# Groupe de pieux : Vérification d'une fondation sur micropieux

#### Résumé

Le but de ce cahier technique est de montrer comment utiliser le programme GEO5 « Groupe de pieux » dans le cadre de la vérification d'une fondation sur micropieux. Le fichier exemple correspondant est « Demo\_manual\_36.gsp ».

**ATTENTION** : Dans ce document, l'utilisateur sera guidé à travers toutes les étapes de définition et d'analyse d'un projet géotechnique, dans un contexte établi par l'auteur. L'utilisateur doit être informé que les réglages de l'analyse (onglet « Paramètres ») sont de sa responsabilité et doivent être vérifiés/adaptés avant de commencer tout nouveau projet.

### 1 Projet

Analyser une fondation sur micropieux sous une grue à tour selon la norme EN 1997 – DA2. Le schéma de la fondation sur micropieux est représenté sur la figure 1. Les coordonnées et l'inclinaison des différents micropieux sont indiquées dans le tableau 1. Les micropieux sont en acier (S355) et le profil utilisé est le TK 108 x 20. La longueur totale des micropieux est de 7,0 m et ils sont divisés en trois parties. La partie inférieure est le scellement d'un diamètre de 0,3 m et d'une longueur de 3,0 m. La partie suivante est la longueur libre du micropieu, elle mesure 3,0 m. Enfin, la dernière partie est le micropieu de connexion avec la semelle des pieux d'une longueur de 1,0 m. Le profil géologique de cette tâche est présenté dans le tableau 2. La nappe phréatique n'est pas prise en compte. Pour calculer les ressorts verticaux le long du scellement d'un micropieu, le module de réaction de cisaillement sera considéré comme constant le long de celle-ci et vaudra  $k_v = 45,00 \text{ MN/m}^3$ , la raideur du ressort sous la pointe sera fixée à  $k_p = 5,00 \text{ MN/m}$ . Le frottement latéral limite moyen pour la vérification du scellement des micropieux a été déterminée lors une étude géologique, sa valeur est fixée à  $q_{sav} = 350,00 \text{ kPa}$ .



FIGURE 1 – Schéma de la fondation sur micropieux

N° du micropieu	X [m]	Y [m]	Inclinaison [°]
1	-0,77	-1,57	0,00
2	0,77	-1,57	0,00
3	-1,57	-0,77	0,00
4	0,00	-0,92	0,00
5	1,57	-0,77	0,00
6	-0,92	0,00	0,00
7	0,92	0,00	0,00
8	-1,57	0,77	0,00
9	0,00	0,92	0,00
10	1,57	0,77	0,00
11	-0,77	1,57	0,00
12	0,77	1,57	0,00
13	-1,57	-1,57	15,00
14	1,57	-1,57	15,00
15	1,57	1,57	15,00
16	-1,57	1,57	15,00

TABLE 1 – Coordonnées et l'inclinaison des micropieux

Sol	Profil [m]	$\gamma  [{ m kN/m^3}]$	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [kPa]	$\nu$ [-]	$E_{def}$ [MPa]	$k [MN/m^3]$	β [°]
Sol 1	0,00 - 1,90	21,00	19,00	30,00	0,40	10,00	150,00	9,50
(CL, CI)								
Sol 2	1,90 - 3,10	20,00	21,00	12,00	0,40	4,00	200,00	10, 50
(ML, MI)								
Sol 3	3,10 - 4,90	19,00	35, 50	0,00	0,25	95,00	250,00	12,75
(G-F)								
Sol 1	4,90 - 6,50	20,00	38,50	0,00	0, 20	210,00	320,00	19,25
(GP)								
Sol 1	> 6,50	20, 50	15,00	5,00	0,42	3,00	60,00	7,50
(CH, CV,								
CE)								

TABLE 2 – Propriétés des sols - Valeurs caractéristiques effectives

La charge d'exploitation utilisée pour calculer la rotation et le tassement de la semelle des pieux est décrite dans le tableau 3. La charge de calcul est décrite dans le tableau 4. Les charges sont considérées comme agissant au milieu de la face supérieure de la semelle. La charge de calcul engendrée par le poids propre de la semelle (de dimensions de  $4,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ ) sera quant à elle calculée automatiquement.

