

PLANCHE DE COMPACTAGE EXPERIMENTALE : IMPACT DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE BON COMPACTAGE DES SOLS FINS

FULL SCALE COMPACTION TEST: PARAMETERS IMPACT ON FINE GRAINED SOILS FOR ROBUST COMPACTION

Benjamin PELIZZARI^{1,2,3}, Dino MAHMUTOVIC^{1,4}, Luc BOUTONNIER⁴, Maurice BUFALO⁵, Ludovic GAVOIS³, Simon SALAGER^{1,2}

¹ UNIV. GRENOBLE ALPES, 3SR, GRENOBLE, FRANCE

² CNRS, 3SR, GRENOBLE, FRANCE

³ VINCI CONSTRUCTION TERRASSEMENT, NANTERRE FRANCE

⁴ EGIS GEOTECHNIQUE, SEYSSINS, France

⁵ VALERIAN, SORGUES, FRANCE

RÉSUMÉ - Cet article a pour but de présenter une planche de compactage réalisée à Charleville Mezière (08) sur des matériaux A2 (GTR). Quatre paramètres ont été testés : le type de compacteur, l'énergie de compactage, l'état hydrique du sol ainsi que la taille des mottes appelée aussi mouture. Les essais in situ et de laboratoire réalisés sur la planche permettent de mettre en évidence le rôle de chaque paramètre sur le bon compactage d'un sol.

ABSTRACT – This paper aims to present a full compaction test on gray marls next to Charleville Mezière. Four parameters are being tested: compactor type, compaction energy, material grinding and water content. Then series of in-situ and laboratory tests are performed in order to acknowledge the state and the mechanical response of the soil.

1. Introduction

Cette communication s'intéresse aux problèmes de compactage des sols fins. Si des prescriptions existent dans le Guide des terrassements routiers (GTR, SETRA- LCPC, 1992) et le guide de conception et de réalisation de 2007 (CFTR 2007), les données permettant de quantifier l'effet de certains paramètres sont rares. En effet il est difficile de trouver des informations ou recommandations quant à l'impact de la mouture, du type de compacteur ou du nombre de passes de compactage si l'on va au-delà des prescriptions du GTR. Des informations sur le sujet permettraient de pouvoir étendre les pratiques proposées par ce dernier.

Une planche de compactage a ainsi été réalisée dans le cadre du projet de recherche TerreDurable sur des matériaux marneux de l'autoroute A304. Plusieurs paramètres comme le type d'engin utilisé (cylindre vibrant lisse ou vibrant pied dameur), le nombre de passes de terrassement, l'état hydrique des matériaux en place (sec, moyen ou humide), ainsi que le type de mouture (brute ou pulvimixée) sont analysés au travers de valeurs de résistance de pointe (d'essais pénétrométriques de type Panda 2 (Benz Navarette, 2009)), de mesures de succion ainsi que des valeurs de densité sèche.

2. Présentation de la planche de compactage et des différents paramètres que l'on souhaite mettre en évidence

2.1. Localisation de la planche de compactage

Cette planche de compactage a été réalisée sur le chantier de l'A304 au Nord-Est de la France à proximité de Charleville Mézières (08). Les entreprises Vinci Construction et Terrassement et Valérian ont mis à disposition les moyens matériels et humains nécessaires à la bonne réalisation de cette dernière. La planche d'essais se compose de 10 plots ayant chacun été réalisé selon des paramètres de compactage différents. La moitié des plots a été réalisée sur le dépôt définitif 18P2 et l'autre moitié sur la couche de protection de la PST du déblai D9A.

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des différents plots proviennent du dépôt 18P2 constitué à partir de matériaux prélevés dans le déblai D9B voisin. Un volume total de 2700 m³ de matériaux a été nécessaire à la réalisation. Il s'agit d'une marne grise de classe A2 au regard du GTR. Les principales caractéristiques géotechniques du matériau utilisé figurent dans le tableau 1. L'extraction a eu lieu de manière frontale à la pelle directement dans le dépôt de 18P2. Ce dépôt a été préalablement compacté dans les règles de l'art et présentait une résistance en point au Panda comprise entre 2 et 5 MPa.

