

# CARACTERISATION DES PARAMETRES DE DEFORMABILITE DES ARGILES VERTES DE LA REGION PARISIENNE

## CHARACTERISATION OF THE PARIS AREA GREEN CLAYS DEFORMABILITY PARAMETERS

Benoit VUILLAUME<sup>1</sup>, Catherine JACQUARD<sup>1</sup>

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

**RÉSUMÉ** – L'objectif de l'article est de décrire la formation des Argiles Vertes de la région parisienne, au travers des résultats d'investigations géotechniques, et notamment de quantifier le rapport de consolidation de cette formation. Il présente ensuite une analyse relative aux paramètres de déformabilité de ces argiles, dans le domaine surconsolidé, en comparant les modules de déformation unidimensionnel évalués selon plusieurs méthodes.

**ABSTRACT** – This article aims to depict the green clay formation in Paris area and specially to quantify its over-consolidation ratio based on soil investigation results. This paper also presents an analysis of deformability parameters in the over-consolidated domain, by comparing the unidimensional deformation modulus obtained from several methods.

### 1. Introduction

La réalisation par Fondasol de campagnes de reconnaissance pour le compte de la Société du Grand Paris, dans les formations géologiques de la région parisienne, nous a donné l'occasion d'utiliser pour quelques formations géologiques relativement homogènes, les corrélations présentées par différents auteurs, et de les confronter entre elles et aux paramètres réellement mesurés.

Nous avons ainsi utilisé les résultats des investigations réalisées sur le tracé de la future ligne 18 du Métro de Paris, sur les communes de Palaiseau, Massy et Anthony, au Sud de Paris, pendant les campagnes 2012 et 2014 du lot 7 dont Fondasol avait la charge.

Dans le présent article, nous traitons uniquement les données récoltées par Fondasol sur la formation des Argiles Vertes, sur une période restreinte et sur une zone géographique délimitée. L'objectif n'est pas de proposer des valeurs caractéristiques pour tel ou tel type d'ouvrage, mais de caractériser sur cet échantillonnage, la pertinence des corrélations présentées dans l'article.

### 2. Renseignements géologiques

Sur la fiche 5 des travaux de Filliat (1981) correspondant aux « Glaises Vertes », cette formation géologique est décrite comme des Argiles vertes, Argiles vertes de Romainville (Marnes à Cyrènes, Glaises à Cyrènes) appartenant à la formation géologique de l'Oligocène/Stampien/Sannoisien. Son épaisseur est en moyenne de 8 à 10 m ; sa structure est massive, sans stratification apparente, hormis vers la base avec apparition de fins lits silteux (Marnes à Cyrènes). Sa nature est essentiellement argileuse pour les Argiles Vertes (origine laguno-marine, azoïque), avec apparition d'un faciès carbonaté (30 à 40%) dans la partie inférieure (Marnes à Cyrènes). Sa couleur verte caractéristique en tête explique l'origine de la nomination, oxydation fréquente à la base (jaune à rouille). Il s'agit d'argiles très plastiques, gonflantes, très sensibles à l'eau et aux agents atmosphériques.

### 3. Caractéristiques des Argiles Vertes mesurées en laboratoire et in-situ

#### 3.1. Consistance des investigations

Les investigations sont composées de 7 sondages carottés ayant permis le prélèvement d'échantillons pour identifications et essais mécaniques en laboratoire (dont 7 essais de compressibilité à l'œdomètre), 11 sondages destructifs avec réalisation de 3 à 6 essais pressiométriques dans les Argiles Vertes (38 essais exploités au total), et 7 essais de pénétration statique à la pointe piézocône.

Ces investigations ont été réalisées sur le tracé de la future ligne 18 du Métro de Paris, sur les communes de Palaiseau, Massy et Anthony, au Sud de Paris, pendant les campagnes 2012 et 2014 du lot 7 dont Fondasol avait la charge.

