

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 6 Le contrôle des pieux finis



LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 6

Le contrôle des pieux finis



Collection

« Les références »

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

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

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

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Les pieux forés pour les ouvrages d'art et le bâtiment - Guide de réalisation - Fascicule 6 - Le contrôle des pieux finis*. Lyon : Cerema, 2025.
Collection : Les références.
ISBN : 978-2-37180-716-7 (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 Gaufilllet (Schöck), Philippe Guezennec (Cerema), Thomas Holder (Soletanche Bachy International), Philippe Jandin (Cerema), Frédéric Larrere (Cerema), Claudio Mandelli (Sireg), André Mikolajczak (Soletanche Bachy Fondations Spéciales), Sylvie Nouvion-Dupray (Cerema), Aurélie Pintat (Soletanche Bachy Fondations Spéciales).

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

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

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

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

Photo de couverture : Soletanche Bachy.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sommaire

Remerciements	2
----------------------	----------

Avant-propos	4
---------------------	----------

CHAPITRE 1

Choix et opportunité des contrôles	9
---	----------

1.1 - Opportunité des contrôles	10
1.1.1 - Contrôle d'exécution lors de la mise en œuvre	11
1.1.2 - Contrôle renforcé d'intégrité	11
1.1.3 - Cas des marchés publics d'ouvrages de génie civil	12
1.1.4 - Opportunité de contrôles non envisagés contractuellement	13
1.2 - Intégration dans le planning de chantier	13
1.3 - Choix des contrôles	14
1.3.1 - Élaboration d'un programme de contrôle des pieux finis	15
1.3.2 - Détermination du type d'essai	15
1.3.3 - Le volume de contrôles	17

CHAPITRE 2

Présentation des méthodes	19
----------------------------------	-----------

2.1 - Méthodes non destructives	20
2.1.1 - Méthode sonique par transparence	20
2.1.2 - Méthodes par réflexion et impédance	36
2.1.3 - Méthodes gammamétriques	46
2.1.4 - Méthode sismique parallèle	47
2.2 - Méthodes destructives	49
2.2.1 - Sondages carottés d'échantillons de béton	49
2.2.2- Forages destructifs	53
2.2.3- Inspection caméra	53
2.3 - Essais de chargement de pieux	54

CHAPITRE 3**Exploitation des contrôles****57**

3.1 - Position contractuelle du problème	58
3.2 - Caractérisation des non-conformités	58
3.2.1 - Méthode sonique par transparence	58
3.2.2- Méthode par impédance	59
3.2.3- Méthode par réflexion	59
3.2.4- Sondages carottés	60
3.3 - Gestion contractuelle des anomalies ou singularités	61
3.4 - Traitement des non-conformités	61
3.4.1 - Auscultations supplémentaires	61
3.4.2- Auscultation par un autre matériel avec une méthode identique	62
3.4.3- Auscultation par une autre méthode non destructive	62
3.4.4- Sondages carottés	62
3.4.5- Inspection caméra	63
3.4.6- Surfaces maximales potentiellement affectées et recalcul	63
3.4.7- Essais de chargement axial de pieux	63

Annexe**65**

Aide à la détermination d'un niveau de contrôle pour les pieux de bâtiment	66
Description de la démarche	66
Cotation des critères de facteurs de risques	66
Élaboration du programme de contrôle	70
Le contrôle des pieux durant l'exécution	70
Exemples	71

Bibliographie**75**

Ouvrages	76
Fascicules du CCTG (Cahier des clauses techniques générales)	76
Normes afnor	76

Le fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis » aborde les méthodes et moyens de contrôle de l'intégrité des ouvrages géotechniques réalisés (*Note*). Il ne traite ni des contrôles en cours d'exécution qui sont traités dans d'autres fascicules ni des procédures de suivi et de supervision des travaux.

Les méthodes d'auscultation des éléments de fondation présentées dans ce fascicule peuvent être diverses et sous une forme :

- **non destructive** :
 - méthode sonique par transparence (§ 2.1.1),
 - méthodes par réflexion et par impédance (§ 2.1.2),
 - méthodes gammamétriques ou méthodes par diffusion nucléaire à rayonnement gamma (§ 2.1.3),
 - méthode sismique parallèle (§ 2.1.4) ;
- **destructive**, avec éventuellement **le passage d'une caméra** (§ 2.2.3) :
 - par carottage (§ 2.2.1),
 - par forage destructif (§ 2.2.2).

L'essai de chargement, bien que rarement utilisé dans le cadre du contrôle d'exécution, est sommairement introduit dans ce guide. Il convient de noter que cet essai permet de vérifier la capacité portante des pieux, c'est-à-dire la capacité à reprendre des efforts, mais ne permet pas de statuer sur l'intégrité du pieu.

Note : les essais d'intégrité visent à vérifier la géométrie et le bon état des matériaux mis en place (article 3.1.10 de la norme NF P94-262 COMPIL1). Le terme de contrôle d'intégrité regroupe les méthodes soniques par transparence, réflexion, impédance, gammamétrie ainsi que la sismique parallèle. Ce terme peut prêter à confusion, les méthodes ainsi nommées permettant seulement pour la plupart de vérifier l'homogénéité de la fondation et de détecter et de localiser d'éventuelles anomalies, donc ces contrôles constituent une auscultation souvent partielle de la qualité d'une fondation et ne peuvent totalement garantir la qualité d'exécution de l'ouvrage. Ces essais d'intégrité ne se substituent pas aux différents contrôles en cours d'exécution ; ils sont complémentaires.

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). Certaines préconisations de la classe 1 ne sont pas directement transposables à la classe 2.

CHAPITRE 1

Choix et opportunité des contrôles

1. CHOIX ET OPPORTUNITÉ DES CONTRÔLES

Plusieurs éléments concourent au choix d'un plan de contrôle des pieux finis : le contexte normatif, contractuel, géotechnique, la complexité de l'ouvrage ou la technique de réalisation.

Ces divers éléments orientent **le choix du type et du volume des contrôles**. Le coût relatif des contrôles rapporté au coût de réalisation des fondations peut s'avérer notable pour des chantiers de petite taille. Dans ce cas, il peut devenir pertinent de concentrer les contrôles sur des pieux pour lesquels un défaut entraînerait des conséquences importantes sur la structure.

Cette partie donne des éléments de choix concernant l'élaboration d'un plan de contrôle des pieux finis, défini dans **le cahier des charges** ou pour ce qui concerne le déclenchement de contrôles initialement non envisagés par le cahier des charges.

1.1 - OPPORTUNITÉ DES CONTRÔLES

Le seul contrôle imposé par les textes normatifs⁽¹⁾ est **un contrôle d'exécution lors de la mise en œuvre**, réalisé au sein même de la chaîne de production. Par ailleurs, la **norme NF P94-500** impose ce contrôle interne (*Note 1*) et un suivi géotechnique d'exécution (mission géotechnique G3 « Étude et suivi géotechnique d'exécution » – *Note 2*) et un contrôle extérieur pour le compte du maître d'ouvrage (mission géotechnique G4 « Supervision géotechnique d'exécution » – *Note 3*). Cette disposition peut être adaptée pour les marchés publics avec maîtrise d'œuvre publique, pour lesquels les missions géotechniques G4 peuvent être réalisées par une assistance à maîtrise d'œuvre et un contrôle extérieur.

Du point de vue de la **norme européenne d'exécution NF EN 1536+A1** ou **des normes de dimensionnement** (Eurocode 7 – norme NF EN 1997 (Parties 1 et 2) et norme d'application nationale NF P94-262 COMPIL1), **le contrôle des pieux finis n'est obligatoire que dans quelques cas clairement identifiés** (*Note 4*) :

- les pieux de pont (annexe Q de la norme NF P94-262 COMPIL1) ;
- certains pieux sollicités en traction (article 8.9 de la norme NF P94-262 COMPIL1, cf. tableaux 8.9.1 et 8.9.2) ;
- les pieux sous contrôle renforcé (article 6.4.1 (8) de la norme NF P94-262 COMPIL1).

Au-delà du cas général, **le contexte contractuel ou réglementaire** peut imposer un contrôle par méthodes destructives ou non destructives.

***Note 1** : la mission géotechnique G3 est confiée à l'entrepreneur, sauf disposition contractuelle contraire (tableau 2 de la norme NF P94-500). Ce contrôle interne comprend les fiches de bétonnage, les enregistrements de paramètres, tous les autocontrôles...*

***Note 2** : cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle comprend deux phases interactives : la phase étude et la phase suivi (tableau 2 de la norme NF P94-500).*

***Note 3** : cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle comprend deux phases interactives : la phase supervision de l'étude d'exécution et la phase supervision du suivi d'exécution (tableau 2 de la norme NF P94-500).*

***Note 4** : le contrôle des ouvrages dépend de leur importance et du risque sur ces derniers en cas de présence d'un défaut : ainsi il est généralement plus important pour des pieux en traction qu'en compression, pour les pieux d'ouvrages d'art conçus pour 100 ans contre 50 ans pour ceux des bâtiments, ou encore pour des ouvrages fortement sollicités.*

1. Normes d'exécution européennes (NF EN 1536+A1). Le Fascicule 68 du CCTG pour les ouvrages publics impose un nombre minimal d'auscultation pour les pieux.

1.1.1 - CONTRÔLE D'EXÉCUTION LORS DE LA MISE EN ŒUVRE

Pour la plupart des ouvrages géotechniques, le contrôle visuel direct de l'ouvrage réalisé en profondeur n'est pas envisageable. **Les contrôles d'exécution** consistent alors à observer et à interpréter des éléments indirects (observations visuelles en surface, mesures, « monitoring »⁽²⁾). De ce fait, malgré une chaîne de contrôle d'exécution efficace impliquant les diverses parties prenantes (entreprise et sa mission géotechnique G3, maître d'ouvrage et/ou maître d'œuvre, géotechnicien de mission géotechnique G4), **des contrôles d'intégrité⁽³⁾ des pieux finis** sont très largement réalisés et fortement recommandés.

1.1.2 - CONTRÔLE RENFORCÉ D'INTÉGRITÉ

Impact du contrôle renforcé d'intégrité sur le calcul de la résistance en compression du béton

La norme de justification des fondations profondes (NF P94-262 COMPIL1) introduit la possibilité d'augmenter de 20 %⁽⁴⁾ la valeur de calcul de la résistance en compression de calcul du béton f_{cd} , si **un plan de contrôle renforcé des pieux finis** est mis en place. Cette majoration peut également s'appliquer aux valeurs moyenne et maximale des contraintes de compression du béton à l'état limite de service caractéristique (article 6.4.1(9) de la norme NF P94-262 COMPIL1).

Proportion de pieux à tester

Le tableau 6.4.1.2 de la norme NF P94-262 COMPIL1, repris dans le Tableau 6.1, précise en fonction des méthodes de contrôle choisies (sonique par transparence et/ou par impédance), la proportion de pieux à tester en corollaire de l'article 6.4.1(8) de la même norme. Lorsque les méthodes d'auscultation par impédance ou par réflexion (respectivement **normes NF P94-160-4 ou NF P94-160-2**) ne sont pas applicables ou lorsque la géométrie des pieux ou le contexte géotechnique sont susceptibles de compromettre la pertinence de ce type d'auscultations, il convient de recourir à la méthode d'auscultation A définie dans le Tableau 6.1.

La proportion de pieux à ausculter, hors fondations de ponts (Note), est :

- **en général**, extraite du tableau 6.4.1.2 de la norme NF P94-262 COMPIL1 (repris dans le Tableau 6.1) ;
- **lorsque l'augmentation de 20 %⁽⁵⁾** ne concerne que quelques pieux du projet, il est recommandé que le nombre de pieux à ausculter soit supérieur ou égal à cinq afin de garantir une représentativité suffisante.

Note : pour les ponts, le Tableau 6.1 de ce fascicule est à remplacer par le Tableau 6.2 (issu du tableau Q.1.1 de la norme NF P94-262 COMPIL1) spécifiant le nombre minimal de pieux ou de barrettes à ausculter pour atteindre un niveau de contrôle renforcé.

2. Suivi automatique en temps réel.

3. Le terme de contrôle d'intégrité regroupe les méthodes soniques par transparence, par réflexion, par impédance, ainsi que les méthodes gammamétriques et par sismique parallèle. Ce terme peut prêter à confusion, les méthodes ainsi nommées permettant seulement pour la plupart de vérifier l'homogénéité de la fondation et de détecter et de localiser d'éventuelles singularités ou anomalies.

4. La démarche consiste à multiplier la valeur caractéristique de résistance en compression uniaxiale par un facteur complémentaire dénommé k_3 égal à 1,2. (article 6.4.1(8) de la norme NF P94-262 COMPIL1).

5. Dans le cas d'un contrôle renforcé de la qualité et de la continuité du fût (tableau 6.4.1.2 de la norme NF P94-262 COMPIL1 dont les informations sont reprises dans le Tableau 6.1 de ce fascicule).

Tableau 6.1 : Nombre minimal de pieux ou barrettes à ausculter pour des contrôles d'intégrité renforcés, selon les méthodes d'auscultation A, B ou C (selon le tableau 6.4.1.2 de la norme NF P94-262 COMPIL1)

	Méthodes d'auscultation (Notes 1 à 4)		
	A	B	C
Nombre de pieux à ausculter avec un minimum de cinq pieux	Par transparence : 1/6 des pieux concernés (*) (Note 2)	Par transparence : 1/8 des pieux concernés (*) (Note 2) + Par impédance : 1/6 des pieux concernés (*) (Note 3)	Par impédance : 1/4 des pieux concernés (*) (Note 3)
(*) concernés par l'augmentation de la contrainte ($k_3 = 1,2$) <i>Note 1 :</i> les procédures A, B ou C sont indifféremment autorisées, mais les procédures A et B ne sont possibles que si les pieux sont équipés de tubes de réservation et donc aussi armés sur toute leur hauteur. <i>Note 2 :</i> selon la norme NF P94-160-1 (méthode sonique par transparence – cf. § 2.1.1). Dans ce cas, les tubes utilisés, de 40 mm de diamètre intérieur minimum, sont à placer de façon à ne pas nuire à l'enrobage des armatures principales des cages. <i>Note 3 :</i> selon la norme NF P94-160-4 ou NF P94-160-2 (méthode vibratoire par impédance ou par réflexion – cf. § 2.1.2). Lorsque cette méthode n'est pas applicable ou lorsque la géométrie et le contexte géotechnique sont susceptibles d'en compromettre la pertinence, il convient de recourir à la méthode A. Lorsque le défaut de représentativité de la méthode par impédance est constaté à posteriori, il convient d'effectuer des auscultations au moyen de la méthode sismique parallèle selon la norme NF P94-160-3 (cf. § 2.1.4). <i>Note 4 :</i> les normes de type «NF EN» se substitueront aux normes de type NF P94-160 lorsqu'elles seront applicables.			

