

COMPARAISON DU DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGES A PARTIR DU PRESSIOMETRE ET DU PENETROMETRE STATIQUE

COMPARISON OF GEOTECHNICAL DESIGN WITH PRESSUREMETER AND CONE PENETRATION TEST

Eric VERMOOTE¹, Fanny BRULPORT¹, Ouanogo Léonce OUERMI²

¹ *Geos, Archamps, France*

² *Ecole des Mines de Nancy, France*

RÉSUMÉ – Le calcul des fondations d'ouvrages peut être mené selon les méthodes pressiométrique et pénétrométrique. Les écarts de dimensionnement peuvent être expliqués par des différences de méthode de mesures, et/ou de calcul. L'article présente les corrélations entre les paramètres pressiométriques et pénétrométriques d'un projet situé dans l'Est de la France pour différents types de sol et commente les résultats des dimensionnements qui en découlent pour un sol particulier.

ABSTRACT – Foundation design can be carried out according to the pressuremeter and penetrometer methods. These two standards lead to design discrepancies probably due to differences in measurements and/or calculation methods. This paper presents correlations between the pressuremeter and penetrometer parameters based on a case study in eastern France for different kind of soil. Comparison and analysis of the results for a specific soil are presented.

1. Introduction

Le document français d'application de l'Eurocode 7 relatif aux fondations superficielles (NF P 94-261) permet le dimensionnement de ces ouvrages à partir de sondages pressiométriques ou pénétrométriques. Les retours d'expérience montrent généralement un écart des dimensionnements obtenus par ces deux méthodes.

Outre l'hétérogénéité du site, cette divergence peut s'expliquer par deux causes. En effet, les résistances de pointe d'une part, et les modules pressiométriques et les pressions limites d'autre part peuvent ne pas retranscrire les mêmes propriétés en termes de résistance du sol. Il peut également exister des divergences dans les méthodes pressiométrique et pénétrométrique de calcul de capacité portante et de tassements.

Pour répondre à cette problématique, l'objectif de la démarche est, pour un site donné, d'établir dans un premier temps des corrélations entre les paramètres pressiométriques et pénétrométriques et, dans un second temps, de calculer la capacité portante et le tassement successivement à partir des paramètres mesurés, puis corrélés.

2. Description du site

L'analyse est menée dans le cadre de quinze ouvrages d'art situés en région Grand Est. La géologie générale au droit de ces ouvrages comprend des matériaux loessiques et des lehms, avec, au niveau des cours d'eau, des dépôts alluvionnaires gravelo-sableux à passages tourbeux.

Les reconnaissances disponibles comprennent dix-neuf sondages pressiométriques, ainsi que vingt-cinq sondages au pénétromètre statique, descendus jusqu'à une profondeur maximale de 16 mètres par rapport au terrain naturel.

L'analyse géotechnique des ouvrages a conduit à isoler quatre natures de sol : les lehms (LH), les loëss (Oe), les sables (S) et les graves (G). Cette discrétisation permet de comparer des sols issus d'ensembles géologiques homogènes, donc de considérer que la variation spatiale est faible et l'analyse non biaisée.

La figure 1 présente les variations en fonction de la profondeur des modules pressiométriques, des pressions limites et de des résistances de pointe sur l'ensemble des ouvrages étudiés, en distinguant chaque nature de sol. Pour faciliter la comparaison, les résistances de pointe sont les moyennes arithmétiques des valeurs mesurées, sur une épaisseur égale à une hauteur de sonde pressiométrique.