Charge	N [kN]	$M_x$ [kNm]	$M_y$ [kNm]	$H_x$ [kN]	$H_y$ [kN]
Valeur	609,00	2111,00	2111,00	47,00	47,00

TABLE 3 – Charge d'exploitation

Change	AT [LAT]	M [LNIma]	M [l-Nrea]	<i>II</i> [1.N]	<i>II</i> [1-N]
Unarge	IN [KIN]	$M_x$ [KINIII]	$M_y$ [KINIII]	$\Pi_x$ [KIN]	$\Pi_y$ [KIN]
Valeur	822,00	2850,00	2850,00	63,00	63,00

TABLE 4 – Charge de calcul

## 2 Solution

Pour résoudre ce problème, nous allons utiliser le programme GEO5 « Groupe de pieux ». Nous allons analyser l'effet de la charge sur chaque micropieu du groupe puis évaluer le micropieu subissant la plus forte charge. Le texte ci-dessous décrit étape par étape la solution de ce problème. Nous allons analyser le groupe de micropieux à l'aide de la méthode dite « des ressorts », qui modélise les différents micropieux par de poutres sur un lit élastique. Chaque micropieu est divisé en dix sections, pour lesquelles les valeurs des ressorts horizontaux et verticaux sont calculées. La semelle couvrant le groupe (dalle de fondation) est considéré comme infiniment rigide. La solution se base la méthode des éléments finis adaptée au calcul des déformations.

### 2.1 Paramétrage

Dans le **cadre « Paramètres »**, nous allons cliquer sur le bouton « Sélectionner les paramètres » et choisir le paramétrage « Standard – EN 1997 – DA2 » :

🛅 Liste des parar	nètres de calcul			×
Numéro	Nom	Validité		
1	Standard - coefficients de sécurité	Tous		
2	Standard - états limites	Tous		
3	Standard - EN 1997 - DA1	Tous		
4	Standard - EN 1997 - DA2	Tous		
5	Standard - EN 1997 - DA3	Tous		
6	Standard - LRFD 2003	Tous		
7	Standard - sans réduction	Tous		
8	République tchèque - normes anciennes CSN (73 1001, 73	Tous		
37	France - EN 1997	Tous		
38	France - EN 1997, gamma d'eau=1.0	Tous		
47	Chine - normes de construction (JGJ)	Tous		
50	Chine - normes de transport (JT)	Tous		
53	Chine - normes ferroviaires (TB)	Tous		
56	Chine - normes de protection de l'eau (SL)	Tous		🗸 ОК
59	Chine - coefficient de sécurité (ASD)	Tous		
62	Chine - états limites (LSD)	Tous	▼	🗙 Annuler

FIGURE 2 - Cadre « Paramètres » - Fenêtre de dialogue « Liste des paramètres de calcul »

L'étape suivante consiste à choisir le type de calcul « Méthode des ressorts – micropieux ». Nous allons considérer que le raccordement des micropieux à la dalle est « fixe ». La dernière étape de ce cadre consiste à définir le « Module de réaction du sous-sol », qui décrit le comportement des micropieux dans la direction horizontale. Dans ce cas, le module de réaction « linéaire » du sous-sol est bien adapté (il est calculé selon la méthode de Bowles). Pour plus d'informations, vous pouvez consulter l'aide (touche F1).

