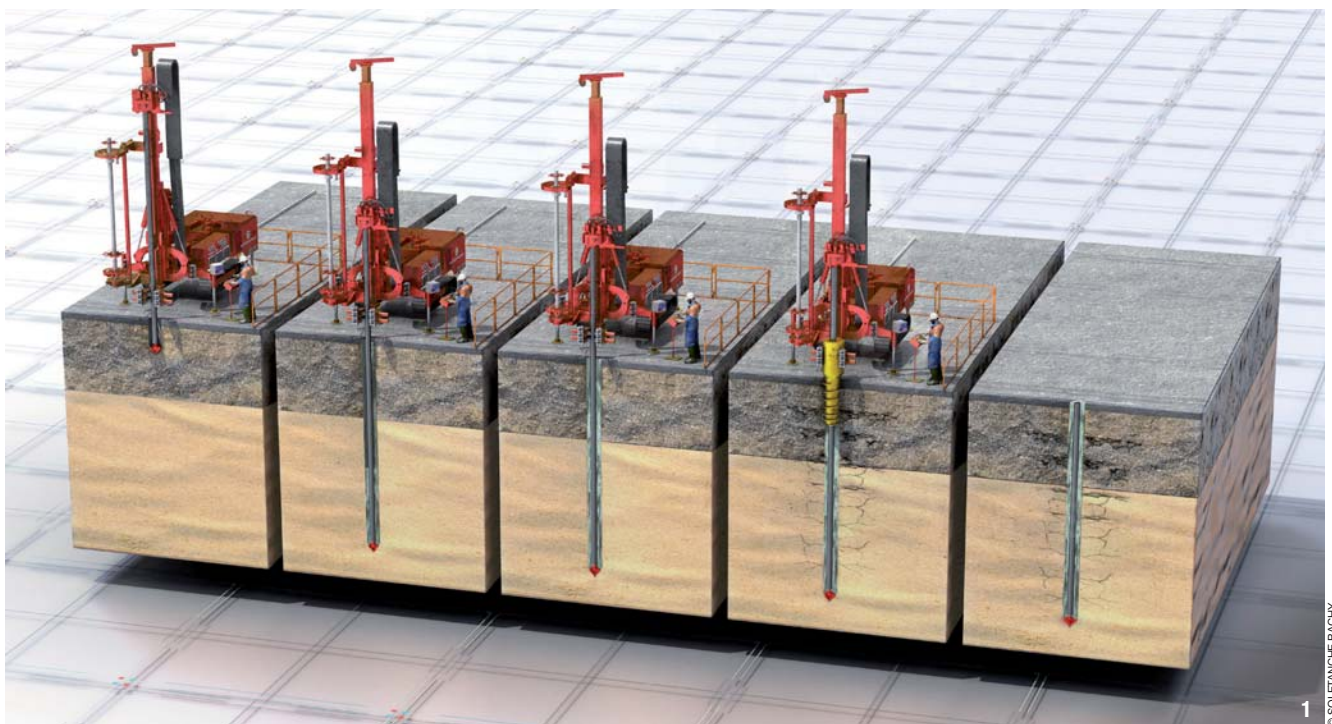


COMMENT INNOVER AVEC DES MICROPIEUX ? L'INJECTION DE SERRAGE UNITAIRE

AUTEURS : PAUL VIDIL, DIRECTEUR ADJOINT DU BUREAU D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE -
AURÉLIEN PRUGNAUD, INGÉNIEUR MÉTHODES EXPERT, SOLETANCHE BACHY FRANCE

INNOVER ENCORE EN TERMES DE MICROPIEUX, ALORS QUE TOUT EST DÉJÀ DÉFINI DANS LES NORMES ET LES GUIDES, POURRAIT SEMBLER UNE GAGEURE. C'EST POURTANT CE QUI A ÉTÉ FAIT AVEC LE PROCÉDÉ ISU, INJECTION DE SERRAGE UNITAIRE, QUI EST L'ABOUTISSEMENT D'UNE DÉMARCHE DE SOLETANCHE BACHY VISANT, D'UNE PART, À AMÉLIORER LA QUALITÉ D'EXÉCUTION DES MICROPIEUX INJECTÉS ET, D'AUTRE PART, À RENDRE PLUS EFFICACE LA RÉALISATION DES MICROPIEUX.



