

ESSAIS GEOTECHNIQUES DE TERRASSEMENT ET SUCCION : QUELQUES ENSEIGNEMENTS PRATIQUES

EARTHWORKS LABORATORY TESTS AND SUCTION : SOME PRATICAL LESSONS¹

Luc BOUTONNIER¹, Dino MAHMUTOVIC^{1,2}, Rinah ANDRIANATREHINA³, Denis BRANQUE⁴, Thiep DOANH⁴, Thierry DUBREUCQ⁷, Jean-Marie FLEUREAU⁵, Jean-Jacques FRY⁶, Lan HOANG⁴, Benjamin PELIZZARI², Said TAIBI³, Simon SALAGER², Maurice BUFALO⁸, Ludovic GAVOIS⁹

¹ Egis géotechnique, Seyssins, France

² Univ. Grenoble Alpes, 3SR, f-38000 Grenoble, France
CNRS, 3SR, Grenoble, France

³ LOMC, Le Havre, France

⁴ ENTPE, Vaulx-en-Velin, France

⁵ Centrale Supélec, Châtenay-Malabry, France

⁶ EDF, Bourget du Lac, France

⁷ IFSTTAR, Nantes, France

⁸ Valérian, SORGUES, FRANCE

⁹ Vinci Construction Terrassements, NANTERRE, FRANCE

RÉSUMÉ – Le but de cette communication est de faire un lien entre les essais de terrassement classiques utilisés dans la profession et la succion, afin de mieux appréhender le comportement à court et long terme des ouvrages en terre. Les résultats de plusieurs essais (Proctor, Rc, IPI) sont ainsi analysés au travers de la succion. Ce papier présente des résultats préliminaires qui seront présentés plus en détail dans le guide méthodologique du projet TerreDurable.

ABSTRACT – This paper aims to build a link between earthworks laboratory tests and suction in order to improve earthworks behavior knowledge in the short and long terms. Results of different tests (Proctor, Rc, IPI) are analyzed with respect to suction. The paper presents preliminary results that will be detailed in the TerreDurable project methodological guide.

1. Introduction

Ce papier s'inscrit dans le cadre du projet ANR TerreDurable (programme Bâtiments et Villes Durables, convention ANR 2011 VILD 004 01), 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.

Cette communication est une contribution à la compréhension des sols fins compactés. Elle cherche à répondre à certaines questions:

- Comment évolue la résistance au cisaillement en fonction de l'état hydrique?
- Comment évolue la résistance au cisaillement en fonction de l'énergie de compactage?
- Comment évolue la résistance au cisaillement en fonction du chemin de contrainte et du chemin hydrique?

A cet effet, les résultats d'essais Proctor, d'essais de compression simple (Rc), et d'Indice Portant Immédiat (IPI) sont analysés au travers de mesures de succion, degré de saturation et teneur en eau.

Les résultats présentés par la suite s'appuient sur quatre sols différents : deux marnes provenant du chantier de l'autoroute A304 (Charleville Mézières (08)), un sable limoneux provenant du barrage de Livet Gavet (Isère, 38) et une argile plastique provenant du chantier de la LGV SEA. Les résultats présentés sont partiels mais ils seront intégralement disponibles dans le guide méthodologique de synthèse du projet Terredurable.

2. Les principaux essais de laboratoire utilisés lors de travaux de terrassement et leur utilité

2.1. Les objectifs du compactage d'un sol

Avant de parler des essais de laboratoire utilisés lors de travaux de terrassement, il convient d'abord d'expliquer ce qu'est un compactage et son objectif.

Le compactage d'un sol a pour but de diminuer son volume d'air. Compacter un sol c'est le densifier, en augmentant son poids volumique sec et en diminuant son volume apparent. Cette technique a de nombreux effets sur un sol tels que (Biarez et Favre, 1975): une augmentation de la résistance au cisaillement, une diminution du retrait, une diminution de la perméabilité et une diminution de la compressibilité.

