

VARIATION DES MODULES EN FONCTION DU NIVEAU DE DEFORMATION D'APRES DES ESSAIS IN-SITU ET DES ESSAIS DE LABORATOIRE. APPLICATION AU METRO TOULOUSAIN

SHEAR AND YOUNG MODULI VARIATION WITH STRAIN LEVEL FROM IN-SITU TESTS AND LABORATORY. APPLICATION TO THE TOULOUSE METRO

Vincent SAVATIER⁽¹⁾, Rémi DELUZARCHE⁽²⁾, Jean François SERRATRICE⁽³⁾

⁽¹⁾ EGIS géotechnique agence de Balma, Vincent.SAVATIER@egis.fr

⁽²⁾ EGIS géotechnique agence de Balma, Remi.DELUZARCHE@egis.fr

⁽³⁾ CEREMA Méditerranée, jean-francois.serratrice@cerema.fr

RÉSUMÉ – Les modules de cisaillement des sols sont fonction du niveau de déformation. Il est proposé une méthode de détermination de ces modules et de leur variation avec la déformation basée sur une approche associant des essais de laboratoire et des mesures in-situ. Cette méthode est appliquée au cas du chantier d'extension de la station Jean Jaurès du métro toulousain.

ABSTRACT – Shear and Young's moduli change with strain level. A determination method of moduli and their change with strain based on in situ and laboratory tests is proposed. This method is applied to the case of the extension of Jean Jaures station in the Toulouse Metro.

1. Introduction

Il est de l'expérience courante des ingénieurs géotechnicien, qui dimensionnent des ouvrages aussi variés que les dallages et les tunnels, de constater que les modules de compression et de cisaillement d'un sol varient fortement en fonction du niveau de déformation. Le symposium Param 2002 a donné l'occasion à plusieurs auteurs de proposer des schémas de ces variations à l'intention des praticiens, mettant en correspondance les types d'essais in situ et de laboratoire, d'où sont tirés les modules, avec les différentes gammes de déformations rencontrées dans la pratique. La figure 1 rappelle le schéma de synthèse transcrit par Reiffsteck (2002).

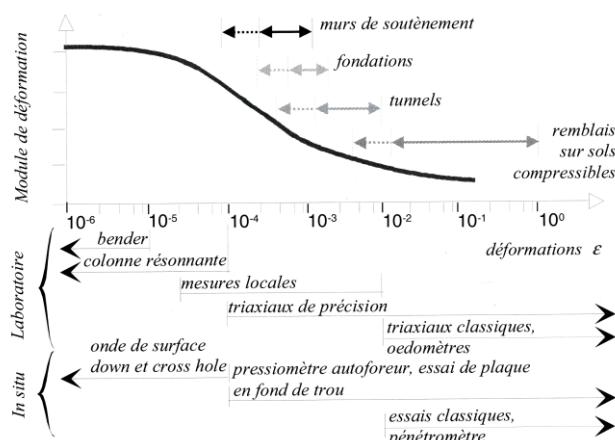


Figure 1: Domaines d'utilisation des matériaux d'essais pour le déterminations des modules de déformation. Transcrit par Reiffsteck (2002)

Ce graphe peut être décrit par la loi de Hardin et Drnevich (1972) :

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0.7}} \right)} \quad (1)$$

donnant le module de cisaillement G en fonction de la déformation ε , où G_0 est le module élastique en très petite déformation, a est une constante et $\varepsilon_{0.7}$ une déformation de référence (notée aussi $\gamma_{0.7}$). Le module d'Young E est relié à G par la relation $E = 2(1 + \nu)G$, ν étant le coefficient de Poisson. Le rapport $G/G_0 = 0,722$ se situe au niveau de déformation $\varepsilon = \varepsilon_{0.7}$ si $a = 0,385$.

Dans l'hypothèse d'un coefficient de Poisson constant et si deux mesures E_1 et E_2 du module d'Young sont disponibles, associées au niveaux de déformation ε_1 et ε_2 , le rapport $d = a / \varepsilon_{0.7}$ peut être évalué d'après la formule (1) par la relation :

$$d = \frac{a}{\varepsilon_{0.7}} = \frac{\left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right) * \frac{1}{\varepsilon_1}}{\left(\frac{E_1}{E_2} * \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) - 1} \quad (2)$$

Le schéma de la figure 1 et la relation (2) trouve une application dans le projet d'extension de la station Jean Jaurès à proximité du tunnel de la ligne A du métro toulousain.

