

Evaluation du procédé géotechnique

STARSOL.REF

Nom du procédé	Pieu vissé moulé injecté au tube plongeur appelé STARSOL.REF
Demandeur	Soletanche Bachy Fondations Spéciales 21 rue du Jura 94150 Rungis

L'évaluation du renouvellement du procédé géotechnique STARSOLREFREF a été conduite par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema et approuvée de manière consensuelle par une commission dont la composition est précisée dans le référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques.

L'évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise Soletanche Bachy Fondations Spéciales sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour un renouvellement du cahier des charges STARSOL.REF avec l'engagement que la mise en œuvre du procédé STARSOL.REF n'a pas été identifiée comme une source de potentiel de désordres ;
- la liste des chantiers réalisés par Soletanche Bachy Fondations Spéciales sur ces trois dernières années mettant en œuvre le procédé STARSOL.REF ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique STARSOL.REF dans le cadre d'une mission réalisée par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema. Les conclusions de cette mission sont consignées dans un rapport d'analyse qui est présenté en annexe 1 ;
- le référentiel pour l'évaluation des procédés géotechniques (version 1 provisoire en date du 27/02/2019) ;

Marne La Vallée, le 19 septembre 2024.

Fabien Szymkiewicz

Univ. Gustave Eiffel



Loic Leurent

Cerema Hauts de France



1. Présentation du procédé

Le procédé STARSOL.REF fait partie de la famille des pieux visés moulés injectés au tube plongeur.

Il est développé par Soletanche-Bachy à partir d'un outil refoulant spécifique surmonté d'une colonne à âme creuse et améliore les performances du pieu vissé moulé grâce aux principes fondamentaux suivants : le bétonnage est réalisé au moyen d'un tube de bétonnage continu présent sur la totalité de la hauteur de l'outil refoulant et de la colonne et positionné dans l'âme creuse de ceux-ci.

Le tube plongeur est raccordé en tête au col de cygne de bétonnage lui-même raccordé aux flexibles 4" ou 5" et au dispositif de pompage du béton.

Ce tube de bétonnage, continu, est coulissant grâce aux vérins situés en tête au niveau de la table de rotation, et devient pendant le bétonnage un véritable tube plongeur télescopable sur une longueur de $1,0 \text{ m} \pm 0,2 \text{ m}$, dont la base reste constamment immergée dans le béton ouvrable qui vient d'être mis en place.

Son positionnement par rapport à la base de la tarière est vérifiable à tous les stades de l'exécution grâce à la visualisation de la course des vérins situés au niveau de la tête de rotation.

Un enregistrement continu des paramètres en temps réel sous la forme de courbe est aussi mis en œuvre, avec double affichage à la fois sur un écran devant l'opérateur et en impression papier.

2. Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique STARSOL.REF

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique STARSOL.REF comprend :

- l'Eurocode 7 partie 1 avec son annexe nationale française ;
- l'Eurocode 7 partie 2 ;
- la norme NF P 94-262 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations profondes;
- la norme européenne d'exécution NF EN 12699;
- Cahier Technique 38- Avril 2017 - Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal – AFPS ;
- le référentiel pour l'évaluation des procédés géotechniques (version 1 provisoire en date du 27/02/2019) ;

3. Documents

Les documents examinés dans le cadre de la mission confiée à l'Université Gustave Eiffel et au Cerema sont les suivants :

- le cahier des charges du procédé géotechnique STARSOL.REF Edition n°4 du 01/07/2024.
- la synthèse des divers essais (essais de chargement de pieux, essais de résistance du béton, etc.),
- la synthèse des chantiers réalisés depuis 2021,
- les attestations d'assurances et de travaux.

4. Domaine d'emploi

Le domaine d'application concerne les pieux porteurs ou de soutènement, de tous types d'ouvrages (bâtiments, ouvrages d'art, tours, mâts, cheminées et silos) en situation de calcul sismique ou non, aussi bien public que privé.

Le procédé peut être employé dans tous types de terrains dans lesquels les conditions adaptées de fonçage et bétonnage avec les moyens dédiés ont été démontrées, si nécessaire par un essai de faisabilité en début de chantier.

5. Recommandations spécifiques au procédé

a. Note à l'intention du maître d'œuvre et des contrôleurs

Le recours à un procédé de type STARSOL.REF est généralement à considérer sur les projets de pieux comme une adaptation technique à la solution de pieux retenue par le marché.

Il convient alors de s'assurer que la synthèse géotechnique prévue en phase conception, mission G2 au sens de la NF P94-500 (ou similaire), est adaptée à ce procédé.

L'emploi de ce procédé est soumis à l'appréciation du maître d'ouvrage sur conseils de son maître d'œuvre, et généralement du géotechnicien qui ne dépend pas du maître d'œuvre et du bureau de contrôle. Ce conseil intervient idéalement lors de la phase Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (phase ACT).

b. Exécution

La réalisation des pieux STARSOL.REF suit les recommandations de la norme d'exécution des pieux refoulants NF EN 12699. Des compléments sont indiqués dans le cahier des charges.

c. Cas d'utilisation en conditions de sols sensibles

Dans le cas de conditions de sols sensibles l'essai de faisabilité en début de chantier est obligatoire. Sont classés comme sensibles, les sols suivants :

- terrains très mous $C_u < 15$ kPa ou ;
- conditions de site avec nappe artésienne.

d. Cas d'utilisation pour des ponts

Dans le cas où l'annexe Q de la norme NF P 94- 262 (concernant les ponts) est rendue contractuelle par le marché, elle reste la référence pour l'ensemble de ses clauses avec une dérogation possible pour le taux de travail du béton (à valider par le Maître d'œuvre en fonction du projet).

