

INFLUENCE D'UN COMPACTEUR ROULANT DE LABORATOIRE SUR LE COMPACTAGE DES SOLS FINS

INFLUENCE OF LABORATORY ROLLER COMPACTOR ON COMPACTION OF FINE GRAINED SOILS

Ouardia SEDIKI¹²³, Andry Rico RAZAKAMANANTSOA¹, Mahdia HATTAB², Tangi LE BORGNE⁴

¹ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux – GERS – GMG, Nantes, France

² Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux, Université de Lorraine - CNRS UMR 7239, Metz, France

³ VINCI Constructions Terrassements

⁴ Bouygues – Travaux Publics

RÉSUMÉ – On se propose d'étudier l'influence d'un compacteur roulant de laboratoire sur le compactage du limon de Val d'Europe. Une étude comparative a été réalisée avec le compactage dynamique au Proctor et le compactage statique. Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques macroscopiques et microscopiques des éprouvettes sont sensibles au mode de compactage appliqué.

ABSTRACT – The study focus on the influence of a laboratory roller compactor on the compaction of silt from Val d'Europe. A comparative study was carried out with dynamic compaction by Proctor and static compaction. The results show that the macroscopic and microscopic characteristics of the samples are susceptible to the compaction mode applied.

1. Introduction

Un défaut de compactage est à l'origine de divers désordres observés dans les chantiers de terrassement, tels que des problèmes liés aux tassements, des dégradations de la surface des sols sous l'effet de trafic (Gillies et al. 2005), la perte de portance du sol, des fissurations (Etymezian et al. 2003) etc. Un compactage de bonne qualité permet de limiter sensiblement ce type de problèmes. Sur chantier, le compactage est réalisé à l'aide de différents engins de compactage comme les rouleaux à pneus, les rouleaux lisses, les rouleaux vibrants, les pieds dameurs ou le pied de mouton. La qualité de compactage visée sur chantier fait référence aux valeurs de densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale obtenues à l'essai Proctor (Proctor, 1933). L'essai Proctor présente l'avantage d'être un essai pratique et reproductible permettant d'estimer rapidement une valeur moyenne de la densité nécessaire pour un compactage optimisé.

En revanche, l'essai Proctor se limite à une énergie fixe de compactage, quelque soit l'état du sol, sans lien avec le type de compactage utilisé sur terrain. Il ne renseigne pas comment adapter l'effort de compactage en fonction des propriétés du sol (Saffih-Hdadi et al. 2009) et/ou matériel de compactage (Vogler et al. 2007 ; Mesbah et al. 1999) réellement utilisé sur chantier. Le lien possible, entre le compactage in-situ et celui réalisé au laboratoire sur le même sol selon des méthodes normalisées, n'est donc pas maîtrisé, et in fine le comportement des sols compactés in-situ non plus.

L'objectif de cette recherche consiste à reproduire à l'échelle du laboratoire les modalités de compactage similaires à celles du chantier. Dans ce cadre de cette étude, un dispositif de compactage roulant a été testé au laboratoire sur le limon de Val d'Europe, puis, les résultats ont été comparés à ceux obtenus par la méthode dynamique au Proctor, et la méthode de compactage statique à la presse. L'influence de ces différentes méthodes sur les propriétés du sol a été analysée à différentes échelles. Nous avons observé, en particulier, les énergies de compactage déployées, poids volumique sec moyens, les profils du poids volumique sec en fonction de la profondeur ainsi que la distribution des pores.

2. Méthodes de compactage et description des dispositifs utilisés

Trois modes de compactage ont été utilisés: la méthode dynamique, la méthode statique, différente de la précédente par son mode d'application des efforts et de transmission de l'énergie. Elle permet de faire une transition entre les conditions de compactage Proctor et les méthodes de mise en œuvre in-situ. La condition de compactage in-situ est reproduite à l'aide d'un nouveau dispositif de compactage roulant de laboratoire.