Tableau 1. Propriétés géotechniques du matériau de la planche

Matériau	IP	w _i	WOPN	CaCO ₃	Classe GTR
Marne	24	46%	21%	18,4%	A2

2.3. Moyens matériels à disposition

Les différents engins de chantier nécessaires à la réalisation de la planche sont un compacteur vibrant lisse V5, un compacteur vibrant pied dameur VP5, une pulvimixeuse, un bulldozer, une pelle mécanique et un tombereau.

Les deux rouleaux V5 et VP5 présentent des propriétés relativement proches. La charge de la bille sur le sol (58kg.cm⁻¹), la fréquence de vibration (30Hz) ainsi que les excentriques (1mm) présentent quasiment les mêmes valeurs. Ces compacteurs sont donc parfaitement comparables dans le cadre de nos essais. Le Pulvimixeur permet d'atteindre une mouture comprise entre 0 et 50 mm. Le bulldozer permet, grâce à la herse montée à l'arrière, la scarification du matériau pour faciliter son séchage.

2.4. Protocole expérimental

2.4.1. Protocole concernant le réglage de l'état hydrique

Trois états hydriques différents ont été testés : Sec (14.7%<w<18.9%), Moyen (18.9%<w<23.1%) et Humide (23.1%<w<27.3%t). Sachant que la teneur en eau naturelle du sol extrait du déblai est autour de 21% (proche de w_{opn}) soit un état médium selon le GTR. Le séchage du sol, pour obtenir un état sec, a consisté à répandre le matériau, le scarifier en surface et le laisser sécher à l'air libre. L'humidification du matériau pour l'état humide, a consisté à répandre le matériau, le mouiller à l'aide d'une queue de carpe. Le risque d'hétérogénéité hydrique du matériau n'est pas à écarter. La météo sur la période était globalement clémente avec des Température proches des 20°C, un ciel dégagé, et un léger vent.

2.4.2. Protocole concernant le réglage de la mouture

Deux types de moutures différentes ont été testés : une mouture brute (non retravaillée ou très légèrement par rapport au matériau extrait du déblai) présentant des mottes allant jusqu'à 70 cm de diamètre et une mouture pulvimixée à un calibre 0/50 mm à l'aide d'un pulvimixeur. Le maintien des épaisseurs finales de couche est difficile dû à la nature du matériau (Froumentin & Morel, 1981).

2.4.3. Protocole concernant le terrassement des matériaux

Le choix de l'énergie de compactage de référence s'est fait à Partir du GTR sur la base d'un compactage avec un compacteur V5 sur un sol dans un état hydrique moyen. Quatre passes de compactage ont ainsi été retenues pour un compactage normal et 12 passes pour un surcompactage. L'objectif est de pouvoir comparer différents paramètres à même énergie de compactage (type de compacteur et teneur en eau)

La planche d'essai comprend 10 plots différents :

- 4 plots (n°1 à 4) réalisés sur la couche de protection de la PST du D9A. Ils sont composés de 3 couches de 30 cm chacune. Les 2 premières couches ont été compactées normalement, c'est-à-dire 4 passes de terrassement, la moitié de la 3^e couche (selon le sens longitudinal) a été compactée normalement (4 passes) et l'autre moitié sur-compactée (12 passes). Les deux premières couches compactées permettent d'avoir un support représentatif du matériau en remblai à la 3^e couche, qui est celle que l'on cherche à étudier.
- 2 plots (n°5 et 6) réalisés sur le dépôt 18P2 ayant une structure en 3 couches de 30cm.
- 4 plots (n°7 à 10) réalisés sur le dépôt 18P2 mais avec une seule couche de 30 cm (moitié compactée normalement et l'autre sur-compactée). Ce changement de protocole a été dicté par des raisons logistiques et justifié par le fait que le plot 18P2 avait été compacté dans les règles de l'art. Le plot humide avec matériau brut et compacteur lisse n'a pas pu être compacté convenablement à cause d'une portance insuffisante.

Le détail des caractéristiques de compactage des différents plots est rappelé dans le tableau 2.

