

UNE NOUVELLE METHODE D'INJECTION DE MICROPIEU : L'INJECTION DE SERRAGE UNITAIRE

A BRAND NEW GROUTING PROCESS FOR MICROPILES : THE SINGLE-STAGE IMMEDIATE POST GROUTING

Paul VIDIL¹, Aurélien PRUGNAUD¹, Nicolas UTTER¹, Patrick BERTHELOT²

¹ SOLETANCHE BACHY, Rueil-Malmaison, France

² BUREAU VERITAS, Aix en Provence, France/PBE CONSEILS, Sanary sur mer, France

RÉSUMÉ – La norme NF P94-262 définit quatre types de micropieus. Parmi ceux-ci, les micropieus type III sont ceux qui donnent les résultats d'essais les plus variables, en termes de frottement axial. Le présent article traite d'un nouveau type de micropieu, sous Injection de Serrage Unitaire (ISU), visant d'une part à améliorer la qualité d'exécution des micropieus injectés, et d'autre part à rendre plus efficace leur réalisation.

ABSTRACT – The French code NF P94-262 defines 4 micropiles types ; one of them, the post grouting single-stage micropile (type III), varies widely when it comes to trial tests. The hereby article deals with a new micropile type, under single-stage immediate post grouting (ISU), in order to increase the grouting quality and to make more effective the micropiles completion.

1. Introduction

La Norme d'Application Nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes, NF P94-262, définit quatre types de micropieus dans son annexe A : les micropieus type I et II, les micropieus injectés mode IGU (type III, alias MIGU) et mode IRS (type IV, alias MIRS). Or, les micropieus type III sont en réalité ceux qui donnent les résultats les plus variables en termes de résistance de frottement axial, car ils sont 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, sous Injection de Serrage Unitaire, dit micropieu ISU, qui est l'aboutissement d'une démarche visant d'une part à améliorer la qualité d'exécution des micropieus injectés, et d'autre part à rendre plus efficace leur réalisation.

Ce procédé fait l'objet d'un Cahier des Charges Particulier, conformément à l'article 9 du premier chapitre de la norme NF P94-262. De plus, le système ISU a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

2. Présentation générale du procédé

La particularité du système d'injection, en lieu et place du tube à manchettes utilisé pour les micropieus de types III et IV, est une virole en tête de forage, venant chapeauter l'armature et permettant l'injection du micropieu. (cf. fig. 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, permettant des fuites de coulis vers la surface.

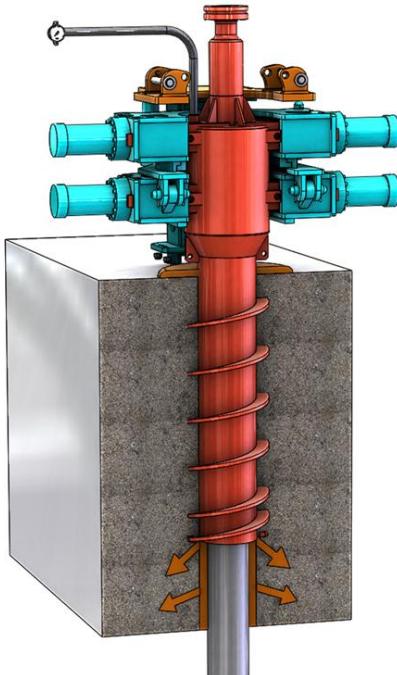


Figure 1. Principe général

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 micropile :

- 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.

3. Différentiant technique

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

- 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 micropile dont le forage a été fait en Hi'Drill, ou un micropile qui a été fait à l'outil perdu se calcule usuellement en appliquant la norme NF 94-262. 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 micropile.

Il arrive néanmoins que le Hi'Drill ne permette pas d'apporter un gain d'efficacité significatif dans la réalisation des micropiles ; il est alors remplacé par une autre méthode de forage plus adaptée. Cela concerne certains projets spécifiques, suivant

- les caractéristiques des sols rencontrés : par exemple dans un terrain homogène et/ou facile à forer,

- et/ou le type d'ouvrage à réaliser : par exemple des micropieux courts où le temps de forage impacte peu le temps total de réalisation,
- et/ou la configuration du site : par exemple du fait d'une inadéquation des dimensions ou de la cinématique des foreuses Hi'Drill,
- et/ou d'autres contraintes particulières.

4. Aspect normatif

Dans l'article 9 du premier chapitre de la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes, NF P94-262, il est indiqué :

(9) 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 rentre donc tout à fait dans la catégorie de ces procédés non décrits dans la norme NF P94-262.