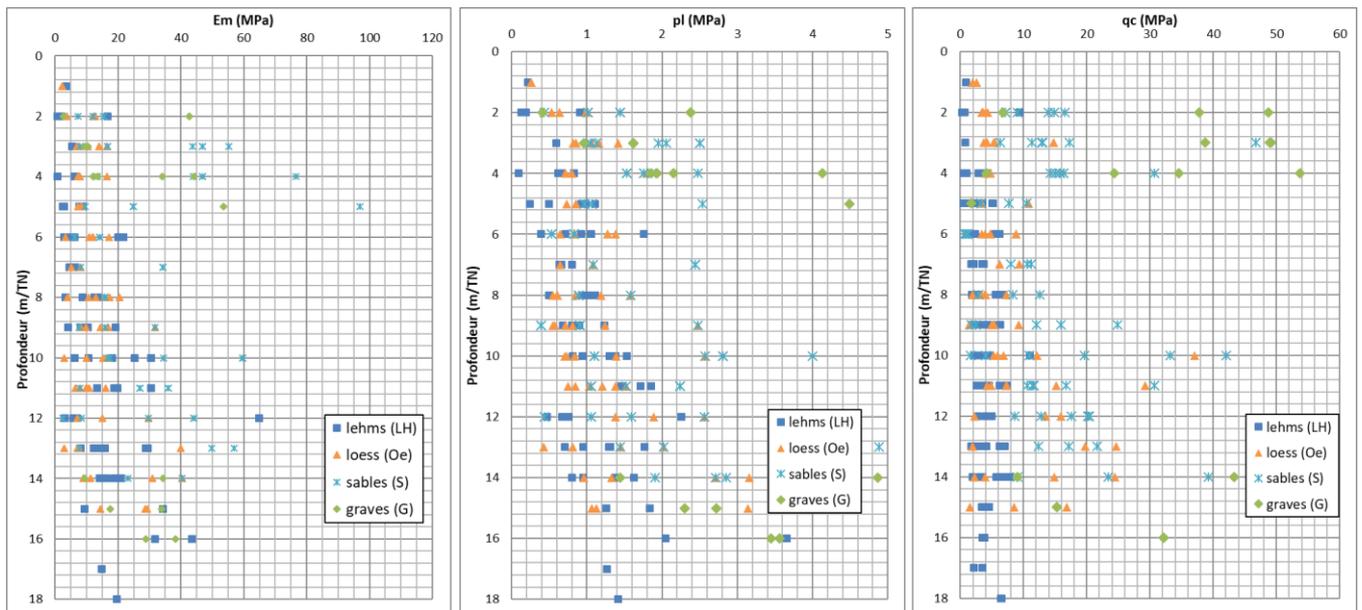


Figure 1. Evolution par nature de sol et en fonction de la profondeur, des modules pressiométriques, des pressions limites et des résistances de pointe

3. Identification des sols

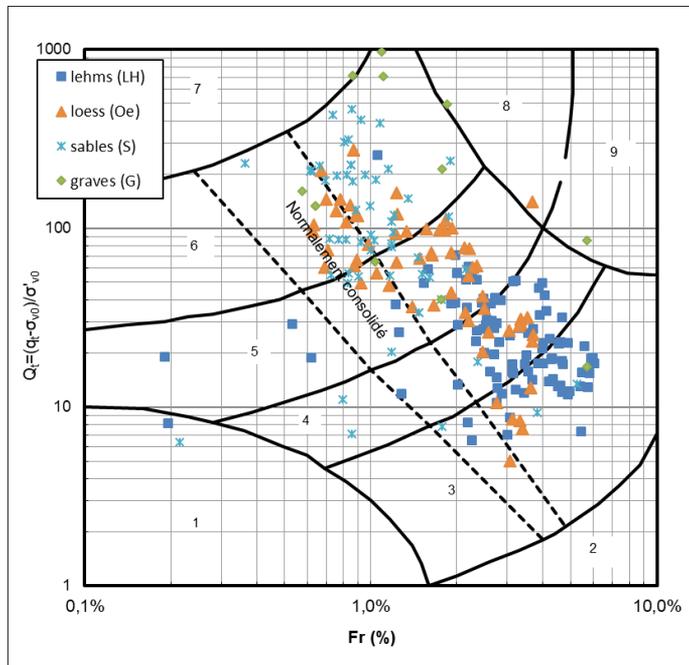
La nature des sols étudiés a été déterminée d'une part sur la base de l'abaque de Robertson (Robertson et Cabal, 2009) à partir des essais pénétrométriques et d'autre part sur la base des identifications en laboratoire réalisées sur les échantillons de sol (classification selon la norme NF P 94-400-2).

