

SIMULATION DU DECHARGEMENT MECANIQUE D'UN DEBLAI MARNEUX AVEC UN MODELE QUASI-SATURE

MODELISATION OF A EARTHWORK EXCAVATION ON MARLY SOIL WITH A QUASI-SATURATED THEORITICAL MODEL

^{1,2}Dino MAHMUTOVIC, ¹Luc BOUTONNIER, ³Jacques MONNET,

¹ *EGIS GEOTECHNIQUE, Seyssins, France*

² *3SR, Grenoble, France*

³ *GAIA TECH, Seyssinet-Pariset, France*

Cet article est consacré à la modélisation d'un déblai marneux sur le chantier de l'A304. Cet ouvrage a préalablement été équipé d'un système d'instrumentation afin de suivre l'évolution des pressions interstitielles et du gonflement au cours de l'excavation. Une modélisation numérique utilisant un modèle quasi-saturé est présentée et ses résultats comparés aux mesures in situ.

This paper is devoted to the simulation of an earthwork excavation of a marly soil in A304 site. The excavation has been equipped by a deformation and pore pressure monitoring system before earthworks. Results of simulation with a quasi-saturated model are presented and compared with the in situ data.

1.Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre du projet ANR Terredurable, commencé en 2012 et qui prendra fin en décembre 2016. Terredurable a pour objectif d'améliorer la conception des ouvrages en terre (compactage et stabilité) en combinant recherche expérimentale et théorique avec le retour d'expérience des praticiens. Ce projet a pour ambition de mieux comprendre la mécanique des sols non saturés et notamment celle des sols proches de la saturation. Ces derniers ont un comportement bien spécifique avec la présence de bulles d'air occluses. Cet état hydrique correspond par ailleurs à la majorité des ouvrages en terre anthropiques en sols fins (déblais, remblais, barrages en terre, digues,...).

Cette communication est la deuxième partie d'une double communication dédiée à l'instrumentation d'un déblai et à sa modélisation numérique. La première communication (« Instrumentation d'un déblai dans une marne - évolution des déplacements et de la pression interstitielle suite à un déchargement mécanique » - Mahmutovic et al 2016) est consacré à la description du dispositif d'instrumentation, à sa mise en place et à la récolte des mesures. Cette deuxième communication décrit quant à elle les premiers résultats de la modélisation de l'ouvrage à l'aide d'un code de calcul aux différences finies (Flac) et un modèle quasi-saturé. L'originalité du modèle est la prise en compte de la compressibilité du fluide interstitiel qui permet de modéliser la déformation « instantanée » (non drainée) et la déformation « différée » (drainée). Les prédictions du modèle sont comparées aux mesures in situ ainsi qu'à un calcul analytique 1D afin de juger de la pertinence de ce dernier.

2. Présentation du déblai et de sa géologie

L'ouvrage à modéliser est le déblai D9B de la future autoroute de liaison A304. Il est large de 160 m pour une longueur de 400m. La profondeur finale de l'arase par rapport au TN est de 18 m. Le déblai est composé de 3 risbermes côté gauche et 1 risberme côté droit de l'axe de la future autoroute. Les pentes des talus sont de 3 pour 1 (cf Figure 1). Cet ouvrage a été instrumenté avant son excavation à l'aide de 4 dispositifs :

- 2 capteurs de pression interstitielle CPI
- 1 dispositif de mesures du gonflement de l'arase à l'aide de piges topographiques
- 1 dispositif de mesures des déformations à l'aide d'élongamètres chaînés qui permettent de mesurer les déformations par tranches de sol, de hauteur 2m ou 3m, mis en place sous l'arase

Plus d'informations techniques sur ces dispositifs ainsi que leur mise en place sont disponibles dans la première communication (Mahmutovic et al, 2016).

