

# PRECISION DES RESULTATS DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

## PRECISION RESULTS OF PRESSUREMETER TEST

Jacques MONNET<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> *Gaiatech, Seyssinet, France*

**RÉSUMÉ** – La présente étude porte sur la détermination des erreurs admissibles sur les paramètres issus de l'essai pressiométrique ( $E_M$ ,  $p_{LM}$ ), pour une meilleure estimation de la précision de la conception des fondations. La théorie des erreurs est utilisée et l'influence de la précision des mesures sur les résultats pressiométrique est indiquée.

**ABSTRACT** – This study concerns the determination of permissible errors on the parameters from the pressuremeter test ( $E_M$ ,  $p_{LM}$ ), for a better estimate of the accuracy of the design of foundations. Error theory is used and the influence of the accuracy of the measurements on the pressuremeter results is indicated.

### 1. Introduction

Le développement de méthodes numériques et la nécessité de quantifier la précision des calculs obligent à préciser les erreurs admissibles sur les données de calcul et en particulier sur les paramètres issus de l'essai pressiométrique ( $E_M$ ,  $p_{LM}$ ), utilisés pour la conception des fondations (AFNOR, 2013).

On suppose que les données du pressiomètre suivent une répartition de Gauss avec une valeur moyenne et un écart type. La théorie des erreurs (GUM, 2008 ; Gachon, 1969 ; Rouaud, 2013) est utilisée et ses relations sont appliquées aux méthodes de détermination standardisées (AFNOR, 2015). Le calcul de l'erreur est finalement appliqué à une série d'essai pressiométriques utilisés comme référence par le Projet National français ARSCOP (Jacquard et Varaksin, 2018). Cette analyse permet de tirer des conclusions sur l'influence de chaque mesure individuelle (pression, volume, diamètre, longueur,...), sur la précision des corrections apportée à la pression et au volume, et finalement sur la précision des paramètres pressiométrique que sont le module pressiométrique  $E_M$  et la pression limite  $p_{LM}$  ce qui est d'un grand intérêt pour le dimensionnement des ouvrages (AFNOR, 2013 ; Monnet, 2016).

### 2. Théorie des erreurs - application au pressiomètre

Il existe une assez grande variabilité des résultats pressiométriques pour le même sol (Jacquard et Varaksin, 2018), liés à divers paramètres mécaniques (précision de la mesure brute des pressions, des volumes, des dimensions de la sonde), de l'interprétation (précision de la plage de pression ou de volume, choix de l'extrapolation) ou de réalisation (qualité du forage ou de l'opérateur) (Bigot, 2004). Cependant la bibliographie concernant le calcul des erreurs appliqué au pressiomètre est limitée et orientée soit vers une analyse de la précision des mesures (Cambridge in Situ, 2011) mais sans aller jusqu'à la précision des grandeurs pressiométriques, soit vers une analyse numérique de la précision (Genetay et Mehdizadeh, 2018), soit par une analyse théorique (Bigot, 2004) mais sans analyse de la pression limite. La présente étude se propose de développer l'approche théorique de la précision du module pressiométrique, de la pression limite et de l'appliquer à des exemples pratiques d'essais de façon à pouvoir prévoir la précision des

résultats pressiométriques liées aux mesures, aux dimensions de la sonde et à l'interprétation.

## 2.1. Notions de Fautes et d'erreur - Composition des erreurs

Nous utilisons les notions suivantes : la **mesure vrai n'existe pas**, il existe toujours une incertitude de mesure liée à l'imperfection de nos sens et/ou de nos instruments ; les **erreurs s'ajoutent toujours**, et ne se retranchent jamais les unes des autres ; **l'erreur est inévitable**, toute mesure est entachée d'une erreur; la **faute est une erreur grossière** liée au non respect du protocole de mesure ; la **tolérance est la limite maximale de l'erreur**, au delà de laquelle on parle de faute.

Bien que la distribution de l'erreur de mesure puisse être variable, on constate que la majorité des erreurs liées à la mesure visuelle d'une quantité se répartissent selon une courbe de Gauss (Gachon, 1969 ; Poreba, 2014), avec une moyenne des mesures  $\bar{X}$  (1) ; un écart type  $\sigma$  ou variance ou Erreur moyenne quadratique  $E_{mq}$  (2) ; une erreur probable  $E_p$  (3) ; une tolérance  $T$  (4). C'est l'hypothèse suivie ici.

