
Apport d'une approche géostatistique dans l'estimation des tassements par éléments finis.

Julien Dubost * — Alain Denis * — Marc Chanson ****

* Université Bordeaux1 – Centre de Développement des Géosciences Appliquées (CDGA) – Avenue des Facultés – Domaine Universitaire 33405 TALENCE cedex.
j.dubost@cdga.u-bordeaux1.fr, a.denis@cdga.u-bordeaux1.fr

** SNCF – Direction Régionale Poitou-Charentes Aquitaine – DRI – Pole Ingénierie – Groupe Etudes Générales (PI.EG) – 54 bis rue Amédée St Germain, 33077 BORDEAUX cedex.
marc.chanson@sncf.fr

RÉSUMÉ. La méthode des éléments finis (MEF) est couramment utilisée pour le calcul des tassements en géotechnique. La détermination des paramètres mécaniques utilisés dans le calcul est souvent difficile et approximative. L'article présente une méthodologie pour estimer au mieux les modules élastiques des sols à partir des mesures de teneur en eau et des essais pressiométriques. L'estimation des tassements est réalisée par la MEF en intégrant l'ensemble des couples modules de déformation / épaisseur de sol compressible. On peut ainsi proposer une carte des tassements sur l'ensemble d'un site.

ABSTRACT. Finite elements method (FEM) is currently used for assessing settlement in geotechnical engineering. The determination of the mechanicals parameters for calculation is problematic and therefore it is approximate. The article presents a methodology to assess elastic modulus using the water content measurement and the pressumeters test results. Settlement computation is carried out with the FEM, integrating both assessed deformation modulus / compressive soil thickness. A settlement map can be drawn at a site scale.

MOTS-CLÉS : Géotechnique, méthode des éléments finis, tassements, module élastique.

KEYWORDS: Geotechnical engineering, finite element method, settlement, elastic modulus.

1. Introduction

Une plate-forme de transport combiné rail/route, d'une superficie de 11 ha, a été implantée sur des sols compressibles et très hétérogènes. Les tassements estimés lors de la conception (tassements totaux et différentiels inférieurs à 2cm) diffèrent sensiblement de ceux mesurés sur le site après la mise en service de l'infrastructure. Le présent article présente une méthodologie pour estimer les propriétés mécaniques et leur variabilité à utiliser dans les calculs de tassement.

Dans un premier temps, on propose une démarche permettant d'estimer un module élastique des sols compressibles qui est nécessaire par la suite pour les modélisations par éléments finis. Les essais œdométriques sont souvent trop peu nombreux pour permettre de rendre compte de la variabilité et de l'hétérogénéité des sols. Aussi, en tenant compte des remarques de Combarieu (2006), les mesures de teneurs en eau et les essais pressiométriques ont été exploités afin d'obtenir un module élastique équivalent pour chaque sondage.

Ces valeurs sont ensuite utilisées pour calculer le tassement pour une cellule élémentaire de sol renforcé, selon les techniques utilisées en phase de conception de l'ouvrage. Les valeurs de tassement ainsi obtenues sont fonction de la géologie identifiée sur le site, la variabilité est donc bien prise en compte. Un traitement géostatistique de ces valeurs permet, enfin, de proposer une carte de valeurs de tassement du site.

2. Présentation du site

2.1. Géologie du site

La plate-forme est implantée dans la plaine alluviale de la Garonne, où les sols sont réputés très hétérogènes. Les reconnaissances géologiques et géotechniques menées ont conclu à un modèle simplifié en trois couches : des remblais anthropiques, des sols compressibles (remplissage alluvionnaire) et des terrasses alluviales sablo graveleuses surmontant un substratum calcaire.

La couche compressible est très hétérogène, tant par son épaisseur que par la nature des sols reconnus. Trois grandes catégories peuvent être retenue : les limons, les argiles et les sols à forte proportion de matières organiques (tourbes et sols tourbeux).

2.2. Données géotechniques retenues

Une base de données géotechniques intégrant toutes les données des sondages disponibles a été construite (250 sondages). Elle permet un traitement statistique des différentes propriétés mécaniques des sols. Ainsi, les données nécessaires pour

l'estimation des tassements peuvent être proposée de manière raisonnée à l'échelle du site. Les tableaux 1 et 2 donnent les valeurs moyennes des essais œdométriques et pressiométriques en fonction de la lithologie, mais sans distinction de profondeur. Les coefficients de variations associés montrent bien la variabilité des valeurs ; ces moyennes donnent bien une idée de la compressibilité du site mais ne suffisent pas pour estimer les tassements à l'échelle du site.

