

Analyse de groupes de micropieux sous charge transversale par une méthode hybride

Analysis of laterally loaded micropiles groups using a hybrid method

S. Perlo & R. Frank

CERMES (LCPC-ENPC), Marne-la-Vallée, France

E. Degny

Ministère de l'équipement, la Défense, France

R. Estephan

CERMES, actuellement Arcadis-ESG, Quimper, France

RÉSUMÉ

Cette communication présente une approche numérique pour estimer le comportement des groupes de pieux sous chargement axial et transversal. Le logiciel de calcul de groupe de pieux « GOUPEG-3D », reposant sur un modèle hybride est d'abord présenté, puis son aptitude à résoudre des problèmes tridimensionnels, et à tenir compte de l'interaction pieu-sol-pieu est démontré à travers l'analyse d'essais en vraie grandeur de groupes de micropieux sous sollicitation transversale.

ABSTRACT

This paper describes a numerical approach for predicting the behaviour of axially and laterally loaded pile groups. The GOUPEG-3D code, which uses a hybrid method is presented; its ability to solve three-dimensional problems, as well as pile-soil-pile interaction, is demonstrated through examples modelling the full-scale experiments on laterally loaded micropile groups.

1 INTRODUCTION

On fait appel aux fondations profondes, non seulement lors de réalisations « onshore », mais aussi « offshore » où les conditions environnementales rencontrées sont souvent plus sévères. Plus une structure est haute, plus elle est soumise aux forces transversales, comme le vent, les tremblements de terre ou encore les vagues.

Il est difficile d'appréhender les réactions du sol aux sollicitations des pieux. De manière simplifiée, on peut dire que lorsque le pieu est chargé transversalement, les réactions du sol se développent le long du pieu afin de permettre l'équilibre du système ; le pieu fléchit et le sol est soumis à des déformations (Fig. 1a). La relation entre le déplacement du pieu et la résistance du sol, matérialisée par les « courbes de réaction », est généralement non-linéaire (Fig. 1b).

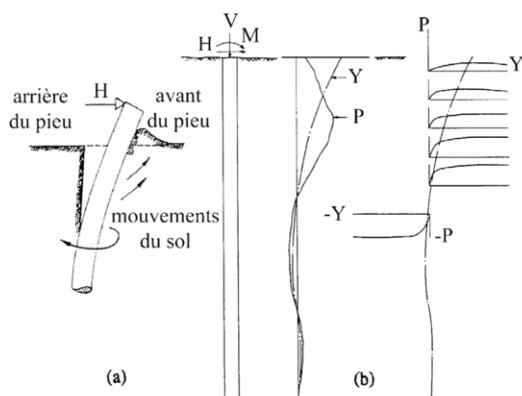


Figure 1. a) Comportement du sol autour du pieu au voisinage du terrain naturel (T.N.) (Broms, 1964)
 b) Réponse « P-y » d'un pieu sous un chargement transversal hypothétique (O'Neill et al., 1985) V : effort axial en tête ; H : effort transversal en tête de pieu ; M : moment en tête de pieu ; Y : déplacement dans la direction transversale ; P : réaction du sol dans la direction transversale.

Lorsque le pieu se trouve au sein d'un groupe, son comportement devient encore plus complexe, car il est soumis à des facteurs que l'on pourrait considérer comme géométriques ou

structuraux (géométrie du groupe, condition en tête, ...) ainsi que mécaniques, conséquence de l'interaction sol-structure conduisant à la superposition des champs de contraintes et de déformation (Fig. 2).

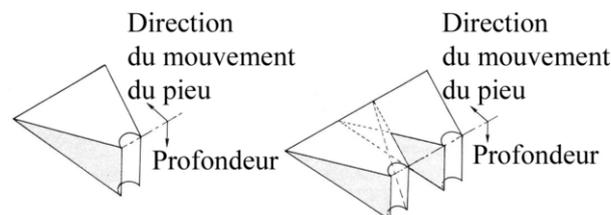


Figure 2. Zones de chevauchement des contraintes de cisaillement de la rangée « avant » (Brown et al., 1988)

2 GROUPES DE PIEUX SOUS CHARGES TRANSVERSALES

Les mesures de déplacements en tête, dans le cas de groupes de pieux sous charge transversale, ont mis en évidence l'effet d'ombre, qui se traduit par la réduction de la résistance du pieu de la rangée « arrière » en raison de la présence des pieux qui les précèdent. Les courbes de réaction présentées sur la figure 3, issues d'essais en centrifugeuse, illustrent l'influence à la fois de l'effet de groupe et de l'effet d'ombre sur le comportement des pieux au sein du groupe par rapport à celui du pieu isolé qui lui est associé.