1.1.3 - CAS DES MARCHÉS PUBLICS D'OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Tableau 6.2 : Nombre minimal de pieux ou barrettes à ausculter pour des contrôles renforcés d'intégrité des ponts (selon le tableau Q.1.1 de la norme NF P94-262 COMPIL1)

	Méthodes d'auscultation (Notes 1 à 4)	
	A	B
Nombre de pieux à ausculter	Par transparence : 100 % des pieux concernés (*) (Note 2)	Par transparence : 80 % des pieux concernés (*) (Note 2) + Par impédance : 30 % des pieux concernés (*) (Note 3)
(*) concernés par l'augmentation de la contrainte ($k_3 = 1,2$) <i>Note 1 :</i> les procédures A ou B peuvent être appliquées indifféremment. <i>Note 2 :</i> selon la norme NF P94-160-1 (méthode sonique par transparence – cf. § 2.1.1). Dans ce cas, les tubes utilisés, de 40 mm de diamètre intérieur minimum, sont à placer de façon à ne pas nuire à l'enrobage des armatures principales des cages. <i>Note 3 :</i> selon la norme NF P94-160-4 (méthode vibratoire par impédance – cf. § 2.1.2). <i>Note 4 :</i> les normes de type «NF EN» se substitueront aux normes de type NF P94-160 lorsqu'elles seront applicables.		

Le Fascicule 68 du CCTG est une pièce technique générale applicable aux marchés publics.

La dernière version validée du Fascicule 68⁽⁶⁾ du CCTG indique pour le plan de contrôle des pieux finis « sauf disposition contraire du marché, 30 % des pieux au minimum font l'objet d'un contrôle d'intégrité par auscultation sonique. Dans le cas des ponts et conformément à l'Annexe Q de la norme NF P94-262 COMPIL1, l'intégralité des pieux est contrôlée. »

Dans les marchés faisant référence au Fascicule 68⁽⁶⁾ du CCTG, le concepteur se trouve toujours dans le cas d'un contrôle renforcé ($k_3 = 1,2$)⁽⁷⁾.

6. Version de l'arrêté du 28 mai 2018.

7. Article 6.4.1 (8) de la norme NF P94-262 COMPIL1 « Béton, coulis ou mortier » sur la valeur du coefficient k_3 en cas de contrôle renforcé de la qualité et de la continuité du fût (tableau 6.4.1.2).

1.1.4 - OPPORTUNITÉ DE CONTRÔLES NON ENVISAGÉS CONTRACTUELLEMENT

La **survenance d'événements imprévus** pouvant induire un risque non négligeable sur l'intégrité des fondations doit motiver le déclenchement de contrôles que le marché n'a initialement pas prévus. Parmi les incidents particuliers pouvant justifier la réalisation de contrôles sur les pieux finis, nous pouvons citer :

- la chute de pression de bétonnage en deçà de 10 kPa pour une technique d'exécution à la tarière creuse ;
- **l'attente excessive lors du bétonnage**. Le critère de délai peut être adapté à celui du maintien de la rhéologie pris en compte lors de l'étude de formulation du béton ;
- **les incidents à la foration** : éboulements, difficulté à faire pénétrer le tubage provisoire ;
- **les incidents au bétonnage** : suspicion de désamorçage, surconsommation, sous-consommation du béton ;
- **les incidents lors de l'équipement** : descente de la cage d'armature (concernant les techniques pour lesquelles l'équipement est postérieur au bétonnage) ;
- **les contextes géotechniques défavorables et inattendus** : contact sol bouillant sur rocher, présence d'un horizon très compact (nécessitant le trépanage) ou très mou, remontée du niveau d'eau dans le forage lors du bétonnage ;
- **l'incident lors des enregistrements** de paramètres de forage et/ou de bétonnage (technique tarière creuse – Note).

Note : la Note (3) du tableau 6.4.1.1 de la norme NF P94-262 COMPIL1 relative aux techniques de tarière creuse demande la réalisation de contrôles d'intégrité sur les pieux dont le dispositif d'enregistrement des paramètres de forage et de bétonnage est défectueux. Cette clause normative précise que les contrôles d'intégrité sont à réaliser non seulement sur les pieux concernés par le dispositif défectueux, mais également sur un nombre identique de pieux pour lesquels l'enregistrement continu des paramètres de forage et de bétonnage aura été réalisé correctement, de manière à servir d'étalonnage pour les essais des pieux dont le dispositif d'enregistrement a été défectueux. Comme il est précisé plus loin dans ce fascicule, il est conseillé que les techniques d'impédance et de réflexion soient simultanément mises en œuvre.

1.2 - INTÉGRATION DANS LE PLANNING DE CHANTIER

Délais incompressibles à intégrer dans le planning de chantier

La réalisation du contrôle des pieux finis doit être prise en compte dans le planning de chantier en intégrant les délais incompressibles liés aux éléments suivants :

- **l'aménagement d'une plateforme ainsi que l'amenée et le repli d'un atelier de forage**, pour des contrôles par moyens destructifs ;
- **le temps d'attente minimum** qui est de 7 jours (Note 1) pour les contrôles non destructifs (sonique par transparence, réflexion, impédance, gammamétrie, et sismique parallèle) ;
- **la préparation de l'essai** (Note 2) ;
- **la réalisation de l'essai** (1 journée minimum) ;
- **le dépouillement, l'interprétation et l'édition du rapport** (Note 3).

Note 1 : en effet, une auscultation sur un béton trop jeune peut entraîner des perturbations des mesures susceptibles d'être interprétées comme des singularités⁽⁸⁾ ou des anomalies ; dans ce cas il est nécessaire de renouveler le contrôle au-delà de ce délai de référence pour confirmer ou infirmer ces premiers résultats.

Note 2 : par exemple :

- **pour l'auscultation par la méthode sonique par transparence**, le lavage et le remplissage des tubes d'auscultation à l'eau claire ;
- **pour l'auscultation par la méthode par réflexion ou impédance**, la préparation de la tête du pieu ;
- **pour l'auscultation par la méthode sismique parallèle**, la réalisation d'un forage parallèle au pieu.

Note 3 : suivant les méthodes de contrôle non destructif et le nombre de pieux auscultés, le délai de dépouillement est généralement de 1 à 2 jours pour une journée d'essai sur site. Il est souvent possible d'obtenir des résultats sommaires plus rapidement.

8. Cf. § 2.1.1 relative à la méthode sonique par transparence.

Informations à fournir aux organismes chargés du contrôle

La connaissance des informations suivantes est indispensable à la bonne conduite du contrôle des fondations :

- **préalablement aux interventions :**

- l'implantation et la longueur théorique des éléments de fondation sur un plan d'exécution à jour (fourni par l'entreprise ou la maîtrise d'œuvre),
- la technique de construction employée (méthode et moyens de forage ou d'exécution) (*Note 1*),
- la date de bétonnage de chaque élément de fondation,
- la cote altimétrique théorique (*Note 2*) :
 - de la base des éléments de fondation,
 - de la tête après recépage,
- la coupe géotechnique (*Notes 1 et 2*),
- les sujétions particulières liées au chantier (horaires, accessibilité...);

- **sur le chantier :**

- en présence de tubes de réservation (auscultation par la méthode sonique par transparence) ou tubes pour le carottage :
 - leur nombre et leur implantation sur un plan d'exécution à jour,
 - la cote altimétrique de leur sommet pour chaque élément de fondation (*Notes 2 et 3*),
 - en cas d'auscultation sonique par transparence, l'assurance que les tubes de réservation ont bien été lavés, qu'ils sont étanches et remplis d'eau claire avant les mesures,
- la courbe de bétonnage de chaque élément de fondation (cf. fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »),
- la liste des éventuels incidents survenus en cours d'exécution (au forage et au bétonnage),
- la cote altimétrique réelle des éléments de fondation après recépage.

Note 1 : la connaissance de la technique de réalisation ainsi que la coupe géologique sont indispensables pour interpréter les résultats des essais et expliciter l'origine d'éventuelles singularités⁽⁹⁾ ou anomalies (particulièrement pour les méthodes par réflexion et impédance).

Note 2 : les cotes altimétriques permettent de déterminer la longueur des éléments de fondation et leur position dans le contexte géologique. Elles permettent notamment de situer les cotes de fond de pieu ainsi que les éventuelles singularités ou anomalies détectées au cours des contrôles.

Note 3 : pour des raisons pratiques, il est souhaitable que tous les tubes de réservation soient recoupés à la même hauteur.

1.3 - CHOIX DES CONTRÔLES

Depuis la première rédaction du recueil des règles de l'art [6.1], la qualité de réalisation des pieux s'est indéniablement améliorée. Ceci s'explique par divers facteurs tels que l'efficacité de la mise en œuvre des démarches « qualité » auxquelles les entreprises se conforment, le développement de procédés dotés de *monitoring* (outil de surveillance⁽¹⁰⁾) permettant de suivre en temps réel et d'enregistrer les paramètres de foration et de bétonnage (par exemple, les enregistrements des paramètres des pieux à la tarière creuse), ainsi que les progrès technologiques sur la formulation des bétons. Aussi, dans les cas courants, à condition que le maître d'œuvre s'assure sur site du respect des règles de l'art et qu'aucun événement suspect n'ait été relevé, un contrôle systématique des pieux finis n'apparaît pas nécessairement obligatoire.

Cependant la complexité des projets augmente notamment en raison des contraintes architecturales, du contexte urbain, et du fait que les sols disponibles relèvent fréquemment de contextes géotechniques plus compliqués.

Dans la pratique, l'ensemble des acteurs de la profession (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises) trouve donc un intérêt à prévoir un programme de contrôle avec un coût adapté au regard des risques encourus. Ce programme doit être alors adapté aux diverses conditions du projet.

9. Terme défini pour les essais par la méthode sonique par transparence (norme NF P94-160-1).

10. Suivi automatique en temps réel.

1.3.1 - ÉLABORATION D'UN PROGRAMME DE CONTRÔLE DES PIEUX FINIS

Lors de l'élaboration d'un programme de contrôle des pieux finis, **il convient de préciser** :

- **le type d'essai mis en œuvre** – le choix du type de contrôle se détermine habituellement entre la méthode sonique par transparence (cf. § 2.1.1), les méthodes par réflexion et par impédance (cf. § 2.1.2) ou par l'utilisation du carottage (avec ou sans caméra – cf. § 2.2.1 et 2.2.3, *Note*) ;
- **le volume de contrôle** ;
- **le choix éventuel des pieux à contrôler.**

Note : le carottage est un essai complémentaire, il est recommandé de l'associer à au moins un des essais cités (transparence, réflexion et impédance).

1.3.2 - DÉTERMINATION DU TYPE D'ESSAI

Le choix du type d'essai doit reposer sur :

- **le mode de fonctionnement du pieu** ; ainsi pour des pieux travaillant essentiellement en pointe, il est souvent illusoire d'espérer un résultat fiable à partir d'une méthode de contrôle non destructive (sonique, réflexion/impédance, gammamétrie)⁽¹¹⁾. Dans ce cas, il convient d'associer aux contrôles non destructifs des carottages systématiques (*Note 1*) réalisés nécessairement (*Note 2*) à l'abri d'une réservation tubulaire (réservation arrêtée à 500 mm du fond de pieu, afin de pouvoir extraire une carotte de béton et de terrain naturel permettant de juger du contact pieu-sol) ;
- **les facteurs de risques de nature géotechnique** qui génèrent des typologies diverses de défauts possibles. Le Tableau 6.3 propose une évaluation de l'efficacité de chaque méthode d'auscultation pour les principaux types de défauts ;
- **le type de fondation** (pieux forés, barrettes, paroi moulée) **et sa géométrie** (cf. Tableau 6.4).

Nota bene :

- **Les essais de chargement** ne vérifient pas l'intégrité des pieux, mais garantissent une résistance globale.
- **Les méthodes de contrôle non destructives** (sonique, réflexion/impédance, gammamétrie) ne permettent pas :
 - de contrôler la qualité de l'ensemble du contact sol-pieu,
 - d'estimer la portance ;
- **Les méthodes sonique et gammamétrie** ne permettent pas d'ausculter le béton au-delà du plus profond des tubes de réservation.

Note 1 : il faut faire attention à l'usage du carottage, par exemple, pour des pieux ancrés dans du sable, car l'usage d'un certain débit d'eau pour refroidir l'outil délave nécessairement le sable, quand le carottage perce le fond du pieu, créant un défaut au niveau de la pointe.

Note 2 : en absence de réservation tubulaire, le carottage risque de dévier avant d'atteindre la pointe du pieu ou encore de sectionner les aciers.

11. Dont la profondeur d'investigation est par nature limitée.

Tableau 6.3 : Efficacité de la méthode d'auscultation en fonction du type de défauts

	Réduction de diamètre (sous-consommation/éboulement)	Discontinuité rupture du pieu (choc latéral)	Coupure totale du pieu (désamorçage du bétonnage, éboulement)	Défaut de qualité/homogénéité du béton	Défaut de qualité de l'interface sol-pieu en pointe ⁽¹²⁾	Sur-consommation
Sonique transparence⁽¹³⁾	+	++	+++	+++ ^{a)}	+ ^{b)}	
Réflexion	++	+++	++	+		++
Impédance	+	+++	++	+		++
Réflexion + impédance	++ ^{c)}	+++	++	+		+++
Gammamétrie	+	+	++	+++		
Sismique parallèle		++	++	+		
Carottage toute hauteur^{d)}		++	++	++	+++	
Carottage de fond de pieu^{e)}					+++	
Essais sur carottes				+++		
Caméra^{f)}		+++	++	++	+	

Légende : +++ : adapté et conseillé ; ++ : adapté ; + : possible

a) L'auscultation sonique constitue un des moyens les plus fiables et les plus répandus pour vérifier l'homogénéité « globale » du béton, le carottage ne permettant de l'évaluer que visuellement et très localement.

b) Si les tubes de réservation descendent jusqu'au fond du pieu (cas rarement rencontré mais possible à réaliser).

c) Les strictions de pieux et les défauts du béton en pointe non généralisés ne sont généralement pas détectables en réflexion/impédance.

d) Le carottage permet effectivement de voir le défaut seulement s'il se trouve dans sa trajectoire. Le carottage ne représente qu'un faible pourcentage de la section (généralement moins d'1 %) et est susceptible de dévier et de sectionner les armatures.

e) En règle générale, le carottage est pratiqué depuis le fond du tube de réservation et pénètre d'au moins 0,50 m dans le sol sous la pointe du pieu. Dans certains cas (sables sous nappe), ce carottage peut être limité en profondeur, afin de ne pas déconfiner ni éroder les formations présentes sous la pointe du pieu.

f) La caméra est passée dans un carottage toute hauteur ou dans un forage destructif toute hauteur.

