

# DES ESSAIS HAUTE PRESSION DANS LES SABLES DU THANETIEN A LONDRES

## HIGH PRESSURE MENARD PRESSUREMETER TESTS (MPT) IN LONDON THANET SANDS

Catherine JACQUARD<sup>1\*</sup>, Jean-Yves de LAMBALLERIE<sup>2</sup>, Michel RISPAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fondasol, Avignon, France

<sup>2</sup> Fondasol, Toulouse, France

**RÉSUMÉ** - Une campagne d'investigation géotechnique dans la région de Londres a comporté des essais pressiométriques haute pression dans l'horizon des sables du Thanétien. Ces essais ont été menés avec un matériel spécifique permettant d'atteindre une pression d'essai de 12 MPa. Les résultats de ces essais sont analysés, comparés avec d'autres données disponibles pour cet horizon, puis utilisés pour un calcul de pieux selon l'approche de calcul de la norme française d'application de l'Eurocode 7.

**ABSTRACT** – A geotechnical investigation in the London area has included High Pressure Menard Pressuremeter Tests (MPT) in the Thanet sands. These tests were conducted with a specific equipment to achieve test pressure up to 12 MPa. The results of the tests are presented and discussed, compared with other geotechnical data available for these sands, and then used for a pile design in accordance with the Eurocode 7.

### 1. Contexte général du projet et méthode de forage

La campagne de reconnaissance géotechnique s'est déroulée à Stratford, à une dizaine de kilomètres au Nord Est du centre de la ville de Londres, dans le secteur de Forest Ln. Ce secteur de Londres fait l'objet d'une intense restructuration, dans le prolongement de la rénovation urbaine qui a été menée à proximité pour les jeux Olympiques de 2012.

Entre autres essais, la campagne de reconnaissance a comporté deux sondages destructifs profonds avec réalisation d'essais pressiométriques Haute Pression.

Les forages ont été faits avec une machine hydraulique en rotation, avec des outils de forage de type tricône à dents de 66 mm de diamètre.

Le fluide de forage utilisé est une boue bentonitique dosée à 50 kg/m<sup>3</sup>.

La séquence de forage et d'essai mise en œuvre était la suivante:

- Tubage HQ jusqu'à 1 m au-dessus de la cote d'essai,
- Forage au tricône de 66 mm à un mètre de profondeur sous le sabot du tubage pour former la cavité d'essai,
- Descente de la sonde pressiométrique HP dans la cavité, réalisation de l'essai, extraction de la sonde,
- Avancée du tubage HQ jusqu'à la base de la cavité d'essai, etc.

### 2. Présentation du matériel et mode opératoire des essais pressiométriques

Le matériel utilisé est constitué :

- d'un contrôleur pression-volume de fabrication FONDASOL spécialement conçu pour permettre d'appliquer une pression d'au moins 12 MPa à la sonde de mesure,
- d'une sonde de mesure type G à cellules emboîtées munie d'une gaine de protection permettant un fonctionnement en haute pression.

L'ensemble pressiométrique est conforme à la norme NF P-94-110-1.

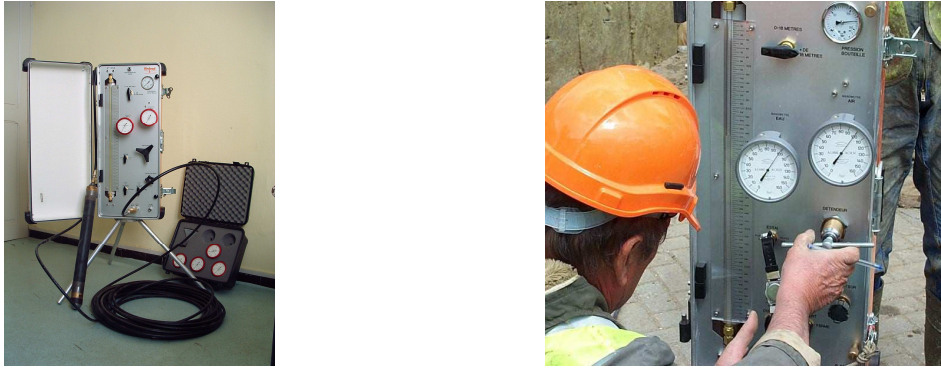


Figure 1. Matériel utilisé pour le chantier

La figure 2 présente un essai mené avec cette sonde sur un autre chantier londonien en 2012 à 64.5m, qui a permis de mesurer une pression limite à 12.1 MPa, un fluage à partir de 6.5 MPa, et un module pressiométrique de 220 MPa.