En effet, dans les groupes faiblement espacés, l'augmentation de contrainte dans le sol due aux pieux voisins limite la charge qu'aurait pu supporter le pieu isolé. L'effet de groupe conduit à l'assouplissement du sol qui se traduit par une diminution des valeurs de la résistance limite et une augmentation de la déflexion du pieu (O'Neill et Dunnavant, 1985).

De manière analytique, les courbes de réaction d'un pieu isolé sont modifiées pour tenir compte de l'interaction pieu-sol-pieu par des facteurs multiplicateurs de déplacement, notés « $F_{act,y}$ », et des facteurs réducteurs de pression ultimes, notés « $F_{act,p}$ » (Fig. 4). Ces facteurs peuvent être estimés à partir d'essais en vraie grandeur (Rollins et al., 1998), en modèle réduit (Georgiadis et al., 1991), en centrifugeuse (Mc Vay et al.,

1998), ou de calculs numériques par les éléments finis (Brown et Shie, 1990 ; Ata, 1998) ou utilisant la théorie du continuum (O'Neill et al., 1977 ; Hariharan et Kumarasamy, 1982 ; Maléki, 1995).

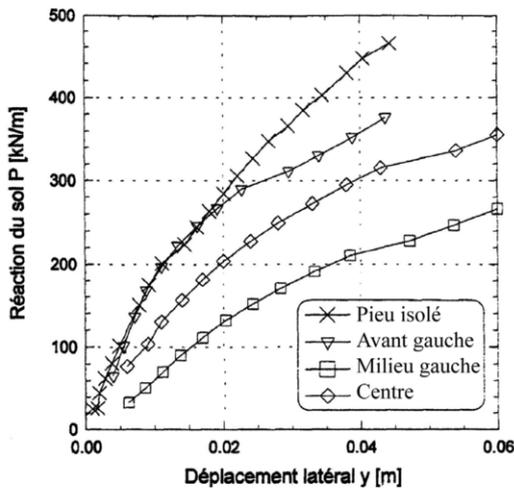


Figure 3. Courbes P-y obtenues par des essais en centrifugeuse sur un pieu isolé et les pieux au sein du groupe associé de 3x3 pieux de 3 diamètres d'entre-axe selon leur position (Remaud, 1999).

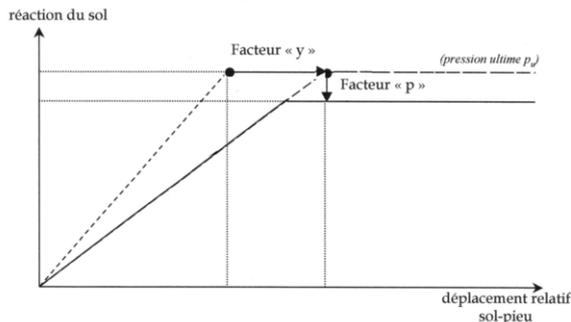


Figure 4. Modélisation de la prise en compte de l'effet de groupe par modification des courbes « P-y » par l'association de facteurs correcteurs de déplacement « $\langle y \rangle$ » et de pression limite « $\langle p \rangle$ ».

3 PROGRAMME GOUPEG-3D

Le but du logiciel GOUPEG-3D réside dans le calcul de la réponse d'un groupe de pieux soumis à des sollicitations tridimensionnelles en un point de son chevron, et à des déplacements du sol de direction quelconque associés à chacun des pieux. Le logiciel permet une forme propre à chaque pieu et une disposition géométrique quelconque dans l'espace.

