

# VARIATION DE LA PÉNÉTRATION DYNAMIQUE EN FONCTION DE L'ÉTAT HYDRIQUE ET CORRÉLATIONS NOUVELLES

## VARIATION OF THE DYNAMIC CONE PENETRATION DUE TO A VARIATION OF THE MOISTURE CONTENT AND NEW CORRELATIONS

Matthias FERREIRA<sup>1</sup>, Benoît GIUDICELLI<sup>2</sup>

1 - HYDROGÉOTECHNIQUE, directeur grande région Normandie-Bretagne-Pays de Loire, Rouen, France.

2 - HYDROGÉOTECHNIQUE – ingénieur géotechnicien, Rouen, France.

**RÉSUMÉ** - Cette étude a pour objectif de caractériser la variation de la pénétration dynamique de pointe en fonction de l'état hydrique des limons peu à moyennement plastiques du Nord de la France (classe A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub> au sens du GTR). Nous proposons dans cette étude deux approches pour aborder des lois empiriques du type  $q_{d,sat}=f(w_n, w_{n,sat}, q_d)$  : approche inspirée de travaux de Freitag (1987) et de Gress (2015 et 2016).

**ABSTRACT** - This study deals with the influence of the moisture content on the dynamic cone penetration on the loam of the Northern France. We propose to define two empirical laws of the form  $q_{d,sat}=f(w_n, w_{n,sat}, q_d)$  inspired by the work of Freitag (1987) and Gress (2015 and 2016).

### 1. Introduction

D'une manière générale, la plupart des régions du monde présente des cycles de variations hydriques au cours du temps rendant impératif aux géotechniciens de se poser la question de savoir ce que vaut le paramètre mesuré in situ : est-il dans des conditions de saturation ? La valeur mesurée est-elle constante dans le temps ? A partir de quelle profondeur les cycles de précipitations n'impactent plus l'état hydrique du sol ? L'objectif de cette étude est de donner de nouveaux outils pour anticiper les effets de la saturation et d'anticiper la dégradation de certaines valeurs mécaniques mesurées in situ. Nous proposerons ici deux approches :

- approche inspirée des travaux de Freitag (Freitag, 1987) issus d'une étude agronomique sur la circulabilité des champs cultivés,
- approche issue des travaux de Gress (Gress, 2015 et 2016).

### 2. Présentation de la population étudiée

J.Leplat définit le limon, d'un point de vue géotechnique, comme un matériau présentant « une fraction granulométrique intermédiaire entre sable et argile, et par extension une famille de sols où cette fraction prédomine, et à laquelle se rattachent un certain nombre de propriétés physiques et mécaniques ». Nous essayons à travers cette étude, de dégager une loi de comportement mécanique de ces matériaux très présents dans le Nord de la France. Le secteur d'étude est situé à Saint Jacques sur Darnétal (76).

L'expérimentation a consisté à réaliser dans un premier temps une caractérisation précise des matériaux objet de l'étude via des essais en laboratoire. La courbe granulométrique a été établie, ainsi que la détermination de l'argilosité et de la perméabilité des matériaux. Notre retour d'expérience sur la région a permis d'identifier le

site comme étant représentatif des limons des plateaux normands et de manière plus générale des limons loessiques du nord de la France. On retient les paramètres principaux suivants (Tableau 1) :

Tableau 1 : caractérisation des matériaux testés

%400 $\mu$ m	%80 $\mu$ m	VBS	IP	w <sub>L</sub>	Classe GTR	K (m/s)
99,00%	97,50%	2,6	11	34,00%	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>	2,08.10 <sup>-6</sup>

L'expérimentation sur le terrain a consisté à réaliser, pendant 2 années consécutives, et de manière aussi régulière que possible (fréquence hebdomadaire dans le meilleur des cas) le protocole suivant :

- réalisation d'un sondage pénétrométrique à 2,0m de profondeur, avec mesure de la résistance dynamique de pointe tous les 0,10m, suivant la norme NF EN ISO 22476-2,
- en parallèle, un sondage de reconnaissance géologique à la tarière manuelle à 2,0m de profondeur en diamètre 64mm avec mesure de la teneur en eau tous les 0,25m.