Les lehms sont classés essentiellement en classes S3/S4 selon l'abaque de Robertson typique des argiles silteuses communément reconnues dans la région. La classification selon la norme NF P 94-400-2 corrobore cette description avec une identification en argile limoneuse (zone « p » avec un pourcentage d'argile supérieur à 90%)

Les loëss sont plus sableux, ils sont classés en silts sableux selon Robertson et en limons à limons sableux sur le diagramme triangulaire.

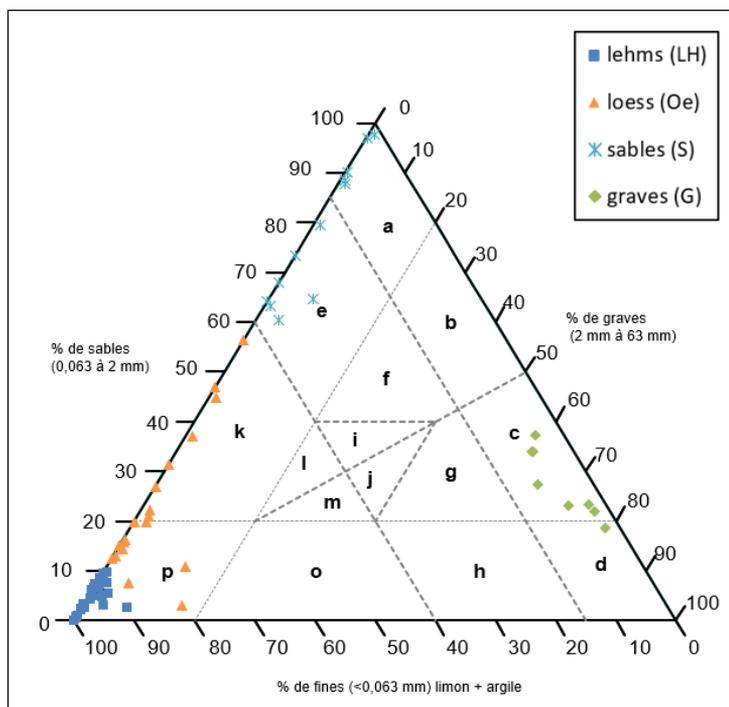
Les sables sont des sables propres à sables limoneux alluvionnaires classés en S6 au sens de Robertson et en zones « a » et « e » selon la norme des principes de classification.

Enfin, les graves ne ressortent pas en tant que tel sur le diagramme de Robertson parce que les sondages pénétrométriques traversent rarement ces horizons. Dans cette étude, elles correspondent à des graves sableuses (zone « c »).



- S1 Sols fins argiles ou silts sensibles
- S2 Sols organiques et tourbes
- S3 Argiles : argiles à argiles silteuses
- S4 Silts : silts argileux à argiles silteuses
- S5 Sables : Sables silteux à silts sableux
- S6 Sables : Sables propres à sables silteux
- S7 Sables à sable graveleux
- S8 Sols fins intermédiaires très raides
- S9 Sables cimentés ou dilatants

Figure 2. Classification des sols d'après l'abaque de Robertson



- a: Sable
- b: Sable graveleux
- c: Grave sableuse
- d: Grave
- e: Sable limoneux/Sable Argileux
- f: Sable limono-graveleux/Sable argilo-graveleux
- g: Grave limono-sableuse/Grave argilo-sableuse
- h: Grave limoneuse/Grave argileuse
- i: Limon sablo-graveleux/Argile sablo-graveleuse
- j: Limon graveleux-sableux/Argile graveleux-sableuse
- k: Limon sableux/Limon argileux-sableux/Argile limono-sableuse/Argile sableuse
- l: Limon sablo-graveleux/Argile sablo-graveleuse
- m: Limon graveleux-sableux/Argile graveleux-sableuse
- o: Limon graveleux/Limon argilo-graveleux/Argile limono-graveleuse/Argile graveleuse
- p: Limon/Limon argileux/Argile Limoneuse/Argile

Figure 3. Classification des sols d'après la NF P94-400-2.

4. Lois de régression pénétromètre / pressiomètre

Des corrélations entre des valeurs représentatives de résistance de pointe (q_c) d'une part ; et des valeurs représentatives de module pressiométrique (E_m) et de pression limite (p_l) d'autre part, sont établies.

