

Les

références

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 7

Défauts et réparations des pieux forés



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



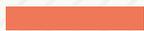
LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 7

Défauts et réparations des pieux forés



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)
- Rincenc 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 7 - Défauts et réparations des pieux forés.*

Lyon : Cerema, 2025.

Collection : Les références.

ISBN : 978-2-37180-718-1 (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 : Durmeyer.

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

Causes des défauts	8
---------------------------	----------

1.1 - La phase de forage (en lien avec le fascicule 3)	10
1.2 - La phase de bétonnage (en lien avec le fascicule 4)	11
1.3 - Autres causes	11

CHAPITRE 2

Nature et gravité des défauts	12
--------------------------------------	-----------

2.1 - Les défauts de la pointe	14
2.2 - Les défauts du fût	16
2.3 - Les défauts de la partie haute du pieu	18

CHAPITRE 3

Opportunité de la réparation du pieu	20
---	-----------

3.1 - Introduction	22
3.2 - Démarche conseillée – Arbre de décision	23
3.3 - Évaluation des étendues de défauts	25
3.4 - Principes de justification par le calcul d'une fondation défectueuse	26

CHAPITRE 4

Les différents modes de réparation	28
---	-----------

4.1 - L'injection	30
4.2 - Le scellement de barres d'acier dans les parties saines du fût	33
4.3 - Le jet-grouting	33
4.4 - Réparation à l'abri d'un tubage ou d'un blindage	35
4.5 - Réalisation de fondations additionnelles	36
4.6 - Micropieux en pointe (micropieux racines)	36
4.7 - Justification en cas de confortement	37

CHAPITRE 5**Exemples de réparation 38**

5.1 - Injection en pointe suite à un défaut en pointe suspecté	40
5.2 - Injection multiple du fût et de la pointe suite à la détection d'inclusion de sol	41
5.3 - Micropieux périphériques suite à des singularités détectées en pointe	43
5.4 - Micropieux racines suite à la non-atteinte de la cote du projet	45
5.5 - Jet-grouting suite à la détection de singularités	47
5.6 - Excavation et remplacement/forage suite à la détection de poches de béton délavé	48
5.7 - Scellement de barres suite à un défaut constaté dans le fût du pieu	49

CHAPITRE 6**Réception des pieux réparés 51****Bibliographie 53**

Ouvrage	54
Article	54
Normes afnor	54

Ce fascicule est dédié aux défauts qui peuvent être rencontrés lors de la réalisation des pieux sur certains chantiers, mais il faut noter que nombre de chantiers se déroulent sans aucune anomalie avec des pieux ne présentant aucun défaut.

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 (cf. chapitre 3 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »). Certaines préconisations de la classe 1 ne sont pas directement transposables à la classe 2.



CHAPITRE 1

Causes des défauts

1. CAUSES DES DÉFAUTS

Les causes des défauts peuvent être multiples et sont essentiellement dues à :

- **l'absence de maîtrise** dans une ou dans plusieurs opérations (décrites dans les fascicules précédents) pour la réalisation du pieu ;
- **l'utilisation d'une technique inadaptée** au contexte géotechnique réellement rencontré ;
- **une absence ou un niveau trop faible d'étude géotechnique et hydrogéologique** du site ;
- **une étude géotechnique insuffisante** pour choisir correctement la technique et l'outil de forage (*Note*) ;
- **l'insuffisance de contrôle sur le chantier** durant l'exécution, de la part du maître d'œuvre ou de l'entreprise (contrôle extérieur, contrôle interne et externe) ;
- l'existence d'un marché défaillant ou d'un planning « serré » ou contraint qui impose **des cadences d'exécution incompatibles avec la réalisation d'un travail de qualité**.

Note : le choix de la technique est généralement fait lors de la mission géotechnique G2, toutefois, il est possible de rencontrer des terrains dont la résistance est plus importante sans avoir été pour autant mesurée ni signalée dans l'étude⁽¹⁾, ce qui peut poser une difficulté quant à la mise en œuvre de cette technique et au choix de l'outil de forage.

1.1 - LA PHASE DE FORAGE (EN LIEN AVEC LE FASCICULE 3)

Les causes les plus courantes des défauts lors de la phase de forage sont les suivantes :

- **le choix du matériel et/ou de la technique de foration et du type de pieu inadapté** aux sols en place (cf. chapitre 6 « Recommandations en fonction de la nature des terrains » du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 » et *Note 1*) ;
- **des pertes de fluide stabilisateur** (boues) importantes et continues en présence de vides (terrains karstiques, dissolution du gypse...), de roches fracturées ou de graves sans fines ou de terrains perméables (cf. chapitre 4 « Techniques de tenue des parois par fluide stabilisateur » du fascicule 3) ;
- **l'existence d'un artésianisme ou d'une nappe en charge ou encore de circulation d'eau** pouvant provoquer des éboulements (*Note 1*) ;
- **l'éboulement des parois de forage** dû à l'utilisation d'un fluide stabilisateur de composition non adaptée au sol ou rendue inadaptée par le contact prolongé avec celui-ci (cf. chapitre 4 du fascicule 3) ;
- **des déviations de forage** dues à la nature du terrain (présence de blocs, existence d'un pendage...) et à un guidage de verticalité (ou de l'inclinaison souhaitée) non efficace (*Notes 1 et 2*) ;
- **un curage** (cf. § 5.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») insuffisant du fond de pieu pouvant conduire à un mauvais contact en pointe de pieu et une pollution du béton ;
- **l'existence d'une interface sol pulvérulent sur sol imperméable compact** (par exemple, sable sur rocher) **sous nappes** avec des arrivées possibles de sable sous le tube de travail ancré partiellement au-dessus du niveau du contact avec le rocher (*Note 3*) ;
- **la qualité de la plateforme de travail**. (cf. § 3.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Note 1 : cas traités dans différentes parties du fascicule 3.

Note 2 : dans certains cas, cette déviation peut ne pas conduire systématiquement à des défauts pour l'ouvrage.

Note 3 : la surface de la roche n'est pas forcément plane. De plus, son érosion ne se produit pas par couches horizontales, mais attaque les zones faibles, les fissures et les diaclases, qui peuvent se dégager en forme de « V » relativement ouvert et profond. Puis les conditions géologiques changent et du sable peut, par exemple, se déposer par-dessus et donc dans les « V ». Lorsqu'on fore, même si on entre le tube dans le rocher sur tout le périmètre (l'ancrage n'est donc pas partiel), des venues de sable provenant des creux peuvent se produire. Cet apport en sol peut être parfois important et difficile à maîtriser si on est dans un environnement soumis à des fluctuations de nappe importantes et rapides, dues à la marée par exemple. De plus, certains sondages géotechniques pour caractériser le sol ont pu être réalisés dans ces « V » remplis de sable, conduisant à estimer le substratum rocheux plus en profondeur.

1. C'est le cas par exemple de l'essai pressiométrique dont la pression limite mesurée est généralement bornée à 5 MPa (article 5.7.3 de la norme NF EN ISO 22476-4).

1.2 - LA PHASE DE BÉTONNAGE (EN LIEN AVEC LE FASCICULE 4)

Les causes les plus courantes des défauts lors de la phase de bétonnage sont les suivantes :

- un dispositif de bétonnage inadapté ou en mauvais état (cf. chapitre 4 « Mise en œuvre du béton dans le forage » du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- un processus de bétonnage mal conduit : défaut d'amorçage, rupture du bétonnage due à une remontée trop rapide du tube plongeur ou de la colonne de bétonnage (désamorçage) (cf. chapitre 4 du fascicule 4) ;
- un approvisionnement en béton irrégulier (cf. chapitre 4 du fascicule 4) ou une durée du maintien des caractéristiques rhéologiques inadaptée (*Note*) pouvant entraîner dans certains cas un début de perte de fluidité du béton (raidissement) avant la fin du bétonnage ;
- une mise en œuvre d'un béton de composition non spécifique ou non conforme (cf. § 2.1 « La formulation » du fascicule 4), insuffisamment maniable (cf. § 1.1.1 « Une grande maniabilité » du fascicule 4), faible résistance à la ségrégation (cf. § 1.1.2 « Une grande résistance à la ségrégation » du fascicule 4) ou trop fluide ;
- un abaissement différé du niveau du béton (*Note*) ;
- un mauvais dessablage du fluide stabilisateur (cf. chapitre 4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ;
- une baisse brutale (non maîtrisée) du niveau du béton, par exemple liée à des vides dans le sol (*Note*).

Note : sujets traités dans différentes parties du fascicule 4.

1.3 - AUTRES CAUSES

D'autres causes n'étant pas particulièrement identifiées comme liées à la phase de forage ou de bétonnage peuvent exister. Les plus courantes sont les suivantes :

- des caractéristiques du béton non adaptées à l'agressivité du milieu pouvant entraîner, par exemple, un retard de prise (*Note*) ou une perte de résistance (cf. par exemple § 1.1.4 « Une durabilité adaptée à l'agressivité chimique du milieu environnant » du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- les circulations d'eau importantes qui lessivent localement le béton frais en raison d'un mauvais choix de technique de réalisation des pieux (cf. § 6.2 « Bétonnage en présence de circulation d'eau : risque de délavage du béton » du fascicule 4) ;
- des nappes en charge provoquant des remontées d'eau dans le béton frais du pieu, en absence d'équilibrage de la pression d'eau (cf. notamment § 6.2 du fascicule 4) ;
- le remaniement du sol provoquant une diminution du frottement axial ou de la portance de la pointe (cf. entre autres § 4.1.1.3 « Le bétonnage au tube plongeur » du fascicule 4) ;
- un délai trop important entre le forage et le bétonnage favorisant les éboulements ou la sédimentation en fond de trou (cf. par exemple § 4.1.1.3 du fascicule 4) ;
- la mise en place mal appréhendée ou préparée ou le mauvais positionnement de la cage d'armature notamment lors de l'utilisation de la technique de la « tarière creuse » (cf. par exemple § 9.4 « Risques associés au levage et à la mise en place des cages d'armature » du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») ;
- la difficulté de retrait du tube de travail en raison d'un début de prise du béton ou du resserrage du sol (cf. § 5.7 « Le retrait du tube de travail » du fascicule 4) ;
- l'utilisation d'engins de battage de type trépan, de compacteur vibrant ou de vibrofonçeur à proximité de pieux dont le béton n'a pas eu le temps de faire prise. L'article 8.2.1.12 de la norme NF EN 1536+A1 impose un délai de 4 heures²⁾ entre deux pieux distants de moins de quatre diamètres avec un minimum de 2 m (cf. notamment § 4.1.1.3 du fascicule 4) ;
- une mauvaise implantation (cf. § 4.1 « Processus d'implantation et de récolement des pieux » du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») ;

2. Cette durée peut être augmentée en fonction de la rhéologie du béton et des conditions particulières de sol.

- **une réalisation de pieux de géométrie non conforme** (longueur, ancrage, inclinaison, diamètre et cage d'armature) ;
- **un mauvais contrôle du recépage** (erreur de cote) (cf. § 5.4 « Recépage des pieux forés » du fascicule 4) ;
- **un recépage insuffisamment poussé** (béton pollué encore présent en tête de pieu) ;
- **un recépage mal mené** (matériel trop puissant qui endommage le pieu) ;
- **un défaut de la cote d'arase** en raison de la purge du béton pollué ;
- **des travaux de terrassement à proximité** pouvant endommager les pieux (cf. par exemple § 5.2 « Réception et précautions particulières de conservation des pieux » du fascicule 2).

Note : le retard de prise peut entraîner un risque de lessivage du béton ou d'endommagement des pieux lors des travaux de terrassement.

CHAPITRE 2

Nature et gravité des défauts

2. NATURE ET GRAVITÉ DES DÉFAUTS

Ce chapitre traite des défauts. Il faut signaler que certains d'entre eux ne conduisent pas automatiquement à des réparations.

Les causes évoquées au chapitre 1 peuvent être à l'origine de défauts affectant la pointe, le fût ou la partie haute du pieu (Figure 7.1).

Lorsqu'aucune réparation n'est possible ou que la solution se révèle excessivement onéreuse, il peut être envisagé de remplacer la fondation, quels que soient le type et le lieu du défaut. Dans ce cas, il conviendra de modifier la géométrie et le plan de ferrailage de la semelle si nécessaire et/ou de dimensionner des longrines de redressement.

Figure 7.1 : Exemple de défauts



2.1 - LES DÉFAUTS DE LA POINTE

Les défauts en pointe sont probablement les plus fréquents. Leurs conséquences sont évidemment plus graves pour les pieux travaillant en pointe (cas notamment des pieux chemisés) et **peuvent se traduire par une diminution sensible de la résistance intrinsèque du pieu et/ou de sa capacité portante**, au risque d'engendrer des tassements importants.

Les défauts de la pointe

Ils peuvent intéresser :

- **la pointe même du pieu**, avec des défauts au niveau du béton (*Note 1*), lui conférant une résistance à la compression moindre ;
- **le contact sol-pieu**, en raison d'un curage inefficace du fond de forage, laissant place à une interposition d'un mélange de fluide stabilisateur et de sédiments entre le béton et le sol – Figures 7.2 et 7.3 (*Note 2*) ;
- **le terrain sous-jacent en place** qui a été remanié par l'emploi de techniques de forage mal adaptées à la nature des terrains (cf. le Tableau 1.2 dans le § 4.1 du Fascicule 1 « Les différents types de pieux », relatif au choix des techniques selon la nature des terrains) (*Note 2*).