Ainsi, le protocole a été répété 32 fois sur les deux années d'expérience. Celui-ci a permis d'établir les données brutes suivantes (Figure 1) :

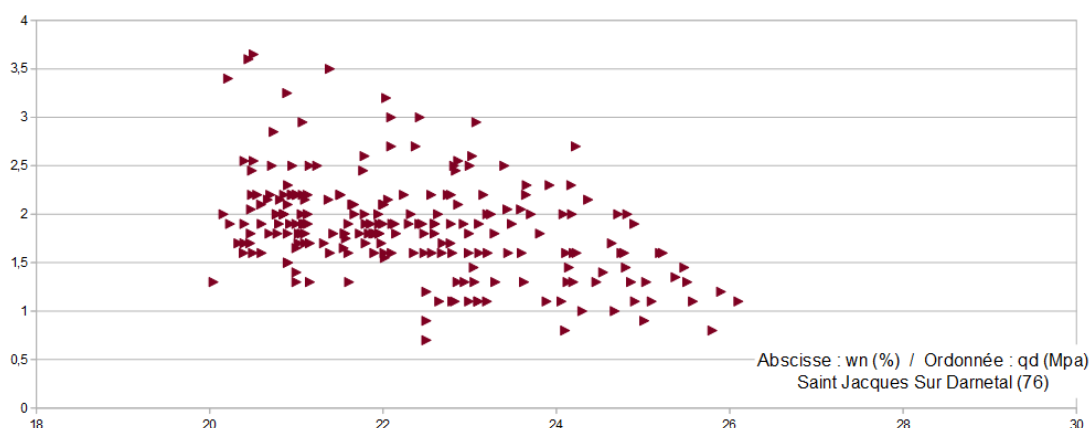


Figure 1 : synthèse des données récoltées pendant la phase expérimentale

Les limites de cette expérimentation sont rapidement ressorties dans la mesure où les conditions naturelles (cycle de précipitations, sécheresse, conditions de site,...) n'ont permis d'explorer qu'une frange trop restreinte de l'état hydrique des matériaux. En effet, sur les deux années de suivi, nous observons une variation des teneurs en eau de 20,0 à 26,0%.

A ce stade de l'étude, nous avons donc fait appel au retour d'expérience de notre société sur la région pour étoffer notre base de données d'autres couples ( $w_n$  ;  $q_d$ ) en s'appuyant notamment sur 4 études complémentaires :

- tracé routier entre Dieppe et Penly (76),
- aménagement d'une zone d'activité majeure sur Saint Romain de Colbosc (76),
- création d'un barreau routier sur la commune de Glicourt (76),
- création d'une plate-forme logistique sur Cauverville en Roumois (27).

Sur ces quatre études, le contexte géologique est le même avec un limon en tête comparable au limon de Saint Jacques Sur Darnetal (Tableau 2) :

Tableau 2 : caractérisation des limons sur la population étudiée

Analyse	%400 $\mu$ m moyenne	%80 $\mu$ m moyenne	VBS moyenne	Classe GTR
St Jacques Sur D.	99,00%	97,50%	2,6	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>
Glicourt 9 analyses GTR	95,78%	92,89%	2,5	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>
Dieppe-Penly 20 analyses GTR	97,50%	83,16%	1,7	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>
Saint Romain de C. 27 analyses GTR	99,00%	96,20%	2,2	A <sub>1</sub> /A <sub>2</sub>
Cauverville en Roumois 1 analyse GTR	97,00%	95,00%	2,3	A <sub>1</sub>

Cela rejoint par ailleurs les caractéristiques établies par Leplat (Leplat, 1965) définissant les limons loessiques du Nord de la France comme suit :

- %80 $\mu$ m compris entre 85 et 95%
- $w_L$  comprise entre 27 et 35% et IP compris entre 9 et 15.