La théorie des erreurs peut être trouvée dans (GUM, 2008 ; Lalère, 2011). L'erreur moyenne sur une fonction (5) simple (addition ou soustraction) est calculée comme la somme des carrés de variance de chaque variable (6). Si la fonction est composée (7), son erreur s'obtient par la relation (8).

$$\bar{X} = (\sum_{i=1}^n X_i)/n \quad (1)$$

$$\sigma = E_{mq} = \sqrt{\{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 ]/(n - 1)\}} \quad (2)$$

$$E_p = 2/3 E_{mq} \quad (3)$$

$$T = 4. E_p \quad (4)$$

$$F = x + y - z \quad (5)$$

$$\sigma_F^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \quad (6)$$

$$F = (a. x. b. y)/(c. z) \quad (7)$$

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^n (\partial F / \partial X_i)^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (8)$$

## 2.2. Précision du module pressiométrique $E_M$

### 2.2.1. Formule de calcul du module pressiométrique

Le module pressiométrique est calculé par l'expression (9) sur la plage pseudo élastique entre les points  $p_1$  et  $p_2$ . Pour le module élastique  $E^e$  on utilise les points  $p_3$  et  $p_4$  extrêmes du cycle avec les formules (9) à (12) du module pressiométrique.

Les variables de calcul sont le volume de la sonde  $V_s$  (10) qui dépend de la longueur de la sonde  $l_s$ , du diamètre du tube d'étalonnage  $d_i$ , de la correction en volume  $V_p$ . Les pressions corrigées  $p_1$  et  $p_2$  se calculent par (11) qui dépendent de la pression mesurée  $p_{r1}$ , de la relation de résistance propre de la sonde  $p_{el}(V_e)$  et de la profondeur  $z$  de la sonde dans le forage. Les volumes corrigés  $V_1$  et  $V_2$  se calculent par (12) et dépendent du volume mesuré  $V_{r1}$ , du coefficient de dilatation propre d'appareillage  $a$ , de l'ordonnée à l'origine de la droite de dilatation d'appareillage. Pour plus de précision sur ces différentes variables, on consultera (AFNOR, 2015) .

$$E_M = 2.66. [V_s + (V_1 + V_2)/2]. (p_2 - p_1)/(V_2 - V_1) \quad (9)$$

$$V_s = 0,25. \pi. l_s. d_i^2 - V_p \quad (10)$$

$$p_1 = p_{r1} - p_{el}(V_e) + \gamma_w \cdot z \quad (11)$$

$$V_1 = V_{r1} - a. p_{r1} \quad (12)$$

### 2.2.2. Précision des variables principales

Dans la suite du document le terme erreur désignera l'écart type (au sens gaussien) de l'erreur de mesure. L'erreur sur les variables principales se calcule également par la loi de propagation des erreurs pour les fonctions composées (8). On obtient alors pour le calcul du volume de la sonde  $V_s$  (10): les dérivées par rapport à la longueur de la sonde  $l_s$  (13), par rapport au diamètre du tube de calibration  $d_i$  (14) ; la dérivée par rapport à  $V_p$  est égale (15) ; l'erreur sur le volume de la sonde  $V_s$  (18) dont la définition est (10). A noter que  $V_p$  s'obtient par l'ordonnée à l'origine de la droite de régression. Sa précision suit la même règle que celle de la pression limite. L'erreur moyenne d'estimation sera  $\sigma_r$  (16), l'écart type de l'erreur sur  $V_p$  sera alors (avec  $y = V$  et  $x = p$  et  $\hat{y}$  le volume estimé par la régression linéaire) donné par  $\sigma_{Vp}$  (17). Finalement l'erreur sur la volume de la sonde  $V_s$  sera  $\sigma_{Vs}$  (18), avec  $t$  la fonction de Student correspondant à l'espérance normale.

$$\partial V_s / \partial l_s = 0,25 \cdot \pi \cdot d_i^2 \quad (13)$$

$$\partial V_s / \partial d_i = 0,5 \cdot \pi \cdot l_s \cdot d_i \quad (14)$$

$$\partial V_s / \partial V_p = -1 \quad (15)$$

$$\sigma_r = \sqrt{(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2) / (n - 2)} \quad (16)$$

$$\sigma_{Vp} = t_{(1-\alpha/2), (n-2)} \cdot \sigma_r \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n}\right) + \left\{ \frac{(0 - \bar{x})^2}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]} \right\}} + \sigma_{Vr} = \Delta x \quad (17)$$

$$\sigma_{Vs} = \sqrt{0,0625 \cdot \pi^2 \cdot d_i^4 \cdot \sigma_{l_s}^2 + 0,25 \cdot \pi^2 \cdot l_s^2 \cdot d_i^2 \cdot \sigma_{d_i}^2 + \sigma_{Vp}^2} \quad (18)$$