Ces effets bénéfiques se caractérisent d'un point de vue pratique par une augmentation de la portance, de la traficabilité et de la stabilité ainsi qu'une diminution des déformations.

Les objectifs peuvent néanmoins être variables selon le type d'ouvrage. Par exemple :

- pour les infrastructures linéaires (routes, voies ferrées), on cherche à limiter les tassements différés et à avoir une portance suffisante au niveau de la plateforme pour supporter le trafic routier ou ferroviaire,
- Pour les noyaux de barrages en terre, une perméabilité homogène est essentielle alors que les tassements différés ne sont pas un problème majeur.

2.2. Rôle des différents essais de laboratoire testés dans le cas des sols fins

Dans le domaine des infrastructures :

En France, dans le domaine des infrastructures, les terrassiers s'appuient sur le GTR (Guide des Terrassements Routiers SETRA-LCPC (1992)) qui prescrit des recommandations sur le compactage en fonction du type de sol rencontré. Il est pour cela important de bien identifier un sol du point de vue du GTR (granulométrie, valeur au bleu, indice de plasticité) et d'accompagner son étude par des essais de laboratoire de terrassement. Les principaux essais et leur fonction sont les suivants :

- l'essai Proctor : il permet d'obtenir la densité et la teneur en eau optimale de compactage pour une énergie de compactage donnée,
- l'Indice portant immédiat (IPI) ou CBR est un bon révélateur de la portance du sol et de sa traficabilité pour une teneur en eau donnée. Pour prendre en compte l'effet d'une imbibition du remblai, des essais CBR après immersion de 4 jours dans l'eau sont parfois réalisés.
- Pour étudier la stabilité, les concepteurs des ouvrages s'appuient généralement sur des essais sur des sols saturés (triaxiaux), et/ou sur des corrélations basées sur la nature des matériaux (granulométrie, limites d'Atterberg) pour estimer des caractéristiques de cisaillement drainées. Dans les cas courants, aucune estimation

des tassements différés n'est effectuée dans les corps de remblai, le compactage étant sensé limiter le risque de tassements différés.

Dans le domaine des ouvrages hydrauliques :

Le GTR n'a pas été conçu pour les ouvrages hydrauliques mais le Proctor et l'essai CBR restent les essais de référence. Contrairement à la pratique dans le domaine des infrastructures, l'essai de compression simple Rc est d'un usage courant pour évaluer l'évolution de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau, les barrages nécessitant souvent, compte tenu de leur hauteur, une analyse de la stabilité à court et long terme. Pour la phase étude, ces essais sont bien évidemment complétés par des essais de mécanique des sols (triaxiaux drainés et non drainés, oedomètres avec mesure de pressions interstitielles pour estimer Ru, etc.).

Lien avec la succion :

Dans des sols compactés, il est usuel de faire la relation entre Rc, l'IPI ou le CBR en fonction de la teneur en eau de préparation de l'éprouvette. En réalité, pour un matériau donné, c'est la succion, dont la valeur est liée à la teneur en eau et à l'indice des vides, qui gouverne le comportement. C'est ce que nous allons montrer dans la suite de cette communication pour éclairer la compréhension du comportement des sols compactés.

3. Présentation des sols étudiés et du programme expérimental

3.1. Les sols étudiés

Tableau 1. Propriétés géotechniques des différents sols étudiés

	Granulométrie (%)		w _L (%)	I _p	w _{OPN} (%)	γ _{d OPN} (kN/m ³)	CaCO ₃ (%)	Classe GTR
	< 80 μm	< 2 μm						
Marne A304 D5	94	36	80	49	27,5	15	18,5	
Marne A304 D9B	-	-	46	24	21	16	-	A2
Sable limoneux Livet-Gavet	53	100	29	8	11.2	18.3	-	A1
argiles à Châtaignier LGV SEA	88	70	46	24	21	13,1	13	A3

Quatre sols différents ont été étudiés au cours du projet Terredurable comme illustrés dans le tableau 1. Quatre doctorants ont travaillé sur la réalisation de ces essais.