#### 3.2. Lithologie

Sur l'ensemble de ces investigations, le toit des Argiles Vertes a été reconnu entre 4,4 et 13,9 m de profondeur et sa base entre 11,9 et 19,5 m. La formation est surmontée de bas en haut par les Calcaires de Brie, les Marnes à huitres, les limons des plateaux et/ou des remblais, et son épaisseur est comprise entre 3,7 et 12,3 m au droit des sondages.

#### 3.3. Résultats des essais en laboratoire

Les résultats des essais en laboratoire sont synthétisés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1. Synthèse des résultats des essais en laboratoire

|              | prof. | w <sub>n</sub> | γ <sub>d</sub>    | γ <sub>s</sub>    | w <sub>L</sub> | w <sub>P</sub> | Ip | n     | CaCO <sub>3</sub> | Cc   | Cs   | e <sub>0</sub> | σ <sub>g</sub> |
|--------------|-------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----|-------|-------------------|------|------|----------------|----------------|
|              | m     | %              | kN/m <sup>3</sup> | kN/m <sup>3</sup> | %              | %              | %  |       | %                 |      |      |                | MPa            |
| Nb. d'essais | 17    | 17             | 17                | 12                | 16             | 16             | 16 | 15    | 6                 | 7    | 7    | 7              | 6              |
| Minimum      | 7,9   | 20,9           | 12,8              | 25,8              | 55             | 29             | 18 | 0,33  | 7,8               | 0,13 | 0,05 | 0,56           | 0,210          |
| Maximum      | 17,5  | 39,4           | 17,0              | 26,8              | 91             | 43             | 52 | 0,48  | 39,0              | 0,33 | 0,17 | 1,16           | 0,380          |
| Moyenne      |       | 29,4           | 15,0              | 26,2              | 67             | 35             | 33 | 0,412 | 17,0              | 0,21 | 0,11 | 0,72           | 0,300          |
| Ecart-type   |       | 4,8            | 1,1               | 0,3               | 11             | 5              | 9  | 0,042 | 11,6              | 0,08 | 0,05 | 0,21           | 0,060          |

Les valeurs moyennes de la limite de liquidité w<sub>L</sub> et de l'indice de plasticité Ip sont assez proches de celles issues de travaux de différents auteurs traitant de la formation des Argiles Vertes. Ainsi, les valeurs moyennes rapportées par G. Filliat (1981) relatives à des échantillons prélevés dans le secteur d'Arcueil sont de 69 % pour w<sub>L</sub> et de 37 % pour Ip. Celles présentées par Azizi et Josseume (1991) pour des échantillons prélevés à Villejuif sont de 64 % pour w<sub>L</sub> et de 33 % pour Ip (on note toutefois une dispersion moins importante que pour les mesures que nous avons effectuées). Enfin, les valeurs rapportées par Audiguier et al. (2007) (lieu de prélèvement inconnu) sont de 75 % pour w<sub>L</sub> et de 30 à 35 % pour Ip.

On note que les essais réalisés confirment le caractère gonflant des Argiles Vertes, avec des pressions de gonflement comprises entre 210 et 380 kPa (valeur moyenne de 300 kPa).

#### 3.4. Résultats des essais pressiométriques

38 essais pressiométriques ont été exploités. A noter que les essais avec des paramètres très élevés (p<sub>l</sub>\* > 7 MPa et/ou E<sub>M</sub> > 100 MPa) correspondant à des passages indurés ont été écartés, ainsi que les essais présentant un rapport E<sub>M</sub>/p<sub>l</sub>\* inférieur à 6 ou supérieur à 30.

Sur les histogrammes de répartition des fréquences (fig. 1) et dans le tableau 2, on constate une population de 12 essais avec des modules pressiométriques entre 5 et 12 MPa (moyenne 9,8 MPa) pour lesquels le rapport E<sub>M</sub>/p<sub>l</sub>\* est faible (moyenne 10,2), et

la pression limite nette  $pl^*$  est moyenne (moyenne 1,02 MPa) correspondant à des argiles fermes ; et une population de 26 essais correspondant à des argiles raides pour lesquelles les valeurs moyennes sont de 23,9 MPa pour  $E_M$ , 1,38 MPa pour  $pl^*$ , et 18,4 pour  $E_M/pl^*$ .