Tableau 2. Paramètres de compactage des différents plots de la planche

Nom du plot	Etat Hydrique	Mouture	Compacteur	Nombre de passes
Plot 3	Sec	Brute	Vibrant pied dameur	4 passes / 12 passes
Plot 4	Sec	Brute	Vibrant lisse	4 passes / 12 passes
Plot 1	Moyen	Brute	Vibrant pied dameur	4 passes / 12 passes
Plot 2	Moyen	Brute	Vibrant lisse	4 passes / 12 passes
Plot 5	Moyen	Pulvimixée	Vibrant pied dameur	4 passes / 12 passes
Plot 6	Moyen	Pulvimixée	Vibrant lisse	4 passes / 12 passes
Plot 9	Humide	Brute	Vibrant pied dameur	4 passes / 12 passes
Plot 10	Humide	Brute	Vibrant lisse	Compactage impossible
Plot 7	Humide	Pulvimixée	Vibrant pied dameur	4 passes / 12 passes
Plot 8	Humide	Pulvimixée	Vibrant lisse	4 passes / 12 passes

3. Présentation des différents essais de laboratoires et in situ réalisés sur la planche

Chaque plot a fait l'objet d'essais in situ et de laboratoire dans le but de tirer des conclusions quant au bon compactage. Plusieurs types d'essais ont été réalisés sur chaque plots comme présenté dans le tableau 3.

Tableau 3. Essais réalisés sur la planche

Essai	Nombre	Paramètre mesuré
Panda 2	45	Resistance en pointe qd
Panda 3	26	qd, Module élastique
Gamma densimètre, tarière	48	Densité sèche, w
Carottes	54	Pour densité, w, succion
Perméabilité simple anneau	6	Perméabilité

La partie ci-présente porte sur les mesures de résistance en pointe. Il s'agit une mesure facile, liée à la résistance au cisaillement. Les variables influençant directement son comportement sont la densité sèche et la succion (Collins et Miller, 2014 ; Russel et Khalili, 2014 ; Athapaththu et al, 2007). A densité sèche constante, l'accroissement de succion augmentera la résistance en pointe. Une résistance plus importante sera aussi visible pour une densité augmentée.

4. Mise en évidence de l'effet du sur-compactage

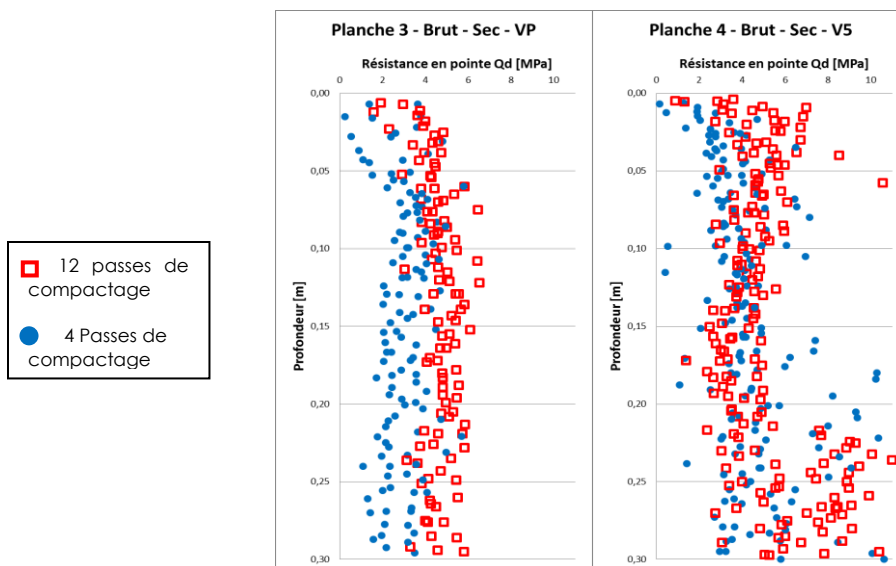


Figure 1. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots secs.