3.2. Le programme expérimental

Le premier volet du programme a consisté à réaliser des essais Proctor à différentes énergies de compactage et à mesurer la succion. L'objectif est d'avoir une base de donnée d'essais interprétables qui seront exploités dans la synthèse du projet.

Le deuxième volet couvre les essais de résistance courants (IPI, CBR et Rc) qui ont été réalisés avec mesures de succion afin d'être réinterprétés et éventuellement simulés par des modélisations numériques, pour faire le lien entre les essais courants et la mécanique des sols.

Le programme comprend également une analyse de la structure des matériaux (relation teneur en eau / succion reliée à la distribution des tailles de pores dans le sol).

L'approche laboratoire a été complétée par la réalisation d'une planche de compactage dont les principaux résultats sont présentés dans les actes de ce congrès (Pelizzari et al., 2016).

4. Structure et succion dans un sol compacté

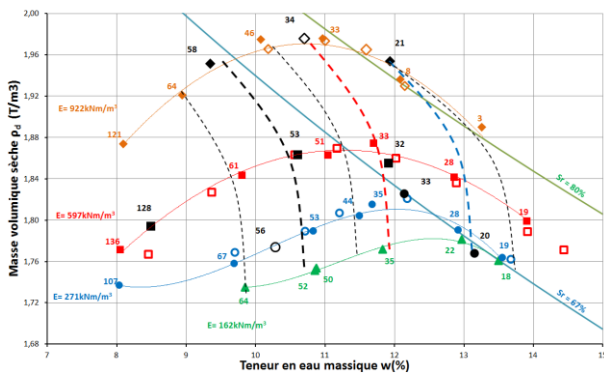
4.1. Protocole expérimental des essais mis en place

Les essais Proctor ont été réalisés à différentes énergies de compactages (norme NF-EN-13286-47). Des mesures de succion par technique au papier filtre (Gardner, 1937) viennent compléter les mesures Proctor. Les papiers filtres ont été placés à l'intérieur des moules Proctor pendant la phase de compactage. Chaque moule a fait l'objet de deux mesures de succion, avec mesures de porosimétrie mercure pour certains moules.

4.2. Résultats des essais de laboratoire et interprétation

Résultats des essais Proctor :

a. Sable limoneux Livet Gavet



b. Argile à châtaignier SEA (Zong-Sen Li, 2015)

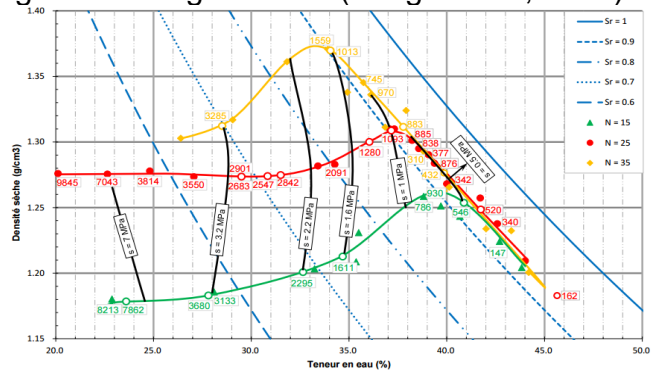


Figure 1- Résultats des courbes Proctor réalisées à différentes énergies de compactage et des mesures de succion associées pour différents types de sol (a. sable limoneux Livet Gavet, b. Argile à châtaignier LGV-SEA)

Nous donnons à titre d'exemple les résultats des mesures effectuées sur 2 sols différents (Figure 1). Des courbes d'iso-succion sont tracées sur les courbes Proctor. Ces dernières permettent d'apprécier l'impact de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur la succion.