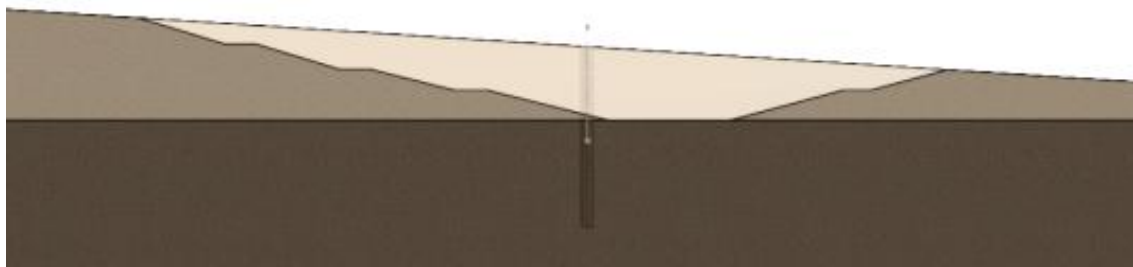


Figure 1. Profil en travers du déblai D9B – mise en évidence de la position de l'instrumentation au sein de l'ouvrage.

Un des trous de forage ayant servi à la mise en place de l'instrumentation a été carotté au diamètre 200mm. Les informations et essais réalisés sur ces échantillons serviront par la suite à la modélisation numérique. De plus, une coupe stratigraphique a été déduite de ce carottage et est représentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Différentes couches de sol en place.

Profondeur	Couche de sol	Caractéristiques
0,0 – 0,2 m	Terre végétale	
0,2 – 21,5 m	Marne argileuse	Présence de lits de galets décimétriques et nodules calcifiés
21,5 – 48 m	Marne argileuse compacte	Présence de nodules calcaires

3. Calcul analytique 1D de la pression interstitielle au sein d'échantillons de sol issu d'un déconfinement mécanique

Des mesures de succion au papier filtre ont été réalisées in situ à partir des carottes de sols prélevées sur place. Les résultats de ces mesures sont reportés sur la figure 3 et nous permettront de valider les prédictions du modèle.

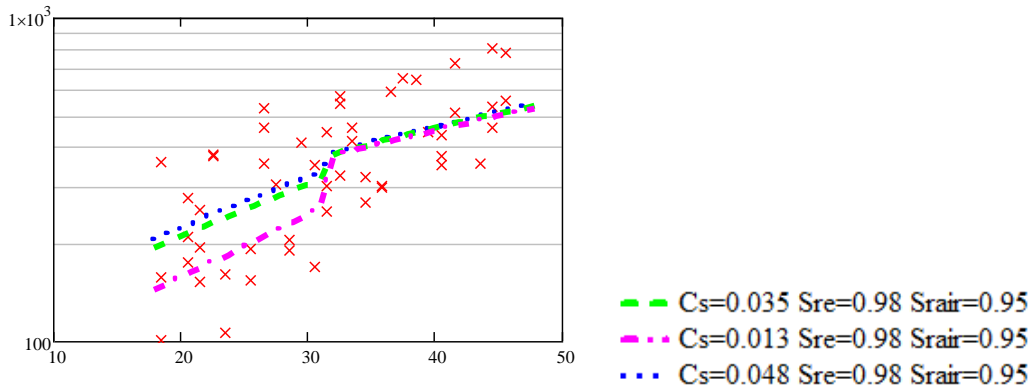


Figure 3. Résultats de la simulation numérique superposés sur les mesures de succion effectuées par la méthode des papiers filtres à différentes profondeurs sur échantillons intacts.

D'après la figure 3, la succion des échantillons en place augmente en fonction de la profondeur. Ces mesures de succions sont caractéristiques de ce qu'il se passe après un déconfinement mécanique (et non pas du sol en place). En effet, une variation de contrainte totale est imposée sur le sol en place équivalente au poids des terres qui a été enlevé au-dessus des échantillons testés.