2. Problème posé

Les travaux d'extension de la station Jean Jaurès consistent en une excavation des sols au voisinage du tunnel qui avait été réalisé au tunnelier dans les années 80. Les caractéristiques géométriques principales du projet sont données figure 2. Les existants sont représentés en noir et les parois de la nouvelle excavation en gris.

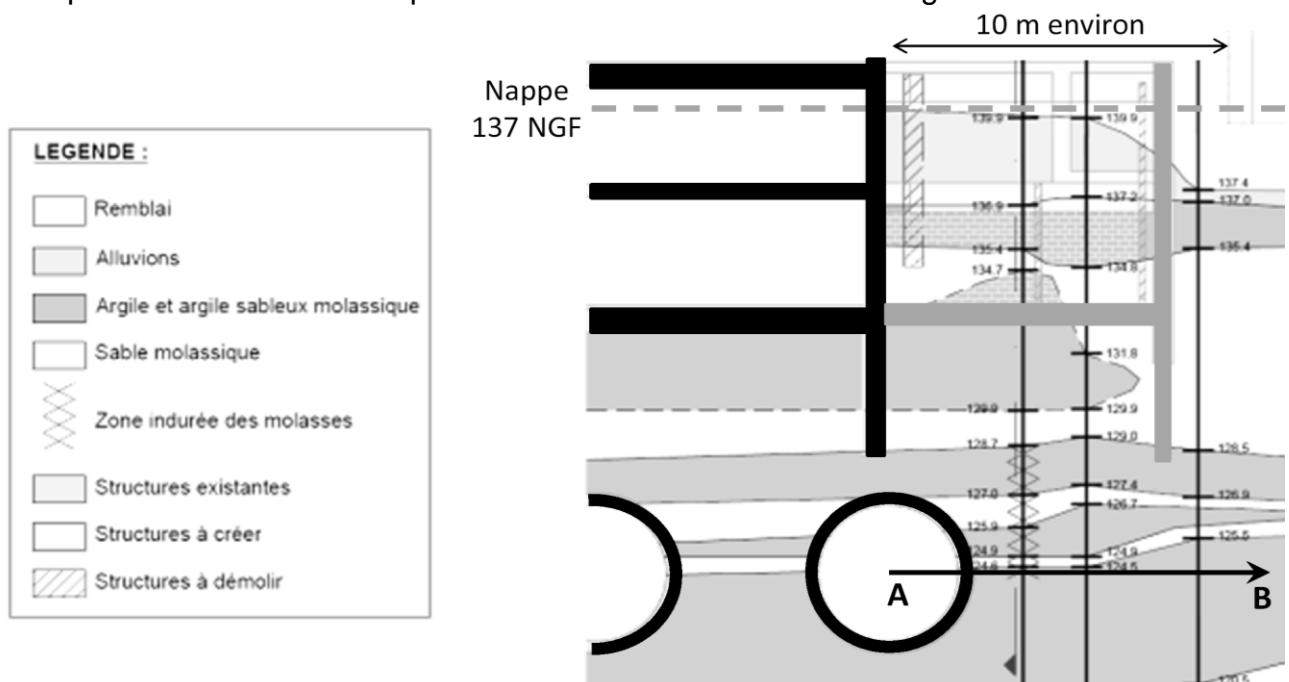


Figure 2: Station Jean Jaurès, métro de Toulouse. Schéma des travaux

Les variations des contraintes effectives dans le massif en fonction de la distance au centre du tunnel selon l'axe AB sont données sur la figure 3, où $\sigma_h = \sigma_r$ représente la contrainte radiale au tunnel qui correspond à la contrainte horizontale sur l'axe AB. Cette contrainte reste inchangée lors du déchargement. Dans l'état initial et sur l'axe AB, $\sigma_v = \sigma_\theta$

représente la contrainte tangentielle au tunnel qui correspond ici à la contrainte verticale. Les courbes σ_v paliers 1, 2 et 7 représentent une estimation par calcul analytique des contraintes verticales pour deux paliers intermédiaires de déchargement et le palier final après excavation.

