

ESTIMATION DU RAPPORT E/E_M : APPLICATION AUX RADIERES DE GRANDES DIMENSIONS

ESTIMATION OF THE RATIO E/E_M : APPLICATION TO FOUNDATIONS OF LARGE DIMENSIONS

Minh Tuan Hoang¹, Fahd Cuira¹, Daniel Dias², Pierre Miraillet³

¹ Terrasol, Paris, France

² Laboratoire 3SR, Polytech Grenoble, Saint Martin d'Hères, France

³ EDF TEGG, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une approche alternative pour estimer le module de déformation élastique E à partir du module pressiométrique E_M dans le cas d'un calcul de radiers ou de dallages de grandes dimensions. La particularité de l'approche proposée réside dans la prise en compte du niveau de déformation (ϵ) induit par l'ouvrage. Une loi de type $E/E_M = f(\epsilon)$ a été mise au point par calage analytique à partir du modèle de Ménard. La validité de cette loi est ensuite confrontée à des mesures en vraie grandeur, notamment sous les radiers de centrales nucléaires d'EDF.

ABSTRACT – This paper presents an alternative approach for the estimation of the elastic modulus E from the pressuremeter modulus E_M in the framework of large dimensional raft or slab foundation calculations. The particularity of this approach consists in the consideration of strain levels (ϵ) induced by the structure. A law of type $E/E_M = f(\epsilon)$ has been developed by analytical calibration from the Ménard's model. This law's validity is then confronted with field test measurements, especially in EDF's nuclear power plants.

1. Introduction

L'essai pressiométrique est un essai de reconnaissance des sols largement répandu depuis sa création par L. Ménard en 1955. À la différence de beaucoup d'autres essais in-situ, il présente l'avantage de fournir à la fois un paramètre de déformabilité (module pressiométrique E_M) et un paramètre de rupture (pression limite p_l). Pour le module E_M , on effectue une interprétation en élasticité sur la base d'un tube épais soumis à une pression intérieure sur la cavité créée par le forage. La partie « linéaire » est appelée pseudo élastique et conduit au calcul du module pressiométrique E_M . Pour un matériau élastique linéaire, le module E_M représente théoriquement le module de Young mesuré sur un chemin de cisaillement simple. Le sol n'étant pas un matériau élastique linéaire, la valeur du module pressiométrique conventionnel se trouve en réalité impactée non seulement par la « plasticité », mais également par le mécanisme de dégradation de la rigidité avec la déformation. Il est en effet important de rappeler que la plage de déformation sur laquelle le module E_M est défini (de l'ordre de 1% à 10%) est bien plus importante que celle qui intéresse le dimensionnement et le fonctionnement des ouvrages géotechniques courants (entre 0,01% et 1%) comme le rappelle la Figure 1. La notion de déformation « moyenne » peut être appréhendée en première approche en écrivant le rapport entre le tassement d'une couche et son épaisseur. Pour un ouvrage fondé superficiellement et « correctement » dimensionné, on s'attend à un tassement de l'ordre de quelques centimètres se développant généralement dans un complexe stratigraphique d'épaisseur totale d'une ou plusieurs dizaines de mètres. Le ratio tassement/épaisseur donne alors une valeur comprise entre 0,1% et 1%. Il s'agit en réalité d'une valeur moyenne, la déformation sera plutôt de l'ordre de 1% à proximité immédiate de la fondation et décroît à moins de 0,1% dans les couches profondes.

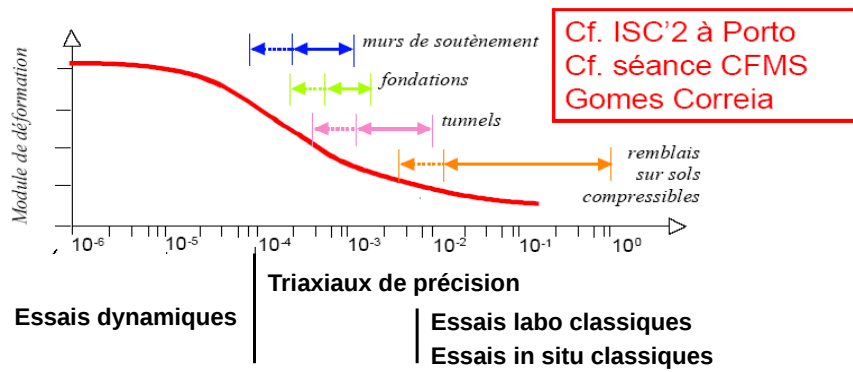


Figure 1. Variation du module de déformation avec la déformation (Reiffsteck, 2002)

