

Etude du comportement des sols quasi-saturés – Cas pratique des marnes d'Argenteuil sur la gare de Clichy-Montfermeil.

Study of the behaviour of quasi-saturated soils – Practical case of the Argenteuil marls at the Clichy-Montfermeil station.

Missom OUEDRAOGO^{1*}, Dino MAHMUTOVIC¹, Fabrice EMERIAULT², Luc BOUTONNIER¹

1 EGIS SE—Géotechnique, Seyssins, France

2 Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, Grenoble, France

**missom.ouedraogo@egis-group.com*

RESUME: Le présent article s'intéresse au comportement des sols dans le domaine quasi-saturé, à travers une étude menée sur les marnes d'Argenteuil, sur la future gare de Clichy-Montfermeil. Ces sols étant réputés gonflants, l'objectif est de proposer une approche hydromécanique permettant d'expliquer ce comportement complexe. L'étude comprend deux volets. Le premier volet, expérimental, repose sur une instrumentation in situ impliquant la conception et la mise en œuvre d'un dispositif pour mesurer la réponse des sols lors des travaux d'excavation. Ainsi, le chantier de la gare de Clichy-Montfermeil a été instrumenté au niveau du fond de fouille, dans les marnes d'Argenteuil. Les instruments ont été installés avant les travaux, depuis la surface. Le choix des capteurs, leur nombre et la méthode de mise en place ont été définis pour garantir la continuité des mesures. Cette approche a permis un suivi continu des pressions interstitielles et des déplacements au fond de fouille durant l'excavation et la pose du radier. Ce type de données est peu courant dans la littérature et présente un premier intérêt de cette étude.

Le second volet, numérique, s'appuie sur les données issues de l'instrumentation. Une démarche de rétro-analyse a été entreprise, consistant, à partir d'une approche analytique simplifiée (Sol homogène, modèle élastique linéaire), à converger vers des modèles numériques plus complexe mais plus réalistes en introduisant : un fluide homogène compressible équivalent au mélange air+eau, un couplage hydromécanique via le coefficient B de Skempton, et un modèle élastoplastique non linéaire (HSM) dans le sol. Cette approche progressive a permis d'expliquer les différentes mesures. Elle a mis en évidence le rôle central du coefficient de Skempton dans l'estimation de la réponse du sol. Enfin, elle a mis en évidence l'impact considérable des choix de conditions aux limites dans ce type de problèmes.

ABSTRACT: This article focuses on the behavior of soils in the quasi-saturated domain, through a study conducted on the Argenteuil marls at the future Clichy-Montfermeil station. As these soils are known for their swelling potential, the objective is to present a hydromechanical approach to explain this complex behavior. The study consists of two parts. The first part, experimental, is based on in situ instrumentation involving the design and implementation of a system to measure the soil response during excavation works. Thus, the Clichy-Montfermeil station construction site was instrumented at the bottom of the excavation, in the Argenteuil marls. The instruments were installed before the works, from the surface. The choice of sensors, their number, and the installation method were defined to ensure the continuity of measurements. This approach enabled continuous monitoring of pore water pressures and displacements at the bottom of the excavation during excavation and the installation of the raft slab. Such data is rare in the literature and represents a primary interest of this study.

The second part, numerical, is based on data from the instrumentation. A back-analysis approach was adopted, starting from a simplified analytical approach (homogeneous soil, linear elastic model) and progressing towards more complex but more realistic numerical models by introducing: a homogeneous compressible fluid equivalent to the air+water mixture, a hydromechanical coupling via Skempton's B coefficient, and a nonlinear elastoplastic model (HSM) in the soil. This progressive approach made it possible to explain the various measurements. It highlighted the central role of Skempton's coefficient in estimating the soil response. Finally, it demonstrated the considerable impact of boundary condition choices in this type of problem.

Mots-clés: Quasi saturé ; Air occlus ; pression d'eau ; compressibilité ; coefficient B de Skempton ; perméabilité.

1 INTRODUCTION

Cet article analyse des mesures in situ de déplacements et de pressions interstitielles acquises lors de phases de déchargement liées à des excavations. À partir d'une interprétation en contraintes effectives fondée sur le coefficient de Skempton et sur des modèles théoriques et numériques simplifiés, l'influence de l'air occlus sur la réponse instantanée et différée des sols fins proches de la saturation est mise en évidence.

2 ASPECTS THEORIQUES – COMPORTEMENT NON SATURE DANS LES SOLS FINS

Les sols fins saturés ont une réponse en deux temps lorsqu'ils sont soumis à une sollicitation.

Dans un premier temps, la sollicitation est directement reprise par l'eau sous forme de variation de pression interstitielle. La contrainte effective varie peu. Dans ce cas il n'y a quasiment pas de déformation instantanée.

