

# CORRELATIONS A PARTIR DU PENETROMETRE STATIQUE

## SOME CORRELATIONS OUT OF CONE PENETRATION TESTS

Catherine JACQUARD<sup>1</sup>, Claire BOUTET<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fondasol, Montfavet, France. <sup>2</sup> Fondasol, Lille, France

**RÉSUMÉ** – L'objectif de l'article est de passer en revue les différentes corrélations trouvées dans la littérature entre pénétromètre statique à pointe électrique, et un ensemble de paramètres géotechniques. A travers une étude réalisée sur un site du Nord de la France, l'article commente l'application des corrélations aux cas de figure étudiés.

**ABSTRACT** – The purpose of the paper is to review some correlations from authors, between cone penetration tests and some geotechnical parameters. Out of investigations performed on a site in the north of France, the paper comments if correlations are relevant or not.

### 1. Introduction

L'objectif de l'article est de passer en revue les différentes corrélations entre pénétromètre statique à pointe électrique, et un ensemble de paramètres d'identification, d'état tels le poids volumique, la teneur en eau, le degré de surconsolidation des sols fins ; mécaniques tels la pression limite nette  $Pl^*$  mesurée au pressiomètre Ménard et la cohésion non drainée  $C_u$ ; de déformabilité tels le module pressiométrique Ménard  $E_M$ , le module d'Young  $E$  ou le module oedométrique  $E_{oed}$ . L'étude porte sur les sols fins reconnus au droit du site analysé.

Ces essais effectués conformément à la norme NF EN ISO 22-476-1(2013), ont fait l'objet de nombreuses études de corrélation. L'origine des formules utilisées dans cet article est présentée et est appliquée à un site ayant fait l'objet d'investigations au moyen d'essais de pénétration statique à pointe électrique (PS), de carottages (SC), avec essais d'identification et essais mécaniques, et de sondages destructifs (SP) avec essais pressiométriques Ménard réalisés conformément à la norme NFP94-110-1 (2000). Nous discutons enfin l'application des corrélations pour les sols rencontrés sur ce site.

### 2. Description du site

Le site étudié se trouve dans le département du Nord. Il a été réalisé trois essais de pénétration statique, 4 sondages carottés et 6 sondages pressiométriques. Les formations rencontrées sous les remblais présents jusqu'à 2 à 4m de profondeur, sont des limons argileux (LA) jusqu'à 5.5 à 8m, puis des limons sableux(LS) jusqu'à 14 à 16m. La nappe est rencontrée entre 1 et 2 m de profondeur. La figure 1 donne les logs pressiométriques et pénétrométriques mesurés entre 2 et 15m de profondeur dans ces formations.