2.1. Dynamique

L'essai de compactage dynamique Proctor Normal représente l'essai de référence en laboratoire. Les essais sont réalisés conformément à la norme NF P 94-093. Le sol à compacter, préalablement humidifié et homogénéisé, est placé dans un moule cylindrique de diamètre $101 \pm 0,5$ mm et de hauteur $116,5 \pm 0,5$ mm, compacté en 3 couches. L'effort est appliqué par choc, à l'aide de la dame Proctor normalisée de masse 2,5 Kg, avec une hauteur de chute de 305 mm à raison de 25 coups par couche. L'énergie potentielle déployée est de 600 kN.m/m^3 .

2.2. Statique

La méthode de compactage statique a été réalisé à l'aide d'une presse mécanique de capacité maximale 100 kN. L'éprouvette compactée est de forme cylindrique ($\phi = 101 \pm 0,5$ mm), compactée en une couche de $40 \pm 0,5$ mm d'épaisseur. L'énergie statique appliquée correspond au travail déployé donné par l'équation 1.

$$E = \frac{1}{v} \int_0^d V \times ds \quad (1)$$

v est le volume total de l'éprouvette (m^3), V est l'effort vertical (kN), ds le tassement élémentaire (mm) avec $V \times ds = W_i$ le travail élémentaire (kN.m).

2.3. Au compacteur roulant

La Figure 1 montre le compacteur roulant, noté « CR », conçu au laboratoire. Il est constitué d'un plateau mobile situé au-dessus d'une embase fixe. Ce plateau mobile, sur lequel sera posée l'éprouvette de sol, permet un mouvement dans le sens vertical du moule lors le compactage. Le compactage est assuré par le passage d'une roue en Ertalon, de diamètre 400 mm et une largeur de 170 mm, sur l'éprouvette de forme parallélépipédique et de dimensions $500 \times 180 \times 50 \text{ mm}^3$. Le chargement est appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique alimenté d'air comprimé avec des pressions comprises entre 50 kPa et 7000 kPa.

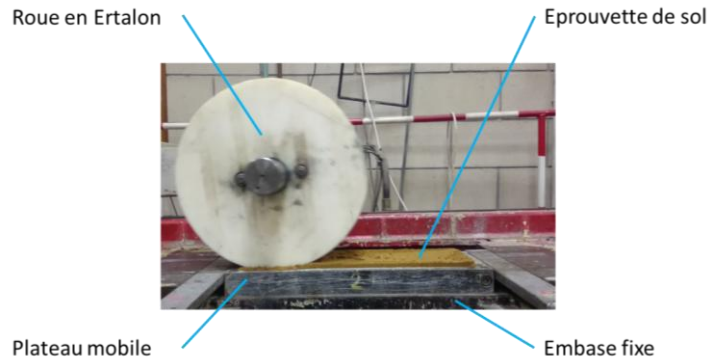


Figure 1. Composants du compacteur roulant de laboratoire

Le dispositif présente l'avantage de pouvoir appliquer des charges comparables à celles appliquées par les engins in-situ : une charge verticale combinée à une translation horizontale à vitesse constante de 0,3 m/s, sans vibration.

L'énergie déployée par le compacteur roulant, et calculée par l'Equation 1, correspond au travail fourni par le dispositif pour compacter le volume du sol.

3. Matériau

Le sol étudié est le Limon Val d'Europe de classe géotechnique A2. Ce matériau provient du bassin parisien, sur la commune de Magny et Hongre (77). Après prélèvement, le sol a été séché en chambre climatique à 40°C, puis concassé, tamisé à 2 mm et enfin conditionné dans des fûts jusqu'à utilisation. La courbe granulométrique et la courbe de compactage Proctor Normal du limon sont représentées respectivement sur la Figure 2a et Figure 2b, les propriétés géotechniques sont récapitulées dans le Tableau 1.