Note 1 : il peut s'agir :

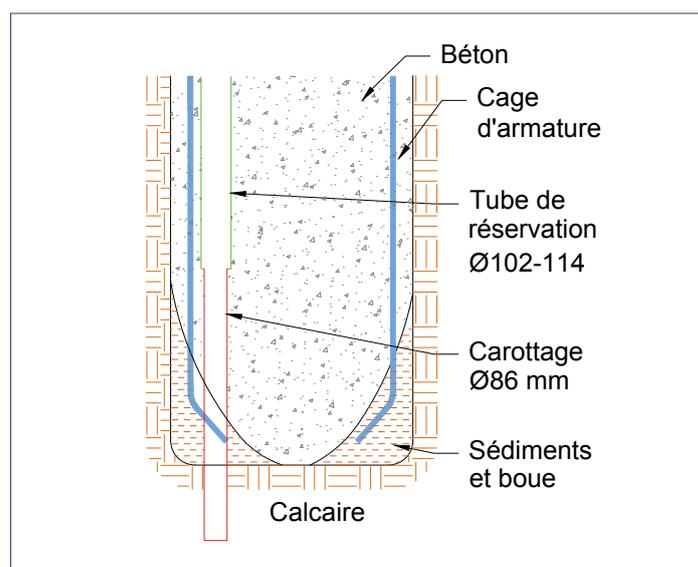
- de **béton délavé**, c'est-à-dire que la pointe n'est constituée que de granulats sans ciment en raison d'une circulation d'eau ou d'un béton qui se ségrège ;
- d'un **béton de mauvaise qualité ou comportant des inclusions de fluide stabilisateur ou de terrain** en raison d'un défaut d'amorçage.

Note 2 : l'**inclusion de sol ou de fluide stabilisateur ou un remaniement des sols en fond de forage** remettent en cause la qualité du contact béton-sol et la portance mobilisable en pointe.

Figure 7.2 : Exemples de carottage de fond de pieu montrant un défaut de pointe avec une épaisseur d'environ 0,70 m de granulats sans liant



Figure 7.3 : Coupe schématique de la base d'un pieu (réalisation d'un carottage pour observer le contact pointe-sol)



Conséquences des défauts de la pointe

Les défauts de la pointe peuvent conduire à des tassements inadmissibles pour les structures, voire à une chute de la capacité portante.

Réparation préconisée en cas de défaut de pointe

Compte tenu du caractère subjectif de l'évaluation de la gravité du défaut, **les pointes défectueuses doivent toujours être consolidées par injection**, quand sa réalisation est faisable (cf. § 4.1 « L'injection » et l'exemple dans le § 5.1 « Injection en pointe suite à un défaut en pointe suspecte »). À fortiori, **la réparation et le contrôle** très sévère de son efficacité sont impératifs quand le défaut risque de compromettre la stabilité de la fondation (par exemple, les pieux-colonnes faiblement encastés dans le rocher, en site aquatique).

2.2 - LES DÉFAUTS DU FÛT

Les défauts du fût

Il s'agit en principe d'irrégularités de section du fût :

- **d'excroissances** (Figure 7.4) dues au fluage d'une couche molle sous la poussée du béton frais, ou aux hors-profils de forage (éboulements, cavités...) (Note 1) ;
- **de rétrécissements de section** provoqués par les poussées horizontales du sol ;
- **d'inclusions de fluide stabilisateur ou de sol** plus ou moins importantes (Figure 7.5) pouvant conduire à la rupture complète du fût ;
- **de délavages du béton** imputables à des circulations d'eau horizontales (Figure 7.6) ;
- **de défauts d'implantation** (Figure 7.7) ;
- **de fissure nette du pieu** suite à un choc (zone non armée) (Figure 7.8).

Il peut aussi exister :

- **des défauts de géométrie de la cage d'armature** ;
- **des défauts d'enrobage** (Note 2) ;
- **de mauvaises caractéristiques du béton** constatées à postériori.

Note 1 : ces excroissances peuvent conduire à une augmentation du frottement négatif quand elles sont excessives et de ce fait à une diminution de la capacité portante par rapport à celle évaluée lors du dimensionnement.

Note 2 : il peut s'agir aussi éventuellement de défauts dus à l'emploi de bétons insuffisamment ouvrables. La mise en œuvre de bétons présentant des affaissements au cône trop faibles est en effet incompatible avec un enrobage correct des armatures (Figure 7.9) ; un affaissement suffisant est une condition nécessaire mais pas suffisante pour se prémunir du défaut d'enrobage. ⚠ Un tel défaut est d'ailleurs difficilement décelable par auscultation sonique (ou par carottage), puisque celle-ci intéresse la périphérie du pieu dont le cœur demeure normal. Ce type de défauts est peu courant.

Figure 7.4 :
Exemple d'excroissance
au niveau du fût du pieu



Figure 7.5 : Exemples d'inclusion de fluide stabilisateur au sein du pieu



Défaut de bétonnage d'une barrette
(présence de poches de fluide stabilisateur)

Inclusions de fluide stabilisateur ou de sol
vues lors du carottage

Figure 7.6 : Délavage du béton dû à des circulations d'eau



Figure 7.7 : Exemple de défaut d'alignement



Figure 7.8 : Exemple de fracture (coupure totale) vue lors du carottage



Figure 7.9 : Enrobage insuffisant des armatures en raison d'un béton insuffisamment ouvrable



Conséquences des défauts du fût

Les conséquences peuvent être les suivantes :

- **des excroissances**, à part dans le cas de frottements négatifs⁽³⁾, qui ne compromettent pas, en principe, la portance ;
- **certaines inclusions limitées de fluide stabilisateur**, qui ne devraient pas en principe modifier la portance sous réserve de vérification par le calcul ;
- **des strictions ou défauts d'enrobage du pieu** sont plus gênants, car ils entraînent à la fois une réduction de la section du pieu et potentiellement la perte à terme des aciers insuffisamment enrobés ou en contact direct avec le sol. Il convient d'en tenir compte pour l'évaluation de la résistance résiduelle de chaque section de béton en appliquant l'enrobage théorique spécifié dans l'Eurocode 2 ;
- **des défauts mineurs d'alignement** du pieu ne sont généralement pas rédhibitoires dans la mesure où les tolérances d'exécution doivent être prises en compte dès la phase de conception ;
- **des rétrécissements, des poches importantes de fluide stabilisateur** (Figure 7.5), **des délavages** (Figure 7.6), **des défauts d'alignement** (Figure 7.7), et à fortiori **des coupures totales** (Figure 7.8) constituent des défauts d'autant plus graves que le nombre de pieux est faible et l'appui lourdement chargé.

Réparations préconisées en cas de défaut du fût

Généralement les réparations des fûts se révèlent beaucoup plus complexes que celles de la pointe, et d'un point de vue économique, tributaires des dimensions du pieu, il peut être décidé de :

- **réparer le pieu** (cf. chapitre 4 « Les différents modes de réparation »), il s'agit souvent du cas des pieux de gros diamètres ;
- **réaliser de nouvelles fondations**, généralement en cas de pieux de petits diamètres (≤ 800 mm) avec une répartition d'un ou plusieurs pieux à proximité.

Le choix doit être pris en toute connaissance de cause. Le chapitre 3 « Opportunité de la réparation du pieu » évoque cette phase de prise de décision.

2.3 - LES DÉFAUTS DE LA PARTIE HAUTE DU PIEU

Les défauts de la partie haute du pieu

Principalement quatre cas de défauts peuvent être répertoriés :

- **une arase de bétonnage trop basse** suite à une baisse du niveau de béton survenant après la fin du bétonnage ;
- **des inclusions de fluide stabilisateur, de sédiments et un béton de mauvaise qualité** en raison d'une carence ou d'une insuffisance de purge par débordement en fin de bétonnage, ce qui constitue le défaut d'exécution le plus fréquent ;
- **un mauvais enrobage des armatures** pouvant compromettre la pérennité de la fondation (Figure 7.9 dans le § 2.2) ;
- **un défaut de centrage de la cage d'armature en tête** (Figure 7.10).

Dans le cas de **pieux chemisés en tête**, un vide annulaire est inévitable entre le fût et la paroi du forage. Si les pieux doivent reprendre des efforts horizontaux, cet espace annulaire doit être rempli gravitairement ou, mieux, injecté, dans la mesure du possible (cf. § 5.2.2 « Les tubes récupérés ou perdus » du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») sous peine de défaut, sinon la conception de ces fondations sensées reprendre des efforts horizontaux est à revoir.

3. En effet, l'excroissance amplifie le frottement négatif.

Figure 7.10 : Défaut de centrage d'une cage d'armature en tête



Les réparations préconisées pour les défauts en partie haute du pieu

Les réparations les plus courantes sont la suppression de la partie défectueuse du fût, puis son remplacement par un béton sain.

La suppression de la partie défectueuse peut se faire :

- par **recépage**, en cas d'inclusion ou de mauvaise qualité de béton en tête (cf. § 5.4 « Récépage des pieux forés » du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- à partir d'un **surforage** (*Note*), par exemple en cas de mauvais enrobage des armatures.

Note : le surforage consiste selon que l'on soit :

- **hors nappe**, à une excavation tout simplement autour du pieu, jusqu'à 1,30 m ou avec un blindage si plus profond ;
- **dans la nappe**, au fait de planter un tube de gros diamètre pour coiffer le pieu, puis rabattre la nappe à l'intérieur pour excaver et démolir la partie défectueuse du pieu (cf. Figure 7.27 « Enlèvement manuel de poches de béton défectueux à l'abri d'un tube provisoire » dans le § 5.6).



CHAPITRE 3

Opportunité de la réparation du pieu

3. OPPORTUNITÉ DE LA RÉPARATION DU PIEU

Ce chapitre s'intéresse **majoritairement aux défauts de fût, les autres défauts** (d'implantation, de verticalité, de positionnement de cage, de non-conformité du béton ou de la cage) font l'objet généralement d'un recalcul (cf. § 3.4 « Principes de justification par le calcul d'une fondation défectueuse ») ou d'une adaptation du projet.

3.1 - INTRODUCTION

Différenciation entre anomalie/singularité et artefact

Lorsqu'une anomalie/singularité⁽⁴⁾ est mise en évidence par les contrôles (cf. fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »), on ouvre **une fiche de non-conformité**. Il convient alors de **réaliser des investigations complémentaires permettant de vérifier si l'anomalie/la singularité détectée est imputable à :**

- un défaut du pieu ;
- un artefact de l'auscultation (Note 1) ;
- un positif provisoire (Note 2).

Note 1 : de tels artefacts sont parfois rencontrés sur chantier, notamment dans les cas où les tubes de réservation (cf. entre autres, § 5.8 « Les tubes dans le pieu » du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés » et 2.1.1.2 « Travaux accompagnant la méthode sonique par transparence » du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ») ne sont pas suffisamment adhérents au béton (cas de tubes sales ou présentant une surface grasse ou en présence d'adhésifs autour des tubes, ou encore lors du ressuage du béton provoquant des cheminements d'eau le long des tubes). ⚠ Il convient cependant, dans ces cas, de s'assurer que le défaut détecté n'est que ponctuel, qu'il ne concerne que l'adhérence « béton-tube » et qu'il n'est pas signe d'un défaut plus important.

Note 2 : parfois il peut être nécessaire de refaire l'auscultation ultérieurement pour vérifier que l'anomalie/singularité est réellement significative d'un défaut (cf. par exemple le § 3.4 « Traitement des non-conformités » du fascicule 6). Ce cas peut survenir par exemple en raison de l'hétérogénéité de la prise du béton due à la succession des différentes toupies livrant des bétons d'âges différents.

Spécificités des investigations complémentaires

Les investigations complémentaires, qui sont destinées à vérifier la présence et la gravité d'un défaut, nécessitent des techniques de reconnaissance spécifiques (recépage de la partie haute du pieu, carottage éventuellement complété par une imagerie de la paroi du forage, gammamétrie...) permettant de préciser la nature, la position et d'évaluer l'étendue du défaut dans chaque section de pieu.

Lien entre caractéristiques du défaut et opportunité de la réparation

La nature, la position et l'étendue du défaut déterminent le besoin de réparation ainsi que les techniques de réparation possibles et adaptées (cf. exemple ci-après).

L'évaluation de la gravité des défauts et de l'opportunité des réparations nécessite donc :

- d'évaluer **la nature et la position du défaut** (cf. chapitre 2 « Nature et gravité des défauts ») ;
- d'évaluer **l'étendue du défaut** (cf. § 3.3) ;
- de vérifier si le défaut remet en cause **la justification de la fondation** (cf. § 3.4 « Le contrôle des pieux finis » – Note).

Note : dans certains cas, la justification peut se faire sans vérifier l'étendue des défauts (cas d'un pieu purement flottant vis-à-vis d'un défaut de pointe, par exemple).

4. Le terme singularité est propre à la méthode sonique par transparence (cf. § 2.1.1.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

Exemple de lien entre les caractéristiques du défaut et l'opportunité de la réparation : galette d'argile en pointe

En cas de présence d'une galette d'argile en fond de pieu, **on intervient en fonction de l'étendue du défaut** :

- **si elle est faible**, on justifie la fondation par calcul ;
- **si elle est un peu plus importante** (*Note 1*), on peut injecter pour améliorer la portance de la zone avec un bon contact ;
- **si elle est importante** (*Note 2*), il est illusoire d'essayer de réparer le fond de pieu à l'aide d'une technique classique d'injection de coulis de ciment utilisant deux tubes de réservation, compte tenu :
 - des difficultés à purger l'argile sur l'ensemble de la section du pieu,
 - de l'impossibilité d'injecter les argiles ;

on se tournera alors vers une autre solution de réparation.

Note 1 : de ce fait la capacité portante se révélera insuffisante.

Note 2 : s'il s'agit d'un pieu flottant, donc travaillant peu en pointe, il est possible de réussir à justifier la fondation par le calcul.