Le tableau suivant présente une analyse statistique de chaque paramètre par type de sol et permet de définir les intervalles de distribution des données. Il montre une certaine homogénéité même s'il existe quelques valeurs isolées.

Tableau 1 : Intervalle de distribution des paramètres par type de sol

Type de sol	Paramètres	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Lehms (LH)	q_c (MPa)	-	0,33	20,2	4,34	3,06
	E_m (MPa)	98	0,7	85,2	18,6	18,1
	p_l (MPa)	98	0,1	3,66	1,22	0,72
Loess (Oe)	q_c (MPa)	-	1,39	37,05	7,45	6,95
	E_m (MPa)	68	2,2	40,3	12,8	8,25
	p_l (MPa)	68	0,26	3,16	1,12	0,63
Sables (S)	q_c (MPa)	-	0,73	46,79	13,98	10,01
	E_m (MPa)	59	2,5	114,4	28,8	22,6
	p_l (MPa)	59	0,39	4,88	1,63	0,9
Graves (G)	q_c (MPa)	-	1,7	53,77	29,19	17,48
	E_m (MPa)	17	2,7	53,6	25,8	15,8
	p_l (MPa)	17	0,41	4,87	2,49	1,24

La suite de l'analyse consiste à établir des corrélations entre les paramètres pour chaque type de sol étudié. Ces corrélations, représentées sur les graphiques des figures 4 et 5 et synthétisées dans le tableau 2, sont obtenues par régression linéaire :