Ce constat peut être vérifié de manière analytique en s'appuyant sur le modèle quasi-saturé développé lors du projet Terredurable (Mahmutovic et al 2014, Boutonnier et al 2015, Andrianatrehina et al 2015). Nous considérons pour cela un déchargement isotrope (Module E isotrope, Equation (6)) de l'échantillon de sol équivalent au poids des terres qu'il subissait en place. La variation de pression interstitielle est alors égale au coefficient B multiplié par la variation de contrainte totale (Equation (1)). En raisonnant avec des coefficients B_t tangent (Equation (3)), il est possible de calculer le B sécant (Equation (2)) en utilisant la théorie quasi-saturé qui consiste à utiliser un coefficient de compressibilité équivalent. Ce dernier est fonction du volume d'air occlus présent dans le fluide interstitiel (Equation (4) et (5)).

$\Delta u_w = B \Delta \sigma_v$	(1)	$B = \frac{\int_{\sigma_{v_ini}}^{\sigma_{v_final}} B_t d\sigma_z}{\sigma_{v_final} - \sigma_{v_ini}}$	(2)	$B_t = \frac{1}{1 + E_{iso} \frac{e}{1+e} c_f}$	(3)
----------------------------------	-----	--	-----	---	-----

Avec c_f et E_{iso} égales à :

Domaine D2 ($u_w < 0$)		Domaine D3 ($u_w > 0$)			
$c_f = -\frac{1}{S_r} \cdot \alpha + c_w$	(4)	$c_f = \frac{1 - S_r + h S_r}{u_w + s_{bm} + P_a - u_{wg}} + c_w$	(5)	$E_{iso} = \frac{(1+e) p' \ln(10)}{C_x}$	(6)

Les résultats de cette étude analytique sont reportés sur la figure 3 afin de les comparer aux mesures expérimentales. On constate que les prédictions du modèle sont dans la plage de valeurs des mesures de succion réalisées au papier filtre.

La dispersion expérimentale sur la figure 3 est probablement liée aux modes opératoires (en particulier préparation d'éprouvettes en condition de chantier) mais d'autres paramètres peuvent jouer, comme la variation de rigidité rencontrées dans les carottes de sol, avec des passages indurés et d'autre plus mous. Les résultats des essais oedométriques réalisés à différentes profondeurs sont disponibles dans le Tableau 2 (les 4 essais réalisés entre la surface et 8m de profondeur proviennent d'un remblai voisin

recoupant des formations analogues). Afin de voir l'effet de la rigidité sur les prédictions de pressions interstitielles, trois courbes différentes ont été tracées sur la figure 3 avec des valeurs différentes de C_c et C_s .

Tableau 2. Evolutions des paramètres C_c et C_s en fonction de la profondeur à partir de plusieurs essais oedométriques réalisés sur échantillons intacts.

PROVENANCE	Profondeur échantillon	C_c	C_s	Sre	$\alpha = \frac{S_{re} - S_{rair}}{S_{air}}$ [kPa ⁻¹]	Rbm [μm]
Remblai voisin	1,5 m	0.27	0.038	0.99	3.10^{-5}	1,5
	3,5 m	0.196	0.0136	0.96	9.10^{-5}	1
	5,5 m	0.158	0.015	0.98	7.10^{-5}	3
	8 m	0.165	0.0338	0.945	$4,5.10^{-5}$	1.5
Carottage au droit de l'instrumentation	18	0.187	0.048	-	-	-
	19 m	0.332	0.035	0.985	$3,5.10^{-5}$	2
	21m	0.140	0.020	-	-	-
	21m	0.130	0.008	-	-	-
	21m	0.156	0.010	-	-	-

4. Construction d'un modèle numérique 2D

Un calcul analytique ne permettrait pas de prendre en compte l'effet temporel. De plus, les éventuelles ruptures en extension ne seraient pas modélisées. Aussi, un calcul élasto-plastique couplé dans un code de calcul numérique a été mise en œuvre sur un code aux différences finies (FLAC) et il est présenté par la suite.