3.2 - DÉMARCHE CONSEILLÉE – ARBRE DE DECISION

La nature du défaut conditionne pour beaucoup les techniques de réparation nécessaires et envisageables. En effet, comme présenté dans le chapitre 2 « Nature et gravité des défauts », **selon le degré de gravité, et en suivant la démarche présentée dans les Diagrammes 7.1 et 7.2 lors de suspicion de défauts, il est possible de** :

- **ne pas réparer** parce que le défaut est jugé bénin et ne compromet pas la portance de la fondation ;
- **réparer le pieu** en conciliant alors l'efficacité, l'économie et la rapidité du traitement (cf. chapitre 4 « Les différents modes de réparation ») ;
- **remplacer le pieu défectueux** ou **modifier le fonctionnement structurel** de l'ouvrage lorsque la réparation n'est pas économiquement envisageable ou n'offre pas suffisamment de garanties quant à la pérennité.

Différentes situations de défauts identifiés lors de contrôles et les réparations proposées avec les résultats obtenus sont présentées dans le chapitre 5 « Exemples de réparations ».

Diagramme 7.1 : De la détection à la vérification par calcul ou levée de la non-conformité

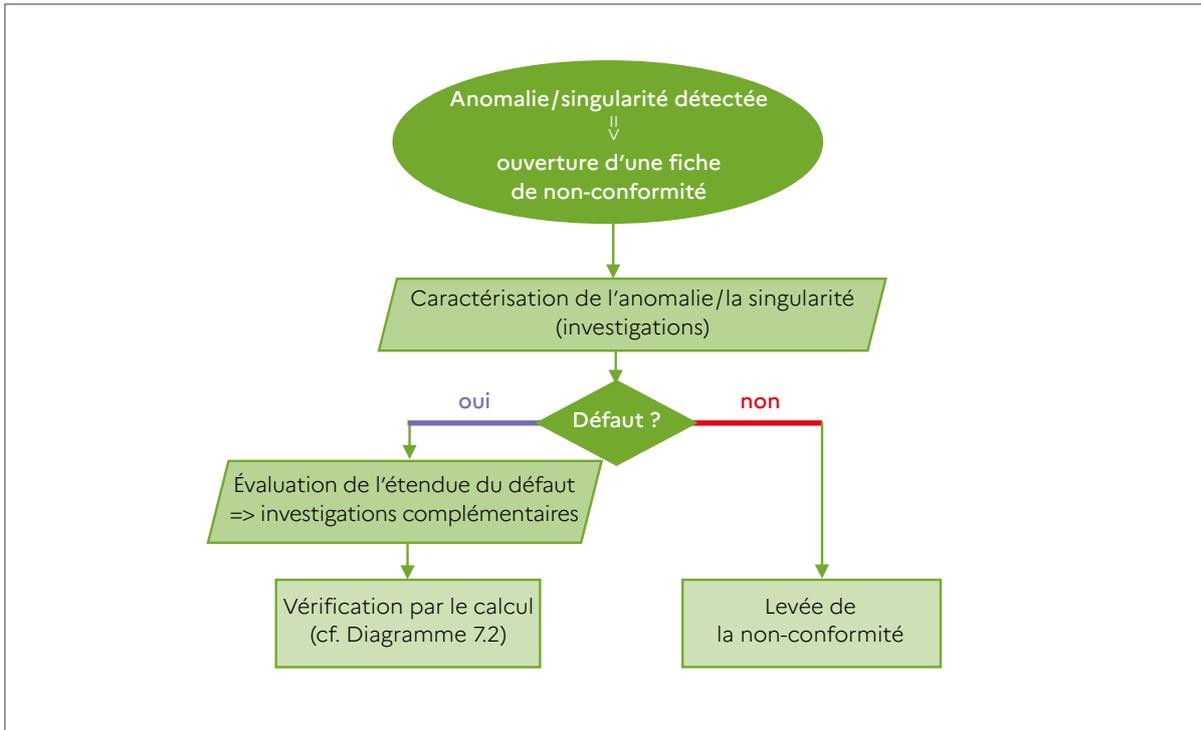
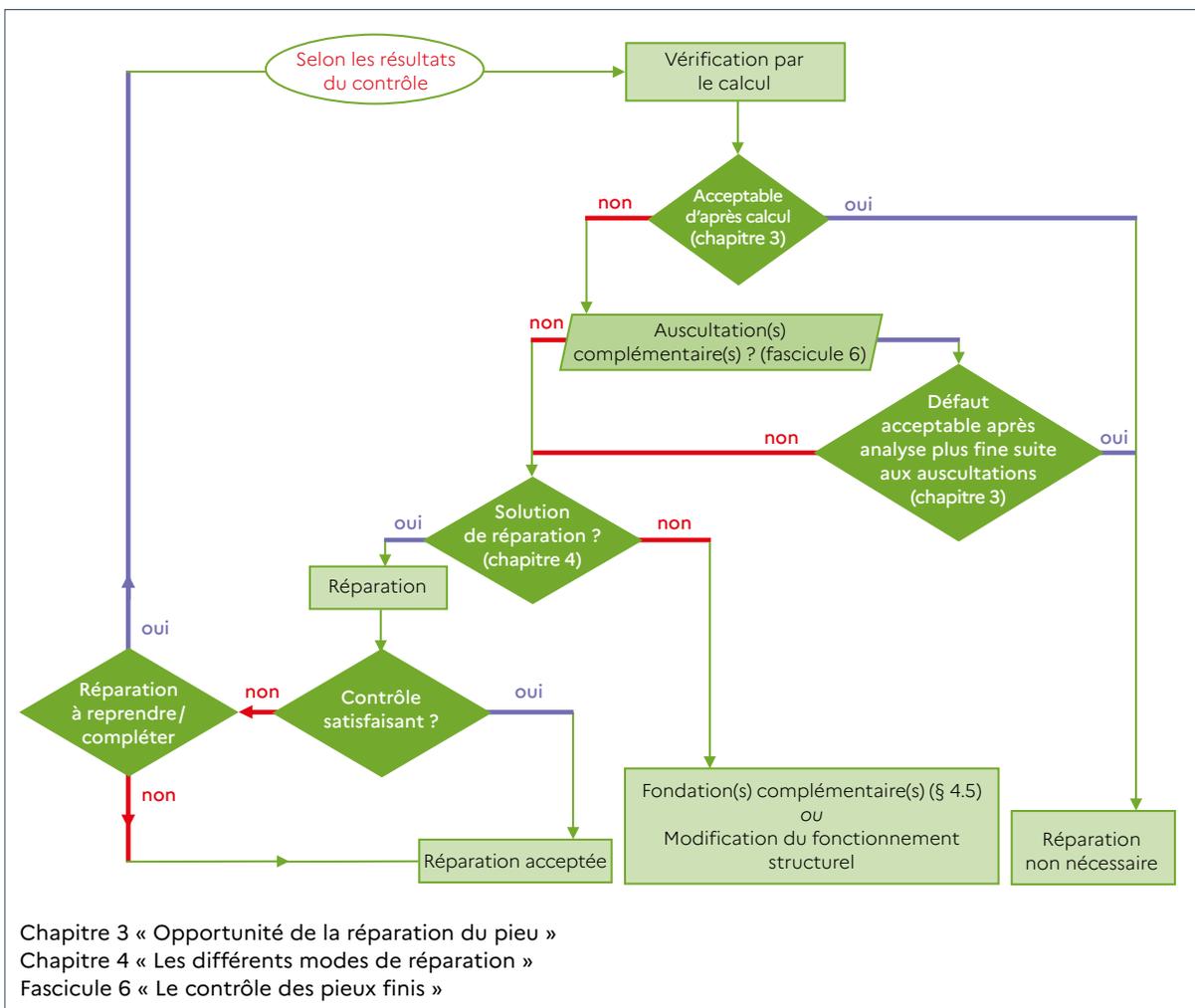


Diagramme 7.2 : De la vérification par calcul à la solution proposée



3.3 - ÉVALUATION DES ÉTENDUES DE DÉFAUTS

Une fois la nature du défaut déterminée, il convient d'estimer son importance pour chaque section de pieu concernée. Cette évaluation peut être, si nécessaire, réalisée de manière itérative comme cela est suggéré dans l'arbre de décision (cf. Diagramme 7.2 dans le § 3.2). L'évaluation des étendues de défauts devra être d'autant plus prudente que la densité de reconnaissances sera faible.

Des calculs peuvent être menés en considérant des géométries de pieux modifiées. L'évaluation de cette géométrie modifiée constitue la première étape de la réflexion.

Défauts d'enrobage ou présence de striction

Les défauts de type striction ou défaut d'enrobage sont très gênants car ils entraînent à la fois une réduction de la section du pieu et une perte d'adhérence acier-béton nuisible à l'efficacité des armatures dans le calcul de béton armé, et à terme, une corrosion des aciers insuffisamment enrobés ou en contact direct avec le sol. Il convient d'en tenir compte pour l'évaluation de la résistance résiduelle de chaque section de pieu.

Détermination de l'étendue maximale affectée par un défaut potentiel

Cette détermination s'appuie usuellement sur des auscultations par la méthode sonore en transparence (norme NF P94-160-1 et cf. § 2.1.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »), afin de circonscrire au mieux les zones potentiellement affectées (*Note*). Il convient de noter que cette évaluation est d'autant plus fine que le nombre de trajets auscultés est important (Figure 7.11). A contrario, pour des pieux équipés uniquement de deux ou trois tubes, cette démarche conduit à indiquer des étendues de défauts généralement trop importantes pour que cette méthode soit applicable telle quelle et on a souvent recours à des auscultations complémentaires réalisées depuis un forage additionnel (Figure 7.12).

Si tous les trajets d'auscultations soniques sont singuliers, une longueur de pieu réduite peut être considérée dans la partie supérieure aux singularités.

Note : le principe est de circonscrire la zone maximale potentiellement affectée par le défaut à l'aide de trajets périphériques qui ne présentent pas de singularité. Cette approche est par définition maximaliste, elle permet par conséquent de déterminer de manière prudente les étendues résiduelles résistantes. La Figure 7.11 illustre sur quelques exemples cette méthode.

Exemples de détermination de surfaces maximales potentiellement affectées (Figure 7.11)

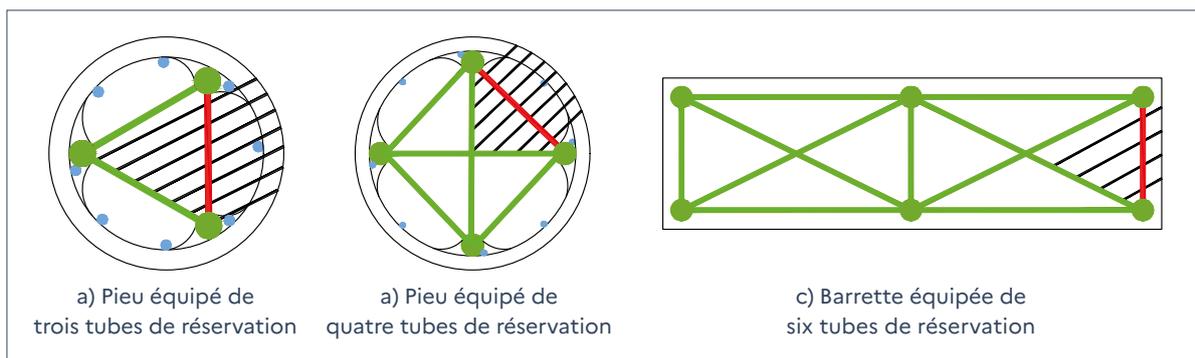
Pour un pieu équipé de trois tubes avec un trajet périphérique affecté
=> l'étendue maximale potentiellement affectée est voisine de 50 %.

Pour un pieu équipé de quatre tubes avec un trajet périphérique affecté
=> l'étendue maximale potentiellement affectée est voisine 25 %.

Pour une barrette équipée de six tubes avec un trajet périphérique affecté
=> l'étendue maximale potentiellement affectée est voisine de 10 %.

Figure 7.11 : Détermination des étendues maximales potentiellement affectées

(en vert les trajets non singuliers et en rouge les trajets singuliers, en hachuré les zones potentielles de défauts)



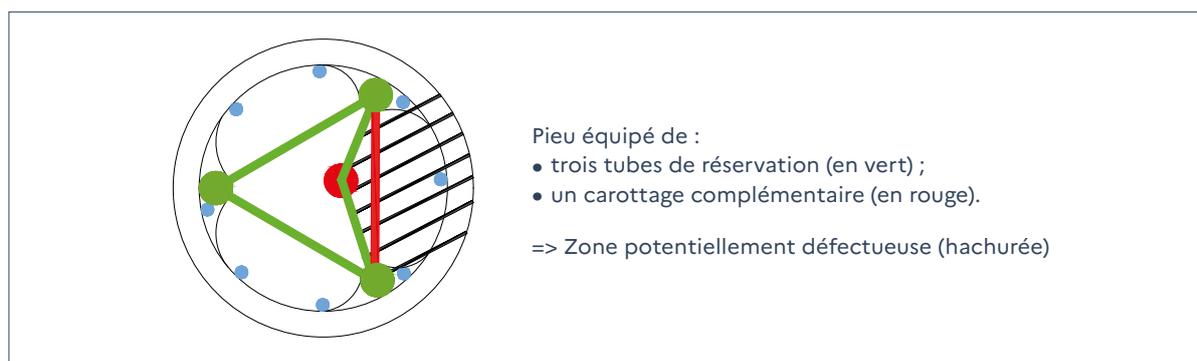
Optimisation des étendues maximales de défauts à l'aide de carottages et diagraphies complémentaires

Les Figures 7.11.a et 7.12 présentent les sections potentiellement défectueuses (zones hachurées) dans le cas d'un pieu équipé de trois tubes de réservation avec un trajet singulier selon les deux analyses possibles :

- en absence d'investigations complémentaires, la section potentiellement défectueuse est voisine de 50 % (Figure 7.11.a) ;
- le recours à des carottages complémentaires permet généralement d'optimiser et de préciser l'emprise des défauts, en augmentant le nombre de trajets auscultés. Dans l'exemple de la Figure 7.12, la réalisation d'un sondage carotté au centre du pieu permet de réaliser des cheminements complémentaires qui s'avèrent ici être non singuliers et permettent de circonscrire plus finement la section potentiellement défectueuse (section maximale défectueuse de l'ordre de 33 %).

