

# CALCUL DU SOULEVEMENT D'UN PIEU ISOLE FONDE DANS UN SOL GONFLANT

## DESIGN THE UPHEAVAL OF ISOLATES PILES FOUNDED IN A SWELLING SOIL.

**BAHEDDI MOHAMED<sup>1</sup>, CHARIF ABDELHAMID<sup>2</sup> & BOUDOUEH MOUNIR<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Chef de Département de Génie Civil, Faculté de l'ingénieur, Université de Batna.  
E-mail: baheddi\_md@yahoo.fr.

<sup>2</sup> Prof., Département de Génie Civil, Université du Roi Abdelaziz, Riad, Arabie Saoudite

<sup>3</sup> Chargé de cours, Département de Génie Civil, Université de Batna.

### RESUME

Cet article analyse le comportement d'un pieu dans un sol gonflant lorsqu'il est humidifié. La tendance qui se développe à l'heure actuelle pour le calcul d'un pieu dans un sol gonflant, consiste à vérifier le calcul de sa capacité portante en tenant compte de la diminution de la résistance provoquée par le sol gonflant sur la surface latérale du pieu. Cette situation entraîne un déplacement du pieu vers le haut et en cas d'humidité excessive celle-ci change la caractéristique de la rigidité, ainsi que la capacité portante, qui dans ce cas diminue.

La méthode proposée consiste à calculer la montée du pieu, basée sur l'étude de l'influence du type d'argile gonflante et de la longueur du pieu.

**MOTS-CLES :** Sol gonflant - pieu - soulèvement.

### ABSTRACT:

This article analyses the behaviour of a pile in a swelling soil when it is moistened. The tendency that develops itself at the present time, for the design of a pile in a swelling soil, consists in verifying the calculation of the bearing capacity of piles while taking into account the reduction of the resistance induced by the swelling soil on the lateral surface of the piles. This situation leads to an upward displacement of the pile and in case of excessive humidity the latter modify the characteristic of the rigidity as well as the bearing capacity, which in this case decreases.

The proposed method consists in calculating the rise of the pile, based on the study of the influence of the type of swelling clay and the length of the pile.

**KEY WORDS:** Swelling soil - piles – uprising.

## 1 INTRODUCTION

Lors de l'élaboration des projets de bâtiments ou d'ouvrages sur sols gonflants, il faut toujours analyser la possibilité d'humidification de ces sols, soit par les pluies soit par des eaux provenant du sol, notamment de fuites dans des conduites ou des réservoirs.

Une des méthodes assurant une exploitation normale des bâtiments et des ouvrages édifiés sur des sols gonflants consiste à les appuyer sur des fondations sur pieux traversant partiellement ou totalement les sols gonflants. Dans ce cas, on réussit à réduire ou éliminer totalement le

soulèvement du bâtiment. Toutefois, ce résultat dépend de l'adaptation de la structure de la fondation sur pieux aux conditions de gonflement réelles du sol.

L'utilisation de pieux dans la construction depuis des siècles, a permis d'accumuler de nombreuses données expérimentales sur la détermination des valeurs expérimentales des forces de frottement sur la surface latérale du pieu ( $q_s$ ) et des forces normales de résistance du sol sous la pointe du pieu ( $q_p$ ). Des données très complètes ont été publiées par [Chen, 1988], [Bowles, 1988], [Mustafaev, 1989], [SoroChan, 1989] et [Magnan et al, 1995]. Ultérieurement, ces données ont été plusieurs fois

complétées et utilisées (Norme SNiP 2.02.01-83 et 2.02.03-85.), [Shakhirev et al, 1996] ont mis au point des tables plus précises pour les valeurs de  $q_s$  et  $q_p$  d'une gamme de sols plus large, applicables au cas des pieux courts moulés en place, de longueur inférieure à 10 m.