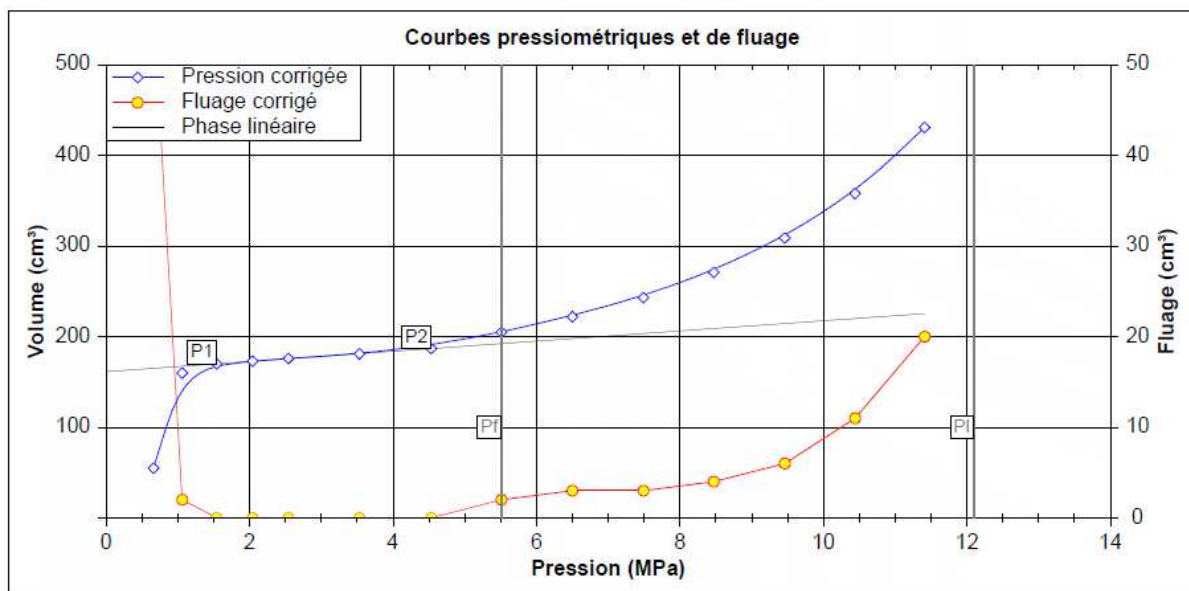


Figure 2. Essai pressiométrique à 64.5m de profondeur.

### 3. Résultats des essais

Les deux sondages réalisés ont permis de reconnaître sous environ 12 m de remblais, une couche de 3m de dépôts alluvionnaires argileux puis graveleux ; on rencontre ensuite la formation de Lambeth caractérisée par des argiles sur 5m d'épaisseur, puis par des sables et graviers sur une épaisseur de 3 à 4m. La formation des sables du Thanétien est rencontrée à partir de 23 à 24m de profondeur. Les deux sondages sont arrêtés à 40m de profondeur, sans avoir rencontré la craie sous-jacente.

Les essais pressiométriques ont été réalisés entre 23 et 34m de profondeur. Les logs pressiométriques correspondants sont représentés sur la figure 3.

Il ressort de ces mesures que seuls quelques essais ont pu être menés jusqu'à 12 MPa ; la plupart ont été arrêtés avant, l'essai ayant dépassé le fluage.

Les logs pressiométriques montrent de façon claire, des caractéristiques mécaniques se répartissant en deux familles: la famille 1 correspond à la frange supérieure des sables, sur une épaisseur de l'ordre de 7m en SP01 et de 5m en SP02, qui présentent des valeurs systématiquement plus élevées de pression limite nette  $PI^*$  (moyenne à 11,3 MPa) que la

famille 2 (moyenne à 7,25 MPa) qui correspond aux 5 essais réalisés en partie basse de chaque sondage à partir de 29/28m.

On constate en revanche que le module pressiométrique reste assez homogène et sensiblement équivalent pour les deux familles, autour de 135 MPa de moyenne harmonique. Il s'ensuit logiquement que le rapport  $EM/PI^* = 12$  est moyen dans les sables très denses de la famille 1, et  $EM/PI^* = 19$  élevé dans la famille 2 de la partie inférieure.