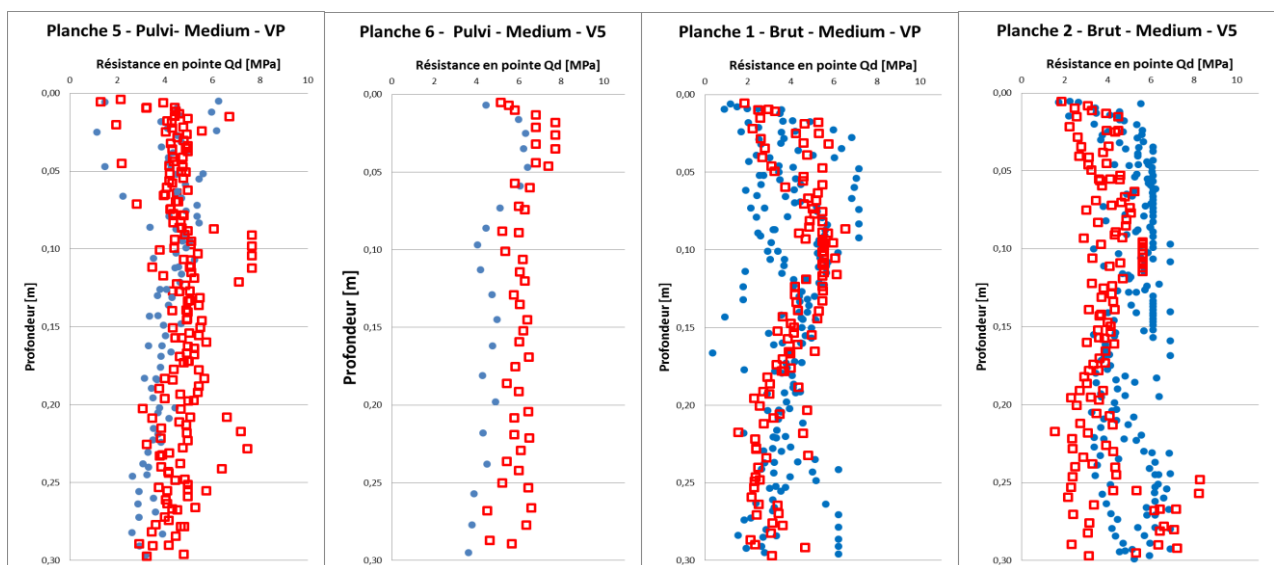


Figure 2. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots médium.

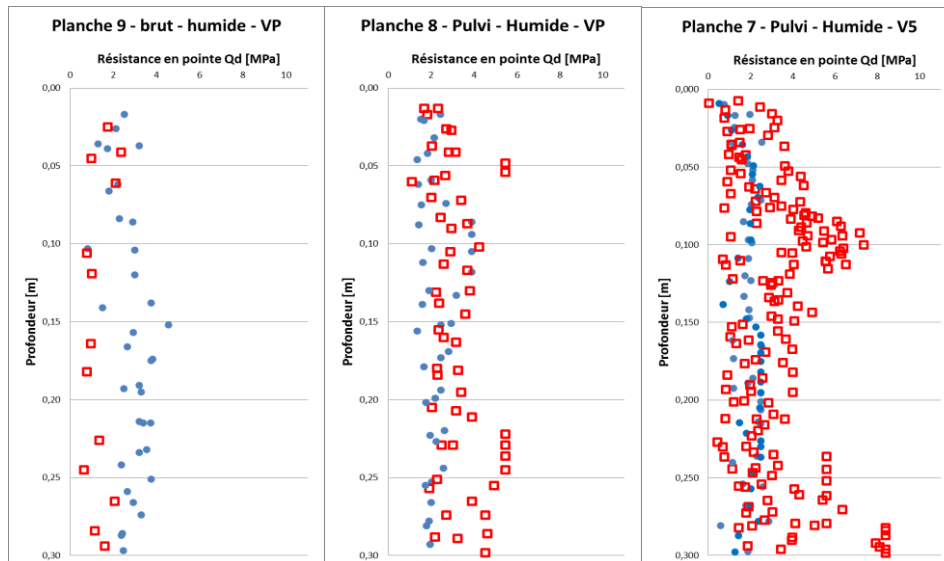


Figure 3. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots humides

Seuls les 30 cm supérieurs de chaque plot sont étudiés. Chaque paramètre de compactage est analysé au travers de la teneur en eau (et la succion de manière implicite) qui est le paramètre de référence. Un écrêtage a été réalisé sur les valeurs de q_d conformément à la méthode de traitement des essais au pénétromètre dynamique selon le fascicule 62 (écrêtage à 1,3 fois la valeur moyenne de résistance de pointe)

De plus, les valeurs de résistance de pointe aberrantes (augmentation soudaine de la résistance sur une hauteur réduite) ont été écartées de l'étude car ces dernières correspondent à des cailloux isolés et ne sont pas représentatives du compactage du plot. Les figures 1 à 3 présentent les valeurs de résistance de pointe mesurées par les Pandas pour différents états hydriques.