Tableau 6.4 : Choix de la méthode d'auscultation à privilégier selon le type de fondation et sa géométrie

Pieux forés		
Longueur	L < 25 m	L ≥ 25 m ^{a)}
Diamètre		
D < 600 mm	Réflexion ^{b) et c)} et impédance ^{b) et c)} à privilégier ^{d)}	/ ^{b) et d)}
600 mm ≤ D ≤ 800 mm	Toutes les méthodes ^{b), c) et e)}	Sonique par transparence
800 mm < D ≤ 1 000 mm	Sonique par transparence ^{e)} , réflexion ^{b) et c)} , impédance ^{b) et c)}	
D > 1 000 mm ^{f)}	Sonique par transparence	
Barrettes		
Sonique par transparence		

a) Dans le cas des tarières creuses, à condition d'avoir les enregistrements ad hoc (et sous réserve de l'étalonnage du système de mesure de la profondeur⁽¹⁴⁾), les méthodes par réflexion/impédance peuvent être utilisées.

b) La norme NF P94-160-2 (méthode par réflexion) et la norme NF P94-160-4 (méthode par impédance) fixent dans le cas général la limite de l'éclatement entre 10 et 30 fois le diamètre, sauf en cas de présence de forte épaisseur de sol mou ou d'eau (article 1 des normes).

c) L'utilisation des méthodes par réflexion et impédance nécessite obligatoirement de connaître les résultats de l'examen préalable du dossier géotechnique.

d) Pour les petits diamètres D < 600 mm, l'auscultation sonique (norme NF P94-160-1 – méthode par transparence) est limitée par le faible nombre de tubes d'auscultation envisageables (deux tubes en général). Cela conduit souvent à limiter drastiquement le nombre de cheminements d'auscultation possibles et à rendre la méthode moins discriminante. Pour des diamètres compris entre 500 et 600 mm, la mesure perd de la justesse en raison des mouvements des sondes dans un contexte de parcours très courts.

e) Lorsque le frottement latéral est prépondérant et quel que soit le diamètre du pieu, seule la méthode sonique est applicable.

f) La norme NF P94-160-2 (méthode par réflexion) et la norme NF P94-160-4 (méthode par impédance) fixent dans le cas général la limite de D_{max} à 1 000 mm.

12. L'interface sol-pieu correspond à la zone de transition entre le fût de béton et le sol en pointe. Cette interface est généralement située au-delà des tubes d'auscultation sonique, ce qui limite naturellement leur portée. Néanmoins, l'existence d'une singularité en fond de tube constitue un indice de défaut en pointe et peut donc être exploité. C'est d'ailleurs par ce biais que l'essentiel des défauts en pointe de pieu sont actuellement détectés.

13. Contrôle des pieux jusqu'à la base des tubes.

14. Cf. § 7.2.1.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ».

1.3.3 - LE VOLUME DE CONTRÔLES

Détermination du volume de contrôles par une approche de niveau de risques

Le volume de contrôles doit être évalué en regard des enjeux (principalement la classe de conséquences selon la norme NF EN 1990), de la sensibilité de la structure, de celle des pieux de fondation et des risques d'origine géotechnique.

Le niveau de risques est donc analysé selon :

- la « **sensibilité de la structure** » qui intègre la classe de conséquence, le nombre de pieux par appui et la sensibilité de la structure aux déplacements ;
- la **vulnérabilité des pieux**, qui tient compte de leur diamètre, de leur élancement, du taux de travail de leur béton, de leur phasage de construction et des modes constructifs, de leur durée de réalisation et du fait qu'ils soient armés toute hauteur ou non ;
- l'**aléa « terrain »** qui regroupe l'ensemble des facteurs d'aléa de nature géotechnique : sols mous (tourbes et argiles molles), sols sans cohésion, circulations d'eau, nappes en charge, présence de fractures, de vides, de karst ou de gypse, variations brutales du terrain d'ancrage et ancrage rocheux.

Une première approche analysant l'influence de chacun de ces facteurs sur les risques de désordres des pieux est décrite en Annexe 6.1 en vue de déterminer un niveau de contrôle.

Choix des pieux à contrôler

Le choix des pieux qui font l'objet du contrôle est guidé par leur technique de réalisation ou leurs spécificités géométriques (pieux les plus longs, par exemple).



CHAPITRE 2

Présentation des méthodes

2. PRÉSENTATION DES MÉTHODES

Les méthodes de contrôle des pieux finis sont réparties en trois familles :

- **les méthodes non destructives** – méthode sonique par transparence (NF P94-160-1), méthode par réflexion (NF P94-160-2) et impédance (NF P94-160-4), méthodes gammamétriques (XP P94-160-5) et méthode sismique parallèle (NF P94-160-3) ;
- **les méthodes destructives** – sondages carottés et forages destructifs (*Note 1*) ;
- **les essais de chargement** (*Note 2*).

Note 1 : le forage destructif (rotopercussion, marteau hors de trou ou fond de trou) est une méthode de contrôle qui ne fournit qu'une appréciation très imprécise de la qualité du béton. Elle ne constitue pas une méthode d'évaluation de l'homogénéité et/ou de l'intégrité du pieu. En revanche, elle peut être utile pour rendre possible une autre méthode de contrôle (cas de la caméra) ou pour la simplifier (par exemple, pour limiter la hauteur carottée à la seule partie nécessaire, sous réserve que la déviation du forage ne rende le contrôle inopérant).

Note 2 : l'essai de chargement est rarement utilisé en contrôle d'exécution des pieux (en raison du coût du système de réaction) ; du fait de ses caractéristiques particulières de réalisation, il ne sera que sommairement abordé ici.

2.1 - MÉTHODES NON DESTRUCTIVES

2.1.1 - MÉTHODE SONIQUE PAR TRANSPARENCE

2.1.1.1 - Principes de la méthode sonique par transparence

Objectif de l'essai sonique par transparence

Cette méthode permet normalement :

- **de suivre les variations de qualité du béton** ;
- **de localiser précisément les défauts** détectés sur toute la hauteur de la fondation.

Principe de la méthode sonique par transparence (Figure 6.1)

Une sonde émettrice d'une onde ultrasonore et une sonde réceptrice sont déplacées simultanément, en continu du bas vers le haut dans des tubes de réservation en acier, liaisonnés à la cage d'armature du pieu et remplis d'eau. Généralement ces sondes sont situées à un même niveau dans deux tubes de réservation, sauf lorsqu'on souhaite identifier la présence d'une fracture horizontale.

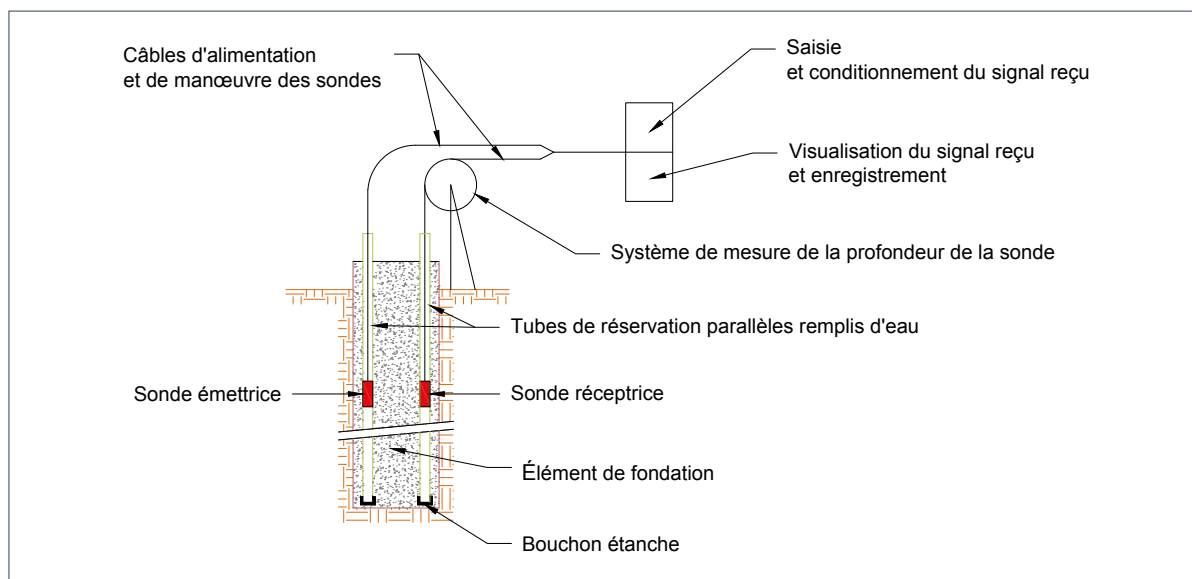
L'application de la norme NF P94-160-1 impose la mesure de deux paramètres sur toute la hauteur auscultée (Figure 6.4) :

- **le temps de propagation de l'onde acoustique dans le béton entre les deux sondes** – fonction de la distance entre tubes et de la qualité du béton, principalement représentative du trajet direct entre les sondes émettrice et réceptrice ;
- **la variation de l'amplitude du signal reçu**, calculée sur les dix premières alternances (*Note*) – peu affectée par les variations de distance sauf en présence d'une singularité⁽¹⁵⁾. L'amplitude du signal est représentative d'un volume de béton qu'il est cependant difficile d'appréhender.

Note : au sens de la norme, la première arrivée d'onde est définie comme étant la première amplitude supérieure à 5 % de l'amplitude maximale. Ce point signifie que toute arrivée d'onde inférieure à ce seuil n'est pas prise en compte.

15. La norme NF P94-160-1 (article 8.4) fixe des critères de détermination d'une singularité, qui sont rappelés plus loin dans le paragraphe « Résultats de l'essai par la méthode sonique par transparence ».

Figure 6.1 : Schéma de principe de la méthode sonique par transparence
(extrait de la norme NF P94-160-1)



Appareillage de la méthode sonique par transparence (Figure 6.2)

L'appareillage est composé d'une sonde émettrice, d'une sonde réceptrice et d'une centrale de commande et de gestion des résultats⁽¹⁶⁾ asservie par un ordinateur portable, ainsi que d'un ensemble de câbles et de treuils (*Note*), permettant la descente (et remontée) des sondes dans les tubes de réservation. La vitesse de remontée de la sonde doit être calculée. Elle est de l'ordre de 800 mm/s et ne doit pas dépasser la valeur maximale déterminée lors de la vérification de l'ensemble de l'appareillage, sous peine de devoir recommencer l'essai (cf. article 8.3 de la norme NF P94-160-1).

La lecture du signal est conduite simultanément par un oscilloscope numérique souvent rattaché à la centrale d'acquisition. L'enregistrement de l'ensemble des signaux reçus pour un post-traitement éventuel est imposé par la norme.

L'appareillage, dont la vérification périodique semestrielle est imposée par la norme (cf. article 11 de la norme NF P94-160-1), doit être en cours de validité lors des essais.

Note : certains dispositifs permettent l'asservissement des treuils à la centrale de mesure. Dans le cas contraire, les sondes sont remontées manuellement. Il convient alors que l'appareillage mesure la vitesse de remontée dont la valeur maximale est fixée lors d'essais préalables en laboratoire.

Figure 6.2 : Exemples d'appareillage de la méthode sonique par transparence mise en place sur chantier



16. Chaîne d'acquisition et de traitement du signal, ainsi qu'un moyen de visualisation et de stockage des informations.

Mode opératoire de la méthode sonique par transparence

Le déplacement de la sonde entre chaque mesure est inférieur ou égal à 10 mm.

La réalisation de l'essai est fortement conditionnée par le réglage du signal qui ne doit pas être :

- saturé sur la hauteur du couple de tubes, afin de ne pas sous-estimer les singularités (article 7.1 de la norme NF P94-160-1) ;
- sous énergétique pour éviter de déclarer des singularités qui ne seraient pas justifiées.

La mise en œuvre de l'essai peut nécessiter dans certains cas une attente supérieure aux 7 jours demandés par la norme entre le bétonnage et l'essai. C'est en particulier le cas pour les bétons à prise lente.

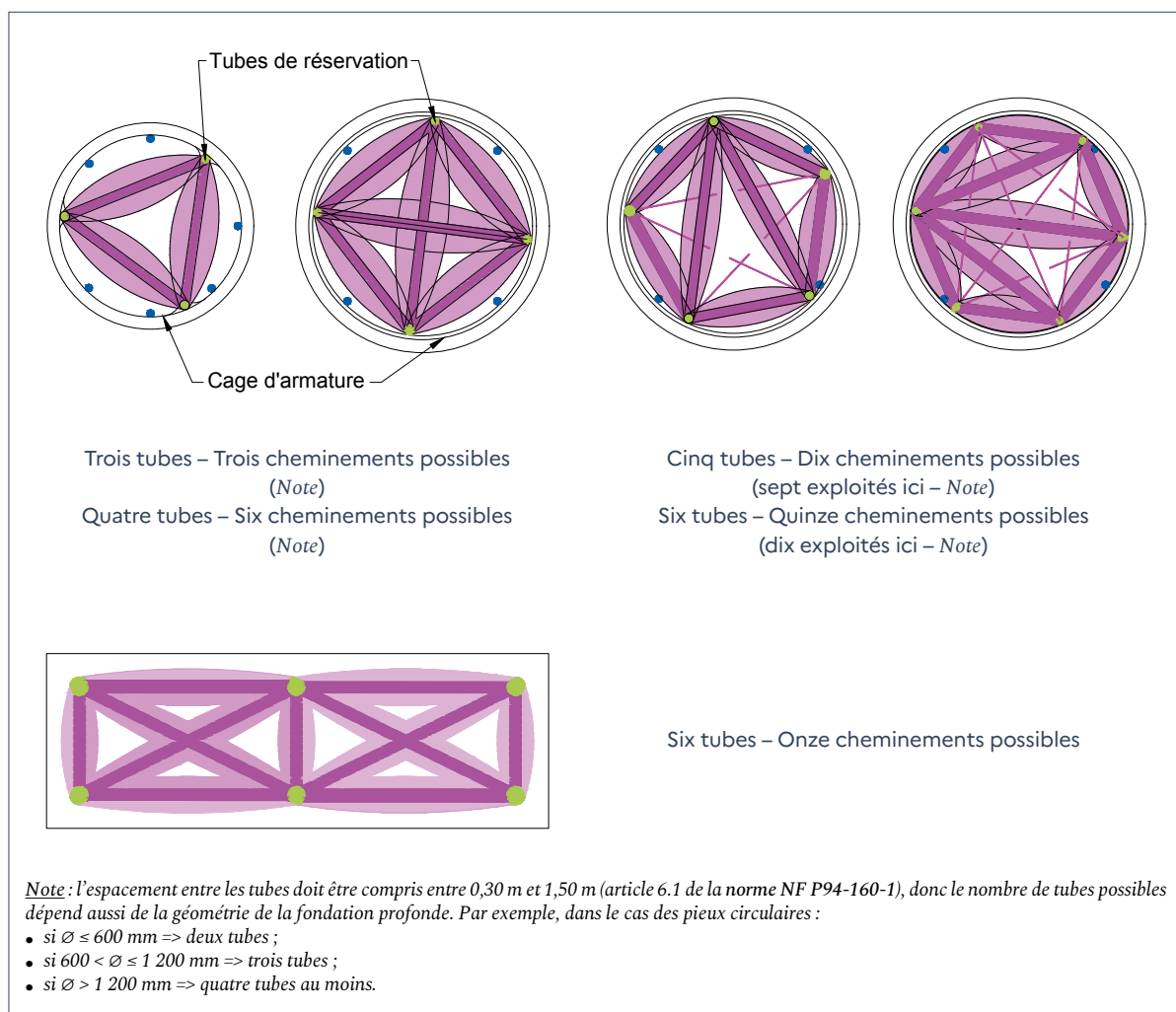
Trajets à ausculter par la méthode sonique par transparence

L'auscultation doit être réalisée par couple de tubes suivant tous les cheminements possibles, par exemple, six cheminements pour un pieu équipé de quatre tubes (Figure 6.3) ou onze cheminements pour une barrette équipée de six tubes.