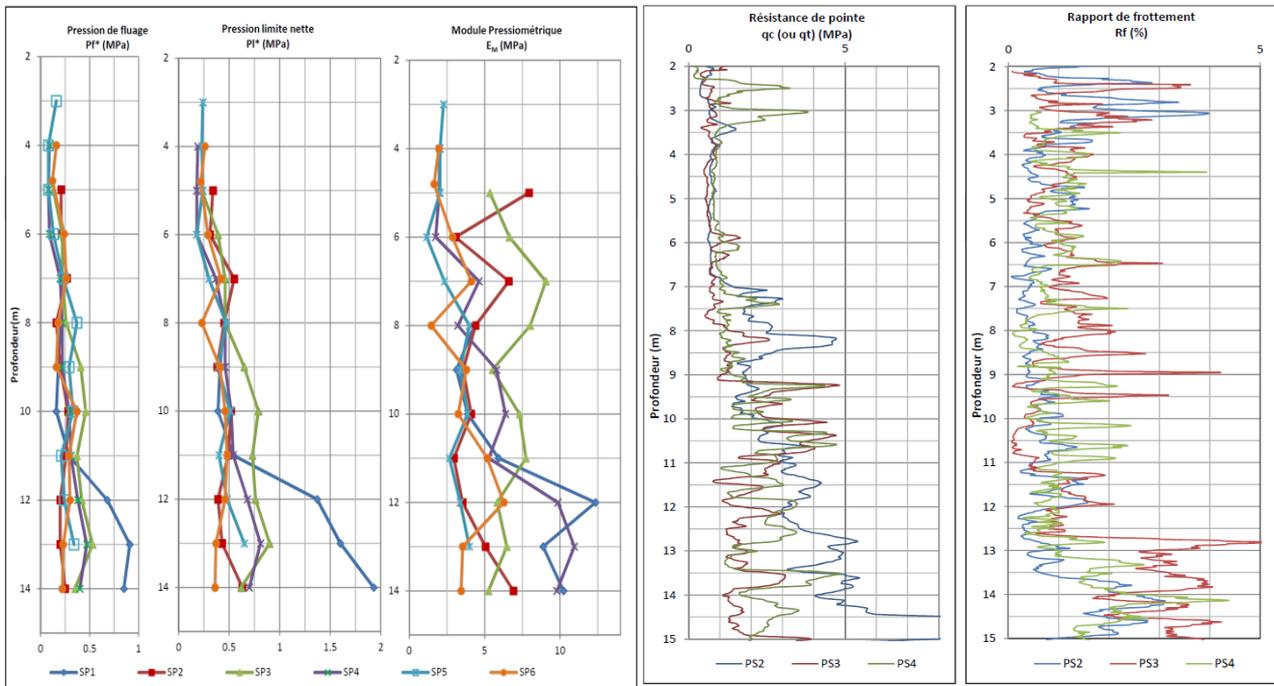
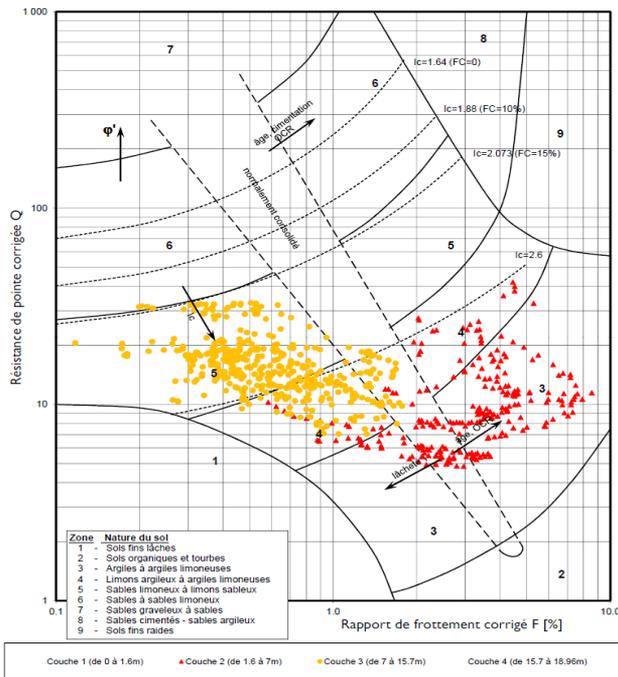


Figure 1. Caractéristiques pressiométriques et pénétrométriques des sols fins du site.

### 3. Identification des sols

Les essais pénétrométriques ont été analysés selon l'abaque de Robertson (2015) reprise par la norme NFP94-261 (AFNOR, 2013) à partir de la résistance de pointe normalisée  $Q_T$  et du rapport de frottement normalisé  $F_R$ , selon l'indice de comportement  $I_R$  (annexe A de cette norme). Ils ont été comparés à la description des sols réalisée conformément à l'annexe B de la norme NF EN ISO 14-688-2 (2005) donnée dans le tableau 1.



Zone	Nature du sol
1	- Sols fins lâches
2	- Sols organiques et tourbes
3	- Argiles à argiles limoneuses
4	- Limons argileux à argiles limoneuses
5	- Sables limoneux à limons sableux
6	- Sables à sables limoneux
7	- Sables graveleux à sables
8	- Sables cimentés - sables argileux
9	- Sols fins raides

Figure 2. Identification des sols fins du site selon l'abaque de Robertson.