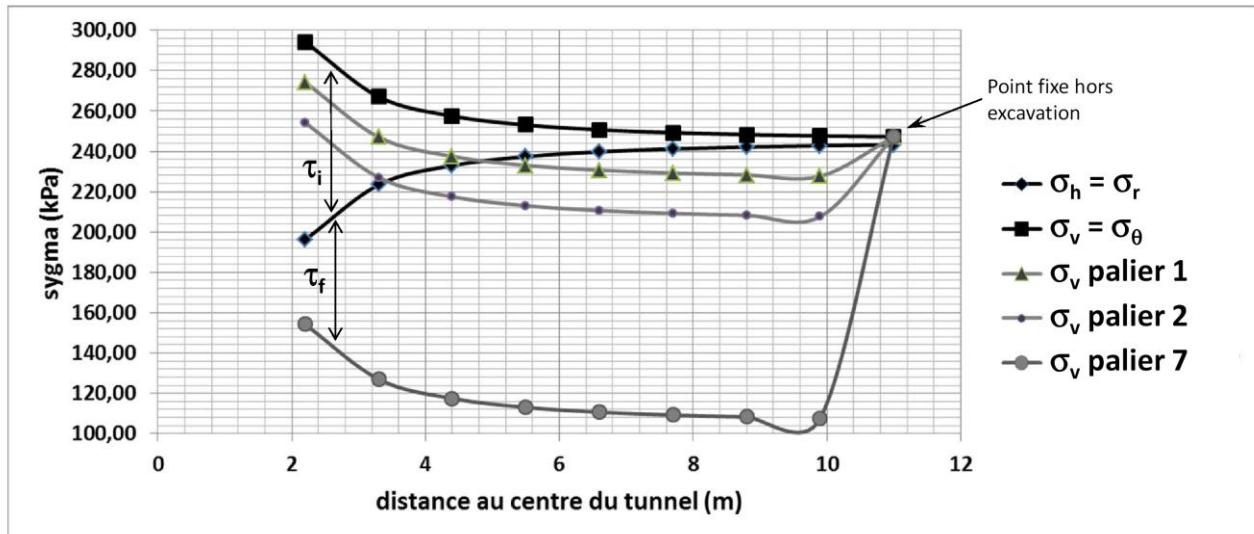


Figure 3: Contraintes radiales et tangentielles au tunnel lors de l'excavation (τ_i et τ_f sont les contraintes de cisaillement initiale et finales)