Les informations relatives aux tubes de réservation à mettre en place (position, nombre...) sont traitées dans le § 2.1.1.2.1.

Figure 6.3 : Schémas de cheminements pour pieux avec trois, quatre, cinq et six tubes et pour une barrette

(« fuseaux colorés » illustrant la zone de pieu influençant l'amplitude du signal, « en foncé », les zones de trajet direct permettant la détermination du temps de propagation, « lignes en pointillés » correspondant aux trajets directs possibles mais non exploités ici)



Résultats de l'essai par la méthode sonique par transparence

Les résultats permettant de signaler une singularité sont exprimés avec deux paramètres (Figures 6.4 et 6.5) conformément à la norme :

- Δt représente l'augmentation du temps de propagation par rapport au temps de référence avant singularité (Note 1) ;
- α_A est l'atténuation du signal, défini comme le rapport de l'amplitude du signal reçu $A_z^{(17)}$ à une profondeur à l'amplitude maximale $A_{z_{\max}}^{(18)}$ (Note 2).

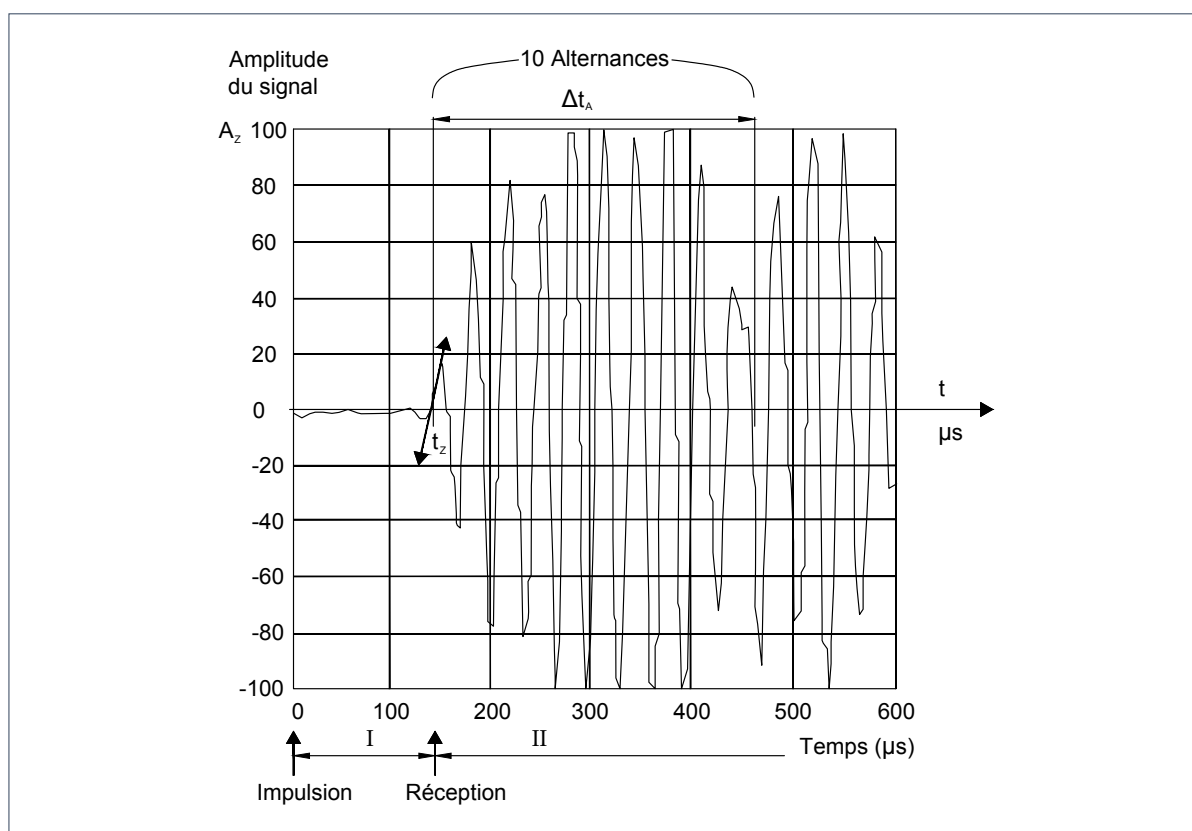
Une singularité est déclarée lorsque les paramètres « temps d'arrivée de première onde » et « amplitude » dépassent les seuils fixés : l'augmentation du temps de propagation $\Delta t > 20\%$ et un rapport des amplitudes $\alpha_a < 0,2$, soit une atténuation supérieure à 80 % (article 8.4.b de la norme NF P94-160-1). Toute singularité doit être aussitôt signalée sur le chantier et confirmée par écrit. Un exemple d'analyse du signal sur une diagraphie est présenté sur la Figure 6.7 et d'autres exemples d'enregistrement de l'amplitude et du temps accompagnés de leur analyse le sont sur la Figure 6.8.

Note 1 : article 8.4.a (NOTE) de la norme NF P94-160-1 « La variation de la durée du parcours du signal ultrasonore entre la sonde émettrice et la sonde réceptrice peut être due à un seul ou à une combinaison des deux phénomènes suivants :

- une distance entre tubes non constante (par exemple, tubes non parallèles) ;
- des matériaux de nature différente ».

Note 2 : article 8.4.a (NOTE) de la norme NF P94-160-1 « L'amplitude du signal reçu est plus affectée par la différence de nature du matériau que par la variation de la distance des tubes ». L'amplitude du signal est globalement sensible à toutes les modifications du milieu ausculté, même situé en dehors d'un trajet direct (Figure 6.6).

Figure 6.4 : Définition des deux paramètres mesurés par la méthode sonique par transparence : amplitude et temps (extrait de la norme NF P94-160-1)



17. L'amplitude du signal reçu A_z , à la profondeur z , est la moyenne arithmétique des valeurs absolues (crête à crête) des dix premières périodes (la première période étant celle où l'amplitude de la première demi-alternance est supérieure à 5/100 de l'amplitude maximale (norme NF P94-160-1).

18. La valeur maximale $A_{z_{\max}}$ est conventionnellement égale à la valeur moyenne arithmétique de trois valeurs consécutives des amplitudes A_z .

Figure 6.5 : Exemple d'enregistrement de l'amplitude et du temps sur un pieu
(méthode sonique par transparence)

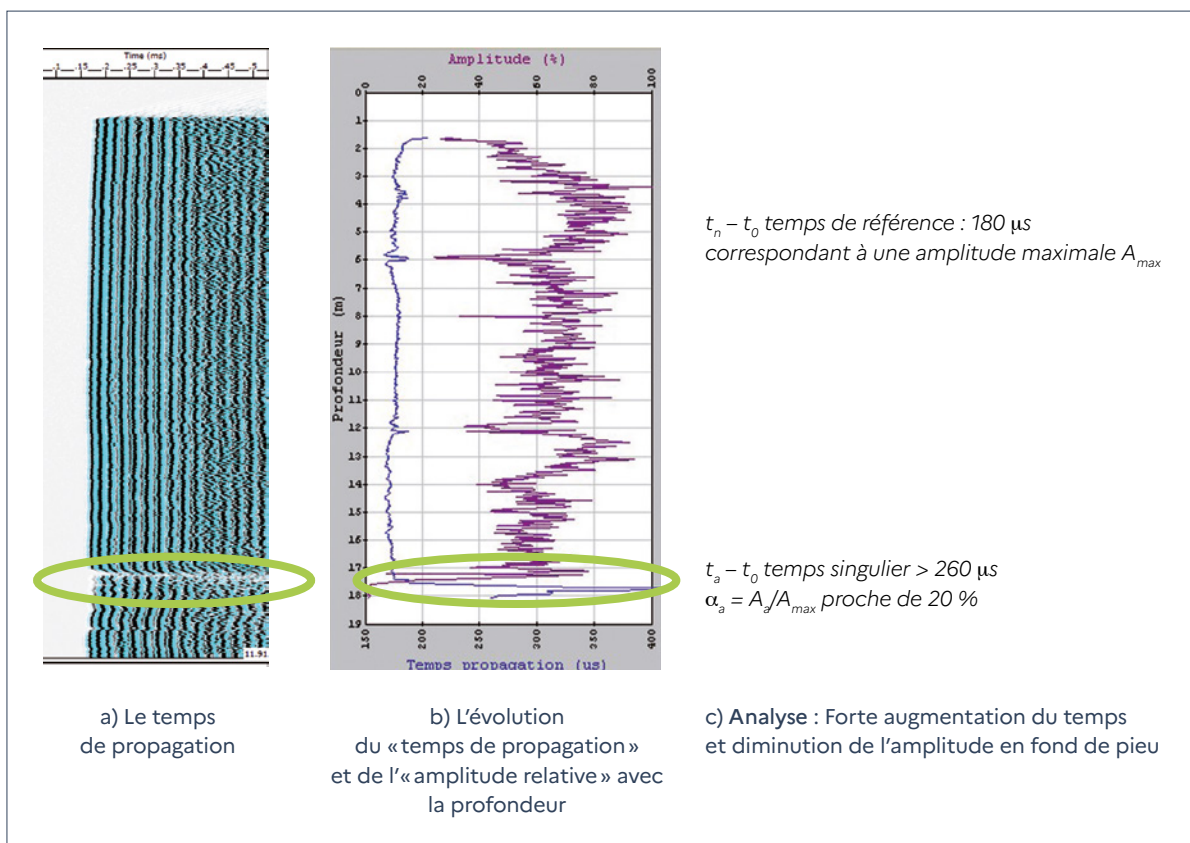


Figure 6.6 : Propagation de l'onde sonique dans la section d'un pieu : illustration des zones d'influence en temps et en amplitude [6.3]

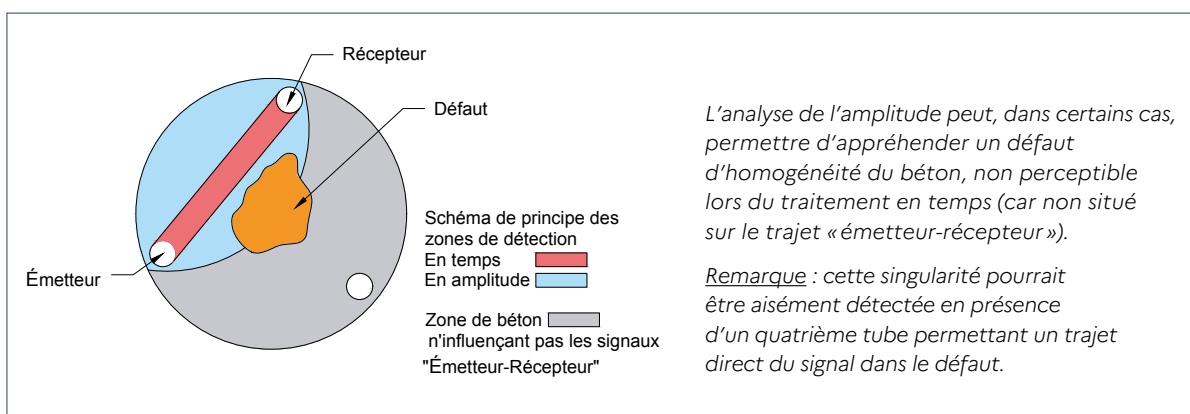


Figure 6.7 : Exemple d'analyse du signal sur une diagraphie
(méthode sonique par transparence)