5. Mise en œuvre

Les tubes d'armatures 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 (couronne, pleine face, tricône, trilame ou autre).

La circulation du fluide de forage (air, eau, mousse, boue, coulis ou autre) se fait au travers des tiges de forage jusqu'à l'ouverture au niveau de l'outil de forage, puis 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).

La profondeur requise atteinte, il est procédé à la substitution de fluide de forage par le coulis de scellement avec un E/C variant de 0.42 à 0.55 (soit 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, jusqu'à déborder.

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 guillotines de la foreuse avec les moyens adaptés de levage disponibles sur site (par exemple : mini pelle, treuil).



Figure 2. Virole à moitié vissée

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

Une fois les guillotines ouvertes, le système vient coiffer le micropieu (sauf dans le cas d'arase basse supérieure à 1 m), et est entraîné en rotation (cf. fig. 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 (cf. fig. 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.



Figure 3. Injection en tête

L'injection au coulis E/C de 0.42 à 0.55 (soit un C/E de 1.8 à 2.4) 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.

Le délai entre la fin de la réalisation du coulis de scellement et le début de l'ISU doit rester inférieur à une heure.

L'exécution consécutive de deux micropieus voisins, avant prise du coulis, n'est possible que si la distance entre axes est théoriquement au moins égale à 1,5 fois la somme des diamètres des deux micropieus. Afin de limiter les risques de communication, il est néanmoins conseillé de les espacer davantage.

Toute remontée de fluide de forage ou de coulis dans un micropieu voisin doit immédiatement être signalée. Les deux micropieus concernés par cet incident doivent être vérifiés, voire reforés ou remplacés, et les dispositions d'exécution des micropieus suivants modifiées en conséquence.

6. Dispositions constructives

Outre les prescriptions générales relatives à l'exécution des micropieus, les dispositions particulières suivantes sont appliquées :

- Les tubes d'armatures faisant office de tige de forage lors de la réalisation ont une épaisseur minimale de 10 mm.
- L'enrobage des tubes d'armatures hors écarteurs est égal à 20 mm au moins.
- L'ISU via le système de virole d'injection ne nécessite pas que les tubes soient équipés de pastilles ou qu'un tube à manchettes soit mis en place.
- Le frottement en partie supérieure pourra être réduit par enduisage, gainage, graissage, tubage ou toute autre méthode appropriée, sous réserve de validation par un essai.

7. Essais réalisés

Différents essais de traction de ce procédé ISU ont été réalisés dans plusieurs types de terrains, sur 3 chantiers différents, et ont été comparés à des essais menés sur les mêmes sites, sur des micropieus traditionnels de type III.

A ce jour des essais 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 »).

Ces essais de micropieus à la rupture ont ainsi été réalisés pour comparer d'une part des micropieus type III « classiques » forés, puis équipés de tubes à pastilles sur la hauteur scellée, et d'autre part des micropieus autoforés Hi'Drill ISU.

Dans ces 4 terrains testés, il est possible de déterminer les valeurs de q_s à partir des abaques présentes dans la norme NF P 94-262 pour des micropieux de type III. Les résultats sont les suivants :

Tableau 1. Résultats des abaques

Terrain	p_l (MPa)	a	b	c	f_{sol} (MPa)	Micropieux type III		
						$a_{pieu-sol}$	q_s (MPa)	$q_{s;max}$ (MPa)
alluvions	2.5	0.01	0.06	1.2	0.08	2.9	0.23	0.38
craie	3	0.007	0.07	1.3	0.09	2.4	0.21	0.32
calcaire	4.0	0.008	0.08	3	0.11	2.4	0.27	0.32
marnes et caillasses	2.0	0.008	0.08	3	0.10	2.4	0.23	0.32

Ci-dessous se trouvent les résultats des 10 essais à la rupture.

En dernière colonne est ajoutée le frottement latéral limite q_s déduit en divisant Q_{tl} , l'effort de traction à la rupture, par le périmètre théorique de forage et par la hauteur scellée. Il est sciemment fait abstraction des coefficients de sécurité d'une part sur les valeurs issues d'abaques et d'autres part sur les valeurs issues d'essais, afin de pouvoir étudier des choses comparables.