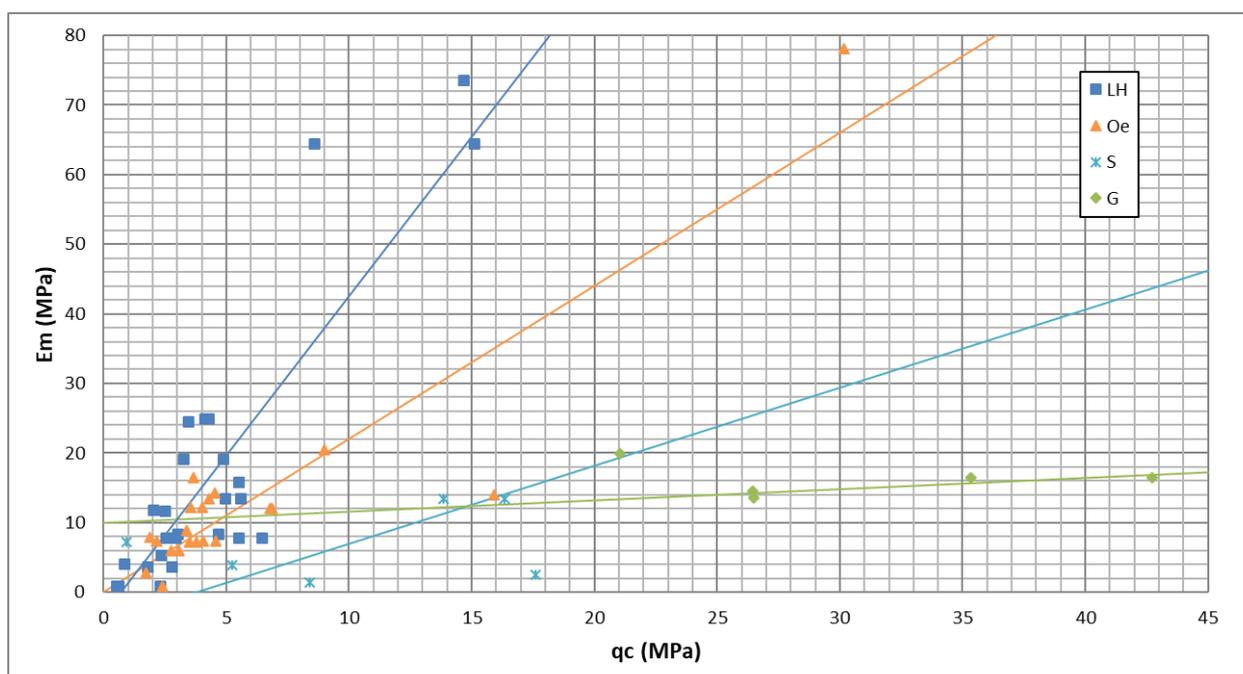


Figure 4. Corrélations entre paramètres pressiométriques Em et qc

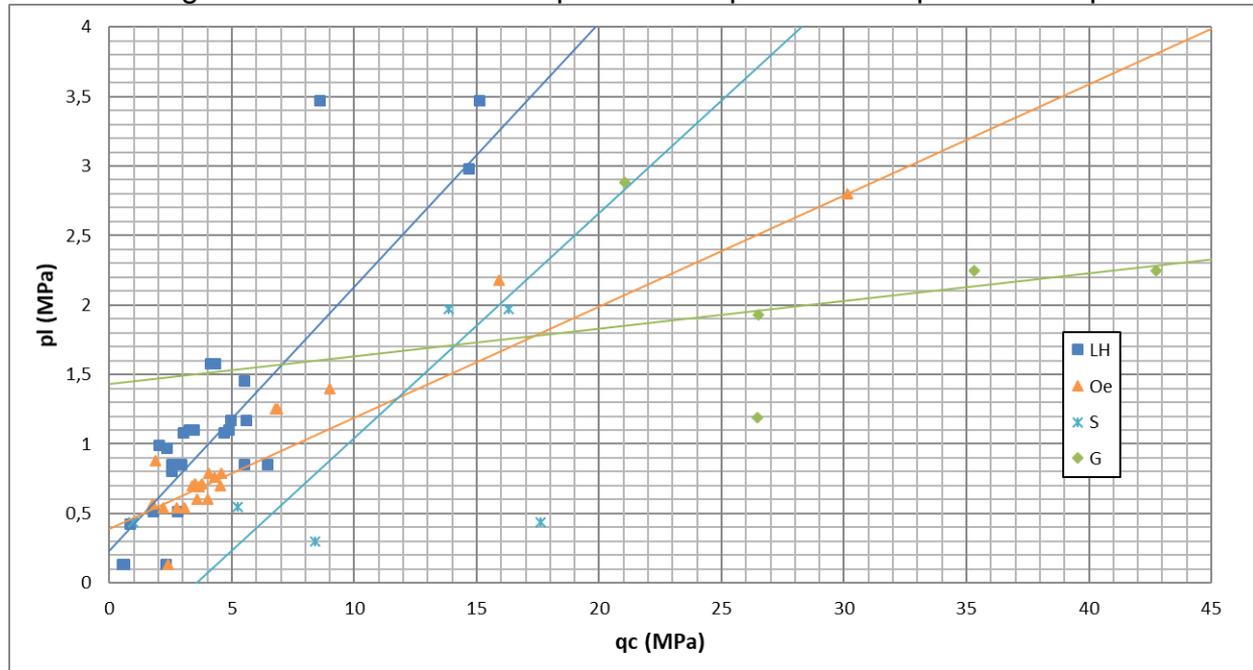


Figure 5. Corrélations entre paramètres pressiométriques pl et qc

Tableau 2. Tableau de synthèse des corrélations par type de sol

Type de sol	Em	pl
Lehms (LH)	$4,58*qc-3,27$ ($r=0,86$)	$0.19*qc+0.23$ ($r=0,84$)
Loess (Oe)	$2,2*qc+0,05$ ($r=0,83$)	$0.08*qc+0.39$ ($r=0,89$)
Sables (S)	$1,12*qc-4,21$ ($r=0,79$)	$0.162*qc-0.58$ ($r=0,83$)
Graves (G)	$0,161*qc+9,98$ ($r=0,79$)	$0.02*qc+1.43$ ($r=0,79$)

De façon générale, le coefficient de corrélation obtenu pour les différents types de sol est de l'ordre de 0,8. Les corrélations à partir de la pression limite pl apparaissent plus pertinentes que celles à partir du module pressiométrique. Cela peut s'expliquer par une incertitude plus grande sur l'interprétation du module Em sur les courbes « pression-volume » que sur la détermination de la pression limite.

L'analyse détaillée par type de sol montre que l'estimation croisée des paramètres est meilleure avec les sols fins qu'avec les sols granulaires : c'est sans doute l'effet de la difficulté de réalisation de l'essai pressiométrique dans des sols pulvérulents sous nappe.