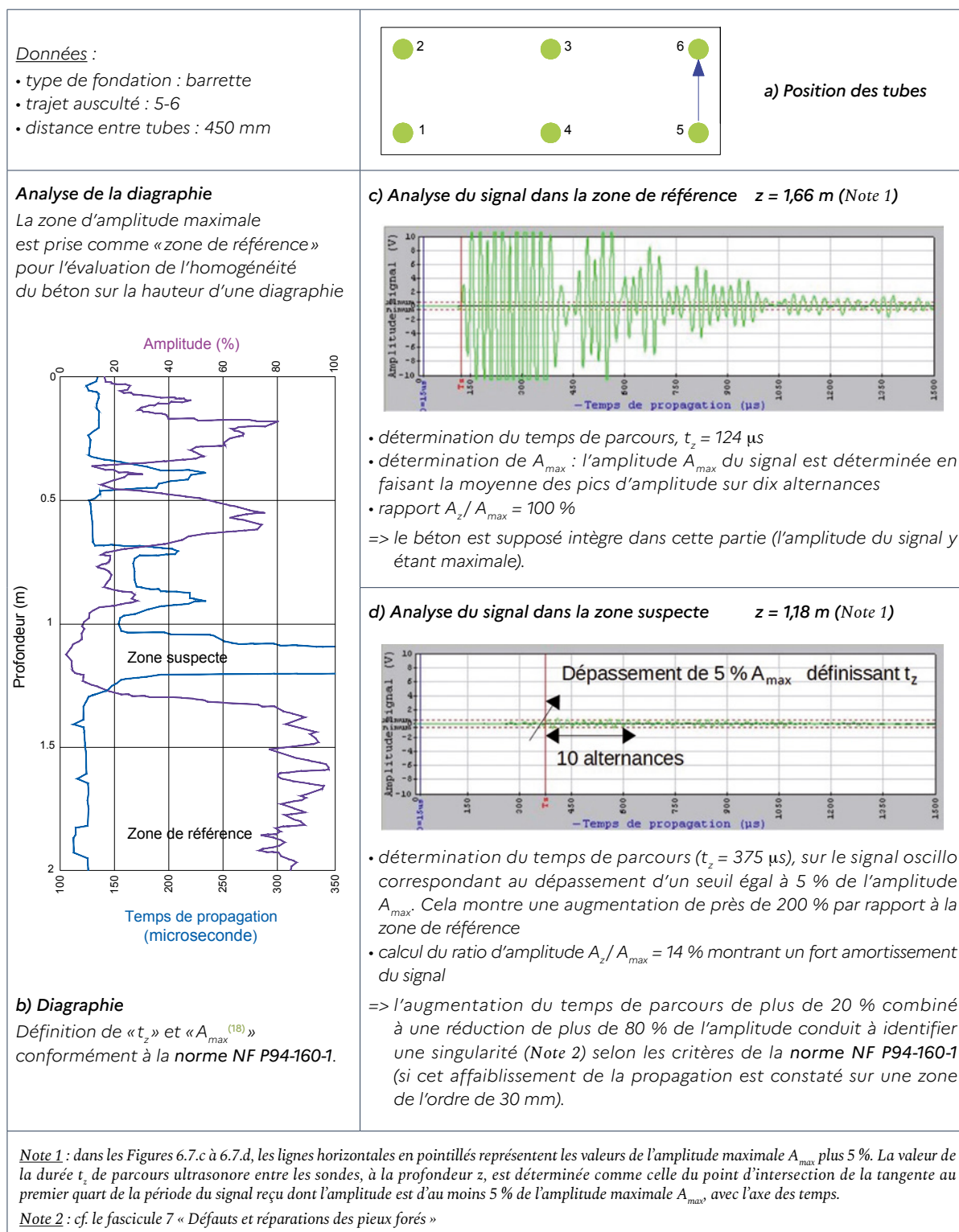
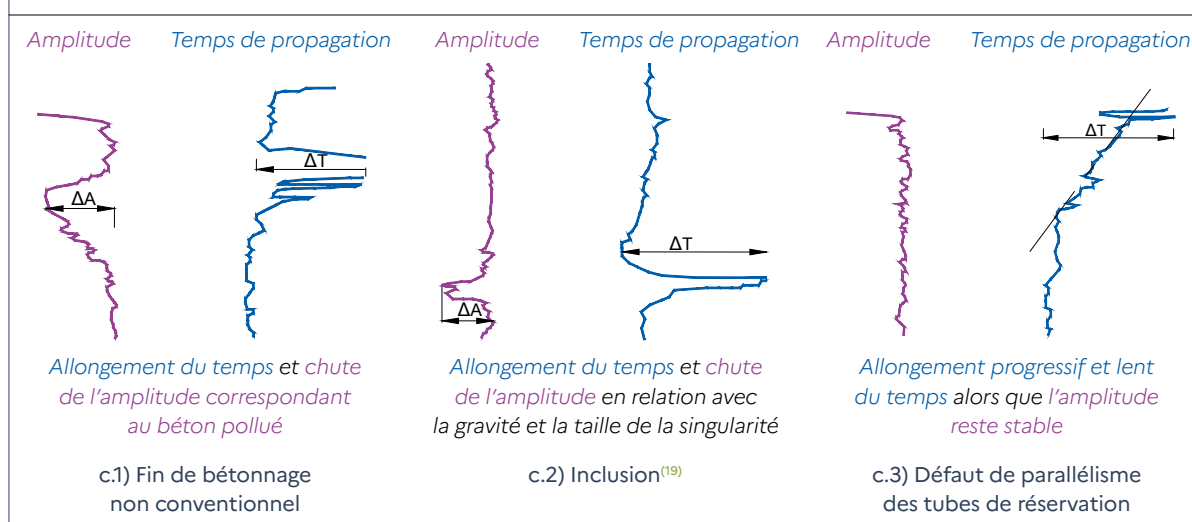
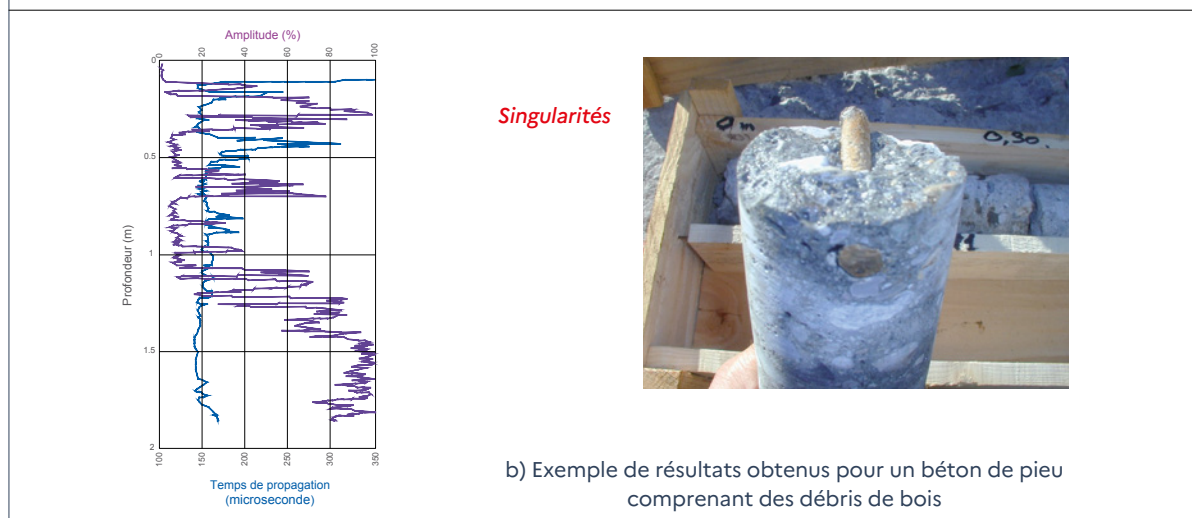
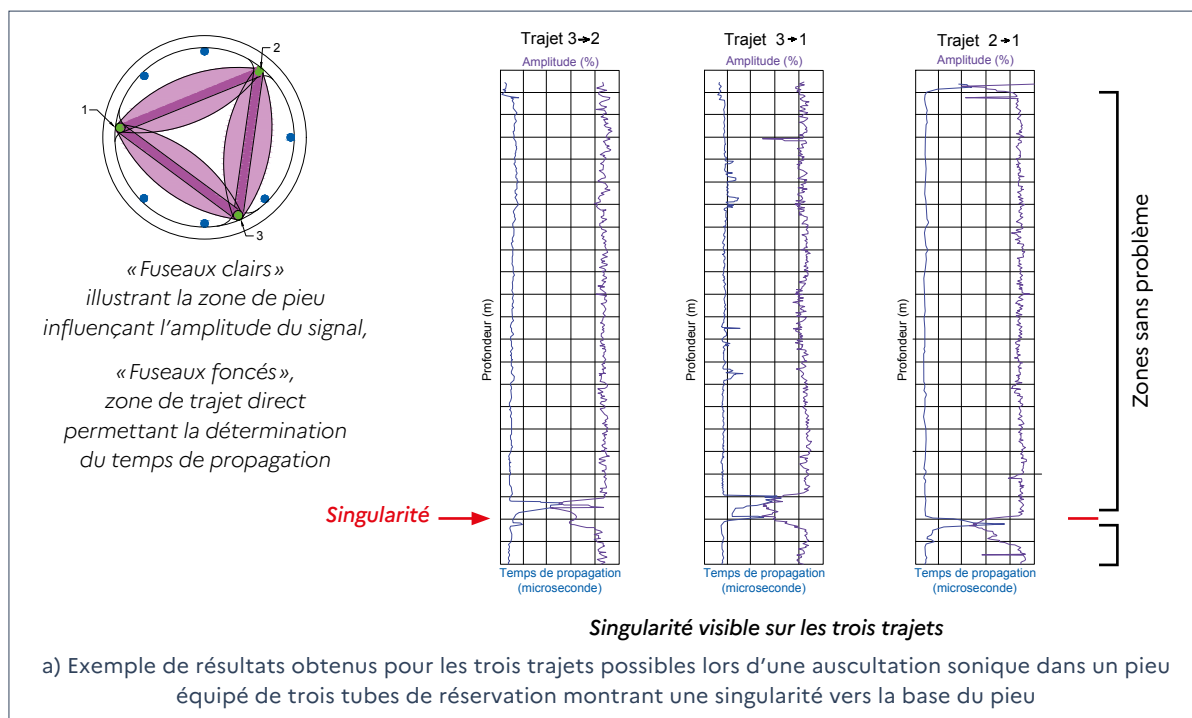


Figure 6.8 : Exemples d'enregistrement de l'amplitude et du temps sur un pieu ainsi que son interprétation (méthode sonique par transparence)



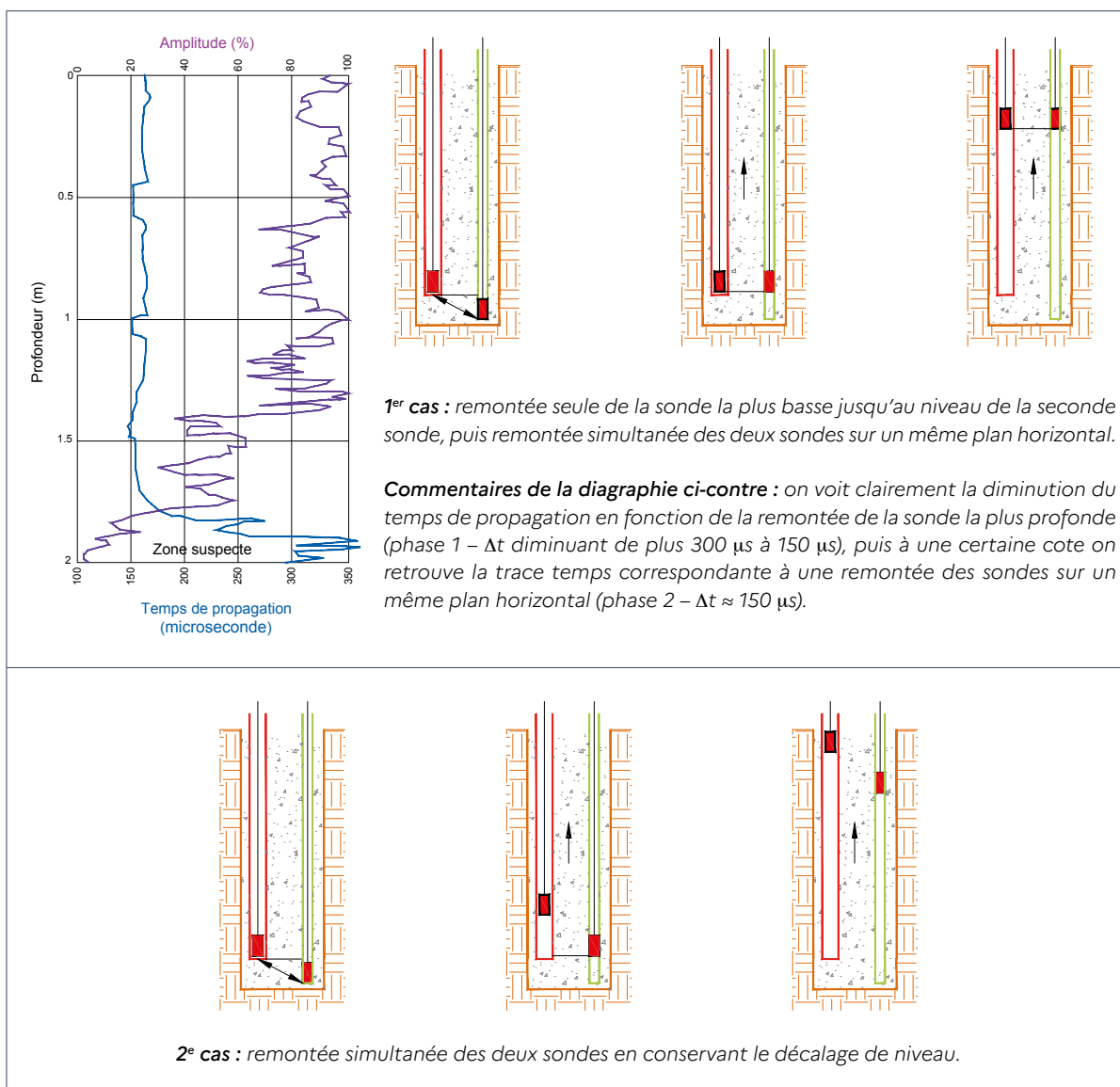
19. Afin de définir la nature de l'inclusion, il faudra faire des investigations complémentaires.

Exemple d'adaptation de la norme de la méthode sonique par transparence Cas de tubes de profondeurs différentes (Figure 6.9)

Il peut être procédé à l'auscultation à partir du fond de chacun des tubes lorsqu'ils sont de profondeurs différentes. Dès que la sonde située dans le tube le plus profond atteint l'altitude de la sonde située dans le tube le plus court (1^{er} cas de la Figure 6.9), les deux sondes peuvent être remontées sur un même plan horizontal. Cette disposition permet notamment d'ausculter une partie de la zone d'ombre située sous le tube de gros diamètre destiné au carottage. Cette disposition peut générer lors de l'analyse de la diagraphie l'apparition d'une anomalie et/ou d'une singularité. Il convient donc de remettre l'analyse dans le contexte avant de conclure.

On peut utilement conserver les sondes décalées (2^e cas de la Figure 6.9), ce qui permet de ne pas introduire de biais sur le temps de propagation. Par contre, cette solution ne permet pas d'ausculter la tête de pieu (partie qui peut par exemple être recépée).

Figure 6.9 : Schéma d'un exemple d'adaptation de la norme
Cas de tubes de profondeurs différentes, par exemple, un gros tube plus court dédié au carottage
(méthode sonique par transparence)



2.1.1.2 - Travaux accompagnant la méthode sonique par transparence

La réalisation d'auscultations par méthode sonique par transparence nécessite **des travaux préalables** de deux types :

- **la mise en place des tubes** de réservation en acier lors de l'équipement de l'armature du pieu (cf. fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») ;
- **une préparation soignée du chantier**, dont la préparation des tubes (lavage et mise en eau) et la planification de la réalisation des essais qui doivent être réalisés avant le recépage mécanique.

Les tubes de réservation sont généralement **rebouchés** par un coulis de ciment (disposition recommandée), une fois les mesures terminées et l'intégrité du fût confirmée.

2.1.1.2.1 - Recommandations concernant les tubes de réservation

Nature et position des tubes de réservation

Les tubes de réservation doivent être **reportés sur les plans d'armatures**.

Il est recommandé, pour des raisons de rigidité, d'**utiliser des tubes en acier d'un diamètre** de 50 mm intérieur et 60 mm extérieur⁽²⁰⁾ de type **manchonné vissé ou autre système permettant une étanchéité parfaite** (on déconseille à ce titre les systèmes tulipés).