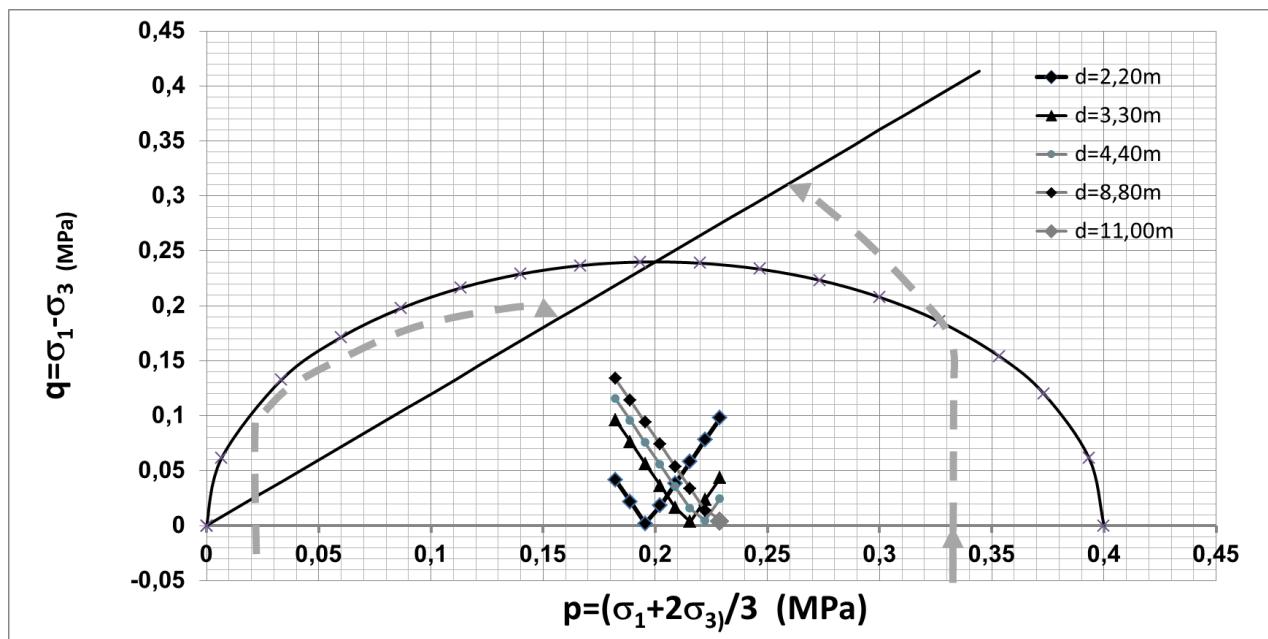


Figure 4: Chemins des contraintes sur l'axe AB lors du déchargement

Les chemins des contraintes suivis en différents points de l'axe AB sont donnés figure 4 (p pression moyenne effective, q déviateur). Ces graphes sont calculés en admettant un coefficient de poussée des terres et un coefficient de pression résiduelle autour du tunnel égaux à 0,8 avant le début des travaux. Dans le volume de sol en interaction avec le tunnel, l'excavation produit une rotation des contraintes principales, la contrainte principale majeure passant de la verticale à l'horizontale. Les chemins des contraintes dans les éléments de sol s'inscrivent tous dans la plage des pressions p comprises entre 0,18 et 0,23 MPa et des déviateurs q inférieurs à 0,15 MPa.

En admettant que le centimètre constitue le niveau de déformation pertinent dans le massif en interaction avec le tunnel pendant l'excavation, pour une longueur

représentative de 10 m, l'ordre de grandeur de la déformation sera $\varepsilon = 10^{-3}$. La gamme de déformation où les modules sont à identifier par les essais est donc $10^{-4} < \varepsilon < 10^{-2}$.

3. Programme d'investigation

3.1. Principes généraux

La figure 5, donne l'implantation des sondages réservés aux essais in situ (SD) et ceux destinés au prélèvement des échantillons carottés (SC).

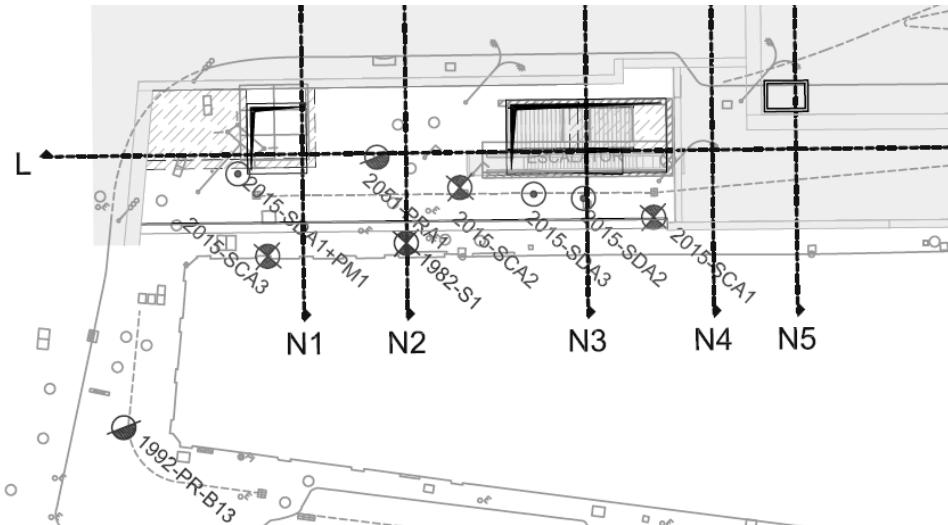


Figure 5 : Station Jean Jaurès. Implantation des investigations

Tableau 1. Détail du programme d'investigations prévues

Niveau de déformations	$\varepsilon=10^{-5}$	$\varepsilon=10^{-4}$	$\varepsilon=10^{-3}$	$\varepsilon=10^{-2}$
Essais in situ	Cross-hole.	-	-	Essais pressiométriques classiques et alternés
	G_{dyn} , E_{dyn} et v_{dyn}	-	-	E_m , E_r
Essais de laboratoire	Mesure par cellules piézoélectriques	Essais triaxiaux de précision	Essais triaxiaux de précision	Essais triaxiaux CD Essais double cédomètre
	G_{dyn} , E_{dyn}	E_{tot} (tangent), v	E_{sct} (sécant), v	modules E et E_{oed}

