

MODELISATION D'UN QUAÏ EN PAROI MOULEE AU PORT DU HAVRE

MODELISATION OF A QUAY IN DIAPHRAGM WALL AT THE PORT OF LE HAVRE

Minh Tuan Hoang¹, Antoine Abboud¹, Martin Cahn¹ et Philippe Joignant²

¹ Terrasol (groupe setec), Paris, France

² HAROPA, Le Havre, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la mission d'Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) pour la construction des deux derniers postes à quai 11 et 12 au Port du Havre (Port 2000), une modélisation par éléments finis 2D a été menée pour analyser le comportement du quai en paroi moulée tirantée, en tenant compte du phasage de travaux. Les lois de comportement de type HSM (Hardening Soil Model) et HSS (Hardening Soil-small) ont été utilisées dans les modèles numériques alimentés avec des paramètres issus de différents calages, à partir des essais pressiométriques ou triaxiaux. Les résultats de ces calculs sont comparés aux méthodes aux coefficients de réaction et aux mesures réalisées pendant les travaux.

ABSTRACT – As part of the Assistance of the project owner mission for the construction of the last two quay walls 11 and 12 at the Port of Le Havre (Port 2000), a 2D finite element modeling was carried out to analyze the behavior of the diaphragm wall quay, taking into account the construction phasing. The soil behavior laws such as HSM (Hardening Soil Model) and HSS (Hardening Soil-small) were used for numerical models considering different sets of parameters from various calibrations based on pressuremeter and triaxial tests. The calculation results are compared to measurements taken during the construction works.

1 Introduction

Lancé au début des années 2000 par HAROPA (ancien Grand Port Maritime du Havre regroupé avec les ports de Rouen et de Paris depuis le 1^{er} juin 2021), le projet du Port 2000 est un complexe évolutif d'infrastructures portuaires permettant l'accueil et le traitement de porte-conteneurs au port du Havre. La 1^{ère} phase s'est achevée en 2005 avec la mise en service des 4 premiers postes à quai. La 2^{ème} phase s'est terminée en 2010 avec la mise en service des 6 postes suivants. La 3^{ème} phase, débutée en 2019, consiste à construire les deux derniers postes 11 et 12, de 350 m chacun, qui prolongent les 3 500 m de dix quais existants. Les travaux ont été réalisés par l'entreprise Solétanche-Bachy tandis que la maîtrise d'œuvre est assurée par Haropa.



Figure 1. Localisation des deux postes 11 et 12

L'ouvrage est composé d'une paroi moulée d'une épaisseur de 1,50 m et d'une profondeur de 42 m environ, avec un ancrage hydraulique d'1 m dans l'argile de Villerville. Cette paroi est retenue par deux nappes de tirants passifs faiblement inclinés, posés avec un espacement horizontal de 1,20 m. Ces tirants, mis en place après terrassement sur 18 m de hauteur environ derrière la paroi, sont fixés à un rideau de palplanches à une distance de 50 m par rapport à la paroi. Devant la paroi, le bassin est dragué jusqu'à la cote théorique -18,50 CMH (Cote Marine du Havre) pour pouvoir l'accueil des navires avec un tirant d'eau jusqu'à 17 m. Les futurs portiques de manutention des conteneurs roulent sur les rails situés d'une part sur la poutre de couronnement coiffant la tête de la paroi moulée et, d'autre part, sur une semelle superficielle filante, située 35 m en arrière.