📾 GEO5 2021 - Groupe de pieux [C:\Users\phili\Documents\GEO5\Cahiers_techniques\Cahiers_techniques_F	R\CT_36\Demo_manual_36_FR.gsp *]	– 🗆 ×					
Eichier Edition Saisie Calcul Sorties Paramètres Ajde							
		Modes _					
2,00							
	1,00	Paramètres					
		Structure					
- <b>↓</b>		III Géométrie					
		Matenau					
		Profil					
53	10.00	Assignation					
	10,00	Eau					
		Ressorts verticaux					
		Charge					
		🙀 Calcul					
	1,00	Dimensionnement					
		Capacité portante					
Paramétres du calcul : Standard - EN 1997 - DA2	Selectionner     les paramètres     Type de calcul :     méthode des ressorts - micropieux	Softies _					
Matériaux et normes Structures en béton : EN 1992-1-1 (EC2)	Gérer Liaison des pieux à la dalle :	Projet: 0					
Coefficients EN 1992-1-1 : standard Structures on acier : EN 1992-1-1 (EC2)	les paramètres	Au total : 0					
Coefficient partiel de capacité portante de la section en acier : $\gamma_{M0} = 1,00$	Ajouter dans le gestionnaire	E <sup>a</sup> Liste des images					
		Liste des annexes					
netres							
Lara	4 Edition	B <sub>1</sub> Copier la vue					
		1					

FIGURE 3 – Cadre « Paramètres »

#### 2.2 Structure

Dans le **cadre « Structure »**, nous allons choisir l'option « forme générale » pour la vue de dessus de la dalle. Le « Surplombement de la dalle » sera fixé à o = 0,38 m. Maintenant, nous pouvons ajouter chaque micropieu en se basant sur le tableau 1 en cliquant sur le bouton « Ajouter ».



FIGURE 4 – Cadre « Structure »

Remarque : le surplombement de la dalle o est la distance entre le bord extérieur du micropieu et le bord de la dalle de fondation.

Après avoir cliqué sur le bouton « Ajouter », la fenêtre de dialogue « Nouveau point » apparaît. Dans cette fenêtre, nous allons saisir les coordonnées x et y et l'inclinaison du micropieu. Les coordonnées et l'inclinaison de chaque micropieu sont indiquées dans le tableau 1. Un nouveau micropieu sera créer en cliquant sur le bouton « Ajouter ».

Nouveau po	int		×			
Position :	x =	-1,57	[m]			
	y =	1,57	[m]			
Inclinaison	:α=	15,00	[°]			
Type de sai	sie :	perpendiculaire	au centre 🔻			
🕂 Ajouter 🗙 Annuler						

FIGURE 5 – Fenêtre de dialogue « Nouveau point » - Micropieu n° 16

Le profil du micropieu sera défini via le « Catalogue des profils ». Dans la section « Classe de la coupe », nous allons choisir un « tube sans soudure section circulaire » puis dans la section « Profil » nous allons choisir le profil TK 108x20.



FIGURE 6 – Fenêtre de dialogue « Catalogue des profils »

#### 2.3 Géométrie

Dans le **cadre « Géométrie »** seront définis la « Profondeur de la fondation » (profondeur à partir de la surface du sol)  $h_z = 0,00 \text{ m}$ , l'« Épaisseur de la dalle de fondation » t = 1,20 m, la « Longueur des micropieux » l = 6,00 m, le « Diamètre du scellement »  $d_r = 0,30 \text{ m}$ , la « Longueur du scellement »  $l_r = 3,00 \text{ met enfin}$  il est possible de définir la « Résistance du sol de

fondation » mais elle ne sera pas prise en compte dans ce cas. Par conséquent la « Résistance du sol de fondation » vaudra R = 0,00 kPa.



FIGURE 7 - Cadre « Géométrie »

Remarque : la résistance du sol de fondation est très importante et a une grande influence sur les résultats de l'analyse. L'amplitude de la résistance du sous-sol de fondation dépend du type de sous-sol, du processus de construction de la structure (nouvelle structure, reconstruction) et de l'historique de chargement. La force  $N_R = A \cdot R$  est soustraite de la charge entrée dans tous les cas.