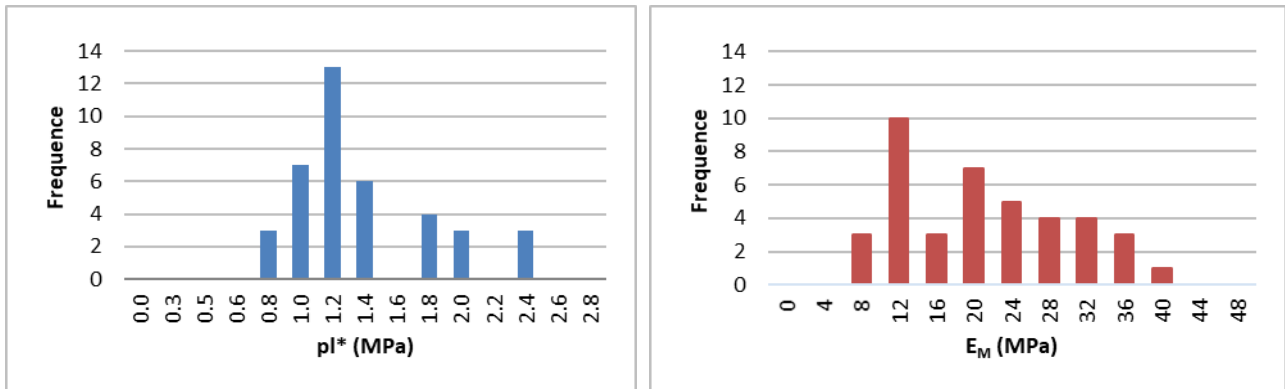


Figure 1. Histogrammes de répartition des fréquences pour les paramètres  $pl^*$  et  $E_M$

Tableau 2. Synthèse des résultats des essais pressiométriques

|                   | Ensemble (38 valeurs) |              |            | Argiles fermes (12 valeurs) |              |            | Argiles raides (26 valeurs) |              |            |
|-------------------|-----------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|
|                   | $E_M$ (MPa)           | $pl^*$ (MPa) | $E_M/pl^*$ | $E_M$ (MPa)                 | $pl^*$ (MPa) | $E_M/pl^*$ | $E_M$ (MPa)                 | $pl^*$ (MPa) | $E_M/pl^*$ |
| <b>Minimum</b>    | 5,7                   | 0,49         | 7,1        | 5,7                         | 0,49         | 7,1        | 14,2                        | 0,73         | 9,1        |
| <b>Maximum</b>    | 38,3                  | 2,36         | 28,1       | 11,7                        | 1,37         | 23,3       | 38,3                        | 2,36         | 28,1       |
| <b>Moyenne</b>    | 19,4                  | 1,27         | 15,8       | 9,8                         | 1,02         | 10,2       | 23,9                        | 1,38         | 18,4       |
| <b>Ecart-type</b> | 8,7                   | 0,45         | 6,4        | 1,9                         | 0,25         | 4,2        | 6,7                         | 0,48         | 5,5        |

### 3.5. Résultats des essais de pénétration statique à la pointe piézocône

Les résultats synthétiques relatifs aux mesures de la résistance au cône corrigée  $q_t$  au droit des 7 essais CPT sont présentés dans le tableau 3.

Ces valeurs sont comparables aux résistances de pointe mesurées au pénétromètre stato-dynamique Andina indiquées par Filliat (1981) :  $3 < R_p < 8$  MPa.