Cela nous a permis de travailler sur la base de données suivantes dont la variation de teneur en eau s'étale de 12,0% à 30,0% (Figure 2 et 3) :

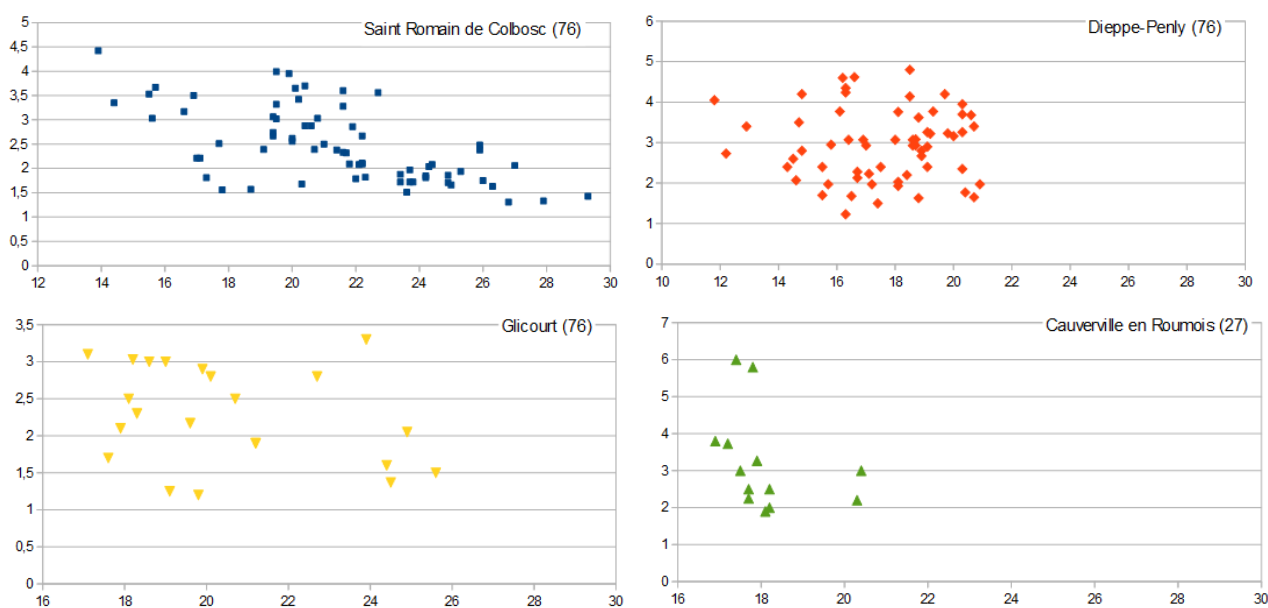


Figure 2 : population étudiée (abscisse  $w_n$ (%) ; ordonnée  $q_d$ (MPa))