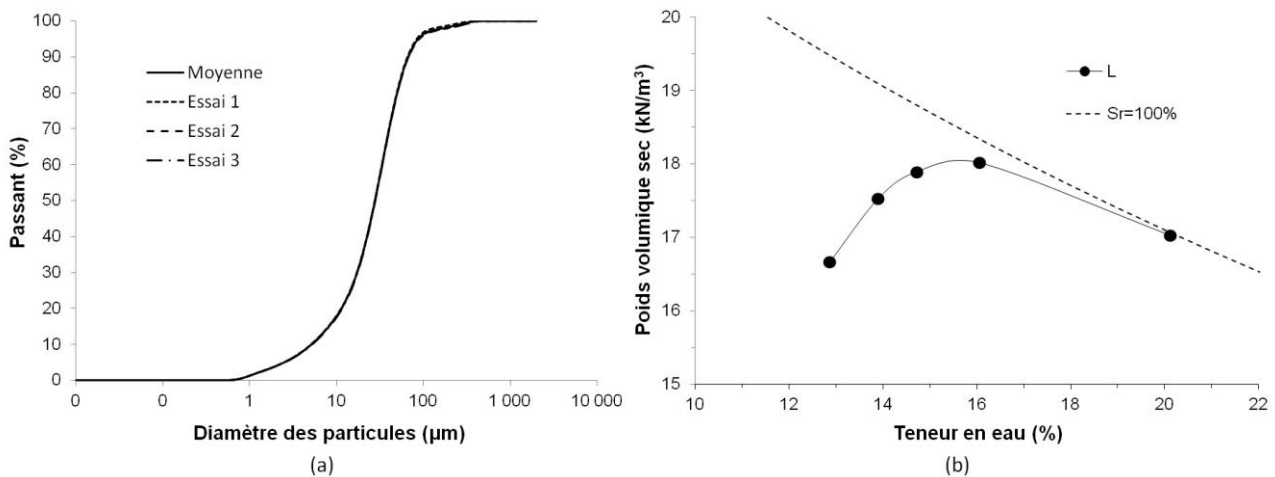


Figure 2: (a) Courbe granulométrique du Limon Val d'Europe (b) Courbe de compactage Proctor Normal

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques du limon Val d'Europe

Caractéristiques granulométriques				Propriétés physiques				Propriétés de compactage	
D10	D _{max}	Cc	Cu	w _L	I _p	VBS	ρ _s	W _{OPN}	γ _{d OPN}
µm	µm			%		g/100g	g/cm ³	%	kN/m ³
1,2	2000	1,71	6,51	36,5	15,7	3,87	2,59	15,6	18,05

4. Programme expérimental

Le programme expérimental est divisé en plusieurs étapes : préparation des éprouvettes, choix des efforts de compactage, essai de compactage et auscultation des éprouvettes.

4.1. Préparation des éprouvettes

Après homogénéisation à sec du sol, il a été humidifié à la teneur en eau optimale, puis mis dans des sacs fermés hermétiquement pendant 24h minimum, pour une homogénéisation hydrique.

4.2. Choix des efforts de compactage

La variation de l'intensité de l'effort permet d'étudier son influence sur le compactage d'un sol. Trois efforts de compactage ont été appliqués: un effort minimal $F1 = 50 \text{ kPa} = 0,73 \text{ kN}$, correspondant au chargement minimal que peut fournir le dispositif de compactage roulant, et deux efforts $F2 = 201 \text{ kPa} = 3,72 \text{ kN}$ et $F3 = 5620 \text{ kPa} = 10,5 \text{ kN}$ équivalents à deux types de compacteurs à rouleaux lisses de terrain.