Tableau 2. Résultats des essais

terrain d'ancrage	N° Essai	Résultats des essais			diamètre forage (m)	q_s (MPa)
		Technique	L_s (m)	Q_{tl} (MN)		
alluvions anciennes	MPE3	IGU - type III	4.5	0.79	0.18	0.31
	MPE6	ISU	4.5	0.85	0.18	0.33
craie	MPE1	IGU - type III	5	1.20	0.25	0.30
	MPE2	IGU - type III	5	1.21	0.25	0.31
	MPE4	ISU	5	1.19	0.25	0.30
	MPE5	ISU	5	1.18	0.25	0.30
calcaire	MP 1	IGU - type III	4	1.07	0.15	0.57
	MP 2	ISU	4	1.07	0.15	0.57
marnes et caillasses	MPTYPE III	IGU - type III	6	1.08	0.25	0.23
	MP ISU	ISU	6	> 1.15	0.25	> 0.24

Comme ce calcul du q_s prend uniquement en compte la longueur scellée, cela implique qu'un dispositif efficace de chemisage de l'armature soit mis en place sur la partie libre.

Malgré ce dispositif, il n'est pas rare, lors d'essais de micropieux avec armatures tubulaires, qu'il faille attendre les premiers paliers de chargement pour que la totalité des frottements parasites sur la longueur libre soit consommée (cf. fig. 4) ; d'où un tracé de courbe pression/déplacement initialement au-dessus du fuseau théorique correspondant aux diagrammes linéaires de tension (longueur libre L_l + longueur extérieure L_e , et longueur libre L_l + longueur extérieure L_e + moitié de la longueur scellée L_s). Cela ne prête néanmoins pas à conséquence sur l'interprétation finale et le calcul correspondant du q_s , car les paliers de chargement suivants « entrent » dans le fuseau.

Une autre manière d'illustrer la fin des frottements parasites sur la longueur libre est d'estimer l'évolution du point d'ancrage fictif dans le micropieu, au gré des paliers de chargement (cf. fig. 5).

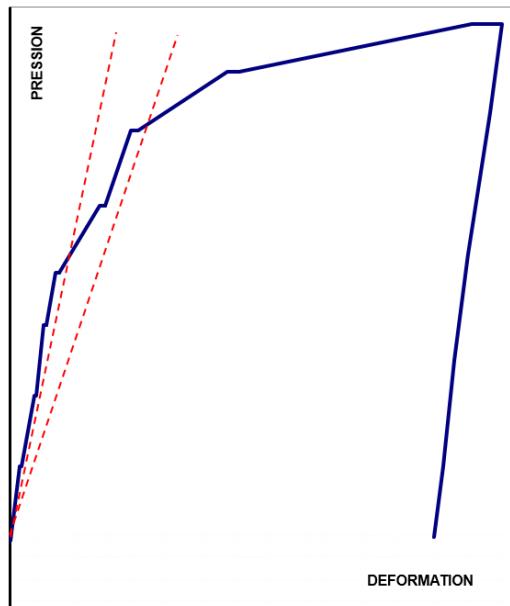


Figure 4. Courbe-type d'essai à la rupture sur armature tubulaire

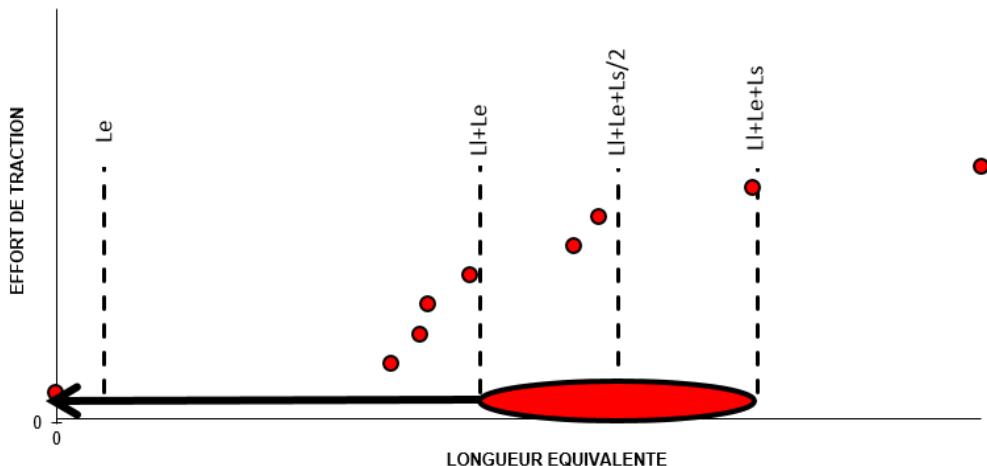


Figure 5. Exemple d'évolution du point d'ancrage fictif dans le micropie

Sur le graphe en fig. 6 sont superposées, pour chaque terrain d'ancrage les frottements latéraux issus de la norme NF P 94-262 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 10 essais dans les alluvions anciennes, la craie, le calcaire, et les marnes et caillasses sont les suivants :

