

Amélioration de la méthode usuelle pour le calcul des tassements de consolidation par la méthode pressiométrique

Improvement of Usual Menard Pressiometric Method for Consolidation Settlement Calculation

V. Savatier & R. Deluzarche

EGIS Structures & Environnement EGIS Géotechnique, Balma, France

RÉSUMÉ : Le calcul des tassements de consolidation dans les argiles à partir des essais pressiométriques utilise le coefficient de Ménard permettant de passer du module pressiométrique au module œdométrique. Ce coefficient d'origine empirique a été calé par Ménard dans un certain domaine de variation de contrainte correspondant à la contrainte de calcul aux ELS pour une semelle peu ancrée. Dans le cas de radiers de grande largeur ou de remblais routiers reposant sur un sol argileux compressible, on utilise cependant usuellement ce module avec un certain succès pour estimer le tassement de consolidation dans des domaines de contrainte plus élevés. Sur la base d'une linéarisation analytique du comportement œdométrique, nous établirons l'expression théorique du coefficient correcteur α_1 à appliquer au coefficient de Ménard pour estimer à partir du module pressiométrique les tassements de consolidation pour un domaine de chargement dépassant fortement la pression de pré-consolidation. Ce coefficient dépend du rapport de sur-consolidation OCR du rapport (C_s/C_c) coefficient de compressibilité du sol sur coefficient de rechargement du sol et du rapport ($\Delta\sigma/\sigma'_p$) de la variation de la charge apportée sur la pression de sur-consolidation.

ABSTRACT: The calculation with pressuremeter test of consolidation settlements in clay is done using the Ménard coefficient. This coefficient has been given by Ménard in order to link oedometric modulus and pressuremeter modulus. It is based on experimentation of plate settlements for a stress variation equal to SLS bearing resistance for footing seated on soil surface. In spite of these conditions the modulus obtain with the Menard coefficient is frequently used to calculate settlement under embankment with higher stress variation. Using a mathematical linearization of oedometric deformation we determine a corrective ratio α_1 that allows to calculate consolidation settlement with pressuremeter for a stress values that hardly exceed the soil consolidation stress.

KEYWORDS: pressuremeter, settlement calculation, theory of consolidation, consolidation test

MOTS CLES : pressiomètre, calcul des tassements, consolidation, essais œdométrique

1 INTRODUCTION.

Le calcul des tassements d'une couche compressible de faible épaisseur à partir d'appareils d'essai in situ et en particulier du pressiomètre, utilise des formules élastiques de type :

$$s = \sum_i \frac{\Delta\sigma_i \alpha_i h_i}{E_{Mi}} \quad (1)$$

$\Delta\sigma_i$: variation de la contrainte dans l'axe du sol i
 E_{Mi} : module de déformation pressiométrique du sol i
 α_i : coefficient de Ménard du sol i
 h_i : hauteur de la couche de sol i

Or, ce type de tassement est un tassement de consolidation qui d'après les résultats d'essais œdométriques est de la forme :

$$s = \sum \frac{\Delta h_i}{h_i} h_i = \sum (s_{OC_i} + s_{NC_i}) h_i \quad (2)$$

$$\text{Avec : } s_{OC_i} = \sup \left(0, \frac{\sigma'_p - \sigma'_{vo}}{\sigma'_p - \sigma'_{vo}} \right) \frac{Cc}{1 + e_0} \log \left(\frac{\inf(\sigma'_p, \sigma'_{vo} + \Delta\sigma)}{\sigma'_{vo}} \right)$$

$$s_{NC_i} = \sup \left(0, \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma - \sigma'_p}{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma - \sigma'_p} \right) \frac{Cc}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sup(\sigma'_p, \sigma'_{vo})} \right)$$

- e_0 : indice des vides initial de la couche i
- σ'_p : contrainte de préconsolidation de la couche i

- σ'_{vo} : contrainte effective initiale dans l'axe de la couche i
- $\Delta\sigma$: augmentation de contrainte dans l'axe de la couche i
- C_c : indice de compression de la couche i
- C_s : indice de rechargement de la couche i

Ces deux formules conduisent, comme on peut s'en rendre compte sur la figure ci-après, à une évolution différente du tassement en fonction de la contrainte avec une identité entre les deux estimations uniquement sur un certain domaine de contrainte. Il peut donc être utile d'affecter la formule (1) d'un coefficient correcteur pour améliorer l'estimation des tassements de consolidation par la méthode pressiométrique.