Ensuite, la pression générée est progressivement transférée au squelette solide, engendrant une déformation graduelle. On introduit le coefficient B de Skempton (Skempton, 1954) défini par la relation ci-dessous. Les paramètres c_s et c_f représentent respectivement la compressibilité du squelette du sol et du fluide.

$$B = \frac{du_w}{dp} = \frac{1}{1+n\frac{c_f}{c_s}} \quad (1)$$

Le coefficient B permet de répartir une charge appliquée entre la phase solide du sol et sa phase fluide. Si on revient au cas d'un sol fin saturé en eau, la compressibilité de l'eau pure est très faible par rapport à celle du sol. Ce qui conduit à un coefficient B de 1, indiquant que toute la sollicitation passe dans le fluide.

Lorsque le sol contient quelques bulles d'air (sol quasi saturé), la compressibilité du mélange air+eau augmente rapidement, entraînant une diminution de B. Une partie de la sollicitation - qui vaut théoriquement $(1-B) \cdot \text{Sollicitation}$ - passe donc directement dans le squelette, entraînant une déformation instantanée et non drainée. L'impact du degré de saturation sur le coefficient B de Skempton est mis en évidence de manière expérimentale par plusieurs auteurs. On peut par exemple se référer à (Yoshimi et al, 1989) et (Oostveen, 2005).

La compressibilité du fluide et le coefficient de Skempton sont donc deux paramètres clé dans la définition du comportement des sols dans le domaine quasi-saturé.

Afin d'intégrer l'impact de la présence de faibles quantités d'air dans la réponse des sols fins, plusieurs auteurs proposent des relations théoriques et/ou empiriques entre compressibilité du fluide et degré de saturation. On peut citer par exemple : (Hilf, 1948) ; (Hasan et Fredlund, 1980) ; (Boutonnier, 2007 ; Mahmutovic, 2016 ; Boutonnier et al., 2019).

Les données récoltées dans les marnes d'Argenteuil dans le cadre de l'instrumentation de la Gare de Clichy-Montfermeil pourront servir à mettre en évidence l'impact de ces paramètres.

3 PRESENTATION DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

Le dispositif de mesure a été présenté de manière détaillée dans (Ouédraogo, 2024). Les grandes lignes sont reprises dans le présent article.

3.1 Contexte et objectifs

La gare de Clichy-Montfermeil est située à l'est de Paris sur la future ligne 16 de métro. Il s'agit d'un ouvrage enterré en forme de bilobe disymétrique (cf. Figure 1). Le fond de fouille se situe à 30m de profondeur. Le radier de l'ouvrage repose sur les marnes d'Argenteuil qui sont réputées gonflantes.

Ainsi, en complément des études d'interactions entre le sol et le radier, un dispositif d'instrumentation a été mis en place afin de suivre la réponse du sol sous le radier pendant et après les travaux. Profitant de cette opportunité, la thèse (Ouédraogo, 2024) s'est inscrite dans le projet d'instrumentation, afin de bénéficier des mesures de la réponse des marnes pendant les phases d'excavation.



Figure 1: Photo aérienne de la gare (Source SGP)

La Figure 2 présente une coupe verticale au droit de la gare. En dessous du radier, on a une couche de marne d'Argenteuil plus ou moins épaisse en fonction de la zone. Cette couche repose sur une couche plus raide de marne Gypseuse.

3.2 Matériel et méthodes

Le dispositif mis en place comprend :

- 2 chaînes d'élongamètres,
- 5 capteurs de pression interstitielle dont 3 capteurs de type tensiomètre a haute capacité,
- 4 cellules de pression totale.

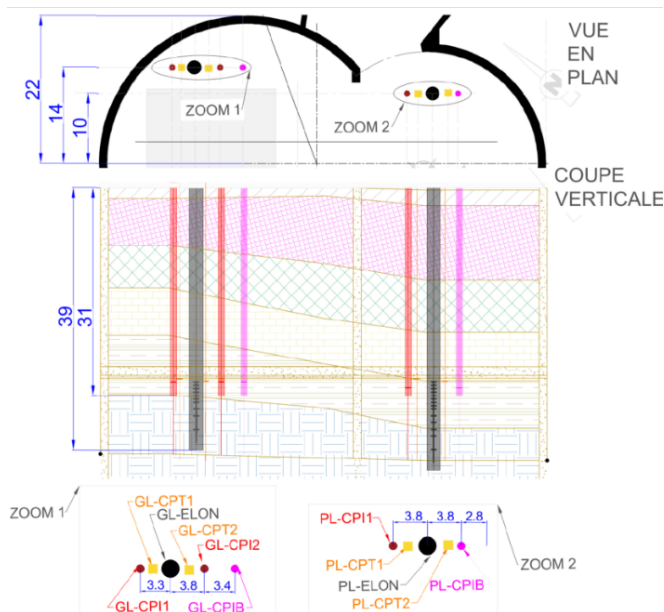


Figure 2: Stratigraphie au droit de la gare et implantation de l'instrumentation (Ouédraogo,2024)



