

Étude par la méthode des éléments finis du comportement des remblais en sols fins compactés

Finite element analysis of embankments in fine compacted soils

Droniuc N.

IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes Champs sur Marne, 77447 Marne la Vallée cedex 2, France

RÉSUMÉ : Les sols fins compactés (argiles ou limons) provenant des déblais peuvent être réutilisés en remblais à condition qu'ils permettent un compactage optimal et que le comportement à long terme ne donne pas des déformations inacceptables par l'ouvrage. La modélisation du comportement mécanique et hydrique est possible en utilisant la méthode des éléments finis, mais à conditions que les modèles numériques soient validés par l'expérience. Cet article présente quelques résultats numériques issus des études sur les remblais en sols fins compactés soumis aux cycles de séchage et d'humidification. Les conclusions portent notamment sur les déformations induites par les variations hydriques dans le corps du remblai expérimental.

ABSTRACT: The fine compacted soils (clay or silt) from cuttings can be used in backfill construction, provided they allow optimal compaction and acceptable long-term behavior. Modeling of the mechanical behavior of this unsaturated fine soil is possible by using the finite element method, but numerical models must be validated by experimental work. This paper presents some numerical results from studies on fine compacted soils used in embankment construction subjected to cycles of wetting and drying.

MOTS-CLÉS: sol non saturé, sol fin compacté, remblai, élastoplasticité, analyse aux éléments finis.

KEYWORDS: unsaturated soil, fine compacted soil, embankment, elastoplasticity, finite element analysis.

1 INTRODUCTION

La sensibilité à l'humidification des sols fins argileux ou limoneux a des implications sur le comportement mécanique et hydrique de nombreux ouvrages géotechniques. Dans les travaux de construction de remblais. Le problème posé est d'abord celui de savoir si le matériau fin peut être compacté dans des conditions optimales. Puis, on doit s'assurer que le comportement mécanique à long terme permette d'obtenir des déformations acceptables sous les charges mécaniques cycliques dues au trafic, mais aussi sous l'action des cycles de séchage et d'humidification.

L'étude du comportement mécanique des remblais en sols fins compactés montre que la principale source de contraintes mécaniques dans un corps de remblai est son poids propre et que les sollicitations cycliques provenant du trafic n'affectent que les couches supérieures des remblais (Serratrice 1995, Mieussens 2000).

L'hétérogénéité des sols fins compactés, due à la nature et à l'état hydrique des déblais dans lesquels le matériau a été prélevé, la présence des talus, leur construction par couches compactées, donnent lieu à des états de contraintes verticales et horizontales complexes.

Concernant le comportement hydrique des remblais en sols fins compactés, les sollicitations sont diverses : les échanges sol-atmosphère, infiltration par la plate-forme, remontées capillaires par la base du corps du remblai, inondations, induisent des contraintes importantes dans le corps et sur les talus des remblais.

Il existe de nombreux remblais construits, et force est de constater que la plupart d'entre eux ont un comportement satisfaisant du point de vue mécanique : ils assurent un minimum de déformations (ou des déformations acceptables) du point de vue de leur rôle.

Les pathologies constatées sur des remblais en sols fins compactés proviennent principalement des sollicitations hydriques et donc la caractérisation du comportement hydrique de ces matériaux reste essentielle.

De plus, les études de conception des remblais, leur analyse en terme de déformations et encore leur stabilité, passent de

plus en plus par l'utilisation de la méthode des éléments finis. Or, la formulation des équations du comportement mécanique et hydrique reste complexe du fait du grand nombre de paramètres (mécaniques, hydriques, d'interaction entre les constituants d'un sol fin), de l'état initial des contraintes et de l'état initial hydrique, ainsi que des conditions aux limites.

Après une courte partie dédiée aux équations du comportement mécanique et hydrique d'un sol fin compacté, cette communication présente quelques aspects pratiques liés à la modélisation par la méthode des éléments finis des sols fins compactés.

Les résultats numériques obtenus sont en accord avec les résultats expérimentaux et montrent la capacité du modèle numérique à prévoir le comportement des sols fins compactés utilisés pour la construction des remblais.

2 MODÉLISATION EN ÉLÉMENTS FINIS

1.1 Les équations du modèle en éléments finis

Pour modéliser numériquement les sols non saturés on suppose souvent que ces sols sont le résultat de la superposition de trois milieux continus, qui, couvrent chacun l'ensemble de l'espace occupé par le sol :

- le milieu continu global (milieu triphasique où on suppose que les mouvements de l'eau et de l'air ont un effet négligeable sur ses propriétés physiques et mécaniques) ;

- le milieu continu air et le milieu continu eau qui peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre à l'intérieur du milieu global et en sortir ou y entrer.

