

## **ANALYSE DU CHEMIN DE CONTRAINTES AUTOUR DU PRESSIOMETRE STRESS PATH ANALYSIS AROUND PRESSUREMETER**

Younes ABED<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie-Civil , Faculté de Technologie, Université de Blida1, Algérie

**RESUME :** Le travail présenté est basé sur une analyse du comportement à court terme des sols purement cohérents autour du pressiomètre. Une description de la loi de comportement du sol utilisée est présentée. Le sol est supposé suivre un modèle élastoplastique conforme à la théorie des matériaux standards généralisés. Une visualisation des chemins de contraintes, en tout point de la discrétisation choisie et pour différents taux de chargement et de déchargement, est présentée. Les résultats obtenus nous ont permis de tirer quelques remarques sur l'évolution des contraintes autour du pressiomètre.

**ABSTRACT:** The work presented here is based on a behaviour analysis of cohesionless soil around pressuremeter probe at short term behaviour. The used elastoplastic model is supposed in accordance to the generalised standard materials theory. We illustrate the stress levels on discretisation area at different rates of loading and unloading cases. Obtained results allow deducing some remarks.

### **1. Introduction**

Le comportement des argiles saturées en conditions non drainées (comportement à court terme) est analogue à celui de certains métaux ductiles tels que l'acier doux (Habib, 1953). Par conséquent, l'utilisation du modèle élastoplastique de Prager généralisé associé au critère de rupture de Von Mises indépendant de la contrainte moyenne est commode.

Le modèle est ensuite introduit dans un code de calcul. Le calage de la réponse du modèle sur la courbe pressiométrique expérimentale permet la détermination des paramètres du modèle, en particulier la cohésion non drainée des sols. L'essai pressiométrique est généralement assimilé à l'expansion d'une cavité cylindrique infinie à l'intérieur d'un milieu uniforme infini en utilisant des solutions analytiques ou des modèles numériques approximatifs (Radhi & Alzubaidi, 2015), (Zhang et al, 2013) .

Enfin, une comparaison des résultats obtenus par l'approche proposée et ceux fournis par d'autres méthodes et essais est présentée. Une visualisation des chemins de contraintes en tout point de la discrétisation choisie et pour différents taux de chargement et de déchargement est présentée. Les résultats obtenus nous ont permis de tirer quelques remarques sur l'évolution des contraintes autour du pressiomètre, telles que l'évolution de la zone plastifiée autour de la sonde pressiométrique avec le taux de chargement,

### **2. Position Du Problème**

Les hypothèses de petites déformations et de déformation plane dans la direction z de l'axe du forage ( $\varepsilon_z=0$ , figure 1) sont prises en compte. Cette dernière hypothèse semble justifiée dans le cas d'un élancement de la sonde pressiométrique important ( $L/D \geq 4$ ).

## Analyse du chemin de contraintes autour du pressiomètre

Le problème aux limites défini par l'essai pressiométrique est donc un problème à la fois en déformation plane et axisymétrique ; c'est donc un problème défini par les seuls variables suivantes (figure 01)

$r$  : coordonnée radiale,

$U_r$  : déplacement radial,

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  : contraintes principales en coordonnées cylindriques.

### 2.1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites définissant l'essai pressiométrique peuvent alors s'écrire, pour un incrément de déplacement radial  $\Delta U_0$  imposé sur les bords du forage ( $r=r_0$ ) :

$$\Delta U_r = \Delta U_0 \quad \text{pour } r = r_0 \quad (1.a)$$

$$\Delta U_r = 0 \quad \text{pour } r = r_\infty \quad (1.b)$$

### 2.2. Champ de déformations

Le champ des déformations  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_\theta$  est défini à partir de la variable  $U_r$  :

$$\Delta \varepsilon_r = -\frac{d}{dr}(\Delta U_r) \quad (2.a)$$

$$\Delta \varepsilon_\theta = -\frac{\Delta U_r}{r} \quad (2.b)$$

### 2.3. Equation d'équilibre

Compte tenu de l'axisymétrie, seule l'équation d'équilibre suivant la direction radiale est non dégénérée, et s'écrit :

$$\frac{d}{dr}(\Delta \sigma_r) + \frac{\Delta \sigma_r - \Delta \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3)$$

Pour résoudre cette équation il faut définir la loi de comportement.