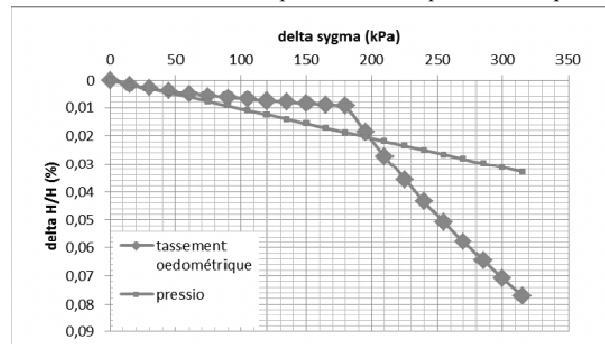


Figure 1: Comparaison des tassements obtenus par les méthodes œdométriques et pressiométrique

Ce coefficient correcteur sera établi pour chaque couche de sol. On a pour chaque couche, un tassement unitaire $\Delta h/h$:

Méthode pressiométrique :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\alpha \Delta \sigma}{E_M} \quad (3)$$

Méthode oedométrique :

$$\frac{\Delta h}{h} = S_{OC} + S_{NC} \quad (4)$$

2 ETABLISSEMENT DU COEFFICIENT CORRECTEUR

2.1 Sols sur-consolidés chargés dans le domaine sur-consolidé

La formule (4) donne dans ce cas :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{1+eo} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (5)$$

Posons $OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}$ et $G = \frac{C_s}{C_c}$.

Ces deux coefficients sont représentatifs ; pour G de la nature minéralogique et de l'arrangement des grains ; pour OCR de l'état de contrainte initial.

On peut écrire d'après (5) :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s \cdot OCR}{2,3(1+eo)} \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)^{2,3} \frac{\log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \right)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)}$$

En divisant le dénominateur et le numérateur du log par σ'_{vo}

Puis en écrivant $\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} = OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)$ et $G \cdot C_c = C_s$ on obtient :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{G \cdot C_c \cdot OCR}{2,3(1+eo)} \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)^{2,3} \frac{\log \left(1 + OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} \quad (6)$$

or $\log(1+x)$ tend vers $\frac{x}{2,3}$ quand x tend vers zéro donc si

$\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p}$ est suffisamment proche de zéro on a :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{1}{2,3} \cdot \frac{G \cdot C_c \cdot OCR}{1+eo} \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p}$$

La formule (3) est donc une approximation de la formule (4) lorsque $\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p}$ est suffisamment faible en posant :

$$\frac{1}{2,3} \cdot \frac{C_c \cdot G \cdot OCR}{1+eo} \cdot \frac{1}{\sigma'_p} = \frac{1}{2,3} \cdot \frac{C_s}{1+eo} \cdot \frac{1}{\sigma'_{vo}} = \frac{\alpha}{E_M} \quad (7)$$

Par ailleurs d'après (6) on peut écrire :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{2,3(1+eo)} \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \left[B \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (8)$$

$$\text{Avec : } B \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) = 2,3 \frac{\log \left(1 + OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} \quad (8b)$$

2.2 Cas des sols sur-consolidés chargés dans le domaine normalement consolidé

(4) peut s'écrire :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{(1+eo)} \left[\log \left(\frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_p} \right) + \frac{C_c}{C_s} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right]$$