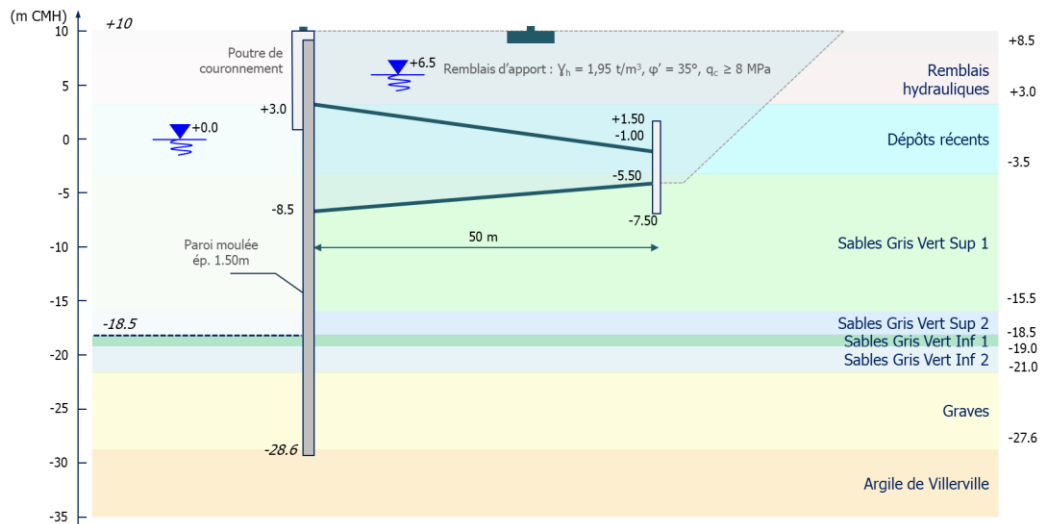


Figure 2. Coupe type de la paroi moulée

2 Contexte géotechnique

Le site est couvert par des remblais terrestre et remblais d'hydraulique déposés lors des phases de travaux précédentes. Les remblais d'aménagement ou remblais terrestres, identifiés en surface sur une épaisseur de 1 à 5 m, sont essentiellement constituée de sables graveleux et de sables limoneux plus ou moins vasards. Les remblais hydrauliques, rencontrés sous les remblais terrestres ou directement en surface sur une épaisseur importante pouvant aller de 5 jusqu'à 12 m, d'origine des travaux d'excavation et dragage des bassins et chenaux, sont essentiellement constitués de sables silteux à silts sableux ainsi que d'argiles et d'argiles silteuses de faible à très faible résistance. Des passages tourbeux, silteux ou argileux organiques sont également rencontrés au sein de cette couche.

Ces remblais reposent sur la série des dépôts alluvionnaires de l'estuaire de la Seine. En haut se trouvent des dépôts récents de nature sablo-silteuse, ponctuellement organique. En bas, il s'agit des dépôts estuariens et marins, nommés Sables Gris Vert Supérieurs et Inférieurs, constitués de sables quartzeux fins micacés, silteux et légèrement organiques.

En profondeur se trouvent des sédiments continentaux, nommés Graves de Fond, constituées de sables moyens à grossiers, graviers et galets siliceux et également des blocs erratiques de grandes dimensions. Le substratum hydraulique correspond aux argiles de Villerville. Cette formation, identifiée à partir de la côte de -28,5/-32 m CMH, est constituée d'argiles noires silteuses, légèrement carbonatées, assez plastiques, fermes à raides avec rares inclusions de petits bancs de calcaire gris et durs discontinus, dans sa partie inférieure, ou de minces lits de coquilles écrasées.

Malgré une similitude du contexte géologique à l'échelle du port, l'analyse des sondages réalisés révèle néanmoins des conditions géotechniques particulièrement plus défavorables aux postes 11 et 12 par rapport aux postes précédents. Les données de sondages provenant des campagnes de reconnaissance géotechnique effectuées le long du quai, du poste 8 au poste 12 ont été analysées. Cette analyse met en évidence une puissance plus importante des remblais hydrauliques et dépôts récents aux deux derniers postes 11 et 12 par rapport aux postes précédents.

