

Justification du coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$ utilisé dans la norme NF EN 50341-2-8 pour le dimensionnement des micropieux de catégorie 18 utilisés comme fondations de pylônes de lignes électriques aériennes

Laurent Chaigneau^{1,*} et Hervé Ducloux²

¹ RTE, Centre National d'Expertise Réseaux, 100, esplanade du Général-de-Gaulle, tour B, 92932 Paris La Défense cedex, France

² RTE, Direction de la R&D et de l'Innovation, 9, rue de la Porte-de-Buc, BP 561, 78005 Versailles cedex, France

Résumé – La norme NF P 94-262 parue en juin 2012 impose pour les micropieux de catégorie 18 une valeur de 2 pour le coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$. Cette forte valeur vient notamment de l'exploitation d'une base d'essais relativement réduite pour cette technologie particulière de fondations profondes. Grâce à une base d'essais complémentaires fournie dans le présent article et dédiée aux micropieux de catégorie 18 utilisés comme fondations de pylônes de lignes électriques aériennes, il est possible, en appliquant la méthode statistique de la norme NF EN 1990 (Eurocodes structuraux, Bases de calcul des structures), de caler une nouvelle valeur moins sévère que celle de la norme NF P 94-262. En conservant les autres valeurs des coefficients de cette norme et après avoir remarqué que le produit $\gamma_{R;d_1} \times \gamma_{R;d_2} \times \gamma_{s;t}$ était équivalent au coefficient global des combinaisons fondamentales des anciennes règles du Fascicule 62 (Titre V – troisième partie), il a été décidé d'intégrer cette nouvelle valeur du coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$ dans la norme NF EN 50341-2-8 dédiée au dimensionnement des lignes électriques aériennes en France.

Mots clés : Eurocode 7 / micropieu / coefficient de modèle / méthode pressiométrique / base d'essais d'arrachement

Abstract – Justification of the $\gamma_{R;d_1}$ category 18 micropile model factor used in the NF EN 50341-2-8 standard dedicated to the design of overhead power lines. The NF P 94-262 standard published in June 2012 assigns 2 to the $\gamma_{R;d_1}$ model factor dedicated to category 18 micropiles. This high value comes in particular from the exploitation of a rather small test database for this specific technology of deep foundations. Additional tests provided in this article and devoted to category 18 micropiles used for the foundations of overhead power line towers allow the authors to use the statistical procedure of NF EN 1990 (Structural Eurocodes, Basis of structural design) to calculate a new value less severe than the one proposed in the NF P 94-262 standard. Keeping unchanged the values of the other coefficients of that standard, it can be observed that the product $\gamma_{R;d_1} \times \gamma_{R;d_2} \times \gamma_{s;t}$ is equivalent to the global coefficient of the ultimate limit state combinations given in the previous "Fascicule 62" standard (Title V – third part). That is the reason why it has been decided to take into account this new value of the $\gamma_{R;d_1}$ model factor in the NF EN 50341-2-8 dedicated to the design of overhead power lines in France.

Keywords: Eurocode 7 / micropile / model factor / pressure meter test / uplift test database

1 Introduction

La norme européenne EN 50341-1 qui fixe les règles de dimensionnement électrique et mécanique des lignes aériennes vient d'être révisée. Dans cette nouvelle édition de 2012, la partie dimensionnement mécanique s'appuie intégralement sur l'application des Eurocodes, ce qui implique que les fondations des pylônes doivent être conçues en respectant

les prescriptions de l'Eurocode 7 (Calcul géotechnique). En France, la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes est le document NF P 94-262 ; c'est donc sur ce dernier que la future norme NF EN 50341-2-8 (Aspects Normatifs Nationaux Français de la norme EN 50341-1) doit s'appuyer pour traiter le cas particulier des pylônes de lignes électriques fondés sur micropieux. Cependant, la valeur très sécuritaire de l'un des coefficients de modèle de la norme NF P 94-262 ne sera pas retenue dans l'état. En effet, RTE dispose d'une base de données d'essais de micropieux qui permet d'améliorer la détermination du

* Auteur correspondant : laurent.chaigneau@rte-france.com

coefficient dédié à la catégorie 18 de ce type de fondations profondes. Cet article a donc deux objectifs :

- mettre à la disposition des géotechniciens une nouvelle base de 42 essais de micropieux qui vient ainsi compléter la base des 174 essais de l'IFSTTAR (Baguelin *et al.*, 2012) qui a permis de déterminer les différents coefficients proposés dans la norme NF P 94-262 ;
- expliquer le coefficient de modèle retenu dans la future norme NF EN 50341-2-8 pour le cas particulier des micropieux de catégorie 18 utilisés pour soutenir les pylônes de lignes électriques.

La première partie rappelle les grands principes du dimensionnement des micropieux en suivant la procédure du « modèle de terrain » à partir des valeurs de pression limite déterminée par la méthode pressiométrique (pressiomètre « Ménard »).