Sorochan (1989) présente des résultats d'essais réalisés dans quatre argiles gonflantes (argiles de Sarmat, type (I) argiles de Khvalin, type (II), argiles quaternaires type (III), et argiles d'Aral type (IV)) sur des pieux forés isolés et des groupes de pieux forés de longueurs comprises entre 1 et 7m de diamètres compris entre 0,40m et 1m de forme cylindrique ou élargie à la base

Dans tous les cas, la solution optimale de fondation sur pieux dépend de la fiabilité de la méthode de calcul du comportement combiné de la fondation et du sol gonflant.

En conformité avec [Sorochan E.A, 1989], la longueur du pieu doit être déterminée à partir des conditions de la capacité portante et les conditions nécessaires pour que le soulèvement ne dépasse pas la tolérance de l'ouvrage.

D'après les données expérimentales de [Sorochan, 1989], la méthode de calcul du soulèvement du pieu dépend du type de sol gonflant, de la forme du pieu, des dimensions géométriques de sa section, et du type du pieu (battu ou foré).

A part cela, la méthode de calcul du soulèvement du pieu est basée sur les interactions conventionnelles. C'est pourquoi on a limité le champ expérimental sur le terrain, et il n'est plus permis non plus d'extrapoler ces conditions sur les pieux courts qui, eux sont mieux adaptés dans ce domaine. C'est pour cette raison que les auteurs proposent une méthode de calcul du soulèvement du pieu dans les sols gonflants qui est basée sur l'analogie du processus de gonflement dû aux dilatations des corps solides et sur les équations différentielles de la théorie thermoplastique.

## 2 DETERMINATION DU SOULEVEMENT DU PIEU

Pour la détermination du soulèvement du pieu, nous allons étudier le cas où le pieu traverse entièrement la couche du sol gonflant (voir Figure 1.).

Dans le cas où le pieu ne traverse pas entièrement la couche du sol gonflant le soulèvement total (global) est ajouté au gonflement de la couche de sol qui se situe sous la pointe du pieu. Quant au soulèvement dû aux forces de frottement sur les surfaces latérales, le calcul reste sans changement.

En général le calcul est basé sur l'analogie du processus de gonflement dû aux dilatations de corps solides. Dans cette fonction l'intensité du gonflement du sol est une fonction  $f(r, z)$ .

$$f(r, z) = \frac{dh_{sw}}{dz} = \alpha\theta(r, z) \quad (1)$$

$h_{sw}$  : Hauteur de gonflement du sol, (m)

$\alpha$  : Coefficient de dilatation linéaire du corps, degré<sup>-1</sup>.

$\theta$  : Changement de la température du corps, degré

$r, z$  : Coordonnées, (m).

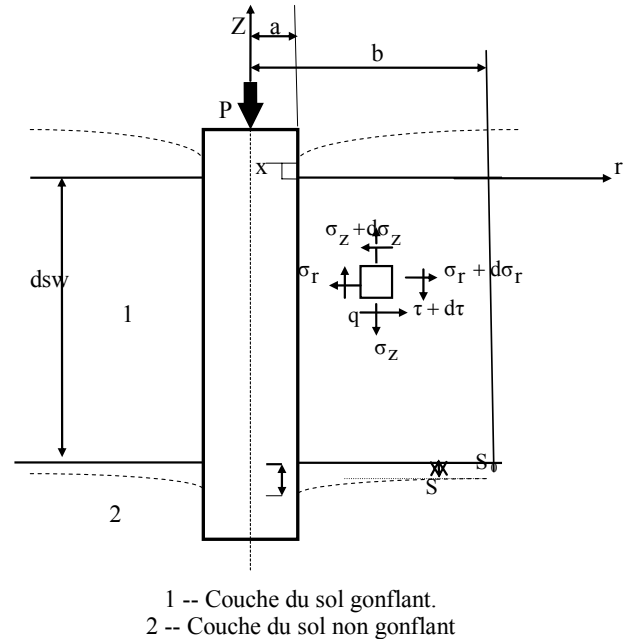


Figure 1 : Schéma de calcul du soulèvement du pieu

La nature physique du processus quasi instantané des corps élastiques après réchauffement couche par couche et après humidification des sols gonflants sera différente mais les résultats définitifs restent les mêmes ; la dilatation du corps solide après réchauffement entraîne une augmentation du volume du sol après mouillage, sur les surfaces latérales du pieu sont réparties les tensions tangentielles, analogiquement comme dans le cas de la tension thermique.