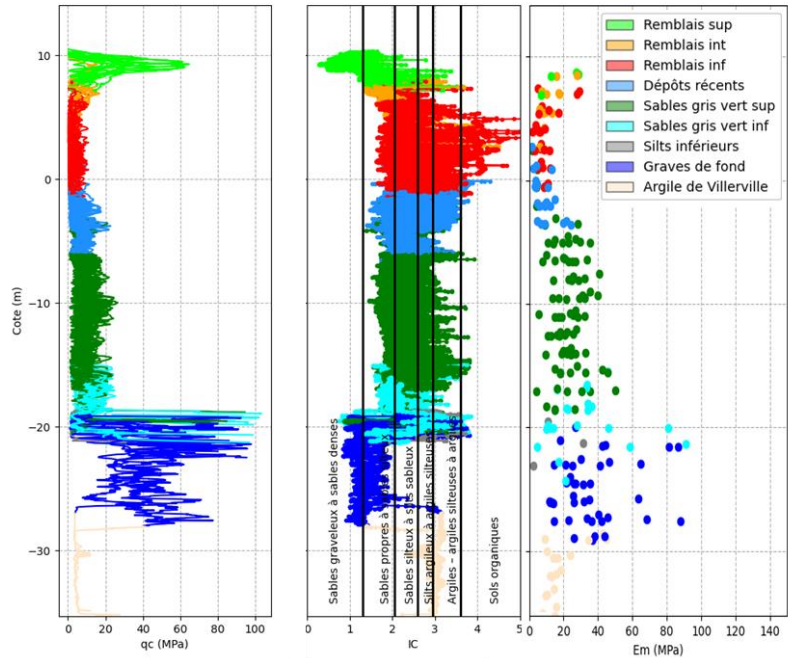


Figure 3. Analyse des sondages géotechniques

L'indice de comportement de Robertson témoigne d'un matériau argileux, silteux avec des passages très fréquents de matière organique dans les remblais hydrauliques et dépôts récents. Les Sables Gris Verts et les Graves de Fond sont relativement homogènes, non seulement en termes d'épaisseur mais aussi en termes de paramètres mécaniques.

3 Calibration des paramètres HSM/HSS

3.1. Modèle HSM/HSS

Le modèle Hardening Soil Model (HSM) est une loi de comportement élasto-plastique hyperbolique à écrouissage isotrope et déviatorique avec un critère de rupture Mohr-Coulomb. La loi HSM permet la prise en compte de l'évolution du module avec la profondeur (en fonction de l'état de contraintes), la distinction entre module de 1^{er} chargement (E_{50}) et celui de déchargement/rechargement (E_{ur}) et la distinction entre comportements en cisaillement et en compression. L'utilisation d'une loi HSM pour modéliser le comportement d'un sol nécessite la calibration de cinq paramètres spécifiques : E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} et E_{ur}^{ref} , R_f , m , en plus des paramètres nécessaires à la définition du critère de rupture Mohr-Coulomb (c' , ϕ') et la dilatance ψ . Le modèle HSS (Hardening Soil-small) est issu du modèle d'origine HSM.

Ce modèle considère la dégradation du module de cisaillement selon la distorsion en phase de rechargement :

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0,385 \times \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0,7}} \right|}$$

γ est la distorsion et G_s est le module de cisaillement sécant.

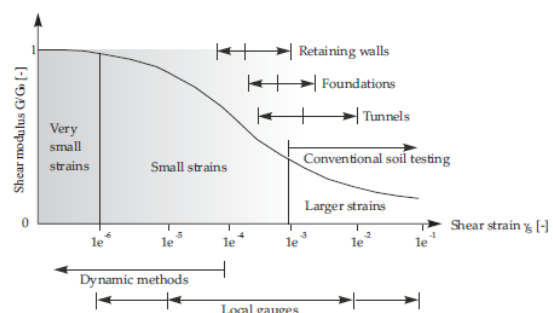


Figure 4. Corrélation $G_s/G_0 - \gamma$ selon Atkinson & Salfors (1991)

En plus de l'ensemble de paramètres du modèle d'origine HSM et deux paramètres supplémentaires sont introduits dans la loi HSS : le module de cisaillement G_0 à très faibles distorsions ($\gamma \sim 10^{-6}$) et la distorsion de référence $\gamma_{0.7}$ pour laquelle $G_s = 0,722G_0$. Le modèle HSS présent l'avantage de pouvoir caractériser le sol à faible niveau de distorsion.

Les paramètres E_{50}^{ref} et m peuvent être défini à partir d'essais in-situ ou laboratoire. Les autres paramètres des modèles HSS/HSM peuvent être définis à l'aide des corrélations proposées dans la bibliographie telles que (Benz, 2007) :

- $E_{50}^{ref} \approx E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$;
- $\gamma_{0.7} \approx 10^{-4}$ pour $IP = 0$;
- $E_0^{ref} \approx 3E_{ur}^{ref}$, donc $G_0^{ref} \approx 1,25E_{ur}^{ref}$ avec $\nu_{ur} = 0,2$.