Les résultats de l'étude montrent que les courbes d'isosuccion sont à la fois influencées par la teneur en eau et l'énergie de compactage. Coté « sec » (à ne pas confondre avec les états hydriques du GTR) de la ligne optimale de compactage (ligne reliant le sommet des courbes Proctor, teneur en air volumique généralement de l'ordre de 6%), les lignes d'isosuccion sont presque verticales. Ce type de constat converge avec d'autres résultats disponibles dans la littérature (Alonso 1998, Li 1995 ; Romero 1999, Tarentino & De Col 2008).

Résultats des essais de porosimétrie mercure

Les valeurs de l'intrusion incrémentale sont reportées en fonction de la taille des pores pour différents types de sols sur la Figure 2. Les pores de gros diamètre (diamètre supérieur à 2 μm) sont présents coté sec ou à l'optimum. Ils disparaissent coté humide de

l'optimum Proctor. Ces résultats convergent avec d'autres essais déjà réalisés dans la littérature (Delage et al. 1996, Ferber 2006, Hoffmann et al 2007).

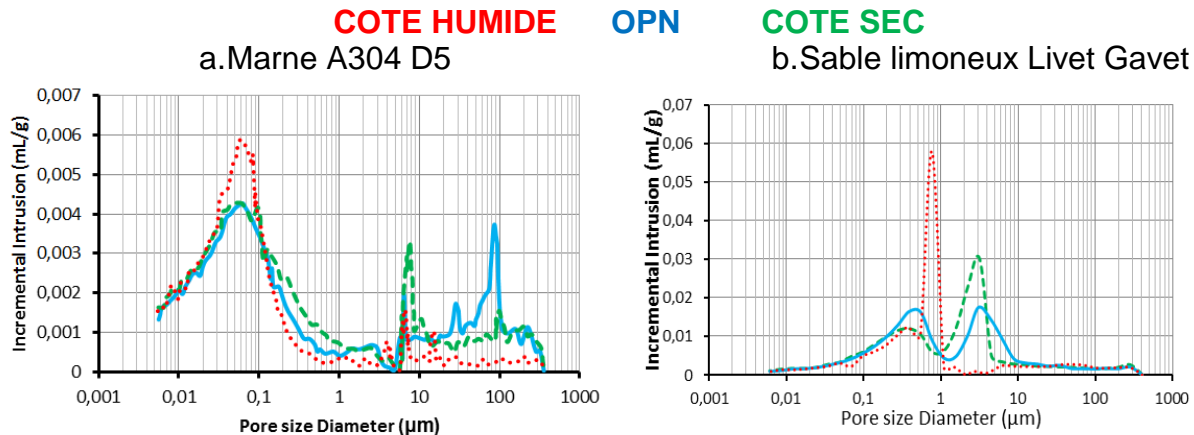


Figure 2 – Résultats des porosimétries au mercure pour différentes teneur en eau de compactage

Les résultats de la porosimétrie au mercure éclairent les résultats des mesures de succion :

1. côté sec, la réduction de volume lié au compactage se fait en réduisant la taille des plus gros pores dans lesquels l'eau n'est pas présente. La succion est donc inchangée lors de la réduction de volume,
2. côté humide, le degré de saturation est proche de 1 et l'air est occlus. Ceci est vérifiable par des perméabilités à l'air très faibles, justifiant de la continuité de la phase liquide (résultats non présentés). La réduction de volume s'opère dans des pores où l'eau est présente. La succion diminue avec l'augmentation de la densité.

5. Evolution de la résistance d'un sol compacté en fonction de sa teneur en eau et de son énergie de compactage

5.1. Protocole expérimental des essais mis en place

Des essais IPI (Indice de Portance Immédiate) ont été réalisés sur les échantillons Proctor une fois terminés. L'essai consiste à enfoncer un piston dans le sol encore dans le moule afin d'obtenir l'indice IPI.