La deuxième partie décrit la base des essais de RTE fournie en Annexe A, avec en particulier la résistance à la traction théorique (R_s) de chaque micropieu et la résistance ultime expérimentale (R_e) associée.

La troisième et dernière partie explique comment est déterminé le coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$ à partir des données de l'Annexe A et de la méthode statistique préconisée dans l'Eurocode (EN 1990 – annexe D.8 : Détermination statistique de modèles de résistance). Une partie des calculs intermédiaires est fournie en Annexe B.

2 Le dimensionnement des micropieux

Selon les critères de la norme NF P 94-262, les micropieux correspondent à des pieux dont le diamètre de forage est inférieur à 300 mm et qui appartiennent à la classe 1 bis (catégories 17 et 18) ou à la classe 8 (catégories 19 et 20).

Les micropieux utilisés dans le cadre des lignes aériennes électriques sont essentiellement de la catégorie 18 (forés ou autoforés, avec une armature scellée par un coulis de ciment mis en place par gravité ou sous très faible pression) et équipés de renforts d'adhérence « coulis/armature » (Figs. 1 et 2).

Ils sont toujours sollicités sous charges axiales et le calcul de la portance (résistance à la compression) se fait comme le calcul de la résistance à la traction : seule la résistance caractéristique latérale ($R_{s;k}$) est prise en compte (la résistance de pointe ($R_{b;k}$) est négligée dans le calcul de la portance). La résistance $R_{s;k}$ est calculée à partir de la résistance théorique (R_s), elle-même issue de la procédure du « modèle de terrain » et des formules issues de la norme NF P 94-262 :

$$R_s = \sum_i A_{s;i} \times q_{s;i}, \quad (1)$$

$$R_{s;k} = \frac{R_s}{\gamma_{R;d_1} \times \gamma_{R;d_2}}. \quad (2)$$

Avec :

- i : l'indice de la i^e couche de sol ;
- $A_{s;i}$: la surface latérale du fût du micropieu dans la couche i ;
- $q_{s;i}$: la valeur de la contrainte de frottement axial dans la couche i (à partir des pressions limites nette $p_{l;i}^*$ de la méthode pressiométrique) ;



Fig. 1. Armatures de micropieux haute adhérence (micropieux forés ou autoforés).

Fig. 1. High adhering micropile frameworks (drilled or self-drilled micropiles).



Fig. 2. Armatures de micropieux en tubes pétroliers avec renforts d'adhérence de type « cerce » (micropieux forés).

Fig. 2. Micropile frameworks made of oil pipes with retaining bands (drilled micropiles).

- $\gamma_{R;d_1}$: la valeur du coefficient partiel de modèle lié à la dispersion du modèle de calcul (permettant de donner une valeur caractéristique présentant un taux de mise en défaut de moins de 15 % selon la norme NF P 94-262) ;
- $\gamma_{R;d_2}$: la valeur du coefficient partiel lié au calage des méthodes de calcul (permettant de prendre en compte la dispersion de la détermination des pressions limites par des opérateurs différents).

En France, dans le cadre de la détermination des résistances caractéristiques des micropieux des pylônes de lignes aériennes, la méthode pressiométrique (pressiomètre « Ménard ») est systématiquement utilisée et la méthode de conversion de la pression limite nette (p_i^*) en contrainte de frottement axial (q_s) est la méthode de l'annexe F de la norme NF P 94-262.

Dans l'annexe C de cette norme, la valeur de calcul de la portance fait intervenir un facteur partiel $\gamma_s = 1,1$ qui est plus petit que le facteur $\gamma_{s,t} = 1,15$ utilisé pour la détermination de la valeur de calcul de la résistance à la traction. Dans un souci de simplification, il a été décidé de ne garder qu'une formule et de ne conserver que la valeur la plus sécuritaire qui est $\gamma_{s,t}$.

Dans la norme NF EN 50341-2-8, la résistance caractéristique latérale est donc transformée en valeur de calcul des résistances en compression ($R_{c,d}$) et en traction ($R_{t,d}$) à l'aide du seul facteur partiel $\gamma_{s,t}$ et des formules suivantes :

$$\text{Compression } R_{c,d} = R_{s;k} / \gamma_{s,t}, \quad (3)$$

$$\text{Traction } R_{t,d} = R_{s;k} / \gamma_{s,t}. \quad (4)$$

Dans l'annexe F de la norme NF P 94-262, les valeurs de $\gamma_{R;d_1}$ et $\gamma_{R;d_2}$ sont fixées pour les micropieux de catégorie 18 dans le cas du « modèle de terrain » (tableau F.2.1) : $\gamma_{R;d_1} = 2$ et $\gamma_{R;d_2} = 1,1$.

Cette valeur de $\gamma_{R;d_1}$ a été déduite de la base des essais de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) comme cela est expliqué dans (Baguelin *et al.*, 2012). Les 174 essais de la base ont été répartis dans deux groupes G1 (155 essais) et G2 (19 essais) et les micropieux de catégorie 18 ont été rangés dans le groupe G2 avec les pieux des catégories 10, 15, 17, 19 et 20. Avec ce faible nombre d'essais pour 6 catégories différentes de pieux, la dispersion des résultats est élevée et le coefficient de modèle du groupe G2 qui en résulte l'est également : c'est le plus gros coefficient du tableau F.2.1.