Pour les sols fins, la bonne corrélation des paramètres indique que les méthodes de réalisation des essais pressiométriques et pénétrométriques sont maîtrisées et reflètent le comportement mécanique de sols similaires.

5. Application aux lehms

5.1. Détail des corrélations

Les corrélations explicitées au paragraphe précédent sont utilisées pour les calculs de capacités portantes et de tassements. Cette application est développée pour les lehms (LH) dans le présent document afin de ne comparer que les méthodes de calculs et de minimiser le biais introduit par les corrélations.

Les figures 6 à 8 présentent les corrélations entre les paramètres mesurés et les paramètres estimés par corrélation dans ces sols.

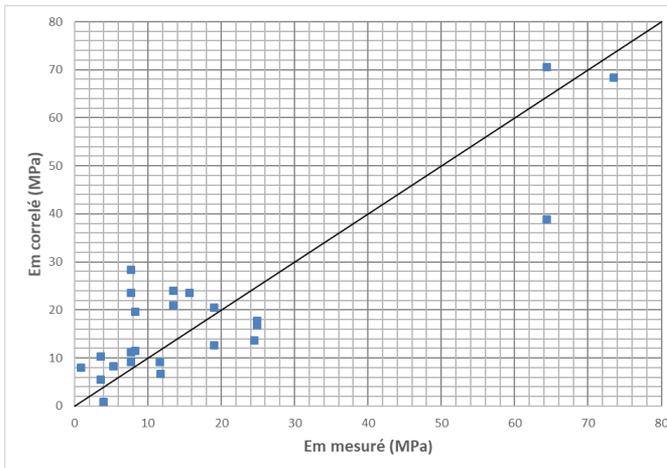


Figure 6. Corrélation entre E_m mesuré et E_m calculé par corrélation à partir de q_c

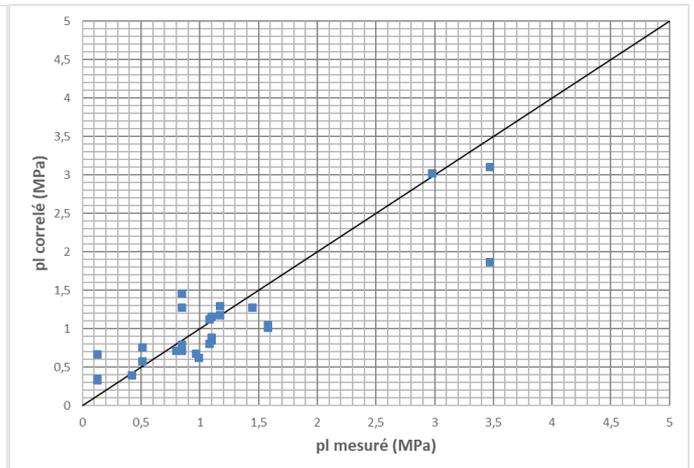


Figure 7. Corrélation entre p_l mesuré et p_l calculé par corrélation à partir de q_c

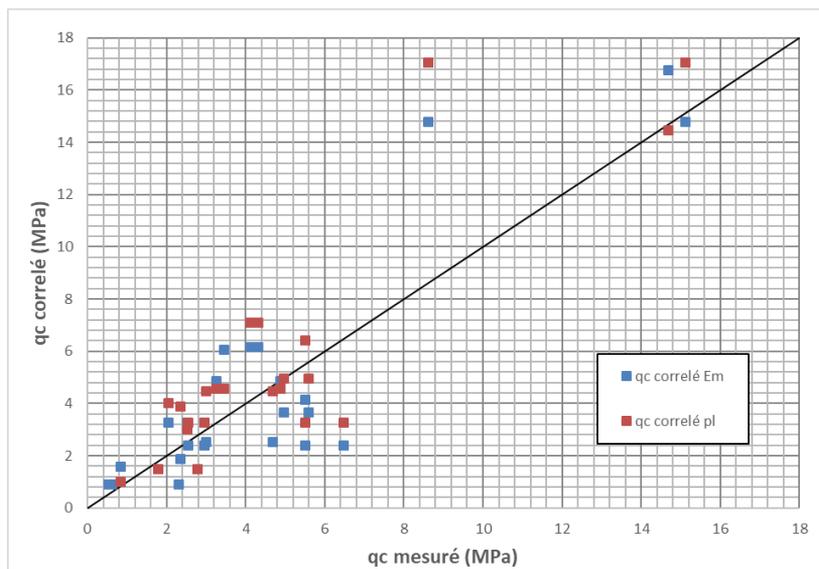


Figure 8. Corrélation entre q_c mesuré et q_c calculé par corrélation à partir de E_m et p_l