3.2. Estimation des paramètres E_{50}^{ref} , m à partir d'essais pressiométriques

Cette approche, largement utilisée pour alimenter des calculs de soutènement, est simple à utiliser et donne souvent une bonne cohérence avec les calculs aux coefficients de réaction. Pour les gammes de déformation classiques rencontrées sur les écrans de soutènement, de l'ordre de 10^{-4} , le module E_{50}^{ref} peut être pris égal à $2E_M/\alpha$ et la variation du module avec la profondeur au sein d'une couche est souvent négligée ($m = 0$, $E_{50} = E_{50}^{ref}$). La pertinence de l'approche dépend également fortement des essais pressiométriques, parfois réalisés en trop faible quantité et de mauvaises qualités.

3.3. Estimation des paramètres E_{50}^{ref} , m à partir d'essais triaxiaux

La formulation pour définir E_{50}^{ref} et m à partir d'essais triaxiaux CD est illustrée ci-dessous :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1}$$

$$a = \frac{1}{E_i}, b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}, R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$$

$$E_{50} = E_i \left(1 - \frac{R_f}{2}\right)$$

La démarche ci-dessus est reconduite sur plusieurs échantillons cisailés avec des contraintes de confinement σ'_3 différentes.

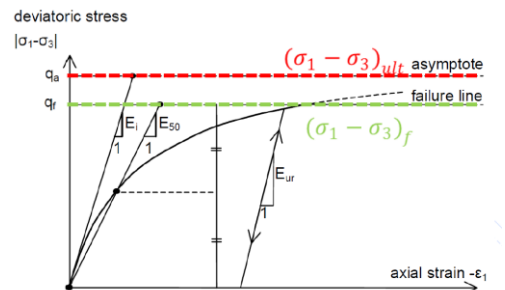


Figure 5. Calage E_{50} à partir d'un essai triaxial

La dépendance du module E_{50} à σ'_3 s'exprime comme : $E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma'_3}{p_{ref}}\right)^m$

Le calage des paramètres E_{50}^{ref} et m est établi à partir d'une régression en puissance sur une projection log-log de l'ensemble des E_{50} déterminés à une étreinte σ'_3 donnée (et pour une pression de référence $p_{ref} = 100$ kPa).

Dans le cadre de l'étude, 45 essais triaxiaux ont été exploités pour caler E_{50}^{ref} et m . Les résultats de calage pour deux couches : Sables Gris Verts Supérieurs et Graves sont présentés ci-dessous.