Tableau 1. Identification et classification du limon argileux (LA) et du limon sableux (LS)

Forage	Prof. (m)	Sol	Classific. ISO 14-688-2	Nature Granulométrique ISO 14-688-2	Classific. P11.300	Teneur en eau W %	Limites d'Atterberg		passant à	
							WL %	IP %	80 $\mu$ m %	2 $\mu$ m %
SC1	3.4	LA	4.3	Argile limoneuse	A2	31.3	51	19	90.0	23.4
	5.8	LA	3.1	Limon sableux	A1	87.4	80	6	59.0	2.7
	8.3	LS	4.1	Limon argileux	A1	19.9	28	7	96.6	17.5
	12.0	LS	2.1	Sable limoneux	A1	18.1			44.9	7.7
SC2	4.0	LA	4.1	Limon	A3	78.4	110	35	76.1	3.5
	7.0	LS	3.2	Limon argilo-sableux	A1	20.4	26	6	72.5	12.5
	11.0	LS	3.3	Argile limono-sableuse	A1	20.9	26	5	90.1	18.7
	14.5	LS	10.1	Sable limono-argileux	B5	13.6	21	6	25.1	5.7
SC3	3.2	LA	4.3	Argile limoneuse	A1	48.2	92	8	90.8	30.4
	5.3	LA	4.1	Limon	A4	50.2	79	64	81.1	5.1
	8.0	LS	4.3	Argile limoneuse	A1	20.3	24	5	85.7	18.8
	12.7	LS	3.2	Limon argilo sableux	A1	16.1	20	4	58.9	8.1
SC4	2.0	LA	4.2	Limon argileux	A2	18.3	35	4	96.6	17.9
	4.3	LA	4.3	Argile limoneuse	A3	58.8	73	34	95.7	26.9
	5.4	LA	4.1	Limon	A3	63.8	73	27	90.2	2.6
	8.1	LS	3.3	Argile limono-sableuse	A1	22.9	28	8	67.9	17.0
	10.5	LS	4.2	Limon argileux	A1	21.5	27	7	97.4	18.3
	13.0	LS	3.3	Argile limono-sableuse	A1	22.6	28	7	56.2	11.7

Les analyses granulométriques et sédimentométriques montrent une relative variabilité des natures au sein d'une même formation, alors que l'abaque de Robertson classe assez clairement les deux formations selon leur indice de comportement entre LA (zones 3 et 4 de Robertson), avec un comportement de sols fins, et LS (zones 4 et 5) avec un comportement de sol intermédiaire. Le type de comportement est davantage décrit à travers les limites d'Atterberg et les teneurs en eau W: le limon argileux présente presque systématiquement (à une exception près) une limite de liquidité  $WL > 50\%$  (sols très plastiques selon le diagramme de Casagrande), et  $W > 30\%$ .

Cependant les analyses granulométriques et sédimentométriques permettent une description relativement fine des sols, là où l'abaque de Robertson, basée sur l'indice  $I_R$ , ne permet que des indications de nature ; ainsi limons, argiles sableuses, et sables argileux ne sont pas décrits par Robertson. Aussi, est-il important au stade de la construction d'un modèle géotechnique, de ne pas confondre la description lithologique des sols qui nécessite l'identification des sols en laboratoire, et la caractérisation de leur comportement, qui peut être ébauchée à travers l'abaque de Robertson.

Les mesures de poids volumique  $\gamma$  réalisées en laboratoire ont été comparées avec les formules proposées par Robertson (2015) et Mayne (2014). Dans le limon argileux,  $\gamma$  varie de 13 à 18  $\text{KN/m}^3$ , alors que les corrélations donnent des valeurs uniformes de 15 à 18  $\text{KN/m}^3$  ; en revanche  $\gamma$  dans les limons sableux est mesuré en moyenne à 20  $\text{KN/m}^3$ , alors que les corrélations indiquent systématiquement des valeurs plus faibles de l'ordre de 16 à 18  $\text{KN/m}^3$ , ce qui n'est guère satisfaisant.

#### 4. Caractéristiques de résistance

Des corrélations entre pression limite nette  $pl^*=pl-p_0$  et résistance de pointe nette  $q_c-\sigma_v$ , et entre module pressiométrique  $E_M$  et résistance de pointe nette, ont été proposées par plusieurs auteurs (Cassan, 1988), selon la nature des sols et synthétisées par Aubrion (2013) : les figures 3 et 4 rappellent ces plages de corrélation.