On peut déterminer l'erreur  $\sigma_p$  (24) sur les pressions corrigées  $p_1$  et  $p_2$  dont la définition est (11), avec  $V_e$  qui peut s'estimer par la courbe polynomiale (19)

$$V_e = a_0 + a_1 \cdot p_{e1} + a_2 \cdot p_{e1}^2 + a_3 \cdot p_{e1}^3 \quad (19)$$

$$\partial V_e / \partial p_{e1} = a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot p_{e1} + 3 \cdot a_3 \cdot p_{e1}^2 \quad (20)$$

$$\partial p_{e1} / \partial V_e = 1 / (a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot p_{e1} + 3 \cdot a_3 \cdot p_{e1}^2) \quad (21)$$

$$\partial p_1 / \partial p_{r1} = 1 \quad (22)$$

$$\partial p_1 / \partial z = \gamma_w \quad (23)$$

$$\sigma_p = \sqrt{[\sigma_{pr}^2 + \sigma_{Ve}^2 / (a_1 + 2 \cdot a_2 \cdot p_e + 3 \cdot a_3 \cdot p_e^2) + \gamma_w^2 \cdot \sigma_z^2]} \quad (24)$$

On trouve la dérivée du volume corrigé  $V_1$  ou  $V_2$  par rapport au volume mesuré  $V_{r1}$  ou  $V_{r2}$  (25), par rapport à la pression mesurée  $p_{r1}$  (26), par rapport au coefficient  $a$  de la régression linéaire (27). L'erreur  $\sigma_V$  (29) sur les volumes corrigés  $V_1$  et  $V_2$  (12) dépend de l'erreur de la pente de la droite de régression  $\sigma_a$  (28) qui est fonction de  $\sigma_r$  l'erreur moyenne d'estimation en régression linéaire (16)

$$\partial V_1 / \partial V_{r1} = 1 \quad (25)$$

$$\partial V_1 / \partial p_{r1} = -a \quad (26)$$

$$\partial V_1 / \partial a = -p_{r1} \quad (27)$$

$$\sigma_a = \sigma_r / \sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]} \quad (28)$$

$$\sigma_{V1} = \sqrt{[\sigma_{Vr1}^2 + a^2 \cdot \sigma_{pr1}^2 + p_{r1}^2 \cdot \sigma_a^2]} \quad (29)$$

### 2.2.3. Précision sur le module Ménard $E_M$

Le calcul d'incertitude nécessite la détermination des dérivées partielles du module  $E_M$  (9) par rapport aux variables principales, par rapport au volume de la sonde  $V_s$  (30), par rapport aux volumes corrigés  $V_1$  et  $V_2$  (31), par rapport aux pressions corrigées  $p_1$  et  $p_2$  (32), ce qui permet d'avoir l'erreur  $\sigma_{EM}$  (33) sur  $E_M$  grâce à la relation de propagation des

erreurs pour les fonctions composées (8) . L'erreur sur le module élastique  $E^e$  est calculée par les mêmes relations :

$$\partial E_M / \partial V_s = 2,66. (p_2 - p_1) / (V_2 - V_1) \quad (30)$$

$$\partial E_M / \partial V_1 = 1,33. (p_2 - p_1) / (V_2 - V_1). \{1 + 2 / (V_2 - V_1) [V_s + (V_1 + V_2) / 2]\} \quad (31)$$

$$\partial E_M / \partial p_1 = 2,66. [V_s + (V_1 + V_2) / 2]. 1 / ((V_2 - V_1)) \quad (32)$$

$$\sigma_{Em} = \{(\partial E_M / \partial V_s)^2. \sigma_{V_s}^2 + 2. (\partial E_M / \partial V_1)^2. \sigma_{V_1}^2 + 2. (\partial E_M / \partial p_1)^2. \sigma_{p_1}^2\}^{0,5} \quad (33)$$

### 2.3. Précision de la pression limite $p_{LM}$

#### 2.3.1. Formule de calcul de la pression limite

La courbe pressiométrique est transformée en une droite par régression linéaire (34) des valeurs corrigées  $\{p ; 1/V\}$ . Cette équation se transforme en une équation hyperbolique (35), ce qui permet de déterminer la pression limite Ménard par (36), avec A pente de la droite de régression en  $V^{-1}$  et B son ordonnée à l'origine :