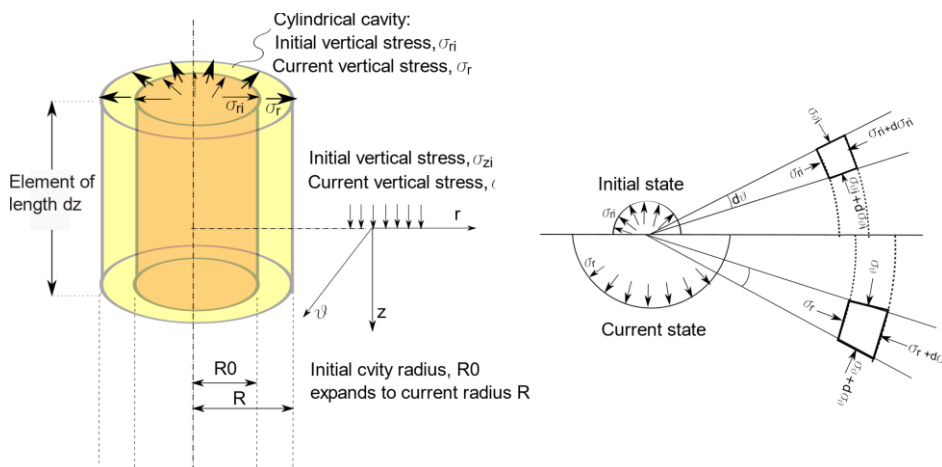


Figure 1: Equilibre d'un élément du sol autour du pressiomètre

## 3. Modèle de comportement

La loi de comportement proposée est basée sur le modèle de Prager généralisé. Dans cette version et afin de décrire le comportement à court terme des argiles, le modèle est associé au critère de rupture de Von Mises. Les contraintes qui interviennent dans la modélisation sont donc des contraintes totales (Bahar et Abed, 1996 ; Abed, 1997).

Puisque il s'agit d'un essai rapide réalisé dans un matériau à faible perméabilité, le critère utilisé sera un critère qui tient compte de la condition d'incompressibilité plastique c'est à dire sans variation de volume, ce qui montre que seul le déviateur qui intervient dans la rupture. Le domaine limité par la surface de charge garde la même taille (sans écrouissage isotrope), mais la surface de charge se translate dans l'espace des contraintes (écrouissage cinématique), le critère qui vérifie cette particularité aura une forme géométrique qui a la même section le long du plan déviatoire.

Pour le présent travail, on a choisi le critère de Von-Mises qui est un cylindre à génératrices parallèles à la première trisectrice comme est illustrée sur la figure 2. Von-Mises (1913) proposa, que la plastification ne commence que quand le 2<sup>ème</sup> invariant du tenseur déviatorique  $J'_2$  atteint une valeur limite:

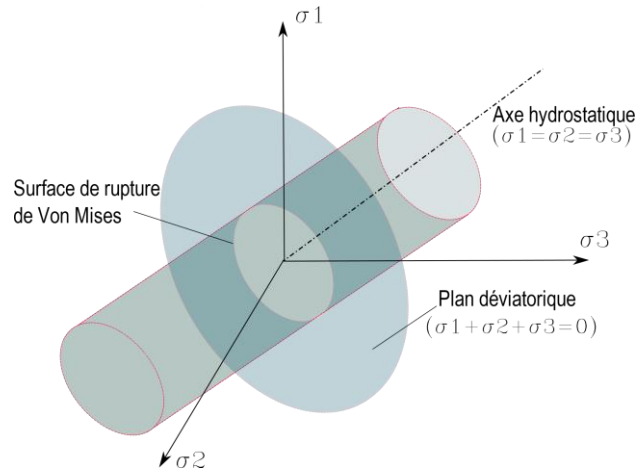


Figure 2: Critère de Von-Mises

### 3.1. Résolution du problème dans la zone élastique

La résolution de l'équation (3) dans la zone à déformations élastique pour  $\nu=0.5$  est donnée par (Bouanga, 1990):

$$d\varepsilon_r = \frac{r_e}{r'} dU_e \quad d\varepsilon_\theta = -\frac{r_e}{r'} dU_e \quad d\varepsilon_z = 0 \quad (4a)$$

$$d\sigma_r = \frac{2}{3} E \frac{r_e}{r'} dU_e \quad d\sigma_\theta = -\frac{2}{3} E \frac{r_e}{r'} dU_e \quad d\sigma_z = 0 \quad (4b)$$