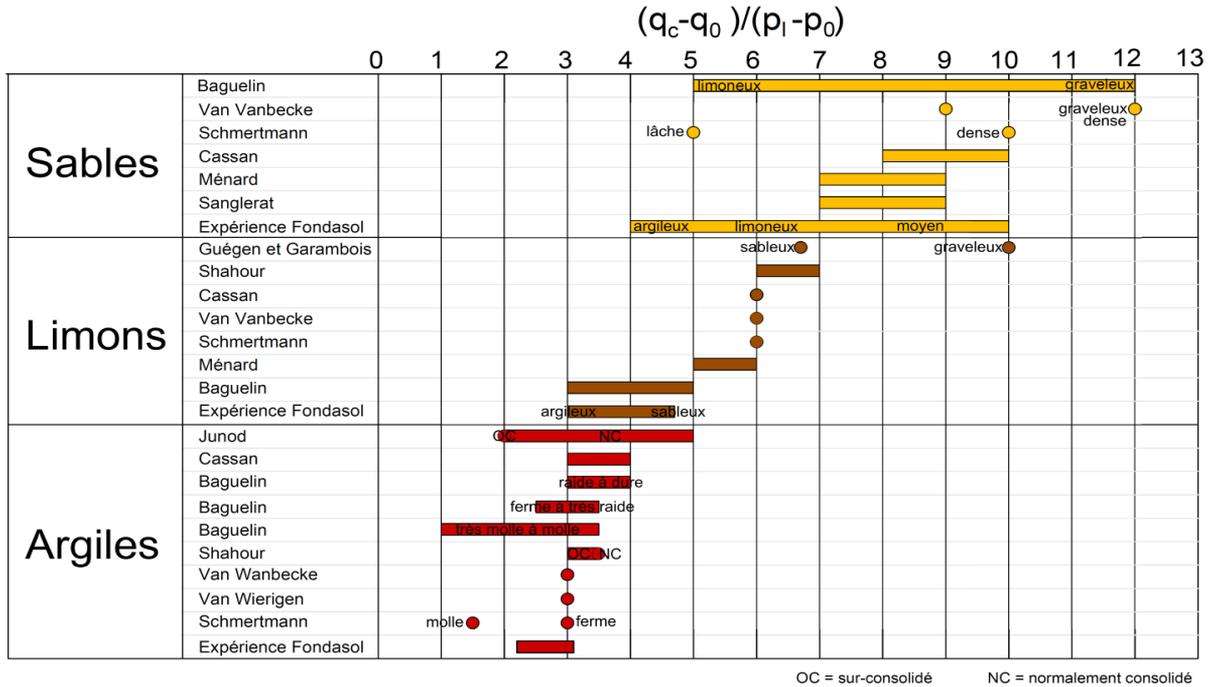


Figure 3. Corrélation  $q_c^*/PI^*$ .