$$V^{-1} = A. p + B \quad (34)$$

$$p = -B/A + 1/(A. V) \quad (35)$$

$$p_{LM} = -B/A + 1/[A. (V_s + 2. V_1)] \quad (36)$$

#### 2.3.2. Précision de la pression limite

Dans ce cas où la pression limite  $p_{LM}$  et le volume  $V_L$  se situent sur un segment de droite entre deux points de mesure  $P_1$  et  $P_2$  qui définissent un segment de droite de pente A et d'ordonnée à l'origine B. L'équation (34) se représente dans la théorie par une droite de régression (37), avec y pour  $V^{-1}$ , x pour p,  $\beta_0$  pour B et  $\beta_1$  pour A. Comme on cherche l'erreur sur  $p_{LM}$ , il faut déterminer l'erreur de x et se ramener à l'équation théorique (38), dont les coefficients  $\beta'_0$  et  $\beta'_1$  sont donnés par (39) et (40) ( Rouaud, 2013). L'intervalle de confiance de x, est trouvé pour un risque donné  $\alpha$  à l'aide de la relation  $\Delta x$  (42) dans laquelle t représente la loi de Student à n-2 degré de liberté. Pour se ramener au cas du pressiomètre et de la pression limite, on peut remarquer que la variable y correspond à  $V_L^{-1}$ ,  $\bar{y}$  correspond à  $\bar{V}^{-1}$ ,  $y_i$  correspond à  $V_i^{-1}$ ,  $\Delta x$  correspond à la variation admissible de la pression  $p_{LM}$ , n correspond au nombre de mesures. Si on fait l'hypothèse d'une répartition gaussienne des mesures, on constate que la variance correspond à une espérance de mesure de 34,1%. La relation théorique qui permet de déterminer la variation de la pression limite avec une probabilité de  $\alpha = 34,1\%$  et une fonction de student t probabiliste de loi normale est  $\sigma_{pLM}$  (43).

$$\hat{y} = \beta_1 . x + \beta_0 \quad (37)$$

$$\tilde{x} = \beta'_1 . y + \beta'_0 \quad (38)$$

$$\beta'_1 = [\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) . (y_i - \bar{y})] / [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2] \quad (39)$$

$$\beta'_0 = \bar{x} - \beta'_1 . \bar{y} \quad (40)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\{(\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2) / (n - 2)\}} \quad (41)$$

$$\Delta x = t_{(1-\alpha/2)}^{(n-2)} . \sigma_r . \sqrt{\{1 + 1/n + (y - \bar{y})^2 / [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]\}} \quad (42)$$

$$\sigma_{pLM} = t_{(1-\alpha/2)}^{(n-2)} . \sigma_r . \sqrt{\{1 + 1/n + (y - \bar{y})^2 / [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]\}} + \sqrt{[(\partial \sigma_{pLM} / \partial V_L)^2 . \sigma_{V_L}^2 + (\partial \sigma_{pLM} / \partial V_1)^2 . \sigma_{V_1}^2]} \quad (43)$$

### 3. Précision du module Ménard EM sur les exemples types

Les exemples type ont été fourni par Fondasol (Jacquard et Varaksin, 2018). Dans les calculs suivants, nous utilisons (Tableau 1) les erreurs des procédures A et B (ou écart

type) déduits de la norme (AFNOR, 2015). L'erreur de la procédure de type C a été proposée par les constructeurs de matériels pressiométriques (Arsonnet et al., 2011)

Tableau 1 : Erreurs utilisées dans les calculs des exemples types

| Variable          | Unité             | Procédure A | Procédure B | Procédure C |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Longueur          | mm                | 1           | 1           | 1           |
| Diam. tube calib. | mm                | 0,1         | 0,1         | 0,1         |
| Profondeur        | m                 | 0,2         | 0,2         | 0,2         |
| Temps             | s                 | 1           | 0,5         | 0,5         |
| Pression          | kPa               | 25          | 15          | 10          |
| Volume            | cm <sup>3</sup>   | 2           | 1           | 0,1         |
| Poids Volumique   | kN/m <sup>3</sup> | 0,1         | 0,1         | 0,1         |

### 3.1. Erreur de $E_M$ Procédure A pour $\sigma_p=25kPa$ et $\sigma_v=2cm^3$

Une première série de calculs suppose que l'opérateur note les mesures visuellement avec une erreur de lecture des pressions  $p_r$  de 25kPa et une erreur sur les volumes  $V_r$  de 2cm<sup>3</sup>, L'erreur sur le cote  $z$  de la sonde est supposée égale à 0,2m, On trouve dans le Tableau 2 l'erreur pour les variables principales et dans le Tableau 3 le calcul de l'erreur pour le module pressiométrique qui varie entre 0,1 et 18%,

Tableau 2 : Erreur pour les variables principales et la procédure A

|                                       | Valeur | Erreur |
|---------------------------------------|--------|--------|
| $d_i$ (mm)                            | 66     | 0,1    |
| $l_s$ (mm)                            | 210    | 1      |
| $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> ) à 20° | 97,89  | 0,1    |
| $V_c$ (cm <sup>3</sup> )              | 144,8  | 3,6    |
| $V_s$ (cm <sup>3</sup> )              | 520,7  | 13,9   |

La détermination du volume de la sonde par l'essai d'expansion propre (résistance) est indiquée pour l'essai dans le forage A à 29m (Figure 1) pour l'essai dans le forage E à 1,5m (Figure 2), Sur ces figures, il a été porté également les droites Minimum et Maximum correspondant à la droite moyenne +/- un écart type (34,1% de précision). On