Tableau 3. Synthèse des résultats des mesures de résistance au cône corrigée  $q_t$  (MPa)

| Essai          | CP2599 | CP2600 | CP2242 | CP2353 | CP2357 | CP2360 | CP2361 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Minimum</b> | 1,8    | 1,9    | 2,3    | 2,1    | 2,1    | 1,7    | 2,2    |
| <b>Maximum</b> | 5,2    | 5,1    | 5,1    | 5,6    | 4,0    | 5,7    | 5,7    |
| <b>Moyenne</b> | 3,4    | 3,6    | 3,6    | 4,2    | 3,3    | 3,5    | 3,6    |

## 4. Analyse relative au rapport de consolidation (OCR)

### 4.1. Démarche

Le rapport de consolidation (OCR, Over Consolidation Ratio) est défini comme le rapport entre la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  et la contrainte verticale effective  $\sigma'_{v0}$ .

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (1)$$

Cinq approches permettant l'évaluation de ce rapport sont étudiées ci-après. La première est la simple restitution des résultats des essais de compressibilité à l'œdomètre et les quatre autres consistent en l'évaluation de corrélations à partir des essais de pénétration statique, proposées par différents auteurs. Dans le cadre de l'évaluation des corrélations, les paramètres suivants sont utilisés.

$Q_T$  : la résistance de pointe normalisée

$$Q_T = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (2)$$

où  $q_t$  est la résistance au cône corrigée et  $\sigma_{v0}$  la contrainte totale verticale

$F_R$  : le frottement de frottement normalisé

$$F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100 \quad (3)$$

où  $f_s$  est le frottement latéral mesuré sur le manchon

$I_R$  : Indice de comportement du sol

$$I_R = [(3,47 - \log Q_T)^2 + (\log F_R + 1,22)^2]^{0,5} \quad (4)$$

a) À partir des essais de compressibilité à l'œdomètre :

On détermine la valeur de l'OCR à partir de la mesure de la contrainte de préconsolidation mesurée lors de l'essai œdométrique, selon la relation (1).

b) A partir des essais CPT, selon Kulhawy et Mayne (1990) :

Selon Kulhawy et Mayne (1990), le rapport de consolidation dans les sols fins peut être évalué à l'aide de la relation (5) :

$$OCR = k \cdot Q_T \quad (5)$$

Avec  $k$  un coefficient dont la valeur moyenne peut être prise égale à 0,33 (avec une plage de variation entre 0,2 et 0,5)

c) A partir des essais de pénétration statique, selon Karlsrud et al. (2005) :

Karlsrud et al. (2005) ont défini la relation (6) à partir d'essais réalisés en Norvège :

$$OCR = 0,25 \cdot Q_T^{1,2} \quad (6)$$

d) A partir des essais CPT, selon Robertson (2012) :

Robertson (2012) propose la relation (7) :

$$OCR = (2,625 + 1,75 \log F_R)^{1,25} \cdot Q_T^{1,25} \quad (7)$$

e) A partir des essais CPT, selon Mayne (2014) :

Mayne (2014) a développé une approche permettant d'évaluer la contrainte de préconsolidation à partir de la résistance nette au cône. Selon cette approche, le rapport de consolidation peut être défini par la relation (8) :

$$OCR = \frac{0,33(q_t - \sigma_{v0})^{m'}}{\sigma_{v0}} \cdot (Pa/100)^{1-m'} \quad (8)$$

Avec  $Pa$  la pression atmosphérique prise égale à 100 kPa et  $m'$  un coefficient qui dépend de la nature des sols et qui varie, sur la base des données disponibles, entre 0,72 pour des sables siliceux ou quartzueux propres à 1,1 pour des argiles fissurées (Mayne, 2014). L'auteur propose la relation (9) pour déterminer  $m'$ .

