

Évaluation du Procédé Géotechnique – EPG

Nom du procédé	Pieu foré tarière creuse injecté au tube plongeur télescopable STARFOREUSE® Pieux forés à la tarière creuse continue équipée d'un tube plongeur télescopique, à contrainte de béton améliorée
Demandeur	SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS 30 avenue du Général Galliéni – CS 80199 92023 NANTERRE CEDEX

L'évaluation du procédé géotechnique STARFOREUSE a été approuvée de manière consensuelle par les membres de la commission technique EPG dont 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 :

- l'engagement que la mise en œuvre du procédé STARFOREUSE n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique STARFOREUSE dans le cadre d'une mission réalisée par les deux instructeurs missionnés de la commission EPG. Les conclusions de cette mission sont consignées dans un rapport d'analyse qui est présenté en annexe ;
- la jurisprudence, au moment de l'évaluation, de la famille à laquelle le procédé géotechnique est rattaché ;
- l'approbation consensuelle par les membres de la commission CT-EPG en date du 25/03/2025, du cahier des charges et des conclusions du rapport.

Avis de la commission technique EPG

Sous réserve d'appliquer les recommandations ci-dessous, la commission technique EPG :

- estime que : le procédé géotechnique STARFOREUSE mis en œuvre par la société SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique révision 8 du 11/03/2025 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu ;
- donne un avis favorable à la prolongation de l'évaluation du procédé.

La présente évaluation est établie jusqu'au 15/05/2028.

Le 15/05/2025.

Le Président de la commission technique
EPG



Loïc LEURENT - CEREMA

Le Vice - Président de la commission
technique EPG



Fabien SZYMKIEWICZ - UGE

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 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 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 présent entre les pales de la tarière assure un bétonnage en continu des pieux et limite également les rotations de la tarière lors cette phase.

Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique STARFOREUSE

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé comprend :

- [1]. Les Eurocodes
- [2]. La norme NF P94-262 Fondations profondes,
- [3]. La norme NF EN 1536,
- [4]. Le fascicule 68 : Cahier des Clauses Techniques Générales - Travaux de Génie Civil / Exécution des Travaux Géotechniques des ouvrages de Génie Civil,
- [5]. La norme NF DTU 13.2. Fondations Profondes,
- [6]. La norme NF EN 206/CN Béton - Spécification, performance, production et conformité,
- [7]. Le Cahier technique n° 38 de l'AFPS.

Les référentiels pour l'évaluation des procédés géotechniques¹ :

- [8]. Le CR de la réunion du 21 mars 2024 de la Commission Générale des EPG.
- [9]. Fascicule 1 : Organisation des commissions et de la procédure EPG version 13/06/24.
- [10]. Guide pour la réalisation des cahiers des charges soumis à une EPG, version 1 de février 2019).

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 forage et bétonnage avec les moyens dédiés ont été démontrées, si nécessaire par un essai de faisabilité en début de chantier.

¹ | <https://piles.cerema.fr/demarche-pour-une-evaluation-membres-de-la-a2047.html>

EPG : Commission d'Évaluations des Procédés Géotechniques

Recommandations spécifiques au procédé

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

Le recours à un procédé de type STARFOREUSE est généralement à considérer sur les projets de pieux comme une adaptation technique à la solution de pieux proposée dans le dossier de consultation.

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 contrôleur technique de la construction. Ce conseil intervient idéalement lors de la phase Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (phase ACT).

2. Exécution

La réalisation des pieux STARFOREUSE suit les recommandations de la norme d'exécution des pieux forés NF EN 1536. Des compléments sont indiqués dans le cahier des charges.

3. 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
- sables très lâches (voir définition tableau B.2.1 de la norme NF P 94-262), ou
- limons et argiles, très mous, de résistance en pointe $q_c < 0.6$ MPa ou pression limite net < 0.25 MPa,
- conditions de site avec nappe artésienne,

4. 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 obligatoire 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).

Instructeurs du dossier :

L'instruction de cette EPG a été suivie par :

- Sébastien Burlon (Cerema– Membre de la CT- EPG) : Instructeur / Rapporteur
- Fabien Szymkiewicz (Université Gustave Eiffel – Membre de la CT- EPG) : Instructeur

Ces instructeurs ont été désignés par la commission EPG.

Conditions particulières

SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS devra informer la commission EPG 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

1. Documents produits par le demandeur Entreprise SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS :

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 version 8 du 11 mars 2025,
- les PV d'essais et la synthèse des essais) réalisés sur 4 sites ;
- La synthèse des chantiers réalisés depuis 2023,
- Les attestations d'assurances et de travaux.

Les attestations d'assurance concluent sur l'absence de sinistre.

