

Les

références

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 1

Les différents types de pieux



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 1

Les différents types de pieux



Collection

« Les références »

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage, œuvre collective du Cerema, a été piloté par Sabrina Perlo (Cerema).

Il a été réalisé en partenariat avec le SOFFONS (Syndicat des entrepreneurs de sondages, forages et fondations spéciales) et différents acteurs du secteur (maître d'œuvre et d'ouvrage, bureaux de contrôle, entreprises de fondation).

Les affiliations indiquées correspondent à celles au début des travaux de groupe. Elles ont changé au fil du temps pour certains participants.

Ont contribué à la rédaction d'un ou de plusieurs fascicules :

- ADP : Jean-François Brie
- Apave : Nathalie Borie
- Bureau Veritas Construction : Patrick Berthelot
- Cerema : Dominique Batista, Mathieu Feregotto, Frédéric Jeanpierre, Philippe Laheurte, Sophie Legrand, Loïc Leurent, Olivier Malassingne, Cécile Maurel, Pierre Paya, Jérôme Saliba (les pilotes de groupe) - David Bicard, Bruno Boulet, Lionel Fix, Laura Kerner, Benjamin Landry, Nicolas Rouxel
- Chartreuse ingénierie : Jean-Marc Grezlak
- Durmeyer : Vincent Keller
- Directions Interdépartementales des routes (DIR) : Frédéric Marty (DIR Méditerranée et DIR Massif Central), Jean-François Messenger (DIR SO)
- Rincet Laboratoires : Corinne Horb
- SNCF : Florence Belut, Vivien Darras, Jérôme Simonnet
- Socotec : Luis Carpinteiro (Socotec, puis Ginger CEBTP)

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Les pieux forés pour les ouvrages d'art et le bâtiment - Guide de réalisation - Fascicule 1 - Les différents types de pieux.* Lyon : Cerema, 2025.
Collection : Les références.
ISBN : 978-2-37180-706-8 (pdf)

- SOFFONS : Laurent Darasse (SOFFONS, GRIMAUD Fondations), Sabine Darson-Balleur (SOFFONS, Soletanche Bachy International), Jean-Robert Gauthey (SOFFONS, Spie Fondations), Régis Lebeaud (SOFFONS, Soletanche Bachy Fondations Spéciales), Rémi Vialard (SOFFONS, GRIMAUD Fondations), Jean-Paul Volcke (SOFFONS, Franki-Fondation)
- Soletanche Bachy : Gérard Cardona (Fondations Spéciales), Michel Glandy (Fondations Spéciales), Marie Lebreton (Fondations Spéciales), Christophe Justino (International).

Sont remerciés pour leur contribution ciblée dans leur domaine d'expertise :

Guillaume Barde (Cerema), Stéphane Brûlé (Menard France), Sylvain Chataigner (Université Gustave Eiffel), Sidonie Cayambo (Cerema), Faustin Gauffillet (Schöck), Philippe Guezennec (Cerema), Thomas Holder (Soletanche Bachy International), Philippe Jandin (Cerema), Frédéric Larrere (Cerema), Claudio Mandelli (Sireg), André Mikolajczak (Soletanche Bachy Fondations Spéciales), Sylvie Nouvion-Dupray (Cerema), Aurélie Pintat (Soletanche Bachy Fondations Spéciales).

Sont remerciés également les relecteurs d'un ou de plusieurs fascicules :

Frédéric Autric (DIR Méditerranée), Bruno Berenger (Cerema), Clément Bonifas (DIR Est), Pierre Corfdir (Cerema), Mickaël Dierkens (Cerema), Roger Frank (École des Ponts), Gaël Gourrin (Socotec), Julien Habert (Cerema), Serge Lambert (Keller), Grégory Meyer (Systra), Nicolas Nayrand (Bureau Veritas Construction), Jean-Marc Potier (SBPE), Rémy Pugeat (Cerema), Fabrice Rojat (Cerema), Gilles Valdeyron (Cerema), Vincent Waller (SNBPE, Unibéton), Nicolas Utter (SOFFONS, Soletanche Bachy France), y compris des participants aux groupes de travail, avec une mention spéciale pour Olivier Madec (SOFFONS, Botte Fondations).

Sont remerciées aussi les entreprises suivantes pour la mise à disposition de photographies : le Cerema, les Directions Interdépartementales des routes (DIR), Botte Fondations, Durmeyer, Franki-Fondation, Grimaud Fondations, Schöck, Sireg, Soletanche Bachy, Spie Batignolles Fondations, Université Gustave Eiffel (ex Ifsttar).

Sont remerciés pour les illustrations : Gérald Bitter et Denis Cousin (Cerema).

Photo de couverture : Soletanche Bachy.

AVANT-PROPOS

Les pieux forés sont largement utilisés pour assurer les fondations des ouvrages de génie civil ou de bâtiment. Ce guide est la reprise complète du guide **Pieux forés – Recueil des règles de l'art**, publié en 1978 par le LCPC et le SETRA (*Note*). Il tient compte de l'importante évolution des pratiques d'exécution des pieux, du contexte normatif et du positionnement des différents acteurs (cf. chapitre 1 du fascicule 1).

Note : le guide ne s'applique pas pleinement aux pieux de soutènement ou réalisés dans le cadre d'un renforcement de sols (par exemple, une stabilisation de pente par clouage) en raison des dispositions particulières (ancrage, tolérance...) ; il pourra donc être nécessaire de se référer aux normes et recommandations relatives à ce type d'ouvrages.

Ce document s'applique à l'**exécution des pieux ou barrettes forés** exécutés en place avec excavation du terrain (*Note 1*), ce qui correspond :

- **au domaine d'application de la norme européenne NF EN 1536+A1** (Exécution des travaux géotechniques spéciaux – pieux forés) restreint aux techniques traditionnellement utilisées en France ;
- **aux pieux forés** (foré simple, foré tubé, foré boue, tarière creuse et foré rainuré) à l'exception des puits (*Note 2*). Ces pieux correspondent aux classes 1 et 2 selon la terminologie de l'annexe A de la norme française NF P94-262 traitant de la justification des ouvrages géotechniques (norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – fondations profondes).

Ce guide s'appuie sur les documents normatifs existants et est conforme aux normes en vigueur, il vient les compléter par des recommandations sur certains points.

Note 1 : ce document ne décrit pas les techniques de fondations profondes avec refoulement du sol (pieux vissés, pieux battus, vibrofoncés...) ni les fondations avec injection (en particulier les micropieux).

Note 2 : le présent document n'est pas applicable aux puits réalisés à la pelle ni aux puits marocains ; certaines dispositions du présent document sont utilisables lorsque les puits sont réalisés par les moyens mécaniques.

Ce guide est constitué de **7 fascicules**.

- **Le fascicule 1** introduit succinctement les actions sur les pieux, les avantages et les inconvénients respectifs des pieux forés et des pieux avec refoulement. Il rappelle les principales étapes de réalisation et le domaine classique d'utilisation des différents types de pieux forés. Il fournit quelques éléments pour le choix de la tenue des parois du pieu lors de sa réalisation. Deux tableaux synthétisent l'adéquation des catégories de pieux avec le contexte géotechnique et hydrogéologique d'une part, et les principaux avantages et inconvénients des techniques de pieux d'autre part.
- **Le fascicule 2** traite des aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier, et plus spécifiquement de généralités sur les marchés pour le montage de l'opération, de la préparation du dossier

de consultation des entreprises (DCE), d'informations relatives à la phase de préparation de chantier et au déroulement de l'exécution. Ce fascicule se termine par les documents à fournir après exécution. Les volets « environnement » et « sécurité » y sont abordés. Des éléments pour la rédaction de bordereau des prix unitaires relatif à l'exécution des pieux forés se trouvent en annexe.

- **Le fascicule 3** se rapporte à l'exécution des pieux forés, en déclinant les techniques et les étapes de forage, les matériels d'excavation, aussi bien que les techniques de tenue des parois par les fluides stabilisateurs ou encore par tubage et chemisage. À titre indicatif, des tableaux synthétiques présentent, en fonction de la nature des terrains, l'adéquation des outils de forage, des dents et molettes, et des méthodes de tenue de parois. On y aborde aussi les contrôles réalisés au démarrage du chantier et lors de l'exécution. Ce fascicule se termine avec quelques exemples de choix de technique de réalisation de pieux argumentés dans des configurations simplifiées.
- **Le fascicule 4** porte sur le bétonnage des pieux forés en commençant par les spécifications des bétons et de leurs constituants. Sont ensuite développés toutes les opérations préalables au bétonnage (formulation, épreuve d'étude et épreuve de convenance...), la fabrication, la livraison, la réception et le transport du béton, et enfin sa mise en œuvre dans le forage. Une dernière partie reprend les points sensibles du bétonnage (par exemple le curage, la purge, le recépage, la surconsommation, le retrait du tube de travail, le ressuage...).
- **Le fascicule 5** a pour objet les armatures des pieux forés. Il introduit les différents types d'armatures et de matériaux, puis décline les cages d'armature en acier et en matériaux composites, les éléments en acier et les fibres pour béton. Une partie est dédiée aux dispositifs particuliers nécessaires à la mise en œuvre des cages (les dispositifs de centrage, de rigidification des cages, les tubes de réservation...). Le sujet crucial de l'enrobage y est traité. Sont aussi abordés le chargement, le transport, le déchargement et le stockage des armatures, ainsi que la mise en place de la cage ou du profilé dans le forage. La dernière partie porte sur les contrôles du ferrailage des pieux.
- **Le fascicule 6** présente le contrôle des pieux, une fois finis, avec le choix et l'opportunité des contrôles et le détail des méthodes non destructives (sonique par transparence, réflexion et impédance, gammamétriques et sismique parallèle), des méthodes destructives (sondages carottés, inspection caméra...) et des essais de chargement. La dernière partie s'intéresse à la position contractuelle du problème, à la caractérisation des non-conformités, à la gestion contractuelle des anomalies ou singularités et enfin au traitement des non-conformités.
- **Le fascicule 7** dresse une liste non exhaustive de défauts avec leurs causes potentielles, leur nature, leur gravité, ainsi que l'opportunité des réparations. Des solutions de réparations des pieux forés sont présentées, puis illustrées à travers sept exemples. La dernière partie de ce fascicule est dédiée à la réception des pieux réparés.

**Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique.
Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).**

Sommaire

Remerciements	2
Avant-propos	4
CHAPITRE 1	
Introduction	9
1.1 - Le guide Pieux forés	10
1.2 - Les actions sur le pieu	12
1.3 - Les différents types de pieux	13
CHAPITRE 2	
Pieux forés de classe 1	15
2.1 - Pieux forés simples (catégorie 1, abréviation FS)	16
2.2 - Pieux forés sous boue (catégorie 2, abréviation FB)	18
2.3 - Pieux forés tubés récupérés ou perdus (catégories 3 et 4, abréviations FTR et FTP)	21
2.4 - Pieux forés simples ou sous boue avec rainurage (catégorie 5, abréviations FSR/FBR)	24
2.5 - Techniques mixtes pour les pieux forés	25
CHAPITRE 3	
Pieux forés de classe 2	27
3.1 - Pieux forés à la tarière creuse simple rotation (catégorie 6)	28
3.2 - Pieux forés à la tarière creuse double rotation (catégorie 6)	29
CHAPITRE 4	
Domaine d'emploi	31
4.1 - Adéquation des catégories de pieux au contexte géotechnique et hydrogéologique	34
4.2 - Avantages/inconvénients des techniques de pieux	35

CHAPITRE 5**Éléments de choix technique
pour la tenue des parois****37**

5.1 - Choix du fluide stabilisateur	38
5.1.1 - Présentation succincte des fluides stabilisateurs	38
5.1.2 - Choix du fluide stabilisateur	39
5.1.3 - Coût du recours au fluide stabilisateur	39
5.1.4 - Choix du fluide stabilisateur selon les types de sol	40
5.1.5 - Considérations environnementales pour le choix de fluide stabilisateur	41
5.2 - Choix d'une enveloppe	42
5.2.1 - Présentation succincte des enveloppes	42
5.2.2 - Choix de l'enveloppe	42
5.2.3 - Choix de la technique des pieux forés tubés ou chemisés	43
5.2.4 - Coût du recours au tubage et au chemisage	43
5.3 - Critères de choix de la technique pour la tenue des parois de forage	43
5.4 - Incidences sur le dimensionnement des pieux	44

Bibliographie**45**

Ouvrages	46
Fascicules du CCTG (Cahier des clauses techniques générales)	46
Normes afnor	46

Les parties comportant ce fond de couleur concernent exclusivement les pieux de classe 2, c'est-à-dire réalisés avec la technique de la tarière creuse définie au chapitre 3.



CHAPITRE 1

Introduction

1. INTRODUCTION

1.1 - LE GUIDE PIEUX FORÉS

Origine du guide

Depuis la parution du guide *Pieux forés – Recueil des règles de l'art* du LCPC/SETRA en 1978 [1.1], les pratiques d'exécution des pieux, le contexte normatif et le positionnement des différents acteurs ont largement évolué :

- **les pratiques d'exécution** : on notera notamment l'utilisation importante de la technique des pieux à la tarière creuse qui était à peine abordée dans la première version du guide. L'augmentation de l'utilisation des pieux forés par rapport aux pieux avec refoulement de sol indiquée dans la version de 1978 est aujourd'hui largement avérée ;
- **le contexte normatif des fondations profondes** : les normes d'exécution européennes (NF EN 1536+A1, en particulier), la norme d'application nationale de l'Eurocode 7 (NF P94-262 COMPIL1) et les règles spécifiques relatives à l'exécution (NF DTU13.2 et Fascicule 68 du CCTG) sont parues entre 2012 et 2020 ;
- **l'évolution des règles des marchés privés comme des marchés publics** : la mise en place de la norme relative aux missions géotechniques (NF P94-500), qui a précisé les responsabilités de chacun, ainsi que le rôle des maîtres d'œuvre et des contrôleurs techniques rendent totalement obsolètes les éléments d'éclairage sur les contrats, décrits dans le guide de 1978.

Définition des pieux forés

La norme NF P94-262 COMPIL1 (article 3.1) définit :

- une « **fondation** », comme la « partie inférieure d'une construction destinée à assurer sa stabilité » ;
- un « **pieu** », comme un « élément structural élancé placé dans le terrain, pour transférer à celui-ci les actions qui lui sont transmises par la structure portée ou par le terrain environnant ».

Les actions auxquelles sont soumis les pieux sont traitées dans le § 1.2 « Les actions sur le pieu ».

La norme NF EN 1536+A1 (article 3.2) indique la définition de « pieu foré » suivante : « pieu ou barrette réalisé(e), avec ou sans tubage, par excavation ou forage d'un trou dans le sol, et remplissage du trou avec du béton armé ou non armé ».