Le logiciel GOUPEG-3D est une évolution du programme GOUPIIL-LCPC (Bangratz, 1982 ; Degny et Romagny, 1989) que l'on a modifié pour tenir compte de l'interaction pieu-sol-pieu pour les configurations de groupes ou de réseaux de manière automatique.

Ces programmes utilisent, pour la modélisation des pieux, les équations classiques de la résistance des matériaux en considérant que le pieu suit un comportement élastique. Le modèle utilisé pour traduire le comportement du sol est une extension du modèle de Winkler, c'est-à-dire que le sol est représenté par les courbes de réaction multilinéaires avec palier, appelées « t-z » pour les frottements latéraux et « p-y » pour les réactions transversales. Le système pieu-sol est discrétisé selon plusieurs critères, puis les calculs sont réalisés en utilisant les notions de matrice de transfert, de vecteur d'état et d'éléments de rigidité (Géry et Calgato, 1973).

La prise en compte de l'interaction pieu-sol-pieu suit la procédure des méthodes hybrides, c'est-à-dire que l'interaction sol-

pieu est calculée à partir de la méthode de Winkler et l'interaction pieu-sol-pieu est estimée à partir d'une méthode reposant sur la théorie du continuum (O'Neill et al., 1977). Dans le logiciel GOUPEG-3D, les équations de Mindlin (1936) sont utilisées. Celles-ci permettent d'estimer les déplacements (ou les contraintes) au sein d'un massif semi-infini élastique, homogène et isotrope en présence d'une force. Les solutions à ces équations sont fournies pour une force ponctuelle perpendiculaire ou parallèle à la surface frontière (Fig. 5).

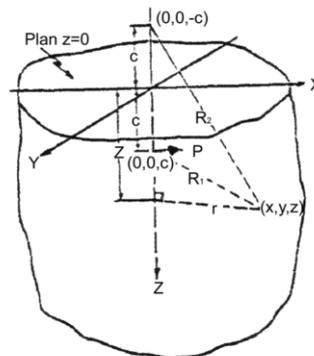


Figure 5. Force parallèle à la frontière à l'intérieur d'un massif semi-infini. (X, Y, Z) représente le repère dans lequel sont exprimées les équations (Mindlin, 1936)

L'interaction pieu-sol-pieu est prise en compte en calculant à partir des équations de Mindlin les déplacements et les contraintes induits par la réaction des pieux aux sollicitations du sol. Cette réaction est estimée lors d'un premier calcul de groupe sans tenir compte de l'interaction et transformée pour être introduite dans les équations de Mindlin (Fig. 6).

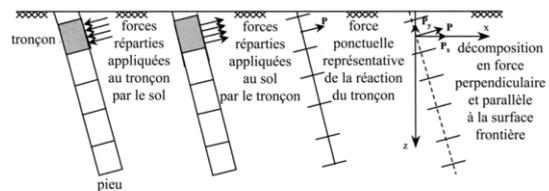


Figure 6. Passage des forces réparties calculées par le logiciel GOUPEG aux forces ponctuelles des équations de Mindlin.

Chaque tronçon de pieu induit des déplacements et des contraintes sur tous les tronçons des autres pieux, donc les déplacements induits pour chaque tronçon sont calculés comme suit, la formulation étant identique pour les contraintes induites :

$$dy = \sum_{K=1}^N \sum_{ktr=1}^{n_{ktr}} dy_{ktr} \quad (1)$$

où dy = déplacements induits sur un tronçon donné, d'un pieu « I » par tous les tronçons « ktr » constituant le pieu « K » (avec $K \neq I$) présentant une réaction du sol assimilable aux forces de Mindlin. N = le nombre de pieux dans le groupe et n_{ktr} = le nombre de tronçon composant le pieu « K ».