Le tableau 1 donne un récapitulatif des valeurs arithmétiques moyennes calculées sur les deux sondages pour les pressions limites nettes et pressions de fluage nettes, et des moyennes harmoniques calculées pour les modules pressiométriques.

Tableau 1. Moyennes des valeurs par famille

	EM (MPa)	Pf* (MPa)	PI* (MPa)	EM/PI*	PI*/Pf*
Moyenne globale	133.5	5.04	9.27	15.6	1.84
famille 1 (10 essais)	131.6	5.90	11.29	12.1	1.94
famille 2 (10 essais)	135.5	4.18	7.25	19.1	1.75
Ecart-type global	23.9	1.25	2.43	3.9	0.21
famille 1	29.9	1.15	1.74	1.4	0.22
famille 2	15.8	0.58	0.82	2.0	0.15

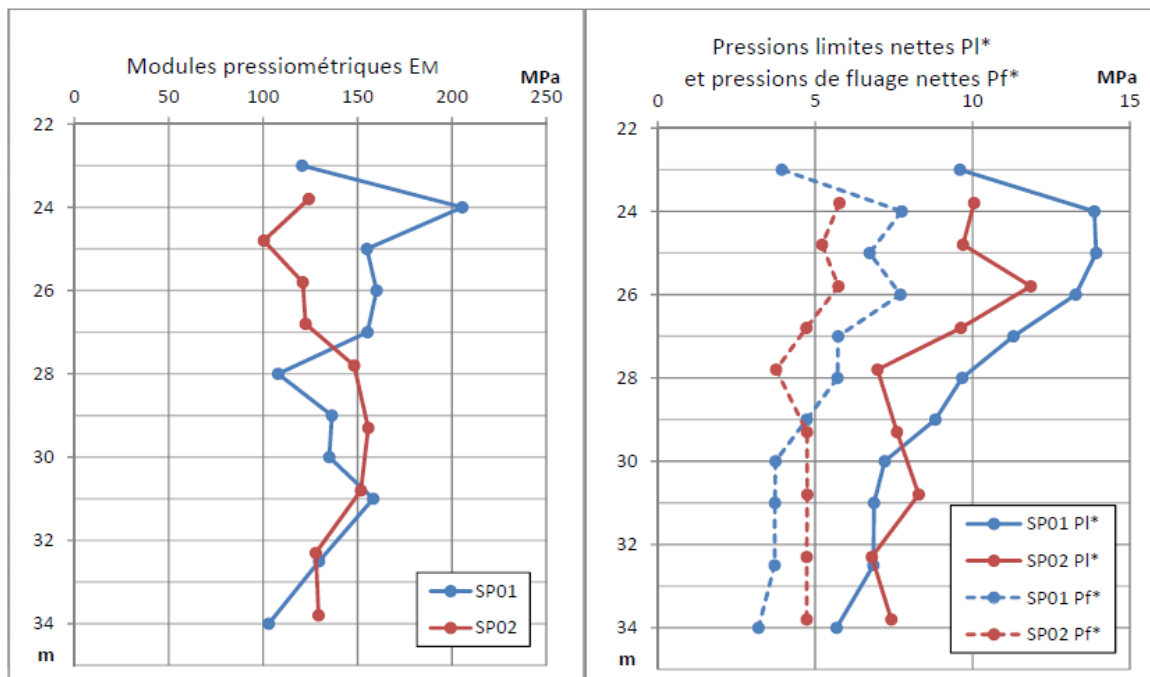


Figure 3. logs pressiométriques du projet

## 4. Analyse comparative

### 4.1. Données bibliographiques

Le travail de recherche effectué par K. Ventouras (Ventouras, 2005) sur les sables du Thanétien, a permis d'analyser et de comprendre les problèmes de capacité portante rencontrés lors d'essais de chargement de pieux dans ces formations. En effet, une moins bonne portance a été observée, pour des pieux ancrés en partie inférieure de ces sables alors qu'on s'attendait à une amélioration de la capacité portante avec la profondeur. L'analyse sur

la base d'essais SPT visibles sur la figure 4.2 de ce travail reproduite ici en figure 4, montre que l'on ne constate pas d'augmentation de valeur de N avec la profondeur, ce qui est généralement le cas dans les sables.