2. Estimation du rapport E/E_M à partir des règles empiriques usuelles

La diffusion de l'essai pressiométrique en France et à l'étranger s'est accompagnée du développement de plusieurs modèles semi-empiriques permettant de traiter des cas élémentaires simples tels que le tassement d'une semelle isolée (Ménard & Rousseau, 1962), le tassement d'un pieu isolé (Frank & Zhao, 1982), ou la déformée d'un écran de soutènement souple (Schmitt, 2005). Ces modèles, bien que limités à des configurations « géométriques » élémentaires, peuvent servir de base de calage à des modèles plus élaborés, numériques ou semi-analytiques, dérivés de la théorie de l'élasticité ou de l'élasto-plasticité et qui nécessitent notamment la définition « d'un module » de déformation E . Le calage ainsi obtenu est valable pour tout ouvrage intéressant le sol dans une gamme de déformation comparable à celle correspondant implicitement au domaine d'application des modèles semi-empiriques usuels.

2.1. Rapport E/E_M pour une semelle isolée

Considérons le cas d'une semelle reposant sur un massif homogène caractérisé par un module pressiométrique E_M et un coefficient rhéologique α . Le rapport E/E_M peut être approché analytiquement en écrivant l'égalité entre le tassement issu du modèle « pressiométrique » de Ménard et celui issu de la théorie de l'élasticité pour une semelle circulaire rigide. Les valeurs du rapport E/E_M obtenues sont présentées dans le tableau ci-dessous : elles varient entre 2 et 10 selon la taille de la fondation. Cette variation s'explique par la dépendance du module avec le niveau de déformation implicitement intégrée dans la formulation empirique du modèle pressiométrique.

Modèle élastique	$s_e = \frac{qB}{4E} \pi (1-\nu^2)$	}	B (m)	0.6	1.2	3.0	6.0
Modèle pressiométrique	$s_p = \frac{qB}{9E_M} \left(2 \cdot \left(\frac{B}{B_0} \right)^{\alpha-1} + \alpha \right)$		$\alpha = 1$	2.08	2.08	2.08	2.08
			$\alpha = 2/3$	2.33	2.78	3.45	3.85
			$\alpha = 1/2$	2.5	3.23	4.55	5.56
			$\alpha = 1/3$	2.7	4.00	6.25	8.33
			$\alpha = 1/4$	2.78	4.35	7.14	10
			Valeurs de E/E_M telles que $s_e = s_p$				

Figure 2. Calage du module à partir du pressiomètre - Semelle circulaire – (Combarieu, 2006)

On retrouve ces ordres de grandeur dans la norme NF P 94 261 qui propose des valeurs pour le rapport E/E_M quand un modèle élastique est utilisé pour calculer le tassement d'une semelle isolée. En réalité, cette « corrélation » entre le module de déformation et le module pressiométrique est valable pour toute fondation induisant un niveau de déformation comparable à celui observé sous une semelle isolée, soit une déformation de l'ordre de 0,1 à 0,3%.

2.2. Rapport E/E_M pour un pieu isolé

Une démarche analogue à celle présentée précédemment peut être menée pour des ouvrages fondés sur pieux. Le modèle semi-empirique de (Frank & Zhao, 1982) établi à l'origine pour des pieux forés peut servir de base de calage (pour des charges allant jusqu'à 70% de la charge de fluage). L'exemple ci-dessous illustre le résultat obtenu pour un pieu foré dans un terrain sableux. L'obtention dans un modèle éléments finis d'une raideur verticale comparable à celle issue du modèle de Frank et Zhao nécessite l'introduction d'un module de déformation de l'ordre de $E = 2,5 \times E_M/\alpha$, soit dans le cas présent ($\alpha = 1/3$), un rapport E/E_M de l'ordre de 7,5. Cette valeur est cohérente avec les ordres de grandeurs issus du calage sur semelle isolée, ce qui indique implicitement que les deux cas correspondent à une même gamme de déformation ($\varepsilon \sim 10^{-3}$).