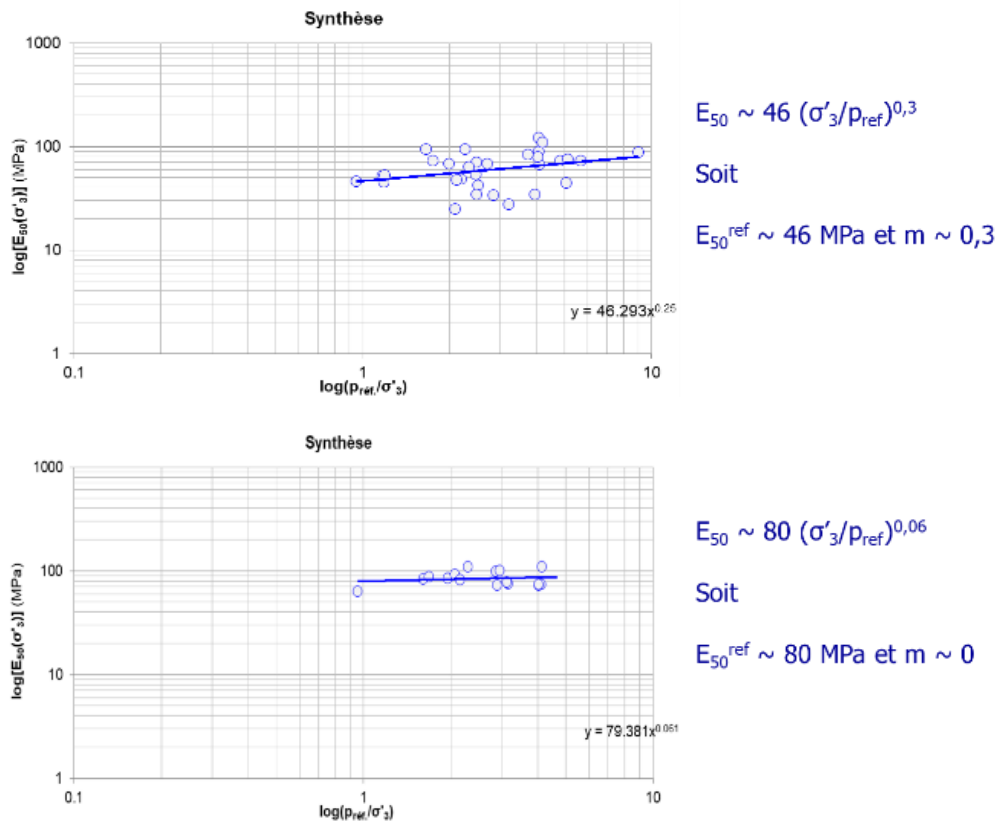


Figure 6. Résultats de calage triaxial dans les Sables Gris Verts Supérieurs 1 et Graves de Fond

3.4. Comparaison des paramètres E_{50}^{ref} , m obtenus

Les modules E_{50}^{ref} issus de la calibration sur les essais triaxiaux sont largement plus faibles que ceux obtenus par la corrélation à partir des essais pressiométriques. La stratigraphie et le profil du module pressiométrique retenus sont issus du sondage le plus proche de la coupe de calcul.

Tableau 1. Comparaison des paramètres E_{50}^{ref} , m retenus à partir des deux approches

Formation	Toit	Base	Approche pressiométrique		Approche triaxiale	
	(CMH)	(CMH)	E_{50}^{ref} (MPa)	m	E_{50}^{ref} (MPa)	m
Remblais terrestres	9.2	8.5	78	0	28	0.4
Remblais hydrauliques	8.5	3.0	90	0	52	0
Dépôts Récents	3.0	-3.5	40	0	31	0.5
Sables Gris Vert Sup 1	-3.5	-15.5	150	0	46	0.3
Sables Gris Vert Sup 2	-15.5	-18.5	140	0	43	0.4
Sables Gris Vert Inf 1	-18.5	-19	90	0	30	0.5
Sables Gris Vert Inf 2	-19	-21	216	0	30	0.5
Graves de Fond	-21	-27.6	288	0	80	0
Argiles de Villerville	-27.6	-	39	0	26	0

4 Modélisation numérique et confrontation aux mesures

Sept chaînes inclinométriques (IPI) sont mises en œuvre dans les panneaux de la paroi moulée le long des poste 11 et 12.

Les résultats issus de l'IPI 12 et 24 sont exploités pour comparer avec les résultats du calcul.

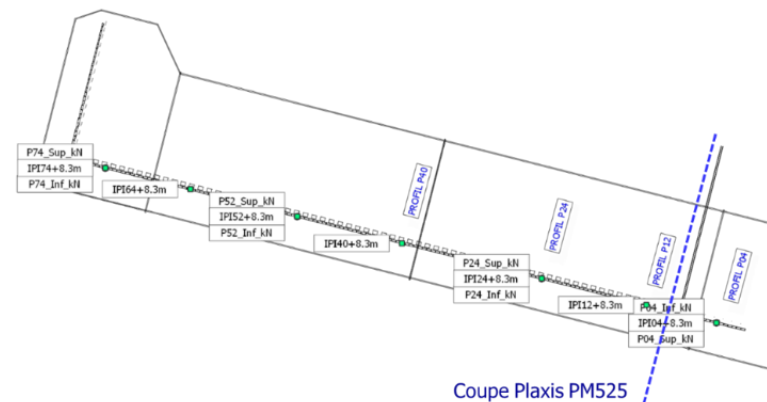


Figure 7. Implantation des IPIs le long de la paroi

Lors des études d'exécution, une modélisation EF a été réalisée en considérant deux jeux de paramètres issus d'essais pressiométriques (HSM pressiométrique) et triaxiaux (HSS triaxial), avec une comparaison aux résultats obtenus par l'entreprise (modèle EF HSM et modèle aux coefficients de réaction utilisant l'approche pressiométrique). A la fin des travaux, un rétro calage a été mené pour intégrer les conditions réelles, telles que le niveau du terrain, du dragage et le niveau de la marée, suivi d'une confrontation détaillée avec les mesures. Les paramètres de sol retenus (HSM pressiométrique et HSS triaxial) restent inchangés.