Figure 3: Instruments installés (a: élongamètres, b: piézomètre, c: cellule de pression totale, d: tensiomètre à haute capacité)

3.2.1 Les capteurs de pression interstitielle (CPI)

Les capteurs de pression interstitielle permettent de mesurer la pression de l'eau dans le sol. Deux types de capteurs ont été mis en place.

Tout d'abord, deux CPI classiques ont été installées. Elles sont constituées d'un réservoir et d'une pierre poreuse. Elles fonctionnent grâce à une mise à l'équilibre entre l'eau du réservoir et l'eau du sol. Ce type de dispositif permet de mesurer avec une bonne précision les pressions d'eau positives. En revanche, lorsque les pressions deviennent négatives, leur capacité de mesure est limitée à environ -100 kPa. En dessous de cette valeur, les mesures sont affectées par le phénomène de cavitation de l'eau dans le capteur.

Afin de pallier cette limitation, des tensiomètres à haute capacité ont également été mis en place. Ces capteurs permettent de mesurer des pressions interstitielles négatives pouvant atteindre -1500 kPa grâce notamment de l'utilisation de pierre poreuses à haute valeur d'entrée d'air.

La Figure 3 présente les deux types de capteurs de pression interstitielle mis en place.

3.2.2 Les chaînes d'élongamètres

Un élongamètre est un dispositif permettant de mesurer des déplacements relatifs par l'allongement ou le raccourcissement d'un tube télescopique.

Plusieurs élongamètres peuvent être assemblés afin de former une chaîne d'élongamètres. Installée verticalement au sein d'une couche de sol, cette chaîne permet de mesurer les phénomènes de tassement ou de gonflement à différentes profondeurs.

Deux chaînes d'élongamètres ont été mises en place. Le nombre et la longueur des élongamètres ont été définis de manière à couvrir l'intégralité de l'épaisseur de la couche des marnes d'Argenteuil, tout en assurant l'ancrage des derniers capteurs dans la couche de gypse sous-jacente.

Dans le grand lobe, la chaîne est constituée de 10 élongamètres répartis sur une hauteur de 9 m et numérotés de GL_ELON_1 à GL_ELON_10.

Dans le petit lobe, la chaîne est constituée de 14 élongamètres répartis sur une hauteur de 12 m.

La Figure 3 illustre les élongamètres utilisés dans le cadre de ce projet.

3.2.3 Les cellules de pression totale

Les cellules de pression totale permettent d'évaluer la contrainte totale s'exerçant en un point.

Placées en sous-face du radier, elles permettent de mesurer l'effort appliqué par le sol sur le radier. La Figure 3 présente le modèle de cellules mises en place.

3.2.4 Disposition et mise en place

Les capteurs ont été placés 1 m sous le fond de fouille. Ils ont été installés depuis la surface à travers des forages, après la première phase de terrassement. La

disposition des équipements a été déterminée de manière à faciliter le déroulement des travaux et ainsi garantir la pérennité de ces capteurs. La Figure 2 présente l'implantation des différents capteurs.

Afin de garantir une bonne continuité entre le capteur et le sol, un coulis de ciment a été mis en place dans chaque forage.

Les capteurs ont été raccordés à des centrales d'acquisition qui ont permis d'effectuer entre 4 et 8 mesures par jour.

3.3 Résultats de l'instrumentation

Dans ce paragraphe, les résultats relatifs à l'évolution des pressions interstitielles et du déplacement vertical dans le grand lobe sont présentés. Ces résultats ont servi de base à une retro-analyse.

3.3.1 Courbe de travaux

Les figures qui suivent présentent les résultats de quelques instruments. Sur chaque graphe de résultat, la courbe de travaux est représentée selon l'axe des ordonnées à gauche. Il s'agit d'une courbe qui représente l'évolution de la cote du fond de fouille en fonction du temps.

Sur cette courbe, on distingue des périodes d'excavations et des périodes de repos. Ces dernières correspondent à des périodes de travaux de génie civil (construction de butons ...).

3.3.2 Origine des temps

L'origine des temps est fixée au jour de début des terrassements. Les capteurs ont été installés après une première phase de terrassement. L'ensemble des graphes commencent autour de 70 j.