La campagne de reconnaissances a pour objectif de recueillir des modules de déformation des sols dans la zone d'influence des travaux au moyen d'essais in-situ, puis au laboratoire à partir d'échantillons carottés dans des sondages proches ou communs aux essais in-situ. Il est envisagé ainsi de disposer de modules associés à quatre niveaux de déformations (tableau 1). Les modules sont fournis par les essais in-situ sous l'état de contrainte régnant dans le terrain mais pouvant être affectés d'erreur de méthode ou d'erreur dimensionnelle. Les échantillons carottés peuvent être affectés par l'effet d'un remaniement et une variation de succion. Mais les essais de laboratoire permettent de contrôler un état de contrainte dont le choix peut être indépendant des contraintes in-situ. Le tableau 1 indique les différents paramètres à recueillir par les différentes méthodes. Les mesures par cellules piézoélectriques ou "bender element" n'ont pas pu être réalisées dans le délai de six mois disponible au moment des études.

3.2. Mesures cross-hole

Les mesures cross-hole sont effectuées dans trois forages alignés sur un même profil, de 110 mm de diamètre et équipés par des tubes inclinométriques PVC de 80 mm de diamètre intérieur et de 5 mm d'épaisseur. Des relevés inclinométriques sont réalisés

dans ces forages pour déterminer les distances entre les points d'émission et de mesure. La source (émetteur) est positionnée dans le premier forage (2015_SCA2), en provoquant deux frappes réversibles à chacun des niveaux, qui sont parcourus à un pas de un mètre, du toit du substratum jusqu'à la base du forage. Les deux autres forages accueillent les récepteurs (2015-SDA3-PRA3 et 2015-SDA2).

3.3. Essais de chargement-déchargement au double œdomètre

Ces essais sont répartis sur la hauteur du substratum argileux. Chacun est réalisé sur un échantillon visuellement homogène dans lequel deux éprouvettes sont découpées. Leurs densités et leurs teneurs en eau ne doivent pas différer de plus de 1 %. Une des éprouvettes est saturée (sat) sous une contrainte axiale de $0,75 \sigma'_{vo}$ ou $1,05 \sigma'_g$, puis après stabilisation, elle est chargée sous σ'_{vo} . On procède alors à un déchargement en cinq paliers jusqu'à $0,75 \sigma'_{vf}$, où σ'_{vf} est la contrainte prévue dans le sol après réalisation des terrassements. L'autre éprouvette sera chargé sous $0,75 \sigma'_{vo}$ sans saturation, dans une enceinte de faible volume fermée aux échanges d'eau, de façon à perturber à minima l'état initial (ns) du sol (moins de 1 %). Elle suivra ensuite le même programme de chargement que l'éprouvette saturée. Les modules œdométriques E_{oed} sont identifiés à chaque palier de déchargement et sont comparés ($E_{oed\ ns}/E_{oed\ sat}$).

3.4. Essai triaxiaux cycliques de haute précision

Les mesures du module d'Young en compression et en extension sont mesurées eu triaxial en condition drainée (CD) dans la gamme $10^{-4} < \varepsilon < 10^{-3}$. Deux éprouvettes sont découpées dans un échantillon homogène. Elles sont consolidées dans des états de contraintes anisotrope, sous une contrainte axiale effective $\sigma'_a = 200$ kPa et des rapports $K_0 = 0,8$ (compression), 1,0 (isotope) et 1,3 (extension) pour l'une et $K_0 = 1,3$, 1,0 et 0,8 pour l'autre. Des cycles de chargement déchargement CD sont effectués en ces différents points. Les modules d'Young tangents E_{tgt} et siccants E_{sec} sont identifiées sur les courbes contrainte-déformation cycliques (mesure globale de la déformation). Ils sont associés à des niveaux de déformation de 10^{-4} et 10^{-3} respectivement (tableau 1). Un exemple est donné sur la figure 6. Les modules E_{tgt} et E_{sec} sont égaux à 130 MPa et 64 MPa.