## 3 DEFORMATION ET TENSION DANS UN SYSTEME DE PIEU.

La déformation et la tension dans un système pieu sol sont considérées en équilibre suite au soulèvement du sol gonflé à un moment donné.

Le sol gonflant est considéré comme un matériau de déformation linéaire ayant un module de déformation  $E$  et un coefficient de Poisson  $\nu$ . Le pieu est pris comme un cylindre de rayon -  $a$  -, en interaction avec une couche infinie du sol gonflant d'épaisseur  $d_{sw}$ . Suivant l'axe du pieu, il y a résistance d'une force  $P$  qui est égale à la somme de la charge et de la force de résistance engendrée par les couches de sol. Par analogie aux équations différentielles de l'état thermique axisymétrique d'une dalle infinie, on remplace le produit  $\alpha \theta$  par la fonction  $f(1)$ .

Les équations d'équilibre des déplacements ont pour forme:

$$\begin{aligned} \Delta^2 u - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} &= \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial f}{\partial r}; \\ \Delta^2 \omega + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} &= \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial f}{\partial z}, \end{aligned} \quad (2)$$

où

$u, \omega$  : correspondent respectivement aux déplacements radial et vertical (m)

$e$  – déformation volumique.

$\nabla^2$  - opérateurs de Laplace à coordonnées cylindriques.

En accord avec la loi générale de Hooke l'état des contraintes en un point (Fig. 1) sont :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\nu}{1-2\nu} e - \frac{1+\nu}{1-2\nu} f \right]; \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \frac{u}{r} + \frac{\nu}{1-2\nu} e - \frac{1+\nu}{1-2\nu} f \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\nu} \left[ \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} e - \frac{1+\nu}{1-2\nu} f \right]; \\ \tau &= \frac{E}{2(1+\nu)} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial r} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

En l'absence du déplacement radial du pieu, il est convenu de prendre  $u = 0$ . Par conséquent le système (3) prend la forme suivante :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = \sigma_\theta &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ \nu \frac{\partial \omega}{\partial z} - (1+\nu) f \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu) \frac{\partial \omega}{\partial z} - (1+\nu) f \right]; \\ \tau &= \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial \omega}{\partial r}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

En substituant  $u = 0$  dans l'équation (2) on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \omega}{\partial z \partial r} &= 2(1+\nu) \frac{\partial f}{\partial r}; \\ \nabla^2 \omega + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} &= \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial f}{\partial z}. \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

En intégrant la première équation de (5) et en substituant le résultat dans la deuxième équation, on obtient :

$$\begin{aligned} \omega &= 2(1+\nu)F + C_1 z + C_2; \\ \nabla^2 F &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

où  $F = \int f(r, z) dz$ .

Par conséquent, on obtient une fonction harmonique  $F$  qu'on peut résoudre à l'aide des séries de BESSEL de

premier et second ordres multipliés par les fonctions trigonométriques. La fonction de l'intensité du gonflement

$f = \frac{\partial F}{\partial z}$  doit avoir une forme analogue ;

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum_{j=1}^{\infty} \left[ A_j \sin(m_j z) + B_j \cos(m_j z) \right] \\ &\quad \left[ C_j I_0(i m_j r) + D_j K_0(i m_j r) \right] + f_0 z \\ f &= \sum_{j=1}^{\infty} m_j \left[ A_j \cos(m_j z) - B_j \sin(m_j z) \right] \\ &\quad \left[ C_j I_0(i m_j r) + D_j K_0(i m_j r) \right] + f_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

où  $A_j, B_j, C_j, D_j, m_j$  et  $f_0$  : sont des constantes.