Tableau 1. Propriétés œdométriques moyennes

Lithologies (nombre d'essais)	Moyennes / Coefficient de variation (CV %)				
	C_c	C_s	e_0	σ'_{v0} (kPa)	σ'_p (kPa)
Argiles (29)	0,71 / 52%	0,07 / 75%	1,5 / 39%	44 / 57%	97 / 37%
Limons (15)	0,96 / 43%	0,08 / 79%	1,9 / 33%	48 / 44%	86 / 35%
Sols très organiques (21)	1 / 38%	0,095 / 69%	2 / 31%	48,5 / 42%	85 / 35%
Tourbes (7)	2.89 / 34%	0,35 / 39%	4.5 / 27%	50 / 31%	73 / 35 %

Avec : C_c l'indice de compression du sol, e_0 l'indice des vides initial, σ'_{v0} la contrainte effective initiale, σ'_p la contrainte effective de préconsolidation.

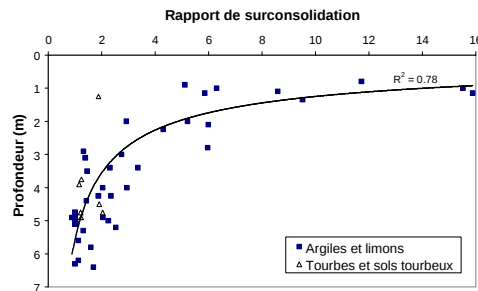


Figure 1. Etat de surconsolidation des sols

On constate que les sols sont globalement surconsolidés. Cependant, une analyse plus fine montre qu'une partie non négligeable des sols, sans distinction de lithologie, est normalement consolidée (figure 1). La variation importante du rapport de surconsolidation ($OCR = \sigma'_p / \sigma'_{v0}$) en fonction de la profondeur impose de le prendre en compte pour une estimation fine des tassements et pour éviter en particulier une surestimation des tassements.

Les données pressiométriques (Tableau 2) montrent, par l'intermédiaire du rapport E_M/P_L , des sols normalement consolidés, et sous consolidés pour les vases et les tourbes. Cependant, les lithologies des forages pressiométrique sont difficiles à interpréter et l'effet de la profondeur n'est pas pris en compte ; il convient donc de rester prudent avec les valeurs proposées ici.

Tableau 2. Propriétés pressiométriques moyennes

Lithologies (nombre d'essais)	Moyenne / Coefficient de variation (CV%)		
	E_M (MPa)	P_L (MPa)	E_M/P_L
Argile (232)	2,95 / 49%	0,3 / 37%	10,4 / 52%
Limon (45)	4,05 / 79%	0,35 / 82%	12,2 / 34%
Vases, tourbes et sols très organiques (32)	2,2 / 20%	0,42 / 21%	5,3 / 4%

Avec : E_M le module pressiométrique et P_L la pression limite

3. Estimation d'un module élastique des sols

Les essais pressiométriques et œdométriques sont couramment utilisés pour évaluer les tassements (totaux et différentiels) qui se produiraient si on implantait une infrastructure sur un sol non traité. Une telle approche conduit très souvent à proposer un renforcement des sols en place. Il existe un large éventail de méthodes que l'on peut classer en deux groupes : les méthodes d'améliorations des propriétés mécaniques (préchargement, drainage vertical, compactage dynamique...), et les méthodes de renforcement par inclusions (colonnes ballastées, pieux, jet-grouting...). Le renforcement des sols par inclusions verticales est de plus en plus modélisé à l'aide de logiciels de calcul par éléments finis (Mestat et Riou, 2004). Ces modélisations nécessitent d'attribuer des modules élastiques aux sols, leur choix est souvent subjectif et rarement justifié. Deux approches sont utilisées ci-après pour accéder à un module élastique à partir des essais œdométriques et pressiométriques.

3.1. Utilisation des données œdométriques et valorisation des mesures de teneur en eau

Le module œdométrique est variable en fonction de la profondeur et de l'état de contrainte de l'échantillon. Il est défini par :

$$E'_{oed} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad [1]$$

Où σ_z est la contrainte appliquée lors de l'essai et ε_z le tassement relatif final de l'échantillon. Le tassement relatif est estimé par la formule [2], où H est l'épaisseur de la couche compressible, ΔH son tassement, et $\sigma'_{vf} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'$ la contrainte verticale effective finale.