Domaine d'application

Ce document s'applique à l'exécution des pieux ou barrettes forés exécutés en place (Note 1) ce qui correspond :

- au domaine d'application de la norme européenne NF EN 1536+A1 (Exécution des travaux géotechniques spéciaux – pieux forés) **restreint aux techniques traditionnellement utilisées en France**, principalement en référence à l'article 1.3, c'est-à-dire :
 - aux pieux forés ayant un rapport profondeur/diamètre⁽¹⁾ ≥ 5 ,
 - aux pieux ayant un diamètre de fût $0,3 \text{ m} \leq D \leq 3,0 \text{ m}$,
 - aux barrettes ayant la plus petite dimension $W_i \geq 0,4 \text{ m}$, un rapport L_i/W_i entre ses plus grandes et plus petites dimensions ≤ 6 et une section $A \leq 15 \text{ m}^2$ (Figure 1.1) ;
- aux pieux forés (foré simple, foré tubé, foré boue, tarière creuse et rainuré) à l'exception des puits (Note 2). Ces pieux correspondent aux classes 1 et 2 (catégories 1 à 6) selon la terminologie de l'annexe A de la norme française NF P94-262 COMPIL1 traitant de la justification des ouvrages géotechniques (norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes).

1. Le terme « largeur » est utilisé dans la norme.

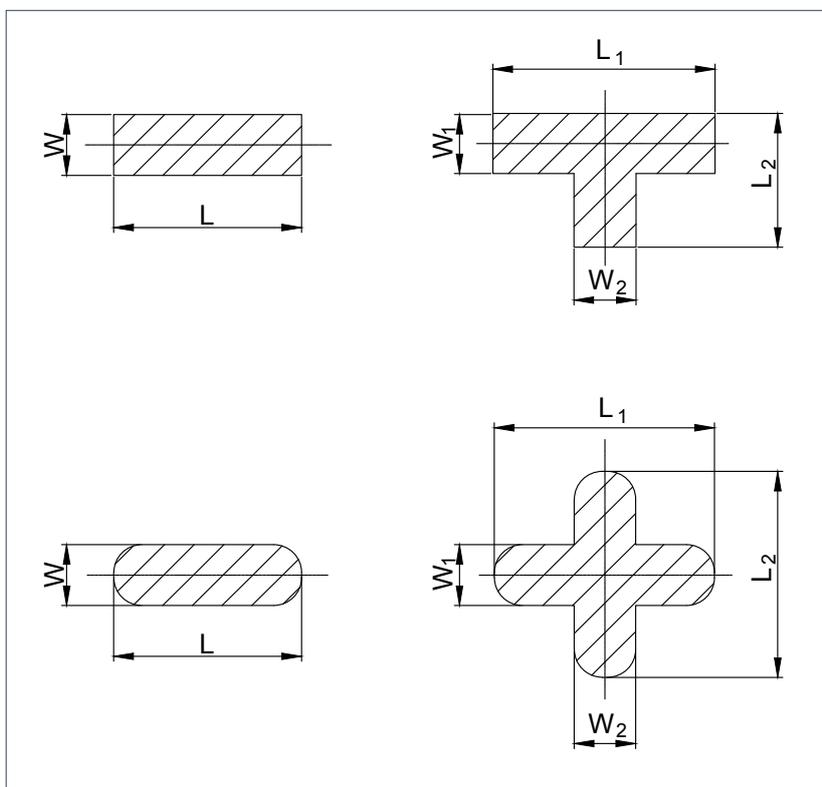
Ce guide s'appuie sur les documents normatifs existants et est conforme aux normes en vigueur à la date de publication, mais peut les compléter par des recommandations sur certains points.

Ce guide ne s'applique pas pleinement **aux pieux de soutènement ou réalisés dans le cadre d'un renforcement de sols** (par exemple une stabilisation de pente par clouage⁽²⁾) en raison des dispositions particulières (ancrage, tolérance...) ; il faudra donc se référer aux normes et recommandations relatives à ce type d'ouvrages.

Note 1 : ce document ne décrit donc pas les techniques de fondations profondes avec refoulement du sol (pieux vissés, battus, vibrofoncés, etc.), ni les fondations avec injection (en particulier les micropieux).

Note 2 : le présent document n'est pas applicable aux puits réalisés à la pelle ou aux puits marocains ; certaines dispositions du présent document sont utilisables lorsque les puits sont réalisés par les moyens mécaniques décrits ici.

Figure 1.1 : Différentes sections de barrettes (L, la longueur et W, la largeur)
(norme NF EN 1536+A1)



2. Pieux travaillant en flexion-cisaillement.

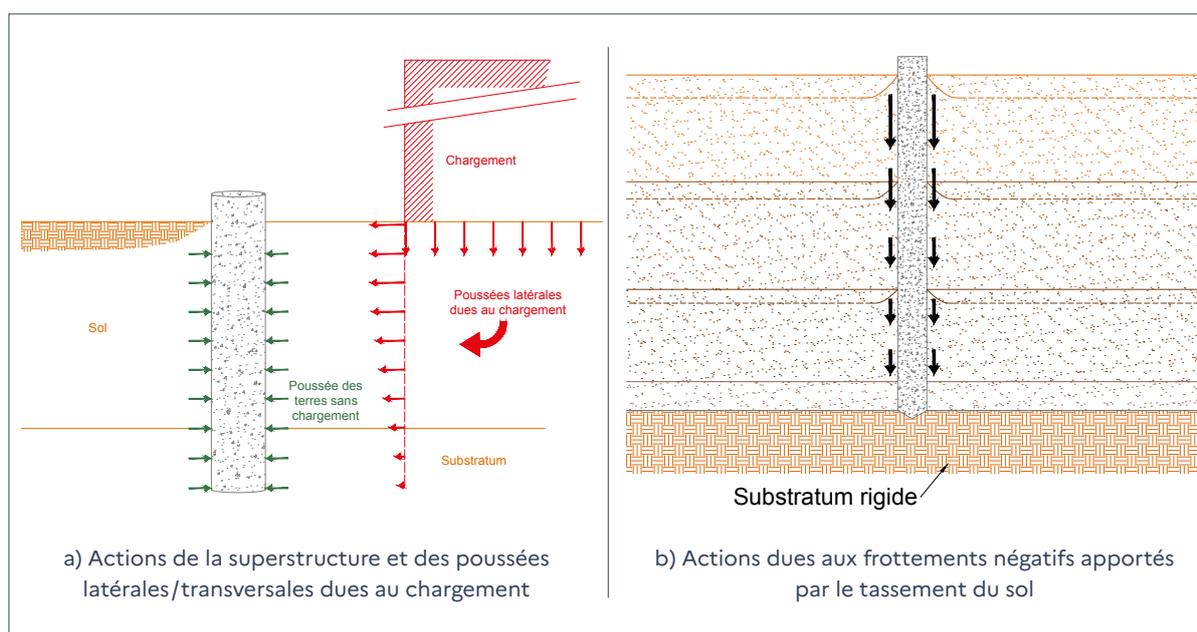
1.2 - LES ACTIONS SUR LE PIEU

Les actions sur le pieu

Le pieu est soumis :

- aux actions transmises par la superstructure portée (Figure 1.2.a) ;
- aux actions dues à un déplacement du sol, c'est-à-dire :
 - un tassement du sol, produisant des « frottements négatifs » sur le pieu (Figure 1.2.b) définis comme une « action géotechnique où le terrain environnant transfère à la fondation profonde une charge descendante, lorsqu'il tasse par rapport au fût de la fondation profonde » selon l'article 3.1.12 de la norme NF P94-262 COMPIL1,
 - un déplacement horizontal du sol, produisant des « poussées transversales », dites aussi « latérales », sur le pieu (Figure 1.2.a).

Figure 1.2 : Les actions sur le pieu



Origine des poussées transversales / latérales

Lorsque des pieux (fondations de culées, piles-culées, murs) traversent **des sols (Note 1) chargés de manière dissymétrique** par des remblais ou des stocks de matériaux pondéreux (Note 2), ils sont soumis à des poussées latérales/transversales (Figure 1.2.a) en plus du frottement négatif (Figure 1.2.b). Lors de séismes, le sol provoque aussi de telles poussées.

Note 1 : l'importance du tassement et des poussées latérales dépendra de la nature compressible du sol.

Note 2 : il convient d'édifier de tels remblais ou de stocker des surcharges bien avant la réalisation des pieux forés, de telles dispositions constructives permettant par ailleurs de limiter les efforts horizontaux sur les fûts et les tassements différentiels.

Origine du frottement négatif

Lorsque les pieux traversent **des sols compressibles** naturellement ou sous l'effet d'un chargement, leur tassement (même faible) a tendance à entraîner le pieu par frottement vers le bas, dans le sens contraire au frottement utile à la portance du pieu, d'où le terme de « frottement négatif » (Figure 1.2.b). Ce dernier agit comme des surcharges verticales vis-à-vis des pieux. Il est donc nécessaire d'en tenir compte dans le dimensionnement des pieux et si possible d'en minimiser l'influence, en adoptant des mesures pour diminuer, voire neutraliser ce frottement négatif.

1.3 - LES DIFFÉRENTS TYPES DE PIEUX

Les pieux forés et les pieux avec refoulement de sol

La norme NF P94-262 COMPIL1 (article 3.1) définit :

- un **pieu foré**, comme une « fondation profonde réalisée par forage ou par excavation manuelle » ;
- un **pieu à refoulement de sol**, comme une « fondation profonde réalisée par battage, ou vérinage, ou vibrage, ou vissage d'un élément préfabriqué en béton armé et métallique. Ce terme comprend aussi les fondations profondes mises en œuvre par introduction de béton, coulis ou mortier dans une empreinte réalisée par fonçage, battage ou vissage d'un tube fermé à sa base ».

Avantages et inconvénients respectifs des pieux forés et des pieux avec refoulement de sol

Le choix entre **pieux forés et pieux avec refoulement de sol** doit tenir compte des avantages et inconvénients (synthétisés dans le Tableau 1.1) liés à leurs techniques d'exécution.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients respectifs des pieux forés ou avec refoulement de sol

Type de pieu	Forés ⁽³⁾	Avec refoulement de sol (battus / vibrés / vérinés ⁽⁴⁾ ou vissés ⁽⁵⁾)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • sections importantes • profondeurs importantes • formes diverses • contrôle de la lithologie (via les matériaux excavés) • adaptabilité des dimensions⁽⁶⁾ : approfondissement possible⁽⁶⁾ • techniques généralement adaptables aux variations géotechniques • ancrage possible dans des horizons compacts à très compacts, conduisant à un terme de pointe fort, à une capacité portante importante 	<ul style="list-style-type: none"> • hautes cadences de mise en œuvre • chantier « propre » • absence de déblais de pieux (intéressant notamment en cas de sol pollué) réduisant les emprises • possibilité de pieux inclinés • portance en pointe généralement améliorée en raison du refoulement de sol <p><u>Pour les pieux battus :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • estimation directe de la portance possible lors de la mise en œuvre⁽⁷⁾ • assurance de la qualité, de l'homogénéité et de la continuité du matériau constituant la fondation
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • matériels généralement encombrants • géométrie : connaissance partielle de la forme du fût • pointe : risque de remaniement des terrains ou de pollution du béton de fondation • chantier plus « sale » et salissant⁽⁸⁾ surtout en présence de fluide stabilisateur (Figure 1.3) • besoins en surface de travail plus élevés (ne serait-ce que pour gérer les déblais) 	<ul style="list-style-type: none"> • dimensions limitées (problème de pénétration) • refus sur les terrains denses et raides ou très raides ou faux refus sur des blocs • risques d'endommagement du pieu • nuisances vibratoires et sonores en battage

3. Correspondant aux catégories 1 à 6 selon l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1.

4. Correspondant aux classes 4, 5, 6 et 7 aux catégories 9 à 16 selon l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1.

5. Correspondant à la classe 3 et aux catégories 7 et 8 selon l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1.

6. Cette adaptabilité est plus limitée avec la technique de la tarière creuse.

7. Les informations issues du battage peuvent fournir une première évaluation qualitative sur la portance du pieu en utilisant par exemple des formules empiriques.

8. Ces chantiers sont affectés par la gestion des déblais et des fluides de forage (propreté et entretien des plateformes, stockage et évacuation, traitement de déblais éventuellement pollués..).

Figure 1.3 : Exemples de chantier de pieux forés au fluide stabilisateur minéral



Différents types de pieux forés

Ainsi au sein de cette grande famille des pieux forés, il existe différents types de pieux, selon la technique de réalisation, répertoriés dans la norme NF P94-262 COMPIL1 :

- **dans la classe 1**, en fonction de la technique de tenue des parois de forage (traitée dans le fascicule 3) qui dépend du contexte géotechnique et hydrogéologique, on distingue :
 - la catégorie 1 : pieux forés simples (§ 2.1),
 - la catégorie 2 : pieux forés sous boue (§ 2.2),
 - la catégorie 3 et 4 : pieux forés tubés (§ 2.3), respectivement avec un tube⁽⁹⁾ perdu ou récupéré,
 - la catégorie 5 : pieux forés simples ou à la boue avec rainurage (§ 2.4) ;
- **dans la classe 2/catégorie 6** (chapitre 3) relative à la technique de la tarière creuse (à simple ou double rotation). Le soutien des parois :
 - dans le cas des tarières creuses simple rotation, est assuré par l'outil de forage (tarière creuse) et les déblais dans les pales,
 - dans le cas des tarières creuses double rotation, par le tube autour de la tarière.

9. Dans la norme NF P94-262 COMPIL1, la terminologie « virole » est utilisée à la place de « tube » dans la dénomination des pieux forés tubés virole perdue (FTP) ou virole récupérée (FTR) ; or, on précise que ce terme correspond normalement au tube provisoire court, mis en place pour sécuriser les à-côtés du forage et empêcher tout effondrement de la partie supérieure du forage proche de la plateforme de travail (définition issue de la norme NF EN 1536+A1). Selon les entreprises, ces machines portent des noms différents, par exemple « Hydrofraise[®] », « Rotoforeuse[®] », « Hydromill[®] », « Cutter[®] ».