Les papiers filtres présents dans les moules permettent d'obtenir la valeur de la succion. Cette dernière est obtenue après enfoncement du piston.

Les différents sols ont été compactés à différentes énergies de compactage (OPN , OPN +10 coups et OPN -10 coups pour la marne du D5 et le limon de Livet Gavet, et OPN et OPM pour la marne du D9B)

5.2. Résultats des essais et interprétation

Des exemples de résultats des essais IPI en fonction de la succion ou de la teneur en eau sont reportés sur la figure 3 pour différentes énergies de compactage. La relation IPI succion est clairement mise en évidence pour une énergie de compactage donnée. Côté sec de l'Optimum Proctor Normal, une augmentation de l'énergie de compactage se traduit par une augmentation de l'IPI (et donc de la résistance au cisaillement) alors que

côté humide elle se traduit au contraire par une diminution de l'IPI. Ces résultats convergent avec les résultats de Pelizzari et al (2016).

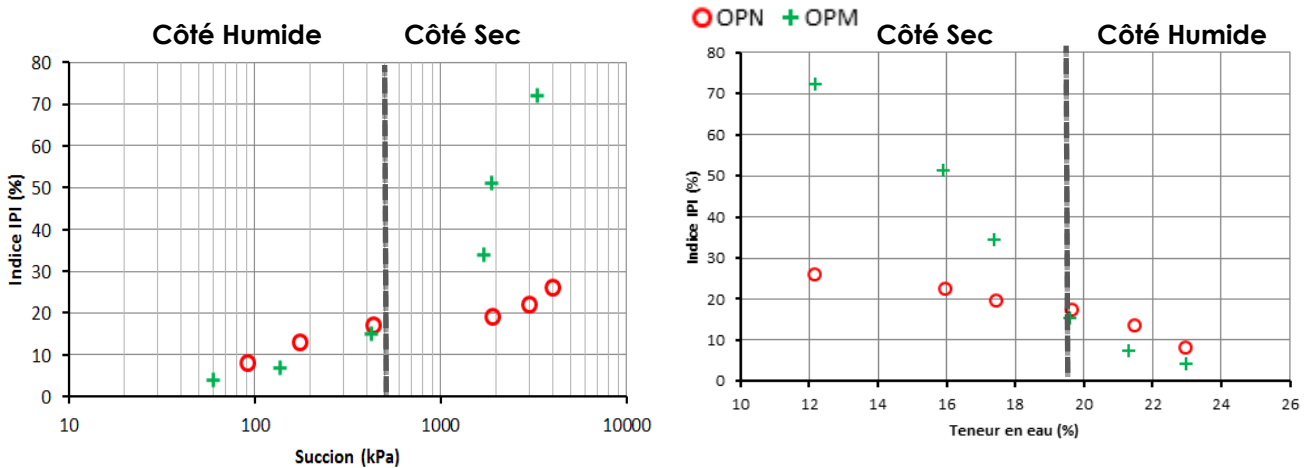


Figure 3 - Résultats des Indices de Portance Immédiat en fonction de la succion et de la teneur en eau réalisés pour différentes énergies de compactage sur la marne de l'A304 (Planche de compactage)

Les essais disponibles permettent d'expliquer qualitativement le phénomène :

- côté sec, l'augmentation de la densité se fait sans réduction de la succion, du moins jusqu'à un degré de saturation de 0,7 voire 0,8 (passage de l'état sec à l'état moyennement humide du GTR) : la résistance au cisaillement et l'IPI augmentent,
- côté humide, l'augmentation de densité s'accompagne d'une réduction de la succion. L'air étant occlus du côté humide, le principe des contraintes effectives s'applique donc si la succion $s = -u_w$ diminue, la contrainte effective isotrope $p' \approx -u_w$ (contrainte totale négligeable en surface) et la résistance au cisaillement également comme montré par l'IPI.