© SOLETANCHE BACHY

INTRODUCTION

La norme d'application nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes, NF P94-262, définit quatre types de micropieux : les micropieux type I et II, les micropieux injectés mode IGU (type III) et mode IRS (type IV). Or, force est de constater que les micropieux type III sont ceux qui donnent les résultats d'essais les plus variables en ce qui concerne le frottement axial : ils sont en effet fortement tributaires du

temps d'attente entre le remplissage du coulis de gaine et l'injection d'un deuxième coulis sous pression dans le forage.

Le présent article traite d'un nouveau type de micropieu proposé par Soletanche Bachy, intitulé micropieu sous Injection de Serrage Unitaire, dit micropieu ISU, qui a pour conséquence la suppression de ce temps d'attente et l'amélioration de la résistance des micropieux injectés.

1- Présentation schématique des différentes phases de réalisation du micropieu ISU.

1- Schematic overview of the various phases of execution of the "ISU" micropile.

Ce nouveau procédé est particulièrement efficace en complément de techniques autoforées et Hi'Drill®.

Cette innovation fait l'objet d'un Cahier des Charges Particulier, initialement validé par Bureau Veritas, puis évalué et validé par l'Ifsttar et le Cerema.

Enfin, à noter que ce procédé a reçu le prix de l'innovation Vinci, région Île-de-France, lors de la dernière édition, dans la catégorie "procédés et techniques".

RÉFÉRENTIEL DE L'INNOVATION

Dans l'article 9 du premier chapitre de la norme NF P94-262, il est indiqué : « Des procédés de fondations profondes non décrits dans le présent document, soit en termes d'exécution, soit en termes de matériaux constitutifs, pourront être utilisés à condition qu'ils aient fait l'objet d'un cahier des charges particulier comprenant les spécifications d'exécution bien précises, ainsi que les valeurs adéquates des paramètres de capacité portante et de résistance des matériaux. Ces valeurs devront être basées sur des justifications expérimentales. Notamment, en ce qui concerne la capacité portante, les valeurs des paramètres doivent être déduites d'un ensemble d'essais de chargement de pieux réalisés dans des contextes géotechniques comparables couvrant ceux prévalant pour le projet ». Le procédé de micropieux autoforés Hi'Drill® ISU décrit dans le présent article rentre tout à fait dans la catégorie de ces procédés non décrits dans la norme.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROCÉDÉ

La particularité du système d'injection, en lieu et place du tube à manchettes utilisé pour les micropieux de types III et IV, est une virole en tête de forage, venant chapeauter l'armature et permettant l'injection du micropieu (figure 1).

L'amélioration de la qualité d'exécution se fait en supprimant le temps d'attente entre le remplissage du coulis de gaine et l'injection du deuxième coulis sous pression dans le forage. Cela permet de s'affranchir du risque d'une prise excessive de la gaine, ne permettant plus sa traversée radiale par le coulis injecté ensuite sous pression et, a contrario, d'une prise insuffisante de la gaine provoquant des fuites de coulis vers la surface.

L'efficacité se traduit par un gain global de temps. Le procédé permet ainsi d'optimiser chacune des phases nécessaires à la réalisation complète d'un micropieu :

- 1- Durant le forage, par le recours au Hi'Drill® ;
- 2- Pendant l'équipement, avec la méthode autoforée ;
- 3- Et lors de l'injection, avec le système ISU.

DIFFÉRENTIANT TECHNIQUE

Le concept de micropieu autoforé Hi'Drill® avec Injection de Serrage Unitaire est détaillé ci-dessous :



© SOLETANCHE BACHY

2- Mise en place de la virole.

3- Raccordement de la conduite d'injection.

2- Placing the casing.

3- Connecting the grouting pipe.

→ La méthode de forage est Hi'Drill® ; c'est-à-dire qu'en plus de l'action traditionnelle de la tête sur les tiges de forages en translation et rotation, la pénétration dans le terrain peut être améliorée par l'entraînement des tiges de forage en vibration axiale, à une fréquence comprise entre 50 Hz et 200 Hz.

→ La méthode de mise en place de l'armature est "autoforée" ; l'outil de forage est perdu et les tubes ont pour fonction définitive l'armature du forage.