$I_0(i m_j r), K_0(i m_j r)$  : les séries de BESSEL respectivement du premier et second type d'ordre nul de l'argument imaginaire.  $j = 1, 2, 3, \dots$

La fonction de BESSEL  $I_0(i m_j r)$  tend vers des valeurs infinies pour  $r \rightarrow \infty$ . C'est pourquoi, en étudiant la tension de déformation de la couche gonflante, celle-ci doit être exclue, c'est à dire  $C_j = 0$ . Après cela il s'ensuit de prendre  $D_j = 1$ . A part cela avec  $r \rightarrow \infty$  l'intensité de gonflement  $f \neq 0$ , ce qui prend en compte l'introduction de la constante  $f_0$ . Son sens physique consiste qu'en dehors de l'influence sur la fonction, l'intensité du gonflement est invariable et égale à  $f_0$ .

Substituons (7) et (6) dans (4), nous obtenons les équations du déplacement vertical et des contraintes.

Pour le cas  $j=1$ , elles possèdent l'état suivant.

$$\left. \begin{aligned} \omega &= 2(1+\nu) \left[ A \sin(m z) + B \cos(m z) K_0(i m r) \right] \\ &\quad + z \left[ 2(1+\nu) f_0 + C_1 \right] + C_2; \\ \sigma_r &= E \left\{ \frac{\nu c_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} - f_0 \right. \\ &\quad \left. - m \left[ A \cos(m z) - B \sin(m z) K_0(i m r) \right] \right\}; \\ \sigma_z &= E \left\{ \frac{(1-\nu) c_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} + f_0 \right. \\ &\quad \left. + m \left[ A \cos(m z) - B \sin(m z) K_0(i m r) \right] \right\}; \\ \tau &= -E m A \left[ \sin(m z) + B \cos(m z) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Dans les conditions limites on adopte ce qui suit :

Pour  $r \rightarrow \infty$   $\tau = 0$  ;  $f = f_0$  ;  $\omega|_{z=0} = -S$

Pour  $z = d_{s0}$   $\sigma_z = 0$

Pour  $r = a$   $\omega|_{z=d_{s0}} = x$  ;  $\omega|_{z=0} = -S$

où  $S, S_0$  sont le tassement du sol pour  $r \rightarrow \infty$  et  $r = a$

Si on prend  $S = 1mm, S_0 = 4mm$  dans les argiles de type (I)  $S_0 = 6mm$

$x$  : montée superficielle du sol au voisinage du pieu.

En substituant l'expression (8) dans les conditions aux limites, nous obtenons un système d'équations dont la résolution pour le cas d'un pieu fixe. On définit les constantes.

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -f_0 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}; \\ B &= A c t g m d_{sw}; \\ A &= (S + S_0) t g(m) \frac{d_{sw}}{2} (1+\nu) K_0 (i m a) \end{aligned} \right\} (9)$$

En tenant compte des données expérimentales [Sorochan E.A, Trofimenkova Y.G., 1985] le coefficient  $m = \frac{0,7\pi}{d_{sw}}$ .

Pour ces mêmes données, l'épure de distribution du déplacement vertical du sol  $\omega$  en fonction de la profondeur  $z$  et de l'épaisseur mouillée, possède une relation du type exponentiel.

$$\omega = h_{sw} e^{(-\eta z)} \quad (10)$$

- où :
- $\eta = 0,6 \text{ m}^{-1}$  pour les argiles de type (I)
  - $\eta = 0,4 \text{ m}^{-1}$  pour les argiles de type (II)
  - $\eta = 0,31 \text{ m}^{-1}$  pour les argiles de type (III)

En supposant que les surfaces des épures tracées à partir des données expérimentales et calculées du déplacement du sol, on obtient l'intensité moyenne  $f_0$  du gonflement du sol.

$$f_0 = \frac{2(1-\nu)}{1+\nu} \left[ h_{sw} \frac{1-e^{-\eta d_{sw}}}{\eta d_{sw}^2} + \frac{S_0}{d_{sw}} \right] \quad (11)$$

La force du soulèvement T qui agit sur un pieu immobile est :

$$T = -2\pi a E A K_1 (i m a) \quad (12)$$

Le tableau 1 présente la comparaison entre les forces de soulèvement  $T_c$  calculée d'après la formule obtenu et les valeurs effectives de  $T_f$  qui sont prises à partir des travaux de [Sorochan E.A, Trofimenkova Y.G., 1985]. Dans les calculs, les caractéristiques mécaniques des massifs gonflants sont considérées analogue à celles des argiles dans un état humide :

Le coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$  ; le module de déformation  $E = 9 \text{ MPa}$  pour les argiles de type (I) ;  $E = 5,4 \text{ MPa}$  pour les argiles de type (II) et enfin  $E = 3,6 \text{ MPa}$  pour les argiles de type (III).