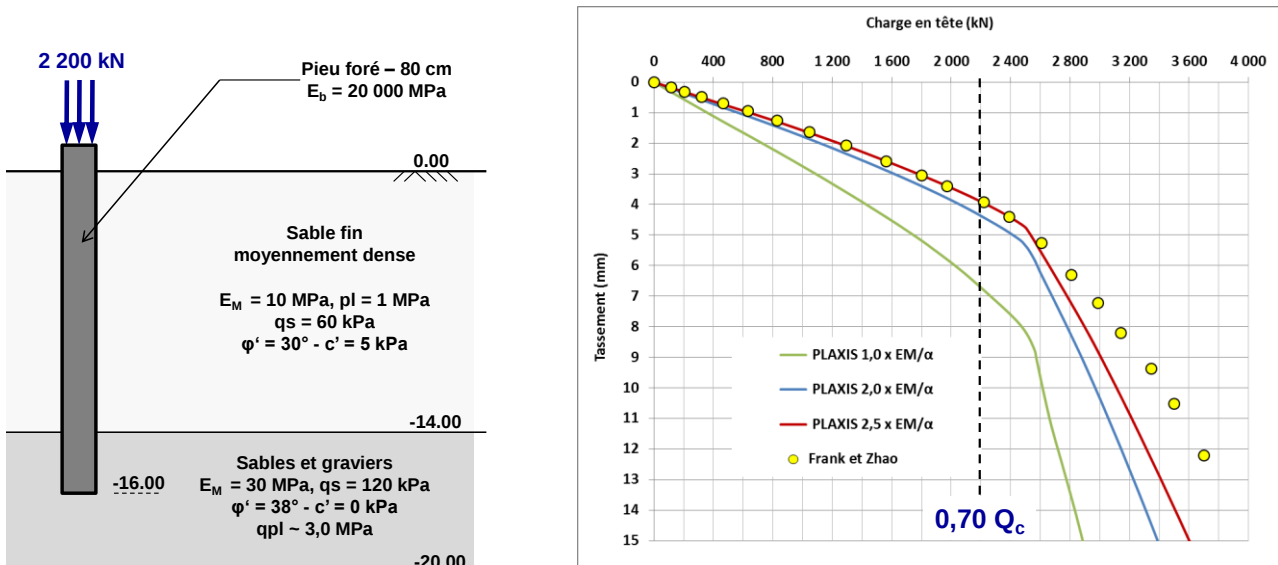


Figure 3. Calage du module à partir du pressiomètre pour un pieu foré (Cuira & Flavigny, 2016)

2.3. Rapport E/E_M pour un écran de soutènement

Les déformations liées aux ouvrages de soutènement sont généralement plus faibles (entre 10^{-4} et 10^{-3}) que celles attendues sous les fondations. Pour un même module pressiométrique, le module « E » considéré pour le calcul d'un écran de soutènement est donc en principe plus important que celui qui serait retenu pour un calcul de fondations. Le succès des modèles aux coefficients de réaction, notamment en France, s'explique (au-delà de l'aspect simplifié du modèle) en partie par l'existence d'une corrélation semi-empirique (par exemple le modèle de Schmitt) permettant d'exprimer la raideur surfacique (apparente) du sol (également appelée coefficient de réaction k_h) en fonction de E_M et α , et qui tient implicitement compte de la gamme de déformation qui intéresse ce type d'ouvrage. Ce modèle peut donc servir de base pour juger de la pertinence des modules de déformations vis-à-vis de l'amplitude des déplacements.

(Schmitt, 2005) a rapporté plusieurs retours d'expérience de parois instrumentées dont celle de la Figure 4 (Station d'épuration à Colombes, France) où la reproduction des mesures par des simulations numériques en éléments finis nécessite systématiquement des modules allant de 2 à 6 E_M/α selon la finesse de la loi de comportement considérée. Pour une loi de comportement linéaire parfaitement plastique, il est proposé d'utiliser un module valant 4 fois E_M/α , notamment à l'avancement du soutènement. Cela correspond à un rapport E/E_M compris entre 8 et 12 selon la nature des terrains traversés.