Une fois calculés les déplacements et les contraintes induits pour un tronçon donné, les facteurs multiplicateurs de déplacement et réducteurs de pression ultime peuvent être estimés selon les équations (2) et (3) respectivement. Ces facteurs viendront modifier les courbes de réaction associées à ce tronçon comme présenté sur la figure 4. Afin de prendre en compte l'effet de groupe lors d'un chargement axial, seul les facteurs de déplacement sont utilisés (O'Neill et al., 1977 ; Maléki, 1995 ; Maléki et Frank, 1997), alors que pour un chargement transversal, en raison de la manifestation d'un effet d'ombre, les facteurs réducteurs de pression ultime sont aussi introduits (Perlo, 2003) :

$$\begin{aligned}
 \text{Fact. } y &= \begin{cases} \frac{y_0 + dy}{y_0} & \text{si } y_0 \cdot dy > 0 \\ 1 & \text{si } y_0 \cdot dy < 0 \end{cases} \quad (\text{O' Neill et al., 1977}) \quad (2) \\
 \text{Fact. } p &= \begin{cases} \frac{p_0 - dp}{p_0} & \text{si } p_0 \cdot dp > 0 \text{ et si } p_0 > dp \\ 1 & \text{si } p_0 \cdot dp < 0 \text{ ou si } p_0 < dp \end{cases} \quad (3)
 \end{aligned}$$

où $\text{Fact. } y$ est le facteur multiplicateur de déplacement ; y_0 , le déplacement propre du tronçon (c'est-à-dire sans tenir compte de l'interaction entre les pieux) ; dy , le déplacements induits par les tronçons des autres pieux ; $\text{Fact. } p$, le facteur réducteur de la pression ultime ; p_0 , la contrainte propre du tronçon (c'est-à-dire sans tenir compte de l'interaction entre les pieux) et dp , les contraintes induites par les tronçons des autres pieux.

Une fois toutes les courbes de réaction modifiées selon la procédure décrite ci-dessus, les déplacements et les contraintes pour le groupe sont recalculés, et le calcul est arrêté ou relancé selon un critère de convergence reposant sur les déplacements en tête de pieu.

4 ANALYSE DES ESSAIS DE CHARGEMENT TRANSVERSAL DES MICROPIEUX

Inscrits dans le cadre du projet national FOREVER (Cyna et al., 2004), les essais réalisés dans du sable de Fontainebleau par le CEBTP à Saint Rémy-lès-Chevreuse comprenaient neuf micropieux isolés (trois de type IIb, trois de type IIh, trois R-SOL assimilés type IV), et deux groupes de 2x2 micropieux espacés de deux diamètres. Les modes de réalisation des micropieux sont illustrés ci-dessous (Fig. 7) et (Fig. 8). Les micropieux présentaient un diamètre $B \approx 100$ mm et une longueur de scellement $L = 5$ m. Des essais de chargement axial et transversal ont été réalisés selon les normes en vigueur en France.

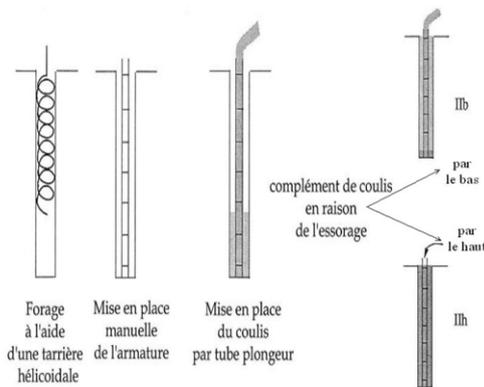


Figure 7. Réalisation des micropieux de type IIb et IIh.

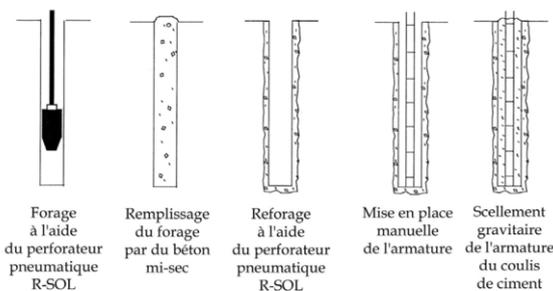


Figure 8. Réalisation des micropieux R-SOL.

On présente ci-dessous les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour les micropieux sous charges transversales.

La principale innovation de la méthode présentée ici par rapport aux travaux antérieurs (Maléki, 1995 ; O'Neill et al., 1977) consiste en la modification des courbes de réaction p-y par un facteur réducteur de pression ultime.