Par ailleurs, l'identification de ces sols en laboratoire, lui a permis (voir figure 4) de montrer qu'on a une teneur en fines très faible en partie supérieure de ces sables (5 à 10%), alors que la partie inférieure en présente une proportion significativement plus importante (15 à 30%) : cette différence de faciès granulométrique des terrains, explique ainsi les différences de caractéristiques mécaniques, et de comportement.

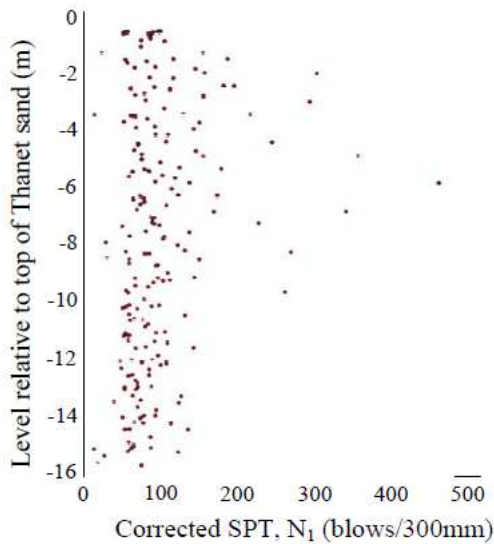


Figure 4-2 Corrected SPT "N" values (after Nicholson et al., 2002)

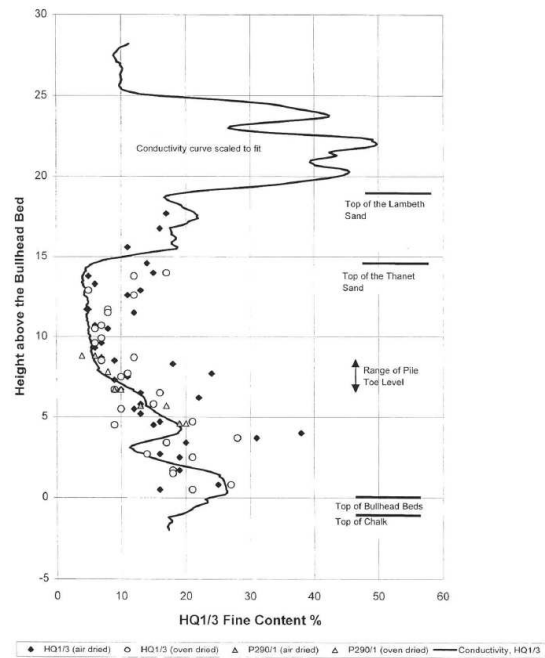


Figure 4-11 Comparison of fines content with conductivity at Heron Quays (after ARUP Geotechnics)

Figure 4. Valeurs corrigées de N SPT et teneurs en fines tirées de Ventouras.

#### 4.2. Comparaison avec d'autres campagnes Fondasol dans les sables du Thanétien

Nous avons repris les valeurs de pressions limites mesurées dans la formation des sables du Thanétien, sur huit autres études réalisées par Fondasol entre 2006 et 2014. Les logs pressiométriques correspondants sont donnés en figure 5.

Il en ressort que les sables du Thanétien présentent des caractéristiques mécaniques sensiblement meilleures (voir tableau N°2), lorsque cette formation se rencontre entre 40 et 70m de profondeur, que lorsque celle-ci se rencontre entre 15 et 40m de profondeur.

Par ailleurs, le constat de caractéristiques mécaniques diminuant avec la profondeur est patent sur la plupart des sondages lorsque cette formation est présente entre 15 et 40m, ce qui en revanche semble ne plus être aussi évident entre 40 et 70m dans la mesure où la plupart des valeurs restent élevées (seulement 4 valeurs inférieures à 7 MPa sur 83 essais).