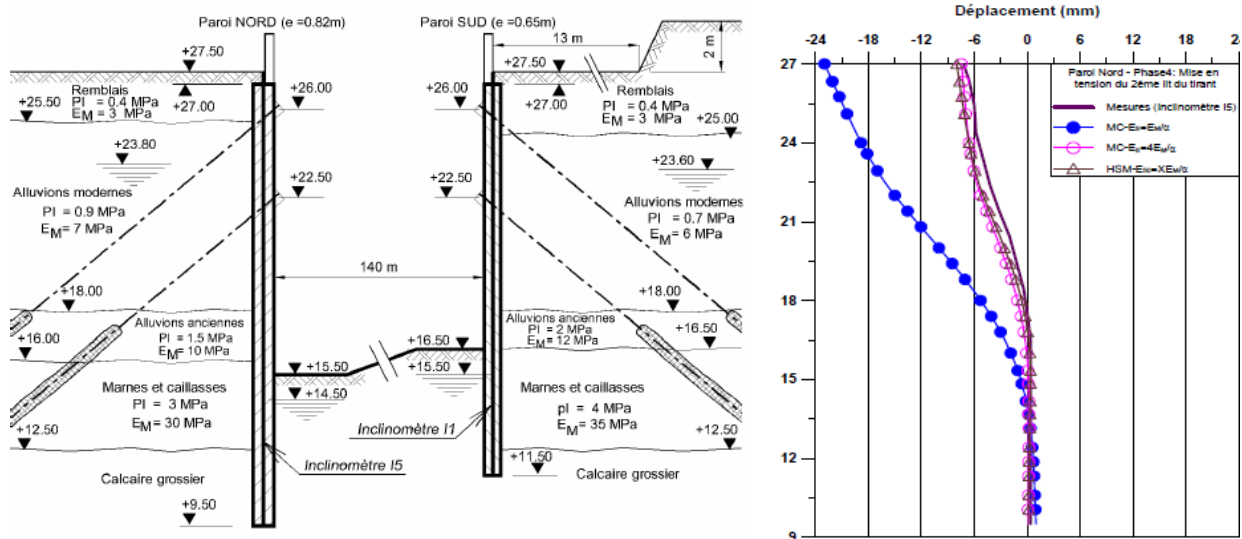


Figure 4. Retro-calage du module de déformation pour un écran tiranté – (Schmitt, 2005)

3. Généralisation au cas d'un chargement quelconque

3.1. Recours à la notion de courbe de dégradation

La démarche de calage du module de déformation sous une semelle isolée telle qu'elle a été exposée au §2.1 peut être affinée en faisant varier le rapport E/E_M avec la profondeur afin de tenir compte de la diffusion de la contrainte et donc du niveau de déformation avec la profondeur. Considérons le cas d'une semelle rectangulaire rigide de largeur B et de longueur L , supportant une contrainte q et reposant sur un massif homogène caractérisé par un module pressiométrique E_M et un coefficient rhéologique α . On se propose alors d'écrire l'égalité entre le tassement pressiométrique issu du modèle de Ménard noté s_p et celui issu d'un modèle élastique non linéaire noté s_{en} dans lequel le module élastique E varie avec la déformation ε selon une relation de type :

$$\frac{E}{E_M} = k(\varepsilon) = \frac{1}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

Où a et b sont deux constantes adimensionnelles qu'il convient de caler. En discrétisant le massif de sol en n sous-couches comprises entre les profondeurs z_i et z_{i+1} , le tassement élastique Δs_i produit dans la sous-couche « i » peut être estimé par recours à la formule simplifiée de Steinbrenner (dérivée des formules de Boussinesq) :

$$\Delta s_i = \frac{q B}{E_i 2} [\rho(z_{i+1}) - \rho(z_i)] \quad \text{avec} \quad \rho(z) = (1 - \nu^2)[F_1(z) + F_2(z)] + (1 - \nu - 2\nu^2)F_3(z) \quad (2)$$

Les expressions des fonctions « de forme » F_1 , F_2 et F_3 sont rappelées ci-dessous (Terzaghi, 1943) :

$$\begin{cases} F_1(z) = \frac{4\lambda}{\pi} \ln \left[\frac{(1 + \sqrt{\lambda^2 + 1})\sqrt{\lambda^2 + \beta^2}}{\lambda(1 + \sqrt{1 + \lambda^2 + \beta^2})} \right] \\ F_2(z) = \frac{4}{\pi} \ln \left[\frac{(\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 1})\sqrt{1 + \beta^2}}{\lambda + \sqrt{1 + \lambda^2 + \beta^2}} \right] \\ F_3(z) = \frac{2\beta}{\pi} \operatorname{atan} \left[\frac{\lambda}{\beta\sqrt{1 + \lambda^2 + \beta^2}} \right] \end{cases} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{L}{B} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{2z}{B} \quad (3)$$

Si l'on définit la déformation moyenne ε_i de la couche « i » comme étant le rapport entre le tassement Δs_i produit dans cette couche et son épaisseur $\Delta z_i = (z_{i+1} - z_i)$, on peut écrire :