Les conclusions pratiques sont les suivantes :

- côté « sec » (tant que la densité sèche pour une teneur en eau donnée est inférieure à celle de la ligne optimale de compactage), le surcompactage (au-delà de l'énergie Proctor Normal ou au-delà du nombre de passes du GTR) n'a pas d'effet négatif et il est même recommandé pour atteindre des densités proches de la ligne optimale de compactage,
- côté « humide » (quand la densité sèche pour une teneur en eau donnée atteint la ligne optimale de compactage), le surcompactage (compactage au-delà de l'énergie Proctor Normal ou au-delà du nombre de passes du GTR) doit absolument être proscrit car il réduit la capacité portante du sol et augmente les pressions interstitielles dans le sol.

6. Rôle du chemin de contrainte et du chemin hydrique dans la résistance d'un sol compacté

Il a été montré précédemment que la résistance au cisaillement d'un sol avait tendance à augmenter lorsque celui-ci était compacté du côté sec. Mais qu'en est-il d'un sol compacté à l'optimum et qui sèche ? ou d'un sol soumis à des cycles climatiques (séchage, humidification) ? Ces questions essayeront de trouver réponse au travers d'essais R_c conçus spécifiquement à cet effet.

6.1. Protocole expérimental des essais mis en place

Un total de 25 éprouvettes a été réalisé pour cette expérience. Chacune a été compactée à la densité optimale (ρ_d OPN) de manière statique par double piston à partir d'une même mouture ($D_{\max} < 5\text{mm}$) préparée à teneur en eau optimale avec cette mouture.

Cinq lots différents ont été préparés afin de tester 5 chemins de contraintes et hydriques différents:

- lot 1 et 2: réalisation de 2 fois 5 éprouvettes à partir d'une même mouture mais à différentes teneurs en eau (séchage de la mouture à partir de la teneur en eau optimale pour le lot 1 et humidification de la mouture pour le lot 2). Compactage des 5 éprouvettes afin d'obtenir une densité égale à la densité optimale.

- lot 3 et 5 : réalisation de 2 fois 5 éprouvettes compactées à densité optimale et teneur en eau optimal. Séchage des éprouvettes à différentes teneurs en eau pour lot 3, et humidification des éprouvettes pour le lot 5.

- lot 4 : réalisation de 5 éprouvettes compactées à densité optimal et teneur en eau optimale. Séchage de toutes les éprouvettes jusqu'à obtention d'une teneur en eau égale à 0,6 wopt, puis humidification des différentes éprouvettes à différentes teneur en eau.

Une fois terminée, chaque éprouvette d'une dimension de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur a été écrasée par compression simple afin d'obtenir la valeur de R_c .

6.2. Résultats des essais et analyse

Le détail des résultats n'est pas présenté ici mais sera publié ultérieurement. Il est très clairement mis en évidence les phénomènes suivants:

a. Les lots 1 et 2 donnent des résultats comparables. La teneur en eau initiale de préparation des éprouvettes a peu d'influence tant que le matériau n'a pas été compacté. En revanche, le lot 3 donne des résistances très supérieures à celle des lots 1 et 2.

b. Les lots 3 et 4 donnent des résultats très différents. Après un cycle de dessiccation / réhumidification, la résistance à la compression mesurée est entre 30 et 50% plus faible.

c. Les lots 3 et 5 montrent une diminution progressive de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en eau depuis le côté sec (lot 3) vers le côté humide (lot 5).