Or, un micropieu dont le forage a été fait en Hi'Drill®, ou un micropieu qui a été fait à l'outil perdu, se calculent usuellement en appliquant la norme NF P94-262. Le caractère innovant est clairement l'Injection de Serrage Unitaire ; les procédés Hi'Drill® et autoforé ont été ajoutés pour maximiser l'efficacité lors de la réalisation du micropieu. Il arrive néanmoins que le Hi'Drill® ne permette pas d'apporter un gain d'efficacité significatif dans la réalisation des micropieux ; il est alors remplacé par une autre méthode de forage plus adaptée.

MISE EN ŒUVRE

Les tubes d'armature du micropieu sont utilisés comme tiges de forage, avec,

à leur extrémité, un outil de forage débordant de diamètre correspondant à celui du forage et adapté au terrain. La circulation du fluide de forage se fait au travers des tiges de forage jusqu'à l'ouverture au niveau de l'outil de forage. Le fluide remonte via l'espace annulaire entre les parois du forage et les tiges. Cette circulation permet l'évacuation des déblais générés par le forage. Le fluide utilisé peut également permettre, si nécessaire, de stabiliser les parois du forage et de maintenir le niveau hydrostatique.

L'avancement du forage jusqu'à la profondeur requise est permis par l'action de la tête de la foreuse sur les tiges de forage.

Au fur et à mesure de l'avancement du forage, des tiges de forage sont raboutées par vissage entre le train de tige déjà en place dans le forage et la tête de la foreuse. La longueur des tiges est déterminée en fonction de la longueur totale du forage et des limitations imposées par la foreuse ou par la configuration du site.

En cours de forage, le système d'acquisition de données de type Sirius® permet de visualiser les valeurs des paramètres de forage (circulation du fluide, translation, rotation, vibration). Une fois la profondeur requise atteinte, il est procédé à la substitution du fluide de forage par le coulis de scellement avec un C/E variant de 1,8 à 2,4. Ce coulis suit la même circulation que le fluide de forage au travers des tiges de forage jusqu'à l'ouverture au niveau de l'outil de forage, puis il remonte via l'espace annulaire entre les parois du forage et les tiges. L'opération est terminée lorsque le coulis de scellement s'est substitué au fluide de forage et a complètement rempli le forage jusqu'à la surface, en débordement. La tête de la foreuse est ensuite déconnectée du train de tige de forage. Le train de tige est laissé en place dans le forage et prend alors sa fonction définitive de tube d'armature du micropieu. Juste après l'opération précédente, et avant le début de la prise du coulis, le système de virole d'injection est mis en place entre les guillottes de la foreuse avec les moyens adaptés de levage disponibles sur site.

Le système est alors raccordé à la tête de rotation via le train de tige.

Une fois les guillottes ouvertes, le système vient coiffer le micropieu et il est entraîné en rotation (figure 2) jusqu'à s'ancrer dans le terrain sur une profondeur de 1 m minimum, afin d'éviter la résurgence du coulis lors de l'injection. ▷

La conduite d'injection (figure 3) est ensuite raccordée à la tête de ce système, ce dernier étant toujours liaisonné à la tête de rotation, afin d'empêcher sa remontée du fait des sous-pressions liées à l'injection.

L'injection au coulis E/C de 0,42 à 0,55 est poursuivie jusqu'à l'obtention d'au moins l'un des deux critères suivant :
→ Pression d'arrêt : 1 MPa.

→ Volume d'arrêt : max (1,5 fois le volume théorique de la partie scellée définie par le calcul ; 0,5 fois le volume théorique du micropieu).

Une fois l'un des deux critères d'arrêt atteint, le micropieu ISU est terminé, la conduite d'injection peut être enlevée et le système dévissé du terrain et de la foreuse afin de réaliser le micropieu suivant.

ESSAIS RÉALISÉS

Différents essais de traction de ce procédé ISU (figure 4) ont été réalisés dans plusieurs types de terrains, sur 4 chantiers différents, et ont été comparés à des essais menés sur les mêmes sites, sur des micropieux traditionnels de type III.

À ce jour, des essais à la rupture ont ainsi été menés avec le système Hi'Drill® ISU dans les terrains suivants :

- Type de sol "sable grave" (dénomination géologique "Alluvions Anciennes") ;
- Type de sol "craie" (dénomination géologique "Craie") ;
- Type de sol "marne" et "calcaire-marneux" (dénomination géologique "Calcaire" et "Marnes et Caillasses").



© SOLEILANICHE BACHY

Le tableau 1 donne la répartition de ces essais par terrain.