La construction des courbes de réaction relatives aux micropieux isolés correspond à celles préconisées par le fascicule 62-Titre V (1993). Il s'agit de courbes bilinéaires, dont la pente, calculée à partir du module pressiométrique moyen du massif de sol $E_M = 5$ MPa est égale à $K_f = 27,5$ MPa (Plumelle et Raynaud, 1996). La pression ultime de la réaction transversale est prise égale à la pression de fluage $pf = 0,25$ MPa. Afin de prendre en compte l'effet de surface produit lors d'un chargement transversal, en suivant le fascicule 62-Titre V, on fait varier la pente et la valeur de la pression ultime des courbes de réaction sur une couche d'épaisseur 4B linéairement avec la profondeur.

En raison d'une possible fissuration du coulis lors de la flexion des micropieux, le module d'Young et le moment d'inertie des micropieux introduits dans les données des calculs réalisés par le logiciel GOUPEG-3D sont ceux des armatures métalliques.

La prise en compte de l'interaction pieu-sol-pieu par les équations de Mindlin fait intervenir le coefficient de Poisson, pris égal à $\nu = 0,3$, comme fréquemment recommandé pour un sable fin et assez lâche, et le module de cisaillement, calculé à partir du module pressiométrique et du coefficient de Poisson, pris égal à $G = 5,77$ MPa ($G = E / (2(1 + \nu))$) et $E = 3 E_M$ selon Baguelin et al. (1978), valeurs en accord également avec celles fournies par Bowles (1996).

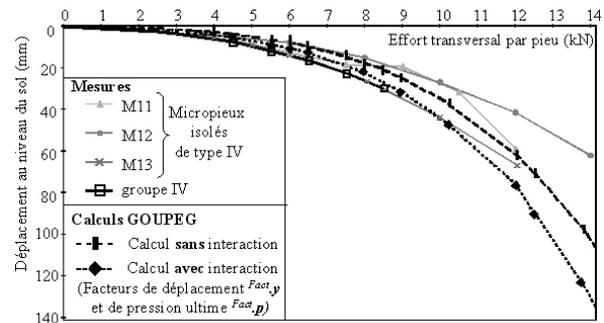


Figure 9. Essais de chargement transversal des micropieux isolés et en groupe de type IV. Courbes effort par micropieu -déplacement issues des mesures et des calculs à l'aide du logiciel GOUPEG-3D en utilisant les deux facteurs correcteurs (« $\text{Fact. } y$ » et « $\text{Fact. } p$ »)

Sur la figure 9 sont à la fois présentées les courbes effort-déplacement relevées sur le site de Saint Rémy (en trait plein) et les simulations réalisées avec le logiciel GOUPEG-3D (en pointillés). L'interaction pieu-sol-pieu a été prise en compte dans ces calculs en modifiant les courbes de réaction du sol définies pour un pieu isolé par un facteur correcteur de déplacement « $\text{Fact. } y$ », mais aussi de pression ultime « $\text{Fact. } p$ » (Fig. 4). Les calculs effectués sans tenir compte de l'interaction pieu-sol-pieu concernent d'une part les micropieux isolés et, d'autre part, servent de point de départ au calcul avec prise en compte de l'interaction.

La courbe effort-déplacement obtenue sans tenir compte de l'interaction est relativement bien encadrée par celles relevées lors des essais de micropieux isolés, avec une légère surestimation des déplacements à partir d'une charge transversale en tête de 10-11 kN, qui se répercute sur le calcul avec interaction, induisant là aussi une surestimation.

La figure 10 présente les mesures de déplacements transversaux relevées pour le groupe de micropieux de type IV et celui de type II, ainsi que les résultats des calculs reposant sur différentes prises en compte de l'interaction pieu-sol-pieu. Ainsi, cette figure permet de souligner l'apport de l'utilisation du facteur réducteur de pression ultime (« $\text{Fact. } p$ ») ; en effet l'augmentation des déplacements induits par l'effet du groupe

obtenue dans un calcul GOUPEG-3D ne faisant intervenir qu'un facteur correcteur de déplacement « $F_{act,y}$ » (courbe en pointillé comprenant des symboles « rond ») demeure insuffisante dans le cas de groupe de pieux sous charge transversale.