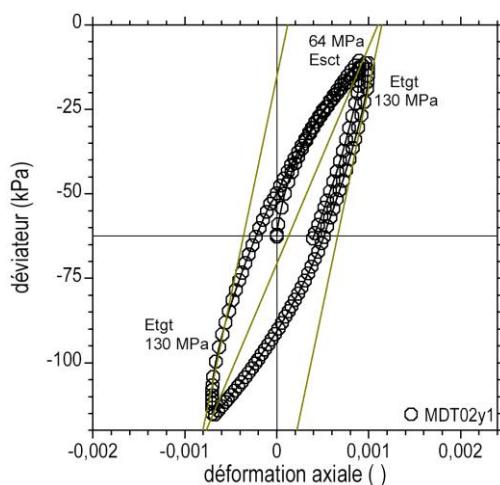


Figure 6: Exemple de cycle obtenu au triaxial à haute précision

4. Résultats des essais

4.1. Les essais in-situ

Les profils des modules mesurés in-situ sont représentés sur la figure 8 (sondage cross-hole et deux sondages pressiométriques). Les molasses sont variables en fonction de la profondeur mais homogènes dans un plan horizontal. Le rapport E_r/E_m vaut 1,6 en moyenne dans les sables molassiques et les molasses silteuses et il vaut 2.4 dans les argiles.

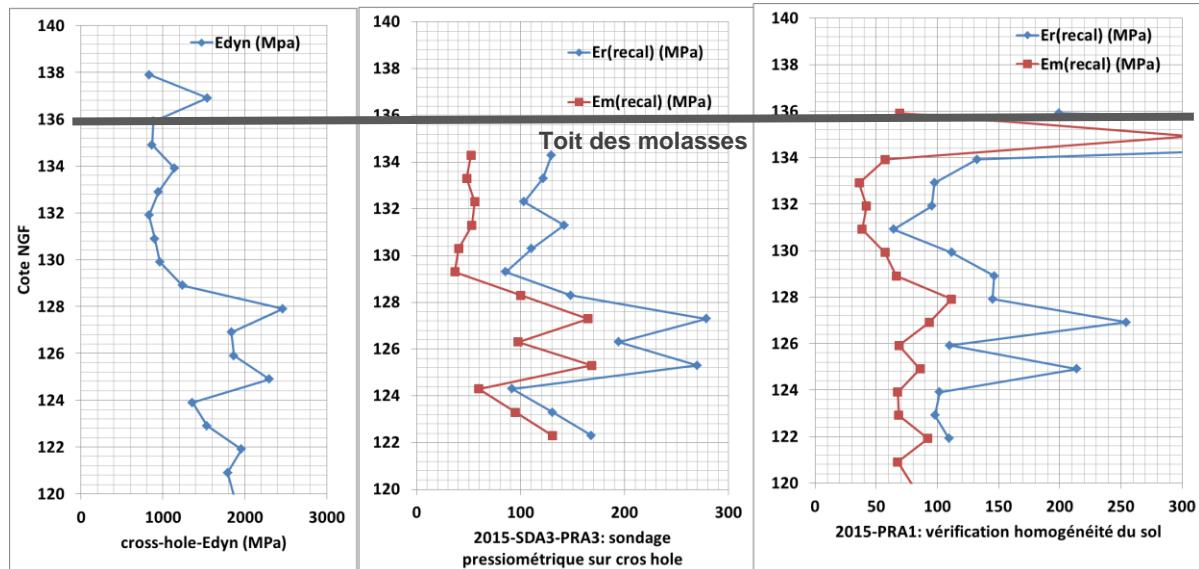


Figure 7 : Modules mesurés in-situ : E_{dyn} module d'Young cross-hole, E_m module pressiométrique, E_r module pressiométrique de recharge

Trois horizons se dessinent où les rapports des modules peuvent être identifiés entre les niveaux de déformation de 10^{-5} (E_{dyn}) et 10^{-2} (E_r). Ils sont égaux à 8,6 dans les niveaux argileux compacts et compris entre 10 et 12,9 dans les niveaux sableux moins raides.

4.2. Essais de laboratoire

4.2.1. Essais au double œdomètre

Le tableau 3 donne les résultats des essais réalisés au double oedomètre.