3.3.3 Déplacements verticaux

La Figure 4 présente les déplacements verticaux issus de l'élongamètre du grand lobe lors de la phase de terrassement.

La courbe GL_ELON_10 représente le déplacement mesuré par le capteur à la base de la chaîne d'élongamètre. Ensuite, la courbe GL_ELON_9 représente le cumul entre les capteurs GL_ELON_9 et GL_ELON_10. Ainsi, la courbe GL_ELON_1 représente le cumul des déplacements mesurés par toute la chaîne.

Les mesures de déplacements mettent en évidence un soulèvement progressif du sol en réponse au déchargement mécanique.

Le comportement mesuré est dépendant de la phase de travaux considérée. Ainsi, pour chaque séquence « déchargement + repos », correspondant respectivement à une phase de terrassement puis à une phase de pause liée à la mise en place d'un buton, on

observe tout d'abord un soulèvement relativement brutal puis d'une phase de soulèvement plus lente, tendant vers une asymptote apparente.

Cette évolution suggère la superposition de deux mécanismes de réponse du sol : une réponse instantanée associée au déchargement, et une réponse différée, nettement plus lente, qui s'étale dans le temps pendant les phases de repos.

Les courbes de déplacements mesurées dans le grand lobe peuvent être organisées en trois ensembles distincts :

Les courbes de tête (1 et 2) sont fortement croissantes. Elles se détachent nettement des autres courbes à partir d'environ 130 jours. Ces courbes sont représentatives de la réponse des Marnes d'Argenteuil,

Les courbes de base (5 à 9) sont aplaties et regroupées, elles présentent des déplacements très faibles par rapport aux courbes de tête. Elles traduisent la réponse des gypses sous-jacentes, validant à l'échelle de l'étude le rôle de substratum de cette couche, les déplacements y étant environ dix fois plus faibles que ceux mesurés dans les marnes.

Les courbes intermédiaires (3 et 4) sont distinctes à la fois des courbes de tête et de base. Elles suivent la même tendance que le paquet supérieur mais avec des amplitudes plus faibles. Elles peuvent être assimilées à une zone de transition entre les marnes et les gypses, ce qui tend à confirmer la cohérence du profil géologique de travail retenu pour cette zone.

3.3.4 Pressions interstitielles

La Figure 5 présente l'évolution de la pression interstitielle dans le grand lobe sur base du capteur GL_CPI_1 (cf. Figure 2). On observe que la pression mesurée est initialement positive, puis devient négative après quelques jours. Il convient de rappeler que le capteur est installé dans un coulis frais, donc à l'état liquide au moment de la pose. La première partie de la courbe traduit ainsi un comportement transitoire résultant à la fois de l'activité du coulis liquide et de celle du sol environnant.

À l'instar des déplacements, deux types de comportement distincts sont observés pour les pressions interstitielles.

D'abord, pendant les phases de déchargement, on observe une diminution brutale de la pression interstitielle. Ce comportement peut être associé à une réponse non drainée du sol, induite par la rapidité des excavations.

Ensuite, pendant les phases de repos, une remontée progressive de la pression interstitielle est mesurée. Cette évolution est interprétée comme une phase de dissipation des surpressions (ou sous-pressions) générées lors de la phase non drainée précédente.