On suppose que les déformations du milieu peuvent être induites par une variation de la contrainte totale ($\sigma + p_a$) et/ou de la succion ($p_a - p_w$), considérées comme variables indépendantes. La loi de comportement est celle proposée par Alonso et al. (1990). C'est une loi de type élastoplastique avec écrouissage. Les contraintes et les déformations doivent satisfaire simultanément les équations d'équilibre et la loi de comportement.

La résolution numérique de ces équations associe la méthode des éléments finis pour discrétiser l'espace et un schéma d'intégration implicite pour discrétiser le temps.

En ajoutant les équations d'équilibre mécanique et les équations qui gouvernent l'écoulement de l'eau et de l'air dans le sol, on obtient un système d'équations décrivant le couplage hydromécanique du système « squelette solide - eau - air ».

En passant par un principe variationnel adapté, on arrive à la forme en éléments finis de ces équations :

$$\begin{bmatrix} R & -C_{uw} & C_{ua} \\ C_{wu} & -C_{ww} + K_w \Delta t & C_{wa} \\ C_{au} & -C_{aw} + K_a \Delta t & E_a + K_a \Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U \\ \Delta H_w \\ \Delta H_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{uw} H_w - C_{ua} H_a + \Delta F \\ K_w H_w \Delta t + Q_w \\ -K_w H_w \Delta t + K_a H_a \Delta t + Q_a \end{Bmatrix}$$

où R est la matrice de rigidité, Δt est l'incrément de temps, E_a est le module de compressibilité de l'air, H_w et H_a sont les vecteurs des valeurs de la charge hydraulique et de la charge d'air, respectivement, K_w et K_a sont les matrices de perméabilité, C_{uw}, C_{ua}, C_{wu}, C_{ww}, C_{wa} et C_{aw} sont des matrices de couplage, ΔF est le vecteur des forces appliquées, Q_w est le flux de l'eau et Q_a le flux d'air, S_r est le degré de saturation et S_{ru} le degré de saturation résiduel, γ_a est le poids volumique de l'air, e l'indice des vides et D et E sont des constantes.

La modélisation proprement dite est faite en utilisant le logiciel de calcul en éléments finis CESAR-LCPC.

1.2 Essai expérimental et résultats numériques

Dans le but d'étudier les transferts hydriques dans les remblais en sols argileux, une expérimentation a été réalisée au Centre d'Expérimentation Routière de Rouen (CER) en collaboration avec l'IFSTTAR, les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées d'Aix en Provence et de Toulouse et l'École Universitaire d'Ingénieurs de Lille (EUDIL).

L'argile de Bavent, utilisée pour la construction de ce remblai expérimental, provient d'une carrière de brique de la région de Rouen. Ce matériau a été sélectionné pour trois motifs :

- son utilisation en remblai courant est possible selon les critères du Guide des Terrassements Routiers (GTR) qui fixe les règles de choix et de mise en œuvre des matériaux de remblais routiers en France ;
- une quantité suffisante de ce matériau est disponible en place. C'est un matériau gonflant.

L'argile de Bavent se présente sous forme d'un mélange à deux couleurs, beige et grise. Un ensemble d'essais d'identification a été effectué dans plusieurs laboratoires impliqués dans l'action de recherche. Les limites de consistance de ce matériau obtenues dans ces laboratoires sont rassemblées dans le tableau 1.

La figure 1 montre la courbe granulométrique de l'argile de Bavent (Alshihabi, 2001). Elle est composée de plus de 85% d'éléments fins (D<80μm). Selon les valeurs des limites de consistance du tableau 1, ce sol peut être classé comme une argile moyennement plastique (A2) ou plastique (A3) selon la classification du Guide des Terrassements Routiers.

La figure 2 montre les résultats d'un essai Proctor normal réalisé au CER de Rouen. La masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal vaut ρ_{dOPN} = 1,71 t/m³. Elle correspond à une teneur en eau optimale de w_{OPN} = 19,6%.