Tableau 3 : Résultats des essais au double oedomètre

sondage	EI	description	cote NGF base	γ_d (kg/m³)	WI	Wp	Ip	w%	VB S	$\sigma'g$	$\sigma'0$	Eoed saturé (MPa)			Eoed non sat (MPa)			rapport Eoed NS/Eoed sat	
										(kPa)	(kPa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	Eoed sat (Mpa)	σ_1 (kPa)	σ_2 (kPa)	Eoed ns (MPa)		
2016-SCA1	17,8-19,3	sable silteux Igment argileux	124	1720	41	27	14	21		150	240	240	158	26,8	240	158	58,1	2,2	
2016-SCA2	8,9-10,4	argile finement sableuse	133	1590					25	1,3	20	158	158	115	27,8	158	115	80,7	2,9
2016-SCA2	13,7-15,2	argile Igment sableuse	128	1840	40	28	12	16		20	214	214	143	51,0	214	143	129,2	2,5	

Le rapport entre les modules non saturés $E_{oed\ ns}$ et les modules saturés $E_{oed\ sat}$ va de 2 à 3. Ce résultat à priori surprenant sous le niveau statique de la nappe s'expliquerait par la présence de concentration notable d'ions dans l'eau interstitielle de la fraction argileuse

des molasses. Lors de la saturation de l'échantillon ces ions sont dilués par les eaux du robinet et les liens entre feuillets argileux amoindris.

4.2.2. Essais triaxiaux standards

Les essais triaxiaux standards fournissent un angle de frottement effectif $\phi' = 38^\circ$ et une cohésion $c' = 61 \text{ kPa}$ dans les argiles molassiques compactes. Des lois empiriques sont en usage pour évaluer un module d'Young sécant E_{50} à partir de ces paramètres de résistance. Le graphique de la figure 8 montre comment sont identifiés l'exposant m et le module de référence E_{50}^{ref} en fonction du paramètre D où $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$:

$$E_{50}/E_{50}^{\text{ref}} = D^m \quad D = \left(\frac{c' \cos \phi' - \sigma_3 \sin \phi'}{c' \cos \phi' - p_{\text{ref}} \sin \phi'} \right) \quad (3)$$

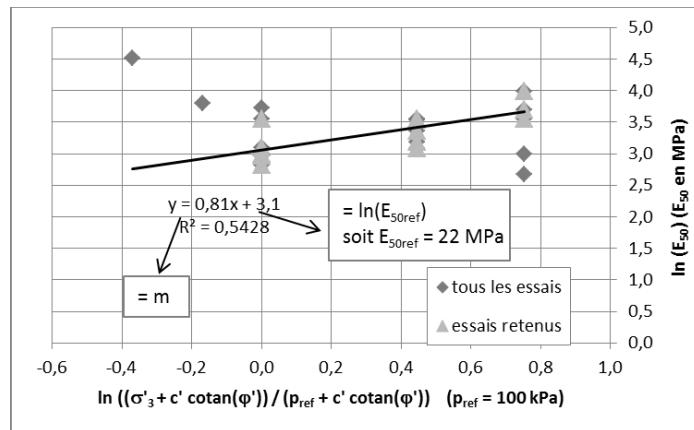


Figure 8 Graphe de détermination de E_{50}^{ref} et du coefficient m

Le coefficient $m = 0,8$ s'avère conforme aux observations habituelles. Le module $E_{50}^{\text{ref}} = 22 \text{ MPa}$ paraît sous-estimé dans la mesure où il est tiré d'essais sur un sol saturé à succion nulle alors que les essais au double œdomètre montrent l'existence d'un rapport supérieur à deux entre les modules.

4.2.3. Essais triaxiaux de haute précision

Quinze essais triaxiaux de haute précision ont fourni des mesures des modules d'Young sécents E_{sec} et tangents E_{tgt} et du coefficient de Poisson v (tableau 1). Les modules se réfèrent aux niveaux de déformation de 10^{-4} et 10^{-3} respectivement. Les coefficients de Poisson valent $v = 0,20$ en moyenne. Une grande hétérogénéité des modules apparaît qui concerne souvent les éprouvettes prélevées dans le même échantillon. Les modules d'Young tangents dépendent en premier lieu de la nature du sol testé, plus que de l'état des contraintes anisotropes appliquées, ni du sens de parcours des séquences de chargement. Par contre, les déformations irréversibles, qui sont plus fortes pour les sols à dominante argileuse, dépendent des séquences de chargement. Les rapports $E_{\text{tgt}}/E_{\text{sec}}$ varie de 1,6 à 2 et plus.

4.2.4. Paramètres d'évolution des modules avec la déformation

A l'issue des reconnaissances du site, les essais ont fourni des mesures des modules de déformation associées à deux niveaux de déformation différents. Le rapport $d = a / \varepsilon_{0,7}$, qui décrit l'évolution non linéaire des modules avec le niveau de déformation, peut être évalué d'après (2). La récapitulation des mesures aboutit à classer les modules dans cinq familles de sols.