#### 2.4 Matériau

Le cadre « Matériau » permet de définir les propriétés matérielles de la structure. Pour la dalle de fondation, le poids volumique est fixé à  $\gamma = 23,00 \text{ kN/m}^3$  et la classe de béton à C20/25 (pour le dimensionnement) et pour les micropieux, nous avons choisi la classe d'acier de construction EN 10210 – 1 : S355. Les classes de matériaux pour le béton et l'acier de construction sont disponibles en cliquant sur le bouton « Catalogue ».



FIGURE 8 - Cadre « Matériau »

### 2.5 Charge

Le **cadre** « **Charge** » va nous permettre d'ajouter des charges. Les valeurs de la charge d'exploitation sont indiquées dans le tableau 3 et les valeurs de la charge de calcul sont indiquées dans le tableau 4.



FIGURE  $9 - Cadre \ll Charge \gg$ 

#### 2.6 Profil géologique

Le profil géologique est défini dans les **cadres « Profil »**, **« Sols »** et **« Assignation »**. Dans le cadre « Profil », nous allons définir les différentes couches du profil géologique. Dans le cadre « Sols », nous allons définir les sols et la dernière étape se fera dans le cadre « Assignation », dans le que les sols seront assignés aux différentes couches du profil géologique. Le profil géologique ainsi que les propriétés de chaque sol sont présentés dans le tableau 2.

Dans la fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols », il convient de saisir les valeurs pour la « Détermination du module de réaction du sol de fondation ». La plage représentative des valeurs du « Coefficient k » et la formule pour déterminer « l'angle de transfert  $\beta$  » sont indiquées dans l'aide (touche F1), dans la rubrique « Distribution linéaire du module de réaction ».

Ajouter des nouveaux sols					×		
- Identification					- Affichage		
Nom :	Sol 3 (G-F)				Catégorie des échantillons :		
Gravier avec l'add	ition de sol fi	n (G-F), dense			GEO 🗸		
— Données de base ———				<b>?</b> -	Chercher :		
Poids volumique :	γ =	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]	19,0	Sous-catégorie :		
Angle de frottement interne :	φ <sub>ef</sub> =	35,50	[°]	33 - 38	Sols (1 - 16) 💌		
Cohésion du sol :	c <sub>ef</sub> =	0,00	[kPa]	0	Echantillon :		
— Tassement - module ced	ométrique -		1	~ ?			
Coefficient de Poisson :	v =	0,25	[-]	0,25	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
Calcul de tassement :	saisir Edef		•		12 Gravier		
Module de rigidité :	E <sub>def</sub> =	95,00	[MPa]	90 - 100	Couleur:		
— Soulèvement hydraulique	e		-	? -	•		
Calcul soulèvem. hydraulique :	standard		•		Arrière-plan :		
Poids volumique du sol saturé :	γ <sub>sat</sub> =	19,00	[kN/m <sup>3</sup> ]		automatique		
	1351				Saturation de la couleur <10 - 90> : 50 [%]		
— Détermination du modul	e de réactio	n du sol de fon	dation —				
Coefficient :	k =	250,00	[MN/m <sup>3</sup> ]				
Angle de transfert :	β =	12,75	[°]				
			,				
Classer Suprimer					🕂 Ajouter 🗙 Annuler		

FIGURE 10 - Fenêtre de dialogue « Ajouter des nouveaux sols »



FIGURE  $11 - Cadre \ll Assignation \gg$ 

#### 2.7 Ressorts verticaux

Le **cadre** « **Ressorts verticaux** » permet de définir le comportement d'un micropieu dans la direction verticale. La charge d'un micropieu est transmise au sol par la pointe et le fût du scellement.



FIGURE  $12 - Cadre \ll Ressorts verticaux \gg$ 

#### 2.8 Résultats

#### 2.8.1 Calcul

Le **cadre « Calcul »** permet de visualiser les résultats des calculs de l'étude. Les résultats (efforts internes, déplacements, etc.) sont affichés pour un ou pour tous les micropieux. Sur le côté droit de la fenêtre, les résultats concernant les efforts internes maximaux (de tous les cas de charge) et ceux liés aux déplacements maximaux (uniquement des cas de charge d'exploitation) de l'ensemble de la structure sont affichés. La figure ci-dessous restitue les résultats pour le micropieux n° 16.