Avec,

$U_e$ : Déplacement élastique;

$r_e$ : Rayon de la zone élastique

La déformation s'effectue donc sans variation de volume et à contrainte moyenne constante.

### 3.2. Résolution du problème dans la zone élastoplastique

## Analyse du chemin de contraintes autour du pressiomètre

L'incompressibilité plastique impose que le critère soit représenté par un cylindre dans l'espace des contraintes principales. La règle de normalité exige donc que l'incrément de la déformation plastique  $d\varepsilon_{ij}^p$  soit situé dans le plan déviatoire. Le vecteur  $d\varepsilon_{ij}^p$  est donc normal à la section de la surface de charge, c'est-à-dire au cercle du centre  $X_{ij}$  et de rayon  $R_k$ , puisque le critère choisi est celui de Von Mises. Mais d'autre part la condition de déformation plane impose que le chemin en déformation soit normal à l'axe  $\varepsilon_z$ .

Au cours de la sollicitation, le point de charge P, de coordonnées  $\sigma_{ij}$ , entraîne dans son déplacement les différentes surfaces de charge qu'il rencontre successivement, ces dernières et dans le plan déviatoire subissent une translation en suivant l'évolution des variables d'érouissage  $X_{ij}$  (centres des cercles), indépendamment de la direction du chemin de sollicitation (matériaux isotrope).

Les deux conditions réunies font que la projection du chemin de sollicitation en contraintes sur le plan déviatoire est un chemin radial perpendiculaire à l'axe  $S_z$ . En définitive on aboutit aux relations suivantes (Bahar et Abed, 1996):

$$d\varepsilon_r = C(r)dS_r; \quad d\varepsilon_\theta = -d\varepsilon_r; \quad d\varepsilon_z = 0 \quad (5a)$$

$$dS_r = \frac{d\varepsilon_r}{C(r)} \quad dS_\theta = -dS_r \quad dS_z = 0 \quad (5b)$$

Avec :

$$C(r) = \frac{3}{2E} + 2 \sum_{k=1}^{n^*} \frac{J_k}{S_k^2} (S_r - X_r(k))(S_r - X_r(k)) \quad (6)$$

Où :

$S_k$  : Seuil associé au maillon d'indice k, qui s'exprime donc en fonction de  $C_u$ .

$S_r$  : Contrainte déviatorique radiale ;

$S_\theta$  : Contrainte déviatorique orthoradiale ;

$K$  : nombre de seuils (surfaces de charge)

$n^*$  : nombre de surfaces de charge activées.

$E$  : module d'élasticité initial.

$J_k$  : complaisance intervenant dans la loi de comportement.

$X_r(k)$  : variable d'érouissage cinématique.

Pour résoudre complètement le problème, on doit introduire une variation de pression isotrope  $dp(r)$  :

$$d\sigma_r = dp(r) + dS_r \quad (7a)$$

$$d\sigma_\theta = dp(r) + dS_\theta \quad (7b)$$

$$d\sigma_z = dp(r) \quad (7c)$$

Cette pression isotrope est déterminée à l'aide des équations d'équilibre et des conditions aux limites :

$$d\sigma(r_0) = \Delta P_0 \quad \text{et} \quad d\sigma(r_e) = 0 \quad (8)$$

On obtient finalement :

$$dp(r) = r_0 dU_0 \left[ \left( \frac{1}{r C(r)} \right)_{r_0}^{r_e} + 2 \int_{r_0}^{r_e} \frac{dr}{r^3 C(r)} \right] \quad (9a)$$

$$dU_0 = \frac{\Delta P_0}{\frac{r_0}{r^2 c(r)} + 2r_0 \int_r^{r_0} \frac{dr}{r^3 c(r)}} \quad (9b)$$

#### 4. Chemins de contraintes autour du pressiomètre

La méthode proposée permet de visualiser les chemins de contraintes en tout point du milieu continu choisi. Pour effectuer cette analyse, nous avons utilisé les paramètres identifiés à partir de l'essai pressiométrique (PAF) réalisé sur l'argile de Cran (France) (Boubanga, 1990).