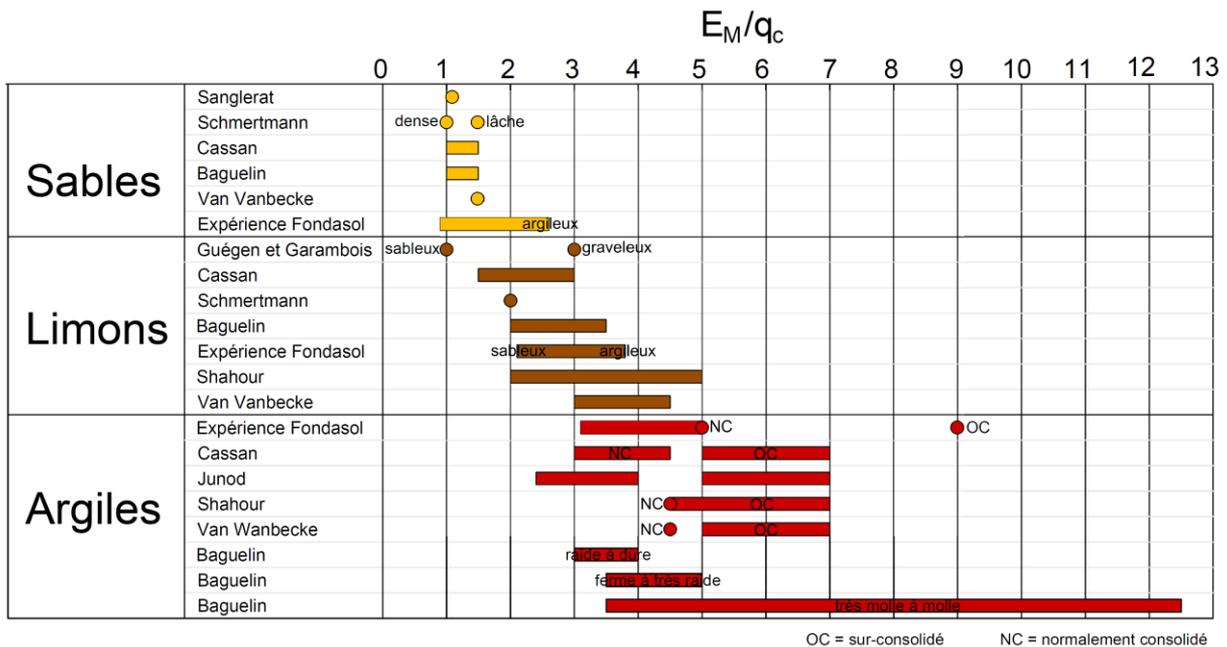


Figure 4. Corrélation  $E_M / q_c$ .

Le tableau 2 présente les ratios  $qc/pl^*$  et  $E_M/qc$  calculés, qui sont dans les plages de ratios habituels pour ces sols.

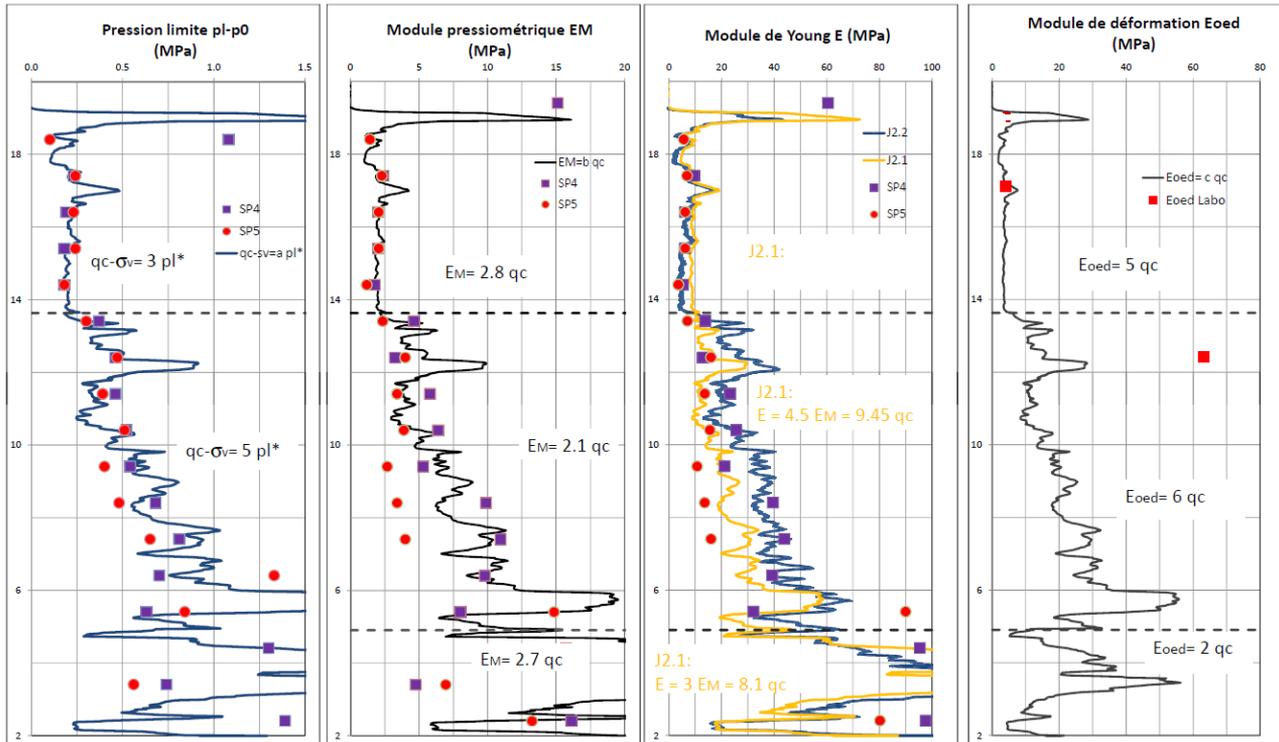


Figure 5. Pression limite nette, modules pressiométriques, d'Young et oedométriques déduits de la résistance de pointe  $qc$  mesurée en PS2