FIGURE  $13 - Cadre \ll Calcul \gg$ 

Les résultats des calculs pour le paramétrage initial (pour une déformation maximale) sont les suivants :

- tassement maximal : 5,8 mm
- déplacement horizontal maximal de la dalle de fondation :  $8,9\,\mathrm{mm}$
- rotation maximale de la dalle : 10,0  $\cdot$  10^{-2}  $^{\circ}$

#### 2.8.2 Dimensionnement

Le cadre « Dimensionnement » permet de visualiser les efforts internes du cas de charge sélectionné ou de l'enveloppe des cas de charge. Les résultats peuvent également être affichés pour n'importe quel pieu. Les forces internes totales sont égales aux forces résultantes calculées à partir des composantes X et Y. La figure suivante montre les efforts internes de l'enveloppe des cas de charge pour tous les micropieux.



FIGURE  $14 - Cadre \ll Dimensionnement \gg$ 

#### 2.8.3 Capacité portante

L'évaluation de la section du micropieu et son scellement se fait dans le programme GEO5 « Micropieux », il suffit simplement de clique sur le **bouton « Capacité portante »**, tous les résultats et les données sont automatiquement transmises vers ce programme.

Évaluation de la section La vérification de la section d'acier d'un micropieu se fait dans le cadre « Calcul de la section ». Les résultats pour le micropieu le plus chargé sont calculés automatiquement. La corrosion n'est pas prise en compte dans ce cas car notre fondation en micropieux n'est pas une structure permanente. Les conditions aux limites sont considérées comme : « charnière – encastrement ».

Cahier technique n°36 Mise à jour 10/2020 GEO5

Micropieux (32 bit) - Groupe de pieux		×
Eichier Edition Saisie Calcul Sorties Paramètres Aide		
Editor		
		Modes _
		Projet
30		🏟 Paramètres
		☆ Géométrie
↓ ↑ ↓		📼 Matériau
*		Profil
Q	5,00	Sols
		Assignation
		<b>*</b> ← Charge
		Nappe + Substratum
		Paramètres de la phase
		Calcul de la cection
Q-Abri		Calcul du scellement
		Sorties _
Calcul : 🛨 😑 [1]	🕃 En gétail	🕒 Ajouter une image
		Calcul de la section : 0
Selectionner automatiquement les maximums	Vérification de la section 1	Au total : 0
Considérer l'effet de la corrosion	charge les plus défavorables.	Bit Liste des images
La durée de vie exigée : t = [année]	Vérification de la stabilité interne de la section méthode	III Liste des annexes
Coefficient de l'effet de liaison : F <sub>ut</sub> = [-]	géométrique (d'Euler)	
Type du sol : sols naturels	Effort normal critique N <sub>crd</sub> = 2802,04 kN Effort normal maximal N <sub>max</sub> = 460,50 kN	
5	Stabilité interne de la section du micropieu ADMISSIBLE	Bà Copier la vue
Madula de réaction du sal de fandation : E = 10.00 [MNI/m <sup>3</sup> ]	Vérification de la capacité portante de la section mixte :	Commande _
e would de reaction du sol de rondation . c <sub>p</sub> = 10,00 [MIQ/m <sup>-</sup> ]	La section est utilisée le plus pour le cas de charge n° 1	Quitter et transmettre les données
Conditions limites du calcul : charnière - encastrement	Contrainte dans l'acter = 131,20 MPa	
3		Quitter sans la transmission des données

FIGURE 15 - Programme « Micropieux » - Cadre « Calcul de la section »

Évaluation de la stabilité interne :

 $N_{crd} (= 2862, 04 \text{ kN}) \ge N_{max} (= 460, 50 \text{ kN})$ La stabilité interne de la section du micropieu est satisfaisante

 $\begin{array}{l} \underline{ \acute{\mathrm{E}}} \text{valuation de la capacité portante de la section couplée} : \\ f_{y,d} (= 236, 67\,\mathrm{MPa}) \geq \sigma_s \,(= 151, 28\,\mathrm{MPa}) \\ \mathbf{La \ section \ couplée \ du \ micropieu \ est \ satisfaisante} \end{array}$ 

**Évaluation du scellement** La vérification de la capacité portante du scellement du micropieu se fait dans le **cadre « Calcul du scellement »**. La vérification est faite selon la théorie de Lizzi et le frottement latéral moyen est fixé à  $q_{sav} = 350$  kPa.