Nota bene : Dans la mesure où les sections de carottages représentent typiquement quelques pourcents de la section des pieux (cf. § 2.2.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »), il est généralement recommandé d'associer à ces carottages des diagraphies soniques rayonnantes réalisées depuis les carottages et permettant de mieux investiguer les sections de béton potentiellement défectueuses.

Figure 7.12 : Évaluation d'une étendue potentiellement défectueuse en utilisant un carottage complémentaire



3.4 - PRINCIPES DE JUSTIFICATION PAR LE CALCUL D'UNE FONDATION DÉFECTUEUSE

Justification en absence de réparation

Il est possible de justifier des pieux présentant des défauts dans les cas suivants :

- pour les défauts concernant le fût ainsi que la tête d'un pieu, il convient de vérifier que les efforts prévus restent admissibles malgré les réductions de section de béton et d'acier induites par les défauts ou une résistance insuffisante du béton. Cela correspond typiquement aux vérifications de résistance structurale prévues par la norme NF P94-262 :
 - ainsi on vérifiera que les contraintes de compression du béton s'appliquant sur les sections de béton résiduelles sont bien admissibles (article 6.4 de la norme NF P94-262) (Note 1),
 - pour ce qui concerne les sections d'acier, la résistance des armatures doit être réduite dans les zones de corrosion (en fonction de l'agressivité du sol, de la nappe et de la durée de vie de l'ouvrage) compte tenu de l'absence de protection vis-à-vis de la corrosion,
 - il convient par ailleurs de tenir compte de l'excentrement de la section de pieux résiduelle ainsi que des pertes d'inertie induites pour la justification des efforts de flexion ;

- au niveau de la **résistance en pointe**, il convient de s'assurer :
 - d'une résistance suffisante en compression du béton, par exemple lorsque le béton est de mauvaise qualité en pointe (béton partiellement délavé ou présentant une résistance moindre) (*Note 2*),
 - de la portance mobilisable en pointe et de la qualité du contact béton-sol, par exemple dans le cas d'une inclusion de sol ou de fluide stabilisateur ou d'un remaniement des sols en fond de forage (*Note 3*).

Note 1 : la valeur caractéristique de la résistance du béton en compression peut être réévaluée à partir d'échantillons prélevés par carottage. Il sera cependant nécessaire de s'assurer que les prélèvements correspondent aux horizons où le béton est le plus sollicité. Par ailleurs, cette valeur caractéristique réévaluée n'est appliquée que sur la section réduite du fait des défauts constatés.

Note 2 : la difficulté est alors d'évaluer la résistance mobilisable dans le béton en fond de pieu, puisque seuls les échantillons de béton intègres pourront être testés, les échantillons de béton désagrégés étant par nature inexploitable pour la détermination de la résistance. Il convient dans ce cas d'évaluer de manière sécuritaire les sections de béton intègres et de procéder à la justification des sections de béton résiduelles ainsi déterminées.

Note 3 : par exemple, pour un fond de pieu présentant une inclusion de fluide stabilisateur couvrant 50 % du contact en pointe, il est illusoire de considérer le développement normal de la portance en pointe. Il conviendra d'adapter la résistance en pointe en fonction du contexte.

Justification en fondation mixte

Il est possible d'évaluer le tassement et la capacité portante de la fondation **en tenant compte de la participation de la semelle**, en plus de celle des pieux. Ce type de solution peut permettre la justification de la fondation sans avoir à recourir à un confortement massif des pieux défectueux (*Note*). Cela étant, une telle approche n'est possible que si le sol permet une mobilisation substantielle d'effort sous la semelle.

Afin de pouvoir tenir compte de la participation de la semelle, il convient d'apporter un soin particulier au nettoyage du fond de fouille, afin d'éviter d'emprisonner des résidus de fluide stabilisateur sous la semelle. Par ailleurs, cette solution n'est pas équivalente à la réparation d'un pieu défectueux, la justification en fondation mixte doit prendre en compte l'augmentation des tassements de l'appui concerné et la reprise des efforts de flexion.

La répartition des efforts entre la semelle et les pieux est fonction du contraste de comportement entre le sol sous la pointe des pieux et les sols sous la semelle. Par conséquent, il convient de vérifier que les tassements et que la répartition des charges calculées à l'aide des modules de réaction des pieux et de la semelle sont bien admissibles et que ces résultats sont robustes (c'est-à-dire toujours acquis lors d'une étude de sensibilité). Pour les ponts, la justification en fondation mixte n'est pas conseillée et de façon générale, elle est peu utilisée en France.

Note : les référentiels actuels ne comportent pas de règles de calcul des fondations mixtes.



CHAPITRE 4

Les différents modes de réparation

4. LES DIFFÉRENTS MODES DE RÉPARATION

En fonction de la localisation du défaut, de son étendue ainsi que des moyens disponibles, différentes possibilités de réparations sont envisageables :

- **l'injection** (§ 4.1 et cf. les exemples associés : § 5.1 « Injection en pointe suite à un défaut en pointe suspecte » et § 5.2 « Injection multiple du fût et de la pointe suite à la détection d'inclusion de sol ») ;
- **le scellement de barres d'acier** dans les parties saines du fût (§ 4.2 et cf. § 5.7 pour l'exemple associé) ;
- **le jet-grouting** (§ 4.3 et cf. § 5.5 pour l'exemple associé « Jet-grouting suite à la détection de singularités ») ;
- **la réparation à l'abri d'un tubage ou d'un blindage** (§ 4.4 et cf. l'exemple associé § 5.6 « Excavation et remplacement/forage suite à la détection de poches de béton délavé ») ;
- **la réalisation de fondations complémentaires** (§ 4.5 et cf. l'exemple associé § 5.3 « Micropieux périphériques suite à des singularités détectées en pointe ») ;
- **la réalisation de micropieux en pointe** (§ 4.6 et cf. l'exemple associé § 5.4 « Micropieux racine suite à la non-atteinte de la cote du projet »).

Le § 4.7 traite de la justification en cas de confortement.

4.1 - L'INJECTION

Dans la pratique, l'injection est **la technique de réparation la plus couramment utilisée**, car elle peut être rapidement mise en œuvre pour le fond de pieu en utilisant les tubes de réservation (*Note* – Figure 7.13) et pour le fût en utilisant les forages de contrôle (Figure 7.14).

Note : principalement le tube 102/114 mm réservé pour le carottage ou ceux perforés pour les tubes 50/60 mm, à choisir en fonction de l'emprise et de la position des défauts.

Domaines d'utilisation de l'injection

La technique de l'injection (exemples § 5.1 et § 5.2, respectivement « Injection en pointe suite à un défaut en pointe suspecte » et « Injection multiple du fût et de la pointe suite à la détection d'inclusion de sol ») peut être utilisée :

- **en présence de poches de granulats sans fines** en raison d'un délavage de béton par des circulations d'eau ou de ségrégation de béton ;
- **en présence d'une poche de sable ou de sols peu cohérents** dans le fût du pieu ;
- **pour l'amélioration du sol en place** (injection en pointe du pieu) ;
- **pour l'amélioration du contact béton substratum** (injection en pointe du pieu).

Les produits d'injection

Le **coulis** doit être homogène (utilisation de malaxeurs à haute turbulence) et doit faire l'objet de contrôles de densité, de viscosité et de décantation en début de chaque poste.

En fonction de l'objet de l'injection, les exigences sont les suivantes :

- **pour combler des vides ou régénérer un béton très délavé**, le coulis présente en règle générale un fort dosage en ciment ($E/C^{(5)} \leq 0,5$) (*Note*) ;
- **pour consolider des pointes**, des dosages plus faibles peuvent être utilisés, notamment avec ajout en faible quantité de bentonite, de manière à obtenir un coulis plus fluide permettant un meilleur rayon d'action. La fluidité du coulis d'injection doit être choisie au regard de la nature du sol en pointe (*Note*).

Note : il convient de s'assurer de la compatibilité du ciment utilisé avec les conditions d'agressivité du milieu.

5. Rapport massique avec C pour le ciment et E pour l'eau.

Les conduits d'injection

Pour une bonne injection, il convient d'avoir dans la zone à traiter deux forages (*Note* – Figure 7.14) ou encore le ou les trous de carottage ayant permis d'identifier le défaut (sous réserve d'un diamètre admissible) ; un pour injecter, le second servant d'évent (éventuellement muni d'un manomètre pour mesurer la pression). Préalablement, il est nécessaire de bien faire circuler de l'eau entre les deux forages (jusqu'à obtention d'une eau claire), de manière à bien nettoyer la « poche » constituant le défaut.

Note : lorsque le défaut est en pointe, il est possible d'utiliser tous les tubes de réservation pour l'injection. Un forage de diamètre adapté peut être réalisé dans chaque tube pour en déboucher le fond (Figure 7.13) et accéder au défaut en le traversant jusqu'à la base du pieu. Les opérations de lavage et d'injection peuvent alors être réalisées à l'aide d'obturateurs simples permettant la mise en œuvre d'eau sous pression (pour le lavage) suivant les différents chemins possibles, puis la mise en œuvre de coulis (pour la réparation), toujours suivant les différents chemins possibles, afin de s'assurer du bon remplissage du défaut nettoyé.

Figure 7.13 : Injection de pointe avec utilisation d'obturateurs en pied

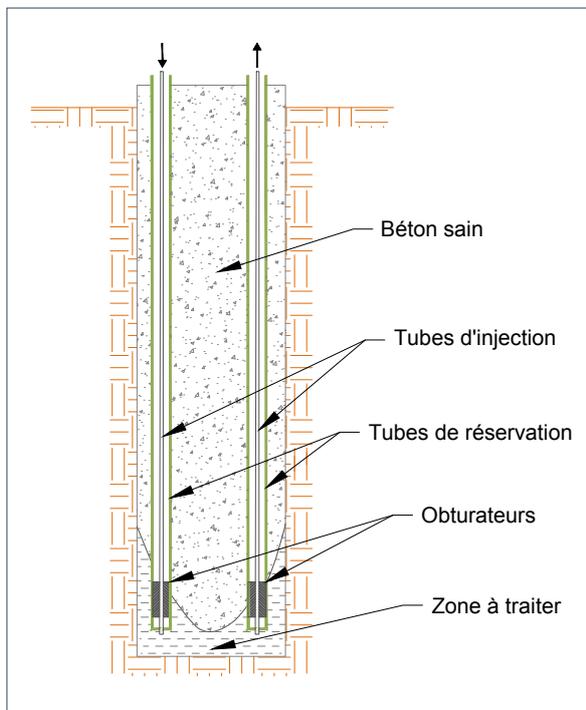
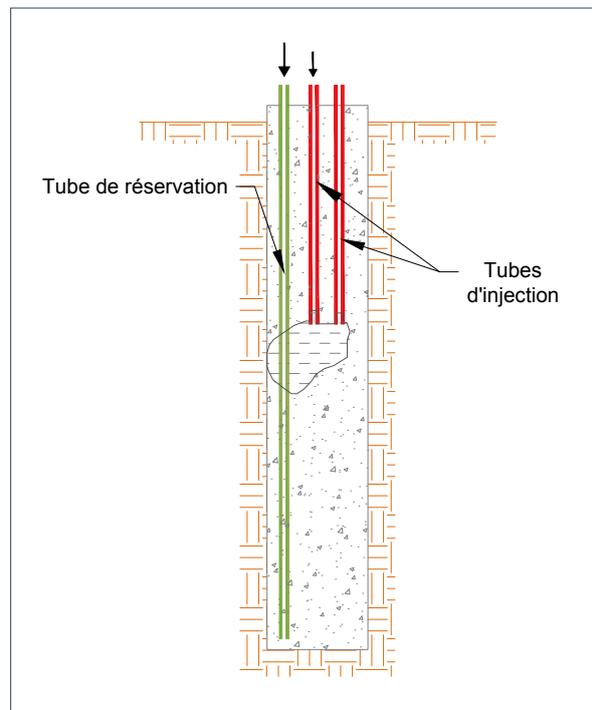


Figure 7.14 : Injection d'une cavité du fût



Les points d'injection

Les conduits peuvent être équipés d'obturateurs (Figure 7.15).

Au sein du fût, l'injection doit se faire jusqu'au niveau de l'anomalie, plus 100 mm de part et d'autre.

Figure 7.15 : Exemple d'obturateur simple



Les opérations préalables avant injection

Il convient de **nettoyer les tubes de réservation et les zones à traiter** à l'eau émulsionnée à l'air comprimé jusqu'à résurgence d'eau claire, au moyen de flexibles rigides jusqu'à la zone à traiter, sauf en pointe en cas de sols pulvérulents (risque d'affouillement) ; le nettoyage sera alors effectué en circuit ouvert sous faible pression (300 à 500 kPa⁽⁶⁾) sans certitude d'efficacité.

La pression d'injection

L'injection de coulis est réalisée à l'aide d'une pompe (Figure 7.16) et sa pression varie en fonction de la nature du défaut :

- pour combler les vides : de l'ordre de quelques centaines de kilopascals⁽⁷⁾ ;
- pour régénérer du béton délavé : de l'ordre de plusieurs mégapascals (2 à 3)⁽⁸⁾ afin de pénétrer et de « serrer au maximum » tout en limitant les claquages et les résurgences, et sans provoquer de mouvements de terrains en surface ou de soulèvement du pieu. Il faut adapter la pression d'injection à la perméabilité du terrain et à la résistance du sol environnant ;
- pour l'amélioration du sol en pointe : elle doit être adaptée à l'objectif et à la qualité du sol encaissant.