Sur le graphe (figure 5) sont superposés, pour chaque terrain d'ancrage, les frottements latéraux issus de la norme NF P94-262 pour des micropieux de type III (q_s et $q_{s,max}$), et les q_s issus des essais (type III et ISU).

Les enseignements à tirer des 18 essais dans les alluvions anciennes, la craie, le calcaire, et les marnes et caillasses, sont les suivants :

- Les charges obtenues de fluage ou à la rupture sont comparables entre les micropieux type III et les micropieux ISU ;
- Les valeurs de frottement latéral sont quasiment les mêmes entre des micropieux type III et des micropieux ISU ;
- Les frottements latéraux limites q_s obtenus peuvent être d'ailleurs supérieurs pour certains terrains aux valeurs de $q_{s,max}$ de la norme NF P94-262.

Le procédé Hi'Drill® autoforé ISU est par conséquent équivalent en termes de frottement latéral à des micropieux injectés mode IGU (type III).

4- Dispositif d'essai à la rupture de micropieux en traction.
5- Synthèse comparative des différents essais de micropieux.

4- Micropile tensile strength test device.
5- Comparative overview of the various micropile tests.

gressivement de constituer une base d'essais avec ce procédé, dans le but, à terme, de définir des abaques associés à un nouveau jeu de coefficients de modèle.

À PROPOS DU NOMBRE D'ESSAIS RÉALISÉS

À l'origine du Cahier des Charges Particulier, évalué et validé par l'Ifsttar et le Cerema, il y a donc un total de 18 essais : 9 essais de micropieux ISU et 9 essais de micropieux type III à titre comparatif.

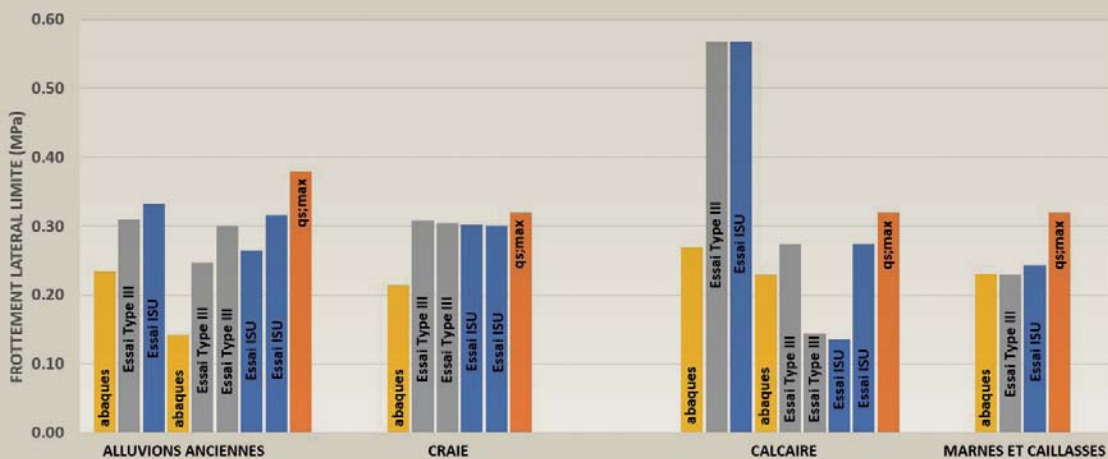
D'aucuns pourraient prétendre que le nombre d'essais avec ce nouveau procédé est pour l'instant relativement réduit.

Or, il est important de rappeler que les abaques de dimensionnement de la norme NF P94-262 reposent, eux aussi, sur un nombre réduit d'essais de micropieux.

F. Baguelin, S. Burlon, M. Bustamante, Roger Frank, L. Gianeselli, et al., dans leur article "Justification de la portance des pieux avec la norme Fondations profondes NF P94-262 et le pressiomètre", lors des Journées Nationales

Il est donc possible, dans les terrains cités ci-dessus, de ranger la technique de mise en œuvre "Micropieu Hi'Drill® autoforé ISU", en classe 8 et en catégorie 19 (au sens de l'annexe A de la norme NF P94-262), comme les micropieux type III. D'autres essais vont être menés prochainement. Cela permettra pro-

SYNTHÈSE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS ESSAIS DE MICROPIEU