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta z_i} = \frac{q}{E_i} \mu_i \text{ avec } \mu_i = \frac{B}{2} \cdot \frac{\rho(z_{i+1}) - \rho(z_i)}{z_{i+1} - z_i} \quad (4)$$

En remplaçant dans (1), on obtient :

$$\varepsilon_i = \frac{a\mu_i\varepsilon_{\text{ref}}}{1 - b\mu_i\varepsilon_{\text{ref}}} \text{ avec } \varepsilon_{\text{ref}} = \frac{q}{E_M} \quad (5)$$

Finalement, le tassement élastique « non linéaire » de la semelle s'obtient par addition des tassements produits dans chaque sous-couche :

$$s_{\text{en}} = \sum_{i=1}^n \Delta s_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a\mu_i\varepsilon_{\text{ref}}}{1 - b\mu_i\varepsilon_{\text{ref}}} \Delta z_i \right) \quad (6)$$

C'est ce tassement s_{en} que nous allons à présent rapprocher de celui issu du modèle de Ménard s_p . Les valeurs de a et b sont recherchées, par un processus d'optimisation à l'aide de la méthode des moindres carrés, de manière à réduire l'écart $s_{\text{en}} - s_p$ pour une « population » de valeurs de B comprises entre 1 et 3 m et pour des élancements L/B allant de 1 à 20. La déformation de référence $\varepsilon_{\text{ref}} = q/E_M$ est quant à elle fixée à 0,3%, correspondant implicitement à une charge de service q allant jusqu'à 1/3 de la pression limite p_l et à un rapport E_M/p_l de l'ordre de 10. Au total 40 configurations ont été analysées. La Figure 5 – gauche présente le résultat obtenu. Ici les courbes ont été établies pour un comportement « rhéologique » donné (α fixée). Pour chaque valeur de α , le processus d'optimisation conduit à un couple (a, b) permettant de décrire entièrement la dégradation du rapport E/E_M avec la déformation.

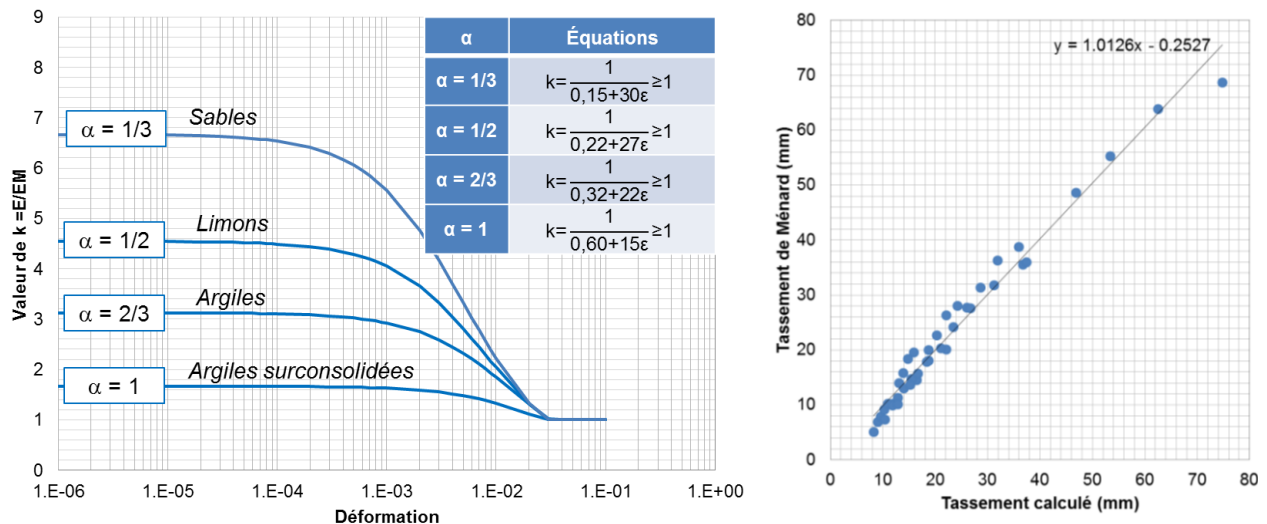


Figure 5. Lois de dégradation $E/E_M = f(\varepsilon)$ proposées (ARSCOP, 2017) (gauche) – Validation du tassement calculé par un modèle élastique non linéaire simplifié (à droite)

3.2. Application au calcul des radiers

L'intérêt de l'approche développée en §3.1 réside dans son caractère « intrinsèque » et indépendant de la forme ou de la rigidité de la fondation. Pour un type de sol donné, le rapport E/E_M est supposé exclusivement fonction de la déformation. Elle peut donc être étendue à l'étude d'une fondation quelconque (semelle isolée ou en groupe, radier ou dallage) dès lors que les déformations induites par celle-ci demeurent compatibles avec la

gamme sur laquelle le calage des courbes proposées a été mené, soit pour des déformations comprises entre 0,01% et 1%.