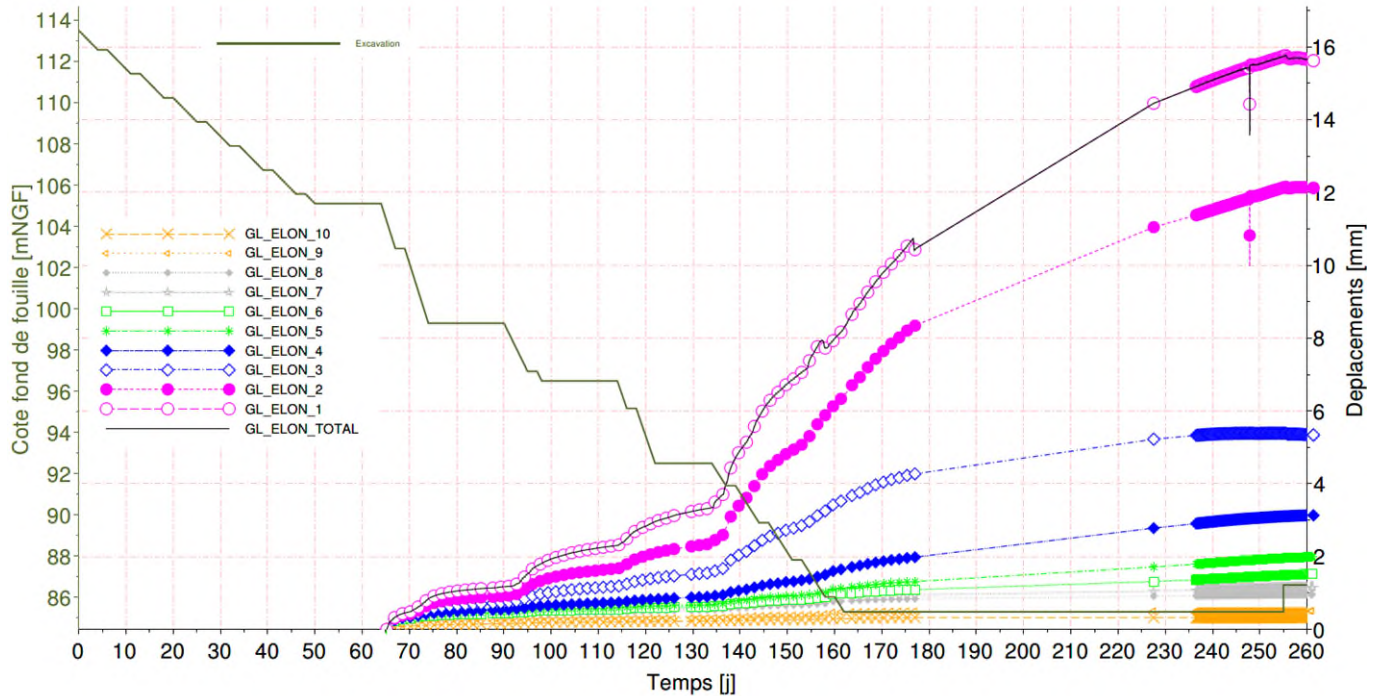


Figure 4: Grand Lobe – Evolution des déplacements verticaux sous GL-ELON

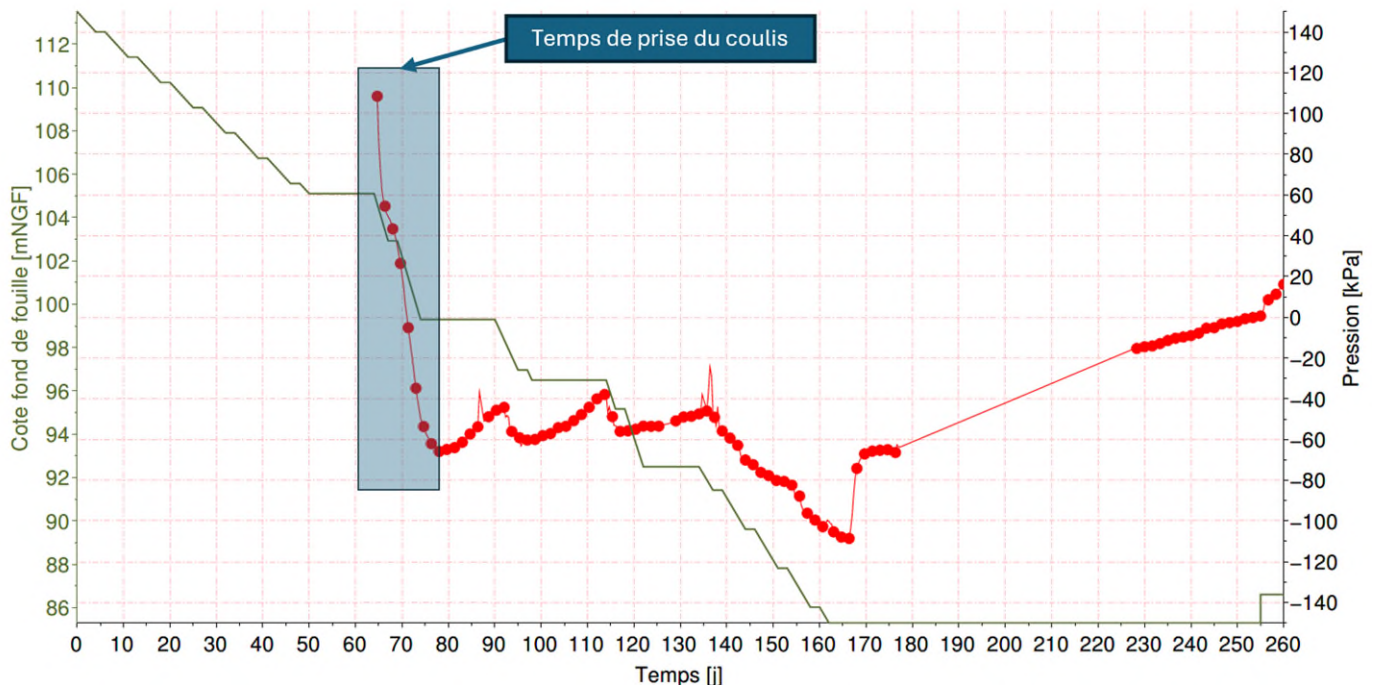


Figure 5: Grand Lobe – Evolution de la pression interstitielle sous GL-CPI 1

4 SIMULATION NUMERIQUE

4.1 Motivation

La Figure 5 présente l'évolution de la pression interstitielle dans le temps. Lors des phases d'excavation, en rapportant la variation de contraintes totales dû au terrassement à la variation de pression interstitielle, on obtient l'évolution du coefficient B de Skempton. Le Tableau 1 ci-dessous présente cette évolution pour les 3 dernières phases de terrassement.