Le maillage utilisé dans le code de calcul reproduit le mieux possible la réelle géométrie du sol en place (Figure 6).

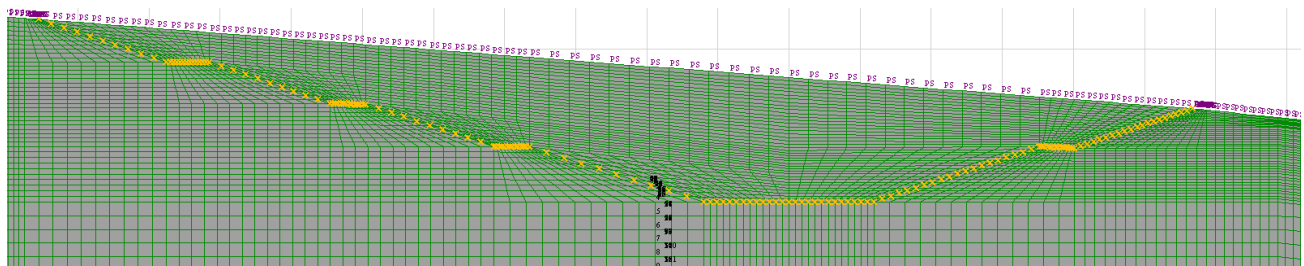


Figure 6. Gros plan sur le maillage du déblai avant terrassement

Des conditions limites de non déplacement ont été placées aux extrémités du modèle (non déplacements horizontaux et verticaux à la base du modèle, non déplacements horizontaux aux frontières latérales du modèle).

Un gradient de pression interstitielle a été mis en place de telle sorte à avoir une nappe se situant à environ 6 mètres de profondeur par rapport au TN initial. Cette nappe à 6m de profondeur est imposée sous forme d'une condition limite en pression d'eau sur les frontières du modèle.

Par ailleurs, un gradient de contrainte verticale totale linéaire depuis le TN a été instauré. Pour ce qui est des contraintes effectives horizontales, un coefficient des terres de type

$K_0 = (1 - \sin\phi') \sqrt{\sigma'_{vmax} / \sigma'_v}$ a été utilisé (d'après relations empiriques constatés in situ Josseume 1976, 1998, Mestat 1998).

Le phasage des travaux, d'un point de vue numérique, consiste à enlever de la matière progressivement en essayant de respecter le planning d'exécution des travaux de terrassement. Le calcul est réalisé de façon couplé en prenant en compte les perméabilités du sol en place afin de respecter les cinétiques d'équilibrage de la pression interstitielle. Huit passes de terrassements sont ainsi prises en compte s'étalant sur 6 mois d'excavation. Les déplacements et les variations de pression interstitielle sont suivis au niveau des élongamètres au cours du temps afin de permettre une superposition des résultats avec les données expérimentales.

Le tableau 4 résume les valeurs des paramètres pour les différentes couches de sol utilisées dans le modèle numérique.

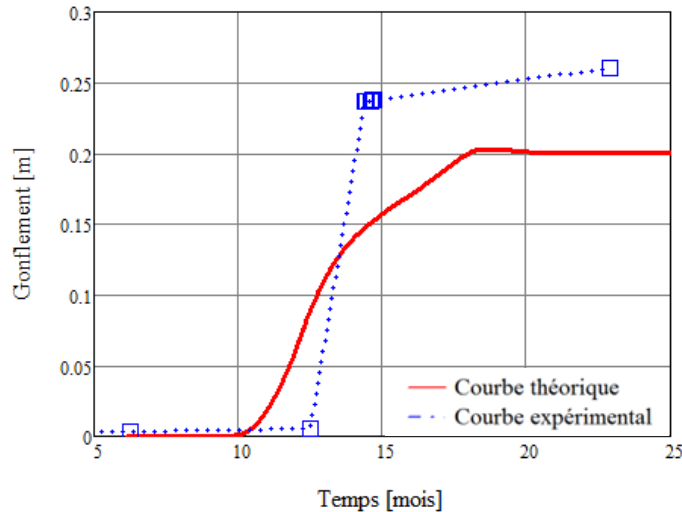
Tableau 4. Paramètres des différentes couches de sols du modèle numérique