Ce que l'on peut écrire :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{(1+eo)} \left[\log(OCR) + \frac{1}{G} \log \left(\frac{1}{OCR} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right]$$

soit :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{2,3(1+eo)} \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)^{2,3} \left[\frac{\log(OCR)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} + \frac{\frac{1}{G} \log \left(\frac{1}{OCR} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} \right]^{x,2,3}$$

On a donc :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_s}{2,3(1+eo)} \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \left[A \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \right] \quad (9)$$

$$\text{avec : } A \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) = 2,3 \left[\frac{\log(OCR)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} + \frac{\frac{1}{G} \log \left(\frac{1}{OCR} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)}{OCR \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} \right] \quad (9b)$$

Pour que la formule (7) soit valable, il faut que l'on soit, en fin de chargement, dans le domaine normalement consolidé. On doit donc avoir :

$$\sigma'_{vo} + \Delta \sigma > \sigma'_p \text{ soit } \frac{1}{OCR} + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} > 1 \text{ ou : } \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} > 1 - \frac{1}{OCR}$$

Nous donnons ci-après le tableau des valeurs minorant $\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p}$ en fonction de OCR :

OCR	1,05	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2	4	5	6	10	15	100	∞
$\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p}$	0,04	0,09	0,167	0,23	0,285	0,33	0,5	0,75	0,8	0,83	0,9	0,93	0,99	1

Tableau 1

2.3 Cas des sols normalement consolidés

Dans ce cas, la formule [4] se simplifie pour donner :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{Cc}{2.3(1+e_0)} \log \left(\frac{\sigma'_{vo} + \Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \right) \quad \text{soit :}$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{Cs}{2.3(1+e_0)} \cdot \frac{1}{\sigma'_{vo}} \cdot \Delta \sigma \cdot C \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) \quad (10)$$

Avec

$$C \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right) = 2.3 \frac{\frac{1}{G} \log \left(1 + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)}{\left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)} \quad (10b)$$

On peut remarquer que les fonctions $A \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)$ et $C \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_p} \right)$ donnent des valeurs identiques pour OCR=1.

2.4 Valeur du coefficient G et correspondance contrainte de pré-consolidation σ'_p avec pl^*

Nous donnons ci-dessous l'histogramme de 303 essais oedométriques réalisés dans le Sud de la France.

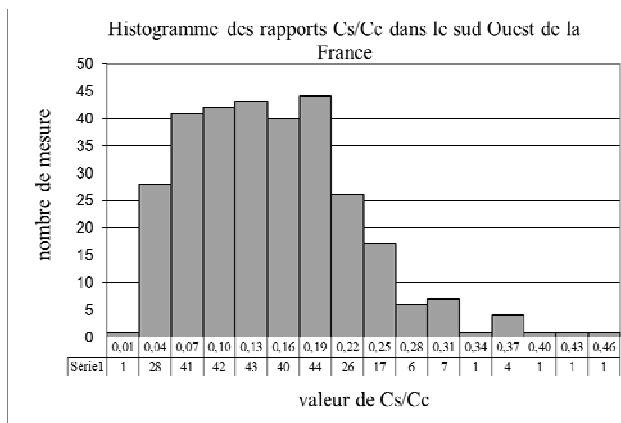


Figure 2: Histogramme du rapport Cc/ Cs

nombre de valeurs n	303
valeur moyenne	0,136
écart type	0,078
intervalle inf de confiance à 99,9 %	0,149
intervalle sup de confiance à 99,9 %	0,122

Tableau 2 : valeurs caractéristiques de l'échantillon

La taille de l'échantillon étant grande, on peut la considérer représentative de la population totale avec une bonne approximation. La valeur minimisant le rapport Cs/Cc avec une probabilité de 90 % est alors 0.042. La valeur maximisant ce même rapport est 0.275.