$$m' = 1 - \frac{0,28}{1 + (I_R/2,65)^{25}} \quad (9)$$

## 4.2. Résultats

Les résultats des calculs du rapport de consolidation OCR selon les différentes approches et au droit de chaque sondage sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4. Valeurs de l'OCR calculées selon les différentes approches

| Sondage            | Méthode (a)<br>Essais<br>œdométriques | Sondage | Méthode (b)<br>Essais CPT -<br>Kulhawy et<br>Mayne | Méthode (c)<br>Essais CPT-<br>Karlsrud et al | Méthode (d)<br>Essais CPT-<br>Robertson | Méthode (e)<br>Essais CPT-<br>Mayne |
|--------------------|---------------------------------------|---------|--|--|---|-------------------------------------|
| SC637              | 4,1                                   | CP2599  | 7,5  | 10,6   | 8,7                                     | 6,0                                 |
| SC644              | 6,2                                   | CP2600  | 5,0  | 6,5  | 5,0                                     | 4,8                                 |
| SC651              | 14,7                                  | CP2242  | 6,7  | 9,2  | 7,6                                     | 5,7                                 |
| SC2231             | 1,4                                   | CP2353  | 3,4  | 4,2  | 3,3                                     | 3,4                                 |
| SC2243             | 4,8                                   | CP2357  | 3,4  | 4,2  | 3,3                                     | 3,4                                 |
| SC2245             | 9,1                                   | CP2360  | 4,9  | 6,3  | 4,9                                     | 4,6                                 |
| SC2598             | 2,6                                   | CP2361  | 5,0  | 6,6  | 5,4                                     | 4,6                                 |
| <b>Moyenne OCR</b> | <b>6,1</b>                            |         | <b>5,1</b>   | <b>6,8</b>                                   | <b>5,5</b>                              | <b>4,6</b>                          |

On constate que les valeurs mesurées de  $\sigma'_p$  à partir des sept essais à l'œdomètre (méthode (a)) sont dispersées et ne sont pas nécessairement corrélées à la profondeur des échantillons. Toutefois, elles mettent en évidence le caractère nettement surconsolidé des Argiles Vertes (valeur moyenne de OCR de 6,1 et de 5,4 en écartant les deux valeurs extrêmes, jugées irréalistes).

Les corrélations à partir des essais de pénétration statique (méthodes (b) à (e)) confirment le caractère surconsolidé des argiles, avec des valeurs moyennes de OCR comprises entre 4,6 et 6,8.

Cette surconsolidation peut s'expliquer par l'histoire géologique : Azizi et Josseume (1991) indiquent que les Argiles Vertes ayant été recouvertes par 80 à 90 m de sol en milieu aquifère, la plus grande contrainte verticale effective subie par la formation au cours de son histoire, est d'au moins 800 kPa.

## 5. Analyse relative au module de déformation unidimensionnel (M)

### 5.1. Démarche

Cinq approches permettant l'évaluation du module de déformation unidimensionnel (de type œdométrique) noté « M » sont étudiées ci-après.

a) A partir des essais de compressibilité à l'œdomètre :

Le module œdométrique est calculé dans le domaine surconsolidé, à partir de la relation (10) :

$$M = \frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta H}{H}} = \frac{\Delta\sigma}{\frac{C_s}{1+e_0} \cdot \log\left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma'_{v0}}\right)} \quad (10)$$

Avec  $C_s$  l'indice de gonflement,  $e_0$  l'indice des vides initial et  $\Delta\sigma$  la valeur de l'incrément de contrainte. Dans notre étude, nous allons examiner la valeur de M pour trois valeurs de  $\Delta\sigma$  :  $\Delta\sigma_1 = 100$  kPa représentant une fraction de la plage de contrainte correspondant au domaine surconsolidé,  $\Delta\sigma_2 = \text{POP}_{\text{géol}} = (\sigma'_p - \sigma'_{v0})_{\text{géol}}$  correspondant à la marge de consolidation évaluée selon l'histoire géologique (de l'ordre de 600 kPa) et  $\Delta\sigma_3 = \text{POP}_{\text{labo}} = (\sigma'_p - \sigma'_{v0})_{\text{labo}}$  correspondant à la marge de consolidation mesurée à l'aide des essais œdométriques.

b) A partir des essais pressiométriques, selon l'annexe J de la norme NF P94-261 :