6. Avis

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema sur la base des différents documents examinés, du rapport d'analyse présenté en annexe 1 estiment que le procédé géotechnique STARSOL.REF décrit par le cahier des charges Edition n°4 en date du 1^{er} juillet 2024 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu.

Le domaine d'application concerne tous les ouvrages de construction (bâtiments, ouvrages d'art, tours, mâts, cheminées et silos) en zone sismique ou non.

7. Validité

La présente évaluation est valable jusqu'au 19/09/2027. Soletanche Bachy Fondations Spéciales devra informer l'Université Gustave Eiffel ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique STARSOL.REF et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Annexe 1 – Rapport d'analyse du procédé géotechnique STARSOL.REF

1. Spécificités du procédé STARSOL.REF

Le procédé STARSOL.REF déroge aux normes de conception sur deux points essentiels :

- la résistance du béton,
- la résistance géotechnique.

Cette dérogation s'accompagne de l'adoption d'un certain nombre de règles internes et de contrôles complémentaires (voir notamment § 4 ci-après).

2. Résistance du béton

Trois paramètres du calcul sont modifiés : $C_{\max}=40$ MPa, $k_1=1.05$ et $k_2=1$.

Ces valeurs sont justifiées par l'expérience propre de l'entreprise et par l'écrasement de 27 carottes prélevées in situ sur des pieux STARSOL.REF.

L'analyse des données d'essais montre que la valeur f_{ck}^* déduite de la relation habituellement utilisée $f_{ck}^*=\inf(C_{\max}, f_{c28})/(k_1.k_2)$ est toujours dépassée.

Par ailleurs, au moins cinq essais de chargement ont été conduits jusqu'à atteindre des contraintes dans le béton supérieures à 20 MPa, ce qui démontre toute la fiabilité du procédé.

3. Résistance géotechnique

Les règles sont modifiées par rapport à la norme NF P 94-262. Elles reposent sur 63 essais de chargement en vraie grandeur réalisés sur des pieux STARSOL ainsi que sur 22 essais réalisés sur des pieux STARSOL.REF réalisés sur 5 sites. Certains essais ont été menés en traction.

Deux des sites ont permis d'établir des comparaisons entre le procédé STARSOL® et le procédé STARSOL.REF dans les sables et les argiles.

L'interprétation de ces essais est basée sur les principes décrits par Baguelin et al. (2012) et Burlon et al. (2014) et conduit à des règles permettant de garantir un niveau de fiabilité et de robustesse des pieux mis en œuvre au moins équivalent à celui garanti par la norme NF P 94-262.

Les frottements axiaux unitaires considérés pour la méthode pressiométrique ainsi que ceux considérés pour la méthode pénétrométrique sont supérieurs à ceux de la norme NF P 94-262 : ils dépassent également les limites des seuils définis dans celle-ci. De même, les facteurs de pointe relatifs aux méthodes pressiométriques et pénétrométriques sont supérieurs à ceux de la norme NF P 94-262.

Cependant, les valeurs retenues assurent que les résistances limites calculées restent inférieures ou égales aux résistances limites du procédé. En particulier, le pourcentage de mise en défaut est bien inférieur aux 15 % de la norme NF P 94-262.

4. Système qualité interne spécifique au procédé STARSOL.REF

Pour garantir l'obtention de ces performances améliorées sur les différents chantiers réalisés sous procédé STARSOL.REF est pourvu d'un système de qualité interne avec notamment :

- la désignation d'un référent béton au sein de son service ;
- le recours à des bétons présentant des classes de consistance et de maintien rhéologique encadrés ;
- la réalisation systématique d'un pieu de convenance au démarrage de ses projets, validant notamment le critère d'ancrage, la méthodologie de forage et de bétonnage qui sera employée sur le projet ;
- le contrôle de l'existence de la nervure par dégarnissage du pieu sur 1 m (1 contrôle pour 100 pieux et minimum 2 pieux contrôlés par chantier).

Dispositions spécifiques au forage

L'adéquation de la méthodologie de forage des terrains est avantageusement obtenue par l'utilisation de matériel de forage disposant systématiquement d'un dispositif de véinage de l'outils lors du forage (« pull down »). Ce dispositif offre ainsi la liberté au foreur d'adapter sa vitesse de rotation, son couple de rotation et sa force d'appui pour obtenir une pénétration suffisante des outils tout en minimisant la remontée de matériaux durant toute l'opération de forage.

Dispositions spécifiques au bétonnage

Sur chantier, le respect des conditions de bétonnage au tube plongeur, pour chaque pieu, est contrôlé et enregistré par un matériel spécifique interne. Les consommations réelle et théorique font l'objet d'un enregistrement et d'un suivi en continu par l'opérateur qui contrôle donc le bon déroulement de l'opération de bétonnage.

Utilisation pour les ponts d'ouvrage d'art

Pour ces ouvrages à défaut de dispositions spécifiques indiquées au marché, l'annexe Q de la norme NF P 94-262 s'applique. Une valeur de C_{max} supérieure à 25 MPa et limitée à 30 MPa, peut toutefois être retenue en cas d'utilisation de béton de caractéristiques appropriées. Cette valeur doit être validée par le maître d'œuvre en charge de la conception après analyse des éventuels effets sur la souplesse des appuis.

En cas de dérogation, il est conseillé d'effectuer un suivi de maintien de stabilité du béton lors de la mise en œuvre suivant les normes cf XP P 18-468 et XP P 18-475.

Sauf prescriptions différentes, ces dispositions ne permettent pas de déroger au § Q.3.4.1.1 de la norme NF P94-262 relatif au diamètre minimaux des pieux exécutés en place.

Dossier Instruit par :
Fabien Szymkiewicz et Gilles Valdeyron
Univ. Gustave Eiffel Cerema