Il faut remarquer la dispersion importante de ces valeurs expérimentales. Une analyse non présentée ici a montré que ces variations étaient indépendantes des paramètres d'identification des sols et du degré de consolidation. Il est possible que cette dispersion soit due à des variations du processus de chargement et que l'on puisse retenir la valeur moyenne comme représentative du rapport Cs/Cc.

La relation entre pl^* et σ'_p est établie à partir des corrélations entre Cu la cohésion non drainée et σ'_p établie dans la référence. On a :

Pour les argiles non organiques telles que : $12 < Ip < 40$:

$$0,18 \leq \frac{cu}{\sigma'_p} \leq 0,32 \quad \text{soit} \quad 3,12 Cu < \sigma'_p < 5,55 Cu. \quad (11)$$

La relation entre Cu et pl^* est tirée de la référence [3]. La combinaison de ces corrélations donne les tableaux suivants :

Pression lim. du sol	Argile non organique	Argile organique
$pl^* < 0,3$ MPa	$pl^* = 1 \text{ à } 1,75 \sigma'_p$	$pl^* = 1,51 \text{ à } 0,66 \sigma'_p$
$0,3 < pl^* < 1$ MPa	$pl^* = 1 \text{ à } 2,85 \sigma'_p$	$pl^* = 1,51 \text{ à } 5 \sigma'_p$
$1 < pl^* < 2,5$ MPa	$pl^* = 2,85 \text{ à } 5 \sigma'_p$	Sans objet

Tableau 3 : relations pl^* avec σ'_p

Pression lim. du sol	Argile non organique $\sigma'_p = (3,12 \text{ à } 5,55) Cu$	Argile organique $\sigma'_p = (1,78 \text{ à } 3,57) Cu$
$pl^* < 0,3$ MPa	$\sigma'_p = 0,57 \text{ à } 1 pl^*$	$\sigma'_p = 0,32 \text{ à } 0,66 pl^*$
$0,3 < pl^* < 1$ MPa	$\sigma'_p = 0,35 \text{ à } 1 pl^*$ avec : $\sigma'_p < 0,26 pl^* + 0,0936$ $\sigma'_p > 0,462 pl^* + 0,1665$	$\sigma'_p = 0,2 \text{ à } 0,66 pl^*$ avec $\sigma'_p < 0,148 pl^* + 0,053$ $\sigma'_p > 0,297 pl^* + 0,107$
$1 < pl^* < 2,5$ MPa	$\sigma'_p = 0,2 \text{ à } 0,35 pl^*$ avec : $\sigma'_p < 0,0891 pl^* + 0,265$ $\sigma'_p > 0,159 pl^* + 0,471$	Sans objet

Tableau 4 : relations σ'_p et pl^*

Nous donnons dans les tableaux ci-après, les valeurs minimisant et maximisant σ'_p et OCR obtenus par ces formules pour diverses contraintes initiales σ'_{vo} dans le cas des argiles non organiques :

σ'_{vo} (kPa)	PL*(MPa)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
20	OCR	2,9	5,7	8,6	9,9	11,2	12,5	13,8	15,1	16,4	17,7	18,2	18,8
50	OCR	1,1	2,3	3,4	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,6	7,1	7,3	7,4
100	OCR	0,6	1,1	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,6	3,7
200	OCR	0,3	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	1,8	1,9
σ'_{vo} (kPa)	PL*(MPa)	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,4	2,5
20	σ'_p inf (kPa)	372	361	390	408	417	426	434	443	452	461	479	488
20	OCR	18,8	18,1	18,5	20,4	20,8	21,3	21,7	22,2	22,8	23,1	24,0	24,4
50	OCR	7,4	7,6	7,8	8,2	8,3	8,5	8,7	8,9	9,0	9,2	9,6	9,8
100	OCR	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,8	4,8	4,9
200	OCR	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4