Le module M est évalué selon l'indication du tableau J.2.1 – Note b, de la norme NF P94-261 :

$$M = \frac{E_M}{\alpha} \quad (11)$$

Avec  $E_M$  le module pressiométrique et  $\alpha$  le coefficient rhéologique du sol, variable selon la nature du sol, pris égal à 2/3 pour les argiles fermes ( $E_M/\rho l^*_{moyen} = 10,2$ ) et 1 pour les argiles raides ( $E_M/\rho l^*_{moyen} = 18,4$ ).

c) A partir des essais CPT, selon Kulhawy et Mayne (1990) :

Selon Mayne (1990), le module M peut être évalué à l'aide de la relation (12) :

$$M = 8,25 \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (12)$$

d) A partir des essais CPT, selon Robertson (2012) :

Robertson (2012) propose la relation suivante pour estimer le module M :

$$M = \alpha_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (13)$$

Avec pour des argiles ( $I_R > 2,2$ ) :

$$\begin{aligned} \alpha_M &= Q_T && \text{pour } Q_T \leq 14 \\ \alpha_M &= 14 && \text{pour } Q_T > 14 \end{aligned} \quad (14)$$

Robertson (2009) précise que le nombre de sites test avec des terrains fins où  $Q_T > 14$  (ce qui est majoritairement le cas des Argiles Vertes testées) sont peu nombreux (Cowden, UK ; Madingley, UK ; Piedmont, USA). Les résultats de ces trois sites mettent en évidence une valeur de  $\alpha_M$  comprises entre 4,5 et 6,5, à comparer à la valeur de 14 suggérée.

Dans notre étude, nous évaluerons la corrélation (13) d'une part en calculant la valeur de  $\alpha_M$  selon à la relation (14) et d'autre part en considérant une valeur de  $\alpha_M = 5,5$ , intermédiaire entre 4,5 et 6,5.

e) A partir des essais CPT, selon l'annexe J de la norme NF P94-261 :

On calcule d'abord la valeur du module d'Young selon la relation J.2.2.1 proposée dans la norme NF P94-261 (valeur proposée pour le calcul des tassements des fondations superficielles) :

$$E = \alpha_E \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (15)$$

Avec, pour des argiles ( $I_R > 2,2$ ) :

$$\begin{aligned} \alpha_E &= Q_T/1,2 && \text{pour } Q_T \leq 14 \\ \alpha_E &= 11,7 && \text{pour } Q_T > 14 \end{aligned} \quad (16)$$

On détermine ensuite la valeur du module pressiométrique  $E_M$  correspondant, à partir de la valeur du rapport  $E/E_M$  du tableau J.2.1 de la norme NF P 94-261. Pour les Argiles Vertes testées, on a considéré un rapport  $E/E_M = 3$  correspondant aux argiles surconsolidées.

Puis, on déduit la valeur du module M, à l'aide de la relation (11), en considérant un coefficient rhéologique  $\alpha = 1$  (argiles surconsolidées).

$$M = \frac{E_M}{\alpha} = \frac{E/3}{\alpha} = \frac{\alpha_E (q_t - \sigma_{v0})/3}{\alpha} \quad (17)$$

f) A partir des essais de pénétration statique, selon Cetin et al. (2014) :

A partir d'une base de données composée de 45 essais au pénétromètre statique et de 59 mesures de tassements compilés sur deux sites en Turquie, Cetin et al. (2014) ont développé la corrélation suivante :

$$M = \alpha_M \cdot q_c \quad (18)$$

Avec  $\alpha_M$  un coefficient qui peut être évalué, selon les auteurs, comme suit :

$$\alpha_M = 0,3 \ln(FC^{-9,32}) + 0,15 \ln(Ip^{-2,89}) + 3,15 \quad (19)$$

Où FC est le pourcentage de fines (passant à 80  $\mu\text{m}$ ) et Ip l'indice de plasticité. Dans notre étude, nous considérons pour ces paramètres, les valeurs moyennes mesurées en laboratoire, soit FC = 98 % et Ip = 33 %. On obtient alors  $\alpha_M = 3,7$ .