On observe que le coefficient B de Skempton est inférieur à 1 à chaque phase, indiquant un comportement quasi-saturé dans les marnes.

Avec l'avancement de l'excavation, on observe également une augmentation de B qui pourrait s'expliquer par le déconfinement des marnes du fait du déchargement. En effet, si l'on se fie à l'équation 1, on constate que théoriquement le coefficient est décroissant par rapport à la compressibilité du squelette.

Tableau 1. Coefficient B de Skempton évalué

Date	$\Delta\sigma_v$	Δu_w	B
De 88 j à 98 j	-54	-9,5	0,18
De 114 j à 122 j	-78	-16	0,2
De 134 j à 167 j	-137	-55	0,4

4.2 Données retenues pour l'étude

En vue de pratiquer une première retro-analyse basée sur les mesures, on retient le déplacement vertical cumulé des 10 élongamètres ainsi que l'évolution de la pression interstitielle dans le grand lobe.

Les objectifs de la retro-analyse numérique sont les suivants :

- Mettre en évidence l'impact important de la compressibilité du fluide dans la réponse du sol,
- Proposer une manière relativement simple de prendre en compte la présence d'air,
- Tenter de reproduire les tendances et valeurs mesurées.

4.3 Analyse 1D simplifiée

4.3.1 Méthode et hypothèses

Des simulations sont réalisées sur une colonne de sol homogène. Le logiciel Flac 3D a été utilisé pour cette simulation.

Le sol est modélisé sur la base d'un comportement élastoplastique non linéaire de type HSM. Les paramètres retenus sont présentés dans le Tableau 2.

Le modèle Terredurable (Mahmutovic, 2016 ; Boutonnier et al., 2019) qui permet de prendre en

compte la présence d'air dans le sol à travers une relation entre le degré de saturation et la compressibilité du fluide a été implémenté dans le logiciel afin de servir à la simulation. Les paramètres retenus sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 2. Paramètres de sol retenus (Modèle HSM)

E_{50}^{ref} MPa	E_{ur} MPa	m -	p^{ref} kPa	c kPa	ϕ' -	v_{ur} -	k m/s
75	300	1	200	0	30	0,25	5×10^{-9}

Tableau 3. Paramètres de fluide retenus (Modèle Terredurable)

S_{re}	S_{rair}	u_{we} kPa	u_{wair} kPa	h -	r_{bm} μm
-	-	0	-1000	0	1

Les conditions aux limites mécaniques sont de types œdométriques.

Pour les phases de drainage, la pression à la base est fixée à 165 kPa. Cette valeur correspondant à la pression initiale à la base du modèle comme on peut le voir sur la Figure 6.

En surface, un débit d'infiltration moyen est appliqué. Un total de 460 mm d'eau est tombé sur les 266j considérés selon les données de la station météorologique située au Bourget. Si l'on considère que toute cette eau s'infiltré dans le sol, on a alors un débit moyen de 2×10^{-8} m/s. En réalité, seulement une partie de l'eau s'infiltré dans le sol. De manière simplifiée, le débit à imposer est considéré comme un paramètre d'ajustement. La valeur finalement retenue est de 4×10^{-9} m/s.