Analyse des plots dans un état hydrique sec

Sur les 30 premiers centimètres, le sur-compactage améliore la résistance de pointe q_d pour les deux types de compacteurs testés (Figure 1). Cependant les résultats du VP5 sont beaucoup plus homogènes que ceux du V5. En effet, le fuseau de valeurs est très restreint avec ce compacteur, et l'effet du sur-compactage est clairement visible, ce qui est moins le cas sur le plot compacté au V5.

Analyse des plots dans un état hydrique moyen

En observant la figure 5, et en s'intéressant aux plots réalisés sur matériaux pulvimixés, l'action bénéfique du sur-compactage est surtout présente pour le plot compacté au V5. En effet, Deux courbes peuvent être distinguées, une pour chaque taux de compactage. Ce constat est moins évident avec le plot compacté au VP5, même si il y a bénéfice en termes de résistance de pointe. La réduction de la granulométrie produite par le passage du pulvimixeur ne change peu l'action du VP5 qui réalise déjà cette action de façon indirecte lors du compactage.

Analyse des plots dans un état hydrique humide

Comme présenté en figure 3, avec des matériaux bruts (et l'utilisation d'un pied dameur) le sur-compactage diminue fortement la résistance de pointe du sol.

Avec des matériaux pulvimixés, la conclusion diffère. Le sur-compactage augmente la résistance de pointe. Les raisons de cette amélioration sont peut-être dues à un séchage du sol lors du compactage. En effet, le sur-compactage (8 passes de compactage supplémentaires), conjugué au pulvimixage et à l'action du pied dameur (qui pétrie le sol) pourrait expliquer une baisse de la teneur en eau et donc une différence de résistance entre le plot normalement compacté et le plot sur-compacté. A noter que la météo était très clémente lors de la réalisation de la planche (ensoleillé et venteux). L'action

bénéfique du sur-compactage avec le rouleau lisse est moins visible, ce qui justifierait cette explication.

Une autre hypothèse viendrait d'un meilleur ré-arrangement des mottes possibles avec le pulvimixage lors du sur-compactage.

Il est difficile de valider totalement une de ces deux hypothèses à cause du manque de données expérimentales valables en termes de teneur en eau. En effet, les carottes issues de la planche de compactage ont pour certaines séchées entre la date de prélèvement et celles des essais de laboratoire. De plus les différentes mesures donnent place à une grande dispersion, ce qui implique un manque d'homogénéité au sein du matériau. Les teneurs en eau in situ n'ont quant à elles été réalisées que sur les plots normalement compactés.