La partie suivante présente une base de 42 essais complémentaires, dédiée aux micropieux de la catégorie 18 servant de fondations aux pylônes de lignes électriques aériennes et dont 35 résultats sont utilisables pour déterminer le coefficient $\gamma_{R;d_1}$ qui sera repris dans la norme NF EN 50341-2-8.

3 La base des essais de RTE

Entre 1982 et 2014, RTE a collecté pour ses propres besoins les résultats de 42 essais d'arrachement de micropieux qui sont présentés dans leur intégralité en [Annexe A](#). Un petit nombre d'essais (7) n'est présenté que pour information car les résultats ne peuvent pas être directement exploités dans le cadre de la détermination du coefficient $\gamma_{R;d_1}$ pour les raisons suivantes :

- essai n° 3 : défaillance du dispositif de mesure en cours d'essai (pas de mesure) ;
- essai n° 20 : problème d'injection du coulis suspecté lors de la mise en œuvre et constaté après l'arrachement ;
- essais n° 28 et 29 : diamètres de forage supérieurs à 300 mm (450 mm) ;
- essais n° 39 et 40 : seuls micropieux forés dans de la roche altérée pour lesquels les valeurs calculées sont très faibles par rapport aux valeurs d'essais, ce qui génère des points aberrants qui ont tendance à trop réduire le coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$;
- essai n° 42 : les valeurs de calculs ne sont pas déduites de la méthode pressiométrique.

Il reste ainsi 35 essais exploitables pour le calage du coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$. Chaque micropieu essayé de catégorie 18 est présenté avec son diamètre, sa longueur et sa



Fig. 3. Montage d'essai du micropieu n° 17 de la base d'essais de RTE.
Fig. 3. Bench test of micropile No. 17 extracted from RTE test database.

technique de mise en œuvre, ce qui est indispensable pour utiliser l'annexe F de la norme NF P 94-262 :

- foré (choix retenu par les auteurs : équivalent pieu catégorie 1) ;
- foré tubé (choix retenu par les auteurs : équivalent pieu catégorie 4) ;
- foré boue (choix retenu par les auteurs : équivalent pieu catégorie 2) ;
- autoforé (choix retenu par les auteurs : équivalent pieu catégorie 6).

Les couches de sol dans lesquelles les micropieux sont implantés sont décrites en respectant les 5 catégories conventionnelles de terrain utilisées avec les tableaux de l'annexe F de la norme NF P 94-262. Pour chaque couche, les pressions limites nettes obtenues par la méthode pressiométrique sont données. Le calcul de la conversion de ces pressions limites nettes (p_l^*) en contraintes de frottement latéral (q_s) et le calcul de la résistance théorique à la traction (R_s) sont réalisés à l'aide du logiciel FOXTA V3.1 (logiciel développé et commercialisé par TERRASOL pour le calcul des fondations profondes, superficielles et mixtes) qui intègre les prescriptions de la norme NF P 94-262.

Chaque micropieu a été essayé à l'aide d'un montage correspondant aux prescriptions de la norme NF P 94-150 ([Fig. 3](#)) et l'effort de traction limite au sens de cette norme est retranscrit en [Annexe A](#) sous l'appellation résistance expérimentale (R_e).

Les données théoriques (R_s) et expérimentales (R_e) de l'[Annexe A](#) sont reprises pour les 35 essais exploitables dans l'[Annexe B](#) qui fournit le détail des calculs intermédiaires décrits dans la partie suivante.

4 La détermination du coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$

Les deux coefficients $\gamma_{R;d_1}$ et $\gamma_{R;d_2}$ permettent de passer d'une valeur de résistance théorique (R_s) directement issue d'un modèle de calcul à une valeur de résistance caractéristique (R_k) au sens des Eurocodes, c'est-à-dire une valeur correspondant à une limite d'exclusion de 5 % (appelée aussi taux de mise en défaut dans la norme NF P 94-262).