Tableau 2. Caractéristiques pressiométriques et pénétrométriques

Modèle géotechnique	$pl^*$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	$qc$ (MPa)	$qc/pl^*$	$E_M/qc$	$E/E_M$	$E(J2.1) = f(E_M)$	$E(J2.1) = f(qc)$	E - EC7
Limon argileux	0.23	2.3	0.8	3.5	2.8	4.5	10.4	12.6	10
Limon sableux 1	0.42	3.6	1.7	4.0	2.1	4.5	16.2	9.5	10 à 20
Limon sableux 2	0.63	7.3	2.7	4.3	2.7	3.0	21.9	8.1	20

La figure 5 montre un exemple de corrélation entre pressiomètre (SP4-SP5), et pénétromètre (PS2) réalisés dans la même zone, avec les ratios du tableau 2. La corrélation est excellente dans le limon argileux entre  $pl^*$  et  $qc$  et entre  $E_M$  et  $qc$  ; elle reste bonne dans le limon sableux entre  $pl^*$  et  $qc$  ; en revanche, la dispersion est importante dans le limon sableux entre  $qc$  et  $E_M$ .

## 5. Caractéristiques de déformation

Nous avons estimé le module d'Young  $E$  de déformation du sol selon les annexes de la norme NF P94-261, J.2.1 à partir des essais au pressiomètre, et J.2.2 à partir du pénétromètre, selon les formules(1).

Nous avons tracé la courbe (J.2.1) donnant  $E$  à partir du module pressiométrique déduit de  $qc$  avec les valeurs de  $E/E_M=4.5$  dans le limon argileux et de  $E/E_M= 3$  dans le

limon sableux (figure 5). La courbe J2.1 a tendance à légèrement surévaluer le module E ainsi estimé dans le limon argileux, alors que la courbe J2.1 est bien calée. En revanche dans les limons sableux, la dispersion est plus grande, et J2.1 s'avère proposer une valeur plus prudente que J2.2.

$$\text{si } I_R < 2.2 \quad E = 0.015 \left[ 10^{(0.55I_R + 1.68)} \right] (q_c - \sigma_v) \quad (1)$$

$$\text{si } I_R > 2.2 : \text{ et } QT < 14 \quad E = \frac{Q_T}{1.2} (q_c - \sigma_v) \quad ; \text{ si } QT > 14 : E = 11.7 (q_c - \sigma_v)$$

La valeur du module oedométrique  $E_{oed}$  proposée par Sanglerat et reprise dans l'annexe D4 de l'EN1997-2 (2007) à partir de  $q_c$ , est représentée figure 5 pour  $E_{oed} = 5q_c$  dans le limon argileux,  $E_{oed} = 6q_c$  dans les limons sableux de tête et  $E_{oed} = 2q_c$  dans le limon sableux plus compact en profondeur. Deux essais oedométriques ont été réalisés, un dans le limon argileux et un dans le limon sableux, ce qui est trop peu pour juger de la représentativité ; néanmoins on note une bonne correspondance dans le limon argileux, et un écart important dans le limon sableux. Les autres corrélations se sont avérées moins performantes, et ont été écartées.

## 6. Résistance au cisaillement et degré de consolidation

La cohésion non drainée  $C_u$  a été estimée selon les formules proposées par Cassan par rapport à la valeur de  $pl^*$  :

$$C_u = \frac{pl^*}{5.5} \quad , \text{ si } Pl^* < 0.4 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$C_u = \frac{pl^*}{12} + 0.03 \text{ (MPa)}, \text{ si } Pl^* < 2.5 \text{ MPa} \quad (3)$$

A partir du pénétromètre statique, nous avons considéré dans les limons argileux,  $C_u = q_c/18$ , et dans les limons sableux  $C_u = q_c/20$ .