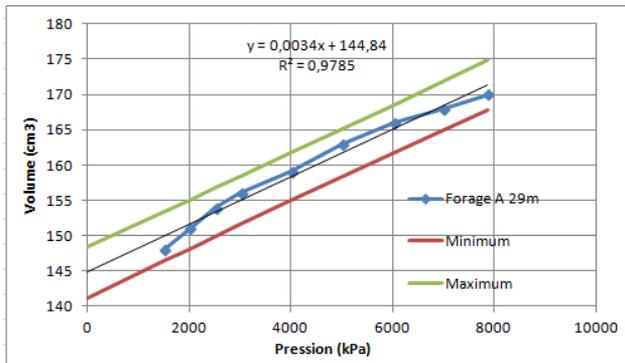


Figure 1 : Précision de  $V_p$  par la régression linéaire liée la dilatation propre (calibration) - Essai à 29m, sondage A

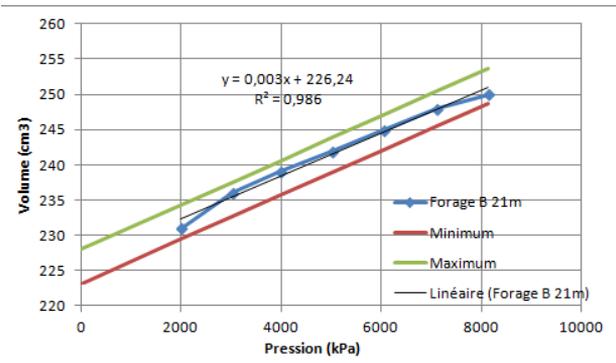


Figure 2 : Précision de  $V_p$  par la régression linéaire liée la dilatation propre (calibration) - Essai à 1,5m, sondage E

remarque une erreur sur le volume  $V_p$  liée à la régression linéaire  $\sigma_{Vp}$  (17) plus importante (col.3, Tableau 3) que celle sur les volumes unitaires de la procédure A (col.3, lin,7, Tableau 1) ; l'erreur liée à la régression linéaire  $\sigma_{Vp}$  n'est pas plus faible si la précision est meilleure, Les valeurs de  $\sigma_{Vs}$  (18) ne changent pas quand on passe de la procédure A à B ou C (col.4, Tableau 3) ; il existe une erreur irréductible liée à la procédure de régression linéaire qui ne peut pas être réduite par l'amélioration de la qualité de la mesure (voir

col.4, Tableau 3 à Tableau 5). L'amélioration de la précision passe par une meilleure approximation de  $V_p$  qui pourrait être affinée par une approximation parabolique plutôt que linéaire (Figure 1). La variance expérimentale du module Ménard des essais types est portée  $\sigma_{E_{exp}}$  col.12. Par comparaison la variance calculée  $\sigma_{EM}$  col.8 montre une erreur des essais B plus faible. Ceci est sans doute lié à la variabilité du choix de  $p_1$  et  $p_2$  qui est supérieure expérimentalement à 25kPa.

Tableau 3 : Calcul de précision du module pressiométrique  $E_M$ ; procédure A

| Eq,<br>For, | Profm | $\sigma_{V_p}$<br>cm <sup>3</sup><br>(17) | $\sigma_{V_s}$<br>cm <sup>3</sup><br>(18) | a<br>cm <sup>3</sup> /kPa | $\sigma_a$<br>cm <sup>3</sup> /kPa<br>(28) | $E_M$<br>MPa<br>(9) | $\sigma_{EM}$<br>MPa<br>(33) | Err,<br>rel,<br>% | Tol,<br>MPa | $E_{ExpMoy}$<br>MPa | $\sigma_{E_{exp}}$<br>MPa |
|-------------|-------|---|---|---------------------------|--|---------------------|------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| A           | 29    | 3,6                                       | 7,7                                       | 3,380                     | 0,1891                                     | 152,3               | 9,6                          | 6,3               | 26,8        | 133                 | 13,3                      |
| B           | 21    | 4,5                                       | 8,6                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 21,6                | 0,8                          | 3,9               | 2,3         | 24                  | 4,4                       |
| B           | 22    | 4,5                                       | 8,6                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 20,6                | 1,8                          | 8,9               | 4,8         | 21,8                | 5,35                      |
| E           | 1,5   | 2,6                                       | 6,7                                       | 1,411                     | 0,1282                                     | 5,3                 | 0,3                          | 6,5               | 2,4         | 4,99                | 0,3                       |

### 3.2. Erreur de $E_M$ Procédure B pour $\sigma_p=15kPa$ et $\sigma_v=1cm^3$

Une seconde série de calcul suppose des mesures réalisées automatiquement avec une erreur de lecture des pressions  $p_r$  de 15kPa et une erreur sur les volumes  $V_r$  de 1cm<sup>3</sup>, L'erreur sur le cote z de la sonde est égale à 0,2m (Tableau 4). On note une diminution de l'erreur sur le module Ménard  $\sigma_{EM}$  (col.8, Tableau 4) des essais A et B.

