

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE SUIVI DE TASSEMENTS DE REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES ET CALAGE DU MODELE GEOTECHNIQUE

FEEDBACK ON THE MONITORING OF BACKFILL SETTLEMENTS ON COMPRESSIBLE SOILS AND CALIBRATION OF THE THEORETICAL MODEL

Matthias FERREIRA¹, Thomas DELPY²

¹ Directeur Grande Région Ouest, Hydrogéotechnique, Rouen, France

² Responsable pôle conception, Hydrogéotechnique, Les Ulis, France

RÉSUMÉ – Dans les travaux présentés aux JNGG 2020 (Ferreira, 2020), nous avons proposé une méthode visant à estimer la contrainte de pré-consolidation σ'_p à partir de la pression limite nette et de la valeur au bleu sur la fraction 0-D. Nous proposons à travers cet article de confronter le modèle de calcul théorique issu des corrélations ($\sigma'_p = f(P_l^*, VB_{0D})$) à des suivis de tassements sur 3 chantiers spécifiques.

ABSTRACT – Following work presented at JNGG 2020 (Ferreira, 2020), we proposed a method to estimate the preconsolidation pressure σ'_p at Menard net Limit pressure and the blue methylen test on the 0-D fraction. We suggest in this article to compare the theoretical calculation model derived from the correlations ($\sigma'_p = f(P_l^*, VB_{0D})$) to settlement monitoring on 3 specific sites.

1. Introduction

Nous avons proposé de nouvelles corrélations (Ferreira 2020) pour caler les modèles œdométriques et notamment la contrainte de préconsolidation σ'_p , à partir d'essais in situ tel que le pressiomètre. Nous souhaitons à travers cet article, justifier de la robustesse de telles corrélations, en comparant les calculs théoriques à des suivis de tassements que notre bureau d'études a pu réaliser ces dernières années.

Les projets que l'on présente ci-après ont été sélectionnés suivants les critères suivants :

1. La campagne géotechnique doit être suffisamment fournie pour avoir un modèle théorique satisfaisant,
2. Un suivi des tassements en phase exécution a été réalisé pour confronter la théorie à la pratique.

2. Rappel sur la corrélation testée

Nous nous concentrons ici sur le paramètre σ'_p , car il constitue à notre sens le curseur principal dans le calcul de l'amplitude de tassement et en même temps un des paramètres les plus difficiles à appréhender (Said Alimi et al, 2017, Boutonnier et al., 2013).

(Ferreira, 2020) a proposé :

$$\sigma'_p = \frac{1}{[\sigma'_{v0}]^{0,25}} \times (P_l^*)^{m \times n} \quad (1)$$

Avec :

$$m = 0,72 + \frac{0,28}{1 + e^{-1,5 \cdot (VB_{0D} - 3,35)}} \quad (\text{Gress, 2019}) \quad (2)$$

$$n = 1.1 \times \frac{VB_{0D}+0.6}{VB_{0D}+0.5} \quad (\text{Ferreira, 2020}) \quad (3)$$

$$\text{et } VB_{0D} = VBS \times \%50mm \quad (4)$$

Avec %50mm, le passant à 50mm et VBS, la valeur au bleu de méthylène sur la fraction [0-5mm] et VB_{0D}, la valeur au bleu de méthylène ramené sur la fraction [0-50mm].

3. Calage du modèle théorique

Le calage du modèle théorique est une étape clef dans le dimensionnement des ouvrages géotechniques. Le géotechnicien doit apporter dans son programme une diversité d'essais de manière à pouvoir faire converger toutes les données et fiabiliser ainsi les paramètres mécaniques à retenir.

Dans la suite de cet article, nous suivrons la démarche suivante pour le calage du modèle œdométrique par corrélation :

1. Analyse spatiale de la distribution des pressions limites et détermination d'une loi de type $P_l^* = a \times z + b$, où P_l^* est la pression limite nette issue de l'essai pressiométrique et z la profondeur d'essai. a et b étant deux paramètres de calage,
2. Analyse spatiale de la VB_{0D} et prise en compte de la moyenne par zone homogène.

A partir de ces deux paramètres retenus, nous appliquerons la corrélation (1) pour estimer la contrainte de pré-consolidation en fonction de la profondeur.