4.3. Essai de compactage au compacteur roulant de laboratoire

L'effort de compactage est dans un premier temps ajusté. Ensuite, la quantité de sol, nécessaire pour atteindre l'objectif de densité, est incorporée dans le moule. L'ensemble moule+sol est déposé sur le plateau mobile du compacteur. L'essai de compactage est réalisé par des passages successifs de la roue sur l'éprouvette. Chaque passage est précédé d'une élévation du plateau mobile permettant d'imposer une hauteur de sol à compacter. Ces cycles (liés aux passages de la roue) sont répétés jusqu'à l'obtention de la densité souhaitée. Un exemple de courbe de tassement est représenté sur la Figure 3.

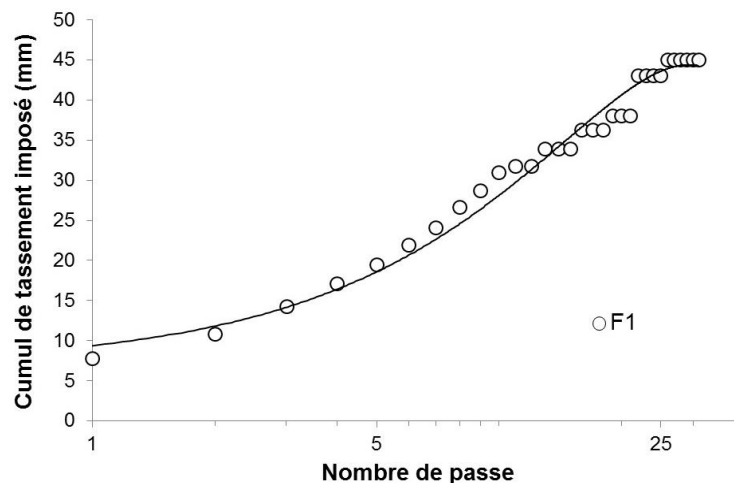


Figure 3 : Evolution du tassement imposé en fonction du nombre de passes

4.4. Auscultation des éprouvettes

A l'issue de l'essai de compactage, plusieurs paramètres sont contrôlés à différentes échelles : poids volumique sec moyen, profils de poids volumique sec et la distribution des pores.

Les profils de poids volumique des éprouvettes compactées sont mesurés par absorption des rayons gamma selon la norme NF P 98-250-5 au moyen d'un banc gamma-densimétrique.

La distribution des pores des échantillons a été obtenue à l'aide des essais de porosimétrie au mercure par le biais d'un porosimètre Micromeritics AutoPore IV 9500 V1.09 suivant la norme ISO 15901-1:2005.

5. Résultats et discussions

Les résultats des essais réalisés sur le matériau sont présentés et discutés. On présentera d'abord les résultats de compactage par roulement, puis une comparaison avec les modes de compactage en dynamique et en statique.

5.1. Compactage par roulement

5.1.1. Influence de l'effort sur l'évolution du poids volumique sec et du nombre de passes
L'évolution du poids volumique sec au cours du compactage est représentée sur la Figure 4. Les courbes montrent que le poids volumique sec est sensible à l'effort de compactage et que le nombre de passes est inversement proportionnel à cet effort.

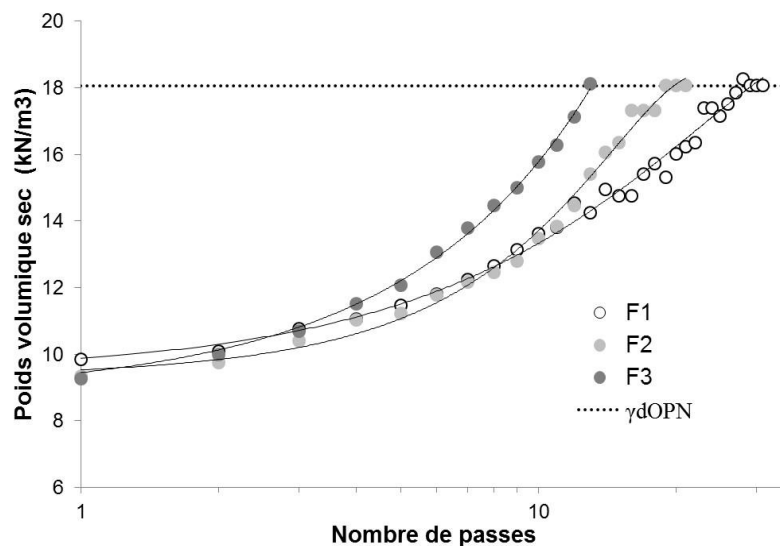


Figure 4. Evolution du poids volumique sec en fonction de l'effort et du nombre de passes