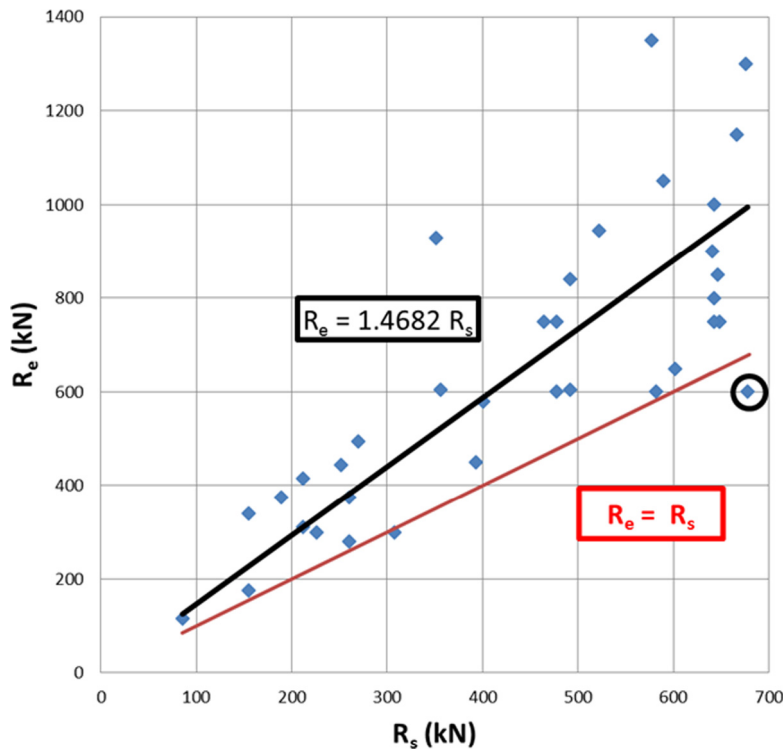


Fig. 4. Comparaison des valeurs théoriques avec les valeurs expérimentales.

Fig. 4. Theoretical values as compared with experimental values.

La valeur de $\gamma_{R;d_2}$ étant déjà fixée (1,1), la procédure décrite ci-après ne s'intéresse qu'à la détermination du coefficient $\gamma_{R;d_1}$. Conformément à la philosophie du dimensionnement des Eurocodes, la procédure d'évaluation standard de l'annexe D.8 de la norme EN 1990 est utilisée. Cette procédure, décomposée en 7 étapes, consiste à étudier le rapport R_e/R_s qui est supposé être distribué selon une loi de distribution « lognormale ».

4.1 Étape 1 (développer un modèle)

Cette étape a été décrite ci-dessus et les 35 valeurs théoriques issues du modèle se trouvent dans le tableau de l'Annexe B.

4.2 Étape 2 (comparer les valeurs expérimentales et théoriques)

Il s'agit de reporter sur un graphique les 35 points de coordonnées (R_s, R_e) et de faire apparaître la droite de pente (b) passant par l'origine obtenue par la méthode des « moindres carrés » (Fig. 4). Seul 1 point sur 35 (entouré sur la Fig. 4) apparaît légèrement sous la droite d'équation « $R_e = R_s$ », ce qui laisse à penser que la valeur finale du coefficient de modèle doit être assez proche de l'unité.

4.3 Étape 3 (estimer le facteur de correction b de la valeur moyenne)

La méthode décrite dans la norme EN 1990 a été utilisée (détails en Annexe B) et la valeur de b est 1,4682.

4.4 Étape 4 (estimer le coefficient de variation des erreurs)

Le coefficient V_δ se calcule en considérant que le rapport « R_e/bR_s » suit une distribution « lognormale ». L'Annexe B montre le détail du calcul permettant d'obtenir la valeur $V_\delta = 26,6$ %.

4.5 Étape 5 (analyse de compatibilité)

Il n'y a pas d'adaptation à faire en Étape 5 car la dispersion V_δ n'a rien d'exceptionnelle.

4.6 Étape 6 (déterminer les coefficients de variation V_{xi} des variables de base)

Il n'y a que deux variables de base : les contraintes de frottement latéral (q_s) et les surfaces latérales (A_s). Comme l'incertitude liée à q_s est déjà comprise dans le coefficient de modèle $\gamma_{R;d_2}$, seule l'incertitude sur les surfaces A_s est prise en compte via une valeur forfaitaire $V_x = 10$ %.

4.7 Étape 7 (déterminer la valeur caractéristique R_k de la résistance)

La dernière étape nécessite le calcul de quelques valeurs intermédiaires :

- $V_r = 28,5$ % ;
- $Q_\delta = 26,1$ % ; $Q_x = 10,0$ % et $Q = 28,0$ % ;
- $\alpha_\delta = 0,93$ et $\alpha_x = 0,36$.