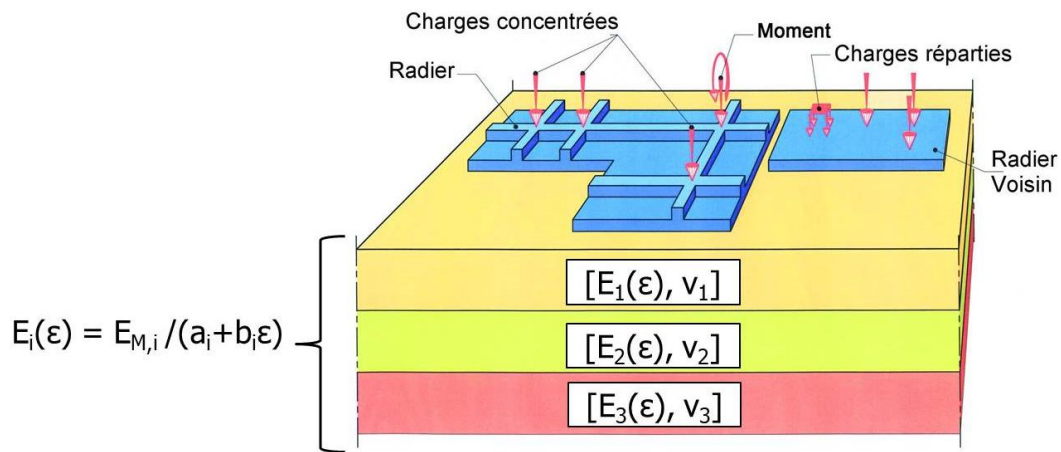


Figure 6. Adaptation du modèle Tasplaq au cas d'un multicouche élastique non linéaire

En pratique, l'utilisation des courbes de dégradation requiert un ajustement « itératif » des modules dans chaque couche en fonction des déformations calculées. Ainsi la formulation des programmes Tasplaq et Tasseldo de la suite logicielle FOXTA (Cuira et Simon, 2008) a été adaptée de manière à appliquer cet ajustement itératif de façon automatique (Figure 6). La mise en œuvre pratique de ce développement est illustrée dans le chapitre suivant.

4. Retour d'expérience sur les centrales EDF

4.1. Ouvrages étudiés

Dans le cadre du projet national ARSCOP, une étude a été menée en collaboration avec EDF CEIDRE sur l'exploitation des tassements de cinq installations nucléaires. Chaque installation est constituée d'un ou plusieurs bâtiments en interaction, tous fondés sur radier général. Les données des sites 1, 2 et 3 ont été fournies par EDF. Les données des sites 4 et 5 sont issues de rapports de thèse (Seifeddine, 1993) et (Leidwanger, 1993). L'étude géotechnique des 5 sites présente pour chaque couche de sol, un module pressiométrique et un coefficient rhéologique. Les tassements mesurés présentent une évolution avec le temps. Nous avons pris comme tassement élastique « à long terme » celui extrapolé à 50 ans après construction. L'amplitude des tassements varie entre 2 et 30 cm selon les sites. Il est intéressant de noter que ces tassements, ramenés aux épaisseurs des couches intéressées par l'ouvrage, correspondent à des niveaux de déformation compris entre 0,1 et 1% selon le site et la profondeur. Les données des sites étudiés (stratigraphie, charges etc...) sont confidentielles et ne sont volontairement pas détaillées dans le présent article. À titre d'exemple, la Figure 7 – gauche présente la vue en plan des radiers constituant la fondation des installations du site n°1. À droite, une vue du modèle Foxta mis au point pour l'estimation des tassements selon l'approche exposée dans le chapitre précédent.