© SOLEILANICHE BACHY

TABLEAU 1 : RÉPARTITION PAR TERRAIN DES ESSAIS RÉALISÉS

Nombre d'essai de micropieux	Type de sol de la NF P94-262					
	Argile CaCO ₃ >30% Limon	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne Calcaire-marneux	Roche altérée ou fragmenté
Type ISU	-	-	3	2	4	-
Type III comparatif	-	-	3	2	4	-

de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2012 à Bordeaux, précisent les conditions d'établissement des abaques de la norme. Les pieux testés dans la norme sont répartis, selon leur technologie de réalisation, en huit classes et vingt catégories qui sont présentées dans le tableau 1. Deux groupes complémentaires sont définis pour l'exploitation de la base de données : le groupe G1 regroupant tous les pieux, hormis les catégories 10 (Battu enrobé béton - mortier - coulis), 15 (Profilé H battu injecté) et 17 à 20 (micropieu type I

6- Répartition des essais par type de sol et type de pieu.

7- Fonctions de répartition de R_{c,cal}/R_{c,mes} pour les pieux du groupe G1.

6- Breakdown of tests by soil type and pile type.

7- R_{c,cal}/R_{c,mes} distribution functions for group G1 piles.

et II, pieu ou micropieu injecté mode IGU type III et mode IRS type IV) regroupées dans le groupe G2. Les micropieux type III et IV font partie des catégories normatives 19 et 20, regroupées dans la classe 8. Le tableau (figure 6), extrait de leur article, montre que le nombre d'essais de micropieux type III et IV utilisés dans la norme est de 10, pour l'ensemble des terrains testés. Cela est donc tout à fait comparable aux 9 essais de micropieux ISU et 9 essais de micropieux type III réalisés à titre comparatif.

FIABILITÉ DU PROCÉDÉ

La norme NF 94-282 inclut une certaine probabilité de mise en défaut. En pratique, cela signifie que la totalité des essais réalisés ne donne pas des valeurs de résistance au-dessus de l'abaque préconisé pour un terrain donné.

- En considérant :
 - R_{c,cal}, la charge limite calculée ;
 - R_{c,mes}, la charge de rupture mesurée ou estimée ;
 - γ_{rd1}, le coefficient de modèle lié à la dispersion du modèle de calcul, la fiabilité correspond au taux de fréquence cumulée d'essais ayant un rapport R_{c,cal}/R_{c,mes} inférieur ou égal à γ_{rd1}.

Sur le premier graphique (figure 7), extrait de F. Baguelin et al., est porté en abscisse le rapport résistance calculée/résistance mesurée, et en ordonnée la fréquence cumulée de la base d'essais nationale pour les fondations de groupe 1. Le coefficient partiel γ_{rd1} fixé à 1,15 pour les pieux non injectés dans la norme correspond à une mise en défaut de 83%.

Le graphique suivant (figure 8), extrait du même article, montre que le coefficient partiel à considérer pour les pieux injectés (groupe 2) doit être supérieur pour obtenir la même mise en défaut. Ce qui explique pourquoi, dans la norme, les coefficients γ_{rd1} sont plus élevés pour les pieux injectés.

Enfin, le dernier graphique (figure 9) montre qu'en exploitant les essais ISU, la fiabilité est de 93%, en n'affectant les résultats que d'un facteur partiel de 1,15, inférieur à celui des micropieux de la base de données nationale qui varie de 1,4 à 2,0.

Le procédé ISU a ainsi une fiabilité bien plus importante que celle de la norme NF P94-262. Les prochains essais et chantiers permettront d'affiner ces données et potentiellement de définir de nouveaux coefficient partiels γ_{rd1}.

MICROPIEUX EN PRODUCTION

Après la phase d'essais de micropieux ISU en marge des chantiers de production, commence petit à petit l'acquisition de chantiers où tout ou partie des micropieux de l'ouvrage sont réalisés avec le procédé ISU.