La distribution des contraintes principales  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  et  $\sigma_z$  dans le massif pour différents taux de chargement est représentée sur les figures (3, 4 et 5). La figure 8 montre que l'évolution de ces contraintes est importante dans un rayon d'environ 50 cm autour de la sonde pressiométrique (sonde autoforeuse:  $R_0 = 8$  cm et  $L = 32$  cm). On remarque ainsi sur la figure (3) que la contrainte orthoradiale  $\sigma_\theta$  décroît au début de l'expansion, mais dès qu'apparaissent des déformations plastiques, elle commence à s'accroître. La contrainte verticale  $\sigma_z$ , reste constante dans la phase élastique, mais elle est croissante dans la phase plastique (figure 8).

Dans le cas d'un état de contraintes initial isotrope (cas de notre étude), l'hypothèse consistant à dire que tous les points du massif suivent le même chemin de contraintes mais à des vitesses différentes est bien vérifiée par les résultats obtenus (figure 7).

La figure 6 donne le chemin des contraintes au bord de la sonde. On y trouve la variation de la contrainte orthoradiale  $\sigma_\theta$  en fonction de la contrainte radiale  $\sigma_r$ ; on constate que la courbe  $\sigma_\theta = f(\sigma_r)$  présente un minimum qui correspond à la valeur maximale du déviateur  $q$ .