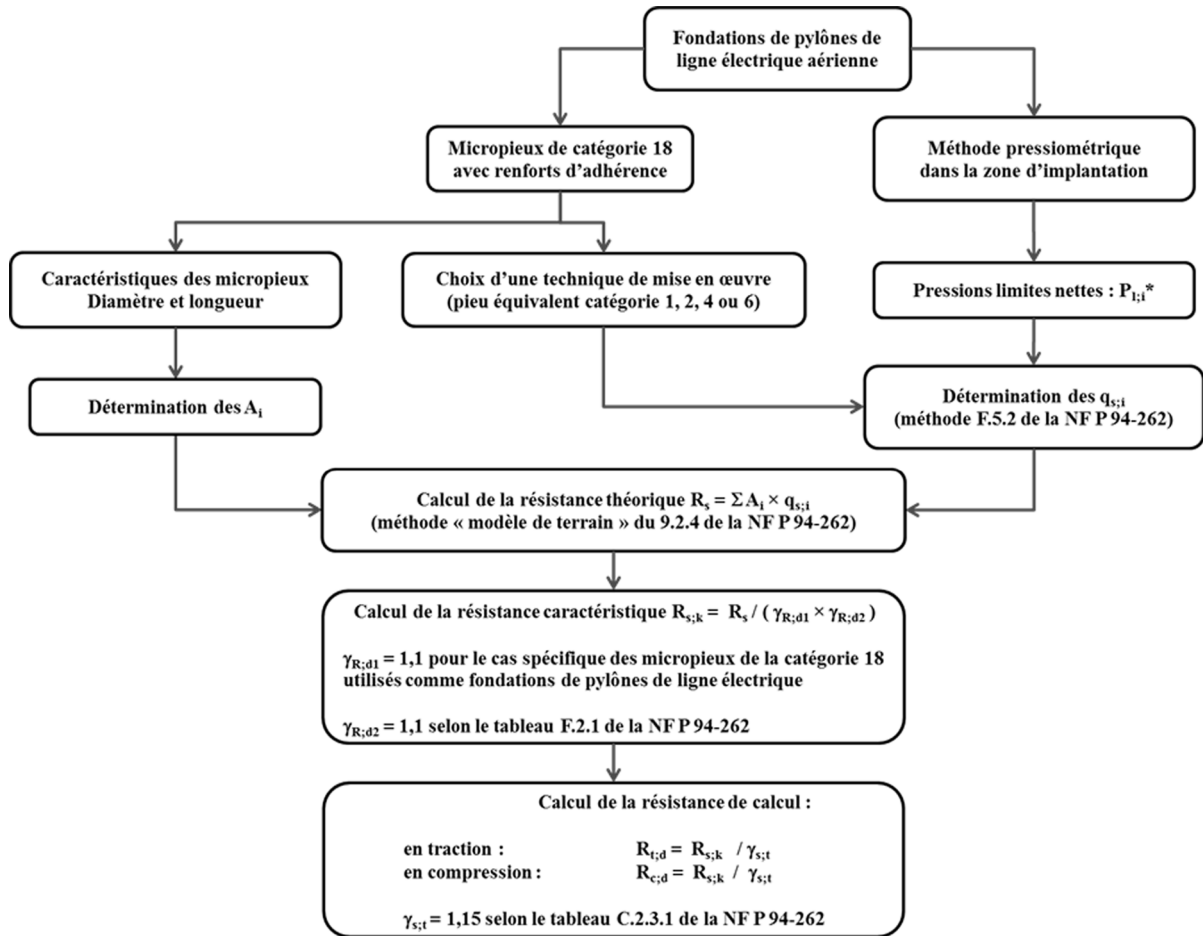


Fig. 5. Dimensionnement proposé dans le projet de norme NF EN 50341-2-8 dédiée au dimensionnement des lignes électriques aériennes en France.

Fig. 5. Design process proposed in NF EN 50341-2-8 draft, which is dedicated to the design of overhead power lines in France.

Enfin, le calcul de γ_{R,d_1} peut se faire selon la formule suivante, issue de l'équation (D.17) de l'annexe D de la norme EN 1990 :

$$\gamma_{R,d_1} = 1 / \left(b \times e^{-1,64 \times \alpha_x \times Q_x - 1,64 \times \alpha_\delta \times Q_\delta - 0,5 \times Q^2} \right). \quad (5)$$

La valeur de (k_n) de l'équation (D.17) a été choisie égale à 1,64 car avec 35 valeurs, il est déjà possible de considérer que n est suffisamment grand pour approcher de l'infini.

Finalement, à partir des 35 essais retenus dans la base de RTE, la valeur du coefficient de modèle γ_{R,d_1} vaut $1,12 \approx 1,1$ ce qui est assez éloigné de la valeur $\gamma_{R,d_1} = 2$ du tableau F.2.1 de l'annexe F de la norme NF P 94-262.

5 Conclusion

En se focalisant sur le cas particulier des fondations profondes de type micropieux de catégorie 18 utilisés comme supports de pylônes de lignes électriques aériennes, il est possible de caler à partir de 35 essais d'arrachement un nouveau

coefficient de modèle γ_{R,d_1} sensiblement différent du coefficient proposé dans la norme NF P 94-262. Cependant, la multiplication des trois coefficients $(\gamma_{R,d_1}, \gamma_{R,d_2}, \gamma_{s,t})$ permet d'obtenir un coefficient global identique au coefficient global des combinaisons fondamentales des anciennes règles du Fascicule 62 (Titre V – troisième partie) : $\gamma_{R,d_1} \times \gamma_{R,d_2} \times \gamma_{s,t} = 1,1 \times 1,1 \times 1,15 = 1,39 \approx 1,4$. Ainsi, l'adoption du coefficient de modèle $\gamma_{R,d_1} = 1,1$ dans la norme NF EN 50341-2-8 dédiée au dimensionnement des lignes électriques aériennes est compatible avec les principes de la norme EN 1990 (Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures) tout en permettant de rester fidèle aux anciennes règles de calcul que le retour d'expérience a largement validées dans le cadre de l'utilisation des micropieux comme fondations de pylônes.