5.1.2. Evaluation des poids volumiques secs moyens

Les résultats du poids volumique sec moyen des éprouvettes sont résumés dans le Tableau 2. Ces résultats confirment la possibilité d'atteindre des poids volumiques OPN avec le compacteur roulant. Les poids volumiques secs obtenus sont proportionnels aux efforts appliqués et sont de l'ordre de $\approx 100\%$ par rapport au poids volumique sec OPN.

Tableau 2. Comparaison des poids volumiques secs moyens des éprouvettes

Mode de compactage	Statique	Par roulement		
		F1=0,73 kN	F2=3,72 kN	F3=10,5 kN
γ_d (kN/m ³)	18,22	17,42	17,87	18,02
$\gamma_d/\gamma_{d\text{OPN}}$ (%)	100,95	96,51	99,00	99,83

5.2. Etude comparative entre les différentes méthodes de compactage

La comparaison des dispositifs porte sur différents paramètres macroscopiques et microscopiques : les énergies déployées, les poids volumiques secs moyens, les profils de poids volumique sec ainsi que la distribution des pores.

5.2.1. Equivalence des énergies de compactage

Les énergies déployées pour le compactage du limon à teneur en eau optimale sont de l'ordre de 600 kN.m/m^3 pour l'essai de compactage Proctor, $156,76 \text{ kN.m/m}^3$ pour l'essai de compactage statique et $124,95 \text{ kN.m/m}^3$ pour le compactage par roulement. Une classification peut être établie : $E_{\text{dynamique}} = 3.8 E_{\text{statique}} = 4.8 E_{\text{roulement}}$.

5.2.2. Poids volumiques secs moyens

Le Tableau 2 montre que les poids volumiques secs moyens atteints sont de l'ordre de 100% quel que soit le mode de compactage utilisé.

5.2.3. Profils de poids volumique

La Figure 5a renseigne sur l'influence du mode de compactage sur l'évolution avec la profondeur du poids volumique, et la Figure 5b montre l'influence de l'effort de compactage sur les profils des éprouvettes compactées par roulement.