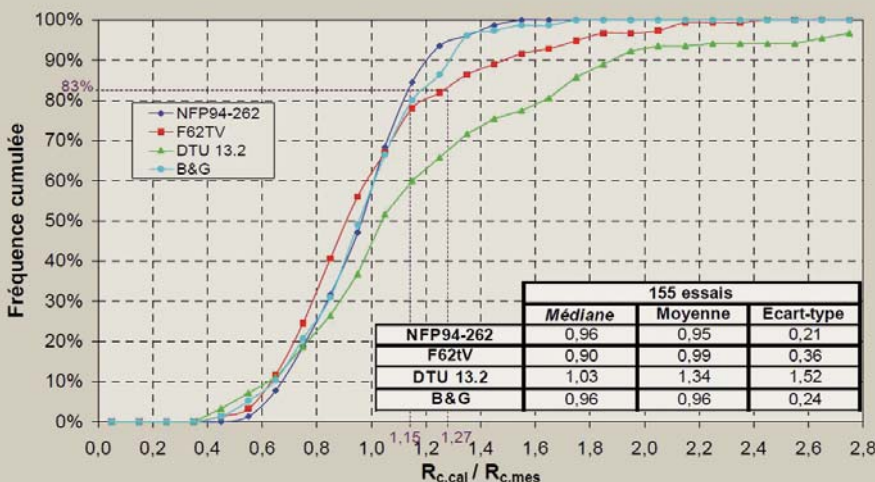
Tout d'abord, quelques micropieux ISU ont été réalisés en mars 2019 à Deauville, sur la presqu'île de la Touque, pour fonder 2 bâtiments entre le bassin des Yachts et le bassin Morny. C'est surtout avec le chantier SNCF de Luynes, près d'Aix en Provence, que le procédé va être mis en œuvre à grande échelle, ▶

RÉPARTITION DES ESSAIS PAR TYPE DE SOL ET TYPE DE PIEU

Type de sol	Classe du pieu								Groupe de pieux		Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	
Argile Limon	10	13	8	18	9	4	8	0	67	3	70
Sable Grave	4	8	14	14	5	1	4	3	48	5	53
Craie	4	0	4	9	1	2	4	0	21	3	24
Marne et Calcaire Marneux	8	1	3	0	0	1	3	4	15	5	20
Roche altérée et fragmentée	4	0	0	0	0	0	0	3	4	3	7
Total	30	22	29	41	15	8	19	10	155	19	174

6

FONCTIONS DE RÉPARTITION DE R_{c,cal}/R_{c,mes} POUR LES PIEUX DU GROUPE G1



© F. BAGUELIN, S. BURLON, M. BUSTAMANTE, ROGER FRANK, L. GINIESSELLI, ET AL.

7

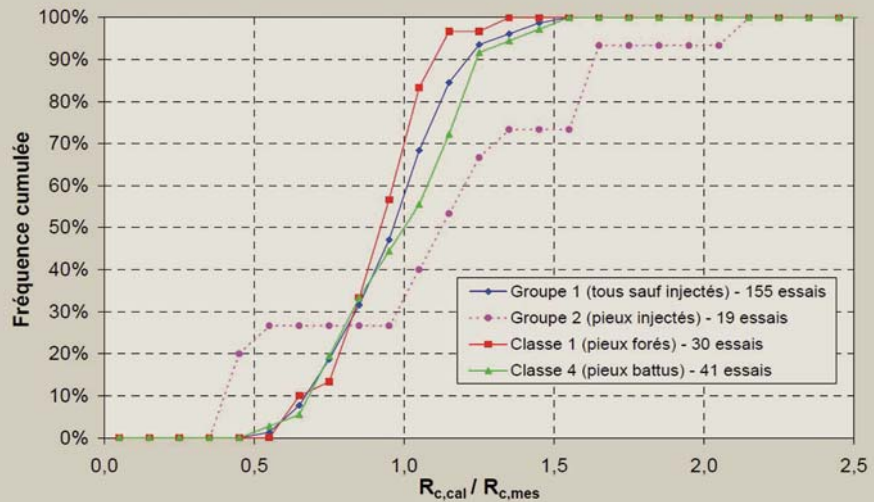
8- Fonctions de répartition de $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ pour les pieux des classes 1 et 4 et des groupes G1 et G2.

9- Fonction de répartition de $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ pour les micropieux ISU testés.

8- $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ distribution functions for piles of classes 1 and 4 and groups G1 and G2.

9- $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ distribution function for tested "ISU" micropiles.

FONCTIONS DE RÉPARTITION DE $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ POUR LES PIEUX DES CLASSES 1 ET 4 ET DES GROUPES G1 ET G2



8

© F. BAGUELIN, S. BURLON, M. BUSTAMANTE, ROGER FRANK, L. GIANESSELLI, ET AL.

puisque'il est prévu près de 200 micropieux ISU pour fonder des écrans acoustiques.