4. Honfleur (14) – Pré-chargement pour un projet de plate-forme logistique

Ce projet, situé au pied du pont de Normandie sur la commune de Honfleur (14) (coordonnées GPS Lambert 93 : 501313 ; 6927837), consistait à construire une plate-forme logistique de 12000 m², dans la plaine alluviale de la Seine. Etant donnée la charge sur dallage annoncée, les tassements attendus n'étaient pas compatibles avec l'exploitation du projet. Une solution de pré-chargement a été imaginée.

Caractéristiques du pré-chargement : plate-forme remblais à 9.2 m NGF pour un TN situé entre 5.6 et 6.5 m NGF. Soit une hauteur de remblais de l'ordre de 2.7 à 3.6m de hauteur.

Le pré-chargement a été instrumenté de manière à pouvoir suivre les tassements du sol. Ainsi un double contrôle a été mis en place : suivi des piges de chantier (3 cibles) et 3 lignes de profilomètre. Ces deux entrants ont permis de confirmer les mesures réalisées.

4.1. Données d'entrée issues de la campagne géotechnique

Les données d'entrée suivantes (Tableau 1) ont été calées sur la base de 5 identifications GTR, 5 densités et 2 essais œdométriques.

Tableau 1. Données d'entrée

| Couche compressible | VB _{0D,k} | $\frac{Cc}{1+e_0}$ | $\frac{Cs}{1+e_0}$ | σ'_{v0} | σ'_p | OCR | POP |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|-------------|-----|---------|
| Alluvions modernes 1 | 3,36 | 0,200 | 0,020 | 38kPa | 84kPa | 2,2 | 46,0kPa |
| Alluvions modernes 2 | 2,25 | 0,129 | 0,012 | 58,4kPa | 61kPa | 1,0 | 2,6kPa |

La difficulté est ici de statuer sur le degré de sur-consolidation des alluvions modernes sur la base de deux essais ponctuels et relativement divergents. Le géotechnicien doit alors s'aider d'outils complémentaires pour calibrer ce paramètre. De nombreux travaux sur le

CPT ou la cohésion non drainée ont permis d'aboutir à des corrélations intéressantes (Leroueil et al., 1985, Robertson, 2015) mais celles-ci ne font pas l'objet du présent papier.

4.2. Calage du paramètre σ'_p

Sur la base de 7 sondages pressiométriques, nous avons retenu le modèle du Tableau 2. On note ici l'introduction d'une couche superficielle sur-consolidée pour tenir compte des valeurs plus élevées sur le premier mètre des sondages (effet de croûte ? Consolidation de surface ?). La nappe a été observée à 1.5 m de profondeur.

Tableau 2. Modèle oedométrique

| Couche compressible | Cote de la base | VB _{0D,k} | $\frac{C_c}{1+e_0}$ | $\frac{C_s}{1+e_0}$ | Loi $P_t^* = f(z)$ | σ'_p | OCR _{moyen} | POP _{moyen} |
|----------------------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|---|----------------------|----------------------|
| Alluvions modernes 1 | variable | 3,36 | 0,200 | 0,020 | | $\sigma'_p = \frac{1}{[\sigma'_{v0}]^{0,25}} \times (P_t^*)^{m \times n}$ | - | 100.0ka |
| Alluvions modernes 2 | 1,8m NGF | 3,36 | 0,200 | 0,020 | $P_t^* = 0,145 - 0,023z$ | | - | 34,0kPa |
| Alluvions modernes 3 | -0,2m NGF | 2,25 | 0,129 | 0,012 | $P_t^* = -0,62 - 0,19z$ | | 1,3 | - |

Cela nous amène sur la répartition suivante en suivant (1) :