Au cours de la détermination des soulèvements des pieux, on utilise l'effet connu de freinage «résistance au déplacement», suite aux soulèvements inégaux des différentes couches de sol gonflant. Pour cela on suppose que  $Z_0$  est la coordonnée de la couche du sol, où le déplacement du pieu et celui du sol coïncident ; c'est à dire  $\omega = h$ .

**Tableau 1** : Comparaison entre  $T_c$  calculée et les valeurs effectives de  $T_f$ .

Type d'argile	Longueur du Pieu (m)	$T_c$ ; (kN)	$T_f$ ; (kN)	$\frac{T_c - T_f}{T_f} \times 100$ %
I	3	77,1	67	15
	4	91,8	83	11
	5	106,5	101	5
	6	120,2	124	-3
II	3	92,6	86	8
	5	127,8	142	-10
	7	160,7	183	-12
III	1	21,6	19	14

$Z_0$  est défini à partir de l'équation d'équilibre de toutes les forces agissantes sur le pieu. Après intégration et transformation, l'équation (12) prend la forme suivante :

$$T \left[ \cos(m z_0) - \sin(m z_0) c t g(m d_{sw}) \right] - 2\pi f_s z_0 = P \quad (13)$$

où  $f_s$  : La résistance de la couche de sol au-dessous de  $Z_0$  elle est égale a 24 Mpa pour le type de sol II et III et égale à 58 Mpa pour le type (I) d'après [Sorochan, Trofimenkova, 1985].

$P$  : La charge sur le pieu.

L'expression (13) pour  $Z_0 = 0$  se transforme en  $T = P$  c'est à dire que la force de soulèvement est égale à la charge sur le pieu.

En remplaçant la valeur  $Z_0$  dans l'expression pour les systèmes inamovibles verticaux (8), on obtient un soulèvement  $h$  égal à :

$$h = 2(1+\nu)A \left[ \sin(m z_0) + c t g(m d_{sw}) \cos(m z_0) \right] K_0 (i m a) + z_0 f_0 \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} - S_0 \quad (14)$$

Dans le cas où la longueur du pieu  $d$  est inférieure à l'épaisseur mouillée  $d_{sw}$ , le soulèvement se détermine comme la somme des déplacements du sol à la suite de l'action sur les surfaces latérales  $h$  et la pointe du pieu  $h_T$ .

Pour cela, dans toutes les formules exceptée la formule (11), on doit remplacer  $d_{sw}$  par  $d$ .

#### 4 COMPARAISON DES DEPLACEMENTS CALCULES AVEC CEUX OBTENUS EXPERIMENTALEMENT.

La comparaison des soulèvements obtenus par les calculs et ceux obtenus expérimentalement est donnée dans le tableau.2.

On remarque que d'après le tableau 2 les résultats des calculs du soulèvement des pieux coïncident avec les résultats expérimentaux des déferents auteurs.

**Tableau 2 : Résultats des mesures des soulèvements des pieux d'après la méthode de calcul et les expériences des différents auteurs.**