Les tubes de réservation doivent :

- **en pied de fondation**, être les plus proches possibles de la base de la cage d'armature⁽²¹⁾ (≤ 100 mm du fond du pieu, excepté bien entendu pour les tubes de carottage – Figure 6.11). Les tubes de réservation doivent être fermés à leur base par un bouchon étanche (Figure 6.10) ;
- **au sommet** (Figure 6.12), dépasser de la tête des éléments de fondation avant recépage et de la plateforme de travail, de 200 à 500 mm⁽²²⁾, afin d'éviter l'obturation des tubes par des chutes de gravats et de sorte à avoir un niveau d'eau dans le tube toujours au-dessus de celui du béton lors de l'essai (Note 1). Toutefois, ils ne doivent pas dépasser exagérément de la plateforme de travail, afin de ne pas compliquer le travail des opérateurs. Ils doivent être accessibles ;
- **être parallèles** (Note 2) ;
- **ne pas être pollués** par des corps gras (problème d'adhérence du béton pouvant induire des singularités lors des contrôles).

***Note 1 :** il faut surveiller ce niveau d'eau lors de l'essai, afin que la quantité d'eau chassée par l'introduction de la sonde et du câble n'entraîne pas une baisse du niveau d'eau excessive (le niveau d'eau dans le tube doit être supérieur à celui du béton à ausculter).*

***Note 2 :** en l'absence de parallélisme (Figure 6.13) ou pire en présence de tubes tordus, le temps de propagation et l'auscultation seront biaisés.*

20. La norme d'application de l'essai requiert un diamètre minimal de 40 mm.

21. Disposition pouvant être rendue difficile lorsque la cage d'armature est rétrécie à sa base.

22. Comme spécifié dans la norme NF P94-160-1, article 6.1.

Figure 6.10 : Exemples de bouchons étanches pour les tubes de réservation**Figure 6.11 : Position des tubes de réservation à la base de la cage d'armature**

a) Disposition de tubes de réservation en pied de cage pour des pieux circulaires



b) Tubes de réservation dépassant en tête de pieux gainés pour faciliter le recépage et l'extraction du bloc de béton



c) Disposition de tubes de réservation pour des barrettes

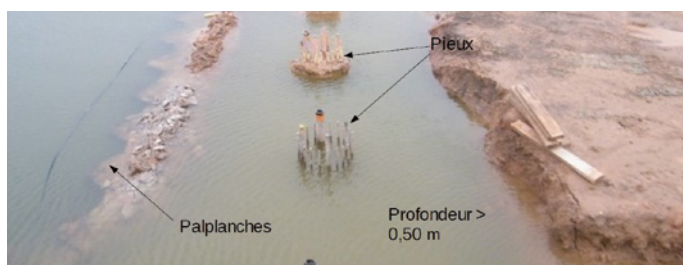
Figure 6.12 : Exemples de position de la tête des tubes



a) Plateforme bien préparée
et accessibilité assurée aux tubes de réservation



b) Exemple d'accessibilité difficile
aux tubes de réservation



c) Accessibilité difficile, voire impossible
en raison de l'inondation de la plateforme



d) Exemples de tubes trop élevés
par rapport à la plateforme



e) Tubes repérés sommairement (point vert)
et ne dépassant pas de l'élément de fondation
et problématique de stagnation d'eau sur la plateforme de travail

Figure 6.13 : Tubes de réservation non rectilignes et non parallèles induisant un temps de propagation biaisé



Nombre et disposition des tubes de réservation dans le cas des pieux forés

Dans le cas des pieux, le nombre minimal de tubes de réservation (exigé par la norme NF P94-160-1⁽²³⁾) peut être augmenté (Tableau 6.5) dans l'intérêt de l'ensemble des acteurs (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises). En effet, l'application du critère « temps de propagation » implique que l'auscultation sonore suivant un cheminement soit sensiblement représentative du trajet direct. Ainsi, l'augmentation du nombre de réservations permet non seulement d'améliorer la qualité du contrôle, mais également d'évaluer plus finement l'extension des sections singulières (cf. Figure 6.6). Néanmoins la présence d'un grand nombre de tubes peut provoquer des défauts de bétonnage, comme la présence d'un grand nombre d'armatures ; il est à ce propos recommandé de ne pas multiplier le nombre de tubes, afin de respecter l'exigence de la norme NF EN 1536+A1 (articles 7.5.2.6 et 7.5.2.7) sur les espacements horizontaux minimaux nu à nu entre barres longitudinales ou paquets de barres, les tubes étant par essence des éléments métalliques longitudinaux.

Tableau 6.5 : Recommandations sur le nombre de tubes de réservation proposé en fonction du diamètre du pieu

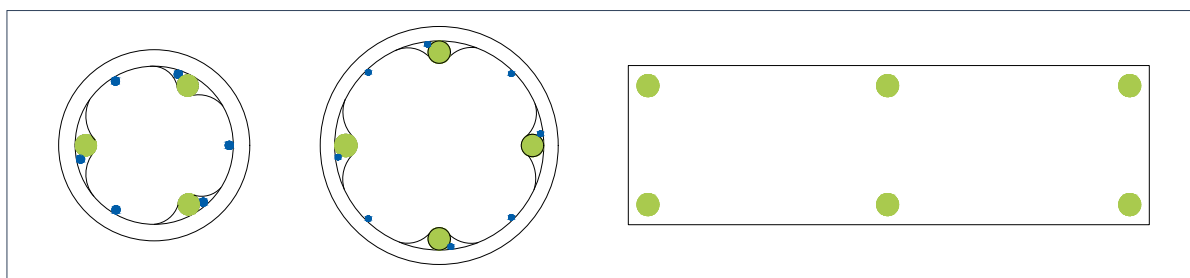
Diamètre du pieu	≤ 600 mm	≤ 800 mm	≤ 1 300 mm	> 1 300 mm
Nombre de tubes	2	3	4	5 au minimum

Nombre et disposition des tubes de réservation dans le cas des barrettes

Dans le cas des barrettes, les tubes de réservation doivent être situés dans les angles et en périphérie (Note), lieu des singularités les plus fréquentes et les plus importantes. Il est donc nécessaire d'implanter des tubes de réservation dans ces zones. On peut retenir la disposition préconisée sur la Figure 6.14, en respectant autant que possible un entraxe minimal de 0,30 m et maximal de 1,50 m.

Note : l'installation de tubes en vis-à-vis et dans les angles peut favoriser encore plus la présence d'un béton de moindre qualité et pollué. Cependant le caractère sensible de ces zones périphériques nécessite le contrôle, d'où une localisation historique des tubes dans les angles.

Figure 6.14 : Schémas de disposition de tubes de réservation en fonction de la taille des pieux/barrettes



Espacement entre les tubes de réservation

L'article 6.1 de la norme NF P94-160-1 exige que la distance entre tubes soit comprise entre 0,3 m (Notes 1 et 2) et 1,5 m (Note 3).

Note 1 : la limite inférieure de 0,3 m est une limite liée à la méthode et plus particulièrement aux incertitudes induites par la présence du tube et de la frange d'eau.

Note 2 : cette valeur rend quasi inapplicable la méthode sonore aux pieux de diamètre < 600 mm ; elle réduit le nombre de trajets possibles sur des barrettes d'épaisseur < 600 mm.

Note 3 : à contrario, la limite de 1,5 m est principalement liée à la sensibilité de la méthode.

23. La norme NF P94-160-1 préconise que pour un pieu en béton à section droite circulaire de diamètre B, le nombre de tubes à prévoir est de deux tubes si $B \leq 0,60$ m, trois tubes si $0,60 \text{ m} < B \leq 1,20$ m et quatre tubes au moins si $B > 1,20$ m.

Étanchéité des tubes de réservation

L'étanchéité des tubes de réservation **est assurée au niveau** :

- **de leurs deux extrémités** par des bouchons étanches conduisant à une fermeture hermétique (Figure 6.15) ;
- **des raccords** (cf. § 7.3 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») :
 - par des manchons vissés ; technique recommandée, car elle garantit une bonne étanchéité (Figure 5.67 dans le § 7.3 du fascicule 5),
 - par tulipage (Figure 6.15.b ci-après et Figure 5.68 du fascicule 5), système non recommandé, car il ne garantit pas l'étanchéité entre les éléments de tubes. Le raccord par tulipage doit être limité aux cas particuliers pour lesquels la mise en œuvre de manchons vissés est particulièrement difficile (assemblage de cage lors de l'équipement).

En effet, **toute perte d'étanchéité** entraîne des difficultés :

- **pour maintenir le niveau d'eau** assurant le couplage entre les sondes et le béton qui conditionne la faisabilité de l'auscultation (*Note*) ;
- **susceptibles de favoriser une pollution avec création d'inclusions** (laitance du béton) dans les tubes, ce qui peut être préjudiciable à la qualité des contrôles et présenter des risques d'accrochage pour les sondes.

⚠ Il convient **d'éviter l'utilisation de rubans adhésifs** (Figure 6.15.b) pour l'étanchéité des raccords ; en effet ils génèrent un défaut de liaison mécanique entre le tube et le béton et entraînent ainsi des singularités parasites.

Note : un niveau d'eau qui ne peut être maintenu dans le tube d'auscultation indique un béton très perméable (béton inacceptable), voire une absence de béton, ce qui constitue de toute façon un défaut majeur.

Figure 6.15 : Étanchéité des tubes de réservation



a) Bouchons étanches
des tubes de réservation



b) Rubans adhésifs pour assurer l'étanchéité
au droit d'un tulipage
⚠ à signaler avant l'auscultation sonique)

Débouchage des tubes de réservation

En cas d'obstruction des tubes de réservation, le **débouchage des tubes est généralement faisable** avec un taillant de 44 mm, mais cette opération devient compliquée, voire infaisable pour des diamètres intérieurs inférieurs à 50 mm.

Fixation des tubes de réservation à la cage d'armature

La fixation des tubes de réservation est traitée dans le § 7.3 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ».

La référence des profondeurs des tubes de réservation

Elle est désignée comme le haut du tube de réservation le plus profond.

Numérotation des tubes de réservation et référence

En règle générale, notamment si différents prestataires interviennent, il convient que la numérotation des tubes débute au niveau du tube de gros diamètre et se poursuive dans le sens horaire. En l'absence de tube de gros diamètre, il convient de marquer sur le site le tube numéroté 1 (et de numéroté les autres dans le sens horaire).

Cas des tubes de réservation prévus pour le carottage

Des réservations peuvent être également destinées à la réalisation de carottages du fond de pieux (*Note 1* et cf. § 2.2.1) ; elles sont alors usuellement de diamètre 102/114 mm et généralement arrêtées 250 à 500 mm avant la base de la cage d'armature (*Note 2*). Cette configuration se solde par une réduction significative de la densité d'auscultation sonore en fond de pieu et il est fortement recommandé de compenser ce déficit d'auscultation par un carottage systématique du fond de pieu (*Note 3*). On peut également procéder au carottage préalable, puis réaliser les auscultations soniques sur l'ensemble de la hauteur des tubes 50/60 mm, afin d'optimiser la densité d'auscultation en fond de pieux.

Pour les raisons énoncées en *Note 2*, l'utilisation du tube de carottage diamètre 102/114 mm ne doit être envisagée que pour des pieux de diamètre supérieur ou égal à 1 000 mm (*Note 4*).

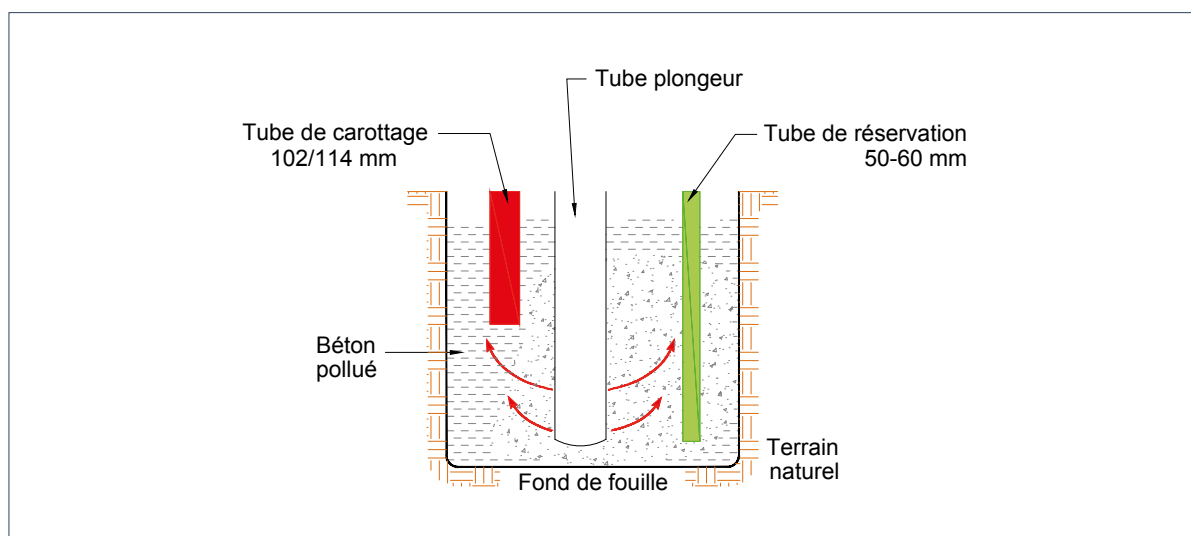
Note 1 : si des tubes de carottage sont mis en place, le carottage est alors fortement recommandé avant ou après auscultation. Avant, il permet généralement de procéder à une auscultation sonore toute hauteur dans tous les tubes de réservation, à condition que le sol en fiche de pieu soit faiblement perméable pour garantir le maintien du niveau d'eau dans les tubes (étanchéité).

Note 2 : moins il y a d'espace entre tubes, plus il y a de risques d'avoir du béton pollué sous la base de ces tubes (ceux-ci empêchant la bonne remontée du béton (Figure 6.16).

Note 3 : comme indiqué dans le § 1.3.2, il faut faire attention à l'usage du carottage, par exemple, pour des pieux ancrés dans du sable, car l'usage d'un certain débit d'eau pour refroidir l'outil délave nécessairement le sable quand le carottage perce le fond du pieu, créant un défaut au niveau de la pointe.

Note 4 : les désordres se trouvent souvent en pointe de pieu. Ce tube de carottage peut à la fois favoriser l'inclusion de béton pollué et permettre son auscultation pour identifier cette dernière... Plus le diamètre du pieu est important et moins les risques d'inclusion à la base du pieu liés à la présence du tube sont vraisemblables.

Figure 6.16 : Désordres occasionnés par le tube de diamètre 102/114 mm [6.3]



2.1.1.2.2 - Préparation du chantier d'auscultation pour la méthode sonique par transparence

⚠ Les auscultations soniques doivent être effectuées avant recépage et nécessitent une préparation minimale de cette phase du chantier. Cette préparation doit être assurée sous la responsabilité du titulaire du marché.