La dispersion des points est plus importante avec le module pressiométrique et la résistance de pointe qu'avec la pression limite. Cela confirme que l'approche avec le module pressiométrique est soumise à plus d'incertitude.

5.2. Application aux calculs de capacité portante et de tassements

Afin de déterminer le biais induit par les méthodes de calcul, les mesures présentées ci avant sont reprises pour les calculs de capacité portante et de tassements. Ces calculs sont menés pour une géométrie de fondation et un cas de charge fixés.

La capacité portante a été estimée par la détermination de la contrainte nette au sens de la norme NF P 94-261 avec la pression limite d'une part (annexe D – NF P 94-261) et la résistance de pointe d'autre part (annexe E – NF P 94-261).

Les tassements ont été calculés par la méthode pressiométrique avec la formule de Ménard (annexe H – NF P 94-261), par la méthode pénétrométrique en considérant le module de déformation de Schmertmann (annexe I – NF P 94-261) ou le module d'Young déduit des travaux de Robertson (annexe J – NF P 94-261), avec la méthode de calculs des tassements associés à ces modules, respectivement la méthode de Schmertmann et la méthode de déformation unidimensionnelle des sols.

Les figures 9 et 10 synthétisent les résultats des calculs de capacité portante et de tassements.

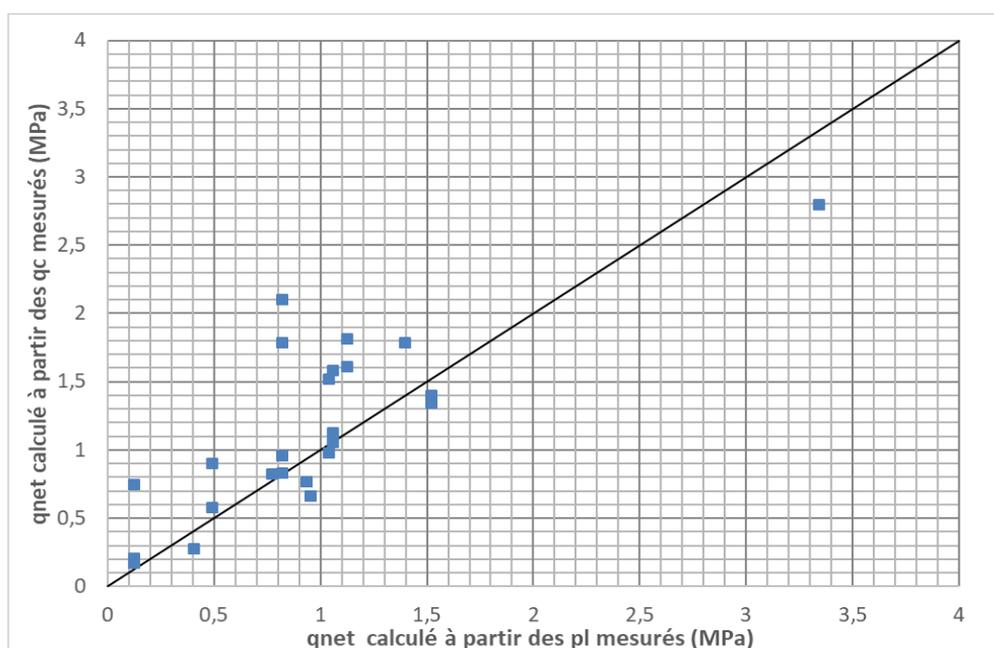


Figure 9. Calcul de la capacité portante.

