

Evaluation du procédé géotechnique STARFOREUSE

Nom du procédé	Pieu foré tarière creuse injecté au tube plongeur télescopable STARFOREUSE®
Demandeur	SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS 30 avenue du Général Galliéni – CS 80199 92023 NANTERRE CEDEX

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

Les conclusions sont détaillées en page 2.

L'évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour un renouvellement du cahier des charges STARFOREUSE avec l'engagement que la mise en œuvre du procédé STARFOREUSE n'a pas été identifiée comme une source de potentiel de désordres ;
- la liste des chantiers réalisés par SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS sur ces trois dernières années mettant en œuvre le procédé STARFOREUSE ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique STARFOREUSE dans le cadre d'une mission réalisée par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema avec l'appui d'un expert. 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 en date du 27/02/2019) ;
- le compte rendu de décision EPG- réunion 18

Fontenay-sous-Bois, le 17/03/2023.

Fabien Szymkiewicz

Cécile Maurel

Université Eiffel /GERS/SRO

Cerema Ile-de-France
Département Géosciences Risques



1. Présentation du procédé

Le procédé STARFOREUSE fait partie de la famille des pieux forés injectés au tube plongeur. Il est développé par SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS à partir d'une tarière continue à axe creux modifiée et améliorée. Les spécificités du procédé par rapport aux techniques de pieux à la tarière creuse tels que définis §A3.1 de la norme NF P94-262/A1 sont les suivants :

- Le bétonnage est réalisé au moyen d'un tube de télescopable d'une longueur minimale de 80 cm, assurant une injection du béton sous faible pression, selon la méthode du tube plongeur. Ce tube télescopable est actionné à l'aide d'un vérin situé à la base de la tarière. Durant tout le bétonnage et la remontée de l'outil, l'ouverture complète du télescope est contrôlée au moyen d'un dispositif spécifique ou d'un témoin lumineux dans la cabine ;
- Les paramètres de forage et bétonnage sont visualisés en continu par le foreur, permettant le cas échéant d'adapter la méthodologie de forage aux terrains rencontrés. Ces paramètres sont enregistrés pour chacun des pieux;
- Des engins de forage à couple élevé avec le cas échéant un système de vérinage de la tarière lors du forage sont utilisés, assurant ainsi une pénétration de la tarière avec un nombre de rotations de la tarière minimal et adapté au sol traversé ;
- Lors de la remontée de l'outil, un système automatisé d'enlèvement des terres présentes entre les pales de la tarière assure un bétonnage en continu des pieux et limite également les rotations de la tarière lors cette phase.
- Ce procédé fait partie des dispositifs groupe 2- actif, selon la nomenclature EPG retenu par la commission EPG – R18 de décembre 2022.

2. Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique STARFOREUSE

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique STARFOREUSE 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 1536 ;
- Cahier Technique 38- Avril 2017 - Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal – AFPS.

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 STARFOREUSE Edition n°7 du 15 Mars 2023,
- Les comptes rendu de 17 essais de chargement statiques réalisés sur 8 sites entre 1999 et 2022 et leur synthèse v4 réalisée par S.Burlon, Terrasol expert mandaté par SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS dans le cadre de l'évaluation du procédé,
- Les comptes rendu d'essais de chargement dynamiques réalisés sur 3 sites,
- Les résultats d'essais de résistance du béton, essais soniques et impédance réalisés sur divers chantiers.

4. Historique

Historiquement, le procédé STARFOREUSE est encadré par différents ETN, depuis 2002. Lors de la mise à jour de 2014, les principes de dimensionnement exposés dans la norme NF P94-262 ont été transposés aux pieux STARFOREUSE avec prise en compte des retours d'expérience des divers essais de chargement et auscultations sur le béton des pieux. Depuis

ces dernières modifications, près de 165 chantiers, couvrant différents types d'ouvrages (bâtiment, génie civil, ouvrages d'art...) ont été réalisés sans aucun retour de sinistralité.

5. Avis

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema sur la base des différents documents examinés, du rapport d'analyse présenté en annexe 1 et de la présentation du procédé géotechnique devant la commission dédiée réunie à l'Université Gustave Eiffel le 17 septembre 2020 estiment que le procédé géotechnique STARFOREUSE décrit par le cahier des charges Edition n°7 en date de 15 mars 2023 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 situation de calcul sismique ou non.