5. Mise en évidence de l'impact du type de mouture utilisé

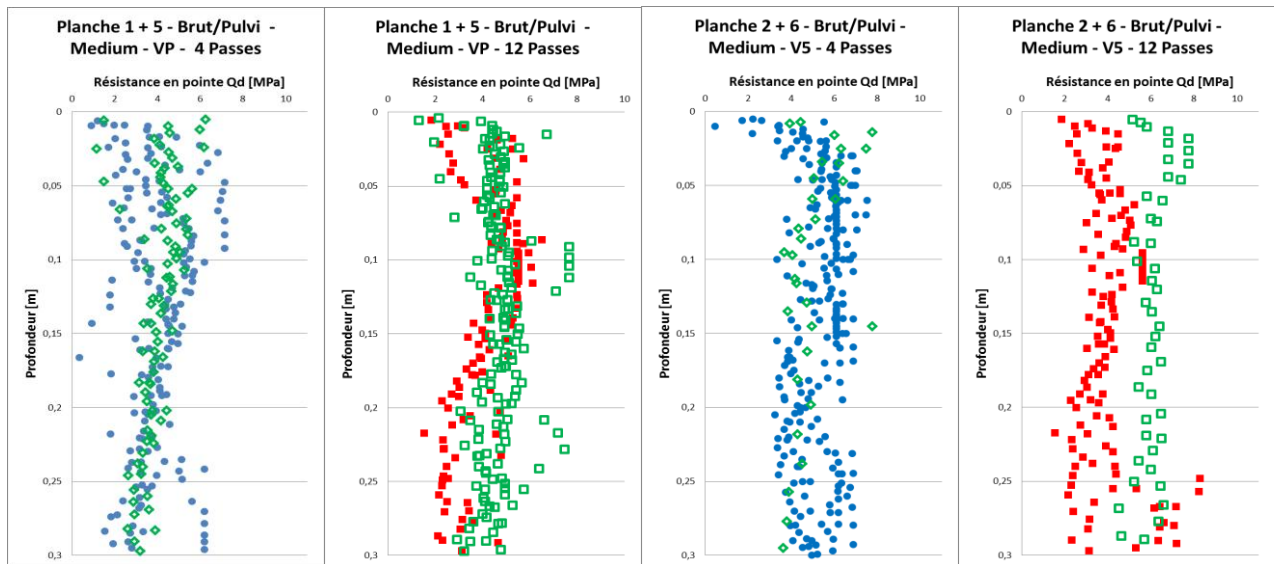


Figure 4. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots médium

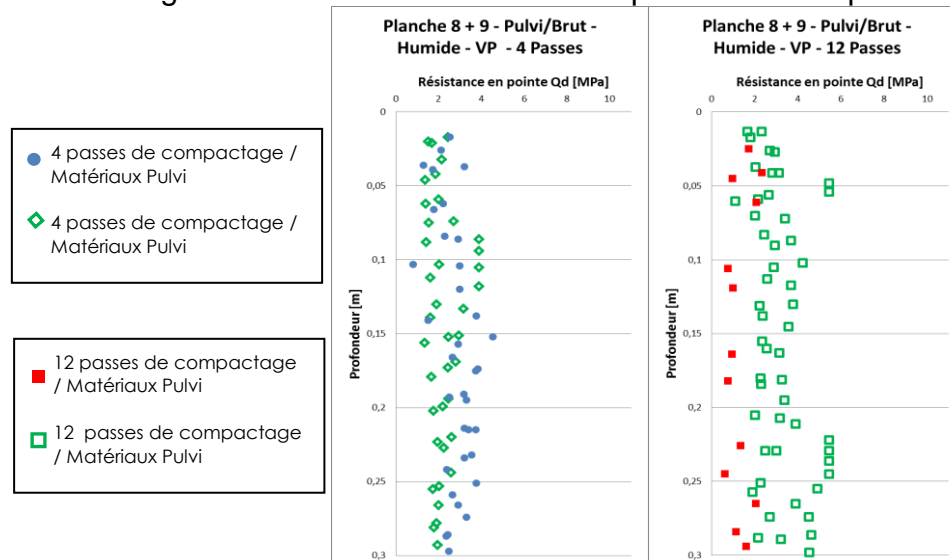


Figure 5. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots humides

Pour un matériau dans un état hydrique moyen, compacté au VP5, les valeurs de q_d sur matériaux pulvimixés (figure 4), sont plus homogènes que sur matériaux bruts, et ceci quel que soit le degré de compactage. L'effet du pulvimixage est plus difficile à repérer avec le VP5 dû à l'effet triturant de son rouleau.

Du côté humide, le matériau pulvimixé se trouve être plus résistant que le matériau brut. Cette différence s'accroît lors du sur-compactage (figure 5). Toutefois un doute subsiste sur la teneur en eau entre ces deux matériaux du côté humide. Le séchage du matériau pendant l'action du pulvimixage n'est pas à écarter.

6. Mise en évidence de l'impact du type de compacteur utilisé

Comme évoqué précédemment, l'effet du type de compacteur est très visible du côté sec (figure 6 ; matériaux bruts), avec des résultats beaucoup plus homogènes en présence du pied d'ameur.

Pour des matériaux médium, brut ou pulvimixés, les résultats sont équivalents entre V5 et VP5, avec des résistances un peu meilleures parfois au V5.

Pour les matériaux humides, le VP5 est très supérieur, avec des résistances beaucoup plus homogènes (voir résultats sur matériaux pulvimixés) et le seul à arriver à trafiquer sur les matériaux bruts.