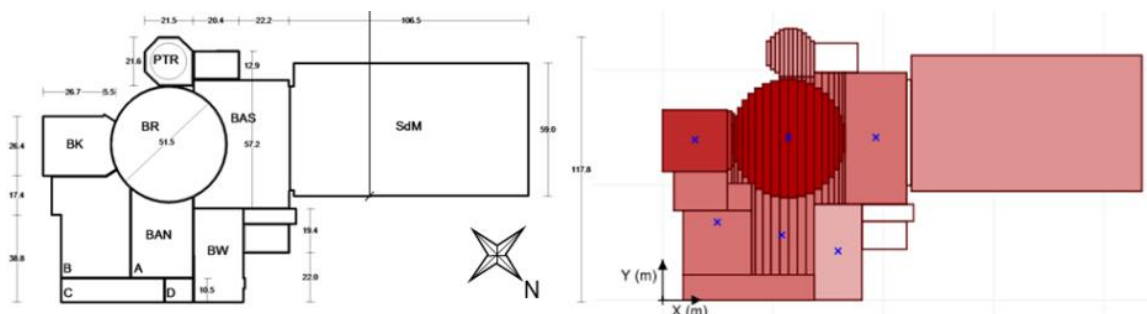


Figure 7. Plan des îlots du site n°1 (à gauche) et Modèle Foxta avec les points de calcul (à droite)

4.2. Mise en œuvre de l'approche développée

La Figure 8 présente le résultat obtenu pour le site n°1 à l'aide d'un modèle Foxta doté des lois de « dégradation » $E/E_M = f(\epsilon)$ de la Figure 5 – gauche. Les valeurs des paramètres a et b ont été choisies dans chaque couche en cohérence avec son comportement rhéologique. Une bonne concordance peut être soulignée entre le résultat de l'approche développée et celui des mesures. Ces dernières sont également comparées au tassement qui serait obtenu en considérant un modèle multicouche élastique linéaire avec $E = E_M/\alpha$ dans chaque couche : la comparaison témoigne encore une fois du caractère pessimiste d'un tel modèle.

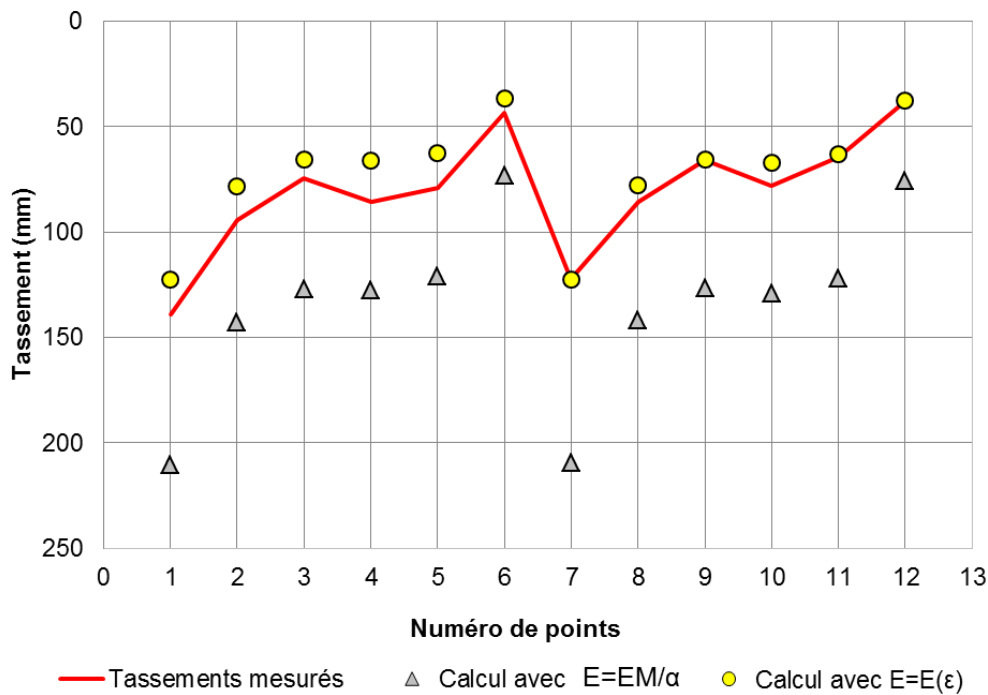


Figure 8. Confrontation aux mesures de tassement à long terme – site 1

Le graphique suivant présente les résultats pour les 5 sites et l'ensemble des points de mesure (l'axe des abscisses représente la succession des points de mesure sans aucune considération sur les distances) et confirme la tendance évoquée précédemment. À titre de complément, deux exemples de semelles issus des travaux de (Bru, Baguelin, Goulet, Jaeck, & Jezequel, 1973) sont également présentés. Les tassements des différents cas étudiés ne sont pas du même ordre de grandeur, ceux-ci ont été représentés donc en échelle logarithmique. A noter que l'ensemble des ouvrages étudiés intéressent ici le sol de fondation dans une gamme de déformation variant entre 1% (en surface) et 0,01% en profondeur.