Tableau 4 : estimation minimisant σ'_p et OCR

σ'_{vo} (kPa)	PL*(MPa)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
20	σ'_p sup (kPa)	100	200	300	351	398	444	490	536	582	629	646	662
20	OCR	5,0	10,0	15,0	17,8	19,9	22,2	24,5	26,8	28,1	31,4	32,3	33,1
50	OCR	2,0	4,0	6,0	7,0	8,0	8,9	9,8	10,7	11,6	12,8	12,9	13,2
100	OCR	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0	4,4	4,8	5,4	5,8	6,3	6,5	6,8
200	OCR	0,5	1,0	1,5	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	2,8	3,1	3,2	3,3
σ'_{vo} (kPa)	PL*(MPa)	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,4	2,5
20	σ'_p sup (kPa)	562	678	694	725	741	757	773	789	805	820	852	868
20	OCR	33,1	33,8	34,7	36,3	37,1	37,9	38,8	39,4	40,2	41,0	42,6	43,4
50	OCR	13,2	13,6	13,9	14,5	14,8	15,1	15,5	15,8	16,1	16,4	17,0	17,4
100	OCR	6,6	6,6	6,9	7,3	7,4	7,6	7,7	7,9	8,0	8,2	8,5	8,7
200	OCR	3,3	3,4	3,5	3,8	3,7	3,8	3,8	3,9	4,0	4,1	4,3	4,3

Tableau 5 : estimation maximisant σ'_p et OCR

3 FORMULE PRESSIOMETRIQUE CORRIGEE POUR LES TASSEMENTS OEDOMETRIQUES

La formule (1) qui est de nature semi empirique a été calée à partir d'essai de chargement à l'ELS de semelles peu ancrées, soit sous une augmentation de contrainte :

$$\Delta\sigma = \frac{1}{3} 0,8(pl^*) \quad (12)$$

De façon à conserver les valeurs de tassements pour cette valeur, tout en ayant une allure des variations des tassements de consolidation conforme à la théorie oedométrique, il est proposé de retenir la formule de calcul des tassements suivante :

$$\frac{\Delta h}{h} = \sum_i \frac{\Delta\sigma_i \cdot \alpha_i \cdot \alpha_{li}}{E_{Mi}} \quad (13)$$

α_{li} :coefficient correcteur dépendant de OCR et de $\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_p}$

Il est calculé pour chaque couche i, en considérant que la formule (3) est une approximation de la formule (4) et en utilisant les relations (7), (8) et (9).

Le mode de calcul proposé est le suivant :

- Le coefficient α_1 est fixé à 1 pour $\Delta\sigma < 0.266pl^*$

$$\alpha_1 = \sup \left(\frac{B \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_p}, OCR \right)}{\beta}, \frac{A \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma'_p}, OCR \right)}{\beta} \right) \text{ pour } \Delta\sigma \geq 0.266pl^*$$

β est le coefficient d'ajustement permettant de faire converger le calcul par la nouvelle méthode avec le calcul classique dans le cas où $k_p=0.8$

- Pour un sol peu compact tel que $OCR = 1$ $\beta = C(\Delta\sigma/\sigma'_p)$ pour $\Delta\sigma = 0.266*pl^*$ pour une argile non organique.
- Pour un sol tel que $OCR \geq 1.3$, $\beta = B(\Delta\sigma/\sigma'_p)$ pour $\Delta\sigma = 0.266pl^*$ pour une argile non organique
- Pour $1 < OCR < 1.3$, β doit être calculé au cas par cas.

Nous donnons dans le tableau ci-dessous pour des valeurs de pl^* comprises entre 0.1 et 2.5 MPa et pour un $OCR > 1.3$, les valeurs de β pouvant être retenues.