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H} = \frac{1}{1 + e_0} \left(C_s \cdot \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \cdot \lg \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) \quad [2]$$

Il est donc possible d'accéder au module oedométrique initial à partir des informations fournies par les essais codés dans la base de données. Le module oedométrique est relié à un module élastique drainé E' par la relation [3]. Le coefficient de Poisson ν est pris égal à 0,3.

$$E'_{oed} = \frac{E'(1-\nu')}{(1+\nu')(1-2\nu')} \approx \frac{E'}{0,74} \quad [3]$$

La teneur en eau est un paramètre physique facile à mesurer (et peu coûteux), on dispose donc très souvent d'un grand nombre de valeurs. On peut donc transformer les teneurs en eau de sortes à obtenir les principaux paramètres de compressibilité, puis comme présenté au paragraphe 3.1., calculer un module élastique équivalent sur la hauteur de sol compressible.

La teneur en eau (W) est, sur notre site comme pour la plupart des sols fins, empiriquement corrélée avec les indices de compression (C_c) et de gonflement (C_s). L'indice des vides peut être obtenu par la relation $e=W.\gamma_s/\gamma_w$. La contrainte effective verticale initiale σ'_{v0} est estimée en fonction de la profondeur et du poids volumique γ des sols, la contrainte effective de préconsolidation σ'_p est, elle, obtenue à partir du rapport de surconsolidation (figure 1). Une fois ces estimations faites, il est possible de calculer une déformation relative et donc d'accéder à un module type oedométrique. Cette démarche conduit aux valeurs de modules présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Modules œdométriques et élastiques moyens.

Lithologies (nombre de valeurs)	E'_{oed} (kPa)	E' (kPa)	CV (%)
Argile (420)	10400	7695	49%
Limon (83)	11233	8312	88%
Vases, tourbes et sols très organiques (81)	7303	5404	153%

3.2. Utilisation des données pressiométriques

Le module pressiométrique E_M a été rapproché d'un module élastique par L. Ménard, par l'intermédiaire d'un coefficient rhéologique α , fonction de la lithologie et de l'état de consolidation du sol considéré. Combarieu (2006) montre à travers de nombreux exemples que cette approche est erronée, et que pour transformer un module pressiométrique en un module élastique, il convient d'être très prudent ; ce qu'il traduit en introduisant un coefficient correctif k , qui reste à l'appréciation du géotechnicien [4].

$$E' = k \cdot \frac{E_M}{\alpha} \quad [4]$$

Pour calculer un module élastique, il propose la démarche suivante : transformer E_M , module sécant, en un module cyclique non drainé $E_U = n.E_M$. Puis, donner une estimation d'un module élastique drainé $E' = m.E_U$ (Lavis *et al.*, 2004). Les coefficients n et m sont empiriques et donnés en fonction de la nature du sol.

A partir des données du paragraphe 2.2., on obtient les valeurs du tableau 4. On constate que les indications données par Combarieu reste imprécises, et que l'utilisation du coefficient rhéologique Ménard donne des valeurs de module élastique en concordance avec les calculs selon les recommandations de Combarieu. Pour la suite, nous avons donc estimé les modules élastiques pour les sondages pressiométriques par la méthode Ménard.

Tableau 4. Modules pressiométriques et élastiques moyens.

Lithologies	E_M (MPa)	n	m	E_U (MPa)	E' (MPa)	E_M/α (MPa)
Argile	2,95	2,5 à 3,5	De 0,6 à 0,9	7,4 à 10,3	4,4 à 9,3	4,4
Limon	4,05	3 à 4,5		12,1 à 18,2	7,3 à 16,4	8,1
Vases, tourbes et sols très organiques	2,2	1 à 2	De 0,1 à 0,6	2,2 à 4,4	0,22 à 2,6	2,2

4. Estimation des tassements

4.1. Intégration des valeurs de modules estimées dans les calculs aux éléments finis

Les approches probabilistes (type Monte-Carlo) combinées aux modélisations par éléments finis permettent de prendre en compte les incertitudes existant sur les paramètres géotechniques, et d'évaluer leur effet sur les résultats, notamment en terme de tassement. Une approche similaire a été conduite en intégrant des valeurs non plus « probables », mais estimées selon les méthodes présentées au paragraphe précédent.

Nous avons calculé environ 600 modules élastiques à partir des teneurs en eau et 300 à partir des essais pressiométriques. Par souci de simplification, nous avons estimé un module équivalent du sol compressible en faisant une moyenne harmonique pour chaque sondage. On obtient au total 174 couples sondage/module équivalent sur notre site.

Ces modules élastiques équivalents ont donc été intégrés dans un calcul numérique pour estimer les tassements. Le modèle utilisé est le même que celui présenté par Dubost *et al.* (2007 a) : modèle axisymétrique en élasticité linéaire d'une cellule élémentaire de sol renforcé par un plot ballasté pilonné. On associe à

chaque calcul : sa position géographique sur le site, un module élastique équivalent et l'épaisseur de sol compressible à l'emplacement du sondage.