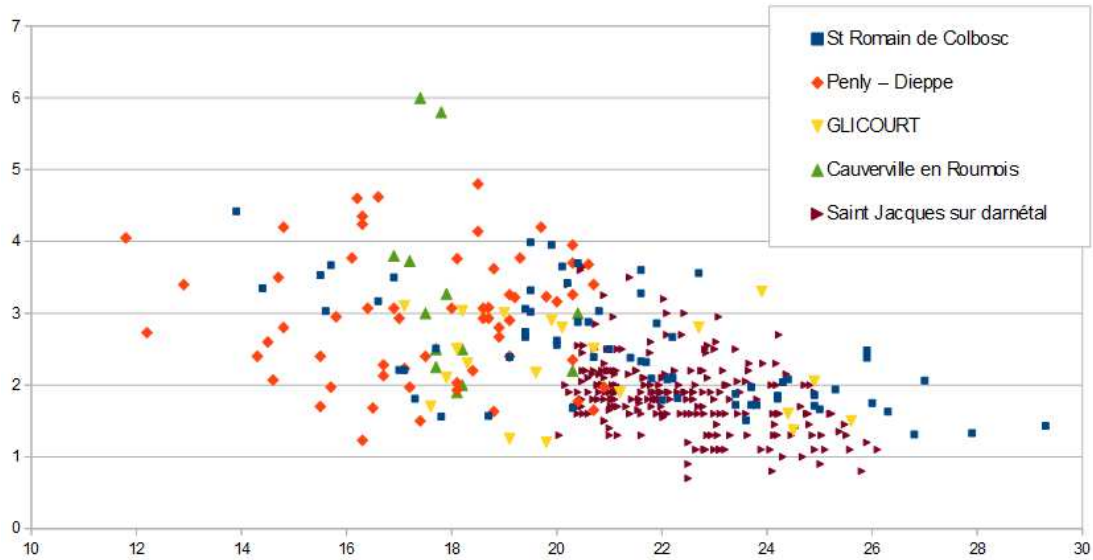


Figure 3 : superposition de l'ensemble des individus de la population étudiée (abscisse  $w_n(\%)$  ; ordonnée  $q_d(\text{MPa})$ )

### 3. Modèle de comportement inspiré des travaux de Freitag

#### 3.1. Relation empirique $q_d = f(w_n)$

On établit ici une relation empirique reliant la résistance en pointe dynamique à la teneur en eau dont la forme générale est issue du modèle empirique de Freitag (Freitag, 1987) (Figure 4) :

$$q_d = e^{a+b \times w_n} \quad [q_d \text{ en kPa}, w_n \text{ en pourcentage}] \quad (1)$$

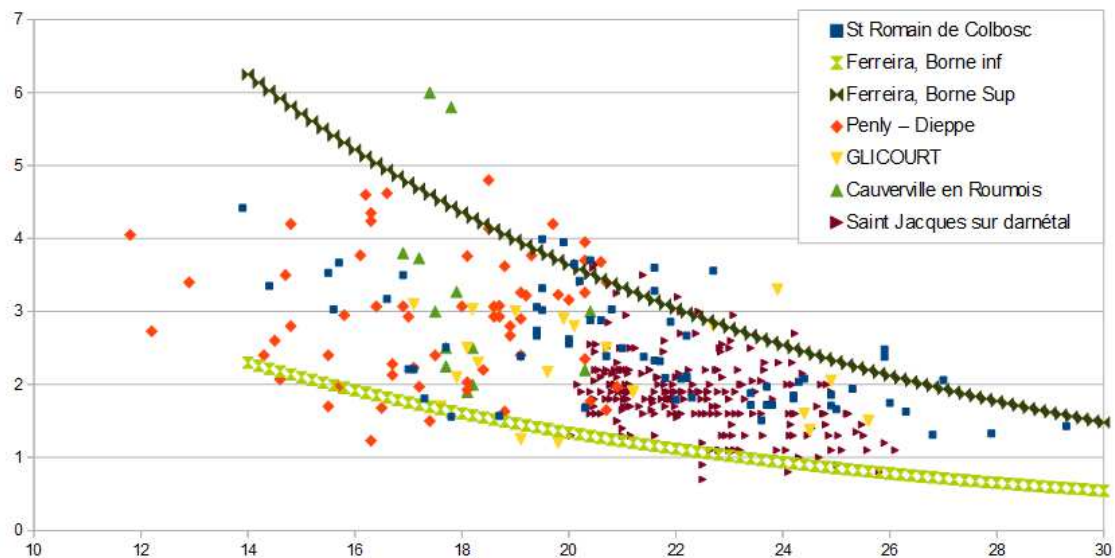


Figure 4 : lois empiriques (abscisse  $w_n(\%)$  ; ordonnée  $q_d(\text{MPa})$ )