Tableau 4 : Calcul de précision du module pressiométrique  $E_M$ ; procédure B

| Eq,<br>For, | Profm | $\sigma_{V_p}$<br>cm <sup>3</sup><br>(17) | $\sigma_{V_s}$<br>cm <sup>3</sup><br>(18) | a<br>cm <sup>3</sup> /kPa | $\sigma_a$<br>cm <sup>3</sup> /kPa<br>(28) | $E_M$<br>MPa<br>(9) | $\sigma_{EM}$<br>MPa<br>(33) | Err,<br>rel,<br>% | Tol,<br>MPa | $E_{ExpMoy}$<br>MPa | $\sigma_{E_{exp}}$<br>MPa |
|-------------|-------|---|---|---------------------------|--|---------------------|------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| A           | 29    | 2,6                                       | 6,7                                       | 3,380                     | 0,1891                                     | 152,3               | 5,0                          | 3,2               | 11,9        | 133                 | 13,3                      |
| B           | 21    | 3,5                                       | 7,6                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 21,6                | 0,5                          | 2,2               | 1,3         | 24                  | 4,4                       |
| B           | 22    | 3,5                                       | 7,6                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 20,6                | 1,0                          | 4,9               | 2,7         | 21,8                | 5,35                      |
| E           | 1,5   | 1,6                                       | 5,7                                       | 1,411                     | 0,1282                                     | 5,3                 | 0,5                          | 9,9               | 1,4         | 4,99                | 0,3                       |

### 3.3. Erreur de $E_M$ Procédure C pour $\sigma_p=10kPa$ et $\sigma_v=0,1cm^3$

Une troisième série fait l'hypothèse que les mesures sont réalisées automatiquement avec une erreur de lecture des pressions  $p_r$  de 10kPa et une erreur sur les volumes  $V_r$  de 0,1cm<sup>3</sup>. L'erreur de la cote z de la sonde est égale à 0,1m (Tableau 5). Il y a une amélioration qui permet presque de doubler la précision du module Ménard par rapport à la procédure B.

Tableau 5 : Calcul de précision du module pressiométrique  $E_M$ ; procédure C

| Eq,<br>For, | Profm | $\sigma_{V_p}$<br>cm <sup>3</sup><br>(17) | $\sigma_{V_s}$<br>cm <sup>3</sup><br>(18) | a<br>cm <sup>3</sup> /kPa | $\sigma_a$<br>cm <sup>3</sup> /kPa<br>(28) | $E_M$<br>MPa<br>(9) | $\sigma_{EM}$<br>MPa<br>(33) | Err,<br>rel,<br>% | Tol,<br>MPa | $E_{ExpMoy}$<br>MPa | $\sigma_{E_{exp}}$<br>MPa |
|-------------|-------|---|---|---------------------------|--|---------------------|------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| A           | 29    | 1,7                                       | 5,8                                       | 3,380                     | 0,1891                                     | 152,3               | 1,5                          | 1,0               | 4,0         | 133                 | 13,3                      |
| B           | 21    | 2,6                                       | 6,7                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 21,6                | 0,3                          | 1,2               | 1,3         | 24                  | 4,4                       |
| B           | 22    | 2,6                                       | 6,7                                       | 3,470                     | 0,2793                                     | 20,6                | 0,5                          | 2,7               | 2,7         | 21,8                | 5,35                      |
| E           | 1,5   | 0,7                                       | 4,8                                       | 1,411                     | 0,1282                                     | 5,3                 | 0,3                          | 6,7               | 1,4         | 4,99                | 0,3                       |

## 4. Erreur de la pression limite $p_{LM}$ sur les exemples types

### 4.1. Par régression linéaire $V^1$ pour $\sigma_p=25kPa$ et $\sigma_v=2cm^3$ Procédure A

Les calculs de l'erreur sont fait à partir de l'équation  $\sigma_{p_{LM}}$ (43) qui tient compte de

l'incertitude de régression linéaire  $\sigma_r$  (41) et à l'incertitude des pressions et volumes. On constate (Figure 3 - Figure 6) et (Tableau 6 - Tableau 8) un alignement linéaire marqué des points expérimentaux et une faible écart des limites hautes et basses liées à la régression linéaire (calculée pour une variation de 34,1%) ; il n'y a aucune influence de l'erreur de la mesure de pression et de volume sur l'erreur de la pression limite ; celle-ci est seulement affectée par la qualité de l'alignement des points après la pression  $p_2$ , c'est-à-dire par la relation (43) et la médiocre précision sur  $V_s$  ; l'erreur théorique (col.5, Tableau 6) est plus faible que l'erreur des essais types (col.9, Tableau 6) sans doute liée une plus grande variabilité expérimentale de la pression de fluage, supérieure à 25kPa.