σ'_{v0} (kPa)	PL*(MPa)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
$\Delta\sigma \text{ inf (kPa)}$		27	53	80	107	133	160	187	213	240	267	293	320
20	β	0.83	0.49	0.40	0.35	0.31	0.27	0.25	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18
50	β		0.80	0.64	0.50	0.40	0.35	0.32	0.28	0.27	0.25	0.23	0.21
100	β		0.89	0.80	0.73	0.57	0.46	0.37	0.30	0.23	0.17	0.12	0.07
200	β			0.84	0.80	0.77	0.73	0.71	0.68	0.66	0.63	0.61	0.60
σ'_{v0} (kPa)	PL*(MPa)	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.4	2.5
$\Delta\sigma \text{ inf (kPa)}$		320	347	373	427	453	480	507	533	560	587	640	667
20	β	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
50	β	0.31	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.20	0.20
100	β	0.65	0.58	0.50	0.40	0.37	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.22	0.20
200	β	0.80	0.76	0.70	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57	0.55	0.54

Tableau 6 : valeurs de β pour $OCR > 1.3$

4 EXEMPLE D'APPLICATION

4.1 Sol faiblement surconsolidé

De façon à illustrer l'utilisation de la méthode proposée, calculons les tassements sous divers remblais de grande largeur apportant des charges de 40, 70, 100 et 150 kPa et reposant à la surface d'un sol argileux faiblement surconsolidé baigné par une nappe située à 2 m de profondeur et de caractéristiques :

- pression limite $pl^* = 0,2$ MPa
- module pressiométrique $E_M = 2$ MPa
- coefficient de Ménard $\alpha = 0,66$
- épaisseur du sol $h = 6$ m

Les résultats du calcul du tassement S par la méthode pressiométrique pour les 4 cas de charges sont résumés dans le tableau ci-après :

$\Delta\sigma$	40 kPa	70 kPa	100 kPa	150 kPa
S (cm)	8	14	19,8	29,7

Tableau 7 : calcul des tassements méthode pressiométrique

Dans le cas de la méthode proposée, nous avons dans l'axe de la couche compressible : $\sigma'_{vo} = 50$ kPa $\frac{pl^*}{\sigma'_{vo}} = 4$ nous

avons donc : $2,3 < OCR < 4$ $115 < \sigma'_p < 200$ kPa ; $\beta = 0.68$, nous obtenons alors les valeurs de α_1 et de tassements corrigés suivants :

$\Delta\sigma$ (kPa)	40	70	100	150
$\sigma'_{vo} 50$		50	50	50
$\sigma'_{vo} + \Delta\sigma$	90	120	150	200
beta	0,68 0,68		0,68 0,68	
$\sigma'_p 200$		200	200	200
OCR	4,00 4,00		4,00 4,00	
G 0,275		0,275	0,275	0,275
B	0,73 0,62		0,55 0,46	
A		-0,34	0,17	0,46
α_1	1,00	0,92	0,81	0,68
$\Delta\sigma$	40 kPa	70 kPa	100 kPa	150 kPa
S (cm)	8	13	16	20

Tableau 8 : borne inférieure des tassements pour $0.042 < G < 0.275$

$\Delta\sigma$ (kPa)	40	70	100	150
σ'_{vo} 50		50	50	50
$\sigma'_{vo}+\Delta\sigma$	90	120	150	200
Beta 0,68		0,68	0,68	0,68
σ'_p 115		115	115	115
OCR 2,30		2,30	2,30	2,30
G 0,042		0,042	0,042	0,042
B 0,73		0,62	0,55	0,46
A		1,32	3,58	4,66
α_1	1,00	1,94	5,26	6,86
$\Delta\sigma$	40 kPa	70 kPa	100 kPa	150 kPa
S (cm)	8	27	104	204

Tableau 9 : borne supérieure des tassements pour $0.042 \leq G < 0.275$

La dispersion des résultats est importante pour les remblais les plus chargés en raison de la dispersion des corrélations donnant σ'_p et G. Si pour s'affranchir de l'incertitude sur G on retient la valeur moyenne $G=0.136$, on obtient les résultats suivants :

Borne inférieure des tassements				
$\Delta\sigma$	40 kPa	70 kPa	100 kPa	150 kPa
S (cm)	8	13	16	20
Borne supérieure des tassements				
$\Delta\sigma$	40 kPa	70 kPa	100 kPa	150 kPa
S (cm)	8	17	41	71

Tableau 10 : calcul des tassements pour $G=0.136$

Dans le cas étudié qui correspond à un sol faiblement surconsolidé, Il apparaît que, si pour les charges faibles à modérées, la méthode traditionnelle donne une estimation correcte des déformations ; pour les charges les plus élevées où le sol est, sur une fraction importante, chargé dans le domaine normalement consolidé, elle peut sous-estimer fortement les tassements.