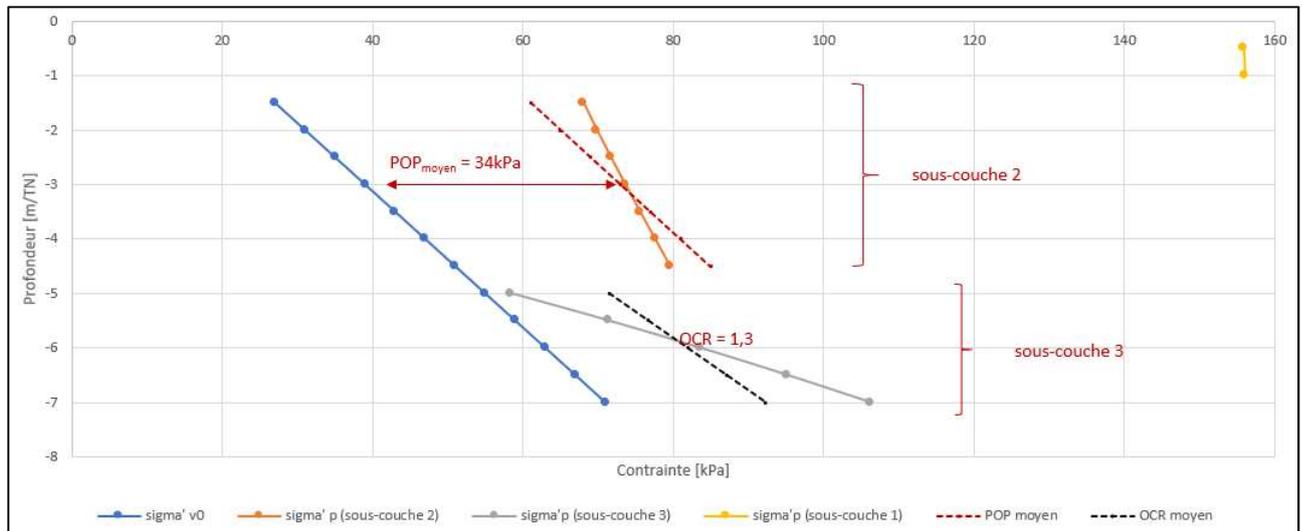


Figure 1. Comparaison entre σ'_{v0} et σ'_p

La figure 1 permet ici de définir le comportement œdométrique qui semble le plus adapté ($POP = \sigma'_p - \sigma'_{v0}$ pour la sous-couche 2 et $OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$ pour la sous-couche 3) et de caler chacun des paramètres pour intégrer dans le calcul de tassement la sur-consolidation à prendre en compte. Il s'agit ici de retenir le comportement qui nous semble plus adapté à l'approche calculatoire, à savoir une sur-consolidation constante avec la profondeur (sous-couche 2) ou une sur-consolidation augmentant de manière proportionnelle avec la profondeur (sous-couche 3).

Dans le modèle œdométrique, on voit également que d'autres paramètres peuvent également montrer une certaine variabilité, notamment les paramètres C_c et C_s . Dans le calcul qui suit, nous ferons varier ce paramètre pour les alluvions 1 et 2 dans l'intervalle $[0,155 ; 0,243]$ pour le ratio $\frac{C_c}{1+e_0}$ et sur l'intervalle $[0,015 ; 0,024]$ pour le ratio $\frac{C_s}{1+e_0}$ sur la base des données en notre possession (essais œdométriques, profils hydriques, ...). Pour les alluvions 3, nous ne possédons pas assez de données pour estimer un intervalle.

4.3. Comparaison du calcul théorique aux mesures de tassements in situ

Sur le site de Honfleur (14), des piges de chantier ont été installées ainsi que 3 profilomètres de 60 m de longueur. Toutes les mesures ont convergé et donnent une amplitude de tassement comprise entre 16 et 30cm (Figure 2). En parallèle, nous avons réalisé le calcul via le logiciel FOXTA V6 – Module TASSELDO développé par TERRASOL. Ce module permet de choisir le comportement mécanique de chaque horizon et particulièrement le modèle œdométrique. Nous obtenons alors les résultats suivants en faisant varier les paramètres C_c et C_s dans les horizons superficiels.

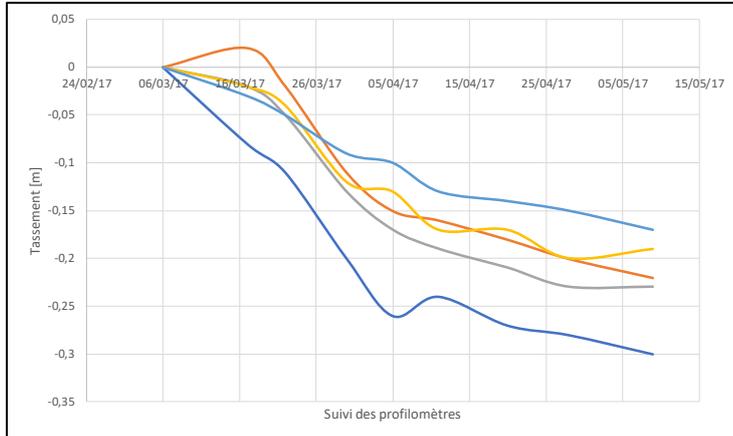


Figure 2. Suivi du tassement sur le site de Honfleur (14)