Le tableau 4 récapitule les niveaux de déformation et les modules E_{dyn} et E_r mesurés in-situ par les essais cross-hole et les essais pressiométriques cycliques. Le rapport E_{dyn}/E_r est indiqué ensuite, puis le paramètre de non linéarité d . Les modules E_{dyn} sont de l'ordre de 1 à 2 GPa et sont dans un rapport de dix avec les modules E_r . Les paramètres d vont de 750 à 1200.

Tableau 4 : Paramètres $\varepsilon_{0.7}/a$ d'après les couples d'essais cross-hole et pressiométriques

	déformation ε_{dyn}	module E_{dyn} (MPa)	déformation ε_r	module E_r (MPa)	rapport E_{dyn}/E_r	$d = a/\varepsilon_{0.7}$
sol 1	1,0E-05	900	1,0E-02	105	8,6	7,6E+02
sol 2	1,0E-05	2400	1,0E-02	280	8,6	7,6E+02
sol 3	1,0E-05	1800	1,0E-02	140	12,9	1,2E+03
sol 4	1,0E-05	2300	1,0E-02	270	8,5	7,5E+02
sol 5	1,0E-05	1300	1,0E-02	130	10	9,0E+02

Le tableau 5 met en correspondance les modules tirés des essais triaxiaux sous deux niveaux de déformation. Le tableau indique ces niveaux de déformation, les modules tangents E_{tgt} et sécants E_{sec} , le rapport E_{tgt}/E_{sec} , puis le paramètre de non linéarité d . Les modules E_{tgt} sont de l'ordre de 80 à 110 MPa et sont dans un rapport de 1,6 à 3,4 avec les modules E_{sec} . Les paramètres d vont de 430 à 710. Ils se situent à 60 % en moyenne des paramètres d tirés des essais in-situ, pour des gammes de déformations dans un rapport de un (10^{-4} à 10^{-3}) à trois (10^{-5} à 10^{-2}).

Tableau 5 Paramètres $\varepsilon_{0.7}/a$ d'après les essais triaxiaux

	déformation ε_{tgt}	module E_{tgt} (MPa)	déformation ε_{sec}	module E_{sec} (MPa)	rapport E_{tgt}/E_{sec}	$d = a/\varepsilon_{0.7}$
sol 1	1,0E-04	107	2,6E-03	49	2,2	4,7E+02
sol 2	1,0E-04	79	4,2E-03	23	3,4	5,9E+02
sol 3	1,0E-04	113	1,0E-03	69	1,6	7,1E+02
sol 4	1,0E-04	93	2,2E-03	49	1,9	4,3E+02
sol 5	1,0E-04	100	3,0E-03	34	2,9	6,7E+02

5. Conclusions

L'approche proposée se fonde sur des essais in-situ et des essais de laboratoire pour évaluer le paramètre d qui gouverne la loi non linéaire d'évolution des modules avec le niveau de déformation. Des couples de modules ont été identifiés in-situ (cross-hole, pressiomètre) et en laboratoire (triaxial de précision cyclique drainé) à des niveaux de déformation différents pour aboutir à une estimation de d dans cinq familles homogènes de sols. Les deux démarches qui sont concordantes seront mises à profit pour alimenter les hypothèses de calculs numériques des phasage de construction de l'ouvrage. En regard d'une démarche courante d'identification des paramètres de déformabilité, ce retour d'expérience montre que, pour de futurs projets, la multiplication de l'essai au double-oedomètre permettra probablement d'éclairer les divergences souvent constatées entre les modules tirés d'essai triaxiaux standard saturés à l'eau courante et les modules tirés d'essais in situ.

6. Références bibliographiques

- Boutonnier L., 2007. Comportement hydromécanique des sols fins proche de la saturation. Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble.
- Hardin B.O., Drnevich V.P., 1972. Shear modulus and damping in soils. Measurement and parameter effects. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 98(6), 603-624.
- Mari J.L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani D., 1998. Géophysique de gisement et de génie civil. Editions Technip, 468 p.
- Savatier V., Garnier P., 2014. Sol effondrables. Essai au double œdomètre. Interprétation et proposition d'amélioration. Actes JNGG 2014, Beauvais, 11 p.
- Reiffsteck P., 2002. Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols. Etat de l'art. Symp. Int RARAM 2002, Paris, 201-242.