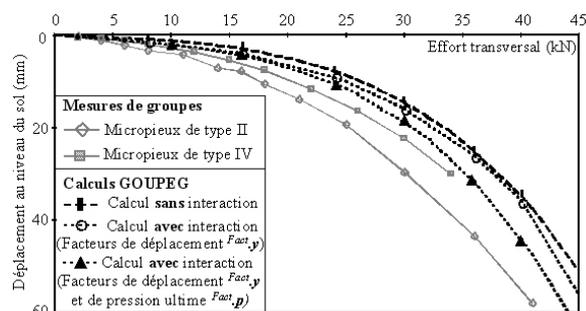


Figure 10. Essais de chargement transversal des groupes de micropieux de type II et de type IV. Courbes effort-déplacement issues des mesures et des calculs à l'aide du logiciel GOUPEG-3D.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le programme GOUPEG-3D, présenté dans cette communication de manière simplifiée, utilise une méthode hybride couplant pour la représentation de l'interaction sol-pieu, les fonctions de transfert de charge et pour l'interaction pieu-sol-pieu, la théorie du continuum élastique par le biais des équations de Mindlin. Le principe de la prise en compte de l'effet de groupe réside dans la modification des courbes de réaction du sol par des facteurs correcteurs.

Au vu des essais de groupe sous charge transversale, on peut constater que l'effet de groupe entraîne un radoucissement des courbes, mais aussi une diminution de la pression ultime, phénomène pouvant s'expliquer par ce que l'on appelle couramment « l'effet d'ombre », propre à ce type de chargement. Par rapport à sa version précédente (Maléki et Frank, 1997), un facteur correcteur de pression ultime a été introduit dans le logiciel GOUPEG-3D. Ce dernier se calcule comme pour le facteur de déplacement à partir d'un calcul de groupe sans prise en compte de l'interaction pieu-sol-pieu et des équations de Mindlin, en utilisant la formulation des contraintes induites dans un massif semi-infini, élastique homogène et isotrope par une force ponctuelle.

Grâce au projet national FOREVER, on a pu analyser des essais en vraie grandeur richement documentés réalisés par le CEBTP dans du sable de Fontainebleau. Ils comprenaient neuf micropieux isolés et deux groupes de micropieux, permettant ainsi d'appuyer les hypothèses sur l'influence de l'interaction pieu-sol-pieu. En ce qui concerne les chargements transversaux, les courbes de transfert de charge représentant la réaction du sol face aux sollicitations des micropieux ont été réalisées en suivant les recommandations du Fascicule 62 – Titre V, à partir des mesures effectuées avec le pressiomètre.

Les comparaisons des courbes effort-déplacement relevées sur le site et celles obtenues par les calculs GOUPEG-3D se sont révélées encourageantes quant à l'adéquation du logiciel à prendre en compte de manière automatique l'interaction pieu-sol-pieu. On a pu aussi constater que lorsqu'il s'agit de groupe de pieux sous charge transversale le facteur de déplacement ne peut à lui seul représenter l'effet de groupe dans sa globalité, c'est-à-dire en incluant l'effet d'ombre.

Le logiciel GOUPEG-3D est un code facile d'utilisation et qui fournit de manière très rapide les valeurs essentielles caractérisant le comportement d'un pieu ou d'un groupe de pieux en trois dimensions (la géométrie des pieux et les sollicitations) sous divers chargements. D'autres analyses d'essais sont encore nécessaires pour confirmer son efficacité et affiner les choix des paramètres de calcul du groupe (coefficient de Poisson et module de cisaillement).