CHAPITRE 2

Pieux forés de classe 1

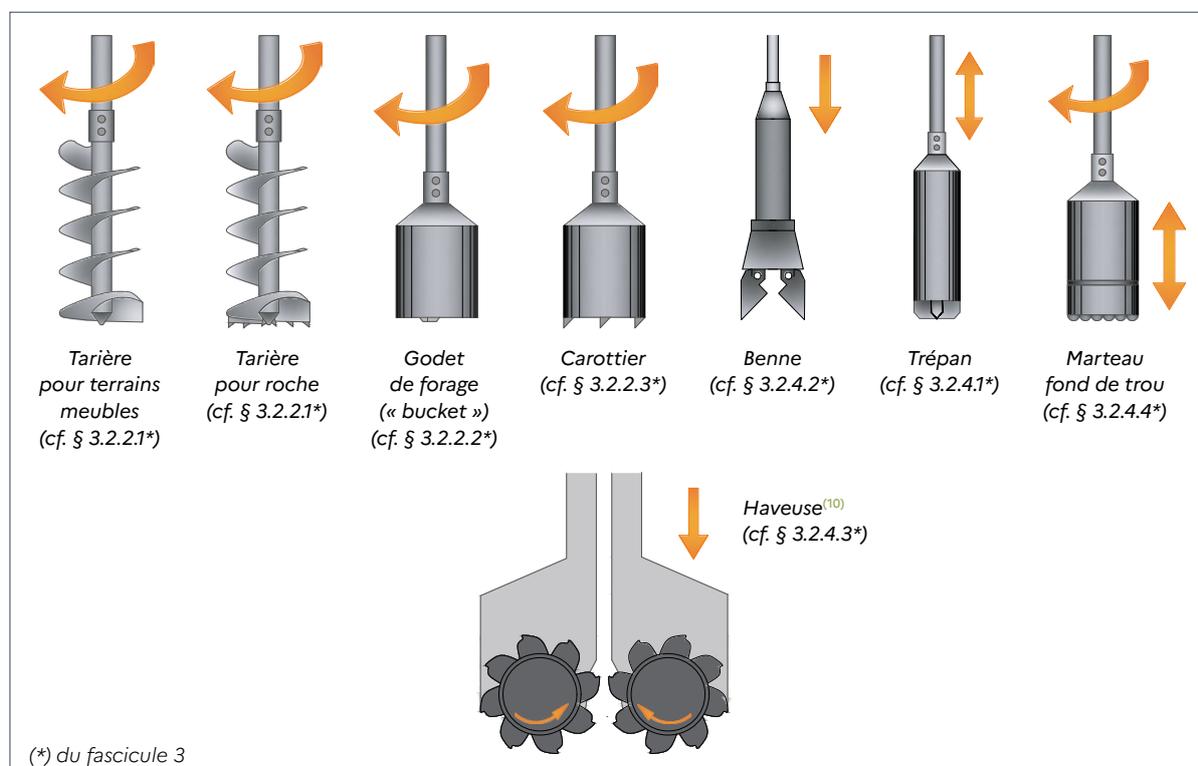
2. PIEUX FORÉS DE CLASSE 1

Selon la nomenclature de la norme NF P94-262 COMPIL1, il peut s'agir de **pieux de section circulaire** ou de **barrettes de formes diverses**. De manière simplifiée, on utilise généralement dans ce guide le terme générique de « pieux », indistinctement pour les pieux circulaires et les barrettes.

Ces pieux sont réalisés :

- par **excavation des terrains** à l'aide d'outils spécifiques (Figure 1.4 et cf. chapitre 3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ;
- par la **mise en place d'une éventuelle cage ou d'éléments d'armatures** (cf. fascicule 5)
- par le **bétonnage** du pieu depuis le fond du forage (cf. fascicule 4).

Figure 1.4 : Différents types d'outils de forage pour l'excavation des terrains (schémas de principe)



2.1 - PIEUX FORÉS SIMPLES (CATÉGORIE 1, ABRÉVIATION FS)

Phasage de réalisation

Il s'agit de pieux dont l'excavation est réalisée **sans technique de soutien des parois**.

Le forage peut être réalisé (Figure 1.5) avec la plupart des outils pour pieux forés (Figure 1.4) mais la nécessité d'obtenir une tolérance acceptable pour la verticalité induit généralement (*Note 1*) la **mise en place préalable d'un guide en tête de pieu** qui est :

- une **virole en acier** (Figure 1.6 – *Note 2*) dans le cas des pieux circulaires (cf. § 5.2.1 du fascicule 3) ;
- une **murette-guide** le plus souvent en béton dans le cas des barrettes (Figure 1.7).

Note 1 : la qualité du matériel de forage et la qualité de la plateforme de travail (planéité, portance) participent aussi à la qualité du pieu.

Note 2 : cette virole s'impose pour la sécurité du personnel suite à de dramatiques accidents.

10. La haveuse est aussi appelée « hydrofraise » ou « fraise » (annexe A de la norme NF EN 1538+A1) ou selon les entreprises « Hydrofraise® », « Rotofraise® », « Hydromill® », « Cutter® ».

Figure 1.5 : Schémas de phasage de la technique du pieu foré simple
(catégorie 1 selon la norme NF P94-262 COMPIL1) (schémas de principe)

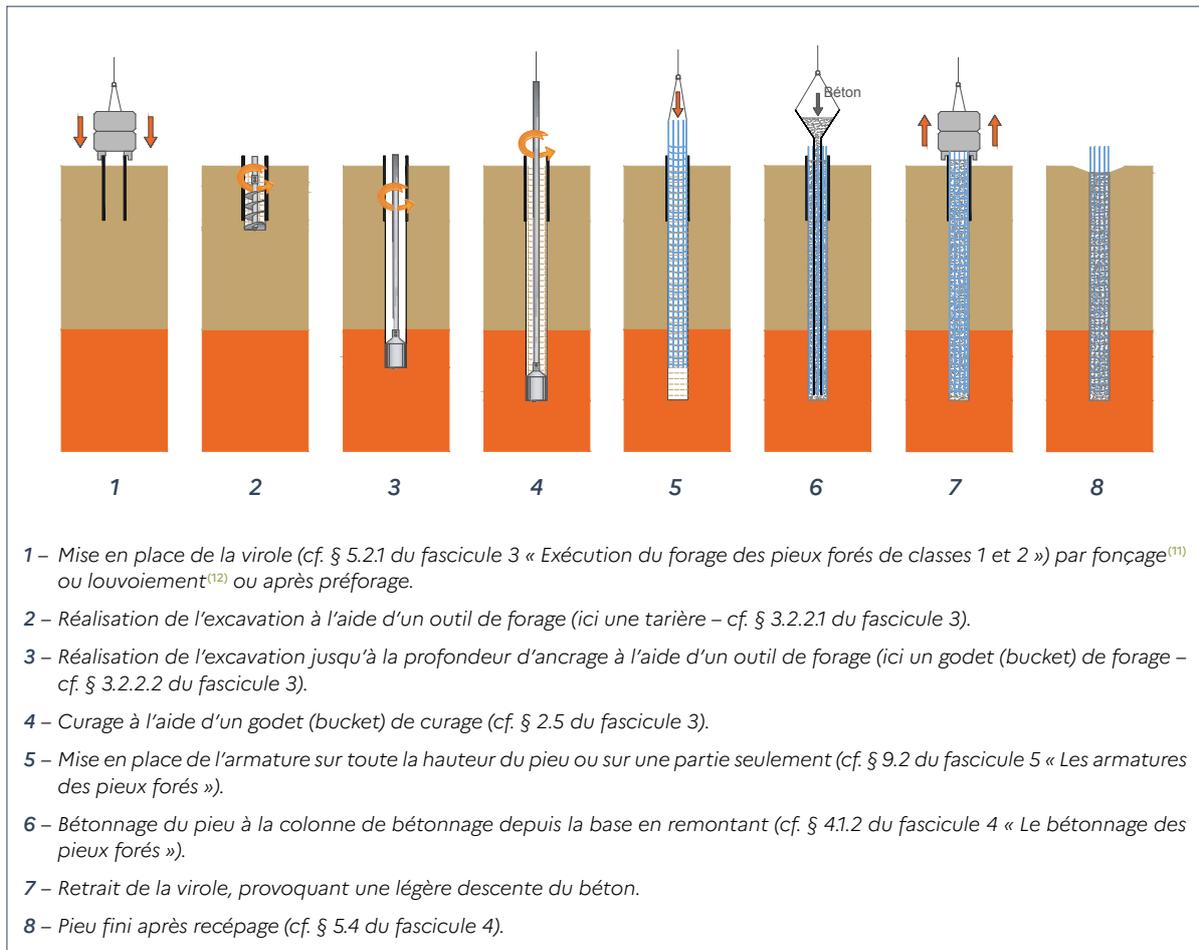


Figure 1.6 : Exemple de virole



11. Fonçage par battage, vibrage, vérinage, vissage ou par une combinaison de ces méthodes (selon l'article 3.23 de la norme NF EN 12699).

12. Ou louvoiage, technique d'enfoncement dans le sol ou d'extraction d'un tube, en lui donnant des mouvements de rotation de sens alterné (selon le Dictionnaire professionnel du BTP des éditions Eyrolles <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP>).

Figure 1.7 : Exemples de murette-guide

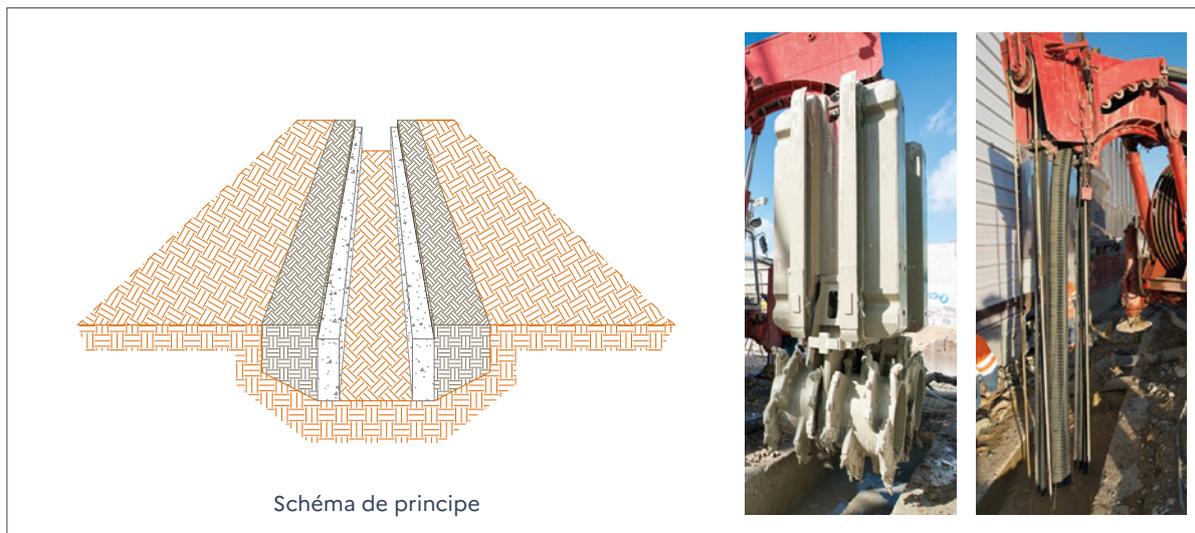


Figure 1.8 : Réalisation de l'excavation d'un pieu foré simple dans une argile raide à l'aide d'une tarière

Le domaine d'utilisation

Le domaine d'utilisation de cette technique est adapté aux terrains présentant une cohésion suffisante (par exemple rocher, marnes, craie, argiles raides – Figure 1.8). En présence de nappes ou de circulation d'eau, la technique devient bien souvent inadaptée ou délicate à mettre en œuvre.

Cette technique est très souvent utilisée pour des pieux courts ou combinée avec des techniques de tubage (cf. exemple 3 dans le § 8.1.3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 »).



2.2 - PIEUX FORÉS SOUS BOUE⁽¹³⁾ (CATÉGORIE 2, ABRÉVIATION FB)

Phasage de réalisation

Il s'agit de pieux dont l'excavation est réalisée sous la protection d'un fluide stabilisateur (eau, suspension minérale ou solution de polymères – cf. § 4.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») qui maintient les parois du forage (Figure 1.9). Le forage est réalisé :

- avec les outils des techniques de pieux forés (Figure 1.4), et afin d'obtenir une tolérance acceptable en plan (*Note 1*) et de contenir le fluide stabilisateur lors de son marnage entraîné par va-et-vient des outils de forage, un guide en tête de pieu est mis en place, il s'agit :
 - d'une virole en acier (Figure 1.6 – *Note 2*) dans le cas des pieux circulaires (cf. § 5.2.1 du fascicule 3),
 - d'une murette-guide, le plus souvent en béton dans le cas des barrettes (Figure 1.7) ;

13. Dans le langage courant, le terme « boue » est aussi bien utilisé pour le fluide stabilisateur que pour le fluide de forage. Alors que le fluide de forage est réservé à la fonction de transport des sédiments et souvent de refroidissement de l'outil, le fluide stabilisateur peut remplir ces fonctions, mais il est avant tout utilisé pour sa capacité de maintenir les parois du forage. Dans ce guide, le terme « fluide stabilisateur » est privilégié. Il est présenté succinctement dans le chapitre 5 de ce fascicule ou plus en détail dans le § 4 du fascicule 3.

- avec des modes de gestion du fluide stabilisateur divers (cf. § 4.3.5 du fascicule 3) :
 - sans circulation pour les solutions de polymères,
 - avec ou sans circulation pour les suspensions minérales :
 - sans circulation du fluide stabilisateur (ou très peu) : le fluide stabilisateur est déversé en tête de forage au fur et à mesure du forage (Figure 1.10),
 - avec circulation de fluide stabilisateur directe : le fluide stabilisateur est refoulé par une pompe depuis l'outil de forage, remonte le long des parois du pieu en entraînant les déblais, pour être récupéré (par pompage) en surface et si possible, expurgé de ses déblais (*Note 3*), pour ré-emploi,
 - avec circulation de fluide stabilisateur inverse : le fluide stabilisateur est déversé au niveau de la surface du pieu, puis aspiré au niveau de l'outil et remonté à l'intérieur de la tige centrale en même temps que les matériaux, pour être récupéré en surface et si possible, expurgé de ses déblais (*Note 3*), pour réemploi.

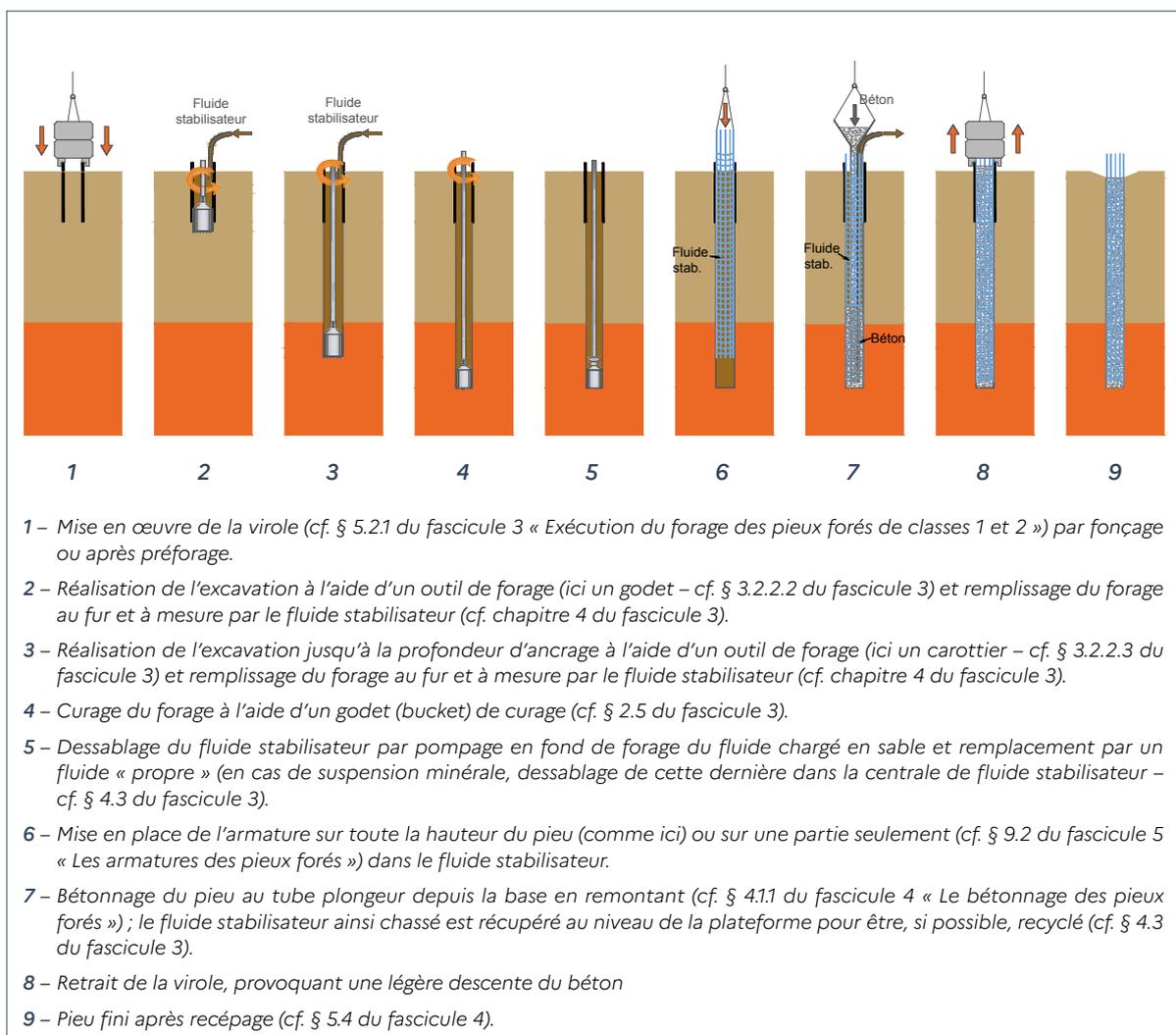
Lors du **bétonnage** à l'aide d'un tube plongeur (cf. § 4.1.1 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »), le fluide stabilisateur est chassé du pieu (du fait d'une densité moindre que celle du béton) et est récupéré depuis le haut du pieu, afin d'être généralement traité et réutilisé (cf. § 4.3 du fascicule 3).