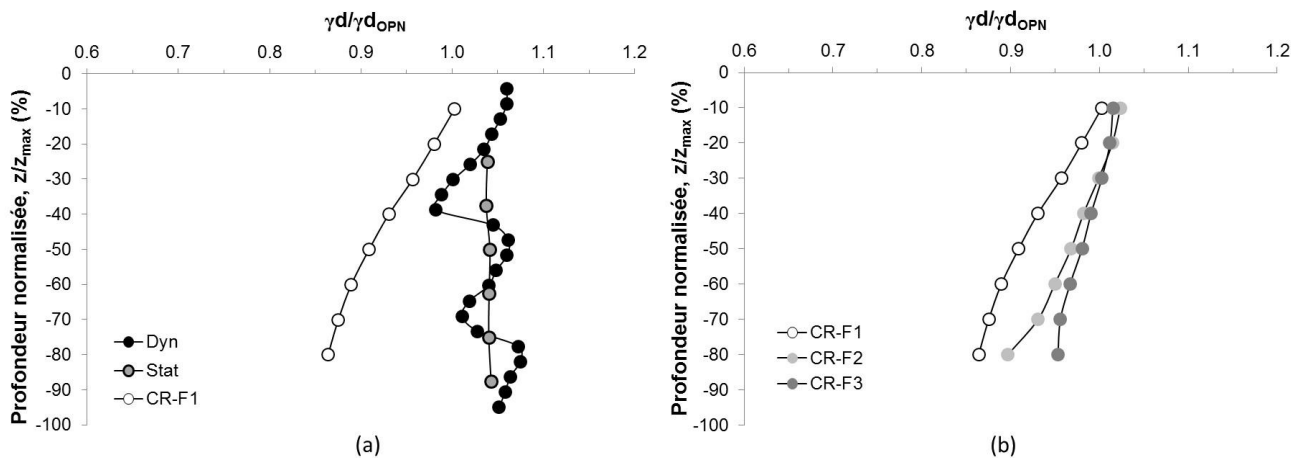


Figure 5. Profils de poids volumique des éprouvettes (a) Influence du mode de compactage (b) Influence de l'effort de compactage

La Figure 5a montre différentes allures dans les profils du poids volumique très dépendant du mode de compactage. Le compactage en dynamique induit un profil influencé par le nombre de couches (3 couches dans notre cas), la courbe présente un poids volumique minimal qui correspond au fond de chaque couche.

Le compactage en statique induit des profils en poids volumique plus homogène. Ceci est lié à l'épaisseur relativement faible de l'échantillon qui favorise la transmission de l'énergie.

Pour le compactage par roulement avec l'effort F1, la courbe montre une diminution du poids volumique avec la profondeur. Il peut y avoir ici plus de dissipation de l'énergie, qui peut être compensée par l'augmentation de l'effort appliqué (Figure 5b).

5.2.4. Distribution des pores

La Figure 6 présente les résultats d'essai au porosimètre au mercure, les courbes de distribution des pores des éprouvettes compactées concernent les trois modes de compactage.

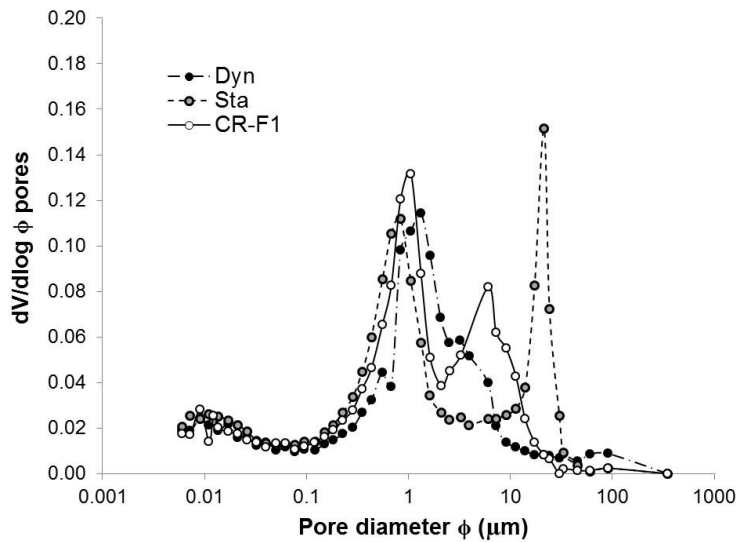


Figure 6. Distribution des pores des éprouvettes

Les courbes montrent l'effet du mode du compactage sur la microstructure. Elles présentent des distributions bimodales des pores. Le premier pic est à un diamètre d'environ 1.31 μm pour les éprouvettes compactées en dynamique, de 0.84 μm en statique et de 1.06 μm pour le compactage par roulement (F1). Le deuxième pic se situe à un diamètre moyen de 3.21 μm pour un compactage en dynamique, de 6.03 μm en statique et de 21.31 μm par roulement (F1). Le mode de compactage semble affecter les gros pores tandis que les petits pores restent inchangés.

5.2.5. Correspondance compacteur roulant de laboratoire / compacteur de terrain

Une tentative de représentation des résultats de compactage conforme au tableau de compactage du Guide Technique Routes (GTR) a été réalisée (Tableau 3).