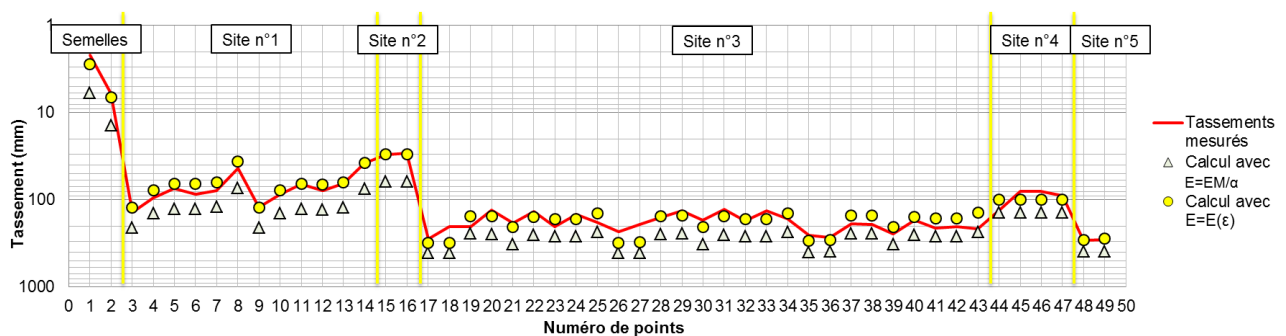


Figure 9. Confrontation aux mesures de tassement à long terme - sites 1 à 5

5. Conclusion

L'approche alternative de type $E = k(\varepsilon) \times E_M$ permet de s'affranchir de la corrélation usuelle $E = E_M/\alpha$ dans les situations où les déformations volumiques ne sont pas prépondérantes. Elle permet donc un choix justifié des paramètres nécessaires au calcul des ouvrages autres que ceux pour lesquels les règles semi-empiriques s'appliquent. La validation du modèle se poursuit dans le cadre du projet ARSCOP avec notamment l'exploitation d'autres retours d'expérience sur les tassements de réservoirs (à court et à long terme), de tassements de tour de grande hauteur (notamment à la Défense) ainsi que de tassements de dallages sur inclusions rigides.

6. Références

- Bru, J. P., Baguelin, F., Goulet, G., Jaeck, G., & Jezequel, J. (1973). Prévion de tassement au pressiomètre et constatations. 8^e congrès international de mécanique des sols et de travaux de fondations, (p. 9). Moscou.
- Combarieu, O. (2006). L'usage des modules de déformation en géotechnique. Revue française de géotechnique N°114, 3-32.
- Cuira, F., & Flavigny, E. (2016). Essai pressiométrique et calculs par élément finis. 5^{ème} Congrès Maghrébin en Ingénierie Géotechnique (5^{ème} CMIG'16). Marrakech.
- Cuira, F., & Simon, B. (2008). Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur sol multicouche élastique. Revue française en géotechnique n°124, 3-17.
- Frank, R., & Zhao, S. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 17-24.
- Leidwanger, C. (1993). Etude des tassements différés à partir de résultats d'essais au Diflupress Longue Durée. Université de Grenoble.
- Ménard, L., & Rousseau, J. (1962). L'évaluation des tassements - Tendances nouvelles. Sols-Soils, No 1, 13-30.
- Reiffsteck, P. (2002). Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols : État de l'art. Symposium international PARAM (pp. 201-242). Presses de l'ENPC.
- Roux, N., & Buet, P. (2009). Retour d'expérience des tassements mesuré sur le CNPE de Gravelines.
- Schmitt, P. (2005). Modules d'élasticité du sol vis-à-vis des écrans de soutènement. Réunion technique CFMS: <http://www.cfms-sols.org/documentation/exposes-du-cfms#2005>
- Seifeddine, I. (1993). Étude du tassement d'une centrale nucléaire sur argile surconsolidée : modélisation avec lois hyperboliques. Ecole Centrale de Paris.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics - Theory of Semi-infinite elastic solids (2^e edition).