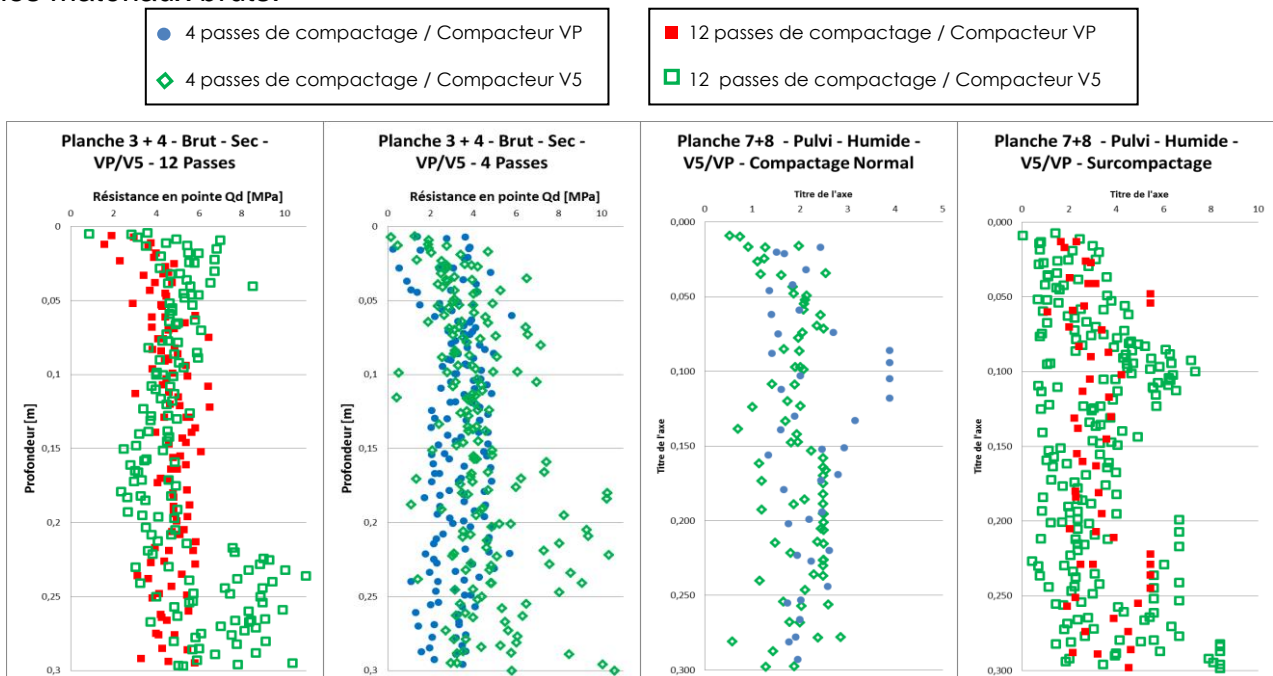


Figure 6. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots secs et humides