Figure 7.16 : Exemples de pompe d'injection



Les conditions d'arrêt et de reprise de l'injection

L'injection doit être arrêtée immédiatement en cas :

- de résurgence de coulis par le trou d'évent, à la périphérie de la fondation ou sur d'autres pieux par exemple ;
- de volume injecté trop important.

Un complément d'injection pourra être réalisé une fois que le premier coulis aura fait prise.

Contrôle de la réparation par injection

Il est important de contrôler l'efficacité de l'injection après réalisation. Le simple constat de la circulation du coulis par les événements ou le suivi des pressions et/ou des volumes injectés ne permet pas de garantir que l'injection ait été efficace.

6. Soit 3 à 5 bars.

7. Soit quelques bars.

8. Soit 20 à 30 bars.

Un **contrôle par auscultation sonore** (*Note*) peut être effectué, soit parce que l'on a pris soin de disposer des obturateurs avant l'injection pour réparer la pointe, soit après nettoyage des tubes de réservation (rapidement après l'injection) ou encore après réalésage, s'ils ont servi à l'injection.

Ce contrôle peut être complété de **carottages** assortis éventuellement d'un **passage de caméra**.

Le **volume injecté** sera contrôlé, reporté sur la **fiche d'injection** et comparé au volume de comblement préestimé.

Note : attention à la différence de signature sonore entre le coulis et le béton (du fait de la différence de nature et d'âge).

Limites de la méthode de réparation par injection

La méthode par injection est déconseillée :

- dans le cas de sols pulvérulents présents en pointe et de circulation d'eau, en raison des risques d'affouillement (*Note*) ;
- dans les sols cohérents (argiles, marnes...) en cas d'inclusions dans le fût du pieu, en raison de la difficulté de nettoyer la poche de sols présente dans le pieu.

Note : il convient de s'orienter vers un autre mode de réparation d'amélioration du sol par injection à des pressions plus importantes ou jet-grouting (cf. § 4.3 « Le jet-grouting » et l'exemple § 5.5 « Jet-grouting suite à la détection de singularités »).

4.2 - LE SCELLEMENT DE BARRES D'ACIER DANS LES PARTIES SAINES DU FÛT

Domaine d'utilisation du scellement de barres d'acier

Le scellement de barres d'acier (exemple § 5.7) consiste à « ponter » le défaut et à transmettre les efforts à la partie inférieure du pieu.

Mise en œuvre des barres de scellement

Les forages ayant permis d'identifier le défaut et les tubes de réservation métalliques peuvent être réutilisés à cette fin. Les barres sont mises en œuvre sur plusieurs mètres, de part et d'autre du défaut, puis scellées au coulis dans les forages. En cas de besoin, d'autres forages peuvent être réalisés et équipés.

Contrôle de la réparation par barres de scellement

Le contrôle est difficilement réalisable, la réparation doit être justifiée par le calcul.

4.3 - LE JET-GROUTING

Domaine d'utilisation de la technique du jet-grouting

Le jet-grouting, selon l'article 3.1 de la norme NF EN 12716 est un procédé de déstructuration hydraulique, de mélange et de substitution partielle d'un sol ou d'une roche tendre par un jet de fluide à haute énergie. Un liant hydraulique est incorporé dans le fluide de déstructuration et/ou sous forme de coulis lors de la substitution pour créer un élément de jet-grouting après durcissement. Cet élément est usuellement appelé « colonne ».

Le mélange sol-ciment, ainsi réalisé, constitue un volume de sol traité ayant des caractéristiques mécaniques élevées.

Un ensemble de volumes réalisés successivement et partiellement ou totalement imbriqués constitue une structure de jet-grouting.

Le procédé est particulièrement efficace dans les parties les plus faibles et les moins cohérentes des matériaux sur lesquels s'exerce le jet de fluide à haute énergie.

La technique du jet-grouting peut être utilisée :

- **pour améliorer le sol en pointe** (*Note 1* – cf. l'exemple § 5.5 « Jet-grouting suite à la détection de singularités »), préférentiellement en cas de présence de sols pulvérulents où son efficacité est plus grande. Mais il peut s'agir également de nettoyer un fond de pieu qui présente un volume de sédiments important résultant par exemple d'un éboulement juste avant le début du bétonnage. On peut distinguer deux cas de figure de réparation de la pointe en fonction de l'accessibilité de la tête :
 - accessibilité encore totale, donc juste après l'exécution (Figure 7.17.a). Dans ce cas, il est possible de réaliser des colonnes de jet-grouting à partir d'un forage central (*Note 2*) dans le pieu et/ou à partir de forages verticaux le long du pieu (*Notes 3 et 4*),
 - accessibilité réduite du fait d'un ouvrage construit en tête (*Note 5* – Figure 7.17.b), les colonnes doivent alors être inclinées (*Note 6*) et de diamètre plus important que dans le premier cas ;
- **pour améliorer le frottement** (*Note 1*) **ou protéger les aciers** en réalisant un traitement périmétrique à l'aide de plusieurs forages autour d'un fût (Figure 7.18.a) (*Note 7*) ;
- **pour compenser un défaut de longueur**, en prolongeant le traitement périmétrique constitué de plusieurs forages **pour passer sous le pieu** (*Note 1*). Dans ce cas, il faut prévoir des diamètres de colonne suffisants pour remplir le dessous du pieu (Figure 7.18.b).

Note 1 : dans ce cas, l'amélioration de sol est partie prenante de la fondation.

Note 2 : les colonnes de jet-grouting ne peuvent pas être réalisées à partir des tubes de réservation pour essais soniques 50/60 qui sont trop petits pour permettre d'y descendre le train de tige nécessaire.

Note 3 : la présence de hors-profils trop importants risquant de faire dévier fortement le forage réalisé le long du fût du pieu, une attention particulière doit être portée à la détection de ces hors-profils, afin de maîtriser la position des colonnes.

Note 4 : lorsque le diamètre du pieu n'est pas trop grand par rapport aux diamètres possibles des colonnes de jet-grouting, une seule colonne centrale peut être réalisée. Dans le cas contraire, la colonne centrale est complétée par des colonnes périmétriques passant sous le pieu.

Note 5 : lorsque le pieu à réparer est en charge à cause d'une superstructure partiellement ou totalement construite, le phasage de réalisation du confortement par jet-grouting doit prendre en compte la perte de portance occasionnée par la réalisation d'une colonne qui est nécessairement liquide avant la prise et qui peut ne pas avoir les caractéristiques nécessaires avant la montée en résistance du mélange sol-ciment.

Note 6 : lors de la réalisation de colonnes de jet-grouting inclinées, il faut faire attention à la tolérance de déviation. Celle-ci, plus importante que pour les colonnes verticales, doit être prise en compte dans le projet de réparation (mesure des déviations et adaptation des diamètres de colonnes ou choix de diamètres de colonnes plus importants).

Note 7 : cette technique de réparation n'est pas applicable à proximité de la plateforme de travail ou si le pieu est chargé.

Contrôle de la réparation par jet-grouting

Le contrôle de la réparation peut être réalisé de manière indirecte (*Note*) :

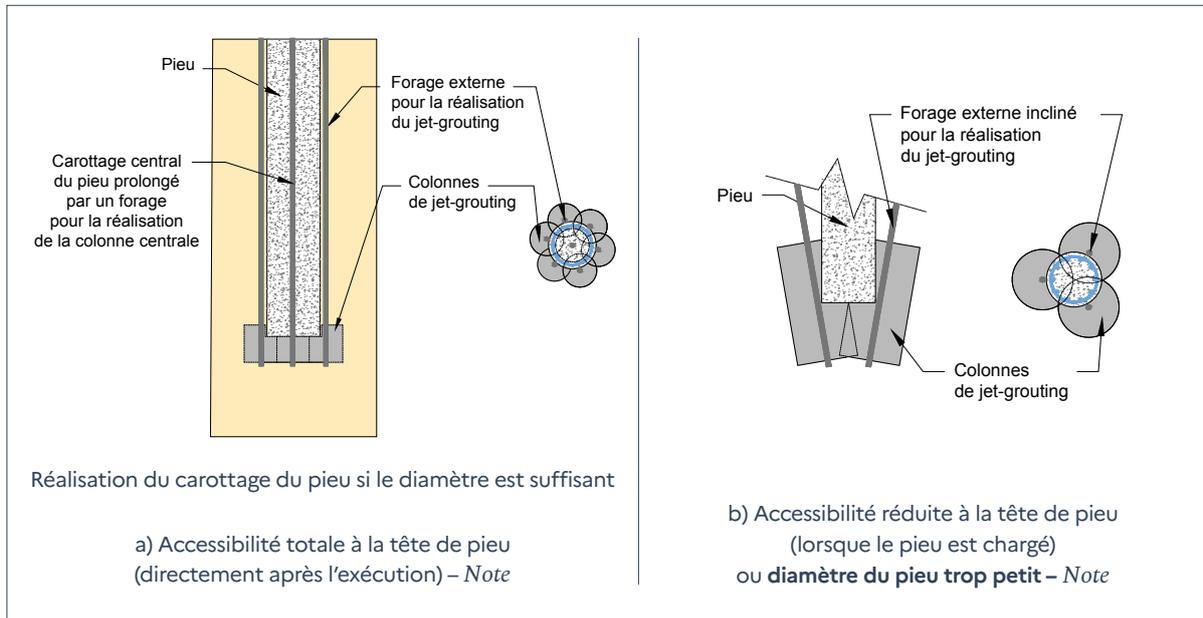
- **à partir des paramètres d'injection, de la qualité du coulis et des volumes injectés.** Le contrôle est alors indirect, ces paramètres permettent de vérifier la bonne mise en œuvre du jet-grouting ;
- **en réalisant des nouvelles auscultations** (carottages) en cas de recours au jet-grouting pour améliorer la capacité portante (pointe et/ou frottement).

Le recours à **un essai de chargement** (cf. § 2.3 « Essais de chargement de pieux » du fascicule 6 « Le contrôle des pieux forés ») pour vérifier la réparation au jet-grouting est relativement rare (parfois impossible à réaliser) et doit se faire en considérant la catégorie géotechnique de l'ouvrage (selon la **section 2 de la norme NF EN 1997-1**) et le fonctionnement de la structure portée (degré d'hyperstaticité, sensibilité aux tassements différentiels...).

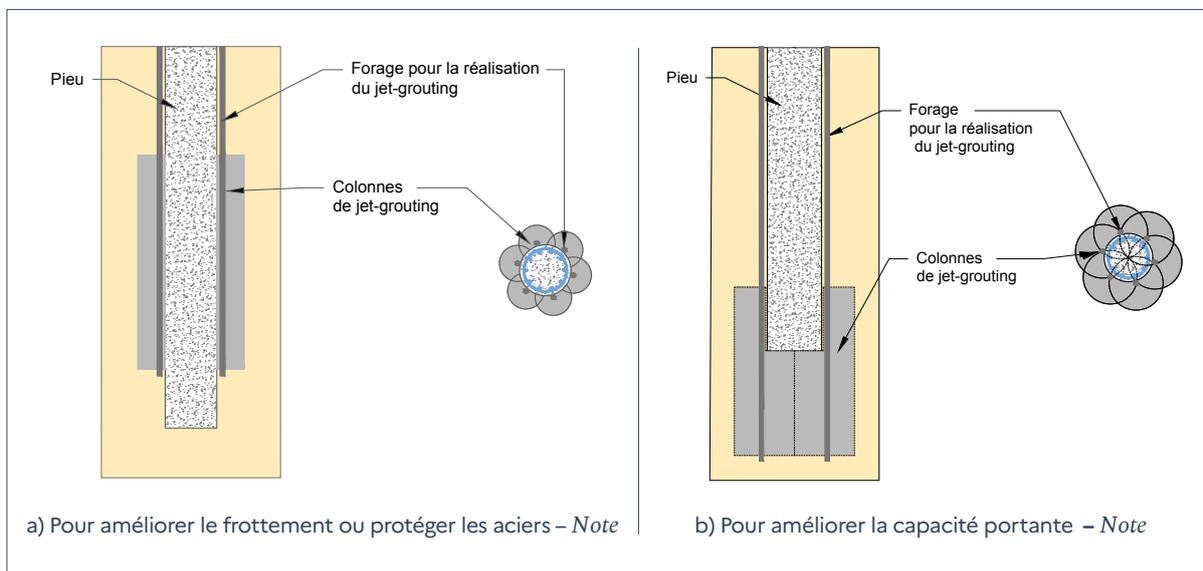
Note : l'attention doit être attirée sur le fait que le calcul des structures géotechniques issues de cette technique n'est pas décrit par les normes actuelles.

Figure 7.17 : Schéma de principe pour la mise en œuvre du jet-grouting pour améliorer le sol sous la pointe

(*Note* : les intersections des colonnes entre elles et avec le pieu à réparer ne sont pas significatives ; elles dépendent de l'ordre de réalisation des colonnes)

**Figure 7.18 : Schéma de principe pour la mise en œuvre du jet-grouting à la périphérie du pieu**

(*Note* : les intersections des colonnes entre elles et avec le pieu à réparer ne sont pas significatives ; elles dépendent de l'ordre de réalisation des colonnes)



4.4 - RÉPARATION À L'ABRI D'UN TUBAGE OU D'UN BLINDAGE

Domaine d'utilisation de réparation à l'abri d'un tubage ou d'un blindage

Dans le cas de défauts à faible profondeur, les parties du fût endommagées peuvent être dégagées à l'abri d'un tubage ou d'un blindage, puis démolies manuellement, tout en conservant les armatures, et enfin, une fois le béton de mauvaise qualité purgé, on peut entreprendre le bétonnage des zones nettoyées (cf. l'exemple § 5.6 « Excavation et remplacement/forage suite à la détection de poches de béton délavé »).