La figure 3 montre les dimensions des deux parties du remblai. La figure 4 montre la mise en œuvre des deux parties du remblai. Le compactage a été assuré par deux méthodes (pilonneuse et marteau électrique) pour garantir le même compactage au milieu et proche des parois.

dans divers laboratoires

		w _p (%)	w _L (%)	I _p (%)
LRPC Aix en	Argile grise	24	53	29
Provence	Argile beige	23	46	23
	CER (Rouen)	18	44	26
	Laboratoire de Mécanique de Lille (EUDIL)	28	44	16
	IFSTTAR	22	48,4	26,4

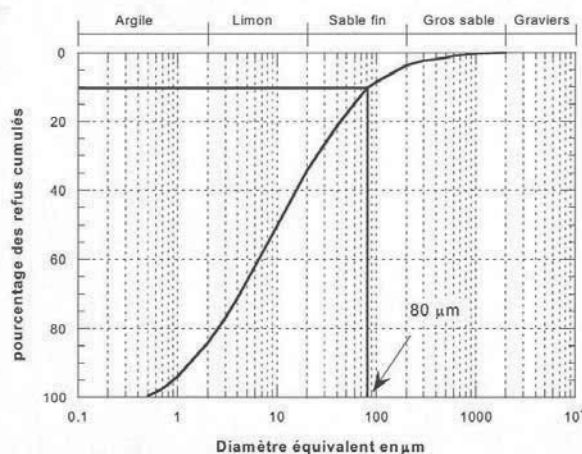


Figure 1. Courbe granulométrique de l'argile de Bavent (Alshihabi, 2002)

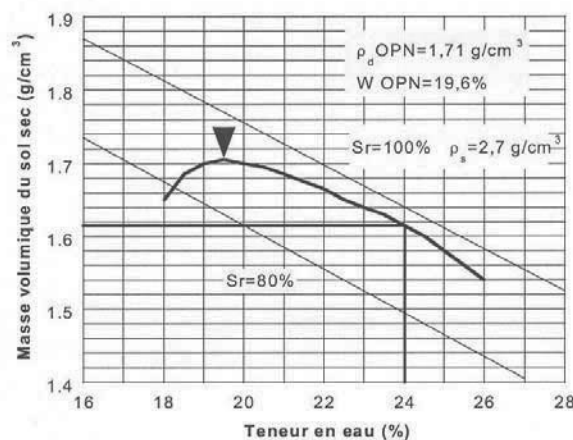


Figure 2. Courbe Proctor normal de l'argile de Bavent

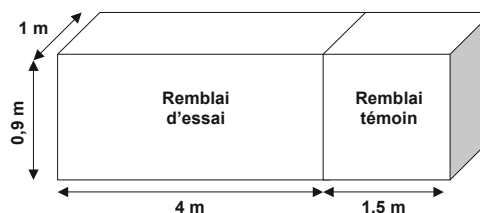


Figure 3. Dimensions du remblai R1

Tableau 1. Caractéristiques physiques de l'argile de Bavent déterminées



a) Enceinte pour recevoir les structures



b) Compactage du matériau à la pilonneuse

Figure 4. Construction du remblai

Plusieurs paramètres sont suivis pendant la période d'expérimentation. Le contrôle du gonflement du matériau de remblai est fait suivant deux méthodes :

- d'une part, par implantation de tassomètres à différentes profondeurs dans le remblai. Six capteurs sont installés à l'intérieur du remblai, à 5 cm, 15 cm et 45 cm de la surface. Pour chaque profondeur, deux capteurs sont implantés dans des positions symétriques ;
- d'autre part, un suivi par nivellement est assuré en trois points du remblai d'essai et en deux points du remblai témoin.

Les variations de la teneur en eau sont suivies par des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) implantées selon trois profils :

- le premier profil contient quatre sondes placées à quatre niveaux (-5 cm, -15 cm, -45 cm et -85 cm) dans le remblai qui subit un cycle d'humidification et de séchage ;
- le deuxième profil comprend deux sondes, implantées dans le remblai d'essai à 5 cm et 45 cm de profondeur ;
- le troisième profil comprend trois sondes implantées dans le remblai témoin à 5 cm, 15 cm et 45 cm de la surface.

La pression interstitielle est contrôlée au moyen de neuf tensiomètres. Dans la zone testée, on a installé des capteurs sur deux profils (Figure 5). Le premier relève les valeurs des pressions à 5 cm, 15 cm, 45 cm et 85 cm de la surface. Dans le deuxième profil, deux niveaux sont suivis : mesures à -5 cm et à -45 cm. Pour la zone témoin, un seul profil de mesure a été équipé, pour enregistrer les pressions à 5 cm, 15 cm et 45 cm de la surface.

Les pressions verticales et horizontales sont également mesurées au sein du remblai. Deux capteurs sont implantés dans le bloc expérimental : un capteur de pression est placé horizontalement à la base, pour mesurer la pression verticale, et un deuxième est placé verticalement à 45 cm de profondeur, pour mesurer la pression horizontale.