## 5.2. Résultats

Les résultats des calculs du module de déformation unidimensionnel (de type œdométrique) selon les différentes approches et au droit de chaque sondage sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Valeurs de M (MPa) calculées selon les différentes approches

| Sondage             | Méthode (a)                             |  |  | Sondage | Méthode (b) | Sondage | Méthode (c) | Méthode (d)                        |                       | Méthode (e) | Méthode (f) |
|---------------------|---|--|--|---------|-------------|---------|-------------|------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                     | Avec $\Delta\sigma_1 = 100 \text{ kPa}$ | Avec $\Delta\sigma_2 = \text{POP}_{\text{géol}}$ | Avec $\Delta\sigma_3 = \text{POP}_{\text{labo}}$ |         |             |         |             | Avec $\alpha_M$ calculé selon (14) | Avec $\alpha_M = 5,5$ |             |             |
| SC637               | 6,6                                     | 10,7   | 12,2   | SP2215  | 20,4        | CP2599  | 27,0        | 45,5                               | 18,0                  | 12,7        | 12,7        |
| SC644               | 22,5                                    | 36,9   | 53,9   | SP2240  | 12,3        | CP2600  | 27,1        | 45,2                               | 18,7                  | 12,6        | 12,7        |
| SC651               | 8,8                                     | 13,4   | 39,2   | SP2244  | 23,9        | CP2242  | 27,0        | 44,7                               | 18,5                  | 12,4        | 12,9        |
| SC2231              | 6,2                                     | 12,7   | 5,6  | SP2668  | 15,2        | CP2353  | 32,4        | 54,4                               | 21,6                  | 15,1        | 15,2        |
| SC2243              | 11,4                                    | 18,0   | 23,6   | SP639   | 17,8        | CP2357  | 24,2        | 29,5                               | 16,1                  | 8,2         | 11,9        |
| SC2245              | 23,0                                    | 32,9   | 73,5   | SP640   | 20,9        | CP2360  | 25,2        | 38,8                               | 16,8                  | 10,9        | 12,0        |
| SC2598              | 8,5                                     | 17,8   | 10,8   | SP645   | 16,9        | CP2361  | 26,5        | 43,6                               | 17,7                  | 12,1        | 12,7        |
|                     |   |  |  | SP646   | 20,6        |         |             |                                    |                       |             |             |
|                     |   |  |  | SP649   | 19,2        |         |             |                                    |                       |             |             |
|                     |   |  |  | SP653   | 26,9        |         |             |                                    |                       |             |             |
|                     |   |  |  | SP654   | 18,3        |         |             |                                    |                       |             |             |
| <b>Moy. M (MPa)</b> | <b>12,4</b>                             | <b>20,3</b>                                      | <b>31,3</b>                                      |         | <b>19,3</b> |         | <b>27,0</b> | <b>43,1</b>                        | <b>18,2</b>           | <b>12,0</b> | <b>12,9</b> |

Dans les cas des Argiles Vertes testées, les résultats de l'évaluation du module de déformation unidimensionnel permettent de classer les méthodes utilisées en trois groupes, selon les valeurs moyennes obtenues pour M :

- Les méthodes (a) avec  $\Delta\sigma = 100 \text{ kPa}$ , (e) et (f) conduisent aux valeurs de M les plus faibles, respectivement de 12,4 ; 12,0 et 12,9 MPa.
- Les méthodes (a) avec  $\Delta\sigma = \text{POP}_{\text{géol}}$ , (b) et (d) (avec  $\alpha_M = 5,5$ ) conduisent à valeurs de M intermédiaires, respectivement de 20,3 ; 19,3 et 18,2 MPa.
- Les méthodes (a) avec  $\Delta\sigma = \text{POP}_{\text{labo}}$ , (c) et (d) (avec  $\alpha_M$  calculé selon la relation (14)) fournissent les valeurs de M les plus fortes, respectivement de 31,3 ; 27,6 et 43,1 MPa.