4.5 - RÉALISATION DE FONDATIONS ADDITIONNELLES

Domaine d'utilisation de la réalisation de fondations additionnelles

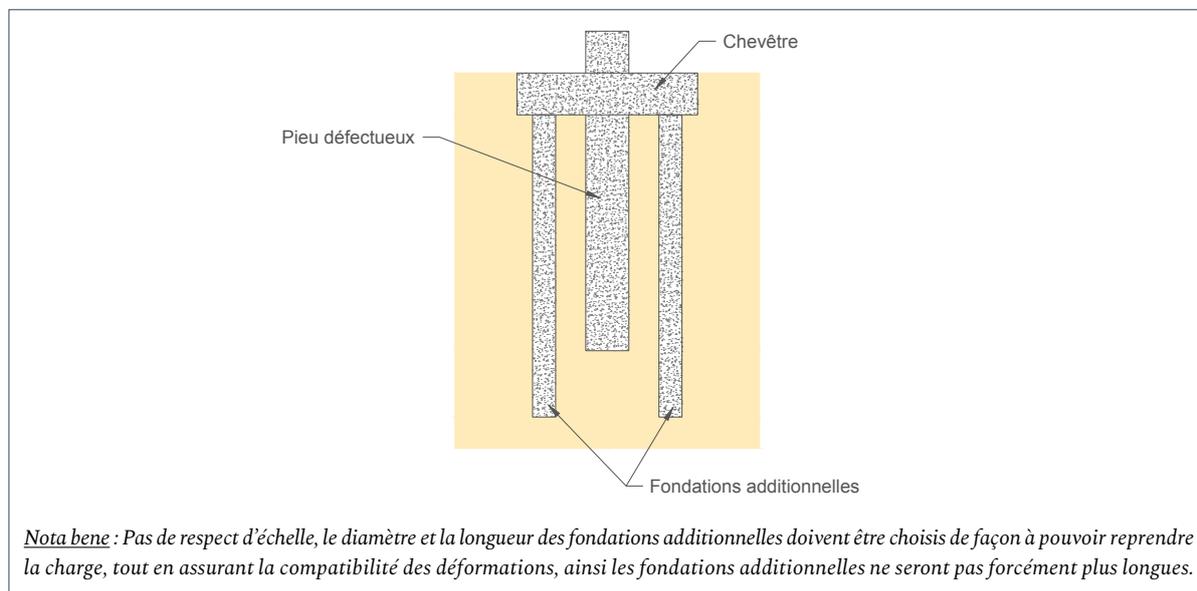
En cas de **défaut important**, la solution la plus rationnelle peut s'avérer être :

- la réalisation d'une ou de plusieurs fondations additionnelles (pieux ou micropieux) de part et d'autre ou autour du pieu à remplacer ou à compléter (Figure 7.19), si la place est suffisante (*Note*) ;
- la réalisation de micropieux en pointe (cf. § 4.6 « Micropieux en pointe (micropieux racines) »), en cas de défauts d'ancrage notamment. Cette technique peut aussi être employée sur les pieux sains voisins pour augmenter la portance totale d'une file de pieux par exemple, et ne pas réparer le pieu présentant un défaut, en variante à la réparation du défaut.

Ces deux solutions doivent être validées par le recalcul.

Note : utilisant un chevêtre pour associer les fondations additionnelles et la fondation existante (sauf si elle est enlevée car trop endommagée), cette conception doit tenir compte de la compatibilité des déformations.

Figure 7.19 : Exemple de schéma de principe pour la mise en œuvre de fondations additionnelles en périphérie du pieu à remplacer ou à compléter (inspiré de [7.1])



Contrôle de la réparation par des fondations additionnelles

Les nouveaux pieux seront soumis, comme toutes fondations profondes, aux contrôles classiques d'exécution. La réparation doit être justifiée par le calcul.

4.6 - MICROPIEUX EN POINTE (MICROPIEUX RACINES)

Domaine d'utilisation des micropieux racines

Cette technique (cf. exemple § 5.4 « Micropieux racines suite à la non-atteinte de la cote du projet ») consiste à réaliser, au travers du pieu, **des micropieux ancrés sous la base du pieu** et scellés dans le fût du pieu, afin de pallier un défaut de pointe et d'améliorer l'ancrage du pieu.

Mise en œuvre des micropieux

Les micropieux peuvent être réalisés à partir :

- des forages ayant permis d'identifier le défaut, en prolongeant leur profondeur par forage ;
- de forages au carottier ou marteau fond de trou au sein du pieu ;

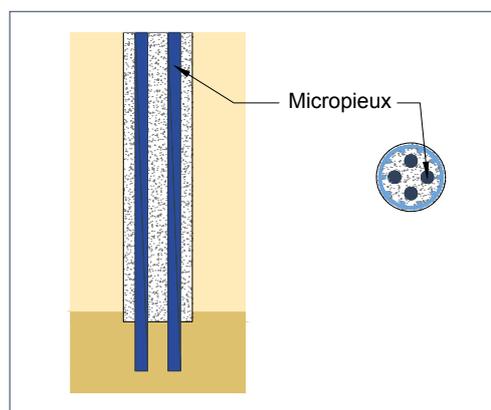
puis un tube peut être scellé avant d'être comblé au coulis (Figure 7.20). Une barre complémentaire peut être elle-même scellée dans le tube afin d'augmenter la résistance structurale du micropieu.

Compte tenu du faible volume disponible et de l'éventuelle présence des cages d'armature, des micropieux de faible diamètre seront à privilégier.

Contrôle de la réparation par des micropieux en pointe

Dans la mesure du possible, des essais d'arrachement ou de chargement des micropieux pourront être réalisés. Compte tenu de la difficulté de réalisation d'essais représentatifs, il est préférable d'opter pour une validation de la réparation par le calcul.

Figure 7.20 : Schéma de principe pour la mise en place de micropieux racines (inspiré de [71])



4.7 - JUSTIFICATION EN CAS DE CONFORTEMENT

Diverses techniques permettent de conforter des pieux défectueux. Les justifications à produire sont généralement fonction du type de réparation. Nous donnons ci-après **quelques principes de justification pour des techniques usuelles** :

- **injection au coulis d'inclusions dans le fût** (cf. § 4.1 « L'injection ») : il faut vérifier que les contraintes de compression du béton (le cas échéant du coulis ou du mortier) s'appliquant sur les sections réparées sont bien admissibles (article 6.4 de la norme NF P94-262). En résumé, la résistance en compression du coulis est au moins égale à la résistance de calcul du béton du pieu ;
- **réparation par scellement de barres dans le fût** (cf. § 4.2 « Le scellement de barres d'acier dans les parties saines du fût ») : le principe est ici de substituer une section défectueuse de béton ou de renforcer une section insuffisante de béton en intégrant une section d'acier permettant la reprise de contraintes en compression et en traction bien supérieures à celles du béton sain (la résistance en traction des aciers étant généralement supérieure à 250 MPa). Un changement du comportement structural du pieu est possible (prise en compte de la résistance des barres, section d'acier différente). Il faut vérifier que le renforcement permet un gain suffisant de résistance structurale, afin de respecter les exigences de la norme NF P94-262 ;
- **réparation par pieux additionnels situés en périphérie de pieux** (cf. § 4.5 « Réalisation de fondations additionnelles ») : il convient dans ce cas de s'assurer du bon transfert des efforts sur les pieux additionnels et de la portance de l'ensemble en intégrant, le cas échéant, les effets de groupe. Pour des pieux additionnels de géométrie ou d'inertie différente des pieux originels, il convient de vérifier que les tassements et que la répartition des charges calculées à l'aide de modules de réaction (adaptés à chaque type de pieux) sont bien admissibles ;
- **réparation par micropieux réalisés en pointe** (cas de pieux présentant un défaut en pointe) (cf. § 4.6 « Micropieux en pointe (micropieux racines) ») : il convient notamment de vérifier l'absence de flambe ment des micropieux en pointe, le bon encastrement des micropieux à la pointe des pieux. La portance additionnelle est évaluée en négligeant la pointe du pieu défectueux et en intégrant le frottement latéral mobilisé sur les micropieux racines sans omettre bien entendu les éventuels effets de groupe.

Dans le cas d'une réparation de type confortement, la réparation envisagée doit faire l'objet d'un dimensionnement et d'une procédure d'exécution qui doivent être **soumis au maître d'œuvre et d'ouvrage pour décision avant réalisation**.

Les méthodes de justification de la réparation devront être basées sur **les textes et normes de calcul en vigueur**.



CHAPITRE 5

Exemples de réparation

5. EXEMPLES DE RÉPARATION

Ci-dessous sont présentés quelques exemples de détection de défauts suite à des contrôles avec des solutions de réparation ayant donné satisfaction.

5.1 - INJECTION EN POINTE SUITE À UN DÉFAUT EN POINTE SUSPECTÉ

Type d'ouvrage / situation	Fondation culée d'ouvrage d'art
Pieu(x)	
Type	Pieux forés tubés (tube récupéré).
Géométrie	Ø 1 000 mm.
Lithologie	Argile sur marne – Ancrage dans les marnes.
Remarques	Pieux travaillant essentiellement en pointe => la qualité du contact béton-fond de forage est primordiale.
Contrôle 1	
Type	Auscultations par transparence (soniques) et/ou par impédance.
Résultats	Défaut en pointe de pieu suspecté.
Contrôle 2	
Type	Carottage.
Résultats	Confirmation du défaut en pointe de pieu.
Interprétation	Choix de réaliser une réparation par injection en pointe.
Réparation suite au contrôle 2	
Opérations préalables	<ul style="list-style-type: none"> • Prolongement en destructif de l'ensemble des tubes d'auscultation ; • Nettoyage des tubes de réservation et/ou des forages à l'eau, jusqu'à obtention d'une eau de résurgence claire ; • Injection à l'obturateur simple de l'anomalie avec de l'eau jusqu'à résurgence ; d'eau claire par le trou d'évent. La pression est maintenue par la fermeture des vannes.
Préparation du coulis	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un malaxeur à haute turbulence nécessaire ; • Fabrication du coulis selon les prescriptions définies (eau, ciment) par rapport aux forages à traiter (100 kg de ciment (*) pour une gâchée d'eau (50 l) – $E/C^{(9)} = 0,5$ avec une tolérance : 0,43 à 0,55) ; • Étalonnage des constituants par gâchage pour chaque coulis en début de chantier ; • Malaxage du mélange jusqu'à obtention d'un coulis homogène et contrôle de la densité, de la viscosité et de la décantation en début de chaque poste (balance Baroïd, cône d'écoulement ajustage de 4,75 mm, trois éprouvettes) ; • Déversement du coulis dans le bac de reprise, ce dernier étant relié à la presse d'injection. <p>(*) Le type de ciment est à adapter en fonction de l'environnement chimique du pieu.</p>

9. Rapport massique avec E pour l'eau et C pour le ciment.

Mise en œuvre de l'injection	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de l'obturateur à 0,50 m au-dessus de l'anomalie sur ordre du centraliste ; • Mise en pression de l'obturateur par gonflement de celui-ci pour isoler la partie à injecter ; • Injection à l'obturateur simple de l'anomalie avec un coulis de ciment par le trou principal ; • Fermeture du trou d'évent lors de l'apparition de résurgence par ce dernier ; • Injection jusqu'à obtention d'une pression d'injection comprise entre 200 et 800 kPa⁽¹⁰⁾ ; consignes d'injection : pression maximum = 1 200 kPa ; • Réalisation de compléments d'injection autant que nécessaire si la pression chute à moins de 200 kPa ; • Maintien de la pression pendant 180 minutes. <p>Après prise, nettoyage des tubes soniques ou carottage jusqu'à la zone d'injection, en vue du contrôle.</p>
Contrôle de l'efficacité de la réparation	<ul style="list-style-type: none"> • Auscultations soniques et/ou impédance ; • Confirmation par carottage si nécessaire et passage caméra.
Dernière étape	Remplissage gravitaire final des tubes d'auscultation sonique.

5.2 - INJECTION MULTIPLE DU FÛT ET DE LA POINTE SUITE À LA DETECTION D'INCLUSION DE SOL

Type d'ouvrage / situation	Ouvrage de franchissement d'un cours d'eau
Pieu(x)	
Type	Forés tubés.
Géométrie	Ø 1 200 mm, longueur environ 25 m.
Lithologie	Pieux traversant une vingtaine de mètres de limons vasards et ancrés de 2,40 m minimum dans un substratum dur mais fracturé.
Remarques	Suite à l'analyse des documents de suivi d'exécution, constatation d'un faible encastrement du tube provisoire (entraînant un défaut de fermeture du tube de travail dans le substratum et une arrivée de limons vasards au contact du substratum), de délais très longs entre la foration et le bétonnage , et de surconsommation de béton .
Contrôle 1	
Type	Auscultations soniques réalisées par un prestataire (contrôle intérieur).
Résultats	Multiples singularités au niveau du fût et en pointe du pieu.
Contrôle 2	
Type	Investigations par carottage situé au centre du pieu (Figure 7.21).
Résultats	Reconnaissance visuelle de défauts dans le fût sur le dernier mètre de pieu ainsi qu'en pointe du pieu (inclusion de limons vasards).

¹⁰. 2 à 8 bars.