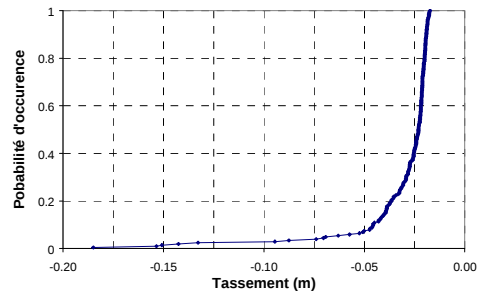


Figure 2. Répartition des valeurs de tassement.

La figure 2 donne la probabilité de rencontrer une valeur de tassement en fonction du module élastique équivalent et de l'épaisseur du sol compressible pour chaque forage. On constate que seul 10% des forages présentent un risque de tassement supérieur à 5 cm, mais que 40% peuvent présenter un tassement supérieur à l'estimation faite en phase conception (c'est-à-dire 2,5cm).

4.2. Approche géostatistique pour estimer les tassements à l'échelle du site

Les tassements calculés sont ensuite repositionnés en plan et un krigeage simple permet de proposer une carte des tassements du site (Khalfaoui *et al.*, 2005) après renforcement des sols (figure 3).

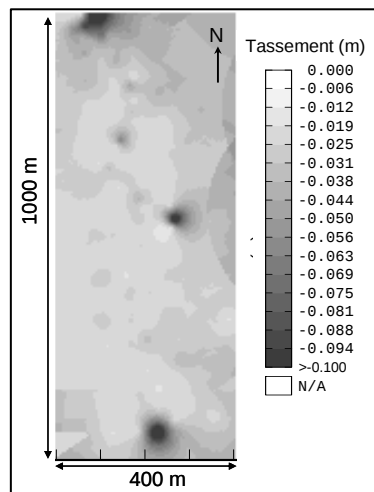


Figure 3. Carte du tassement à l'échelle du site

Les tassements estimés sont globalement uniformes sur le site, compris entre 1 et 3 centimètres. On constate cependant 3 zones où le tassement est très élevé, et qui nécessitent donc une vérification. L'approche proposée ne permet pas la mise en évidence de tassement différentiel important à l'échelle du site, excepté pour les 3 zones précédentes. D'autre part, il est probable que l'épaisseur de sols compressibles ait été sous estimée (Dubost et *al.*, 2007 b). En effet, l'épaisseur considérée ici ne concerne que les sols fins, les sables argileux (ou argiles sableuses) pourraient être plus compressibles que dans l'hypothèse retenue, et les tassements calculés sensiblement différents.

6. Conclusion

Les infrastructures sensibles aux tassements requièrent une étude géotechnique minutieuse qui prend en compte la variabilité et l'hétérogénéité des sols. La compressibilité du site est étudiée à partir des essais œdométriques, puis modélisée avec un renforcement par des calculs aux éléments finis. La variabilité et l'hétérogénéité des sols sont souvent mal intégrées dans ces calculs.

Les mesures de teneurs en eau et les essais pressiométriques sont couramment pratiqués pour les reconnaissances géotechniques. On montre comment valoriser ces mesures pour estimer des modules élastiques des sols pour chaque sondage. Ces modules peuvent ensuite être intégrés dans les modélisations par éléments finis. Les valeurs ainsi calculées sont ensuite traitées par une approche géostatistique permettant de proposer une carte des tassements à l'échelle du site.

7. Références bibliographiques

- Combarieu O. « *L'usage des modules de déformation en géotechnique* ». Revue Française de Géotechnique, N°114, 1^{er} trimestre 2006.
- Dubost J., Denis A., Marache A., Chanson M. "Probabilistic FEM analysis of railway-platform settlements". In NUMOG X International Symposium, Rhodes, Greece, 24-27 april 2007 a.
- Dubost J., Denis A., Chanson M., La Borderie C. « *Analyse de désordres affectant un remblai sur sols renforcés* ». Revue Européenne de Génie Civil, à paraître, 2007 b.
- Khalfaoui S., Mezghache, « *Evaluation géostatistique de la maille de reconnaissance géotechnique de l'aérodrome de Batna (N-E algérien)* », Revue Française de Géotechnique, n°111, 2^{ème} trimestre 2005.
- Lavisse J., Schmitt P. « *Interprétation de mesures de tassements sous des remblais de préchargement au port de Rouen* ». Symposium International ASEP-GI 2004, p229-243, Paris, Septembre 2004.
- Mestat P., Riou Y. « *Validation des modèles numériques de sols améliorés par colonnes* ». Symposium International ASEP-GI 2004, p229-243, Paris, Septembre 2004.