	Modèle	Profondeurs	Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques hydriques	Paramètres quasi-saturé
Couche 1 : Argile altérée	Cam Clay	0-21	$\lambda=0.081$ $\kappa=0.021$ $M=0.809$ $m_{pc}=1600\text{kPa}$ $\nu=0.2$	$k=10^{-10}$ m/s	$S_{re}=0.96$ $S_{rair}=0.90$ $S_{air}=1000\text{kPa}$ $r_{bm}=2\mu\text{m}$
Couche 2 : Marne	Cam Clay	21-fond	$\lambda=0.056$ $\kappa=0.0056$ $M=0.809$ $m_{pc}=2000\text{kPa}$ $\nu=0.2$	$k=10^{-10}$ m/s	$S_{re}=0.98$ $S_{rair}=0.95$ $S_{air}=2000\text{kPa}$ $r_{bm}=2\mu\text{m}$

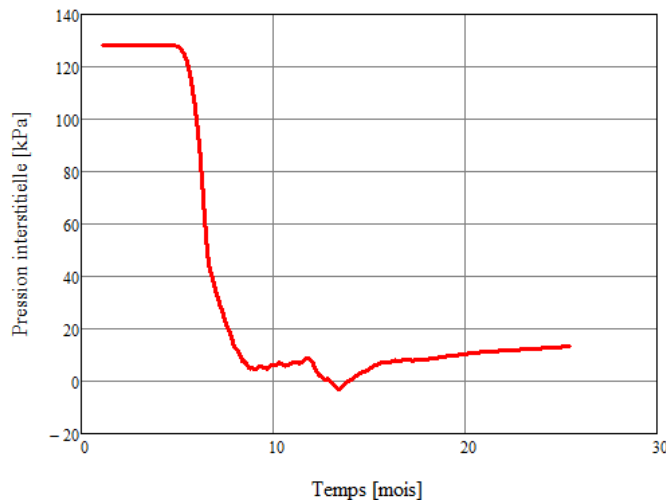
Les paramètres λ et κ proviennent des oedomètres réalisés sur le sol en place. Les valeurs de M sont celles réalisées à partir d'essais triaxiaux CD en extension (Serratrice 2016). Ces essais sont plus représentatifs du mécanisme qui a lieu pendant la phase d'excavation que des essais en compression. La valeur du coefficient ν a été déterminée à partir d'essais oedométriques K_0 à partir des mesures de déformations horizontales et verticales. Les paramètres du modèle quasi-saturé S_{re} , α , et r_{bm} sont déterminés à partir d'un calage indirect du coefficient B sur des courbes de consolidation d'essais oedométriques (Boutonnier 2007 & 2010, Mahmutovic 2014)

5. Résultats

La figure 8 montre la superposition entre les valeurs de déplacement expérimentales et théoriques en 2 dimensions (calcul Flac 2D).



Figures 8. Comparaison entre déplacements totaux expérimentaux et numériques



Figures 9. Evolution de la pression interstitielle pour un point sous l'arase du déblai – mise en évidence de la stabilisation de la pression interstitielle

Le gonflement « immédiat » (correspondant à la durée des travaux d'excavation) théorique est proche du gonflement « immédiat » mesuré (24 cm mesurés contre 21 cm calculés). Les calculs exploratoires ont permis de montrer que la prise en compte de la compressibilité du fluide interstitiel permet d'avoir un déplacement plus important pendant la phase d'excavation, et donc des valeurs calculées plus proches des valeurs mesurées. Cependant le gonflement différé est mal modélisé dans le code de calcul avec une stabilisation du gonflement à 18 mois. L'analyse des pressions interstitielles en fonction du temps montre que ces dernières n'évoluent plus à ce moment-là compte tenu des conditions limites imposées (figure 9).

