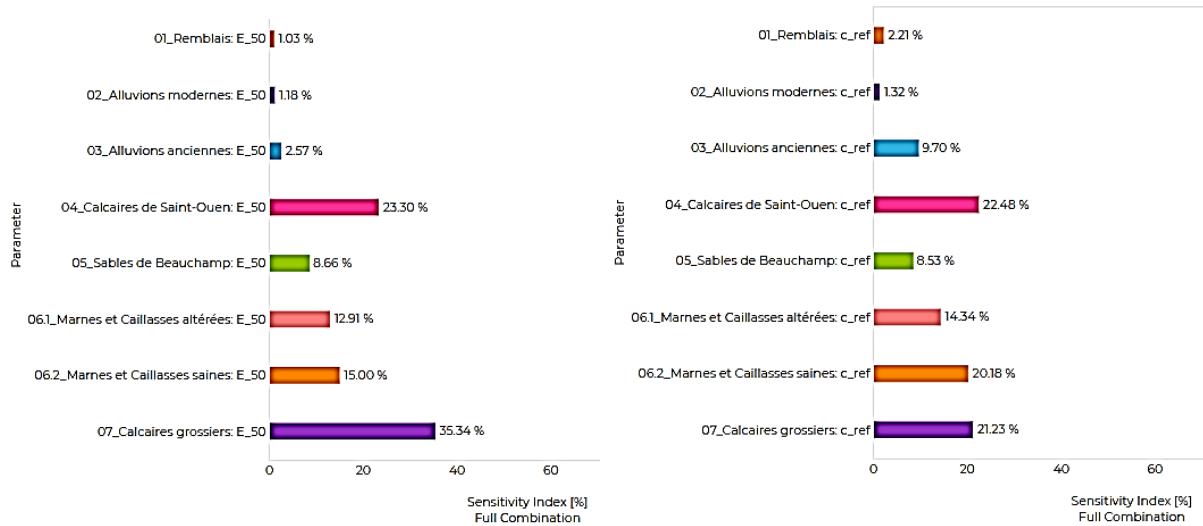


Figure 8 : Résultats de l'étude de sensibilité pour les modules et les cohésions

Les résultats ont permis de permettre de lister les paramètres les plus impactants du modèle :

- Le module E_{50} des Calcaires de Saint-Ouen, des Sables de Beauchamp, des Marnes et Caillasses altérées ou saines et des Calcaires grossiers
- La cohésion des Alluvions Anciennes, des Calcaires de Saint-Ouen, des Sables de Beauchamp, des Marnes et Caillasses altérées ou saines et des Calcaires Grossiers

4.3 Rétro-analyses

La même méthodologie a été appliquée pour la rétro-analyse de cette gare. Seuls les résultats de la dernière étape seront présentés ci-après.

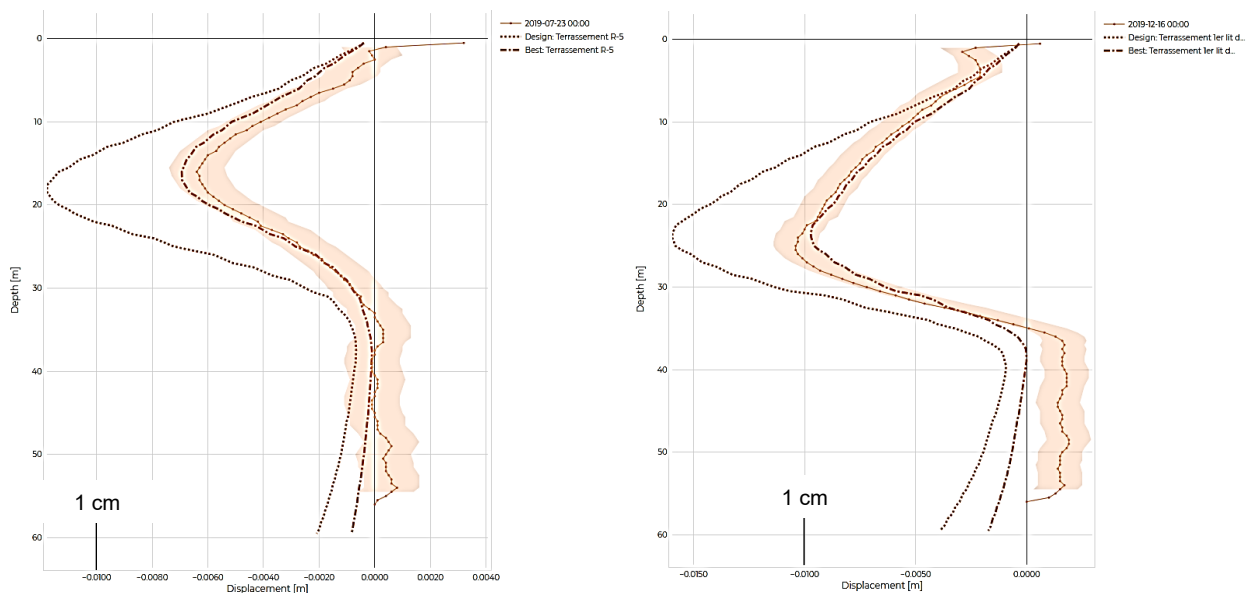


Figure 9 : Courbes des résultats de la rétro-analyse pour 2 phases de travaux

Les courbes montrent que le modèle optimisé est très proche des données d'auscultation, à l'exception des 15 derniers mètres de l'inclinomètre où on remarque une différence de 2mm.

5 Conclusions

Après étude comparative entre les modèles optimaux résultants et les mesures d'instrumentation, plusieurs conclusions ont été tirées :

- Le lien entre le module pressiométrique E_M et le module œdométrique E_{oed} : pour les deux projets étudiés, on remarque que le ratio entre les valeurs de k (coefficient multiplicateur égal au produit du coefficient rhéologique α et du rapport E_{oed}/E_M) rétro-analysées et les valeurs de k utilisées en dimensionnement oscillent entre 2 et 4.

Tableau 4 : valeurs de k déterminées après analyse

Gare	Formation géologique	k_{init}	k	Ratio
Porte Maillot	Remblais	0,67	2,81	4,2
	Marnes et Caillasses supérieures	1,67	2,83	1,7
	Marnes et Caillasses moyennes	1,50	4,28	3,0
	Marnes et Caillasses inférieures	1,13	2,81	2,5
	Calcaire Grossier supérieur	0,75	2,25	3,0
	Calcaire Grossier inférieur	0,83	1,67	2,0
	Sables de Cuise / Sables Supérieurs	1,50	3,00	2,0
	Fausses Glaises	0,95	3,95	4,1
	Sables d'Auteuil	0,57	2,04	3,6
	Argiles Plastiques	1,33	7,03	5,3
Vert de Maisons	Remblais	3,00	-	-
	Alluvions modernes	3,00	-	-
	Alluvions anciennes	3,00	8,44	2,8
	Calcaire de Saint-Ouen	3,00	3,44	1,1
	Sables de Beauchamps	3,00	6,65	2,2
	Marnes et Caillasses altérées	3,00	5,78	1,9
	Marnes et Caillasses saines	3,00	5,45	1,8
	Calcaire grossier	3,00	11,40	3,8

- Etude comparative entre les moments fléchissants des modèles initiaux et optimisés : on remarque que, de manière générale, les modèles optimisés présentent des moments plus faibles et donc potentiellement des économies financières et en impact carbone.