Première réparation suite au contrôle 2	
Type	Injection de coulis depuis le carottage réalisé au centre du pieu (sans exutoire), injection focalisée sur le fût.
Remarques	Procédure réalisée alors que le contrôle extérieur avait émis un avis défavorable, en raison de l'absence d'exutoire (<i>Note</i>) lors de cette opération. Par ailleurs, cette réparation néglige les défauts identifiés en fond de pieu : le pieu reste donc défectueux. <i>Note</i> : l'absence d'exutoire ne garantit pas le bon nettoyage de l'inclusion ni la bonne circulation du coulis.
Contrôle 3	
Type	Deux nouveaux carottages et nouvelles auscultations soniques réalisés depuis les carottages complémentaires et rayonnant vers les tubes de réservation initialement mis en œuvre.
Résultats	<ul style="list-style-type: none"> • Les diagraphies soniques montrent la persistance de singularités majeures sur de fortes hauteurs ; • Les carottages permettent de confirmer la persistance de défauts résiduels : inclusion textile localement (sangle ou sac ?), béton délavé et pulvérulent et inclusion de limon vasards en pointe et sur le dernier mètre du fût.
Deuxième réparation suite au contrôle 3	
Type	Injection sous pression de coulis de ciment , dosage C/E ⁽¹¹⁾ = 2.
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> • Les carottages sont descendus à 1 m minimum dans le substratum fracturé ; • Première injection : pression de 0,3 à 0,5 Mpa⁽¹²⁾ ; • Injection complémentaire : 1 Mpa⁽¹³⁾.
Mode opératoire	<ol style="list-style-type: none"> 1) Lavage des carottages à l'eau et identification des communications existant entre carottages ; 2) Colmatage des exutoires les uns après les autres lorsque la résurgence d'eau claire est constatée, puis mise en pression de l'ensemble (0,3 Mpa, soit 3 bars) pour éviter une nouvelle pollution des carottages ; 3) Injection de coulis à l'aide de tubes d'injection munis de doubles packers pour bien isoler les niveaux à traiter ; 4) Début de l'injection évent par évent jusqu'à remplissage intégral ; 5) Lavage des événements à la lance pour injection complémentaire ultérieure.
Contrôle de l'efficacité de la deuxième réparation	
Type	Auscultations soniques.
Résultats	Persistance de singularités très locales sur la partie inférieure du fût du pieu. Disparition des singularités présentes en pointe.
Interprétation	Prise en compte d'une demi-section de béton résiduel en fond de pieu dans le calcul de vérification au droit de la singularité persistante. Le terme de pointe peut être considéré compte tenu du traitement réussi du fond de pieu.

11. Rapport massique avec C pour le ciment et E pour l'eau.

12. Soit 3 à 5 bars.

13. Soit 10 bars ou 300 l.

Figure 7.21 : Photos de la carotte mettant en évidence l'inclusion de textile et l'inclusion de limon vasard en pointe de pieu (de droite à gauche : béton, limon, scories, basalte) ainsi que la présence de béton délavé sans liant



5.3 - MICROPIEUX PÉRIPHÉRIQUES SUITE À DES SINGULARITÉS DÉTECTÉES EN POINTE

Type d'ouvrage / situation	Ouvrage de franchissement sur un canal
Pieu(x)	
Type	Forés tubés.
Géométrie	Ø 1 200 mm, longueur environ 17 m.
Lithologie	Pieux traversant 2,70 m de remblais, surmontant une couche de 3,50 m de sables / galets (dits supérieurs) et partiellement une couche de presque 31 m de sables / galets (dits inférieurs).
Contrôle 1	
Type	Auscultations soniques réalisées par le contrôle extérieur.
Résultats	Singularités détectées en pointe du pieu sur les trois trajets (Figure 7.22) ; les trajets sont singuliers sur une hauteur maximale de l'ordre d'1,00 m depuis la pointe du pieu.
Première réparation suite au contrôle 1	
Type	Injection de la base du pieu à l'aide de deux forages destructifs de diamètre nominal 100 mm.
Remarques	L'injection est faite avec un tube à manchette de 1,50 m (avec manchettes réparties tous les 500 mm) muni d'un double obturateur.
Mode opératoire	<ol style="list-style-type: none"> 1) Perforation. 2) Mise en place et scellement de l'équipement d'injection. 3) Première phase d'injection : injection préalable 24 heures avant, critère arrêt pression 1 Mpa⁽¹⁴⁾; 4) Deuxième phase d'injection et de la chaussette : injection de traitement par passes de 500 mm sur les zones identifiées (coulis C/E⁽¹⁵⁾ de 2), critère d'arrêt 2-2,5 MPa⁽¹⁶⁾.

14. Soit 10 bars.

15. Rapport massique avec E pour l'eau et C pour le ciment.

16. Soit 20-25 bars.

Contrôle 2	
Type	Réalisation d'un carottage dans le pieu.
Résultats	La réalisation du carottage dans le pieu révèle l'existence de désordres (inclusions de sol) sur une hauteur de 1,50 m depuis la cote de fond de pieu.
Deuxième réparation suite au contrôle 2	
Type	Micropieux périphériques sur le pieu.
Remarques	<p>Principe de dimensionnement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reprise de la charge mobilisée par la pointe et le frottement latéral sur le dernier 1,50 m par quatre micropieux placés à l'extérieur du pieu (Figure 7.23) et ancrés en dessous de la base des pieux ; • L'ensemble des micropieux reprend des efforts de compression centrés ; • Les micropieux sont ancrés dans les sables et galets inférieurs sur une hauteur de 21 m ; • Par sécurité, seule la partie des micropieux située en dessous de la base du pieu a été prise en compte, afin de s'affranchir de tout effet de groupe ; • Vérification du non-flambement des micropieux et du comportement de l'ensemble par des calculs aux modules de réaction (Frank et Zao [7.2]). <p>Les micropieux ont les caractéristiques suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Type de micropieux</u> : type III (IGU) ; • <u>Diamètre nominal</u> : 200 mm ; • <u>Longueur</u> : 37,50 m ; • <u>Armature</u> : tube pétrolier de 38 m de long, de diamètre nominal 114,3 mm / ép 12,7 mm, de nuance N80 ; • <u>Entraxe pieu-micropieu</u> : 1,20 m (soit un décalage de 500 mm entre les deux structures).
Mode opératoire	<p>Réalisation des micropieux (Figure 7.24) à l'aide d'une tête de foration perdue de type tricône soudé en partie basse du tube pétrolier (<i>Note</i>).</p> <p><i>Note</i> : le tube pétrolier constitue à la fois le train de tige et l'armature du micropieu.</p>
Contrôle de l'efficacité de la réparation	
Type	Essais de traction sur micropieux réalisés dans le même contexte (Figure 7.24).
Résultats	Conforme.

Figure 7.22 : Illustration des trois trajets singuliers détectés sur le pieu P1 de la culée C1 de l'ouvrage

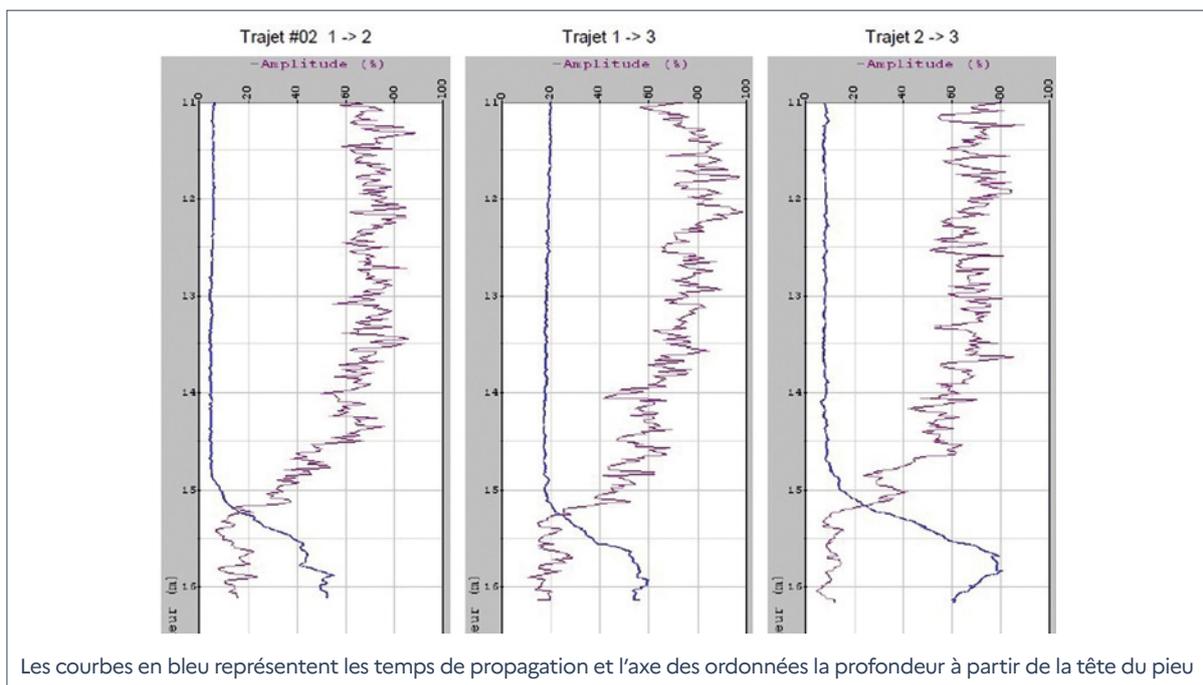


Figure 7.23 : Positionnement des micropieux par rapport au pieu défectueux

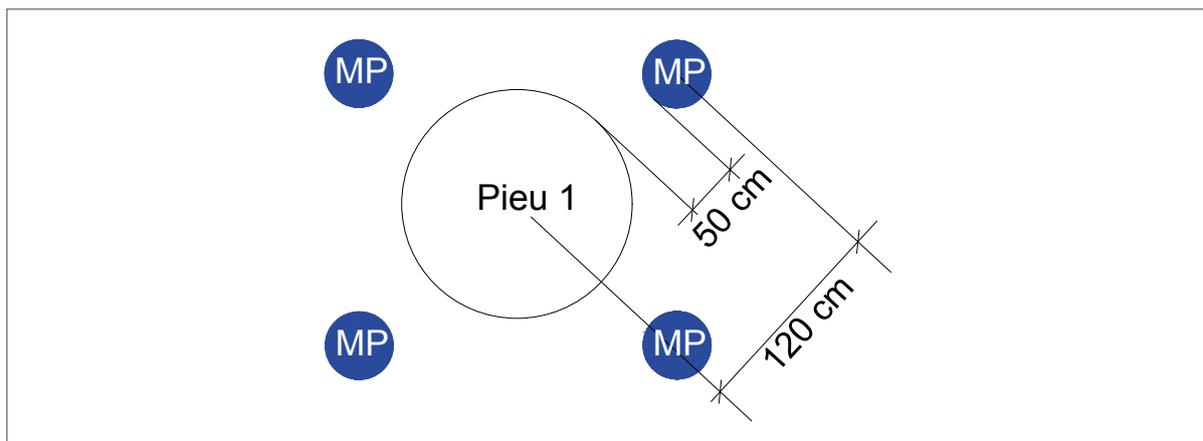


Figure 7.24 : Foration d'un micropieu et essai de traction sur un micropieu

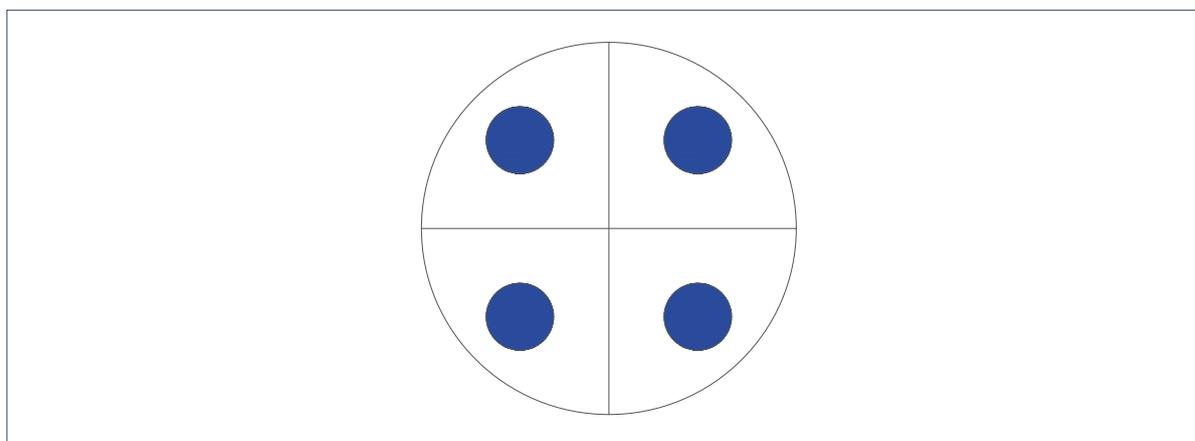


5.4 - MICROPIEUX RACINES SUITE À LA NON-ATTEINTE DE LA COTE DU PROJET

Type d'ouvrage / situation	Pont de franchissement de rivière (monotravée)
Pieu(x)	
Type	Forés tubés à tube perdu.
Géométrie	Ø 1 200 mm – profondeur projet : 20 m.
Lithologie	Succession de sols détritiques de type sable, graves plus ou moins compacts avec la présence de blocs et d'horizons compacts.
Remarques	Présence proche de structures sensibles aux phénomènes vibratoires et nécessité d'utilisation d'un moyen de foration de type trépan pour passer les horizons compacts et les blocs => suivi vibratoire mis en place.