Tableau 6 : Calcul de précision de la pression limite  $p_{LM}$  par régression linéaire; procédure A

| Eq,<br>For, | Profondeur<br>m | $\sigma_r$<br>MPa<br>(41) | $p_{LM}$<br>MPa<br>(36) | $\sigma_{pLM}$<br>MPa<br>(43) | Erreur<br>relative<br>% | Tolérance<br>MPa<br>(4) | $p_{LMMoy}$<br>MPa | $\sigma_{exp}$<br>MPa |
|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| A           | 29              | 0,08                      | 15,4                    | 0,32                          | 0,32                    | 2,0                     | 11,2               | 2,19                  |
| B           | 21              | 0,02                      | 3,9                     | 0,17                          | 0,17                    | 4,3                     | 3,8                | 0,29                  |
| B           | 22              | 0,01                      | 3,0                     | 0,06                          | 0,06                    | 2,0                     | 3,0                | 0,34                  |
| E           | 1,5             | 0,02                      | 0,79                    | 0,06                          | 0,06                    | 7,5                     | 0,77               | 0,06                  |

#### 4.2. Par régression linéaire $V^{-1}$ pour $\sigma_p=15kPa$ et $\sigma_v=1cm^3$ - Procédure B

Tableau 7 : Calcul de précision de la pression limite  $p_{LM}$  par régression linéaire; procédure B

| Eq,<br>For, | Profondeur<br>m | $\sigma_r$<br>MPa<br>(41) | $p_{LM}$<br>MPa<br>(36) | $\sigma_{pLM}$<br>MPa<br>(43) | Erreur<br>relative<br>% | Tolérance<br>MPa<br>(4) | $p_{LMMoy}$<br>MPa | $\sigma_{exp}$<br>MPa |
|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| A           | 29              | 0,08                      | 15,4                    | 0,31                          | 0,31                    | 2,0                     | 11,2               | 2,19                  |
| B           | 21              | 0,07                      | 3,9                     | 0,16                          | 0,16                    | 4,1                     | 3,8                | 0,29                  |
| B           | 22              | 0,01                      | 3,0                     | 0,05                          | 0,05                    | 1,7                     | 3,0                | 0,34                  |
| E           | 1,5             | 0,01                      | 0,79                    | 0,05                          | 0,05                    | 6,3                     | 0,77               | 0,06                  |

#### 4.3. Par régression linéaire $V^{-1}$ pour $\sigma_p=10kPa$ et $\sigma_v=0,1cm^3$ - Procédure C

Tableau 8 : Calcul de précision de la pression limite  $p_{LM}$  par régression linéaire; procédure C

| Eq,<br>For, | Profondeur<br>m | $\sigma_r$<br>MPa<br>(41) | $p_{LM}$<br>MPa<br>(36) | $\sigma_{pLM}$<br>MPa<br>(43) | Erreur<br>relative<br>% | Tolérance<br>MPa<br>(4) | $p_{LMMoy}$<br>MPa | $\sigma_{exp}$<br>MPa |
|-------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|
| A           | 29              | 0,08                      | 15,4                    | 0,30                          | 0,30                    | 1,9                     | 11,2               | 2,19                  |
| B           | 21              | 0,07                      | 3,9                     | 0,15                          | 0,15                    | 3,8                     | 3,8                | 0,29                  |
| B           | 22              | 0,01                      | 3,0                     | 0,04                          | 0,04                    | 1,3                     | 3,0                | 0,34                  |
| E           | 1,5             | 0,01                      | 0,79                    | 0,04                          | 0,04                    | 5,0                     | 0,77               | 0,06                  |