Tableau 2. Pressions limites nettes (MPa) mesurées lors des différentes campagnes Fondasol.

profondeur	15 à 40m	45 à 70m
nombre d'essais	169	83
moyenne	6.96	12.08
écart-type	2.41	4.14

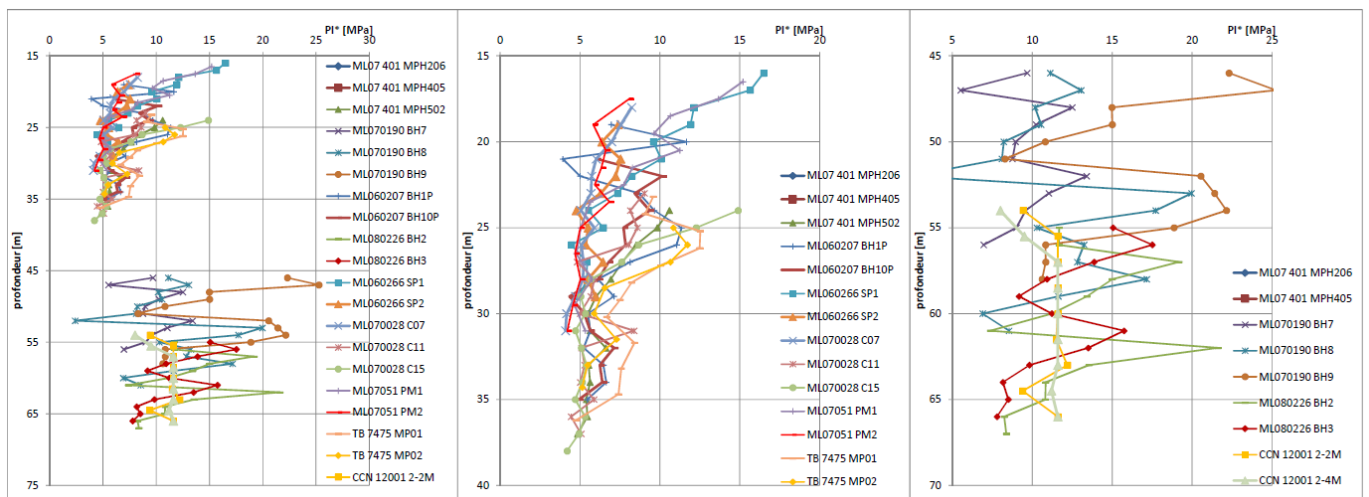


Figure 5. Profils pressiométriques issus de différentes campagnes de Fondasol.

## 5. Capacité portante des pieux à partir des essais pressiométriques

Un calcul de pieux de diamètre 0,80m a été établi sur la base de la norme française d'application de l'Eurocode 7 relative aux fondations profondes (NFP 94 262), pour des pieux forés boue ancrés dans les sables du Thanétien, à partir des deux sondages présentés au paragraphe 3. Le tableau 3 présente les capacités portantes ainsi calculées sous quatre états limites habituels, pour des pieux ancrés respectivement à 25m dans la partie supérieure (famille 1), et à 28m dans la partie inférieure (famille 2), calculée au droit de chaque sondage. Il présente également le calcul de portance pour le cas où les essais pressiométriques auraient été arrêtés à 5 MPa.

Le frottement limite retenu pour ce type de pieux est de  $q_s = 90$  kPa dans les sables, que ce soit les sables supérieurs ou les sables inférieurs. On notera que si l'on considérait la partie inférieure comme des sables intermédiaires, avec un frottement équivalent à celui de limons, le frottement serait faiblement réduit à  $q_s = 83$  kPa.

La différence de capacité portante réside donc essentiellement dans la mobilisation de l'effort de pointe, directement proportionnelle à la pression limite nette  $PI^*$ . Ainsi par exemple pour SP01, à 25m on mobilise  $PI_e^* = 13.8$  MPa, avec un facteur de portance  $k_p = 1.04$ , alors qu'à 28m,  $PI_e^* = 9.9$  MPa et  $k_p = 1.1$ . On a donc une résistance de pointe à la rupture de 7 208 KN à 25m contre 5455 KN à 28m, soit plus de 30% d'écart.

Ainsi, pour des pieux travaillant en compression, la portance diminue lorsqu'on approfondit les pieux, jusqu'à atteindre un seuil à partir duquel la mobilisation du frottement latéral compense la diminution de l'effort de pointe mobilisable, comme indiqué sur la figure 6, à partir de 28m de profondeur.

Pour les sollicitations en traction en revanche, le changement de nature de sol (davantage de fraction fine en partie basse) et les caractéristiques pressiométriques plus faibles ont peu d'impact sur le frottement mobilisable, car on calcule avec la valeur maximale autorisée par la norme dans les sables denses.