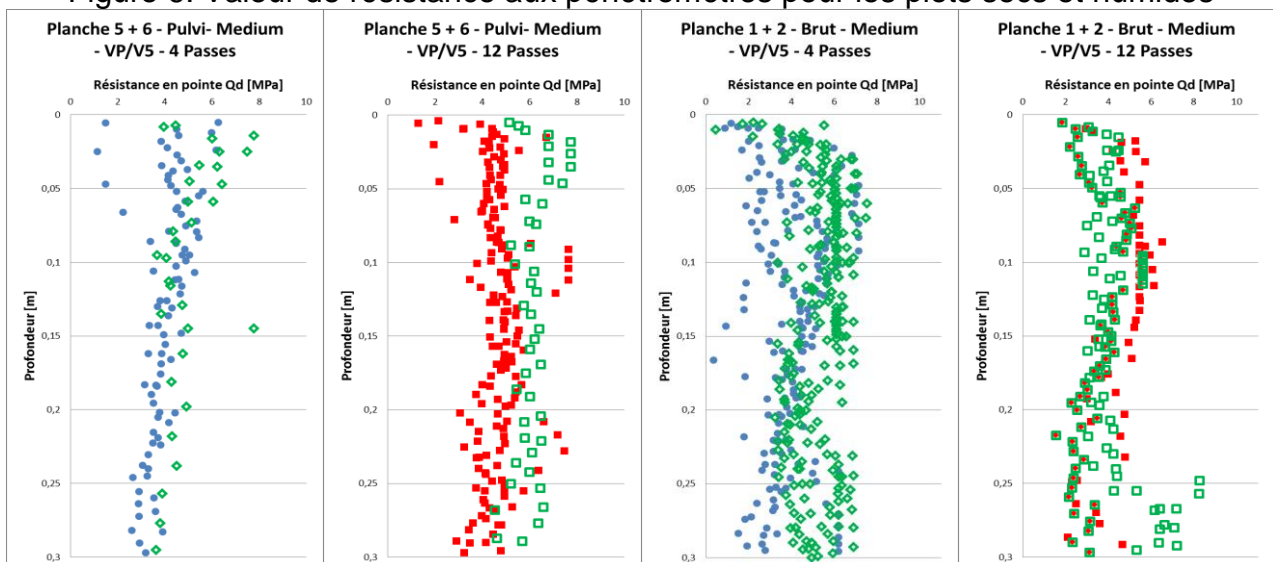


Figure 7. Valeur de résistance aux pénétromètres pour les plots médium

7. Conclusion

Suite à la réalisation d'une série de plots de compactages, sous différentes variations de paramètres, des pénétromètres ont été réalisés pour vérifier la qualité du compactage.

Pour les matériaux marneux de type A2 testés, les essais réalisés confirment les préconisations du GTR en ce qui concerne le compactage intense des matériaux à l'état sec « s » et le compactage faible des matériaux « humides ». Ceci valide la représentativité de la planche d'essais.

Cependant les résultats obtenus permettent certaines avancées par rapport au référentiel :

- 1) l'utilisation d'un compacteur pied dameur par rapport à celle d'un vibrant lisse permet d'obtenir de meilleurs résultats en termes d'homogénéité des caractéristiques géotechniques et cela quel que soit l'état hydrique du matériau.
- 2) Pour des matériaux à l'état hydrique moyen (m), lorsque des densités au-delà de l'optimum Proctor sont recherchées, le pied dameur sur matériaux bruts permet d'obtenir des résultats équivalents au matériau pulvimixé couplé au rouleau lisse.

De manière à mieux comprendre les différents résultats de la planche, des études de laboratoire ont été réalisées (Boutonnier et al, 2016). Ces études montrent que les paramètres qui gouvernent la résistance au cisaillement sont la succion et la densité sèche. Dans un état hydrique sec, le compactage intense se fait à succion constante : l'augmentation de densité produit une augmentation de résistance. Dans un état hydrique humide, le sur compactage produit une diminution de la succion sans augmentation de la densité, la résistance diminue.

Remerciements

Le projet Terredurable est soutenu par l'ANR programme Bâtiments et Villes Durables, convention ANR 2011 VILD 004 01.

La DREAL Champagne-Ardenne est vivement remerciée pour avoir autorisé les partenaires du projet Terredurable à réaliser cette planche sur les emprises du chantier de l'autoroute A304.

Bibliographie

- Athapaththu A. A. R.G. et al. A lightweight dynamic cone penetrometer for evaluation of shear strength of natural masado slopes, *Doboku Gakkai Ronbunshuu C 63.2* (2007), p. 403-416.
- Benz Navarrete, M. (2009). Mesures Dynamiques lors du battage du pénétromètre PANDA 2. Thèse, Université Blaise Pascal - Clermont II.
- Boutonnier L., Mahmutovic D, Andriantrehina R., Branque D., Doanh, T., Dubreucq T., Fleureau J.-M., Fry J.-J., Hoang L., Pelizzari B., Taidi S. et Salager, S., 2016, Essais géotechnique de terrassement et succion : quelques enseignements pratiques, JNGG 2016.
- Collins R. et Miller A. G. (2014) Cone penetration testing in unsaturated soils at two instrumented test sites, *Unsaturated Soils : Research and applications*, p. 1489-1494.
- Fascicule n° 62, titre V - Conception et calcul des fondations des ouvrages de génie civil, Edition des journaux officiels, 182 p.
- Froumentin M. et Morel G. (1981) Compactage à faible teneur en eau – Compte rendu des essais 80-81, CETE Rouen, ministère de l'environnement et du cadre de vie.
- Russel A. R. et Khalili N. (2014), Interpretation of the cone penetration test in unsaturated Sands, *Unsaturated Soils : Research and applications*, p. 1675-1681.
- SETRA- LCPC (1992). Réalisation des remblais et couches de forme (GTR), Guide technique STREA-LCPC, 2 fascicules, 98 et 102 p.