

## Objectifs

Un micropieu est un pieu de diamètre inférieur à 250 mm environ, le plus souvent foré, et comportant une armature centrale scellée dans un mortier ou un coulis de ciment. Utilisés depuis de nombreuses années, les micropieux offrent un vaste champ d'applications en groupe (ensemble de micropieux verticaux) ou en réseaux (ensemble de micropieux verticaux et inclinés). Leur capacité portante est essentiellement assurée par le frottement micropieu/sol.

Ils sont d'abord utilisés pour la reprise en sous-œuvre et le renforcement de bâtiments ou d'ouvrages existants, mais également pour les fondations d'ouvrages neufs en terrains difficiles, pour la stabilisation de pentes et de talus ainsi que pour les soutènements, les tunnels et la protection de structures enterrées. Les réseaux de micropieux ont également de remarquables capacités de résistance aux actions sismiques.

Le Projet National FOREVER, grâce à un programme d'études et d'essais devait préciser le comportement des micropieux isolés, en groupe et en réseau, et établir des règles de l'art ainsi qu'une méthode de dimensionnement permettant d'étendre leurs champs d'application.

# Projet National FOREVER

## Renforcement des sols par micropieux

### Programme réalisé

*Tant pour les comportements élémentaires, que pour les groupes et les réseaux de micropieux, le projet a eu recours à des études théoriques, à des essais sur modèles réduits de laboratoire (centrifugeuse et chambre d'étalonnage), et à des essais en vraie grandeur sur site expérimental ou à l'occasion de chantiers réels.*

*En ce qui concerne les études théoriques, les travaux ont consisté essentiellement en la mise en œuvre de moyens modernes d'analyse numérique. Ainsi, le programme Goupil-LCPC (basé sur les fonctions de transfert de charge) a été étendu à la prise en compte des effets de groupe (programme Goupeg).*

*Des méthodes d'homogénéisation d'inclusions dans les sols ont également été appliquées. La méthode des éléments finis a permis, elle, d'étudier notamment divers aspects sismiques.*

### 1

#### Etudes "paramétriques" sur des modèles réduits de micropieux

La centrifugeuse du LCPC à Nantes, ainsi que la grande cuve d'essais du Laboratoire 3S (Grenoble) et la chambre d'étalonnage du CERMES (ENPC-LCPC) ont permis de mener des études "paramétriques" sur des modèles réduits de micropieux.



**LCPC à Nantes**

Centrifugeuse géotechnique du LCPC à Nantes (essais de modèles réduits de réseaux de micropieux).





**Saint-Rémy-lès-Chevreuse**  
Pieux excavés du site expérimental de sable du CEBTP.



**Rueil-Malmaison**  
Essai de chargement de 3 micropieux - LCPC.



**Grenoble**  
Modèle réduit d'un réseau de 18 micropieux testés dans la grande cuve du labo 3S de Grenoble.

2

## Le site expérimental du CEBTP à Saint-Rémy-lès-Chevreuse

Il a été construit afin d'étudier le comportement de micropieux en vraie grandeur. Il s'agit d'un massif de sable de Fontainebleau, de dimensions 10 m x 10 m et de 6 m de hauteur, mis en place à la densité  $I_D = 0,5 - 0,6$ . Différents types de micropieux verticaux ont été testés, isolés et en groupes (2x2 micropieux), tant sous charges axiales que transversales. De plus des essais portant sur des paires de chevalets (groupes de 2x2 micropieux inclinés) ont été réalisés afin de simuler des réseaux simples.

3

## Chantier de la déviation de Rueil-Malmaison

Les observations sur chantiers ont également apporté leurs contributions au projet. Ainsi, sur le chantier de la déviation de Rueil-Malmaison on a pu tester un groupe de trois micropieux soumis à une traction axiale. Cette expérimentation a été l'occasion d'essayer, avec succès, une méthode de calcul d'effets de groupe fondée sur les résultats d'essais pressiométriques (grâce au logiciel Goupeg).

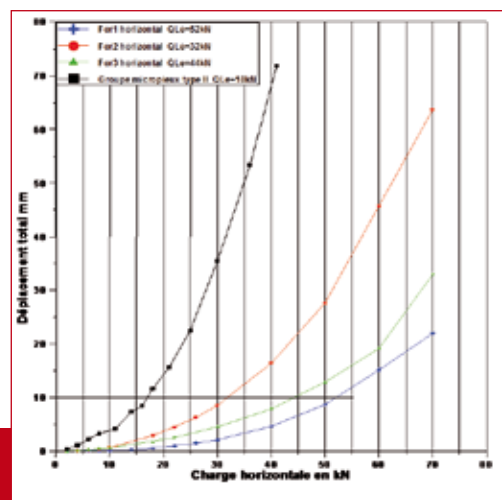
4

## Autoroute A4

Un chantier de construction d'un mur anti-bruit, le long de l'Autoroute A4, a été l'occasion de tester un massif de fondation reposant sur 2 micropieux de 17 m de longueur, dont l'un était incliné à 13,5°. Ce chantier a permis de réaliser des essais de chargements et d'interpréter les résultats.