Note 1 : la qualité du matériel de forage et la qualité de la plateforme de travail (planéité, portance) participent aussi à la qualité du pieu.

Note 2 : cette virole s'impose pour la sécurité du personnel suite à de dramatiques accidents.

Note 3 : le fluide stabilisateur permet le transport des déblais qui doivent être extraits ensuite.

Figure 1.9 : Schémas de phasage de la technique du pieu foré boue (catégorie 2 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 sans indication sur la gestion du fluide stabilisateur – cf. chapitre 4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») (schémas de principe)



Le domaine d'utilisation

Le domaine d'utilisation de cette technique est assez large puisqu'elle permet de réaliser les pieux **dans la plupart des terrains** avec néanmoins une attention particulière à porter dans les cas suivants pouvant conduire à limiter cette technique ou à influencer sur le choix du fluide stabilisateur (cf. § 4.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») :

- en cas **de couches de terrains lâches** ;
- en cas **de surcharges** (engins ou fondations chargées) **à proximité du pieu** ;
- lorsque **des vibrations** sont induites lors du passage de terrains durs (utilisation d'outils de type trépan – cf. § 3.2.4.1 du fascicule 3) susceptibles d'accélérer les phénomènes d'instabilité des parois du pieu ;
- en présence **de nappe phréatique à faible profondeur** (Note 1) ;
- en présence **d'écoulements souterrains importants** pouvant induire des limitations d'utilisation du fluide stabilisateur (Note 2) ;
- en cas **de perméabilité très importante** (Note 3) ;
- en présence **de vides importants** (Note 4) ;
- en présence **de terrains multicouches** lors de l'utilisation d'une solution de polymères ;
- en cas **d'emprise réduite** en raison de l'encombrement d'une centrale de fluide stabilisateur pour sa fabrication et son traitement (cf. § 4.3.2.3 du fascicule 3).

Note 1 : une bonne exécution nécessite de maintenir le niveau de suspension minérale (ou d'eau) au moins 1,5 m au-dessus de celui de la nappe selon la norme NF EN 1536+A1. Pour les solutions de polymères, il est recommandé que le niveau du fluide stabilisateur soit situé au minimum 2 et de préférence 3 m au-dessus de la nappe. Une solution consiste à surélever la plateforme de travail pour constituer cette garde.

Note 2 : la circulation d'eau peut empêcher la formation du cake pour les suspensions minérales (cf. § 4.2.1 du fascicule 3) ou provoquer la dilution des solutions de polymères (cf. § 4.2.2 du fascicule 3) générant de ce fait des éboulements. L'article 8.2.4.5 de la norme NF EN 1536+A1 précise que la pression interne provoquée par le niveau de fluide stabilisateur doit être suffisante pour maintenir la stabilité des parois et empêcher la migration de particules de sol dans le forage. Cette obligation est aussi valable en absence de circulation d'eau.

Note 3 : technique difficilement réalisable lorsque le coefficient de perméabilité k est supérieur à 10^{-2} m/s et possible avec l'utilisation d'un fluide stabilisateur adéquat et une consommation de fluide importante pour des perméabilités supérieures à 10^{-4} m/s. Dans certains cas, des solutions peuvent être apportées notamment par injection préalable.

Note 4 : dans ce cas, on ne peut pas assurer un niveau de fluide stabilisateur constant et surtout suffisant dans le pieu, ce qui peut remettre en cause la stabilité de la paroi.

Figure 1.10 : Exemples de la réalisation d'une barrette forée boue



Excavation à l'aide d'une benne preneuse dans un forage rempli de fluide stabilisateur



Remplissage par la tête du forage par un fluide stabilisateur (ici une suspension minérale)

2.3 - PIEUX FORÉS TUBÉS, TUBE RÉCUPÉRÉ OU PERDU (CATÉGORIES 3 ET 4, ABRÉVIATIONS FTR ET FTP)

Phasage de réalisation

Les tubes, utilisés pour soutenir le terrain lors de l'excavation, peuvent être définitifs (dits aussi « perdus », FTP⁽¹⁴⁾, Figure 1.11) ou provisoires, c'est-à-dire récupérés après (ou au fur et à mesure) du bétonnage du pieu (FTR⁽¹⁵⁾, Figure 1.12). Ils sont mis en œuvre (cf. § 5.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 » et Figure 1.13) par louvoisement, battage (dans les sols meubles), havage, vissage ou vibrofonçage. Le vérinage ou le lançage peuvent être employés dans des cas particuliers.

Il existe **différentes procédures pour la mise en place du tube** (Note 1) :

- **au fur et à mesure du forage** :

- légèrement en avance sur le forage pour la traversée des sols lâches susceptibles de se décompresser, de s'ébouler facilement ou de se remanier sous le niveau du forage atteint à ce stade,
- légèrement en retard sur le forage, dans le cas de terrains compacts, le plus souvent cohérents, de terrains durs ou comportant des blocs.

=> le tube est alors descendu progressivement **par louvoisement ou par havage** (avec si nécessaire un léger battage).

- **descendu directement à la cote du fond de pieu** dans les sols meubles (Note 2) :

=> le tube est généralement mis en place en une seule fois, puis le forage et l'excavation sont exécutés à postériori sous la protection du tubage.

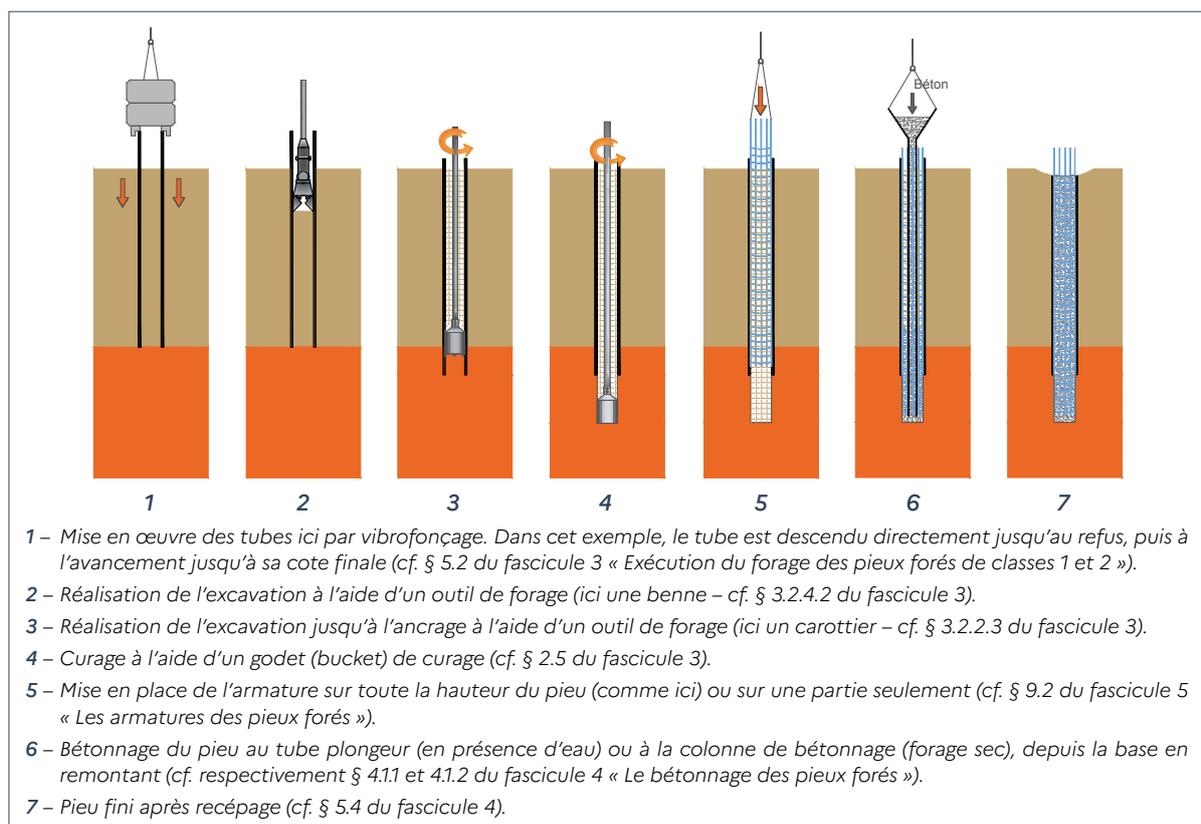
En ce qui concerne le bétonnage, en cas de retrait du tube (FTR, Figure 1.12), il faut anticiper un survolume de béton pour compenser le volume du tube extrait (Note 3).

Note 1 : afin d'aider la descente du tube, celui-ci peut être muni d'une trousse coupante.

Note 2 : le principal avantage de la solution de mise en œuvre du tube en une fois est lié au gain de temps engendré par le fait de séparer la phase de mise en place du tube et celle d'extraction des déblais.

Note 3 : ce survolume est évalué pour tenir compte également des hors-profils propres à tous les pieux non chemisés et occasionnés par la poussée du béton frais sur des terrains insuffisamment résistants.

Figure 1.11 : Schémas de phasage de la technique du pieu foré tubé avec tube perdu⁽¹⁶⁾ – FTP
(catégorie 3 selon la norme NF P94-262 COMPIL1) (schémas de principe)



14. Dans l'annexe A1 de la norme NF P94-262 COMPIL1, le nom correspondant à FTP est Foré tubé – virole perdue.

15. Dans l'annexe A1 de la norme NF P94-262 COMPIL1, le nom correspondant à FTR est Foré tubé – virole récupérée.

16. C'est-à-dire définitif.

Figure 1.12 : Schémas de phasage de la technique du pieu foré tubé avec tube récupéré – FTR
(catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1) (schémas de principe)

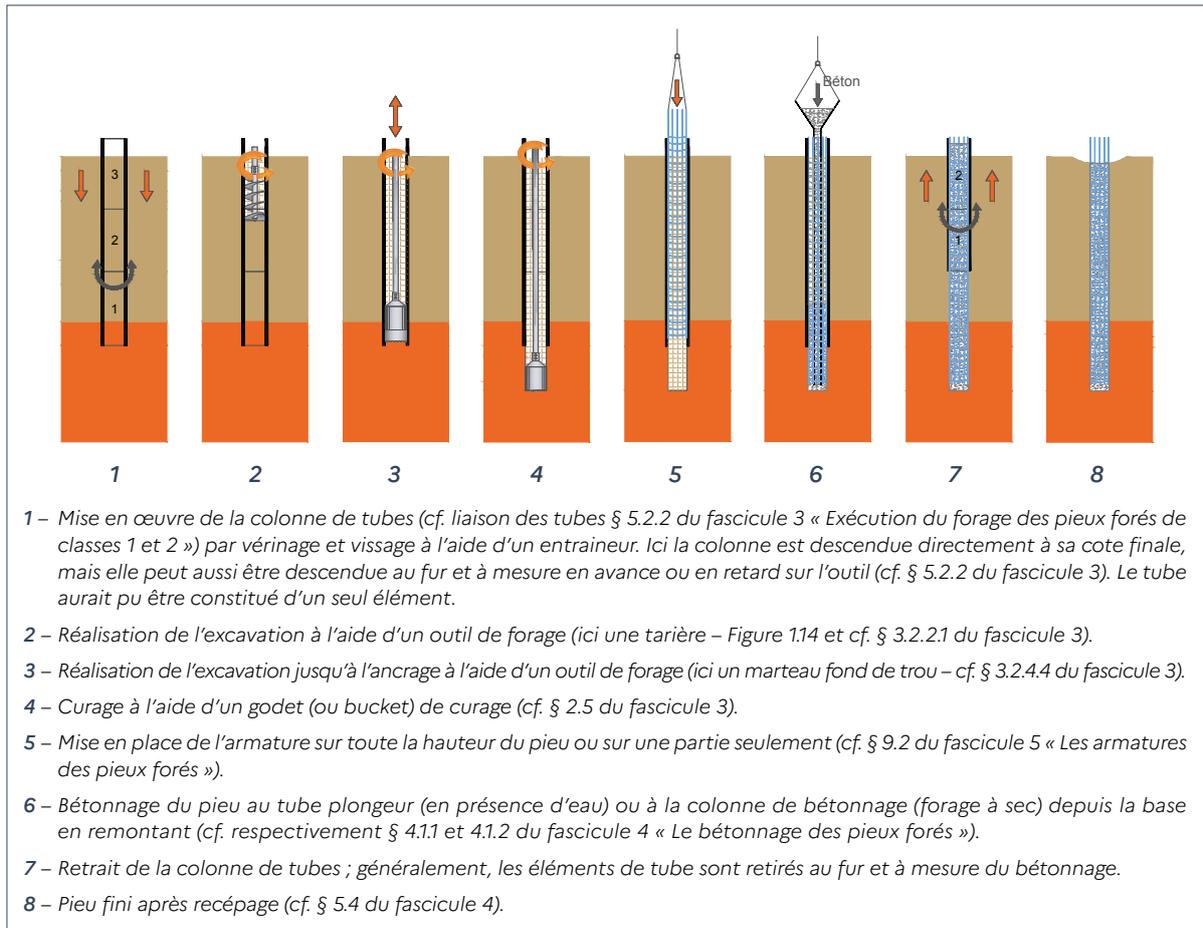
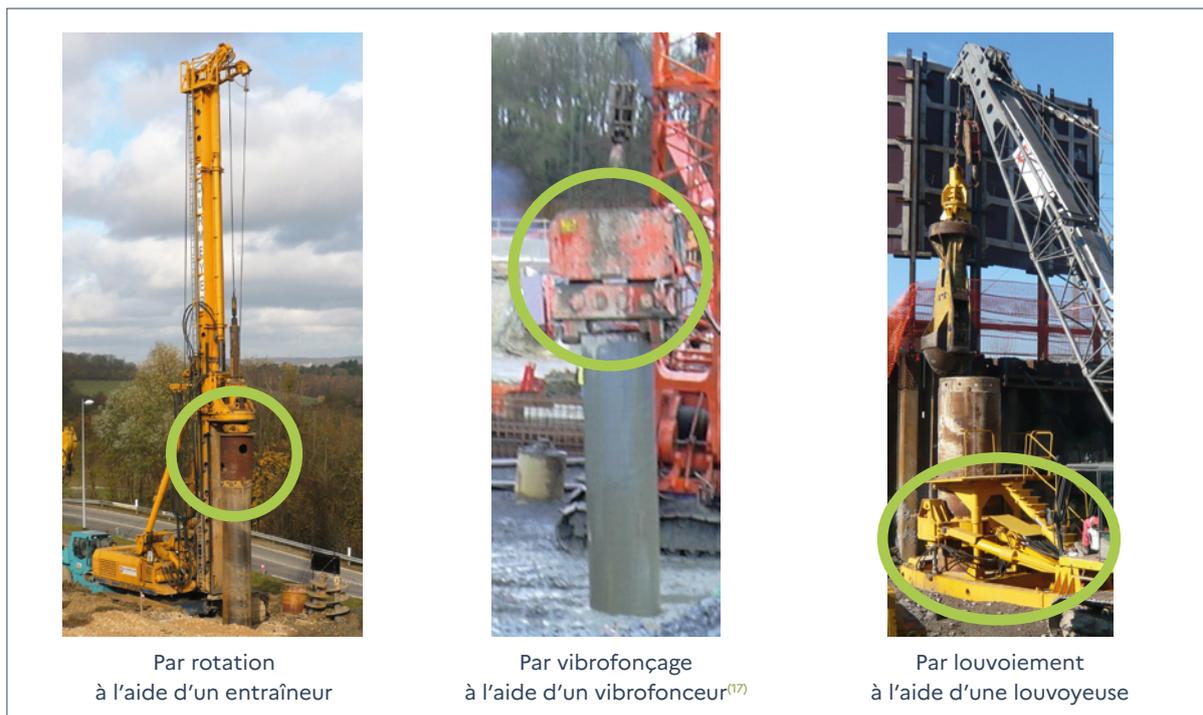