6. Validité et conditions particulières

La présente évaluation est valable jusqu'au 17 / 03 / 25.

A la date de rédaction du présent avis, certaines des conditions prévues aux §11.1.1 du guide d'évaluation des procédés géotechniques, n'ont pas été réalisées. Compte tenu de l'historique et des références nombreuses de réalisation des pieux STARFOREUSE, la commission EPG réunie le 13/03/2023 accepte une dérogation provisoire au référentiel visé, sous condition de réalisation d'essais complémentaires. Le nombre d'essais requis est décrit en annexe 1 du présent document établi de manière à obtenir la conformité au guide EPG pour le prochain renouvellement EPG.

SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS s'engage, d'ici 2 ans, à réaliser à minima 2 à 3 essais de chargement statique sur pieu ancré menés à la rupture.

SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS devra informer l'Université Gustave Eiffel ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique STARFOREUSE et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Annexe 1 – Rapport d'analyse du procédé géotechnique STARFOREUSE

1. Spécificités du procédé STARFOREUSE

Le procédé STARFOREUSE déroge aux normes de conception sur deux points essentiels :

- la résistance du béton,
- la résistance géotechnique.

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,
- la réalisation de 125 essais soniques,
- l'écrasement de 42 carottes prélevées in situ sur des pieux sur des pieux STARFOREUSE.

Par ailleurs, au moins quatre essais de chargement ont été conduits jusqu'à atteindre des contraintes moyennes dans le béton, supérieures à 23 MPa, avec une valeur maximale à 37 MPa.

3. Résistance géotechnique

Les règles sont modifiées par rapport à la norme NF P 94-262. Elles reposent sur 17 essais de chargement en vraie grandeur réalisés sur des pieux STARFOREUSE.

Ces essais ont été réalisés dans les catégories conventionnelles de terrains suivantes (telles que définies dans l'annexe B de la norme NF P94-262) :

- sol de type « sable et graves »,
- sol de type « craie »,
- sol de type « marne et calcaire »,
- sol de type marne raide présentant un comportement argileux.

A la date de rédaction du présent avis, l'ensemble des essais prévu au §11.1.2 du guide d'évaluation des procédés géotechniques, n'a pas été réalisé. SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS s'engage, d'ici 2 ans, à réaliser 2 à 3 essais de chargement statique menés à la rupture afin de tester des pieux ancrés :

- dans les argiles de type raide ou similaire,
- des sables denses à très denses de pression limite nette supérieure à 2.5 MPa,
- dans la craie.

Les sites faisant l'objet de ces essais devront faire l'objet d'une reconnaissance poussée : sondage carotté, profil d'essais pressiométriques et sondage au pénétromètre statique réalisés au voisinage des pieux testés.

3.1 Méthode pressiométrique

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 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 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.

3.2 Méthode pénétrométrique

Les essais de chargement réalisés par SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS n'ont pas fait l'objet d'étalonnage à partir de sondages pénétrométriques implantés à proximité des pieux testés.

Pour les projets dont le modèle de terrain fourni par la G2 PRO est basé sur des résultats de sondages pénétrométriques statiques, des corrélations reconnues entre les valeurs de résistance en pointe q_c et les pressions limites nettes pl^* pourront être utilisées pour le dimensionnement de la portance des pieux. Ces corrélations doivent être effectués par un tiers extérieurs à l'entreprise dans le cadre des missions géotechniques (NF P94-500).

Si les terrains concernés n'ont pas fait l'objet d'études de corrélations publiées et reconnues alors les corrélations devront être confirmées, a minima, par un sondage pressiométrique réalisé dans le cadre de la mission géotechnique d'exécution. Dans la mesure du possible, ce sondage sera positionné à proximité d'un sondage pénétrométrique existant. Un contexte spécifique voire des disparités géotechniques pourront conduire à augmenter le nombre de sondages complémentaires.

4. Utilisation pour les ponts d'ouvrage d'art

Le procédé STARFOREUSE répond aux exigences de la section 3.5.2.5 du fascicule 68 du CCTG relatif à l'emploi des tarières creuses 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 40 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 permet 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 :
Loïc LEURENT
Cerema