La Figure 5 résume la philosophie du dimensionnement prévu dans le projet de norme NF EN 50341-2-8 pour les micropieux :

- de catégorie 18 au sens de la norme NF P 94-262 ;
- équipés de renforts d'adhérence « coulis/armatures » ;
- destinés à servir de fondations à des pylônes de lignes électriques aériennes.

Référence

Baguelin F, Burlon S, Bustamante M, Frank R, Gianceselli L, Habert J, Legrand S. 2012. Justification de la portance des pieux avec la norme « fondations profondes » NF P 94-262 et le pressiomètre. In: *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Bordeaux*, 4-6 juillet 2012, pp. 577-584.

Pour en savoir plus

Fascicule 62, titre V – *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil* – mars 1993, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.
NF EN 1990 – Eurocodes structureaux, Bases de calcul des structures – mars 2003, AFNOR.

NF EN 1997-1 – Eurocode 7 : Calcul géotechnique, Partie 1 : Règles générales – juin 2005, AFNOR.

NF EN 50341-1 – Lignes électriques aériennes dépassant 1 kV en courant alternatif – Partie 1 : Exigences générales - Spécifications communes – décembre 2012 pour la version anglaise, mai 2015 pour la traduction française, AFNOR.

NF EN 50341-2-8 – Lignes électriques aériennes dépassant 1 kV en courant alternatif – Partie 2-8 : Aspects Normatifs Nationaux pour la France – à paraître, AFNOR.

NF P 94-262 – Justification des ouvrages géotechniques, Normes d'application nationale de l'Eurocode 7, Fondations profondes – juin 2012, AFNOR.

NF P 94-150-2 – Sols : reconnaissance et essais, Essai statique de pieu isolé sous un effort axial, Partie 2 : En traction – décembre 1999, AFNOR.

Citation de l'article : Laurent Chaigneau, Hervé Ducloux. Justification du coefficient de modèle $\gamma_{R;d1}$ utilisé dans la norme NF EN 50341-2-8 pour le dimensionnement des micropieux de catégorie 18 utilisés comme fondations de pylônes de lignes électriques aériennes. Rev. Fr. Geotech. 2016, 147, 4.

Annexe A Caractéristiques des micropieux – Descriptions des sols – Résistances théoriques et expérimentales

Appendix A: Micropile characteristics – Soil descriptions – Theoretical and experimental resistances

Rappel : les essais n^{os} 3, 20, 28, 29, 39, 40 et 42 (en italique) ne sont pas utilisés dans le cadre de la détermination du coefficient de modèle

$\gamma_{R;d_1}$.

N°	Technologie de micropieu	Diamètre du forage (mm)	Longueur du micropieu (m)	Catégorie conventionnelle de terrain	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	p_l^* (MPa)	q_s (kPa)	R_s (kN)	R_e (kN)
1	Foré	180	9,5	Couche neutralisée	0	1	–	0		
				Sable et grave	1	3,2	0,91	64,3		
				Sable et grave	3,2	6	2,06	90	400,6	580
				Sable et grave	6	9	3,19	90		
2	Autoforé	165	8,44	Couche neutralisée	0	1	–	0		
				Sable et grave	1	3,2	0,91	82,6		
				Sable et grave	3,2	6	2,06	132,8	491,7	605
				Sable et grave	6	8,44	3,19	161,8		
3	<i>Foré</i>	220	8	<i>Couche neutralisée</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>–</i>	<i>0</i>		
				<i>Sable et grave</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>2,30</i>	<i>77,8</i>		
				<i>Marne et calcaire marneux</i>	<i>4</i>	<i>7</i>	<i>4,70</i>	<i>170</i>	<i>523,7</i>	
				<i>Marne et calcaire marneux</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>5,00</i>	<i>170</i>		
4	Foré	150	14,5	Couche neutralisée	0	3,5	–	0		
				Argile et limon	3,5	7,5	0,60	40,4		
				Argile et limon	7,5	9,5	0,80	43,8	225,7	300
				Argile et limon	9,5	13,5	0,95	45,4		
5	Autoforé	150	14,5	Argile et limon	13,5	14,5	1,40	48,3		
				Couche neutralisée	0	3,5	–	0		
				Argile et limon	3,5	7,5	0,60	55,0		
				Argile et limon	7,5	9,5	0,80	59,7	307,8	300
6	Foré	139,5	17	Argile et limon	9,5	13,5	0,95	62		
				Argile et limon	13,5	14,5	1,40	65,8		
				Couche neutralisée	0	1	–	0		
				Argile et limon	1	6,5	1,41	48,3		
7	Autoforé	150	6,1	Argile et limon	6,5	8,5	0,74	43,0	356,0	605
				Argile et limon	8,5	13	1,39	48,2		
				Argile et limon	13	17	4,90	60,2		
				Couche neutralisée	0	1	–	0		
				Argile et limon	1	3,7	0,48	50,6		
				Argile et limon	3,7	5,8	1,71	67,5	155,1	175
				Marne et calcaire marneux	5,8	6,1	3,22	169,2		