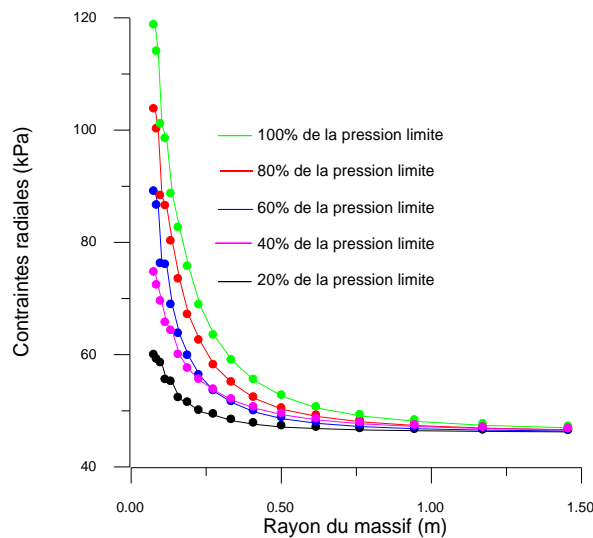


Figure 3: Evolution de la contrainte radiale  $\sigma_r$

## Analyse du chemin de contraintes autour du pressiomètre

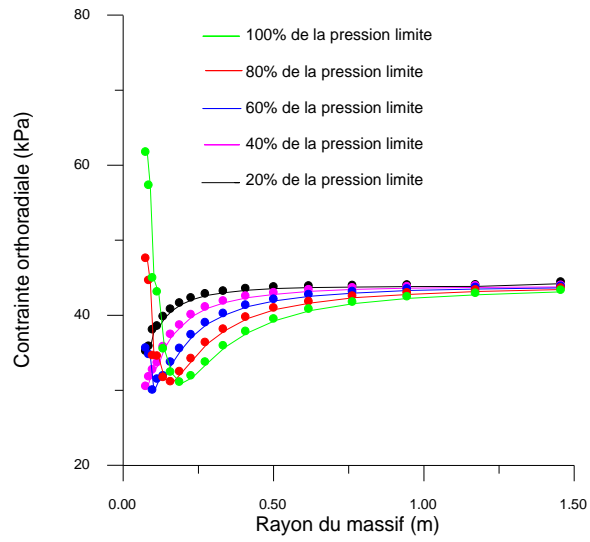


Figure 4: Evolution de la contrainte orthoradiale  $\sigma_\theta$

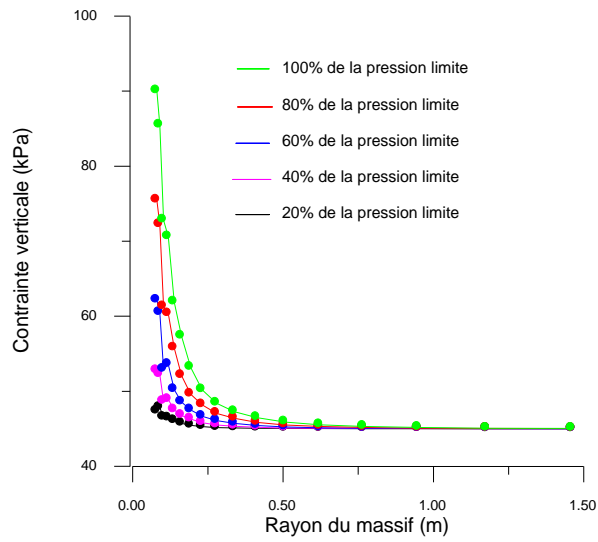


Figure 5 : Evolution de la contrainte verticale  $\sigma_z$

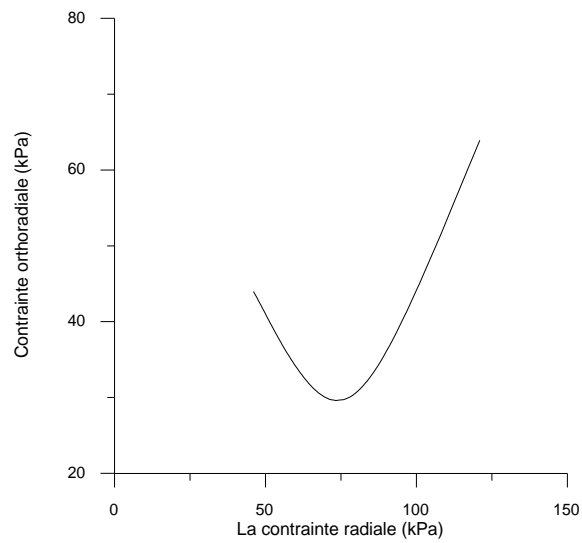


Figure 6: Evolution de la contrainte  $\sigma_\theta$  en fonction de  $\sigma_r$