Enfin, avec une pression limite nette bornée à 5 MPa, la résistance de pointe serait limitée à respectivement 5,2 et 5,5 MPa pour 25 et 28m de profondeur. La capacité portante résultante à l'ELU serait donc réduite de près de 60% pour des pieux de 25m, et de 27% pour des pieux de 28m ! On voit bien ici tout l'intérêt de préconiser des essais haute pression pour optimiser le dimensionnement des fondations.

On notera toutefois que la capacité portante du pieu reste limitée à la charge intrinsèque du béton. Ainsi, pour un béton à  $f_{c28} = 30$  MPa, la charge intrinsèque est de 7 360 KN à l'ELU fondamental, et 3 310 KN à l'ELS caractéristique : la portance est donc limitée par les capacités du béton à l'ELS, dans cet exemple.

Tableau 3. Portance calculée selon NFP 94 262

		Tous sondages	SP01	SP02	PI*= 5 MPa
		Traction	compression	compression	compression
Pieu 25m	ELU sismique	280 kN	6 055 kN	4 828 kN	2 444 kN
	ELU fondamental	255 kN	5 505 kN	4 389 kN	2 222 kN
	ELS caractéristique	187 kN	3 444 kN	2 762 kN	1 437 kN
	ELS quasi-permanent	137 kN	2 817 kN	2 260 kN	1 176 kN
Pieu 28m	ELU sismique	639 kN	4 733 kN	3 840 kN	2 800 kN
	ELU fondamental	699 kN	5 206 kN	4 224 kN	3 080 kN
	ELS caractéristique	467 kN	3 091 kN	2 545 kN	1 910 kN
	ELS quasi-permanent	343 kN	2 529 kN	2 082 kN	1 562 kN

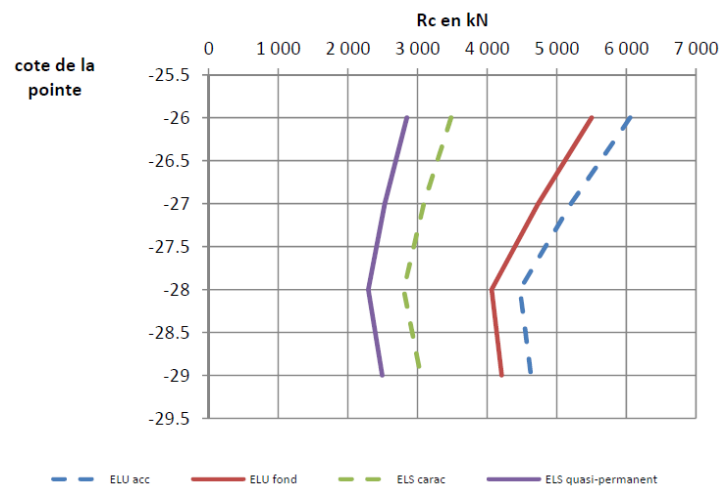


Figure 6. Capacité portance d'un pieu foré boue diamètre 0,8m selon la profondeur au droit de SP01.

## 6. Conclusions

La réalisation d'essais pressiométriques haute pression pour ce projet, a donc permis de distinguer clairement deux familles de résistance sensiblement différentes dans les sables du Thanétien entre 23 et 34m de profondeur, ce qui n'aurait pas été possible avec des essais réalisés avec du matériel permettant d'atteindre une pression de 5 MPa.

Le dimensionnement de pieux en utilisant la norme française NFP 94-262 d'application de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes rend compte de cette diminution à travers la résistance de pointe calculée à partir des essais haute pression.

## 7. Références

- Catherine Jacquard, et Al (2013) - Une nouvelle sonde permettant de mesurer sans extrapoler la pression limite pressiométrique des sols - *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013*
- Roger Massonnet (2005) - Le pressiomètre sous haute pression- *PRESSIO 2005, Tome 1 p81-90*
- Konstantinos Ventouras (2005) - Engineering behavior of Thanet sands- *Thesis of Imperial College of Science.*
- Norme NF P 94-110-1 - Sols : reconnaissance et essais. Essai pressiométrique Ménard. Partie 1 : Essai sans cycle- *AFNOR Janvier 2000*
- Norme NF P 94- 262 - Justification des ouvrages géotechniques. Normes d'application nationale de l'Eurocode 7. Fondations profondes- *AFNOR Juillet 2012*