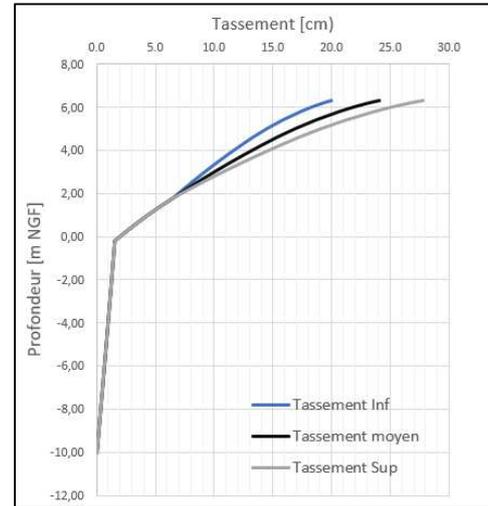


Figure 3. Résultats du calcul mené via FOXTA – Module TASSELDO (logiciel Terrasol)

En intégrant le modèle issu des corrélations, nous obtenons une fourchette de tassements compris entre 20.0 et 30.0 cm (tassement primaire) (Figure 3), ce qui représente un ordre de grandeur tout à fait comparable au suivi de tassement réalisé pour un chargement de 61 kPa (soit environ 2.9 m de remblais).

Des calculs complémentaires ont été réalisés en intégrant un effet de croûte en tête (couche présentant un POP de 100 kPa), les tassements réduisent alors de 2 à 5 cm selon l'épaisseur de cette couche.

5. Rouen (76) – Pré-chargement pour un projet urbain sur une ancienne friche industrielle

Ce projet, situé sur la rive gauche de la Seine sur la commune de Rouen (76) (Coordonnées Lambert 93 : 560535 ; 6928110), consiste à édifier un remblai de plusieurs mètres de hauteur dans le cadre de l'aménagement d'un nouveau centre urbain. Situé dans la plaine alluviale de la Seine, le contexte géotechnique est ici défavorable avec la présence de sols compressibles. Le projet consiste à remblayer la zone sur des hauteurs comprises entre 6 et 7.5 m de hauteur, hors pré-chargement. En intégrant le pré-chargement, les remblais atteindront provisoirement une hauteur de 10.2 m. L'ouvrage a été instrumenté de tassomètres électriques avec transmission des données en direct via GSM.

5.1. Données d'entrée issues de la campagne géotechnique

Ce site a fait l'objet de nombreuses investigations de la mission G1 aux sondages complémentaires menés en G3 pour le compte de l'entreprise. On parle ainsi de 11 sondages pressiométriques, 21 sondages au CPT, 6 sondages carottés, 8 essais

œdométrique, ... Cela nous a permis d'obtenir la synthèse suivante pour les couches nous intéressant (Tableau 3) :

Tableau 3. Données d'entrée

| Couche compressible | VB _{0D,k} | $\frac{Cc}{1+e_0}$ | | | $\frac{Cs}{1+e_0}$ | OCR | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------|--------|--------------------|-----|-----|--------|
| | | Min | Max | Retenu | | Min | Max | Retenu |
| Alluvions / Remblais | 3.9 | - | - | 0.183 | 0.011 | - | - | 3.5 |
| Alluvions modernes 1 | | 0.191 | 0.531 | 0.449 | 0.043 | 1.3 | 2.8 | 3.5 |
| Alluvions modernes 2 | | 0.121 | 0.384 | 0.231 | 0.046 | 2.3 | 3.0 | 1.5 |

La nappe a été retenue à 3.5 m NGF (1 à 2 m de profondeur par rapport au TN).

5.2. Calage du paramètre σ'_p

Sur la base de 11 sondages pressiométriques, nous avons retenu le modèle du Tableau 4.