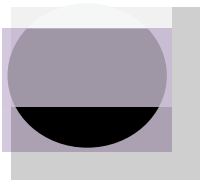
Enfin, l'étude du comportement sismique de micropieux a été l'occasion de collaborations entre le PN FOREVER et l'Université Polytechnique de New-York et la FHWA (Federal Highway Administration) et l'Université de Canterbury en Nouvelle Zélande.

“ Utilisés depuis de nombreuses années, les micropieux offrent un vaste champ d'applications en groupe (ensemble de micropieux verticaux) ou en réseaux (ensemble de micropieux verticaux et inclinés). ”



### Essais de chargement

Résultats des essais de chargement horizontal du groupe et de 3 réseaux simples de micropieux sur le site de Saint-Rémy-lès-Chevreuse.



## Organisation

### La Direction du Projet

Président : Henri CYNA  
 (Président honoraire de Cofiroute),  
 Directeur scientifique : François SCHLOSSER  
 (Terrasol),  
 Directeur technique : Roger FRANK  
 (CERMES/ENPC-LCPC)

### Les partenaires

ANTEA - Bouygues - BRGM - Campenon Bernard  
 (Vinci) - CEBTP - CERCISO et CERMES (Navier, ENPC-  
 LCPC), - Cofiroute - Ecole Centrale de Lille - Federal  
 Highway Administration (FHWA - USA) - Forezienne  
 d'Entreprises (Eiffage) - Ischebeck - Laboratoire 3S/  
 Grenoble - LCPC - Ménard Renforcement - RATP  
 - Scetauroute (Egis) - Sétra - SNCF - Socaso - Soil  
 Nailing - Solétanche Bachy - Terrasol - Université de  
 Canterbury (Nouvelle-Zélande).



## Durée Budget

Le Projet National FOREVER s'est déroulé de 1993 à 2001.

Le budget s'est élevé à 5 091 000 € HT dont 764 000 € HT de subventions DRAST, le solde en apports en nature et cotisations des partenaires.

Essai de chargement dynamique d'un micropieux à Saint-Rémy- lès-Chevreuse - CEBTP



## Publications

Les travaux du Projet National FOREVER ont fait l'objet de plus de 70 rapports et articles.

Ils ont abouti à la rédaction de l'ouvrage :

- « **Synthèse des résultats et recommandations du Projet National sur les micropieux** », édité par les Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- Une traduction en anglais a été éditée par l'Association ADSC aux Etats Unis pour le compte de la Federal Highway Administration.



Essai de chargement de 3 micropieux à Rueil-Malmaison - LCPC



## Applications et retombées du Projet National

**En plus de recommandations sur l'exécution des micropieux, le Projet National FOREVER a permis de préciser les conditions dans lesquelles on peut obtenir un effet de groupe ou de réseau positif.**

■ Par ailleurs, l'ensemble des résultats scientifiques de l'ouvrage de synthèse a servi de base à plusieurs recherches complémentaires dans des universités étrangères.

■ Sur un autre plan la recherche collaborative menée à l'occasion du Projet National FOREVER a suscité la création d'une Société Internationale des Micropieux (ISM-International Society for Micropiles) regroupant les praticiens et chercheurs d'Amérique du Nord, d'Europe et du Japon essentiellement. Cette société tient pratiquement chaque année, depuis 1995, un symposium international pour lequel les experts français sont sollicités

■ Une application directe des schémas de réseaux de micropieux étudiés dans le cadre du Projet National FOREVER, a été faite sur un chantier de bâtiment à Poitiers, où certaines semelles reposent sur des remplissages argileux au lieu d'un calcaire sain initialement prévu.

Des micropieux rayonnants en plan et d'inclinaison variable ont été installés sous les semelles dont les dimensions n'ont pas été modifiées.

Des micropieux verticaux de renfort avaient été prévus en cas de nécessité mais l'observation a confirmé l'efficacité étonnante de ce réseau de micropieux divergents, installés dans l'argile pour obtenir une portance élevée, accompagnée de tassements modestes.

*Passerelle Simone de Beauvoir : ouvrage fondé sur micropieux.  
© PIX'N PIX, O. Farré*



Poitiers. Les Cordeliers