## Analyse du chemin de contraintes autour du pressiomètre

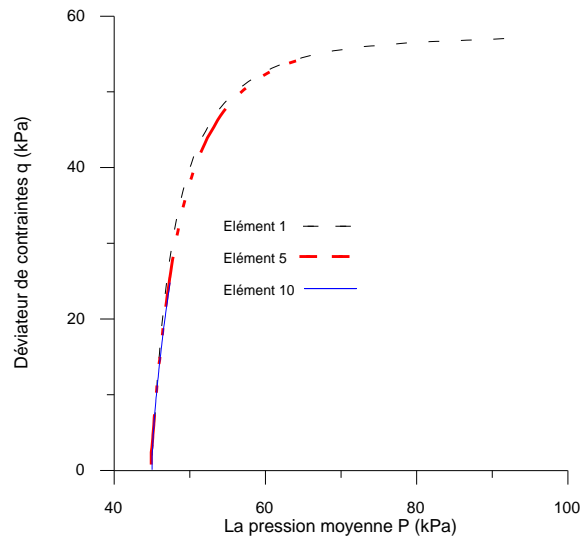


Figure 7: Chemin de contraintes à différents points du massif

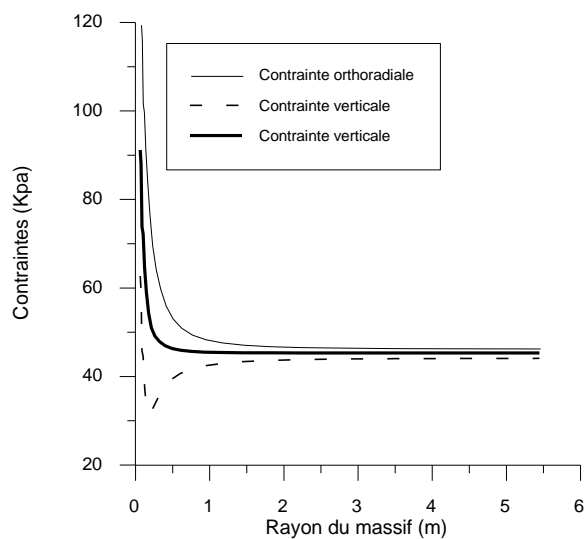


Figure 8 : Contraintes principales à la fin du chargement

## 5. Conclusion

Le modèle proposé dérivant du modèle de Prager généralisé, est utilisé pour décrire le comportement à court-terme des argiles en respectant la condition d'incompressibilité et la théorie des matériaux standards généralisés. L'application au cas du chemin pressiométrique dans l'hypothèse de déformation plane est possible en utilisant le critère de Von Mises. On arrive à un modèle dépendant seulement de trois paramètres : le module tangent initial  $E$ , la cohésion non drainée  $C_u$  et le paramètre  $A$  définissant la courbe contrainte-déformation sur chemin triaxial. On obtient ainsi une modélisation donnant une réponse sur chemin pressiométrique en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Sur la base des résultats obtenus, nous avons constaté ce qui suit :

- L'évolution des contraintes est importante au voisinage du forage.
- Le phénomène de décroissement-croissement de la contrainte orthoradiale  $\sigma_\theta$  distinguée à proximité du forage ni décelé qu'après l'apparition de déformations plastiques (à partir d'un chargement de 40% de la pression limite).
- La contrainte verticale  $\sigma_z$ , est constante dans la phase élastique, mais croissante dans la phase plastique.

## 6. Références bibliographiques

- Abed Y. (1997), Identification des paramètres de comportement des argiles à partir de l'essai pressiométrique, Thèse de Magister, Université de Blida.
- Baguelin F. & Jezequel J.F. (1973), Le pressiomètre autoforeur, Annales ITTPB, vol. 307-308.
- Baguelin F., Jezequel J.F., LE Mee E. & LE Mehautte A. (1972), Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents, Bulletins de liaison, LPC, No. 61, pp 189-202.
- Bahar R. & Abed Y. (1996), Etude théorique de l'équilibre d'un sol purement cohérent autour du pressiomètre, 1<sup>er</sup> Séminaire National de Génie Civil, Biskra, pp 184-192.
- Bahar R. & Olivari G. (1993), *Analyse de la réponse du modèle de Prager généralisé sur chemin pressiométrique*, 6<sup>ème</sup> colloque Franco-Polonais de Mécanique des Sols Appliquées, Douai.
- Bouabanga A. (1990), Identification de paramètres de comportement des sols à partir de l'essai pressiométrique, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
- Habib P. (1953): *La résistance au cisaillement des sols*, Thèse - Paris, publiée par la doc. Technique du bâtiment et des travaux publics.
- Huang A.B., Holtz R.D. & Chameau J.L (1991)., Laboratory study of pressuremeter tests in clays, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, no. 10, pp 1549-1567.
- Iwan W. D. (1967), On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems, Journal of applied Mechanics, Transactions of the ASME, pp 612-617.
- Olivari G. (1990), Remarques sur la modélisation du comportement cyclique des matériaux granulaires, 5<sup>ème</sup> Colloque Franco-Polonais de Mécanique des sols appliquée, Poznam,
- Radhi M. Alzubaidi (2015), A New Approach for Interpretation Strength Sensitivity to Po in Pressuremeter Testing, Arabian Journal of Geosciences, Volume 33, Issue 4, pp 813-832
- Youliang Zhang, Domenico Gallipoli & Charles Augarde (2013), Parameter identification for elasto-plastic modelling of unsaturated soils from pressuremeter tests by parallel modified particle swarm optimization, Computers and Geotechnics 48 293–303.