Le paramètre  $b$  apparaît ici constant alors que le paramètre  $a$  varie de 9,0 à 10,0 :

$$q_d = \left[ e^{9,0-0,09 \times w_n} ; e^{10,0-0,09 \times w_n} \right] \quad [q_d \text{ en kPa, } w_n \text{ en pourcentage}] \quad (2)$$

Afin d'appréhender le paramètre  $a$  sur la population étudiée, nous proposons ci-après une approche par statistiques inférentielles. Cela consiste à déterminer, pour un intervalle de confiance donné, l'écart acceptable à la moyenne suivant les relations suivantes :

$$\bullet \quad IC = \bar{x} \pm t_{\left(n-1; 1-\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} \quad \text{si } n < 30, \quad (3)$$

Avec :

- IC : intervalle de confiance
- $\bar{x}$  : moyenne de la résistance en pointe dynamique pour une teneur en eau donnée,
- $s$  : écart-type,
- $n$  : nombre d'éléments de la population,
- $t_{n-1}$  : table de statistiques, nombre de Student

En prenant ici un intervalle de confiance de 90%, nous obtenons le traitement suivant (Figure 5) :

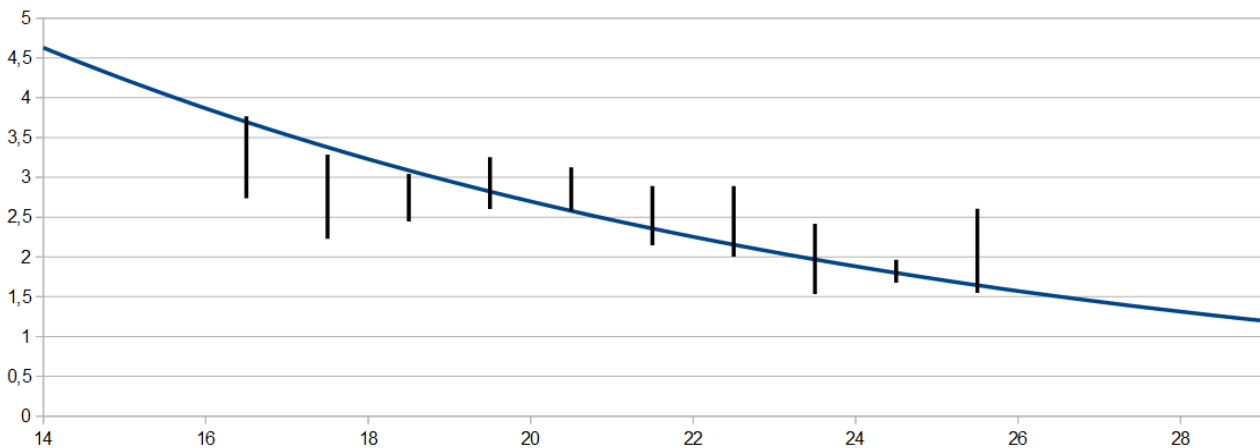


Figure 5 : approche statistique de la population étudiée (abscisse  $w_n(\%)$  ; ordonnée  $q_d(\text{MPa})$ )

Nous proposons la relation suivante :

$$q_d = e^{9,7-0,09 \times w_n} \quad [q_d \text{ en kPa, } w_n \text{ en pourcentage}] \quad (4)$$

### 3.2. Relation empirique $q_{d,sat} = f(w_{n,sat}, w_n, q_d)$

De la relation (3) découle une relation permettant d'approcher la résistance en pointe dynamique à saturation :

$$\begin{cases} q_d = e^{9,7-0,09 \times (w_n)} \\ q_{d,sat} = e^{9,7-0,09 \times (w_{n,sat})} \end{cases} \Rightarrow q_{d,sat} = q_d \times e^{0,09 \times (w_n - w_{n,sat})}$$

$$q_{d,sat} = q_d \times e^{0,09 \times (w_n - w_{n,sat})} \quad [q_d \text{ en kPa, } w_n \text{ en pourcentage}] \quad (5)$$

On voit ici que le paramètre  $a$  variable n'intervient plus dans la relation (5).