Les premiers enseignements à tirer de cette expérience sont les suivants :

1) Reprenons l'observation (a) et imaginons deux matériaux ayant la même teneur en eau :

- i. Le premier préparé en partant de l'optimum Proctor et en asséchant progressivement ;
- ii. Le deuxième préparé à partir d'une poudre, ajustée à la bonne teneur en eau, puis compactée ;

D'après l'observation (a), le matériau (i) a une résistance supérieure au matériau (ii) et est probablement plus proche de l'état naturel du matériau. Ce résultat rejoint le retour d'expérience des chantiers et projets de Vinci, Valerian, EDF et Egis sur la réalisation des essais Proctor et la recommandation est la suivante :

Dans la préparation des matériaux lors de la réalisation d'un essai Proctor, il est important de suivre une sollicitation hydrique et mécanique la plus proche possible du chemin qui sera suivi par le sol sur le chantier pour que les résultats soient représentatifs. **Le séchage du sol à l'étuve puis leur réhumidification est fortement déconseillé, au profit d'un séchage à l'air libre après étalement du sol dans un bac.**

2) A partir de l'observation (b), on voit qu'un sol compacté perd sa résistance sous l'effet d'un cycle de retrait / humidification. Ce résultat rejoint le retour d'expérience chantier de Vinci, Valerian et Egis. **Dans la conception des ouvrages en terre, pour les sols fins soumis aux cycles de retrait / humidification, il est donc recommandé de prendre des caractéristiques de cisaillement de matériaux remaniés** (effacement de la résistance au cisaillement supplémentaire liée au compactage à long terme). Sinon, il convient d'isoler ces matériaux de ces cycles (masques de protection granulaire ou traité, etc.).

3) A partir de l'observation (c), on retrouve, entre R_c et la teneur en eau, une relation analogue à celle reliant l'IPI à la teneur en eau. Ce résultat est logique, R_c et l'IPI étant directement reliés à la succion qui gouverne la rigidité apparente et la résistance à la rupture du matériau, du moins à court terme sous sollicitations rapides et pour la traficabilité des engins de chantier. L'utilisation de critère de résistance est la règle sur les chantiers de barrage pour contrôler le C_u de manière directe (scissomètre) ou indirecte (R_c , CBR). Cette approche pourrait être généralisée au cas des remblais routiers ou ferroviaires lorsque l'on souhaite sortir des référentiels usuels (en construisant par exemple des remblais plus haut sans traitement), sous réserve d'une approche de calcul de type mécanique des sols pour maîtriser les tassements différés.

7. Références bibliographiques

- Alonso E.E, 1998. Suction and moisture regimes in roadway bases and subgrades. Simposio Internacional Sobre Drenaje interno de Firmes y Explanadas. Granada (España). PP. 57-104.
- Biarez J., Favre J.L. (1975). Parameters fitting and statistical analysis of data in soil mechanics. Proceedings 2nd International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Aachen, Germany, vol.2, p.249-264.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y.J., Howat M.D. 1996. Microstructure of a compacted silt. Revue canadienne de géotechnique, 33(1): 150-158, 10.1139/t96-030
- Ferber, V. (2006), Déformations induites par l'humidification des sols fins compactés, apport d'un modèle de microstructure, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 321 pages
- Gardner R., 1937. A method for measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. Soil Science, vol 43, pp. 227-283.
- Hoffmann C., Alonso E.E., Romero E. 2007. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures. Physics and Chemistry of the Earth 32 : 832–849
- LI Z. M. 1995. Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils; Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soil (UNSAT'95), Paris, ALONSON E.E. et DELAGE P. (eds), Volume 1, Page 139-144.
- Pelizzari B., Mahmutovic D., Boutonnier L., Bufalo M., Gavois L., Salager S., 2016, Planche de compactage expérimentale – impact de différents paramètres sur le bon compactage des sols fins, JNGG 2016.
- Romero E. 1999. Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay ; Thèse de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya, Espagne.
- SETRA- LCPC (1992). Réalisation des remblais et couches de forme (GTR), Guide technique STREA-LCPC, 2 fascicules, 98 et 102 p.
- Tarantino A. et De Col E. 2008. Compaction behaviour of clay ; Géotechnique, Volume 58, No. 3, Page 199-213.
- Zhing-Sen L. 2015. Etudes des propriétés hydromécaniques des sols argileux non saturés proches de la saturation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France.