- les charges obtenues de fluege 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 Hi'Drill ISU,
- les frottements latéraux limites q_s obtenus sont supérieurs aux valeurs de l'abaque, et peuvent être d'ailleurs supérieurs pour certains terrains aux valeurs de $q_{s;max}$ de la norme NF P 94-262.

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

Il est donc possible, dans les terrains cités ci-dessus, de ranger la technique de mise en œuvre « Micropieux 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.

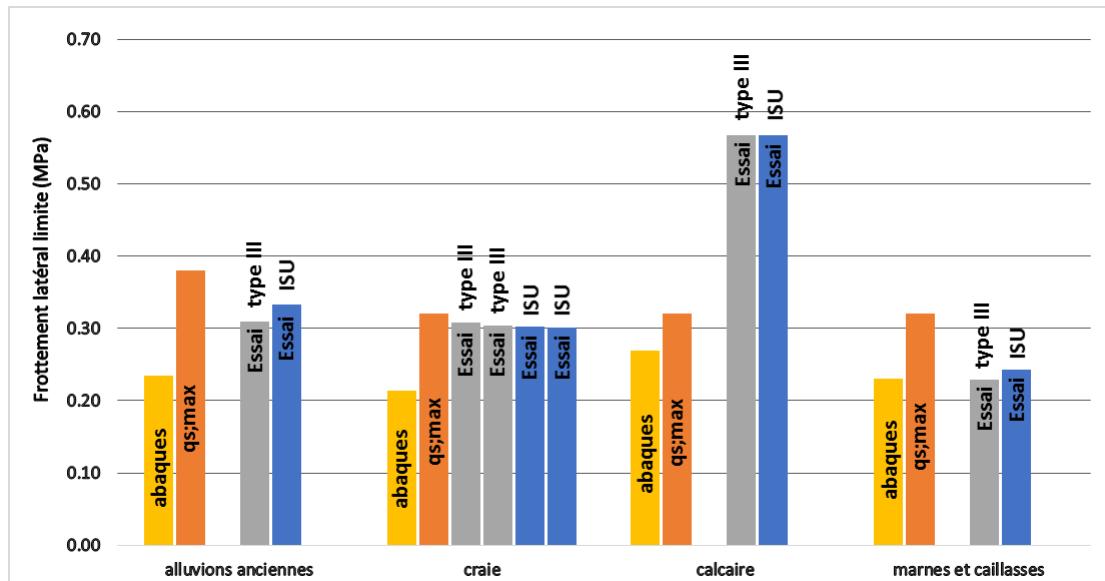


Figure 6. Frottements latéraux estimés et mesurés

D'autres essais vont être menés prochainement. Cela permettra au fur et à mesure 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.

8. Conclusions

L'objet de cette procédure est de décrire la méthodologie d'Injection de Serrage Unitaire (ISU) des micropieux. L'objectif de ce mode d'injection est de pouvoir injecter le coulis sous pression juste après réalisation du forage et équipement, sans attendre la prise du coulis de gaine.

Les essais réalisés jusqu'à présent permettent de conclure d'une part que le comportement sous charge d'essais est tout à fait équivalent entre un micropieus type III et un micropieus ISU, et d'autre part que les frottements latéraux obtenus sont supérieurs à ceux des abaques de la norme NF P 94-262.

Ce procédé pourrait être particulièrement intéressant pour les chantiers à forte contrainte horaire, notamment dans le cas de réalisation de micropieus pour la SNCF sous interruption du trafic.

Une évolution possible de ce nouveau procédé est de mettre en place la virole dans le sol préalablement à la réalisation du forage du micropieus ; cela pourrait ainsi constituer un tubage provisoire en tête dans des terrains particulièrement ouverts.

9. Références bibliographiques

- Cahier des charges particulier. (2017). Micropieus autoforé Hi'Drill avec Injection de Serrage Unitaire – Solétanche Bachy.
- NF EN 14199. (2015). Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Micropieus.
- NF EN 1997-1. (2005). Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales.
- NF P94-262. (2012). Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'Application Nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.