Pour la capacité portante, la méthode pénétrométrique donne des valeurs plus élevées que la méthode pressiométrique. Etant donné que la pression limite se corrèle plutôt bien avec la résistance de pointe, cet écart s'explique par un biais dans la méthode de calcul, notamment par les facteurs de portance k_p et k_c .

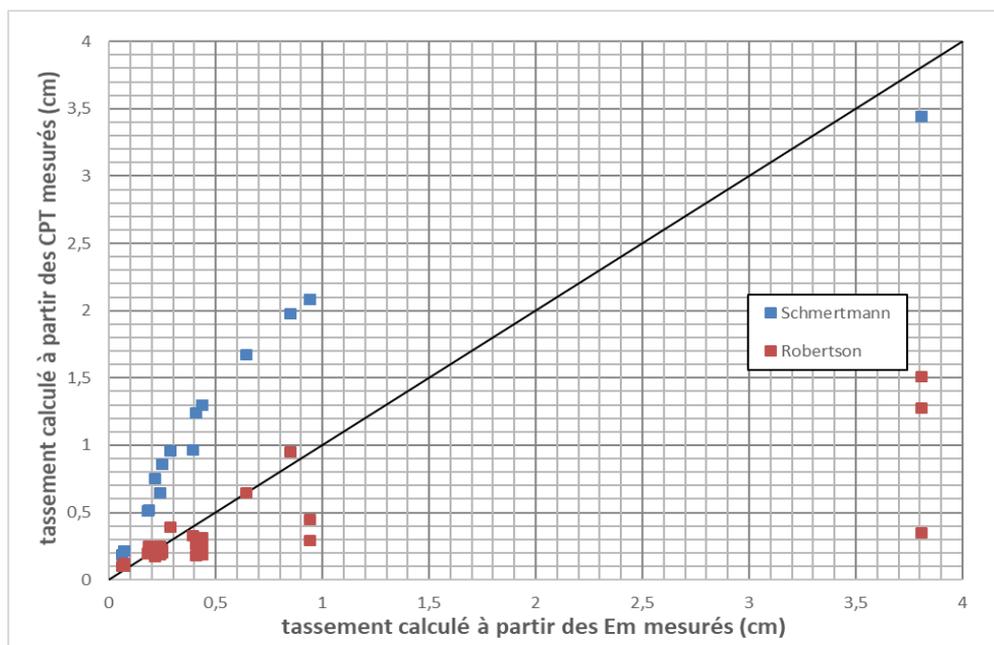


Figure 10. Calcul du tassement

Pour les tassements, dans le cas du CPT, la méthode de Schmertmann donne des valeurs beaucoup plus élevées que celles obtenues par la méthode de Robertson. La méthode de Schmertmann donne des résultats divergents par rapport à la méthode pressiométrique et à la méthode de Robertson. Ces dernières convergent relativement bien entre elles. Cela peut s'expliquer d'une part par le domaine d'application de la méthode de Schmertmann, adaptée aux sols grenus pulvérulents. D'autre part, cette méthode étant adaptée aux pointes mécaniques, ces divergences pourraient également s'expliquer par l'utilisation d'une pointe électrique, la pointe réellement utilisée n'étant pas connue.

6. Conclusions

Les résultats des comparaisons permettent de conclure sur les dispersions engendrées par l'utilisation des corrélations d'une part et par la différence de méthodes de calcul d'autre part.

Dans notre zone d'étude, les corrélations semblent plus adaptées aux sols fins, ce qui est probablement dû à la difficulté de réalisation de l'essai pressiométrique dans les sols granulaires, sous nappe.

En termes de méthodes, la portance est meilleure lorsqu'elle est calculée à partir de données pénétrométriques. Pour les tassements, la méthode de Schmertmann donne des valeurs plus élevées que la méthode pressiométrique et celle de Robertson, ces dernières convergent relativement bien entre elles.

7. Références bibliographiques

- AFNOR (2013). Justification des ouvrages géotechniques – Norme d'application nationale de l'Eurocode – Fondations superficielles – NF P 94-261.
- AFNOR (2013). Reconnaissance et essais géotechniques. Dénomination, description et classification des sols. Partie 2 : Principes pour une classification.– NF P 94-400-2.
- Robertson P.K., Cabal K.L. (2009), Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering, 2nd Edition.