Annexe A. (suite).
Appendix A. (continued)

N°	Technologie de micropieu	Diamètre du forage (mm)	Longueur du micropieu (m)	Catégorie conventionnelle de terrain	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	p_t^* (MPa)	q_s (kPa)	R_s (kN)	R_c (kN)
8	Autoforé	150	7,3	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon Marnes et calcaires marnés Marnes et calcaires marnés	0 1 3,7 5,8 6,5	1 3,7 5,8 6,5 7,3	– 0,48 1,71 3,22 5,25	0 50,6 67,5 169,2 195,2	260,6	280
9	Autoforé	150	6,1	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon Marnes et calcaires marnés	0 1 3,7 5,8	1 3,7 5,8 6,1	– 0,48 1,71 3,22	0 50,6 67,5 169,2	155,1	340
10	Autoforé	150	7,3	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon Marnes et calcaires marnés Marnes et calcaires marnés	0 1 3,7 5,8 6,5	1 3,7 5,8 6,5 7,3	– 0,48 1,71 3,22 5,25	0 50,6 67,5 169,2 195,2	260,6	375
11	Foré	168	10	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon	0 1,8 8,5	1,8 8,5 10	– 1,34 2,6	0 48,0 52,6	211,3	415
12	Foré	168	10	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon	0 1,8 8,5	1,8 8,5 10	– 1,34 2,6	0 48,0 52,6	211,3	310
13	Autoforé	50	10	Couche neutralisée Argile et limon Argile et limon	0 1,8 8,5	1,8 8,5 10	– 1,34 2,6	0 65,2 71,7	85,7	115
14	Autoforé	130	9	Couche neutralisée Argile et limon Sable et gravier	0 0,5 7,3	0,5 7,3 9	– 0,70 3,00	0 57,7 157,5	269,6	495
15	Foré tubé	125	9	Couche neutralisée Argile et limon Sable et gravier	0 0,5 7,3	0,5 7,3 9	– 0,70 3,00	0 48,0 90,0	188,6	375
16	Autoforé	180	14,5	Couche neutralisée Argile et limon	0 1,4	1,4 14,5	– 1,2	0 64,4	477,2	600
17	Foré	140	6,4	Couche neutralisée Roche altérée et fragmentée	0 0,4	0,4 6,4	– 3,0	0 176	464,4	750
18	Foré boue	270	9,7	Argile et limon Argile et limon Marnes et calcaires marnés	0 4,5 7,7	4,5 7,7 9,7	1,0 1,0 1,9	52,1 52,1 142,3	581,9	600
19	Foré boue	270	10,2	Argile et limon Argile et limon Marnes et calcaires marnés	0 4,5 7,65	4,5 7,65 10,2	1,0 1,0 1,9	52,1 52,1 142,3	646,1	850

Annexe A. (suite).
Appendix A. (continued)

N°	Technologie de micropieu	Diamètre du forage (mm)	Longueur du micropieu (m)	Catégorie conventionnelle de terrain	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	p_l^* (MPa)	q_s (kPa)	R_s (kN)	R_c (kN)
20	Autoforé	270	10,1	Argile et limon	0	4,5	1,0	62,5	717,6	350
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	62,5		
				Marne et calcaire marneux	7,7	10,1	1,9	151,8		
21	Foré	270	10,2	Argile et limon	0	4,5	1,0	45,9	601,4	650
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	45,9		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,2	1,9	142,3		
22	Foré	270	10,1	Argile et limon	0	4,5	1,0	45,9	589,3	1050
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	45,9		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,1	1,9	142,3		
23	Foré boue	270	10,25	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	648,3	750
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,25	1,9	142,3		
24	Foré boue	270	10,2	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	642,3	800
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,2	1,9	142,3		
25	Foré boue	270	10,2	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	642,3	1000
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,2	1,9	142,3		
26	Foré boue	270	10,2	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	642,3	750
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,2	1,9	142,3		
27	Foré	180	10,1	Argile et limon	0	4,5	1,0	45,9	392,9	450
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	45,9		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,1	1,9	142,3		
28	Foré boue	450	10,4	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	1110,7	2350
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,4	1,9	142,3		
29	Foré	450	10,2	Argile et limon	0	4,5	1,0	45,9	1002,3	2390
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	45,9		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,2	1,9	142,3		
30	Foré boue	270	10,4	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	666,4	1150
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,4	1,9	142,3		
31	Foré boue	270	10,48	Argile et limon	0	4,5	1,0	52,1	676,1	1300
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	52,1		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10,48	1,9	142,3		
32	Foré	270	10	Argile et limon	0	4,5	1,0	45,9	577,2	1350
				Argile et limon	4,5	7,7	1,0	45,9		
				Mame et calcaire marneux	7,7	10	1,9	142,3		