Tableau 4. Modèle œdométrique

| Couche compressible | Épaisseur | VB _{0D,k} | $\frac{Cc}{1+e_0}$ | $\frac{Cs}{1+e_0}$ | Loi $P_l^* = f(z)$ | σ'_p | POP |
|----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---|-------|
| Alluvions modernes 1 | 3.5 | 3.9 | 0.183 | 0.011 | $P_l^* = 0,3 - 0,01z$ | $\sigma'_p = \frac{1}{[\sigma'_{v0}]^{0,25}} \times (P_l^*)^{m \times n}$ | 73kPa |
| Alluvions modernes 2 | 3.0 | | 0.449 | 0.043 | | | |
| Alluvions modernes 3 | Variable selon les secteurs | | 0.231 | 0.046 | | | |

Cela nous amène sur la répartition suivante en suivant la corrélation (1) :

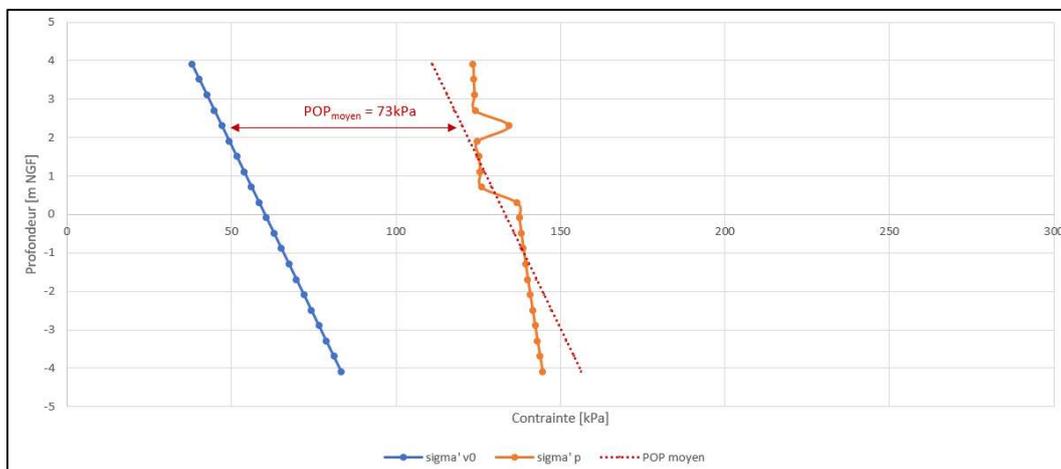
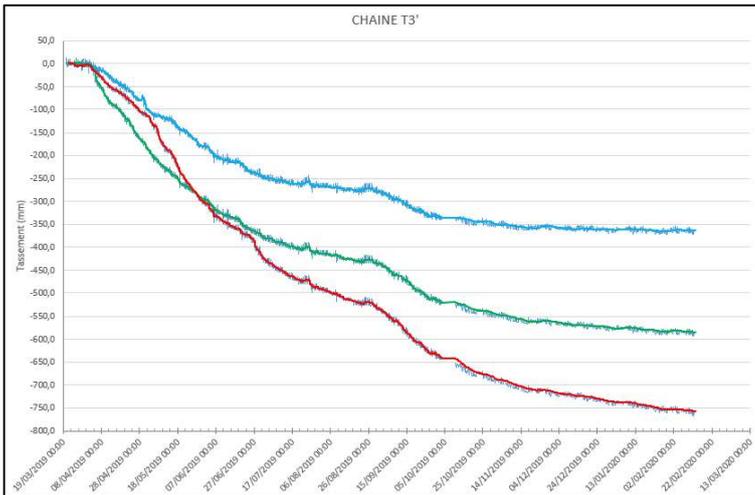


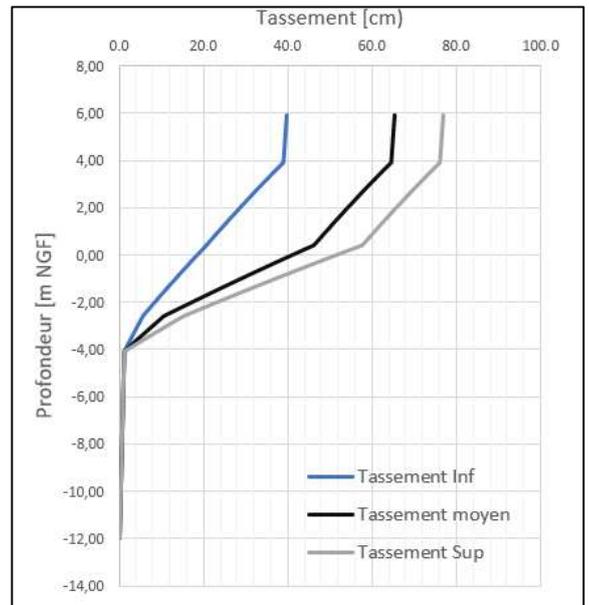
Figure 4. Comparaison entre σ'_{v0} et σ'_p - site de Rouen