Concernant les corrélations à partir des essais CPT, nous en déduisons que la méthode (d) devrait plutôt être utilisée avec une valeur de  $\alpha_M$  comprise entre 4,5 et 6,5, y compris pour des plages de valeurs de  $Q_T$  supérieures à 14.

Pour ce qui est des modules calculés à partir des résultats des essais œdométriques, on peut indiquer que l'amplitude de la plage de contrainte considérée conditionne fortement la valeur de M et que la prise en compte de l'histoire géologique plutôt que de la marge de surconsolidation mesurée en laboratoire, s'avère donner ici une estimation moyenne plus réaliste, si l'on s'intéresse au module sécant sur la totalité de la plage de contrainte du domaine surconsolidé. Si l'on prend en compte une valeur de l'incrément de contrainte plus faible (par exemple 100 kPa) représentant une partie de la plage de contrainte du domaine surconsolidé, les valeurs de M calculées se rapprochent de celles déduites des méthodes (e) et (f).

## 6. Conclusion

Les investigations in-situ et en laboratoire réalisées par Fondasol dans le cadre du projet du Grand Paris Express ont permis de caractériser la formation des Argiles vertes, et ont confirmé les propriétés déjà rapportées par différents auteurs pour cette formation (argiles plastiques, surconsolidées, gonflantes et dont les propriétés sont relativement constantes sur la hauteur de la couche,...).

Les essais réalisés ont également permis de quantifier le rapport de consolidation de cette formation, soit directement (à partir des essais œdométriques), soit indirectement (à partir de corrélations utilisant les résultats des essais CPT). Les valeurs moyennes d'OCR calculées comprises entre 4,6 et 6,8 confirment le caractère nettement surconsolidé de la formation et sont en accord avec l'histoire géologique.

Par ailleurs, la valeur du module de déformation dépend du niveau de contrainte, que seule l'approche œdométrique permet d'appréhender. Les corrélations permettant d'évaluer le module de déformation à partir des essais in situ (essais pressiométriques et essais de pénétration statique) ne permettent pas de prendre directement en compte cette variabilité. Celles-ci fournissent néanmoins des évaluations dans la fourchette [1 à 1,5 fois la valeur minimale], selon la plage de contrainte considérée, dans le domaine surconsolidé.

## 7. Remerciements

Nous remercions la Société du Grand Paris de nous avoir permis d'utiliser les données collectées lors des campagnes de reconnaissance que Fondasol a réalisées, et de les publier dans cet article.

## 8. Références bibliographiques

- AFNOR NF P94-261 (2013), Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.
- AFNOR NF P94-261/A1 (2017), Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles - Amendement 1.
- Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. (2007). Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux – Revue Française de Géotechnique n° 120-121, pp 67-81.
- Azizi H. et Josseaume F. (1991). Détermination expérimentale de la courbe d'état limite d'une argile raide très plastique, l'argile verte du Sannoisien – Revue Française de Géotechnique n° 54, pp 13-25.
- Cetin K.O., Ciloglu F. et Erol A.O. (2014). CPT-based compressibility assessment of soils - 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA.
- Filliat G. (1981) Sols et fondations - Editions du Moniteur 1981, pp 1230-1233.
- Karlsrud K., Lunne T., Kort D.A. et Strandvik S. (2005) - CPTU correlations for Clays. Proc. 16<sup>th</sup> ICSMGE, Osaka, September 2005.
- Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H., (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design, Report EL-6800, Electric Power Research Institute, EPRI, August 1990.
- Mayne, P.W. (2014). KN2: Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46, pp 1337-1355.
- Robertson, P.K. (2012). The James K. Mitchell Lecture: Interpretation of in-situ tests - some insights. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, Vol. 1 (Proc. ISC-4, Pernambuco), Taylor & Francis Group, London – pp 3 - 24.