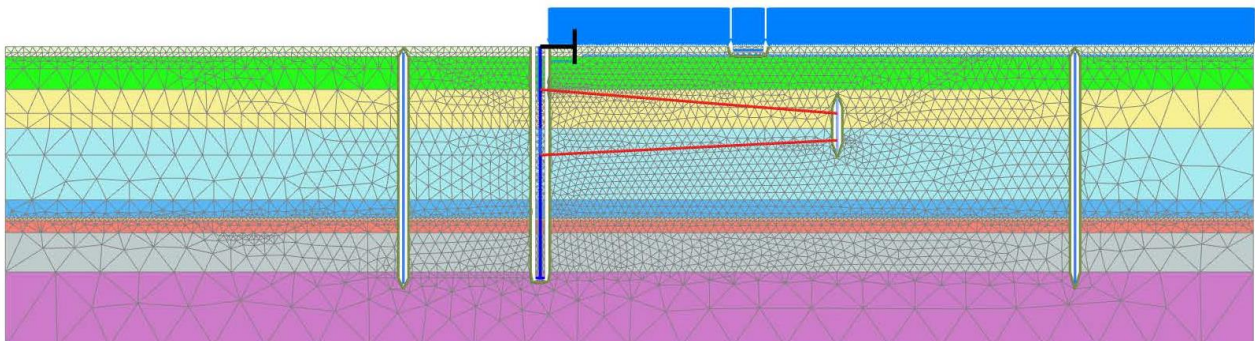


Figure 8. Modèle aux EF Plaxis 2D (*)

(*) Les surcharges sur terre-plein sont appliquées après la phase de dragage final. L'appui fixe en tête est modélisé pour simuler la rigidité de la poutre de couronnement.

Les deux modèles à comparer avec les mesures sont HSM pressiométrique et HSS triaxial. Le modèle HSM pressiométrique conduit à des résultats similaires à ceux du modèle conduit par l'entreprise avec les mêmes hypothèses.

Le phasage considéré dans le calcul est indiqué comme suit. Les phases prises en compte pour la comparaison avec les mesures sont mises en gras.

1. Phase initiale
2. Rabattement de nappe, talus côté mer et paroi moulée
3. Terrassement pour masque d'accostage et poutre de couronnement
4. **Masque d'accostage et poutre de couronnement**
5. Terrassement intermédiaire du terre-plein
6. Terrassement pour tirant T2
7. Réalisation des palplanches
8. Pose tirant T2

9. Remblaiement pour tirant T1
10. Pose tirant T1
11. Remblaiement final (à +9.4 m CMH) du terre-plein et dragage à -1 m CMH
12. Dragage final (à -18.3 m CMH)

Pendant les étapes d'excavation et de la réalisation du génie civil du côté mer, la paroi s'incline vers le futur bassin. L'excavation du côté terre pour mettre en place les deux lits de tirants entraîne un basculement de la paroi vers les terre-pleins. Un déplacement en tête de 12 cm en phase 10 (pose des tirants T1) a été mesuré. L'installation des tirants et le remblaiement a permis de redresser la paroi et réduire ses déplacements à 6-7 cm. Lors de la phase de dragage, les déplacements sont encore diminués sans qu'un basculement vers le bassin ne soit observé.

Dans toutes les phases, le modèle HSS triaxial donne les résultats en très bonne cohérence avec les mesures. Le modèle utilisant l'approche pressiométrique sous-estime des déplacements. Les moments obtenus par le modèle HSS triaxial sont également plus importants que ceux obtenus par le modèle HSM pressiométrique.