5.3. Comparaison du calcul théorique aux mesures de tassements in situ

Le site de Rouen avait la particularité de montrer une épaisseur d'alluvions modernes très variables s'étalant de plus de 8.5 m sur le secteur Ouest Nord, à zéro mètre à l'approche des alluvions anciennes (sables et graviers). Bien qu'ayant sectorisé les zones d'anomalies, nous nous attendions à une forte variabilité sur les amplitudes de tassement à attendre.



(5a)



(5b)

Figure 5. A gauche (5a), Suivi du tassement sur le site de Rouen (76). A droite (5b), Calcul théorique via le logiciel FOXTA – Module TASSELDO en utilisant le modèle corrélé

Sur la chaîne de tassomètres électriques, nous obtenons donc des tassements compris entre 35.0 cm et 75.0 cm (Figure 5a) pour une hauteur de remblais de 8.5 m. Le calcul théorique donne une fourchette comprise entre 40.0 et 77.0 cm (Figure 5b) ce qui paraît être un ordre de grandeur tout à fait acceptable par rapport au calcul théorique. Pour le calcul inférieur et supérieur de la fourchette de tassement, nous avons fait varier les paramètres C_c et C_s selon le minimum et maximum observé à travers la campagne d'essais.

6. Audun le Tiche – Remblais routier à proximité d'un ouvrage hydraulique

Ce projet s'inscrivait dans le cadre de la création d'une déviation routière. Les données ici utilisées ne concernent qu'une zone particulière en remblai d'environ 12.5 m de hauteur par rapport au terrain initiale, zone instrumentée au moyen de tassomètres électriques, à proximité d'un ouvrage hydraulique à construire. Le contexte géotechnique est celui d'alluvions argilo limoneuses peu compactes sur un substratum argileux (formation des « marnes du Toarcien » de Lorraine).

6.1. Données d'entrée

Les données d'entrée suivantes (Tableau 5) ont été calées sur la base de 6 essais œdométriques. La nappe est ici calée au TN.

Tableau 5. Données d'entrée

| Couche compressible | $VB_{0D,k}$ | $\frac{C_c}{1 + e_0}$ | $\frac{C_s}{1 + e_0}$ | σ'_{v0} | σ'_p | OCR | POP |
|-------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------|----------------------------|----------------------------------|
| Limons et argiles +/- silteux | 2.67 | 0.115 | 0.012 | - | - | 1 à 2.2 d'après les essais | 10 kPa à 73 kPa selon les essais |

6.2. Calage du paramètre σ'_p

Sur la base de 5 sondages pressiométriques et des essais en laboratoire, nous avons retenu le modèle du Tableau 6.

Tableau 6. Modèle oedométrique

| Couche compressible | Cote de la base | VB _{0D,k} | $\frac{Cc}{1+e_0}$ | $\frac{Cs}{1+e_0}$ | Loi $P_l^* = f(z)$ | σ'_p | OCR | POP |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|-----|--------|
| Limons et argiles +/- silteux | -6.0 | 2.67 | 0.115 | 0.012 | 0.109+0.088z | $\sigma'_p = \frac{1}{[\sigma'_{v0}]^{0,25}} \times (P_l^*)^{m \times n}$ | - | 59 kPa |

Sur la figure 7 ci-dessous, nous illustrons la répartition des pressions limites avec la profondeur. Nous rappelons que la couche compressible s'étend ici sur les 6 premiers mètres (population bleue). Cette homogénéité se traduit par la traduction d'un facteur POP homogène sur la hauteur de la couche.