Figure 1.13 : Exemples de mise en œuvre d'un tubage
(cf. § 5.2.2 du fascicule 3 « L'exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »)



17. Le terme vibrateur peut aussi être trouvé.

Le domaine d'utilisation

On distingue (cf. § 5.2.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») :

- **les pieux forés tubés – tube récupéré (FTR – catégorie 4** selon la norme NF P94-262 COMPIL1 – Figure 1.12) (Notes 1, 2 et 3), lorsque les parois doivent être soutenues pendant le forage et jusqu'à la fin du bétonnage ;
- **les pieux forés tubés – tube perdu (FTP – catégorie 3** selon la norme NF P94-262 COMPIL1 – Figure 1.11) (Notes 1 et 3), généralement utilisés :
 - lorsque la technique de tube récupéré présente des contraintes d'exécution :
 - en présence de forts risques de surconsommation de béton (perméabilité importante, présence de terrain karstique, présence de vide),
 - en milieu aquatique,
 - en présence de terrains susceptibles de fluer sous la pression de la colonne de béton frais,
 - lorsque le tube répond à d'autres nécessités, comme :
 - la diminution du frottement négatif,
 - la reprise d'efforts importants de cisaillement/flexion (sismique, glissement de terrain),
 - la protection du béton du pieu en présence de terrains pollués (> XA3 – cf. § 1.2.2 du fascicule 4).

L'efficacité et le succès des techniques de pieux forés tubés sont directement liés à la **puissance des machines** qui doit donc être adaptée :

- à la **géométrie du pieu** (diamètre, épaisseur, longueur et donc poids du tube) ;
- au **contexte géotechnique** (sols frottants ou collants induisant des frottements importants ou encore sols compacts – Note 4) ;
- à l'**environnement du chantier** (nuisances, emprises...).

Note 1 : on rappelle que dans la norme NF P94-262 COMPIL1, la terminologie « virole » est utilisée improprement pour le tube ; or, celle-ci fait habituellement référence au tube provisoire court, mis en place pour sécuriser les à-côtés du forage et empêcher tout effondrement de la partie supérieure du forage proche de la plateforme de travail (définition issue de la norme NF EN 1536+A1). La virole est présentée dans le § 5.2.1 du fascicule 3.

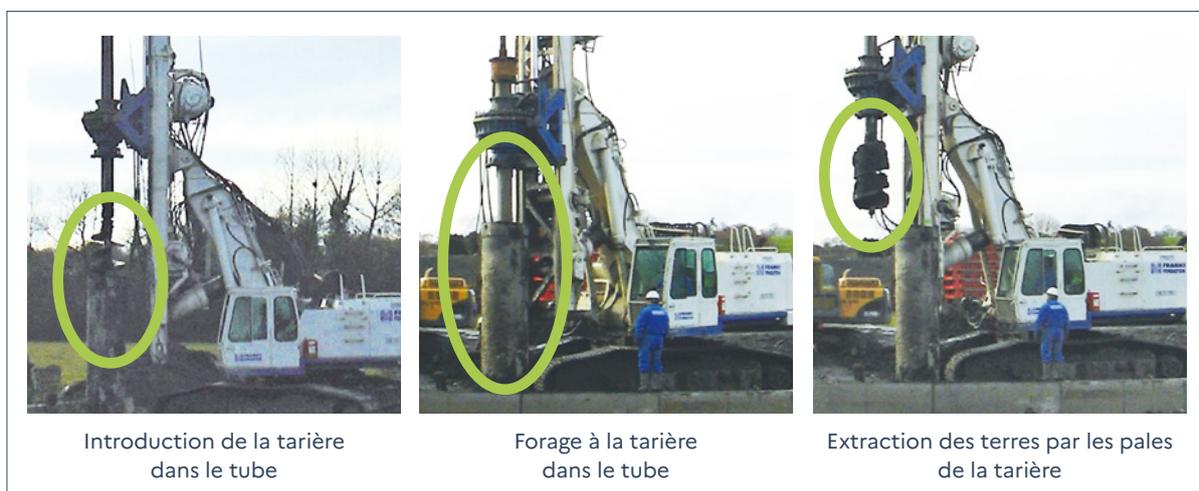
Note 2 : il peut donc arriver qu'en cours d'exécution un tube censé être provisoire (donc récupéré) soit laissé en place changeant ainsi la catégorie du pieu qui devient un pieu foré – tube perdu, du fait de difficultés à retirer le tube (cf. § 5.4.3 du fascicule 3).

Note 3 : il convient de bien distinguer le tube perdu – qui est un tube de travail à usage unique – et le tube définitif, plus communément appelé « gaine ». Tous deux ont des critères d'épaisseur différents selon les efforts à reprendre (cf. § 5.2.2 du fascicule 3) :

- l'épaisseur de la gaine dépend de son objectif : limitation des frottements sol-pieu ou augmentation de la résistance au cisaillement/à la flexion ou protection du béton dans un environnement trop pollué ;
- l'épaisseur du tube de travail, quant à elle, doit être suffisamment importante pour reprendre les efforts sans le déformer :
 - lors de la mise en place,
 - lors du retrait,
 - lors des réutilisations successives.

Note 4 : cette technique peut aussi rencontrer des refus, lorsque les terrains sont très compacts et que la descente du tube n'est plus possible (cf. § 5.4.2 du fascicule 3).

Figure 1.14 : Exemples d'extraction des sols dans la technique des pieux forés tubés (ici à l'aide d'une tarière)

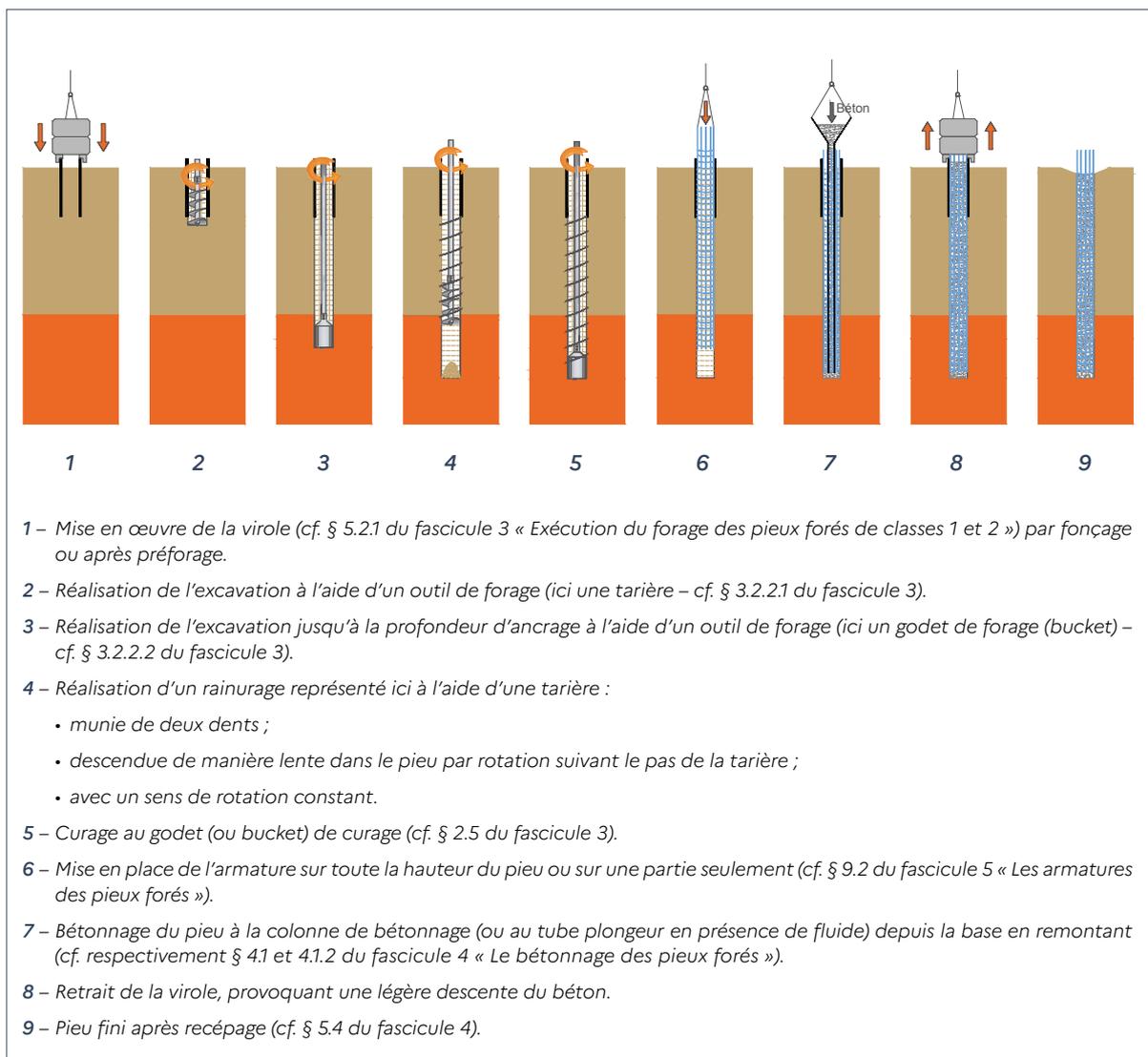


2.4 - PIEUX FORÉS SIMPLES OU SOUS BOUE AVEC RAINURAGE (CATÉGORIE 5, ABRÉVIATIONS FSR/FBR)

Phasage de réalisation

Cette technique reprend celle du pieu foré simple avec une opération supplémentaire entre l'opération de forage et de bétonnage, consistant à passer une tarière munie en périphérie d'un ergot ou d'une dent (Figure 1.15), afin de réaliser une rainure hélicoïdale. Cette rainure a pour objectif d'améliorer le contact sol-pieu conduisant ainsi à une augmentation de la résistance au frottement du pieu.

Figure 1.15 : Schémas de phasage de la technique des pieux forés simples ou boue avec rainurage (schémas de principe)



Le domaine d'utilisation

Cette technique est peu pratiquée en France et est adaptée **uniquement aux sols cohérents** pour lesquels le rainurage ne risque pas d'engendrer **une déstabilisation** ou **un remaniement des parois**.

2.5 - TECHNIQUES MIXTES POUR LES PIEUX FORÉS

En réalité, dans de nombreux cas, différentes techniques (*Note 1*) peuvent être utilisées pour la réalisation d'un même pieu. **Le choix d'une technique mixte** est généralement lié :

- à la **difficulté à mettre en œuvre ou à retirer le tubage** du fait d'un frottement sol-tube important ;
- à un **contexte géotechnique** posant des questions de stabilité de paroi ou de perméabilités variant avec la profondeur.

Des exemples sont détaillés dans le chapitre 8 du fascicule 3 ; les cas les plus courants consistent à commencer par réaliser :

- un **pieu foré tubé – tube récupéré** (FTR – cf. § 2.3) puis **pieu foré simple** (FS – cf. § 2.1) ;
- un **pieu foré tubé – tube perdu** (FTP – cf. § 2.3) puis **pieu foré boue** (FB – cf. § 2.2) ;
- un **pieu foré tubé – tube récupéré** (FTR – cf. § 2.3) sur toute la hauteur avec tubage perdu partiel (*Note 2*).

Note 1 : dans ce cas, il est important de préciser au préalable dans les procédures d'exécution :

- les cotes d'arrêt des tubes définitifs ou de travail ;
- le critère de changement de technique vis-à-vis de la lithologie.

Note 2 : lorsque la partie perdue est moins épaisse que la partie récupérée, il convient d'étudier particulièrement la liaison entre les 2 parties et les efforts développés dans la partie perdue pour éviter l'arrachement de cette dernière. Il est possible que la récupération du tube provisoire entraîne l'arrachement du tube perdu...



CHAPITRE 3

**Pieux forés
de classe 2**

3. PIEUX FORÉS DE CLASSE 2

Selon la nomenclature de la norme NF P94-262 COMPIL1, il s'agit de **pieux forés à la tarière creuse (dite continue)**. Les pieux de classe 2 sont des pieux forés pour lesquels l'excavation et le bétonnage s'effectuent concomitamment. La tarière comprend une âme creuse pour le bétonnage et doit être au moins aussi haute que le pieu à réaliser. La partie basse de l'âme creuse de la tarière doit être munie d'un **système d'obturation** (cf. § 3.2.3.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »). La **stabilité de l'excavation** est assurée par la présence du sol entre les pales de la tarière, dans le cas de la tarière simple rotation ou du tube pour la tarière double rotation.

On distingue :

- les pieux forés à la **tarière creuse simple rotation** (cf. § 2.2.1 du fascicule 3) ;
- les pieux forés à la **tarière creuse à double rotation** (cf. § 2.2.2 du fascicule 3).

En cas de double rotation, un tube de travail accompagne la tarière, à la descente comme à la remontée.