Nous avons analysé pour les sols fins, l'équivalence entre la contrainte effective de préconsolidation  $\sigma_p'$  et la cohésion non drainée  $C_u$ , donnée par la relation de Leroueil (Leroueil, 1983):

$$C_u / \sigma_p' = 0,2 + 0,0024IP \quad (4)$$

Les moyennes de l'indice de plasticité IP mesurées sont de 27.6 pour l'argile limoneuse, et de 6.1 pour le limon sableux, ce qui donne un ratio  $C_u / \sigma_p'$  respectivement de 0.26 et 0.21. La valeur  $\sigma_p'$  est déduite de la formule (3), et le POP =  $\sigma_p' - \sigma_v'$  est alors déduit de la contrainte verticale effective  $\sigma_v'$ , au droit de chaque profil pénétrométrique et pressiométrique. Le tableau 3 donne les valeurs moyennes de POP obtenues au droit de chaque sondage, ainsi que la moyenne par type de sondage, et la moyenne tous sondages confondus.

Dans le limon argileux, les valeurs obtenues sont très proches. Pour obtenir une moyenne équivalente entre pénétromètre et pressiomètre dans les limons sableux, nous avons écarté les valeurs de POP obtenues au pénétromètre supérieures à 300 kPa, considérant que les pics de résistance au pénétromètre correspondent à des passages plus sableux, non concernés par la consolidation. Lorsqu'on considère le paramètre OCR =  $\sigma_p' / \sigma_v'$  en revanche, les corrélations à partir de cette méthode divergent sensiblement entre pénétromètre et pressiomètre. Les formules proposées par d'autres

auteurs de calcul de l'OCR à partir du pénétromètre ne se sont pas avérées probantes pour ce site.

Tableau 3. Degré de surconsolidation (POP en kPa)

POP (kPa)	PS2	PS3	PS4	SP3	SP4	SP5	SP6	Tous PS	Tous SP	Tous PS+SP
Limon argileux	85	114	130	125	90	95	113	110	106	108
Limons sableux	267	211	207	273	226	214	151	228	216	221

## 7. Conclusions et perspectives

Ces premières analyses ne prétendent pas à partir d'un seul site valider ou invalider une méthode de corrélation. Des études sont en cours sur d'autres sites pour affiner ces analyses.

Elles permettent néanmoins de pointer l'importance de caler les mesures in situ, généralement plus rapides, à partir d'une caractérisation de la nature et du comportement par l'identification complète des sols en laboratoire. L'intérêt des essais de pénétration étant avec une mesure continue, de caractériser la variabilité de nature et de comportement d'une formation donnée, ce qu'aucun autre outil d'investigation géotechnique n'est en mesure de proposer.

L'estimation du degré de consolidation des sols fins à partir de la méthode présentée offre l'intérêt de compenser le peu de mesures réalisées à l'oedomètre, à la fois longues et parfois délicates à interpréter du fait du remaniement des échantillons.

## 8. Références bibliographiques

- Aubriou P. (2013), Etude de corrélations entre les résultats des essais pressiométriques et des essais de pénétration statique, Polytech Lille.
- Cassan M. (1988), Les essais in situ en mécanique des sols 1 Réalisation et interprétation, Eyrolles, Paris, 1988.
- Leroueil S., Magnan J.P., Tavenas F. (1985), Remblais sur argiles molles, Tec Doc Lavoisier 1985.
- Mayne P.W. (2014) Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing
- NF EN ISO 22 476-1 (2013), Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 1 : essais de pénétration au cône électrique et au piézocône, AFNOR
- NF P94 261 (2013), Norme française d'application de l'Eurocode 7 pour les fondations superficielles, AFNOR
- NF EN 1997-2 (2007), Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais Reconnaissance des terrains et essais, Annexe D, AFNOR
- NF EN ISO 14 688-2 (2005), Reconnaissance et essais géotechniques- Dénomination, description et classification des sols - Partie 2 : principes pour une classification, NF P94-400-2, AFNOR
- NF P 94 110-1 (2000) Sols : reconnaissance et essais - Essai pressiométrique Ménard - Partie 1 : essai sans cycle, AFNOR
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2015), Guide to cone penetration testing, Gregg Drilling & Testing, Inc, 6th edition
- Robertson P. K. (2009) Interpretation of cone penetration test- a unified approach, Canadian Geotechnical Journal , NRC Research Press, p1337-1355