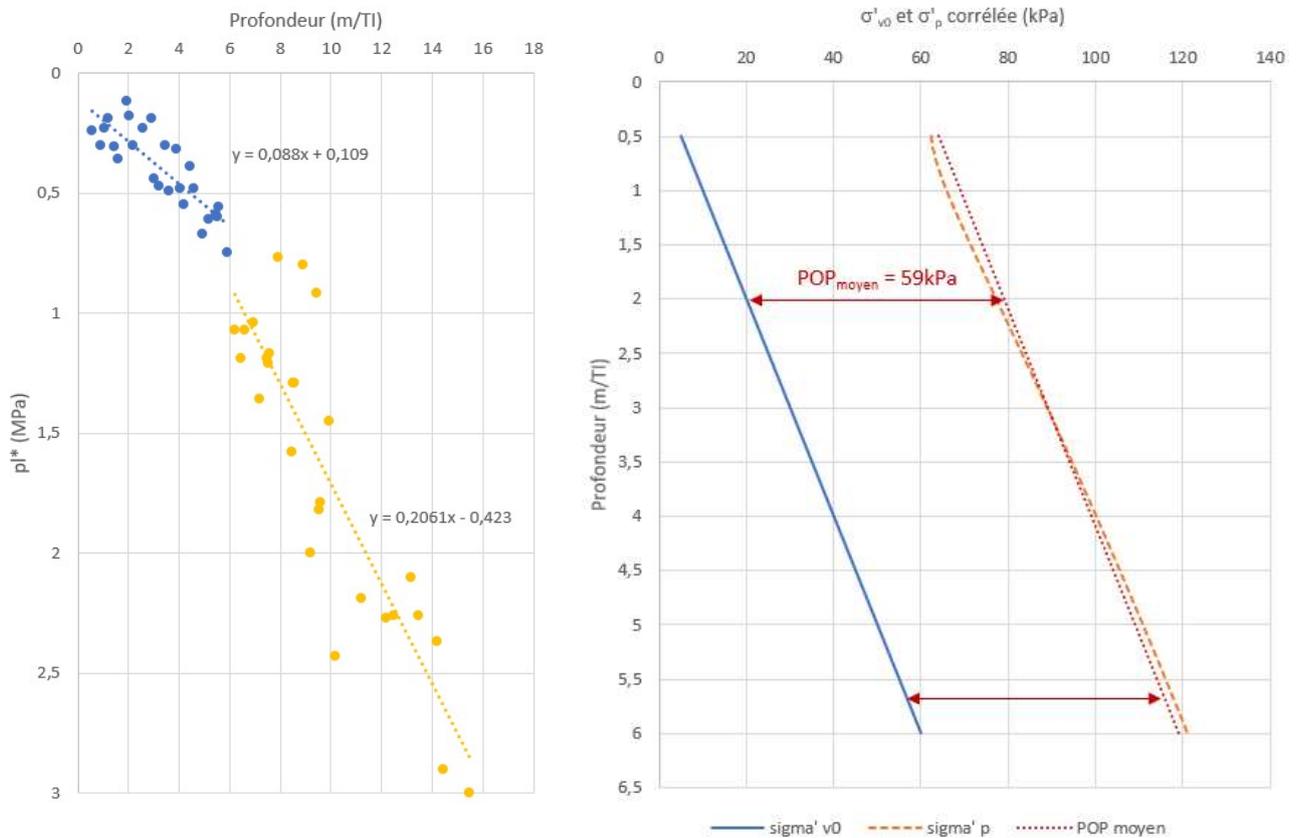
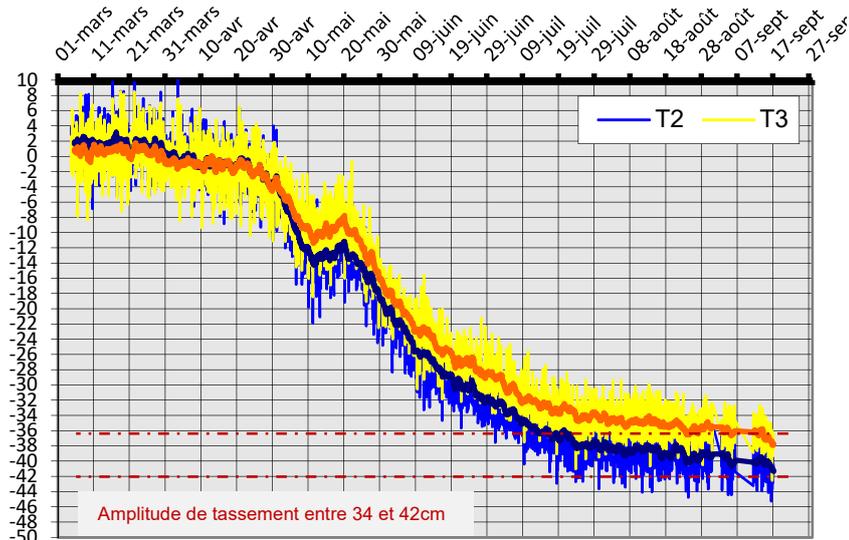