Auteur de l'expérience et type de sol utilisé	h <sub>sw</sub> (cm)	Long. du pieu (m)	Profond. Humidif. (m)	Diamètre du Pieu. (cm)	La charge (kN)	Soulèvement du pieu (cm)	
						Calculs	Expérimentale
E.A. Sorochan Type (I)	14,5	2,5	3	20	50	2,4	2,1
	14,5	2,5	3	20	38	3,0	3,3
	14,5	2,5	3	20	30	5,1	4,0
	14,5	2,5	3	20	22	5,2	4,2
	14,5	2,5	3	20	17	5,3	4,8
V.N. Boiem. Type (II)	9	5	5	25 x 25	30	2,1	2,6
	9	5	5	25 x 25	100	1,4	0,9
V.S. Sadjine Type (III)	19	3	8	25 x 25	50	14,9	13,5
E.A. Sorochan TYPE (IV)	19	5	8	25 x 25	50	13,4	10,2
	19	5	8	25 x 25	100	10,8	9,8
	19	5	8	25 x 25	150	8,9	8,8
	19	5	8	25 x 25	5	15,2	13,5
	8	2	3	20	47	6,6	3,8
	8	2	3	20	32	6,8	4,8
	8	2	3	20	18	7,0	5,4
	11	4	7	20	14	9,1	7,1
	11	4	8	20	25	7,6	6,1

## 5 CONCLUSION

Dans tous les cas, il est souhaitable que les pieux traversent complètement les sols gonflants ou s'arrêtent à un niveau où le gonflement du sol en cas d'humidification produira un soulèvement admissible de l'ouvrage.

La méthode de calcul du soulèvement du pieu est basée sur les interactions sol gonflant et pieu. Les auteurs proposent une méthode de calcul du soulèvement du pieu dans les sols gonflants qui est basée sur l'analogie du processus de gonflement dû aux dilatations des corps solides et sur les équations différentielles de la théorie thermoplastique.

Du tableau 1 et 2, il ressort que les résultats des calculs relatifs au soulèvement des pieux coïncident avec les résultats expérimentaux.

Il découle de ce qui précède que l'on peut toujours choisir une charge verticale P appliquée au pieu qui soit supérieur aux forces actives de frottement qui apparaissent sur la surface latérale du pieu à cause du soulèvement du sol et empêche donc le soulèvement du pieu de se produire.

## REFERENCES

- [1] Bowles J.E. Foundation analysis and design, 4th edition, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1004 pages. (1988).
- [2] Chen F.H Foundations on expansive soils, Elsevier, Amsterdam, Developments in Geotechnical Engineering, vol. 54, 463 pages, (1988).
- [3] Ejjaouani H., Magnan J.P., Shakhirev V. Calcul des fondations sur sols gonflants. Revue Marocaine du Génie Civil, N° 89, (2000).
- [4] Magnan J.P., Shakhirev V., Ejjaouani, Etude expérimentale du comportement de pieux forés dans des sols gonflants, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. N° 198, pp 29-38. (1995).
- [5] Mustafaev A. A., Fondation sur sols affaissables et gonflants (En russe) Vysshaya shkola, Moscou, 592 pages. (1989)
- [6] Pataleev A.V. Calcul des pieux et des fondations sur pieux (En russe) Moscou 1968 Rechizdat
- [7] Philipponnat G., Retrait gonflement des argiles, proposition de méthodologie. Revue Française de géotechnique, N° 57, P.5-22. (1991)
- [8] Sadjin V.S. Détermination du soulèvement du pieu dans un sol gonflant humidifié. Journal «les constrictions sur sol gonflants» (En russe), Moscou 1968 p: 93 - 98
- [9] Shakhirev V., Magnan J.P., Ejjaouani H. Etude expérimentale du comportement du sol lors du fonçage des pieux. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 206, pp. 99-116. (1996).
- [10] SNIP 2.02.01.-83 (1983) Norme : Fondations de bâtiments et d'ouvrages (En russe). Strojizdat. Moscou.
- [11] SNIP 2.02.03.-85 (1985) Norme : Fondations sur pieux (En russe). Strojizdat. Moscou.
- [12] Sorochan E.A., Construction d'ouvrages sur les sols gonflants (En russe) Strojizdat, Moscou, (1989), 312 pages,
- [13] Sorochan E.A, Trofimenkova Y.G. Les fondations et les ouvrages souterrains, Guide technique d'ouvrages (En russe) Strojizdat, Moscou, (1985), pp 245 - 250,
- [14] Tsytovich N.A. Sols et fondations (En russe) Moscou 1959 Rechizdat
- [15] Vijayvergiya V.N., Ghazzaly O.I., Prediction of swelling potential for natural clays, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, pp. 227-236, (1973).