D'autres paramètres ont été contrôlés pendant cet essai, comme les températures du matériau et de l'air ambiant et la densité du matériau.

Les figures 5 et 6 montrent une coupe et une vue en plan du remblai. Elles indiquent l'emplacement de l'ensemble des capteurs dans le remblai.

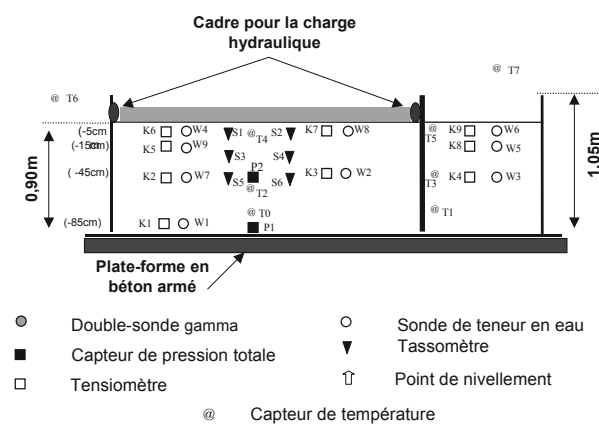


Figure 5. Coupe verticale des deux zones du remblai R1

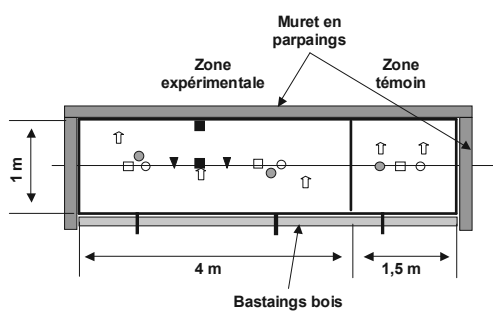


Figure 6. Vue en plan des deux zones du remblai R1

Les mesures de déplacement pendant une période de plus de 900 jours, avec un cycle hydrique, ont permis de tracer les courbes de déplacement (en mm) en fonction du temps (en jours) (Figure 7). La position symétrique des capteurs aurait dû donner les mêmes courbes de gonflement ou des courbes proches les unes des autres (couples de capteurs S1-S2, S3-S4 et S5-S6). Toutes les courbes ont la même allure. Avant la mise à l'eau, aucune déformation n'a été indiquée par le capteur S5 à la profondeur de 45 cm. Par contre, on a noté un faible gonflement du matériau en S6 et un tassement de l'ordre de 1 mm à proximité de la surface (S1 et S2).

Le comportement de l'argile de Bavent au début des mesures a montré la complexité de son état initial. Le remblai expérimental a été édifié en suivant les mêmes procédures que pour les ouvrages réels. Le matériau a donc subi une forte sollicitation due au compactage. Il a atteint la pression de préconsolidation et l'air dans les pores s'est comprimé. Une fois le compactage achevé, le matériau non saturé a réagi en sens inverse pour décompresser le volume d'air enfermé dans les pores et il a gonflé.

Avant l'humidification, le sol a été en contact avec l'atmosphère, donc dans des conditions de séchage. Le matériau a donc subi une combinaison de deux évolutions opposées : le gonflement dû à la réaction du matériau après le compactage et le retrait dû au séchage à l'air. Ceci explique les résultats obtenus avant l'humidification du remblai. Si l'effet du compactage est plus important que l'effet du séchage, on obtient un gonflement, et inversement. Ce phénomène a d'ailleurs été mis en évidence dans le modèle en éléments finis.

Après l'humidification, le gonflement est maximal à la surface et diminue avec la profondeur. L'effet de l'humidification apparaît en premier dans les couches

superficielles et se propage ensuite lentement vers les couches profondes à cause de la faible perméabilité de l'argile.

Au cours de l'imbibition, les couches les plus profondes sont restées moins saturées que les couches de surface. D'autre part, le poids volumique augmente avec la profondeur ; c'est pourquoi on observe un gonflement plus important en surface. Le soulèvement atteint 28 mm à 10 cm de la surface (résultat fourni par le capteur S1).

Au début de l'assèchement du remblai, les courbes ont changé de pentes et on a remarqué un décalage du début de retrait entre les différentes profondeurs ; comme le séchage s'effectue à l'air, les couches les plus proches de la surface évoluent plus tôt. Les courbes sont restées parallèles et ont varié avec les mêmes pentes.

Les mesures des capteurs positionnés d'une manière symétriques ont les mêmes pentes mais sont décalées. On peut expliquer cette différence par la non-homogénéité du sol, puisque le remblai a été construit avec un sol naturel.