Remarque : la méthode de calcul de la capacité portante des scellements peut être modifiée dans le cadre « Paramètres » en modifiant les paramètres « Micropieux ».

m *Micropieux (32 bit) - Groupe de pieux		×				
Eichier Edition Satsie Calcul Sorties Paramètres Ajde						
		Modes _				
		Projet				
		🍄 Paramètres				
		⁺⊊ Géométrie				
		🚥 Matériau				
		Profil				
		Sols				
		Assignation				
		Charge				
	_	Paramètres de la nhase				
Same Vérification du scellament		Calcul du scellement				
Méthode du calcul - méthode de Lizzi.						
Coefficient de l'effet du diametre du scellement = 0,00 Frottement latéral limite moyen q <sub>Qar</sub> = 350,00 kPa						
Verification du micropieu en compression	D To date	Sorties _				
Capacité portante du fût du micropieu R <sub>g</sub> = 791,68 kN	En getan	Ajouter une image				
Frottement latéral sur le scellement     Capacité portante partielle du scellement du microipeu Ra = 527,79 kN     Copacité portante partielle du scellement du microipeu Ra = 527,79 kN     Knass = 46,050 kN     Naass = 46,050 kN		Calcul du scellement : 0 Au total : 0				
Frottement latéral limite moyen		🔠 Liste des images				
Vérification du micropieu en traction		III Liste des annexes				
Num.   Coordonnée Frottement  Agouter Capacité portante du fút du micropieu R <sub>2</sub> = 791,86 kN  Capacité portante du fút du micropieu R <sub>3</sub> = 791,86 kN  Capacité portante autilité du micropieu R <sub>3</sub> = 791,70 kN						
k mig q [kr+a]						
Supprimer		B Copier la vue				
Capacity portaine du microgree en declara homitalace		Commande _				
Capacité portante verticale du micropieu ADMISSIBLE		<ul> <li>Quitter et transmettre les données</li> </ul>				
C X Outler	•	Quitter sans la transmission des données				

FIGURE 16 - Programme « Micropieux » - Cadre « Calcul du scellement »

Évaluation du micropieu en compression :

- Effort normal maximal :  $N_{max} = 460, 50 \text{ kN}$
- Capacité portante du fût du micropieu : $R_s (= 791, 68 \text{ kN}) \ge N_{max}$
- Capacité portante partielle du scellement du micropieu :  $R_d (= 527, 79 \text{ kN}) \ge N_{max}$
- La capacité portante du micropieu en compression est satisfaisante

Évaluation du micropieu en traction :

- Force de traction maximale :  $N_{max} = 276, 10 \,\mathrm{kN}$
- Capacité portante du fût du micropieu : $R_s (= 791, 68 \text{ kN}) \ge N_{max}$
- Capacité portante partielle du scellement du micropieu :  $R_d (= 527, 79 \text{ kN}) \ge N_{max}$

La capacité portante du micropieu en traction est satisfaisante

Il ne reste plus qu'à sauvegarder les résultats en cliquant sur le bouton « Quitter et transmettre les données ».

### 3 Conclusion

Les valeurs de tassement maximal, de déplacements horizontaux maximaux et de rotation de la dalle de fondation se situent dans les limites admissibles.

Le dimensionnement d'un micropieu TK 108/20 en acier de construction EN 10210-1 : S355 et son scellement sont satisfaisants selon EN 1997 – DA2.