3.1 - PIEUX FORÉS À LA TARIÈRE CREUSE SIMPLE ROTATION (CATÉGORIE 6)

Phasage de réalisation

Cette classe de pieux (Figure 1.16) regroupe différentes technologies dont le principe et le phasage (Figure 1.17) restent toutefois identiques. Il s'agit en effet :

- **de visser jusqu'à la cote souhaitée** une tarière à axe creux dans le terrain, induisant ainsi un léger refoulement ;
- de manière simultanée, de remonter la **tarière** (sans dévisser afin d'obtenir un fut circulaire) **et de réaliser le bétonnage** depuis le bas de l'axe creux (ouverture d'un obturateur en pied de l'outil – cf. § 3.2.3.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ;
- **d'introduire l'armature** dans le béton frais.

Le domaine d'utilisation

La technique de la tarière creuse simple rotation est utilisée depuis une quarantaine d'années ; elle permet une exécution rapide des pieux. Mais comme les autres techniques, elle peut souffrir d'un certain nombre de difficultés, en raison principalement de l'impossibilité de changer l'outil de forage au cours de la réalisation du pieu (par exemple pour passer des zones indurées potentiellement sous-estimées lors de l'étude).

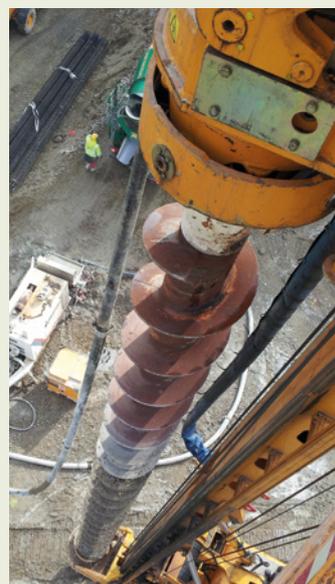
Figure 1.16 : Exemples de machines pour la réalisation de pieu à la tarière creuse simple rotation



Avant le début du forage

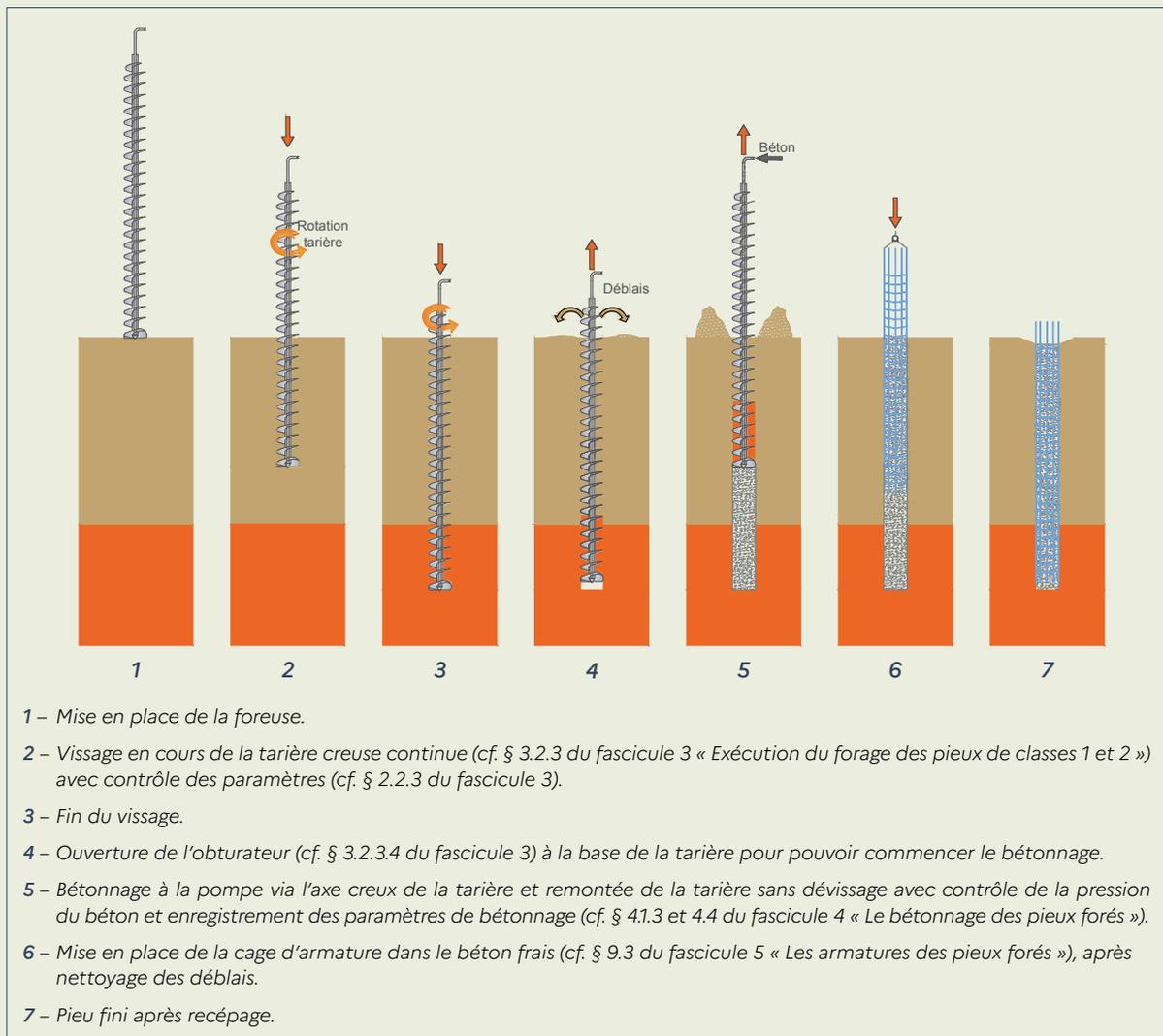


En cours de forage à la tarière creuse



Vue du haut de la tarière creuse

Figure 1.17 : Schémas de phasage de la technique du pieu à la tarière creuse simple rotation
(classe 2, catégorie 6 selon la norme NF P94-262 COMPIL1) (schémas de principe)



3.2 - PIEUX FORÉS À LA TARIÈRE CREUSE DOUBLE ROTATION (CATÉGORIE 6)

Phasage de réalisation

Les pieux à la tarière creuse double rotation (cf. § 2.2.2 du fascicule 3) nécessitent un système de forage comprenant deux tables de rotation⁽¹⁸⁾ superposées, une pour la rotation de la tarière, l'autre pour celle du tube. La réalisation de ces pieux (Figure 1.18 et Figure 1.19) consiste :

- à visser une tarière à axe creux et à descendre dans le même temps un tubage (*Note*) par rotation en sens inverse ;
- puis, à remonter la tarière et le tube, et simultanément, à bétonner depuis le fond du pieu.

Les déblais remontent par les pales de la tarière et sont évacués par les ouvertures en haut du tube (Figure 1.20). La technique de la tarière creuse double rotation présente les avantages de la tarière creuse simple rotation, et le tube :

- facilite, par effet combiné tube-tarière, le découpage des terrains ;
- limite les déviations lors du forage (augmentation de la rigidité) ;
- maîtrise mieux les surconsommations durant le bétonnage.

Note : la descente progressive du tube pose les mêmes questions que pour les forés tubés, puisque le tube est, là aussi, légèrement en avance ou en retard sur le forage.

18. Table de rotation : système permettant la rotation de l'outil de forage ou la rotation du tube.

Figure 1.18 : Schémas de phasage de la technique du pieu à la tarière creuse double rotation
(classe 2, catégorie 6 selon la norme NF P94-262 COMPIL1) (schémas de principe)

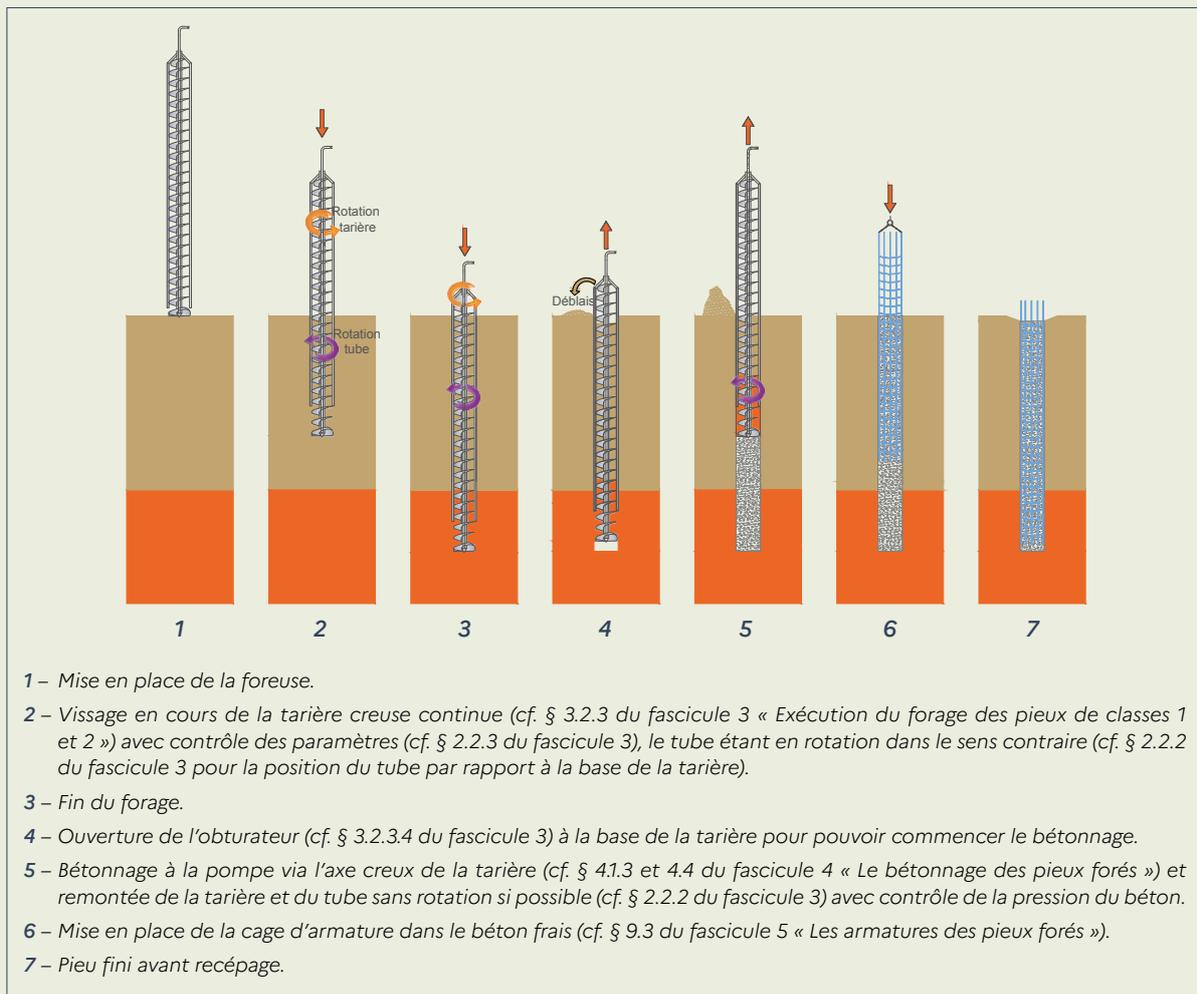


Figure 1.19 : Exemples de réalisation de pieux à la tarière creuse à double rotation



Machine de forage pour la réalisation de pieux à la tarière creuse double rotation



Exemple de base de tarière creuse double rotation



Exemple de pieux réalisés par la technique tarière creuse double rotation

Figure 1.20 : Exemples de technique de récupération des déblais en tête de tube avec la tarière creuse double rotation



Le domaine d'utilisation

Cette technique est utilisée avantageusement lorsque :

- les exigences de verticalité sont sévères ;
- le risque d'obstacle ou de points durs (en particulier pour une utilisation en pieux sécants) complique le guidage de la tarière ;
- le risque de surexcavation est important (cf. § 2.2.4.3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ;
- le risque de fluage d'une couche compressible de sol sous la poussée du béton induit un risque de survolume du béton et une amplification du phénomène de frottement négatif (cf. § 2.2.4.3 du fascicule 3).

Avantages de la tarière creuse double rotation

L'intérêt de la technique est que le forage et le bétonnage sont réalisés sous la protection du tubage ce qui permet d'obtenir une surface du fût très propre.

De plus, la présence du tubage rigidifie l'ensemble et permet d'améliorer la verticalité des pieux.



CHAPITRE 4

Domaine d'emploi

4. DOMAINE D'EMPLOI

4.1 - ADÉQUATION DES CATÉGORIES DE PIEUX AU CONTEXTE GÉOTECHNIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le Tableau 1.2 fournit des recommandations relatives à l'adéquation des différentes techniques de pieux forés en fonction des types de terrain et de l'éventuelle présence de nappes.

Nota bene : Dans la plupart des cas, la stratigraphie ne s'applique que pour des couches d'épaisseur significative.

Pour la lecture du Tableau 1.2 :

La technique est soit adaptée « + », soit envisageable sous réserve de vérifications et/ou de procédures spécifiques « 0 » ou encore inadaptée « - ».

Rappel des abréviations : « FS » foré simple, « FB » foré sous boue, « FTR et FTP » foré tubé avec respectivement le tube récupéré et le tube perdu, « FSR et FBR » foré rainuré respectivement simple et sous boue, « FTC et FTCD » foré à la tarière creuse, respectivement simple rotation et double rotation.

Tableau 1.2 : Recommandations relatives à l'utilisation des différentes techniques de pieux forés en fonction des terrains et de l'éventuelle présence de nappe

Catégorie de pieux		1	2	3	4	5	6	6
Typologie de sol	Abréviation	FS	FB	FTR	FTP	FSR, FBR	FTC	FTCD
Argiles molles, vases et limons très mous		-	0	+	+	-	0	0
Argiles fermes		+	+	+	+	-	+	+
Argiles et marnes raides		+	+	0	0	+	+	0
Limons : hors eau		0	+	+	+	-	+	+
sous eau ^{a)}		-						
Sables lâches : hors eau		-	+	+	+	-	+	+
sous eau ^{a)}			+	0	+		0	
Sables moyennement compacts et compacts : hors eau		-	+	+	+	-	+	+
sous eau ^{a)}				0				
Sols grossiers (graviers, galets...)		-	0 OU + ^{c)}	+	+	-	+ ^{d)}	+ ^{d)}
Blocs durs avec matrice fine		-	0	0	0	-	0	0
Craie altérée		0	+	+	+	-	+	+
Craie fracturée		0	0	+	+	0	+	+
Craie rocheuse/saine		+	+	0	0	-	0	0
Roches altérées et tendres		+	+	0	0	-	0	0
Roches fragmentées ^{b)}		+	+	0	0	-	0	0

Nota bene : Le système de notation est global ; il implique normalement un bon compromis entre la qualité du forage, la cadence et le coût.

⚠ Les choix doivent être pris en tenant compte du contexte, ce que ces simples tableaux de synthèse ne peuvent pas transcrire parfaitement.

a) Après vérification des circulations d'eaux souterraines.

b) Après vérification de l'absence de cavités naturelles notamment dans les sols rocheux calcaires, gypseux et dolomitiques.

c) Sous réserve d'existence d'une fraction fine.

d) Technique adaptée pour des dimension de granulats maximale $D_{max} < 300$ mm.