2. Présentation du procédé :

Le procédé STARFOREUSE fait partie de la famille des pieux forés (bétonnés) 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 à la technique de pieux à la tarière creuse (classe 2) telle que définies §A3.1 de la norme NF P94-262/A1 sont les suivantes :

- Le bétonnage est réalisé au moyen d'un tube plongeur télescopable d'une longueur minimale de 80 cm, assurant une injection du béton sous faible pression, au tube plongeur. La base du tube plongeur reste constamment immergée dans le béton ouvrable qui vient d'être mis en place. 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 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 présent entre les pales de la tarière assure un bétonnage en continu des pieux et limite également les rotations de la tarière lors cette phase.
- Des procédures internes et contrôles intérieurs complémentaires à la réglementation en vigueur sont également prévus au plan d'assurance qualité de l'entreprise détaillé en annexe du présent avis §4.

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

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé comprend :

- Les Eurocodes,
- la norme NF P 94-262 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 ;
- Fascicule 68 : Cahier des Clauses Techniques Générales - Travaux de génie Civil / Exécution des travaux Géotechniques des ouvrages de Génie Civil,
- NF DTU 13.2. Fondations Profondes,
- NF EN 206/CN Béton - Spécification, performance, production et conformité,
- le Fascicule 1 : Organisation des commissions et de la procédure EPG, version du 13/06/24.
- le référentiel pour l'évaluation des procédés géotechniques (version 1 en date du 27/02/2019),
- le CR de la réunion du 21 mars 2024 de la Commission Générale des EPG.

4. Spécificités du procédé STARFOREUSE :

Le procédé STARFOREUSE déroge à la norme de justification des fondations profondes NF P 94-262, pour le calcul de la résistance du béton (voir § 5 ci-après).

Cette dérogation s'accompagne de l'adoption d'un certain nombre de règles internes et de contrôles complémentaires (voir notamment § 6 ci-après).

Le procédé déroge également sur à la norme en ce qui concerne la résistance géotechnique (voir § 7 ci-après).

5. Résistance du béton :

Trois paramètres du calcul sont modifiés :

- $C_{\max} = 40$ MPa,
- $k_1 = 1,05$, et
- $k_2 = 1,0$.

Ces valeurs sont justifiées par :

- le processus de bétonnage propre à l'entreprise,
- 5 essais de chargement ayant été menés jusqu'à des contraintes en têtes supérieures à 20 MPa (dont 3 avec des contraintes dépassant les 25 MPa)
- Des campagnes d'essais pour différentes conditions de sols et nappes comprenant des essais soniques toute hauteur (plus de 160 essais à ce jour), des carottages (suivis d'essais d'écrasement).

Les résultats des essais montrent :

- une absence de défaut de bétonnage ou singularité pour les différents pieux testés par les différentes méthodes d'essais d'intégrité et/ou par carottage,
- une interface pieu/sol relativement régulière, exempte de défauts manifestes et inclusions,
- des diamètres de pieux déterrés systématiquement quasi identiques aux diamètres théoriques des pieux,
- une augmentation graduelle de la résistance intrinsèque des pieux, avec l'augmentation du béton livré,

6. Système qualité interne spécifique au procédé STARFOREUSE

Pour garantir l'obtention de ces performances améliorées sur les différents chantiers réalisés sous procédé STARFOREUSE, SPIE BATIGNOLLES FONDATIONS a étoffé son 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 et journalière d'essais de contrôle de rhéologie et d'essais visuels de ressuage sur béton frais complémentaires aux recommandations en vigueur,
- la réalisation systématique d'essais de compression simple sur éprouvettes à 7 jours et 28 jours
- la capitalisation de leurs résultats sur les essais de maintien de stabilité des bétons frais,
- dans le cas de pieux traversant des terrains sortant du domaine d'expérience de l'entreprise, la réalisation systématique d'un pieu de convenance au démarrage de ses projets, validant notamment la méthodologie de forage et de bétonnage qui sera employée sur le projet.

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 vérinage de la tarière 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 points de contrôles minimaux sont :

- une ouverture du télescope concomitant au remplissage de l'axe de la tarière (sous 20kPa minimum) puis et un bétonnage du pieu sous faible pression, avec un niveau de base du tube plongeur situé systématiquement 80 cm sous le niveau du béton frais. Cette disposition assure ainsi la remontée du premier béton et des éventuelles impuretés jusqu'à la tête des pieux pour évacuation et arasement.

En cas de non-respect de ces enchainements et/ou valeurs, le contrôle et l'enregistrement de la course du télescope permet automatiquement de mettre en place des actions correctrices comme le reforage du pieu.

7. Résistance géotechnique :

Les règles sont modifiées par rapport à la norme NF P 94-262. Elles reposent sur 22 essais de chargement en vraie grandeur réalisés sur des pieux STARFOREUSE, ayant également permis de dériver 68 valeurs de frottement.

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 « argiles et limons »,
- sol de type « craie »,
- sol de type « marne et calcaire ».

La capacité portante est estimée de manière prudente selon des niveaux de fiabilité comparables à ceux de la norme NF P 94-262. Les mêmes conclusions s'appliquent à l'estimation de la résistance de fluage et de la résistance de traction. En particulier, les résistances de fluage calculées restent estimées avec une confiance supérieure à celle de la norme NF P 94-262.

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 reste inférieur aux 15 % de la norme NF P 94-262.

8. 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 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.