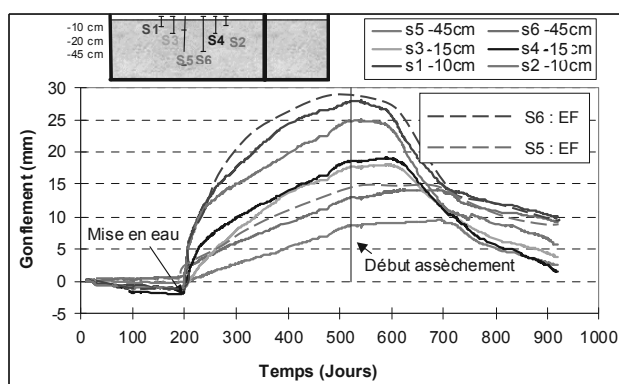


Figure 7. Gonflement et tassement mesurés par tassomètre à différentes profondeurs, durant le cycle d'humidification-séchage : calculs en éléments finis (courbes EF) et comparaison avec les mesures.

2. CONCLUSION

L'étude de ce modèle réduit pendant deux ans et demi, sous un cycle d'humidification et de séchage, a montré les difficultés et la complexité des conditions initiales dans les ouvrages réels. La non homogénéité du matériau compacté est la source principale de diversité des résultats trouvés. Les effets d'humidification et de séchage sont différents avec la profondeur.

Le remblai relâche ses contraintes totales après le compactage, en cherchant un état d'équilibre. Pendant le cycle, les effets d'humidification et de séchage sont traduits directement par un gonflement puis un retrait dans le matériau. Malgré la différence constatée entre les mesures par tassomètre et par points de nivellement, les résultats dans l'ensemble ont montré une bonne concordance.

Avec des valeurs plus petites d'humidité, on a noté les mêmes variations de la pression interstitielle dans la zone témoin que dans la zone test. Ces valeurs deviennent positives pendant la période d'humidification. Pour la zone expérimentale, on les explique par une saturation du matériau. En revanche, si l'on retrouve ces valeurs positives dans la structure témoin qui n'a pas subi de chargement hydrique, deux possibilités peuvent être imaginées :

- soit, la pression interstitielle positive ne vient pas de l'effet de l'humidification. Tout simplement la pression de l'air dans les pores devient plus importante que la pression de l'eau pour d'autres raisons, comme l'augmentation de la température, par exemple, dans le matériau qui varie pendant cette période entre

18 et 20°C. Dans ce cas, une pression interstitielle positive ne signifie pas forcément une saturation du matériau ;

- soit une variation de l'humidité dans l'air ambiant a conduit à la saturation du matériau de la partie témoin. C'est une possibilité qui est moins acceptable puisque les couches profondes ont également été touchées et présentent les mêmes variations dans la zone test (la séparation entre la partie « remblai expérimental » et la partie « remblai témoin » est faite par une paroi rigide, sans déplacements possibles).

La teneur en eau est le paramètre le plus influencé par l'effet du cycle hydrique :

- avant l'humidification, elle est moins importante près de la surface, augmente vers le milieu de la couche puis diminue en profondeur ;

- pendant l'humidification, elle est plus importante en surface. Elle diminue avec la profondeur ;

- vers la fin d'essai, elle a tendance à revenir vers sa valeur initiale.

On observe que les variations de la teneur en eau sont plus importantes en surface, mais que les mêmes variations se produisent en profondeur, avec un décalage croissant avec la profondeur.

Les premiers résultats obtenus en utilisant le modèle en éléments finis de CESAR-LCPC semblent donner des valeurs de gonflement acceptables, comparables aux valeurs issues des mesures expérimentales, tant pour le gonflement en surface que pour le gonflement en profondeur du remblai. D'autres analyses en éléments finis en cours, concernant la variation de la teneur en eau, du degré de saturation ou encore de la pression interstitielle en fonction du temps permettront de valider le modèle en éléments finis et le rendre utilisable pour la profession.

3. RÉFÉRENCES

- Alonso E., Gens A., Josa A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, n° 40, vol. 3, pp. 405-430.
- Alshihabi O. (2002) Étude en laboratoire du comportement d'un sol compacté non saturé. Influence des cycles de séchage-humidification. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 131 pages.
- Mieussens C. (2000). Déformations cycliques et irréversibles dans les remblais argileux. *Revue Française de Géotechnique*, no. 90, pp. 47-59.
- Serratrice J.F. (1995). Comportement d'une argile compactée. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 200, pp. 13-23.