Origines des limites selon les techniques :

(FS) Foré simple : les réserves portent principalement sur la capacité du terrain à être stable sans système de maintien de paroi.

(FB) Foré boue : les réserves portent principalement sur la capacité du terrain à tenir la charge de fluide stabilisateur.

(FTR et FTP) Foré tubé (tube récupéré ou perdu) : les problèmes viennent principalement de la mise en œuvre des tubes qui nécessite des techniques de fonçage et d'extraction appropriées aux contextes géotechniques.

(FSR et FBR) Foré rainuré (simple ou boue) : cette technique combine les aléas propres à la technique des pieux forés simples accentués par l'effet du rainurage.

(FTC et FTCD) Foré à la tarière creuse (simple et double rotation) : les réserves portent principalement sur la capacité des matériels à franchir les terrains indurés.

4.2 - AVANTAGES/INCONVÉNIENTS DES TECHNIQUES DE PIEUX

Le Tableau 1.3 permet de synthétiser de manière qualitative les avantages et les inconvénients des différentes techniques de pieux forés en fonction de critères d'usage et de caractéristiques.

Nota bene : Cette synthèse n'est qu'une comparaison générale entre chacune des techniques de pieux forés précisées dans ce tableau.

Pour la lecture du Tableau 1.3 :

La technique de pieu est soit avantageuse « + », soit sans incidence « » ou encore désavantageuse « - » au regard de critères d'usage ou de caractéristiques.

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients qualitatifs des différentes techniques de pieux de classes 1 et 2 en fonction de critères d'usage et de caractéristiques

Catégorie de pieux		1	2	3	4	5	6	6
Usage / caractéristique	Abréviation	FS	FB	FTR	FTP	FSR, FBR	FTC	FTCD
Caractéristiques de portance ⁽¹⁹⁾ favorables					-	+	+	+
Maîtrise de la verticalité				+	+			+
Maîtrise des tolérances d'exécution				+	+		-	
Armature du pieu sur hauteur importante							-	-
Réduction du frottement négatif		+ a)	+ a)	+	+		-	-
Passage d'obstacle				-	-		-	-
Cadences élevées			-				+	+
Géométrie : diamètres > 1 200 mm		+	+	+ b, c)	+ c)		-	-
Géométrie : longueur importante (> 20 m)		+	+	-	-			-
Géométrie : longueur très importante (> 35 m)		-	+	-	-	-	-	-
Propreté/remise en état		+	-	+	+		+	+
Emprises chantier réduites		+	-			+ , -	+	+
Réalisation de pieux faiblement inclinés		-		+	+	-		
Maîtrise du risque de pollution			-		+			
Limitation des vibrations				- d)	- d)			

a) Avec ajout d'un chemisage.

b) Au-delà de pieux de 20-25 m de longueur, il faut faire attention à la capacité d'extraction du tube.

c) Deux tubes de plus de 1 200 mm de diamètre et au-delà de 12-15 m de longueur ne peuvent pas être portés par le véhicule de transport.

d) Dépend néanmoins du mode de fonçage ; risque négligeable pour une mise en œuvre par louvoisement, vissage ou havage.

19. En frottement.



CHAPITRE 5

Éléments de choix technique pour la tenue des parois

5. ÉLÉMENTS DE CHOIX TECHNIQUE POUR LA TENUE DES PAROIS

La tenue des parois de forage durant le forage et le bétonnage peut requérir l'emploi :

- d'un fluide stabilisateur ;
- d'une enveloppe : un tube.

Dans ce chapitre sont fournies quelques informations pour aider au choix de la technique de tenue des parois :

- soit par un fluide stabilisateur (§ 5.1) ;
- soit par une enveloppe (§ 5.2) ;

Et ensuite les critères de choix à étudier pour aider au choix de la technique (§ 5.3).

5.1 - CHOIX DU FLUIDE STABILISATEUR

Les fluides stabilisateurs sont présentés dans le chapitre 4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 » et § 4.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés », traitant respectivement du forage et du bétonnage.

5.1.1 - PRÉSENTATION SUCCINCTE DES FLUIDES STABILISATEURS

« Fluide stabilisateur » est le terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (article 3.21) pour définir le « fluide utilisé au cours de l'excavation pour soutenir les parois de forage et, [dans certains cas⁽²⁰⁾], transporter les sédiments », à ne pas confondre avec le fluide de forage (Notes 1 et 2). Les fluides stabilisateurs viennent s'opposer aux poussées (contraintes) horizontales exercées par le terrain et la nappe (cf. figure 3.77 dans le § 4.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

Les deux fluides principalement utilisés lors du forage de pieux sont :

- les suspensions minérales⁽²¹⁾, principalement les suspensions de bentonite ou suspensions bentonitiques (Note 3) (cf. § 4.2.1 du fascicule 3) ;
- les solutions de polymères⁽²²⁾ synthétiques, entre autres, de type PHPA⁽²³⁾ (polyacrylamide partiellement hydrolysé ou copolymère acrylamide – acrylate de sodium) (cf. § 4.2.2 du fascicule 3) ;

et plus rarement d'autres fluides tels que :

- l'eau, mais dans ce cas l'eau sert généralement à contrebalancer la pression interstitielle présente dans le sol (cf. § 4.2.3 du fascicule 3) ;
- des mélanges bentonite/polymères (cf. § 4.2.4 du fascicule 3).

Les fluides stabilisateurs nécessitent souvent ajout d'adjuvants pendant leur utilisation ou leur recyclage afin d'obtenir ou de conserver leurs propriétés et donc leur efficacité (cf. « Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs » dans le § 4.3.6 du fascicule 3).

Il est à noter qu'un fluide stabilisateur ne permet pas la tenue des terrains en tête (pression insuffisante) et qu'une virole (Note 4) dépassant de la plateforme et plantée dans le sol sur les premiers mètres (cf. § 5.2.1 du fascicule 3) est de ce fait souvent impérative.

20. Dans la norme NF EN 1536+A1 (article 3.21), « dans certains cas » n'est pas indiqué.

21. Terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (NOTE de l'article 3.21), en effet des particules minérales sont en suspension dans de l'eau.

22. Terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (NOTE de l'article 3.21), en effet il s'agit d'un mélange homogène de polymères et d'eau.

23. Les PHPA sont des polymères synthétiques dérivés des PAM (polyacrylamides).

Note 1 : pour rappel, dans le langage courant, le terme « boue » est aussi bien utilisé pour le fluide stabilisateur que pour le fluide de forage.

Note 2 : le fluide de forage est réservé à la fonction de transport des sédiments et souvent sert à refroidir l'outil. Le fluide de forage peut être de l'eau, de l'air comprimé ou de la boue (à base d'argile ou de polymères).

Note 3 : la plupart des bentonites que l'on trouve sur le marché contiennent un peu de polymères.

Note 4 : la virole permet aussi :

- **de garantir une surhauteur de fluide stabilisateur** par rapport au niveau de la nappe phréatique, malgré l'abaissement du niveau du fluide lors de la sortie de l'outil de forage ;
- **d'éviter le débordement du fluide** lors de l'entrée de l'outil dans le forage rempli de fluide.

5.1.2 - CHOIX DU FLUIDE STABILISATEUR

Le type de fluide sera choisi majoritairement en fonction :

- **des dimensions du projet** (diamètre, largeur, longueur et profondeur des fondations à réaliser) ;
- **de l'outil de forage** (sensibilité forte au cisaillement des solutions de polymères) ;
- **des autres matériels**, tels que ceux nécessaires pour le pompage, les traitements, les longueurs de tubage (si utilisé) ;
- **du type de circulation des fluides stabilisateurs** ;
- **de la facilité d'utilisation du fluide et de son efficacité éprouvée dans des conditions similaires** ;
- **de la facilité d'approvisionnement en fluide stabilisateur** ;
- **du coût de la technique** (cf. § 5.1.3) dépassant le cadre du coût des matériaux bruts ;
- **du type de sol** (cf. § 5.1.4) : les fluides stabilisateurs ne sont pas adaptés à tous les types de sol. Il convient donc d'examiner les caractéristiques du site pour réaliser un premier inventaire des solutions envisageables ;
- **du niveau technique du personnel** ;
- **des aspects environnementaux** (cf. § 5.1.5) : il est nécessaire de prendre en considération la possible contamination de l'environnement lors de l'utilisation et de la mise en dépôt du fluide stabilisateur (*Note*) et les conditions de leur élimination ;
- **des aspects contextuels** : surcharges à proximité du pieu, vibrations lors de l'utilisation d'outils de forage par percussion (cf. § 3.2.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »), présence d'une nappe en charge ou non...

Comme spécifié dans l'article 8.2.2.4 de la norme NF EN 1536+A1, dans le cas de pieux réalisés sous fluide stabilisateur, le choix et le fonctionnement des outils de forage ne doivent pas remettre en cause **la stabilité du forage**. Il faut adapter la vitesse de fonctionnement et le diamètre de l'outil au diamètre du forage et du tubage (article 8.2.2.5) sous peine, par exemple, de provoquer un effet « piston » qui pourrait déstabiliser les parois.

Note : il convient de tenir compte du risque associé aux matériaux entrant dans la composition du fluide stabilisateur, mais aussi d'estimer comment ces derniers peuvent modifier la physico-chimie du sol et des eaux souterraines. La limitation des pertes de fluides dans le sol est un paramètre clé pour réduire l'impact potentiel sur l'environnement. Il faudra aussi limiter tous les risques accidentels tels que le déversement.

5.1.3 - COÛT DU RECOURS AU FLUIDE STABILISATEUR

Paramètres à prendre en compte pour l'estimation financière

Le coût global du fluide stabilisateur ne se limite pas à celui du matériau de la matière première (par exemple, bentonite ou polymères), mais comprend aussi de nombreux paramètres qui nécessitent d'être considérés dès le début du projet, afin d'éviter toute dérive financière :

- **le coût des matières premières** (par tonne ou au mètre cube) ;
- **le rendement volumique de la matière première** (quantité de matériau nécessaire par mètre cube de fluide ayant les propriétés appropriées) ;

- **les produits de traitement chimique** (§ 4.3.6 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») pour le prétraitement, le traitement en cours d'utilisation (§ 4.3.5 du fascicule 3), et l'élimination (§ 4.3.8 du fascicule 3) ;
- **le coût de l'eau** pour la préparation des fluides stabilisateurs (eau de ville, eau de nappe, eau de cours d'eau...) ;
- **le taux d'utilisation** du fluide stabilisateur (pertes dans le terrain, pertes avec des sols excavés, agressivité du terrain...) ;
- **les coûts des équipements** dédiés :
 - pour le stockage des matières premières et des fluides : réservoirs de stockage... (§ 4.3.2.3 du fascicule 3),
 - pour la circulation des fluides : les pompes (§ 4.3.4 du fascicule 3) et les conduites,
 - pour le traitement mécanique des fluides stabilisateurs : dessableurs, dessiltreurs, centrifugeuse... (§ 4.3.2.3 du fascicule 3),
 - pour le contrôle des fluides stabilisateurs (cf. § 4.3.7.1 du fascicule 3) : filtres-presses (cf. annexe 3.1.5 du fascicule 3)...
- **les coûts d'élimination des matériaux d'excavation et des déchets liquides** : déblais avec mélange de fluide stabilisateur, fluide stabilisateur usé (§ 4.3.8 du fascicule 3) et stock de fluide en fin de projet ;
- **les exigences logistiques** pour les équipements et les produits ;
- **la vitesse du cycle de production** ;
- **les travaux de remise en état** après le repli des installations et les coûts associés ;
- **les coûts de la main-d'œuvre associée.**

Coût de la mise en dépôt de fluide stabilisateur usagé

Le coût et l'exploitation sont fortement impactés par la mise en dépôt :

- **de la suspension minérale** (cf. § 4.3.8.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »), qui peut être complexe et coûteuse en fonction des réglementations environnementales locales, de la distance entre le site de construction et le lieu de dépôt et enfin de la quantité totale de suspension à mettre en installation de stockage de déchets ;
- **de solutions de polymères** (cf. § 4.3.8.3 du fascicule 3), qui s'avère être potentiellement moins laborieuse que pour les suspensions minérale et moins coûteuse, mais qui nécessite d'être évaluée au cas par cas.

5.1.4 - CHOIX DU FLUIDE STABILISATEUR SELON LES TYPES DE SOL

Le choix de la nature du fluide stabilisateur dépend très fortement du type de sol considéré (cf. § 6.3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »). Il faudra s'intéresser à la perméabilité, à la cohésion et à la chimie des sols, mais aussi au niveau et à la pollution des nappes et à la qualité de l'eau de préparation (cf. § 4.3.2.1 du fascicule 3).

Domaine d'utilisation des suspensions minérales

Les suspensions minérales sont conseillées pour :

- **les argiles** (*Note 1*) et **les limons** exceptés les sols très mous (*Note 2*) ;
- **les sables et les sols grossiers** exceptés les sols très lâches (*Note 2*) ;
- **les craies, les marnes et calcaires marneux, la roche.**

Les suspensions minérales (*Note 3*) s'adaptent plus facilement à des profils de sols variés pour des coefficients de perméabilité inférieurs à 10^{-4} m/s. **Les perméabilités** plus importantes peuvent entraîner des risques **de perte de fluide stabilisateur**.

La suspension minérale ne peut être utilisée dans certains sols sans **injection préalable** (*Note 4*). Cette technique doit être analysée en amont au regard du contexte (coût et enjeu).

Note 1 : en présence d'argile gonflante, il convient de vérifier l'adéquation de la suspension minérale comme fluide stabilisateur [1.2].

Note 2 : la problématique des sols mous n'est pas tant le fluide stabilisateur mais éventuellement les éboulements lors du forage, et surtout le bétonnage en raison de la poussée du béton liquide sur ce sol mou peu résistant.

Note 3 : actuellement les bentonites utilisées sont généralement des bentonites sodiques dopées avec des polymères, afin de réduire le dosage en bentonite, d'augmenter la viscosité du fluide stabilisateur et d'être moins sensibles à certains éléments chimiques présents.

Note 4 : dans le cas où on ne peut avoir recours au chemisage.

Domaine d'utilisation des solutions de polymères

Les polymères actuels de type PHPA :

- ne conviennent pas à des terrains ouverts (avec les solutions disponibles au moment de la rédaction de ce guide), car les solutions de polymères vont s'infiltrer (*Note 1*) ;
- sont plutôt adaptées pour un sol monocouche de type :
 - argiles et limons raides à très raides (*Note 2*),
 - marnes et calcaires marneux raides à très raides (*Note 2*) et roche (*Note 3*) ;
- sont à étudier pour les sables et graviers [1.2].

Note 1 : cette infiltration est nuisible pour les sols environnants (stabilité, pollution des nappes phréatiques...) et pour le bon fonctionnement de la solution pendant le forage.

Note 2 : les polymères permettent ici de limiter la perte de fluide stabilisateur et de diminuer le gonflement des formations géologiques présentant des minéraux argileux sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement.

Note 3 : ⚠ la haveuse (cf. § 3.2.4.3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ne peut pas être utilisée avec les solutions de polymères.