Tableau 3 : Paramètres de compactage du compacteur roulant

	F1=0,73 kN	F2=3,72 kN	F3=10,5 kN
Nombre de passes	31	21	13
Q/S (m^3/m^2)	0,0054	0,0071	0,0134

Le résultat montre la possibilité de déterminer la valeur du rapport entre le volume de sol compacté pendant un temps donné Q et la surface balayée par le compacteur pendant le même temps, S ou Q/S relatif au dispositif de laboratoire. Cette démarche permet ainsi d'envisager une étude comparative avec des cas réels de chantier.

6. Conclusions

Le compacteur roulant (CR) de laboratoire est un outil original qui permet de compacter un sol en appliquant des sollicitations similaires à celles appliquées in-situ.

Une étude comparative des différentes méthodes de compactage a été réalisée, à diverses échelles, sur le limon Val d'Europe: dynamique, statique et par roulement. Les

paramètres de comparaison sont: l'énergie de compactage déployée, le poids volumique sec moyen, les profils de poids volumique sec des éprouvettes ainsi que leurs distributions porales.

Les résultats des essais soulignent une importante différence dans les énergies déployées permettant l'établissement d'une classification entre les trois méthodes de compactage: l'énergie de compactage déployée en dynamique représente 4 fois l'énergie déployée en statique et 5 fois celle déployée au CR.

Néanmoins, toutes les méthodes de compactage testées permettent d'atteindre l'objectif de poids volumique sec moyen visé.

Cependant, les méthodes de compactage testées génèrent différents profils de poids volumique sec. Une investigation à l'échelle de la microstructure a été effectuée pour tenter d'apporter des éléments d'explication à cette disparité. L'analyse de la distribution des pores montre que seuls les pores de grande taille sont influencés significativement par le compactage: diminution de la taille et de l'intensité. Par contre, le diamètre des pores de petite taille reste relativement peu impacté. Le compacteur roulant de laboratoire génère une distribution des pores située en zone intermédiaire entre le compactage statique et dynamique.

Une étude comparative avec le cas de chantier réel permettrait de vérifier la représentativité de la méthode de compactage. Le compacteur roulant de laboratoire permet d'envisager cette possibilité.

Remerciements :

Nous adressons nos remerciements à: la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), le Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF) ainsi que l'entreprise VINCI Constructions et Terrassements (VCT) qui ont contribué à l'accompagnement de cette étude.

Références bibliographiques

- AFNOR Mars1993 : NF P 98-250-5, «Partie5 : Mesure en laboratoire de la masse volumique apparente d'un corps d'épreuve au banc Gammadensimétrique»
- AFNOR 1999 : NF P 94-093, « Détermination des références de compactage d'un matériau ». ISSN : 0335-3931
- Etymezian V., Kuhns H., Gillies J., Chow J., Hendrickson K., McGown M., Pitchford M. (2003). Vehicle-based road dust emission measurement (III): effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Valley, ID. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 4583-4593
- Gillies J.A., Etymezian V., Kuhns H., Nikolic D., Gillette D.A. (2005). Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 2341-2347
- ISO 15901-1:2005, "Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 1 : Mercury porosimetry"
- Mesbah A., Morel J.C., Olivier M. (1999). *Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents*. *Matériaux et Constructions*, Vol. 32, pp. 687-694
- Proctor R.R. (1933). *Fundamental Principles of Soil Compaction*. *Engineering News-Record*, Vol. 111(n°9, 10, 11 et 12)
- Saffih-Hdadi K., Défossez P., Richard G., Cui Y.J., Tang A.M., Chaplain V. (2009). *A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density*. *Soil & Tillage Research*. Vol.105, pp. 96-103
- Vogler T. J., Lee M. Y., Grady D. E. (2007). *Static and dynamic compaction of ceramic powders*. *International Journal of Solids and Structures*, Vol 44, pp. 636-658