Dans ces conditions, pour modéliser de manière plus réaliste le gonflement différé, il semble nécessaire de modéliser les apports d'eau infiltrés lors des précipitations. Ce travail va être poursuivi dans le cadre de la finalisation de l'interprétation de cette expérimentation en vraie grandeur. Néanmoins, d'autres phénomènes plus complexes

peuvent également interférer, comme des écoulements transitoires dans les passées décimétriques de cailloutis calcaires que l'on peut trouver dans ces formations géologiques.

6. Conclusion

Le modèle quasi-saturé développé au cours du projet Terredurable a été appliqué à deux exemples différents réalisés à partir d'un même sol (marne provenant du déblai D9B de l'A304):

- Le premier exemple est l'estimation de l'évolution de la pression interstitielle au sein d'échantillons carottés entre 18 m et 50 m de profondeur correspondant aux 30 m situés sous l'arase du déblai D9B.
- Le deuxième exemple est l'estimation du gonflement induit par le déchargement mécanique du déblai.

Les deux calculs donnent des résultats intéressants, même si des analyses complémentaires sont encore nécessaires pour valoriser pleinement les données mesurées.

Les modélisations numériques sont à poursuivre en prenant en compte des conditions limites hydriques plus réalistes au sein de la marne afin de mieux reproduire la cinétique de gonflement dans le temps du déblai.

7. Remerciements

Le projet Terredurable est soutenu par l'ANR programme Bâtiments et Villes Durables, convention ANR 2011 VILD 004 01.

La DREAL Champagne-Ardenne est vivement remerciée pour avoir autorisé les partenaires du projet Terredurable à réaliser cette instrumentation sur les emprises du chantier de l'autoroute A304.

8. Références bibliographiques

- Andrianatrehina R., Mahmutovic, D., Boutonnier, L. taibi, S. Fleureau, J-M., Fry, J-J., Monnet, J. (2015). Observation of cracking evolution during free dessication – experimental and numerical approaches. Symposium international SEC 2015. Marne-la-vallée.
- Boutonnier L. (2010). Mechanics of unsaturated geomaterials, Chap.14 : Coefficient B, Consolidation and swelling in Fine Soils near saturation in Engineering Practice. Ed.L.Laloui, J.Wiley.
- 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 INPG Grenoble soutenue le 23 octobre 2007. <http://geotec-luc.blogspot.com/>
- Boutonnier, L., Mahmutovic, D., Fry, J-J. (2015). Génération de pression interstitielle dans les fondations argileuses des barrages en remblai. Colloque CBR 2015.
- 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 INP Grenoble.
- Josseume H,. (1976)., Comportement et methods de calcul des rideaux de soutènement, Compte rendu des journées du LPC sur les soutènements, Lyno, Rapport Interne LCPC.

- Josseume H., (1998). Propriétés mécaniques de l'argile des Flandres à Dunkerque et à Calais. *Revue Française de géotechnique*.
- Mahmutovic, D., Monnet, J., Loret, B., Ple, O., Pelizzari, B., Boutonnier L., Lai B., (2014). A model for weakly unsaturated soils taking into account the three phases (air, water and soil). *Unsat 2014*. Sydney.
- Mahmutovic D., Boutonnier L., monnet J., (2016). Instrumentation d'un déblai dans une marne – évolution des déplacements et de la pression interstitielle suite à un déchargement mécanique. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur – Nancy 2016*, France.
- Mestat P., (1998). Etat de contraintes initiales dans les sols et calcul par éléments finis. *Bulletin des laboratoire des Ponts et Chaussées*. Ref 4188 - PP. 15-32.
- Serratrice J-F., (2016). Mesures des propriétés mécaniques d'une argile surconsolidée au laboratoire. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur – Nancy 2016*, France.