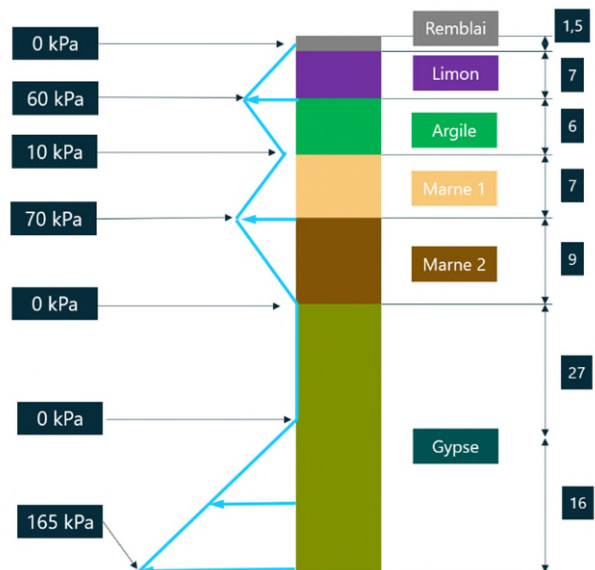


Figure 6: Profil de pression initiale retenu

4.3.2 Résultats

La Figure 7 et la Figure 8 présentent les résultats de la simulation numérique. Les barres verticales représentent une variation de $\pm 25\%$ par rapport à la simulation numérique. Les déplacements obtenus par simulation reproduisent de manière satisfaisante les mesures, tant en amplitude qu'en évolution temporelle, notamment en fin de travaux.

Les pressions interstitielles présentent également des tendances et des ordres de grandeur cohérents avec les observations expérimentales, bien que la forme de la réponse simulée ne soit pas entièrement superposable à celle mesurée.

Ces résultats montrent que ce type de modèle permet de capturer les mécanismes dominants du comportement du sol.

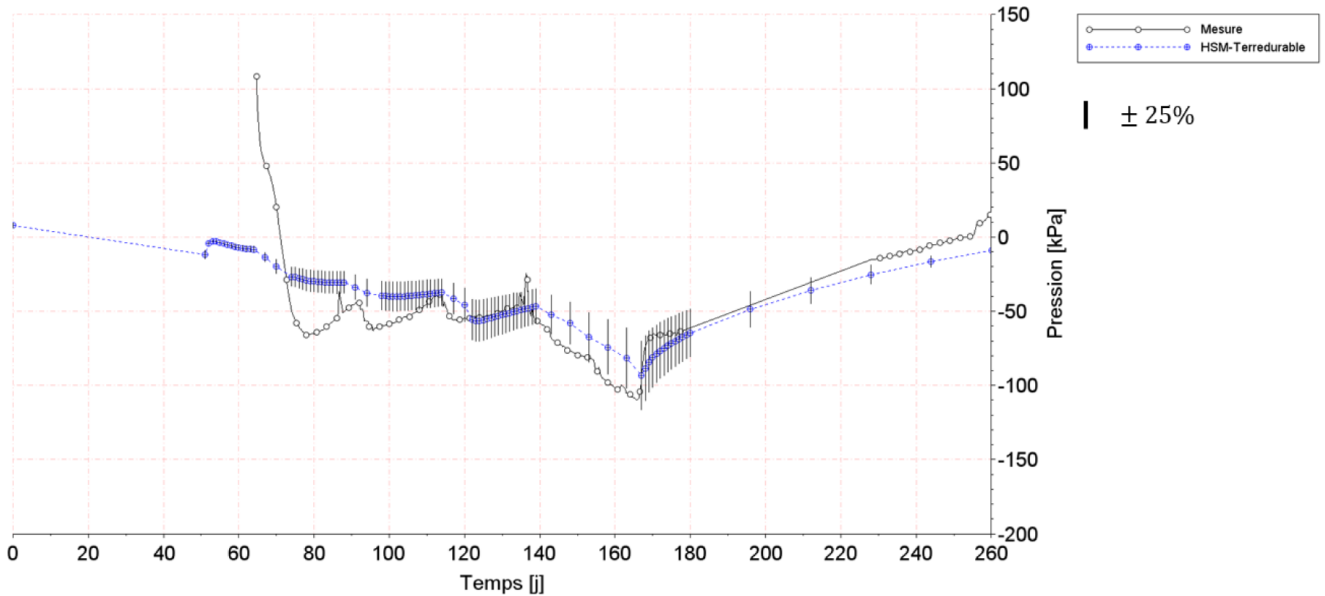


Figure 7 : Simulation de colonne de sol – Calage des pressions interstitielles (Ouédraogo, 2024)