RÉFÉRENCES

- Ata, N. 1998. *Etude du comportement de micropieux sous charge transversale. Construction numérique des courbes (p-y) et couplage fluide-squelette*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et technologies de Lille, 168p.
- Baguélin, F., Jézéquel, J.F. et Shields, D.H. 1978. *The Pressuremeter and Foundation Engineering, Series on Rock and Soil Mechanics*, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, 617p.
- Bangratz, J.-L. 1982. *Calcul élastique non-linéaire d'un groupe de pieux, analyse et programmation*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, FAER 1.05.10.1, février.
- Bowles, J. 1996. *Foundation analysis and design*. The Mc Graw-Hill Companies, Fifth Edition, 1173p.
- Broms, B.B. 1964. Lateral resistance of piles in cohesive soils. *ASCE* vol.90 n°SM2, March.
- Brown, D.A., Morrison, C. et Reese, L.C. 1988. Lateral load behaviour of pile group in sand. *Journal of geotechnical engineering, ASCE*, vol.114, n°11, November, 1261-1276.
- Brown, D.A. et Shie, C.-F. 1990. Numerical experiments into group effects on the response of piles of lateral loading. *Computers and geotechnics*, vol. 10, N°3, 211-230.
- Cyna, H., Schlosser, F., Frank, R., Plumelle, C., Estéphan, R., Altmayer, F., Goulesco, N., Juran, I., Maurel, C., Shahrouh, I. et Vezole, P. 2004. *Synthèse des résultats et recommandations du Projet national sur les micropieux FOREVER*. Opération du Réseau Génie Civil et Urbain, IREX, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, mai, 347p.
- Degny, E. et Romagny, J.-L. 1989. Calcul des efforts et déplacements dans les groupes de pieux : le programme GOUPII. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 162, juillet-août. Fascicule 62-Titre V. 1993. *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*. Centre des techniques des ouvrages d'art, Cahier de clauses techniques applicables aux marchés publics de travaux, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.
- Georgiadis, M., Anagnostopoulos, C. et Saffekou, S. 1991. Interaction of laterally loaded piles. *Edit. Presse Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, 177-184.
- Géry, P.M. et Calgaro, J.A. 1973. *Les matrices-transferts dans le calcul des structures*. Editions Eyrolles, 304p.
- Hariharan, M. et Kumarasamy, K. 1982. Analysis of pile groups subjected to lateral loads. *Proceeding third international conference on behaviour of offshore structures*, vol. 2, Cambridge-Massachusetts, 383-390.
- Maléki, K. 1995. *Contribution à l'étude du comportement des micropieux isolés et en groupe*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 350p.
- Maléki, K. et Frank, R. 1997. Une approche pour le calcul des groupes de micropieux chargés axialement. *Comptes rendus du 14^{ème} Congrès International de Mécanique des sols et des travaux de fondations*, vol.2, Balkema, Hambourg, 1107-1110.
- Mc Vay, M.C., Zhang, L., Molnit, T. et Lai, P. 1998. Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands. *Journal of geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 121, N°5, 436-441.
- Mindlin, R.D. 1936. Force at a point in the interior of semi-infinite solid. *Physics*, March, 195-202.
- O'Neill, M.W. et Dunnavant, T.W. 1985. An evaluation of the behaviour and analysis of laterally loaded pile groups. *A report to the American Petroleum Institute*, December, 177p.
- O'Neill, M., Ghazzaly, O.I. et Ha, H. 1977. Analysis of 3D pile groups with non-linear soil response and pile-soil-pile interaction. *Offshore technology conference*, Houston, may 2-5, 245-250.
- Pello, T., Plumelle, C. et Raynaud D. 1995. *Expérimentation en vraie grandeur de groupes de micropieux. Réalisation des micropieux*. Projet national FOREVER, Rapport interne FO/94/01, mars, 14p.
- Perlo, S. 2003. *Etude numérique par l'approche hybride des groupes de pieux*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 212p.
- Plumelle, C. et Raynaud, D. 1996. *Essais de chargement des micropieux isolés et de groupes*, Projet national FOREVER, Rapport interne FO/95/03, mars, 51p.
- Rémaud, D. 1999. *Pieux sous charges latérales: Etude expérimentale de l'effet de groupe*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 229p.
- Rollins, K., Peterson, K.T. et Thomas, J.W. 1998. Lateral load behaviour of full-scale pile group in clay. *Journal of geotechnical engineering, ASCE*, vol.124, N°6, 468-478.