5.1.5 - CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES POUR LE CHOIX DE FLUIDE STABILISATEUR

Critères de choix des fluides stabilisateurs en fonction de considérations environnementales

Au regard des réglementations environnementales et des conditions du site, le choix du fluide et des ajouts doit se faire en tenant compte **des exigences suivantes** :

- **estimer l'impact environnemental** du fluide et des ajouts choisis par rapport à la réglementation locale ;
- **estimer l'impact et la réaction du sol** environnant lors du forage ;
- **évaluer la méthode** la plus appropriée pour la mise en dépôt :
 - des déblais de forage,
 - du fluide stabilisateur (cf. § 4.3.8 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »),
 - des eaux usées produites sur le site (cf. § 2.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») ;
- **minimiser les volumes de fluide stabilisateur** et donc les pertes de fluide dans les sols environnants.

Les fluides stabilisateurs à base d'argile au regard de l'impact environnemental [1.2]

Bien que les argiles soient des produits naturels, en raison de leur état en suspension colloïdale et de la forme de leurs éléments constitutifs, elles peuvent nuire à certains êtres vivants ; ainsi, composée de plaquettes microscopiques qui restent en suspension, même avec des concentrations très basses, la suspension minérale peut avoir un effet néfaste sur les poissons (étouffement).

Certaines suspensions minérales sont de plus dopées avec des polymères.

Il faut aussi faire attention à tous les ajouts, leur fiche technique, fournie par le fabricant, doit être consultée.

Les solutions de polymères au regard de l'impact environnemental [1.2]

En raison de la diversité des produits polymères disponibles, il est **difficile de statuer** : certains sont biodégradables, d'autres non ou encore biodégradables à moyen terme.

Les ajouts doivent être aussi au centre de l'étude d'impact environnemental, ainsi on peut trouver :

- des **biocides** pour protéger des biopolymères de la fermentation ;
- des **alcalis caustiques** destinés à augmenter le pH, pour améliorer le rendement des polymères synthétiques ;
- des **sels** pour flocculer les argiles ou pour agir comme agents stabilisateurs ;
- ...

Des informations relatives à des paramètres généraux tels que le pH, les éléments solides en suspension ou dissous, les huiles, sont intéressantes pour le dépôt en installation de stockage de déchets.

Comparaison des fluides stabilisateurs à base d'argile ou de polymères au regard de l'impact environnemental

Les solutions de polymères présentent l'avantage de nécessiter des concentrations plus faibles (0,5 à 2 kg/m³) que les suspensions de bentonite (25 à 50 kg/m³) selon l'EFFC/DFI [1.2].

La bentonite est classée comme déchet non dangereux, mais a un impact fortement polluant si elle est libérée dans un environnement aquatique [1.2]. Les polymères sont des produits chimiques à 100 %, leur quantité est faible dans les bentonites dopées aux polymères.

5.2 - CHOIX D'UNE ENVELOPPE

5.2.1 - PRÉSENTATION SUCCINCTE DES ENVELOPPES

Il existe deux types d'enveloppe :

- le **tube**, qui s'interpose entre le vide d'excavation et le sol (*Notes 1, 2 et 3*) et qui est généralement récupéré en fin d'exécution ;
- la **chemise**, qui est placée entre le béton et le sol (*Notes 2 et 4*) et qui est abandonnée en place.

Note 1 : le sujet des différents tubes et de leur mise en œuvre est traité dans le chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ».

Note 2 : lorsque le tube est maintenu au moment du bétonnage, il fait alors office de chemise.

Note 3 : une chemise métallique épaisse est appelée « gaine ».

Note 4 : le chemisage permet de désolidariser le béton du sol, de fait, il est traité en détail dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

5.2.2 - CHOIX DE L'ENVELOPPE

Intérêt du tubage et du chemisage

Le **tube** (lorsqu'il est perdu) et le **chemisage** sont mis en place, entre autres, pour assurer :

- la **stabilité des parois du forage** :
 - le tubage concerne la stabilité des parois vis-à-vis de la poussée du sol, le tube est ainsi soumis à des efforts de compression nécessitant une épaisseur importante,
 - le chemisage permet la stabilisation des parois vis-à-vis de la poussée du béton frais, sollicitant ainsi la chemise en traction et de ce fait, même une faible épaisseur permet de reprendre ces efforts.
- l'**intégrité du fût** :
 - en empêchant la surconsommation du béton (*Note*)
 - en évitant le délavage du béton lors de circulation d'eau (§ 6.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »),
- la **limitation (ou la réduction) de l'impact des actions géotechniques** (frottement négatif et poussées latérales du sol, respectivement dans les § 5.3.3 et 5.3.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

Nota bene : L'intérêt des enveloppes pour le **bétonnage des pieux forés** est traité dans le § 2.4 du fascicule 4.

Note : la surconsommation du béton (§ 5.6 du fascicule 4) peut être due à des pertes de béton dans les réseaux de fissures ou vides ou au fluage des couches molles pouvant conduire à une augmentation ou à une diminution du diamètre des pieux.

Informations à fournir dans le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières)

Les caractéristiques des tubes perdus et chemises doivent être bien précisées dans le CCTP (avec, en particulier, mention de la nuance minimale, de l'épaisseur minimale selon calcul (*Note*), de la longueur et de la hauteur concernées de tube/chemise).

Note : l'épaisseur minimale pourra être augmentée forfaitairement en fonction des sollicitations résultantes de la mise en œuvre.

5.2.3 - CHOIX DE LA TECHNIQUE DES PIEUX FORÉS TUBÉS OU CHEMISÉS

Le recours à la technique des pieux forés tubés est avant tout lié aux conditions géologiques ou hydrogéologiques de l'ouvrage. Elle peut être adaptée (*Note*) dans les cas suivants :

- en présence :
 - d'environnement agressif vis-à-vis du béton (les classes XA sont définies dans le § 1.2.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »),
 - de vides ou de karsts (§ 5.3.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 » et § 6.3 du fascicule 4),
 - de circulations d'eau horizontales ou verticales (§ 6.2 du fascicule 4),
 - de sols mous ou chargés de manière dissymétrique (§ 5.3.3 et 5.3.4 du fascicule 3 et § 6.1 du fascicule 4),
 - d'éboulements (§ 5.3.2 du fascicule 3),
 - d'affouillement (§ 5.2.2 et 5.4.1 du fascicule 3) ;
- **en cas d'utilisation d'outils de forage non guidés** ne permettant pas d'assurer une section homogène ni une rectitude acceptable de forage.

⚠ Dans tous les cas, la décision d'utiliser cette technique doit être **prévue dès la conception des fondations**, car une utilisation en cours de chantier est souvent lourde de conséquences sur les délais et sur les coûts, du fait :

- **de la nécessité d'avoir à changer de matériels** pour d'autres, pas forcément disponibles immédiatement ;
- **de devoir revoir le dimensionnement**, ce qui peut entraîner des changements de diamètre et/ou de longueurs, rendant les cages d'armature déjà réalisées inutilisables.

Note : selon les cas, d'autres techniques peuvent aussi convenir.

5.2.4 - COÛT DU RECOURS AU TUBAGE ET AU CHEMISAGE

Le choix de la technique doit donc être apprécié au stade du projet sous peine d'augmentation des coûts et des délais.

Généralement, la technique du tube perdu ou celle du chemisage augmente les coûts, du fait qu'il s'agit d'une opération délicate, qui rallonge la durée de réalisation des pieux (approvisionnement, mise en œuvre) et qui est difficile à improviser. Les coûts et les délais seront d'autant plus importants qu'ils n'auront pas été anticipés.

5.3 - CRITÈRES DE CHOIX DE LA TECHNIQUE POUR LA TENUE DES PAROIS DE FORAGE

L'utilisation du **fluide stabilisateur** n'est possible qu'en l'absence de cavité de grande ampleur, de fracturations ou de fissurations importantes et si le terrain présente une perméabilité adaptée (§ 5.3.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 » et § 5.1.4 du présent fascicule).

En dehors des contextes précités, **le choix entre une solution de pieux tubés ou forés au fluide stabilisateur**, diffère en fonction :

- **de la longueur des tubes nécessaires** : au-delà de 20 m la solution de pieux tubés devient lourde à mettre en œuvre, mais si le tube provisoire reste inférieur à 20 m, alors cette technique est souvent plus intéressante ;
- **de la nécessité d'un tube définitif** (frottement négatif, pieu sous nappe...), le pieu foré tubé à tube perdu est normalement plus intéressant que le pieu foré boue chemisé ;
- **du coût** : lorsque le nombre de pieux à réaliser est faible et que le diamètre des tubes est unique ou restreint (*Notes 1 et 2*), la technique du pieu tubé est souvent la plus intéressante ;
- **du délai** : la technique des pieux tubés est généralement plus rapide surtout si le fonçage peut se faire en une fois par des moyens séparés (*Note 3*), la gestion du fluide stabilisateur ralentit le forage des pieux et leur bétonnage.

Note 1 : au-delà d'un diamètre de 1 200 mm, le fluide stabilisateur peut redevenir compétitif.

Note 2 : en cas d'utilisation de plusieurs diamètres de tubes, la logistique et le risque d'erreur augmentent.

Note 3 : si en revanche, il faut alterner fonçage du tube et excavation du sol dans ce dernier, la technique du fluide stabilisateur peut s'avérer plus intéressante.

5.4 - INCIDENCES SUR LE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX

Incidences d'un chemisage ou tubage perdu non prévu

Lorsque le chemisage s'impose au moment de l'exécution, alors que la reconnaissance préalable n'avait pas fait apparaître de phénomènes comme la circulation d'eau horizontale ou des éboulements non pressentis, l'incidence de mise en œuvre d'une chemise ou d'un tube porte, entre autres, sur :

- **le mode de travail du pieu** et en particulier en ce qui concerne la valeur du frottement latéral (diminution de la force portante – cf. ci-après) et celle de la réaction latérale (réduction éventuelle de la résistance aux efforts horizontaux) ;
- **la compatibilité des diamètres respectifs** des cages d'armature, des chemises, et le cas échéant des tubes de travail.

Incidence sur le frottement latéral en cas de tubage ou chemisage non prévu

Le frottement latéral, en présence :

- **d'un tube non prévu foncé dans le sol**, n'est donc plus celui béton-sol et de ce fait le frottement latéral peut s'en trouver réduit par rapport à la réalisation de ce pieu sans tube ;
- **d'une chemise non prévue**, se trouve réduit dans les zones où elle est disposée, en raison du vide annulaire ainsi créé.

La diminution du frottement latéral entraîne celle de la capacité portante du pieu sauf en cas de frottement négatif (défini dans le § 1.2).

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [1.1] *Pieux forés – Recueil des règles de l'art, guide*, Ministère des transports - Direction générale des transports intérieurs, LCPC/SETRA, 1978
- [1.2] EFFC/DFI, *Guide to Support fluids for Deep Foundations*, LCPC/SETRA, mars 2019

FASCICULE DU CCTG (CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES)

Fascicule 68 du **Cahier des clauses techniques générales (CCTG)** – Travaux de génie civil, *Exécution des travaux géotechniques des ouvrages de génie civil*, décembre 2017 (paru en mai 2018)

NORMES AFNOR

- NF DTU 13.2** Travaux de bâtiment – Fondations Profondes, 2020
Partie 1-1 : éléments relatifs à l'exécution – Cahier des clauses techniques types
Partie 1-2 : critères de choix des matériaux
Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types
- NF EN 1536+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés, 2015
- NF EN 1538+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées, 2015
- NF EN 12699** Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux avec refoulement du sol, 2015
- NF P94-262 COMPIL1** Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes (Tirage 2), 2018
- NF P94-500** Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications, 2013

Traduction

Bored piles for civil engineering works and building

Application guide

Since the first issue of this guide dedicated to bored piles in 1978, many changes have occurred affecting both technical aspects and applicable standards. This new issue incorporates these developments to which it is necessary to add the changes relating to public and private procurement.

This new guide deals with the execution in situ with excavation of the ground, class 1 and 2 piles (continuous flight auger piles), or barrette, constituting the deep foundations of both civil engineering works and buildings.

Very widely illustrated with more than 370 figures and several tables, it is intended for professionals. It consists of 7 booklets dealing respectively with generalities on the different types of piles, general aspects of works contracts, the execution of boring, concreting, reinforcements, inspection of finished piles and finally, their defects and their repair.

Pilotes perforados para obras de ingeniería y edificio

Guía de aplicación

Desde la primera edición de esta guía sobre pilotes perforados, publicada en 1978, se han producido muchísimos cambios, tanto en la técnica como en las normas aplicables. Esta nueva edición recoge dichos cambios, así como los relativos a los contratos públicos y privados.

Esta nueva guía trata de la ejecución in situ con excavación del terreno, de pilotes de clase 1 y 2 (barrena hueca continua), o de elementos portantes, que constituyen las cimentaciones profundas tanto de obras de ingeniería civil como de edificios.

Ilustrada con más de 370 figuras y numerosas tablas, va dirigida a un público profesional. Consta de siete entregas que tratan, respectivamente, de información general sobre los distintos tipos de pilotes, los aspectos generales de los contratos de obras, la perforación, el hormigonado, las armaduras, la inspección de los pilotes acabados y, por último, los defectos y reparaciones.

© 2025 - Cerema

LE CEREMA, L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Le Cerema, Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, est un établissement public qui apporte son concours à l'État et aux collectivités territoriales pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques au service de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires. Il porte des missions de recherche & innovation et appuie le transfert d'innovations dans les territoires et auprès des acteurs privés.

Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral. Présent partout en métropole et dans les Outre-mer par ses 27 implantations, il développe une expertise de référence au contact de ses partenaires européens et contribue à diffuser le savoir-faire français à l'international.

Le Cerema capitalise les connaissances et savoir-faire dans ses domaines d'activité. Éditeur, il mène sa mission de centre de ressources en ingénierie par la mise à disposition de près de 3 000 références à retrouver sur www.cerema.fr rubrique nos publications.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Dupliprint est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Direction de la Stratégie et de la Communication / Pôle éditions

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : PAO Concept

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achévé d'imprimer : mai 2025

Dépôt légal : mai 2025

ISBN : 978-2-37180-706-8 (pdf) - 978-2-37180-707-5 (papier) - ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

2 rue Antoine Charial - CS 33 927 - 69426 Lyon Cedex 03 - France

www.cerema.fr

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 1 Les différents types de pieux

Depuis la première édition de ce guide consacré aux pieux forés en 1978, de nombreux changements sont intervenus qui concernent aussi bien la technique que les normes applicables. Cette nouvelle édition intègre ces évolutions auxquelles il faut ajouter les changements relatifs aux marchés publics et privés.

Ce nouveau guide traite de l'exécution en place et avec excavation du terrain, des pieux de classes 1 et 2 (tarière creuse continue), ou de barrettes forées, constituant les fondations profondes aussi bien d'ouvrages de génie civil que de bâtiment.

Très largement illustré par plus de 370 figures et de nombreux tableaux, il se destine à un public professionnel. Il est constitué de 7 fascicules traitant respectivement de généralités sur les différents types de pieux, des aspects généraux des marchés de travaux, de l'exécution du forage, du bétonnage, des armatures, des contrôles des pieux finis et enfin, de leurs défauts et de leur réparation.



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT | MOBILITÉS
| INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT | ENVIRONNEMENT &
RISQUES | MER & LITTORAL