### 3.3. Corrélations nouvelles

Enfin en suivant les corrélations reliant la résistance en pointe dynamique avec d'une part la pression limite et d'autre part la résistance au pénétromètre statique (Gress, 2012 et 2015) :

$$P_l^* = q_d^{0,8} \quad (6)$$

Avec  $q_d$  : résistance en pointe dynamique [kPa]  
et  $P_l^*$  : pression limite

$$q_c = 0,83 \times q_d \quad (7)$$

Avec  $q_c$  : résistance en pointe statique  
et  $q_d$  : résistance en pointe dynamique

Nous obtenons les corrélations suivantes pour estimer les paramètres à saturation dans des matériaux peu à moyennement plastiques :

$$P_{l,w_{n,sat}}^* = P_{l,w_n}^* \times e^{0,072 \times (w_n - w_{n,sat})} \quad [P_l^* \text{ en kPa, } w_n \text{ en pourcentage}] \quad (8)$$

$$q_{c,w_{n,sat}} = 0,83 \times q_{c,w_n} \times e^{0,09 \times (w_n - w_{n,sat})} \quad (9)$$

## 4. Modèle de comportement inspiré des travaux de Gress

Les travaux de Gress (Gress, 2016) proposent une relation comme suit :

$$\frac{X_1}{X_2} = \left( \frac{w_{n,2}}{w_{n,1}} \right)^n \quad (10)$$

Où  $X_1$  et  $X_2$  correspondent à des valeurs mécaniques de type pression limite, résistance en pointe,... A rebours sur la population étudiée et sur les bornes définies précédemment,

nous recalons le paramètre n (Figure 6).

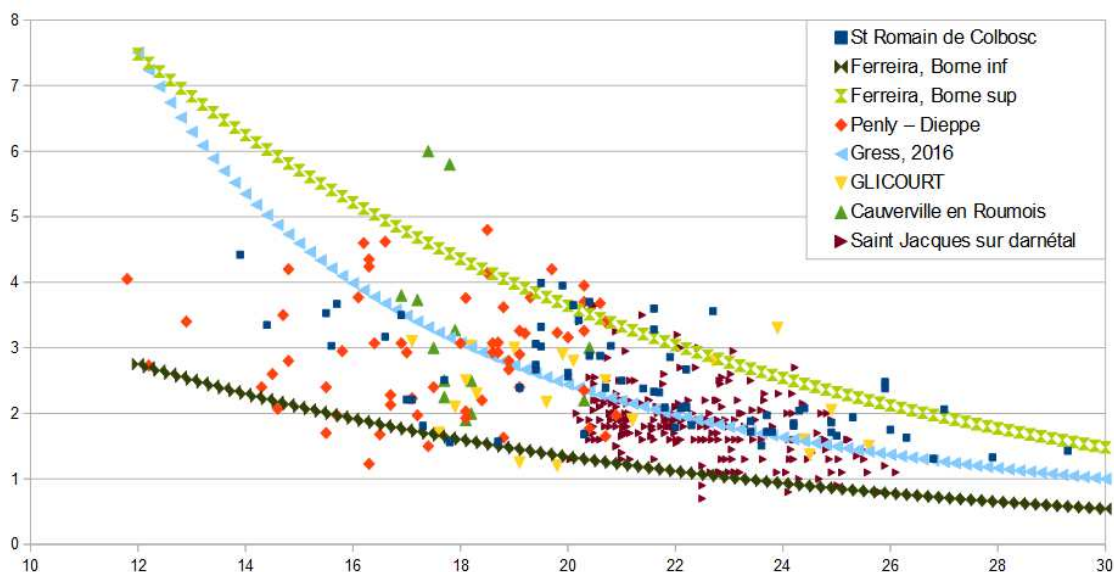


Figure 6 : loi de comportement inspiré des travaux de Gress, 2016 (abscisse  $w_n(\%)$  ; ordonnée  $q_d(\text{MPa})$ )