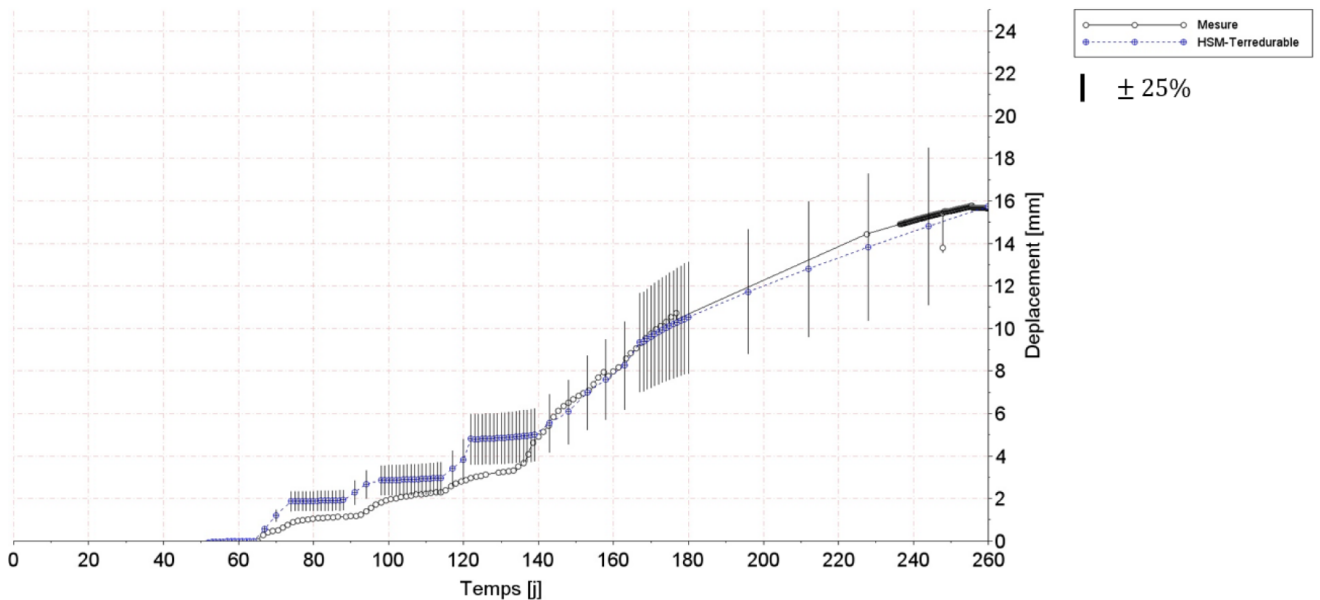


Figure 8 : Simulation de colonne de sol – Calage des pressions déplacements verticaux (Ouédraogo, 2024)

5 CONCLUSION

Une gare enterrée a été instrumentée en début de phase de terrassement. Les sols gonflants situés sous le radier ont été instrumentés en termes de déformation et de mesures de pression interstitielle.

L'analyse des mesures in situ mettent en évidence une réponse des sols fins proches de la saturation marquée par une phase instantanée liée à un comportement non drainé, suivie d'une évolution différée liée à un rééquilibrage des pressions interstitielles.

Les coefficients de Skempton issus de l'interprétation des pressions mesurées sont nettement inférieurs à l'unité et indiquent que la prise en compte de la non-saturation du sol serait plus adaptée.

Les modélisations numériques montrent que l'introduction d'une compressibilité de fluide accrue, représentative de la présence d'air occlus, permet de reproduire de manière satisfaisante les tendances et les ordres de grandeur observés pour les déplacements et les pressions.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les effets du quasi-saturé pour une modélisation plus réaliste du comportement des sols fins soumis à des déchargements.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements à la Société du Grand Paris (SGP) pour la confiance accordée, et l'accès aux données, qui ont permis la réalisation de cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Biot, M. A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12 (2), 155-164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>

Boutonnier, L. (2007). Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation. Cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait / gonflement. Thèse de doctorat, INP Grenoble.

Boutonnier L., Bufalo M., Dubreucq T., Fry J-J, Lejeune J.-M., Mahmutovic D. (2019). Conception et construction des ouvrages en sols fins. Sous la coordination de L. Boutonnier. 512 pages. Presses des Ponts (ISBN : 9782859785222)

Hasan, J. U., & Fredlund, D. G. (1980). Pore Pressure Parameters for Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 17 (3), 395-404. <https://doi.org/10.1139/t80-046>

Hilf, J. (1948). Estimating Construction Pore Pressures in Rolled Earth Dams. *Proceedings 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.

Mahmutovic, D. (2016). Etude du comportement des sols proches de la saturation : Validation numérique sur essais de laboratoire et ouvrages en terre. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.

Skempton, A. W. (1954). The Pore-Pressure Coefficients A and B. *Géotechnique*, 4 (4), 143-147. <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.4.143>

Oostveen, J. P. (2005). Undrained Isotropic Compression of Soil. In T. Schanz (Éd.), *Unsaturated Soils : Experimental Studies* (p. 315-330). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-26736-0_24

Ouedraogo, M. F. (2024). Conception et dimensionnement des ouvrages enterrés urbains - Prise en compte du comportement non saturé des sols et de l'effet du déchargement. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. <https://theses.hal.science/tel-05351670>

Yoshimi, Y., Tanaka, K., & Tokimatsu, K. (1989). Liquefaction Resistance of A Partially Saturated Sand. *Soils and Foundations*, 29 (3), 157-162. https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.3_157