Préparation au niveau des tubes de réservation avant auscultations soniques

Un soin particulier doit être apporté à la pose des tubes de réservation et à leur destination d'usage :

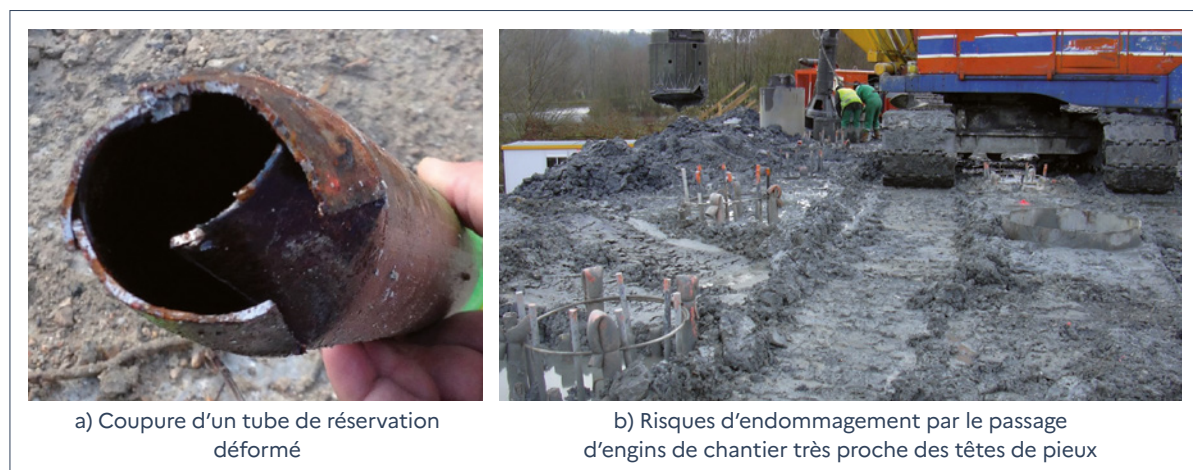
- **les tubes** doivent être :
 - propres et exempts de souillures susceptibles de nuire à l'adhérence tube-béton. Pour cela, les cages d'armature ne doivent pas être en contact direct avec le sol au cours de leur stockage et si nécessaire les tubes seront dégraissés avant leur mise en place,
 - lavés et remplis d'eau claire, juste avant les mesures ;
- **la partie des tubes dépassant de la tête des pieux** (de 200 à 500 mm) doit être intacte. En cas de déformation (*Notes 1 et 2*) ou d'inclusions empêchant le passage des sondes, des dispositions particulières doivent être prises.

Note 1 : lorsque les tubes sont pincés et/ou tordus (Figure 6.17.a), il est possible, entre autres :

- d'utiliser une barre à mine **pour refaire la section du tube** depuis l'intérieur ;
- **de découper des têtes de tube** sous la partie pincée, puis remise en forme de la tête pour emboîtement dans les tubes (Figure 6.17.a). En cas de nécessité de recouper les tubes d'auscultation, le découpage à la disqueuse doit être suivi d'une finition des tubes (risque d'endommagement des câbles à cause des bavures). Le découpage au chalumeau est à éviter.

Note 2 : le phasage du chantier doit tenir compte de la présence de ces tubes, afin de limiter les risques d'endommagement notamment à cause de la circulation des engins de chantier (Figure 6.17.b).

Figure 6.17 : Déformation des tubes de réservation



Travaux préparatoires avant auscultations soniques

Des **travaux préparatoires** doivent précéder les auscultations. Ceux-ci consistent, sauf contraintes particulières, à :

- **araser les réservations** à au plus 0,50 m au-dessus de la plateforme de travail pour éviter le risque d'accrochage des tubes lors du passage d'engins à proximité ;
- **repérer les dispositifs** (soucoupes ou fourreaux) pour le recépage chimique (ciments expansifs – cf. § 5.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») **ou toute autre réservation** laissée dans le béton pouvant masquer ou perturber les signaux ;
- **assurer l'accès aux têtes de tubes, à pied d'œuvre et hors d'eau**, qui doit être possible sans risques, ainsi qu'un accès avec véhicule utilitaire à une distance permettant le transport du matériel (contrairement à ce qui est montré sur les Figures 6.12.b et 6.12.c) ;
- **informer les opérateurs d'essais** des risques du chantier, particulièrement en cas d'arases basses ;
- **s'assurer que les travaux pouvant générer des interférences avec les essais** (vibrofonçage, compactage, recépage mécanique...) soient réalisés à des distances raisonnables.

Si possible, il est préférable que le **béton de propreté** soit en place avant la réalisation des auscultations soniques.

Après les auscultations soniques

Conformément à l'article 7.4 de la norme NF P94-160-1, ne peuvent être réalisés qu'après acceptation de l'élément de fondation par le maître d'œuvre :

- le remplissage des tubes avec un coulis de ciment ;
- le recépage du pieu et la découpe des tubes d'auscultation.

2.1.1.2.3 - Principaux avantages et inconvénients de la méthode sonique par transparence

Avantages de la méthode sonique par transparence

Les avantages de la méthode sonique par transparence sont :

- **les critères simples de réception** : la définition d'une singularité⁶⁽²⁴⁾ est donnée dans la norme NF P94-160-1, à l'aide de critères simples n'engendrant ainsi aucune ambiguïté ;
- **l'adaptation à toute nature des terrains** : la méthode sonique par transparence n'est tributaire d'aucune contrainte liée à la nature du sol ;
- **l'adaptation à tous types de pieux** : la méthode permet d'ausculter tous types de pieux forés, quels que soient leur élancement et leur géométrie en plan⁽²⁵⁾, mais également d'ausculter les barrettes ;
- **la possibilité d'ausculter toutes les parties** : la méthode par transparence permet d'ausculter un pieu fracturé sous la partie endommagée ;
- **la localisation de la singularité** : l'adaptation de la méthode (passages avec sondes décalées) permet de localiser l'anomalie en profondeur ;
- **sa complémentarité possible avec les autres méthodes** : l'auscultation sonique par transparence par ses réservations autorise l'utilisation des méthodes complémentaires suivantes : gammamétrie et carottage en dessous des tubes ;
- **la vérification potentielle de la qualité des réparations par injection** à l'aide d'auscultations post-traitement ;
- **une meilleure détermination du niveau de recépage** : la norme impose que les pieux ne soient pas recépés avant les essais soniques (contrairement aux méthodes par réflexion et par impédance), ce qui présente l'avantage de ne pas devoir attendre la phase de recépage, et, de plus, de permettre la détermination des profondeurs de recépage nécessaires (identification de la frange de béton pollué en tête) ;
- **la possibilité de réaliser certaines réparations** par les tubes de réservation : possibilité de réparer un défaut en pointe en procédant à une injection de coulis par les tubes de réservation, ce qui évite parfois un carottage du pieu délicat et coûteux.

Inconvénients de la méthode sonique par transparence

Les inconvénients de la méthode sonique par transparence sont :

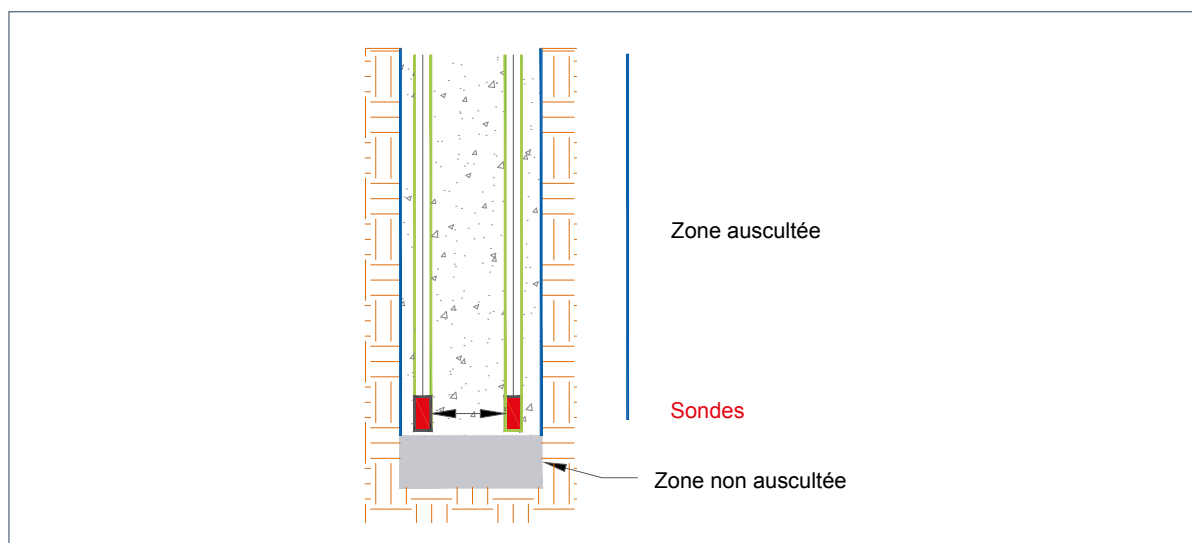
- **le ferrailage nécessaire du pieu** : la méthode nécessitant la mise en place de tubes de réservations, impose que le pieu soit ferrailé sur toute sa hauteur ;
- **la difficulté à détecter une éventuelle fracture du fût** : la méthode par transparence ne permet pas toujours de détecter des fractures horizontales, sauf à recommencer l'auscultation en décalant les sondes, en cas d'expertise ;
- **l'auscultation partielle de la section du fût** : le signal recueilli est représentatif du béton situé entre deux tubes. Ainsi une pathologie présente en dehors des cheminements directs ne pourra être que difficilement détectée (cf. § 2.1.1.1 Figure 6.6). Dans le cas d'un pieu équipé de trois tubes, une singularité de faible volume située en partie centrale du fût risque également de ne pas être détectée. Cet inconvénient doit cependant être modulé par le fait que l'amplitude du signal pourrait être assez largement atténuée par la présence de la singularité. Au-delà de trois tubes, la section centrale du pieu est auscultée via les trajets diagonaux (cf. § 2.1.1.1 Figure 6.3) ;

24. La norme NF P94-160-1 (article 8.4) fixe des critères de détermination d'une singularité, qui sont rappelés plus loin dans le paragraphe « Résultats de l'essai par la méthode sonique par transparence ».

25. Attention, les pieux de grands diamètres (> 1,6 m) ne sont au mieux que difficilement auscultables.

- **l'auscultation de l'élément de fondation limitée à la longueur des tubes** (Figure 6.18) : la méthode sonique nécessite la mise en place préalable de tubes de réservation pour le passage des sondes. L'extrémité inférieure de l'élément de fondation ne pourra pas être auscultée correctement si la réservation est positionnée à une cote trop haute par rapport au fond de forage (cas des réservations pour les sondages carottés) ou si l'un des tubes est obstrué en un point donné du tube au-dessus du fond de pieu. Par ailleurs, il existe sur le marché différents types de sondes, intégrant des positionnements de capteurs différents (position plus ou moins haute), ce qui fait que certaines sondes pourront mieux détecter des défauts de fond de pieu (la zone non auscultée pouvant atteindre les 150-200 mm par rapport au fond du tube). Il s'agit là d'une source de désaccord possible en cas de contrôles contradictoires effectués avec des matériels d'auscultation sonique différents ;
- **le temps de réalisation du contrôle** : la méthode sonique par transparence nécessite l'installation d'un matériel, plus important que celui des méthodes par réflexion et par impédance, ce qui peut avoir une incidence sur la durée du contrôle, notamment si la préparation de l'intervention a été mal réalisée.
⚠ Le volume d'auscultation journalier est variable (de 500 à 1 500 mètres linéaires de diagraphie) en fonction du nombre de mises en station sur pieux, des conditions d'accès mobilisant une équipe d'un à deux techniciens. Dans tous les cas, il est impératif d'intégrer le temps des essais dans le planning des travaux ;
- **le nombre de tubes d'auscultation limité pour les pieux de « petit » diamètre** : sur des pieux de diamètre inférieur ou égal à 600 mm, il ne peut généralement être mis en œuvre que deux réservations, ce qui limite l'auscultation à un unique trajet. De ce fait la méthode apparaît, dans ce cas, peu pertinente.

Figure 6.18 : Auscultation limitée par la longueur des tubes de réservation
(méthode sonique par transparence)



2.1.2 - MÉTHODES PAR RÉFLEXION ET IMPÉDANCE

2.1.2.1 - Principe des méthodes par réflexion et impédance

2.1.2.1.1 - Informations communes aux méthodes par réflexion et par impédance

Objectif des méthodes par réflexion et par impédance

Ces méthodes permettent généralement de déterminer :

- **la nature et la localisation des défauts** de structures de fondation (bulbes, strictions, fracturations, hétérogénéités...) ;
- **la longueur du pieu** (⚠ sous réserve de connaître la célérité des ondes dans le béton et qu'elle soit constante dans le pieu).

Conditions d'utilisation des méthodes par réflexion et par impédance

Ces méthodes s'appliquent **aux éléments de fondation de section droite, circulaire ou carrée**, inclinés ou non, et **dont la tête est accessible**. Les deux méthodes s'appliquent essentiellement aux pieux, puisque l'ensemble de la théorie s'appuie sur une hypothèse de propagation uniaxiale des signaux qui ne prend en considération que l'onde longitudinale et **ne peuvent donc s'appliquer aux barrettes**. Le domaine d'application est **un élanement de pieu compris entre 10 et 30, pour un diamètre maximum de 1 000 mm**⁽²⁶⁾.

Par application des normes d'essai NF P94-160-2 (méthode par réflexion) et NF P94-160-4 (méthode par impédance), elles doivent être **mises en œuvre** :

- **après recépage** (cf. § 5.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») et **préparation de la tête de pieu** (cf. § 2.1.2.2) ;
- **avant mise en place des massifs**⁽²⁵⁾ ;
- **sur des éléments âgés d'au moins 7 jours**⁽²⁵⁾.

Il s'agit de **méthodes comparatives** qui prennent en compte à la fois les caractéristiques du sol et la qualité du béton, impliquant un nombre minimum de pieux auscultés (cinq selon [6.3]) dans un environnement homogène pour dissocier la signature du sol de celle du béton.

Principe des méthodes par réflexion et par impédance

Ces méthodes reposent sur la génération d'une onde mécanique émise depuis la tête des pieux, obtenue en provoquant un choc avec un marteau. **L'onde mécanique descendante obtenue donne naissance à une onde réfléchie (montante) au droit** :

- **des discontinuités** éventuelles **dans le fût** (correspondant à une variation d'impédance⁽²⁷⁾ – Note 1) ;
- **des zones de variation du frottement latéral** ;
- **du fond de pieu** (Note 2).