Nous obtenons un modèle satisfaisant pour  $n = 2,2$  en calant le modèle sur la base des bornes définies en (2) et en comparaison de la forme empirique retenue en (4), soit :

$$\frac{q_{d,1}}{q_{d,2}} = \left( \frac{w_{n,2}}{w_{n,1}} \right)^{2,2} \quad (11)$$

## 5. Analyse critique des modèles empiriques

Les deux modèles présentés ci-avant dépendent d'un paramètre b et n que l'on peut relier à l'argilosité du sol.

Freitag propose de faire varier b (relation (1)), comme suit (Tableau 3) :

Tableau 3 : paramètres issus des travaux de Freitag

Type de sol	Argile	Argile silteuse	Silt	Silt sableux
Valeur de b	0,1	0,2	0,3	0,4

L'approche de Gress (Gress, 2016) propose :

$$n = 2,5 - \frac{3}{\pi} \times \text{Arc tan}(VBS - 4,4) \quad (12)$$

Pour les limons du Nord de la France, pour une VBS variant de 1,5 à 3,0, on calcule un paramètre n variant de 3,4 à 3,7. Les deux modèles proposés précédemment convergent

vers des paramètres qualifiant un sol plastique à très plastique pour caractériser le comportement des limons du Nord de la France.

Cela nous amène à conclure que seule l'argilosité ne saurait définir le comportement des sols et que des paramètres tels que la densité et la granulométrie influent également sur celui-ci. Notamment, les limons du Nord de la France ont la particularité d'avoir une fraction à 2 $\mu$ m importante (20 à 30%) pour une argilosité faible à moyenne.

## 6. Conclusions

L'expérimentation est toujours en cours, l'incrément de mesure permet ainsi d'affiner toujours plus le modèle empirique. Ces premiers résultats ont permis de définir deux modèles empiriques permettant d'estimer le comportement du sol à saturation pour les limons du Nord de la France. Par corrélation, ces résultats ont été étendus aux paramètres géotechniques usuellement utilisés en France telles que la pression limite et la résistance en pointe statique.

Un axe de développement complémentaire associé à ces premiers résultats consiste à relier l'impact de la pluviométrie sur les variations de teneur en eau et d'affiner la notion de garde hydrique.

L'intérêt de cette étude est de donner aux géotechniciens des outils pour anticiper l'effet de la saturation sur un paramètre mécanique que l'on aurait mesuré à un instant t. Cela permettra, entre autre, d'assurer la pérennité des ouvrages géotechniques.

## 6. Références bibliographiques

- **FREITAG, D.R.**, 1987. A proposed strength classification test for fine-grained soils. Journal of Terramechanics, volume 24, n° 1. p. 25-39.
- **GRESS JC**, 2012. Corrélations nouvelles pour améliorer la pertinence du diagnostic géotechnique – Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur 2012, Bordeaux.
- **GRESS JC**, 2015. Caractérisation en laboratoire et in situ des sols – 1er séminaire international sur les routes et les matériaux routiers (RMR' 2015), USTHB Alger.
- **GRESS JC**, 2016. Avancées dans la caractérisation du comportement prévisible des sols à risques de retrait gonflement par les essais en laboratoire et par les mesures in situ – symposium géotechnique de Dakar.
- **LERAT J.**, 1965, Limons et loess – exposé présenté aux journées de la géologie Appliquée aux problèmes des Ponts et chaussées, organisées à Rouen les 12, 13 et 14 mai 1965.
- **NF EN ISO 22476-2** , juillet 2005: reconnaissance et essais géotechniques – essais en place – partie 2 - essai de pénétration dynamique dynamique.