Annexe A. (suite).
Appendix A. (continued)

N°	Technologie de micropieu	Diamètre du forage (mm)	Longueur du micropieu (m)	Catégorie conventionnelle de terrain	Profondeur début (m)	Profondeur fin (m)	p_i^* (MPa)	q_s (kPa)	R_s (kN)	R_e (kN)
33	Autoforé	130	9	Couche neutralisée Sable et grave	0 2	2 5	– 3,1	0 159,6	522,3	945
34	Autoforé	115	9	Roche altérée et fragmentée Couche neutralisée Sable et grave	0 1	1 9	– 3,6	0 170	491,4	840
35	Autoforé	156	11	Couche neutralisée Argile et limon	0 1	3	– 0,66	0 56,9	677,7	600
36	Autoforé	175	12	Marne et calcaire marneux Marne et calcaire marneux Couche neutralisée	3 7,5 0	7,5 11 2	1,40 3,89 –	143,7 177,8 0	677,7	600
37	Autoforé	130	12	Argile et limon Argile et limon Argile et limon	2 2,5 10	2,5 10,5 12	0,30 0,50 1,16	39,9 51,4 138,5	351,3	930
38	Autoforé	130	12	Marne et calcaire marneux Couche neutralisée	0 2,8	1 3	– 1,24	0 64,7	640,4	900
39	Foré	200	4,9	Argile et limon Marne et calcaire marneux Roche altérée et fragmentée	3 0 3,5	12 3,5 3,5	3,50 4,0 6,0	172,8 192 200	598,2	1500
40	Foré	220	4,9	Roche altérée et fragmentée Couche neutralisée	0 0,5	0,5 4,9	– 6,0	0 200	608,2	2380
41	Foré	220	7	Argile et limon Sable et grave	0 0,6	0,6 4,3	0,73 1,50	9,9 62,6	477,7	750
42	Autoforé	130	6	Marne et calcaire marneux Sable et grave Argile et limon	4,3 0 3,2	7 3,2 6	4,00 Pas de méthode pressiométrique	168	–	655

Annexe B Calculs intermédiaires permettant de déterminer le coefficient de modèle $\gamma_{R;d_1}$ Appendix B: Successive calculation steps used to generate the $\gamma_{R;d_1}$ model factor

Essai	R_s	R_e	$R_e R_s$	R_s^2	$\delta = R_e/bR_s$	$\Delta = \text{Ln}(\delta)$	$(\Delta - \Delta_m)^2$
1	401	580	232348	160480	0,9861	-0,014	0,00026
2	492	605	297478,5	241769	0,8380	-0,177	0,03195
4	226	300	67710	50940	0,9053	-0,099	0,01031
5	308	300	92340	94741	0,6638	-0,410	0,16955
6	356	605	215380	126736	1,1575	0,146	0,02079
7	155	175	27142,5	24056	0,7685	-0,263	0,07043
8	261	280	72968	67912	0,7318	-0,312	0,09878
9	155	340	52734	24056	1,4931	0,401	0,15903
10	261	375	97725	67912	0,9801	-0,020	0,00049
11	211	415	87689,5	44648	1,3377	0,291	0,08347
12	211	310	65503	44648	0,9992	-0,001	0,00001
13	86	115	9855,5	7344	0,9140	-0,090	0,00847
14	270	495	133452	72684	1,2505	0,224	0,04907
15	189	375	70725	35570	1,3542	0,303	0,09072
16	477	600	286320	227720	0,8564	-0,155	0,02468
17	464	750	348300	215667	1,1000	0,095	0,00869
18	582	600	349140	338608	0,7023	-0,353	0,12635
19	646	850	549185	417445	0,8960	-0,110	0,01250
21	601	650	390910	361682	0,7361	-0,306	0,09510
22	589	1050	618765	347274	1,2136	0,194	0,03668
23	648	750	486225	420293	0,7879	-0,238	0,05778
24	642	800	513840	412549	0,8483	-0,164	0,02773
25	642	1000	642300	412549	1,0604	0,059	0,00320
26	642	750	481725	412549	0,7953	-0,229	0,05340
27	393	450	176805	154370	0,7801	-0,248	0,06270
30	666	1150	766360	444089	1,1754	0,162	0,02545
31	676	1300	878930	457111	1,3096	0,270	0,07166
32	577	1350	779220	333160	1,5930	0,466	0,21490
33	522	945	493573,5	272797	1,2323	0,209	0,04279
34	491	840	412776	241474	1,1643	0,152	0,02252
35	678	600	406620	459277	0,6030	-0,506	0,25793
36	351	930	326709	123412	1,8031	0,589	0,34510
37	252	445	112051	63403	1,2037	0,185	0,03362
38	640	900	576360	410112	0,9572	-0,044	0,00210
41	478	750	358275	228197	1,0693	0,067	0,00422
			Somme	Somme		Moyenne	Somme/34
			11477441	7817238		Δ_m	S^2
		b				0,002	0,0683
		1,4682					V_δ
							26,6 %