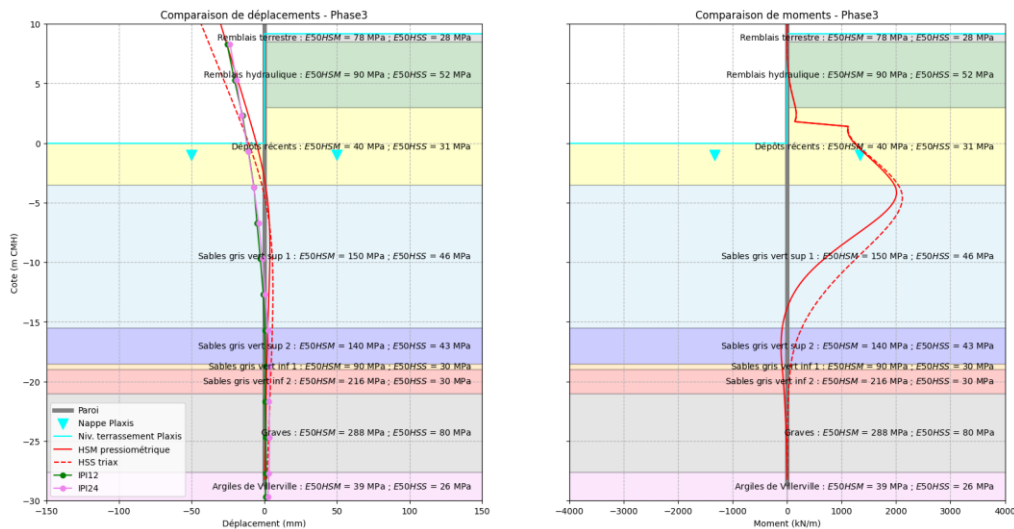


Figure 9. Résultats de la phase 4 – Masque d'accostage et poutre de couronnement

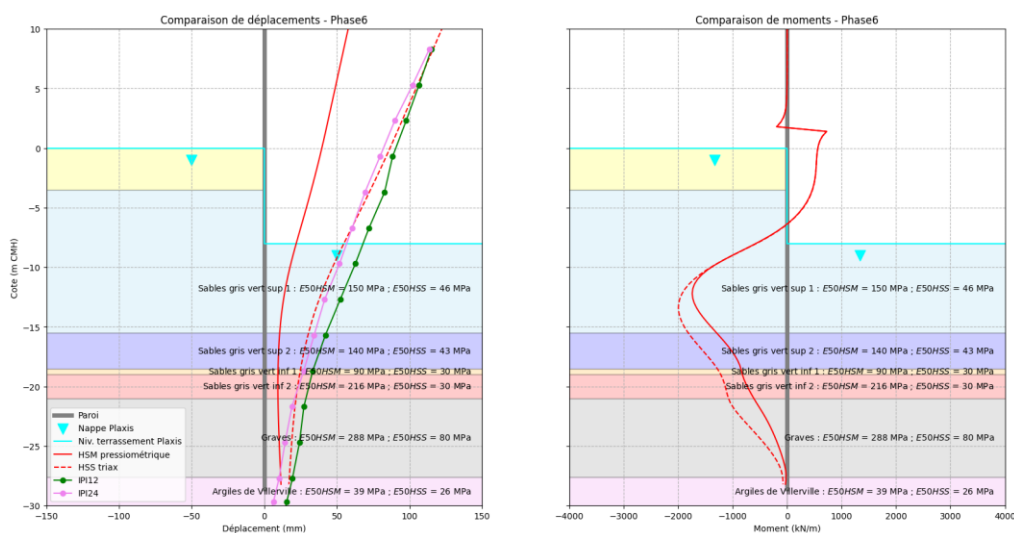


Figure 10. Résultats de la phase 6 – Terrassement pour tirant T2

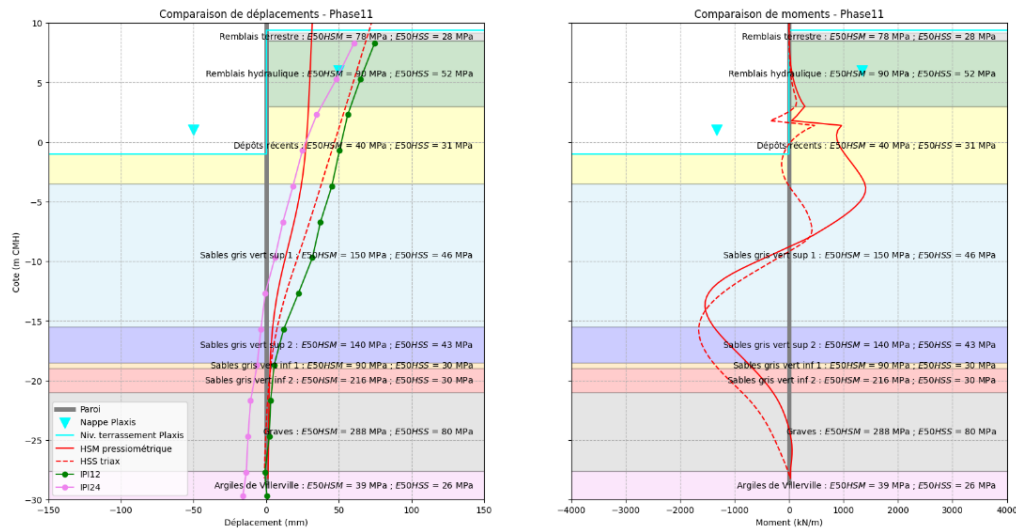


Figure 11. Résultats de la phase 11 – Remblaiement final du terre-plein et dragage à -1 m CMH

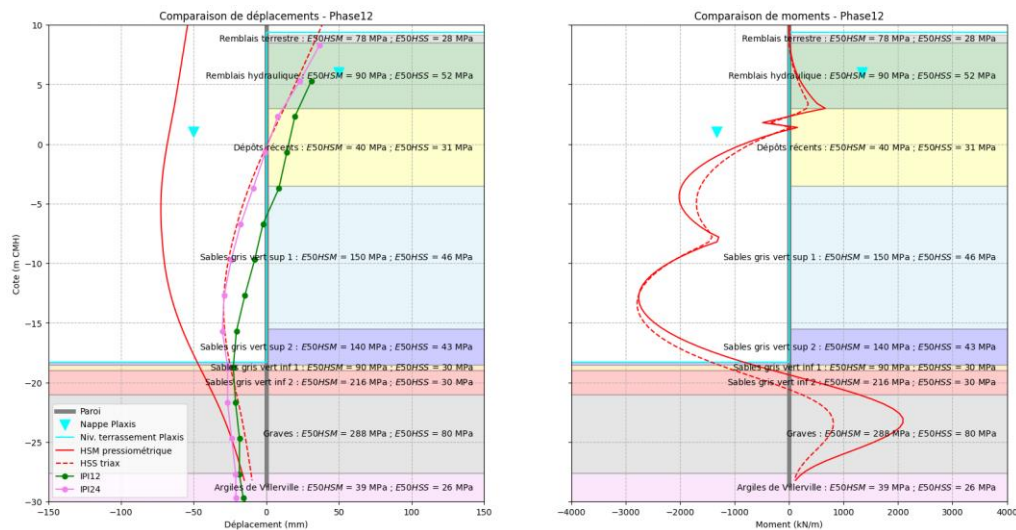


Figure 12. Résultats de la phase 12 – Dragage final (à -18.3 m CMH)

5 Conclusions

Le modèle HSS calibré sur les essais triaxiaux donne les résultats en très bonne cohérence avec les mesures. Le calage à l'aide des essais triaxiaux est particulièrement pertinent, notamment dans le cas de grande déformation (supérieure à 0,1%), pour lesquelles le lien classique avec les essais pressiométriques ($E_{50}^{ref} = 2E_M/\alpha$) peut être mis en défaut.

6 Références bibliographiques

- Benz Thomas (2007). Small-strain stiffness in soils and its numerical consequences
- Ph. Joignant & A. Bernardet (2011). La méthode des éléments finis dans les grands projets : Port 2000 - Le Havre. Journée technique CFMS.
- S. Marten & L. Delattre et al. (2006). Comportement observé du mur de quai du nouveau « Port 2000 », Le Havre, France. 16th IGSMGE.
- Hoang, M.T., Cuiru, F., Dias, D. et Miraillet, P. (2018). Estimation du rapport E/EM : application aux radiers de grandes dimensions. JNGG 2018
- Atkinson J. H., Salfors G. (1991). Experimental determination of soil properties. General Report to Session 1. 1991, 3, Proceedings of the 10th ECSMFE, Florence, 915–956.