Figure 7. Calage de la fonction $P_l^* = f(z)$ et détermination de la surconsolidation

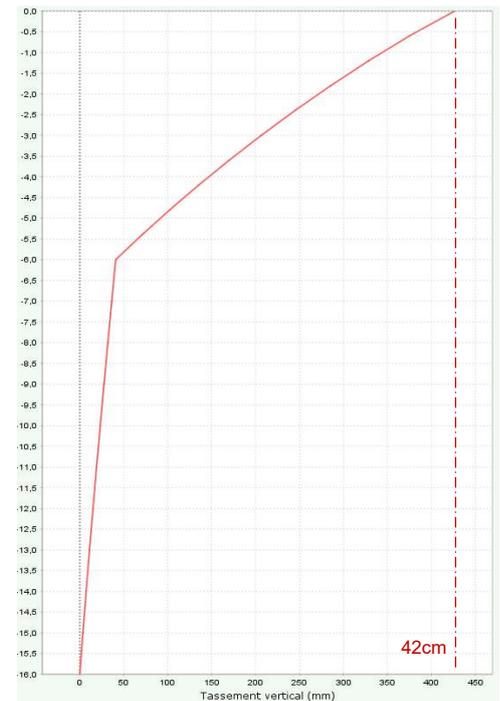
6.3. Comparaison du calcul théorique aux mesures de tassements in situ

Les graphiques de la figure 8 ci-dessous montrent ici encore le bon fonctionnement du modèle théorique et la convergence des amplitudes de tassement calculées par l'approche proposée (1).



(8a)

Figure 8. A gauche, Suivi du tassement sur le site d'Audun le Tiche (57) – tassomètres T2 et T3 sous hauteur maximale de remblais (8a). A droite, calcul théorique par la méthode œdométrique (via le logiciel FOXTA) (8b).



(8b)

7. Conclusions

Suite aux travaux proposés aux JNGG 2020 (Ferreira, 2020), nous avons souhaité à travers cet article confronter la méthode à des suivis de tassements sur des sites bien investigués. Cette présentation permet ainsi de bénéficier d'un retour d'expérience sur 3 sites mais aussi de confirmer l'approche corrélatrice de la contrainte de pré-consolidation σ'_p par la pression limite dès lors que l'on connaît l'argilosité du sol.

Ce travail doit continuer et la méthode doit être confrontée à un maximum de suivis pour l'améliorer dans la durée et la rendre robuste. A ce stade, notamment, celle-ci a été peu ou pas confrontée à des sols plus limoneux dont la VB_{0D} serait inférieure à 2.0.

8. Références bibliographiques

- Boutonnier L, Hajouai F (2013) : LGV Est Lot 41 : tassements calculés puis mesurés sous remblais, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013*
- Ferreira M (2020) : Journées Nationales de la Géologie et de la Géotechnique (JNGG), Lyon. *Corrélations nouvelles entre le CPTU, PMT et la VBS pour donner de la robustesse au modèle géotechnique.*
- Gress JC, Cuinet JM, Ferreira M (2019) : 10ème colloque national de l'AFPS, Strasbourg. *Mise en cohérence de l'estimation du module de cisaillement G_{max} par les paramètres CTPu, PMT et confrontation avec les essais en laboratoire.*
- Leroueil S, Magnan JP, Tavenas F (1985) : *Remblais sur argiles molles. Techniques et documentation Lavoisier.*
- Robertson PK (2015) : *guide to cone penetration testing, 6th edition.*
- Said Alami S, Reiffsteck P, Cuira F (2017) : *Méthode d'estimation des tassements des sols fins sous les remblais d'infrastructures ferroviaires pour lignes à grande vitesse. Revue Française de Géotechnique, Volume 153.*