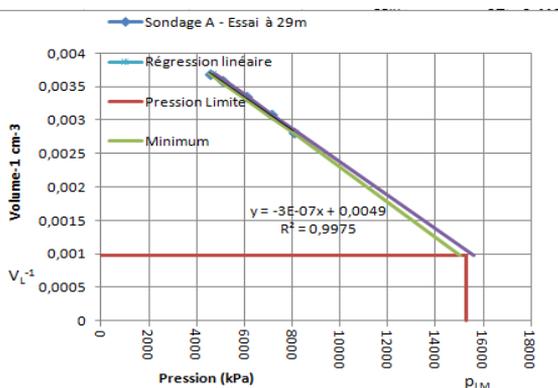


Figure 3 : Précision de la pression limite  $p_{LM}$  - Essai à 29m, sondage A

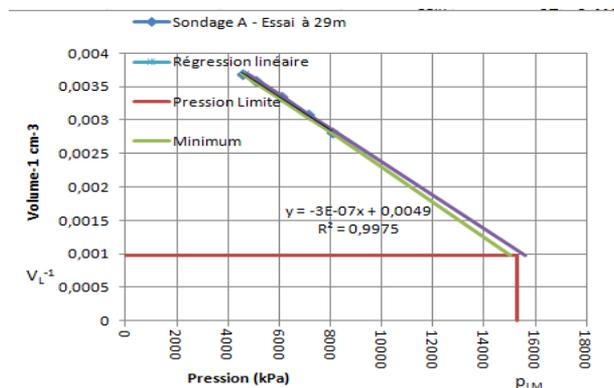


Figure 4 : Précision de la pression limite  $p_{LM}$  - Essai à 21m, sondage B

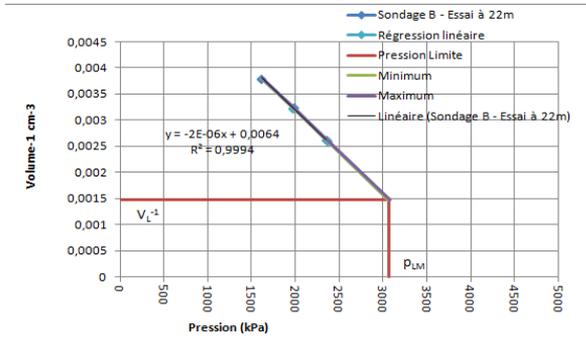


Figure 5 : Précision de la pression limite  $p_{LM}$  - Essai à 22m, sondage B

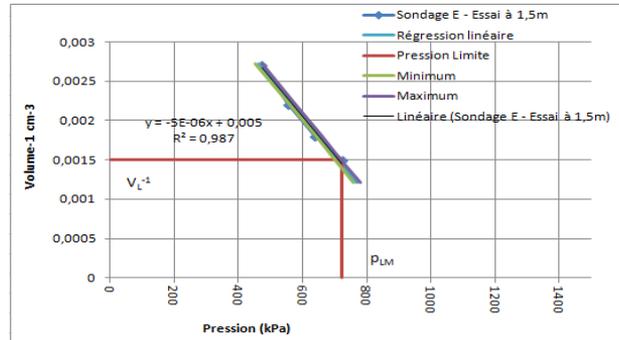


Figure 6 : Précision de la la pression limite  $p_{LM}$  - Essai à 1,5m, sondage E

## 5. Conclusion

Pour les trois classes de précisions choisies, le calcul de l'erreur liée aux résultats pressiométriques (module pressiométrique et pression limite) a pu être mené par l'analyse théorique et validée sur un exemple pratique d'essais. Pour le module pressiométrique, l'analyse montre que l'erreur est liée à l'erreur unitaire des pressions et volumes, mais plus encore à l'erreur liée au volume unitaire de la sonde et au choix des pressions  $p_1$  et  $p_2$ . Paradoxalement, on constate également une meilleure précision pour les fortes valeurs du module pressiométrique. La précision du module cyclique suit les mêmes règles que celle du module pressiométrique. Pour la pression limite, l'analyse montre une précision qui n'est pas liée à la précision des mesures de pression et de volume, mais plutôt à la variabilité de la pression de fluage qui affecte la précision sur la pression limite  $p_{LM}$ . L'auteur remercie le Projet National ARSCOP pour son soutien financier.

## 6. Bibliographie

- AFNOR, 2015. NF EN ISO 22476-4 Essai pressiométrique Ménard. AFNOR, Reconnaissance et essais géotechniques.
- AFNOR, 2013. NF P94-261 Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'ap. nat. de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles - Calcul géotechnique.
- Arsonnet, G., Baud, J.-P., Gambin, M., Heintz, R., 2011. L'HyperPac 25 MPa comble le vide entre le pressiomètre Ménard et le dilatomètre, 15th Eur. Conf. SMGE, Athènes.
- Bigot, G., 2004. Incertitude type associée au module pressiométrique  $E_m$ . Groupe Miroir Français Essais Géotechniques.
- Cambridge in Situ, 2011. A compilation of the results of ten tests in a variety of materials, selected to show what can be derived from careful pressuremeter testing.
- Gachon, J.-C., 1969. Cours de topographie. INSA, Lyon.
- Genetay, E., Mehdizadeh, R., 2018. Quantification de l'incertitude sur le module pressiométrique de Ménard due aux erreurs, 10èmes jour. Fiab. Mat. Struct., Bordeaux.
- GUM, 2008. Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. JCGM 100, 132.
- Jacquard, C., Varaksin, S., 2018. Rapport d'analyse de l'enquête relative à la pratique des essais pressiométriques. ARSCOP - Fondasol.
- Lalère, B., 2011. Estimation de l'incertitude de mesure appliquée aux résultats de mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau. LNE - ONEMA L010705, 40.
- Monnet, J., 2016. Les essais in situ en géotechnique, ISTE Edition. ed, Génie Civil et Géomécanique. 978-2-85978-522-2.
- Poreba, M., 2014. Qualification et amélioration de la précision de systèmes de balayage laser mobiles par extraction d'arêtes. Paris-Tech, Paris.
- Rouaud, M., 2013. Calcul d'incertitudes. Creative Commons.