Si on fixe G l'incertitude sur l'estimation de la borne supérieure des tassements reste forte. Cette incertitude résulte de la dispersion des corrélations entre pl^* et σ'_p et donc de l'incertitude sur la consolidation.

Il faut remarquer qu'en retenant l'estimation « maximisant σ'_p et OCR à partir de pl^* », on reste, pour tous les remblais étudiés ici, dans le domaine surconsolidé et le tassement pressiométrique reste alors proche du tassement étudié par la nouvelle méthode.

L'incertitude sur la consolidation des sols pour une pression limite mesurée est donc première dans l'estimation du tassement et demande à être pour les sols faiblement surconsolidés précisée par des corrélations locales entre pl^* et σ'_p .

4.2 Sol fortement surconsolidé

Calculons maintenant les tassements un remblai de grande largeur apportant une charge de 200 kPa et reposant à la surface

d'un sol argileux surconsolidé baigné par une nappe située à 2 m de profondeur et de caractéristiques :

- pression limite $pl^* = 1$ MPa
- module pressiométrique $E_M = 10$ MPa
- coefficient de Ménard $\alpha = 0,66$
- épaisseur du sol $h = 6$ m

Le tassement obtenu par la méthode pressiométrique est alors $s=8$ cm.

Dans le cas de la méthode proposée, nous avons dans l'axe de la couche compressible : $\sigma'_{vo} = 50$ kPa $\frac{pl^*}{\sigma'_{vo}} = 20$ nous avons

donc : $7,1 < OCR < 12,6$ $355 < \sigma'_p < 630$ kPa ; $\beta=0.35$, nous obtenons alors une valeur de $\alpha_1=1,15$

Le tassement corrigé est alors dans tous les cas $S_{cor}=9$ cm.

L'incidence de la correction est donc, dans le cas d'un sol fortement surconsolidé, faible.

5 CONCLUSION

La méthode proposée permet d'avoir une variation des tassements de consolidation avec la charge conforme aux données expérimentales œdométriques. Pour les charges faibles où le remblai est chargé dans le domaine sur-consolidé où à proximité de la charge de pré-consolidation, les différences avec la méthode de calcul traditionnelle sont faibles. Pour les charges plus importantes, l'approche faite montre que l'approche traditionnelle utilisant la formule (1) peut conduire dans le cas de sol faiblement surconsolidés à une forte sous-estimation des tassements. L'utilisation de la méthode proposée avec des paramètres tirés de corrélation à grande échelle conduit à une incertitude importante sur les résultats pour ces sols très chargés. La précision pourra toutefois être fortement améliorée par l'établissement de corrélations par type de formation entre la pression limite pl^* ou C_u la cohésion non drainée et σ'_p la pression de pré-consolidation. Une analyse plus précise de la relation C_s/C_c serait également utile.

6 REFERENCES

- [1] Philipponat G 1987. *Fondation et ouvrage en terre* Eyrolles, ed. 1987 p. 373
- [2] Leroueil S. and Magnan J.P and Tavenas F.1985. *Remblai sur argiles molles* – Lavoisier Tec. et doc. p. 120
- [3] Cassan M. 1988. *Les essais in situ dans la mécanique des sols*, tome 1 – Eyrolles p. 517
- [4] Cordary D. 1994 *Mécanique des sols* – Lavoisier tec. et doc. p. 326 tome 1