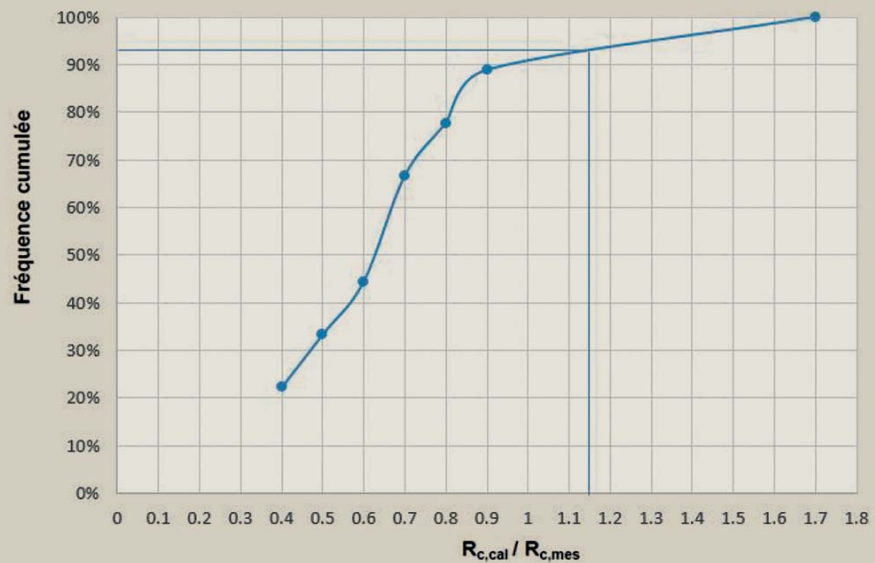
Le groupement Vinci Construction Terrassement/Soletanche Bachy a été retenu pour mener à bien la réalisation d'écrans acoustiques sur les secteurs "Luynes" et "Aix Schuman". Une variante d'injection des micropieux par le procédé d'Injection de Serrage Unitaire ISU a permis de remplacer les fondations qui étaient en solution de base en micropieux type III.

Les premiers micropieux ISU vont démarrer en janvier 2020, après les essais préalables en fin d'année 2019. Le programme de production prévoit 2 phases :

- De fin janvier à fin février 2020, avec une foreuse ;
- De mi-juillet à début septembre 2020, avec du matériel Rail-Route (pelle et glissière de forage).

À suivre donc ! □

FONCTION DE RÉPARTITION DE $R_{c,cal}/R_{c,mes}$ POUR LES MICROPIEUX ISU TESTÉS



9

© SOLETANCHE BACHY

ABSTRACT

HOW TO INNOVATE WITH MICROPILES? SINGLE-STAGE IMMEDIATE POST GROUTING

PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY - AURÉLIEN PRUGNAUD, SOLETANCHE BACHY

A new micropile type, under single-stage immediate post grouting, the "ISU" micropile, is the culmination of a Soletanche Bachy programme aiming to improve the quality of execution of grouted micropiles and, at the same time, improve the efficiency of execution. Numerous tests have been conducted, leading to the establishment of Particular Technical Specifications, initially validated by Bureau Veritas, then evaluated and validated by Ifsttar and Cerema. It has been demonstrated that the ISU process offers a load-bearing capacity identical to that of type III and a reliability exceeding that of the Eurocode 7 national application standard for deep foundations NF P94-262. □

¿CÓMO INNOVAR CON MICROPILOTES? LA INYECCIÓN DE SUJECCIÓN UNITARIA

PAUL VIDIL, SOLETANCHE BACHY - AURÉLIEN PRUGNAUD, SOLETANCHE BACHY

El nuevo tipo de micropilote con Inyección de Sujeción Unitaria, llamado "micropilote ISU", es el resultado de un proyecto de Soletanche Bachy que pretendía, por una parte, mejorar la calidad de ejecución de los micropilotes inyectados y, por otra, mejorar la eficacia de su realización. Se llevaron a cabo numerosos ensayos, que condujeron a la redacción de un pliego de condiciones particular, inicialmente validado por Bureau Veritas, y seguidamente evaluado y validado por el Ifsttar y el Cerema. Ha quedado demostrado que el procedimiento ISU ofrece una capacidad de carga idéntica a la del tipo III y una fiabilidad superior a la de la norma de aplicación nacional del Eurocódigo 7 para cimentaciones profundas NF P94-262. □