Contrôle 1	
Type	Contrôle des vibrations lors de l'utilisation du trépan (foration des pieux).
Résultats	Dépassement des seuils en mode normal d'utilisation du trépan lors de la réalisation d'un des pieux, conduisant à l'impossibilité d'atteindre la cote projet (arrêt de la foration à 6,20 m de profondeur) => nécessité de modifier la conception de la fondation profonde pour garantir sa portance.
Réparation suite au contrôle 1	
Type	Réalisation de quatre micropieux de type III de 250 mm de diamètre et de 15 m de longueur, soit 8,8 m sous la pointe du pieu réalisé au trépan. La disposition envisagée est présentée sur la Figure 7.25. Une note de calcul est proposée et acceptée par le maître d'ouvrage.
Mode opératoire	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre des micropieux par forage au marteau fond de trou ; • Injection des micropieux suivant la procédure suivante : <ul style="list-style-type: none"> – <u>confection du coulis de gaine</u> avec un E/C⁽¹⁷⁾ = 0,43 pour un E/C théorique de 0,5, – <u>injection du coulis de gaine</u> à travers le train de tube (pas de remontée visuelle du mélange), – <u>injection du coulis dans l'espace annulaire</u> entre le tube ODEX (<i>Note</i>) et le terrain, – <u>réinjection du coulis de gaine</u> à travers le train de tube (pas de remontée visuelle du mélange) ; • Compte tenu de l'absence de remontée du mélange, une modification a été apportée à la formulation du coulis avec utilisation d'un adjuvant de type superplastifiant (adjuvant antidélavement) pour prendre en compte la présence probable de circulation d'eau ; • Après modification de la formulation du coulis, l'injection a réussi.
Contrôle de l'efficacité de la réparation	Suivi complet de la réalisation (foration et injection). Acceptation de l'injection suite au contrôle complet de l'exécution sur site.
<i>Note</i> : la méthode ODEX permet de forer et de tuber en même temps, en utilisant le couplage d'un taillant et d'un aléreur rétractable lors de la remontée de l'équipement à l'intérieur du tube descendu lors du forage et laissé en place dans le forage.	

Figure 7.25 : Disposition des micropieux envisagée



17. Rapport massique avec E pour l'eau et C pour le ciment.

5.5 - JET-GROUTING SUITE À LA DÉTECTION DE SINGULARITÉS

Type d'ouvrage / situation	Viaduc en bord de rivière
Pieu(x)	
Type	Forés tubés.
Géométrie	Ø 1 000 mm.
Lithologie	Ancrés faiblement dans un rocher peu altéré.
Remarques	Pieux travaillant essentiellement en pointe => la qualité du contact béton-fond de forage est primordiale.
Contrôle 1	
Type	Auscultations soniques.
Résultats	Singularités en base de plusieurs pieux d'une même pile.
Contrôle 2	
Type	Carottage grâce au tube de réservation (Figure 7.26).
Résultats	Mise en évidence de poches de sable coquillier et de béton délavé à la base des pieux (Figure 7.26).
Interprétation	Ces désordres semblent liés à la présence d'importantes circulations d'eau.
Réparation suite au contrôle 2	
Type	Injection par coulis sous faible pression.
Remarques	Non concluante (impossibilité de mise en pression).
Contrôle 3	
Type	Carottages au centre de chacun des pieux.
Résultats	Similaire aux carottages précédents : présence de sable avec trace de coulis.
Réparation suite au contrôle 3	
Type	Réparation des pointes par jet-grouting par le forage du carottage central sur une hauteur de 2 m, afin de sceller les pieux au rocher, après création d'un voile injecté pour limiter les circulations d'eau.
Mode opératoire	<u>Coulis</u> : ciment CEM III et dosage E/C ⁽¹⁸⁾ de 1 ; <u>Mise en œuvre du coulis</u> : par la technique du simple jet en monobuse ; <u>Critères de contrôle</u> : résistances à la compression sur éprouvettes de coulis à 7 jours : Rc _{7j} 12 MPa.
Contrôle de l'efficacité de la réparation	Impossibilité de contrôle ultérieur des interfaces pieux-jet-grouting-rocher, sous peine de nouveaux désordres liés aux importantes circulations d'eau.

Figure 7.26 : Photo d'une carotte mettant en évidence les poches de sable coquillier



18. Rapport massique avec E pour l'eau et C pour le ciment.

5.6 - EXCAVATION ET REMPLACEMENT/FORAGE SUITE À LA DÉTECTION DE POCHES DE BÉTON DÉLAVÉ

Type d'ouvrage/ situation	Viaduc en bord de rivière
Pieu(x)	
Type	Forés simples.
Géométrie	Ø 600 mm.
Lithologie	Alluvions sableuses. Ancrés dans un schiste altéré.
Mise en œuvre	Excavé à la tarière dans les sols meubles avec tube provisoire puis bucket dans le rocher altéré.
Contrôle 1	
Type	Auscultations soniques.
Résultats	Singularité en tête de l'un des pieux à 2 m de profondeur.
Contrôle 2	
Type	Carottage au centre du pieu défectueux.
Résultats	Mise en évidence d'une poche de béton délavé.
Interprétation	Les désordres semblent trouver leur origine en une variation rapide du toit du substratum au sein du pieu entraînant un forage sans tube de travail au sein des alluvions sableuses sur une partie du pieu => les eaux de la nappe phréatique ont alors délavé le béton frais sur toute la hauteur non protégée par le tube de travail provisoire.
Réparation suite au contrôle 2	
Type	Surforage.
Mode opératoire	1) Excavation depuis la plateforme jusqu'à la base des défauts du pieu à l'abri d'un tube provisoire de 2 000 mm ; 2) Enlèvement manuel des poches de béton défectueux (Figure 7.27) ; 3) Coulage de béton dans l'intégralité du tube provisoire ; 4) Enlèvement du tubage.

Figure 7.27 : Enlèvement manuel de poches de béton défectueux à l'abri d'un tube provisoire



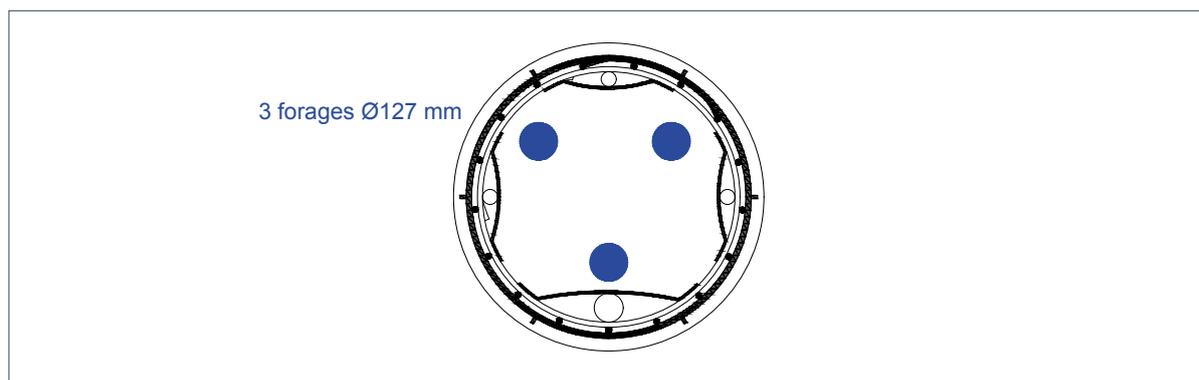
5.7 - SCCELLEMENT DE BARRES SUITE À UN DÉFAUT CONSTATÉ DANS LE FÛT DU PIEU

Type d'ouvrage/ situation	Fondation pile de viaduc
Pieu(x)	
Type	Foré tubé.
Géométrie	Ø 1 200 mm
Lithologie	Du niveau de recépage jusqu'au niveau d'ancrage : <ul style="list-style-type: none"> • limon argileux sur 5,50 m d'épaisseur ; • sables et graviers sur 1,60 m d'épaisseur ; • argiles marneuses de 0,65 m d'épaisseur ; • marnes sur 4,10 m d'épaisseur. Niveau d'eau à – 6,00 m sous le niveau de recépage.
Contrôle 1	
Type	Auscultations soniques.
Résultats	Non concluant entre 5,50 et 6,00 m de profondeur.
Contrôle 2	
Type	Réalisation de trois forages Ø 127 mm répartis à l'intérieur des cerces de la cage d'armature (Figure 7.28) : <ul style="list-style-type: none"> • 4,50 m en forage destructif Ø 127 mm ; • 2,00 m en carottage Ø 66 mm en une seule passe (carotte intacte).
Résultats	Défaut constaté dans le fût du pieu
Interprétation	Nécessité de réaliser une réparation => option choisie : injection et scellement de barres.
Réparation suite au contrôle 2	
Opérations préalables	Lavage par injection d'eau et d'air réalisée au moyen de flexibles rigides descendus au bas du défaut constaté. <u>Critère de contrôle</u> : nature des matériaux remontés et qualité du lavage
Préparation du coulis	Utilisation d'un coulis de type ciment et eau avec C/E ⁽¹⁹⁾ de 2,00. Il sera confectionné au moyen d'un malaxeur haute turbulence. <u>Critères de contrôle</u> : <ul style="list-style-type: none"> • Densité : 1,8 +/- 0,02 ; • Viscosité Marsh : 40 à 80 s ; • Résistance à la compression $R_{C_{28j}}$: 30 MPa.

19. Soit 1 200 kg de ciment et 600 l d'eau.

<p>Mise en œuvre de l'injection</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de trois obturateurs en tête de forage avec un servant d'injecteur et les deux autres d'évents ; • Injection gravitaire avec, dans un premier temps, un débit de 800 à 1000 l/h et une pression de 500 kPa⁽²⁰⁾ ; • Réduction des événements par obturations partielles et diminution du débit d'injection ; à 600 l/h à résurgence du coulis par les événements. Injection jusqu'à une pression moyenne de 1 MPa⁽²¹⁾ environ. <p><u>Critères de contrôle</u> : synthèse des pressions et volumes injectés réalisée à partir des enregistrements des débits et pressions fournis sous forme de disques ou diagrammes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soit les critères recherchés sont atteints et l'injection est réputée conforme ; • Soit la pression d'injection est insuffisante et l'injection sera reprise sous 24 heures après lavage préalable des forages. Cette étape sera reprise jusqu'à l'obtention du critère de pression.
<p>Scellement des barres</p>	<p>Après l'injection validée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Débouchage des forages au moyen d'une foreuse et prolongement jusqu'à 2,00 m sous la singularité ; • Mise en place par le fond d'un coulis de type C/E = 2 ; • Équipement par des barres de type GEWI 63,5 mm jusqu'en tête du pieu.
<p>Contrôle de l'efficacité de la réparation</p>	<p>7 jours après la dernière phase d'injection, validation de la réparation par différents contrôles :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mesure de la résistance à la compression sur les éprouvettes de coulis avec un $R_{c,7j} > 25 \text{ MPa}$; • Auscultation sonore et impédance.

Figure 7.28 : Réalisation de trois forages Ø 127 mm répartis à l'intérieur des cerces de la cage d'armature



20. Soit 5 bars.
21. Soit 10 bars.

CHAPITRE 6

Réception des pieux réparés

6. RÉCEPTION DES PIEUX RÉPARÉS

Certains types de réparation peuvent être contrôlés après réalisation (cf. chapitre 4 « Les différents modes de réparation »).

Méthodes de contrôle

La plupart des méthodes préconisées dans le fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis » peuvent être mises en œuvre après la réalisation d'une réparation.

Dans la majorité des réparations, il est possible de réaliser un contrôle de l'efficacité de la réparation par les méthodes non destructives d'auscultation par transparence (sonique⁽²²⁾) ou par impédance (cf. respectivement § 2.1.1 et § 2.1.2 du fascicule 6), faciles à mettre en œuvre et permettant la prise de décision du maître d'œuvre ou maître d'ouvrage.

Lorsqu'il est difficile de conclure sur l'efficacité de la réparation, des investigations complémentaires de type destructives, comme le carottage (*Note*) peuvent être réalisées.

Les méthodes les plus efficaces pour réceptionner les fondations réparées restent des essais de type chargement (cf. § 2.3 du fascicule 6). Toutefois, ils représentent un coût important, sont lourds à mettre en œuvre et ne sont pas toujours possibles (par exemple, au fond d'un batardeau en rivière).

Note : il n'est cependant pas toujours possible de multiplier, voire de réaliser ces sondages destructifs, compte tenu du manque de place, en raison d'un faible diamètre des pieux et de la présence de la cage d'armature.

Processus du contrôle de la réparation

La réception des réparations reste une phase problématique pour le maître d'œuvre en termes de responsabilité.

Pour être efficace et pour éviter tout problème à la fin du chantier de réparation, il est nécessaire que toutes les phases de réalisation :

- soient respectées selon des procédures d'exécution visées ;
- fassent l'objet d'une validation du maître d'œuvre tout au long du cycle de la réparation (note de calcul de vérification, acceptation de la méthode de réparation, procédure de mise en œuvre...).

Si besoin, le maître d'œuvre pourra s'entourer de bureaux d'études compétents dans les domaines abordés. Un suivi rigoureux du chantier par des personnes compétentes et faisant l'objet de comptes-rendus formalisés est recommandé.

Si toutes ces étapes sont respectées, contrôlées et font, à chaque phase, l'objet d'une validation de la part du maître d'œuvre, la réception de la réparation en sera alors facilitée.

22. Nous rappelons que la méthode sonique par transparence nécessite la présence de tubes de réservation.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGE

- [7.1] FHWA (Federal Highway Administration), *Drilled Shafts : Construction Procedures and LRFD Design Methods*, Publication N°FHWA-NHI-10-016, FHWA GEC 010, 2010.

ARTICLE

- [7.2] Frank R. & Zhao S.R., *Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins*, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 119, mai-juin 1982.

NORMES AFNOR

- NF EN 1997-1** Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : règles générales, 2005
- NF EN 1536+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés, 2015
- NF EN 12716** Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Jet-grouting, 2018
- NF EN ISO 22476-4** Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4 : essai pressiométrique dans un forage préalable selon la procédure Ménard, 2021
- NF P94-160-1** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation – Partie 1 : méthode par transparence, 2000
- NF P94-262** Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes, 2012

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 : juillet 2025

Dépôt légal : juillet 2025

ISBN : 978-2-37180-718-1 (pdf) - 978-2-37180-719-8 (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 7

Défauts et réparations des pieux forés

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