La méthode par réflexion et celle par impédance sont complémentaires (cf. ci-après « Deux approches complémentaires : méthodes par réflexion et impédance »).

=> Ces méthodes prennent en compte à la fois les caractéristiques du sol et la qualité du béton.

Note 1 : les variations d'impédance sont liées à la modification du module du béton, de la section du pieu, de la modification du frottement latéral ainsi que de la célérité de l'onde dans le béton.

Note 2 : suivant que la fondation est considérée libre ou encastrée en pied, l'onde de fond de pieu est réfléchie soit en compression, soit en traction (cf. théorie des cordes vibrantes).

Appareillage des méthodes par réflexion et par impédance (Figure 6.19)

La chaîne de mesures est constituée :

- **d'un marteau** générant le choc, qui est instrumenté pour la mesure de la force dans le cas de l'essai par impédance ;
- **d'un capteur de vitesse ou capteur d'accélération**, placé en tête de pieu, afin d'évaluer la vitesse particulière⁽²⁸⁾ en tête ;
- **d'une centrale d'acquisition et d'un ordinateur**, permettant l'acquisition, l'enregistrement et la restitution des signaux.

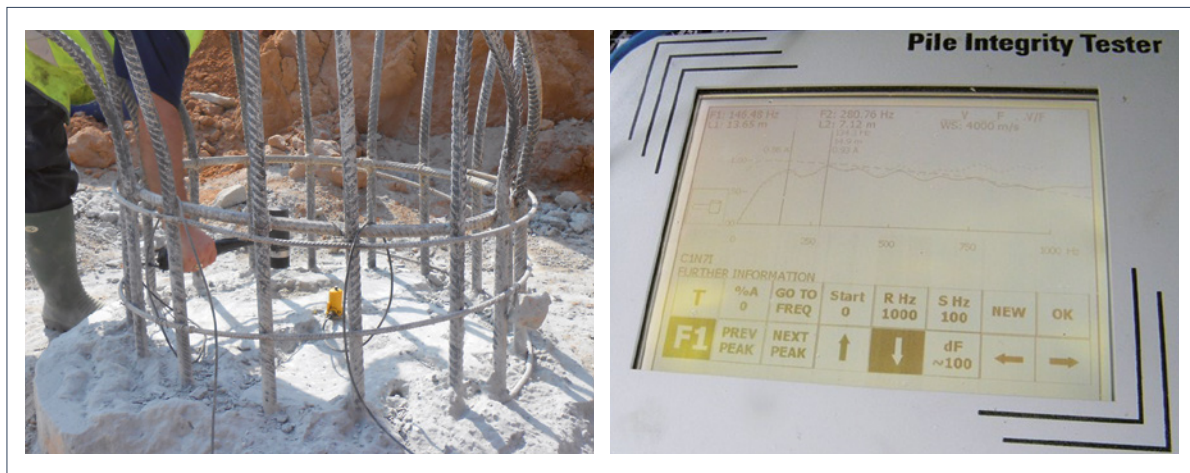
26. Il est possible dans certaines conditions d'adapter la procédure d'essais pour déroger à certains de ces critères (âge des pieux < 7 jours, essais sur massifs, diamètres supérieurs à 1 000 mm, élanement supérieur à 30...) sous réserve d'une argumentation technique dûment validée par le maître d'œuvre ou le représentant technique du maître d'ouvrage.

27. L'impédance mécanique d'un pieu, selon la **norme NF P94-160-4**, est le rapport entre la force F appliquée en tête du pieu, lors de l'essai, et la vitesse particulière « v » d'un point en vibration en tête de pieu.

28. « La vitesse particulière est la vitesse de déplacement des particules constituant le béton après impact du marteau en tête de pieu. » [6.3]

La chaîne de mesures complète doit faire l'objet d'une **vérification périodique semestrielle** qui doit être en cours de validité lors des essais.

Figure 6.19 : Exemple d'appareillage pour l'auscultation par réflexion ou impédance
(à gauche, le géophone en jaune au centre de la cage d'armature et le marteau, et à droite l'unité d'acquisition – Pour la préparation du support au droit du géophone, cf. Figure 6.24)



Données indispensables pour le traitement des méthodes par réflexion et par impédance

Les informations indispensables à l'analyse des résultats et à communiquer par le chantier sont :

- la **géométrie des pieux testés** (diamètres et longueurs théoriques) ;
- la **coupe de sol géotechnique**, afin de distinguer les réflexions liées au pieu de celles liées aux interfaces de sol ;
- les **hauteurs d'armatures** ;
- les **particularités des pieux** testés tels que les chemisages, les éventuels incidents de forage ou de bétonnage.

Deux approches complémentaires : méthodes par réflexion et par impédance

L'analyse des résultats peut être menée par **deux approches très complémentaires** :

- une première approche est la « **méthode par réflexion** » (la norme NF P94-160-2), qui consiste à **étudier les variations de vitesse particulière en fonction du temps** ; on peut ainsi dresser un profil du pieu sous réserve de connaître le contexte géotechnique. L'analyse de la méthode par réflexion dans le seul domaine fréquentiel, bien qu'elle soit permise par la norme, n'est pas recommandée puisqu'elle ne permet pas d'accéder aux valeurs d'admittance caractéristique pour l'ensemble du pieu ;
- la seconde approche, dite « **méthode par impédance** » (la norme NF P94-160-4), qui consiste à **étudier le régime vibratoire par une analyse fréquentielle du signal**. Cette analyse, plus mécanique que la méthode par réflexion, présente l'avantage de proposer des estimations des valeurs de paramètres mécaniques : variation de la fréquence (fréquence dominante et harmoniques), longueur mesurée, raideur du système sol-pieu⁽²⁹⁾ et admittances mécaniques (admittance moyenne, admittance maximale).

La **complémentarité de ces méthodes**, ainsi que le fait qu'elles puissent être réalisées avec le même signal de base, donc le même matériel, conduisent à recommander de les mener conjointement. Sauf à ne pas pouvoir faire autrement, ces deux méthodes s'appliquent préférentiellement sur un nombre important de pieux dans des contextes comparables. En effet, plus le nombre d'échantillons est important, plus les incertitudes diminuent.

29. Cette raideur ne constitue pas un paramètre mécanique véritable, mais uniquement un indicateur de la qualité de la raideur de la fondation, elle n'est pas associée à un critère d'acceptation explicite par la norme. Elle illustre la raideur du système sol-pieu pour des fréquences faibles et des niveaux de sollicitations faibles.

2.1.2.1.2 - Méthode par réflexion

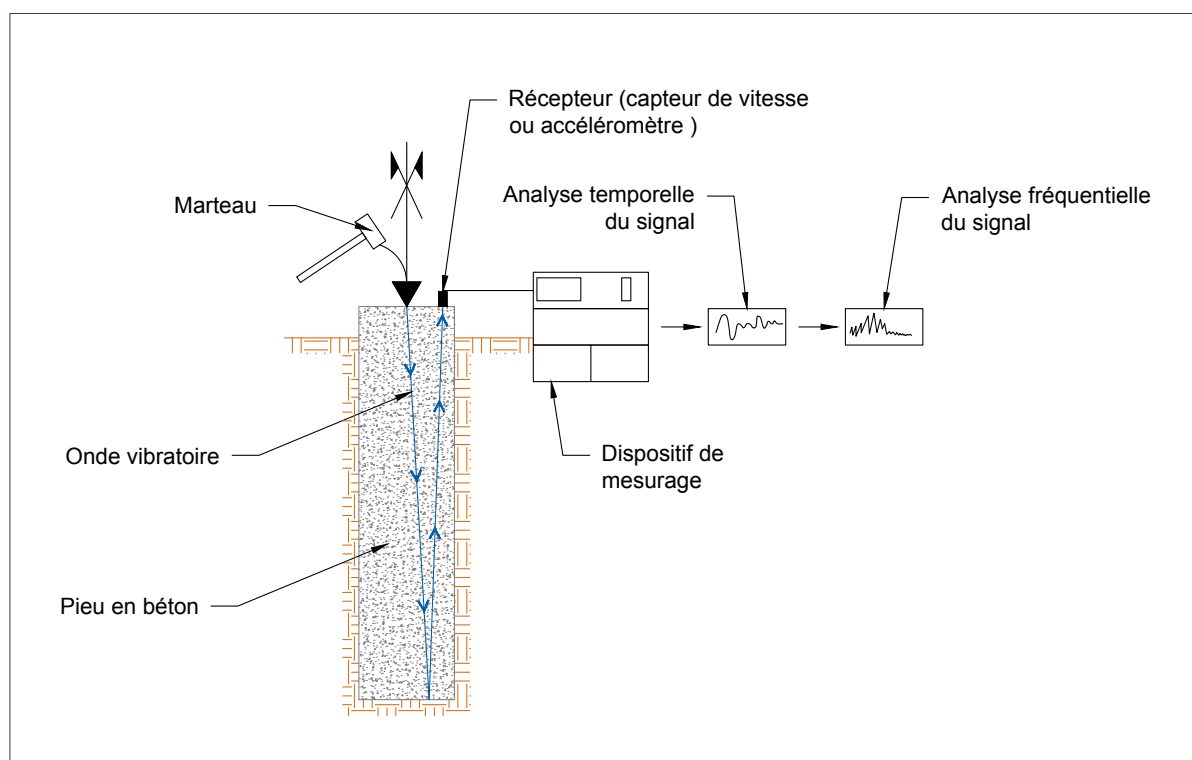
Principe de la méthode par réflexion

Cette méthode, qui fait l'objet de la norme NP P94-160-2, dont le principe est donné sur la Figure 6.20, consiste à étudier l'évolution de la vitesse particulaire de l'onde réfléchi en fonction du temps.

La célérité de l'onde dans le béton est généralement comprise entre 3 500 et 4 500 m/s. Sa détermination est habituellement calée sur les variations de frottement axial déduites de la coupe géotechnique. Ce calage de la vitesse de propagation sur la signature⁽³⁰⁾ du sol améliore la précision sur la vitesse de propagation et par conséquent celle sur la profondeur (de l'ordre de 5 à 10 % en fonction du nombre de tests réalisés). Ainsi, pour s'assurer d'une analyse conforme, il convient que les éléments du dossier géotechnique soient fournis. En l'absence de données géotechniques, l'article 6 de la norme NF P94-160-2 propose de retenir la valeur par défaut de 4 000 m/s.

Bien qu'elle soit permise par la norme, l'analyse de la méthode par réflexion dans le seul domaine fréquentiel n'est pas recommandée, puisqu'elle ne permet pas d'accéder aux valeurs d'admittance caractéristique pour l'ensemble du pieu.

Figure 6.20 : Schéma de principe de la méthode par réflexion
(extrait de la norme NF P94-160-2)



Mode opératoire de la méthode par réflexion

L'essai consiste à **générer trois chocs successifs** au marteau en tête de pieu.

Vérification de la qualité des signaux de la méthode par réflexion

Pour que l'essai soit réputé interprétable, il convient que les trois traces soient similaires.

30. La signature du sol reflète l'incidence des caractéristiques mécaniques du sol sur la courbe de réponse. [6.3]

Résultats de l'essai de la méthode par réflexion

Après filtrage des variations liées à la signature du sol, cette méthode permet :

- **d'identifier :**
 - les variations de diamètre ou de frottement latéral, de manière qualitative,
 - les niveaux de cassure ou de fissuration du pieu ;
- **de déterminer la longueur du pieu⁽³¹⁾.**

La Figure 6.22 suivante donne des exemples d'interprétation de signaux.

2.1.2.1.3 - Méthode par impédance

Principe de la méthode par impédance

Cette méthode, qui fait l'objet de la norme NF P94-160-4, dont le principe est donné sur la Figure 6.21, consiste à étudier le régime vibratoire par une analyse fréquentielle du signal, c'est-à-dire le graphique de l'admittance « v/F » en fonction de la fréquence ($1/t$).

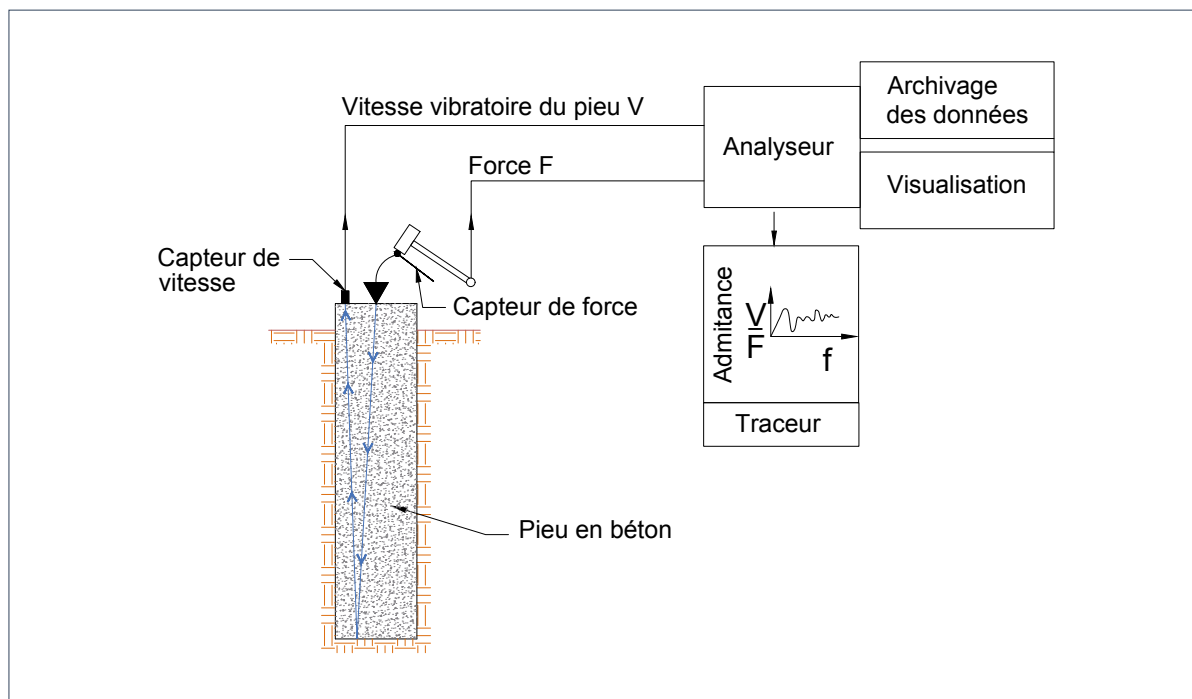
La **vitesse particulière** d'un point en vibration en tête de pieu « v » est obtenue après intégration du signal dans le temps.

Le marteau est instrumenté afin de mesurer la **force appliquée en tête de pieu « F »** lors de l'essai.

Mode opératoire de la méthode par impédance

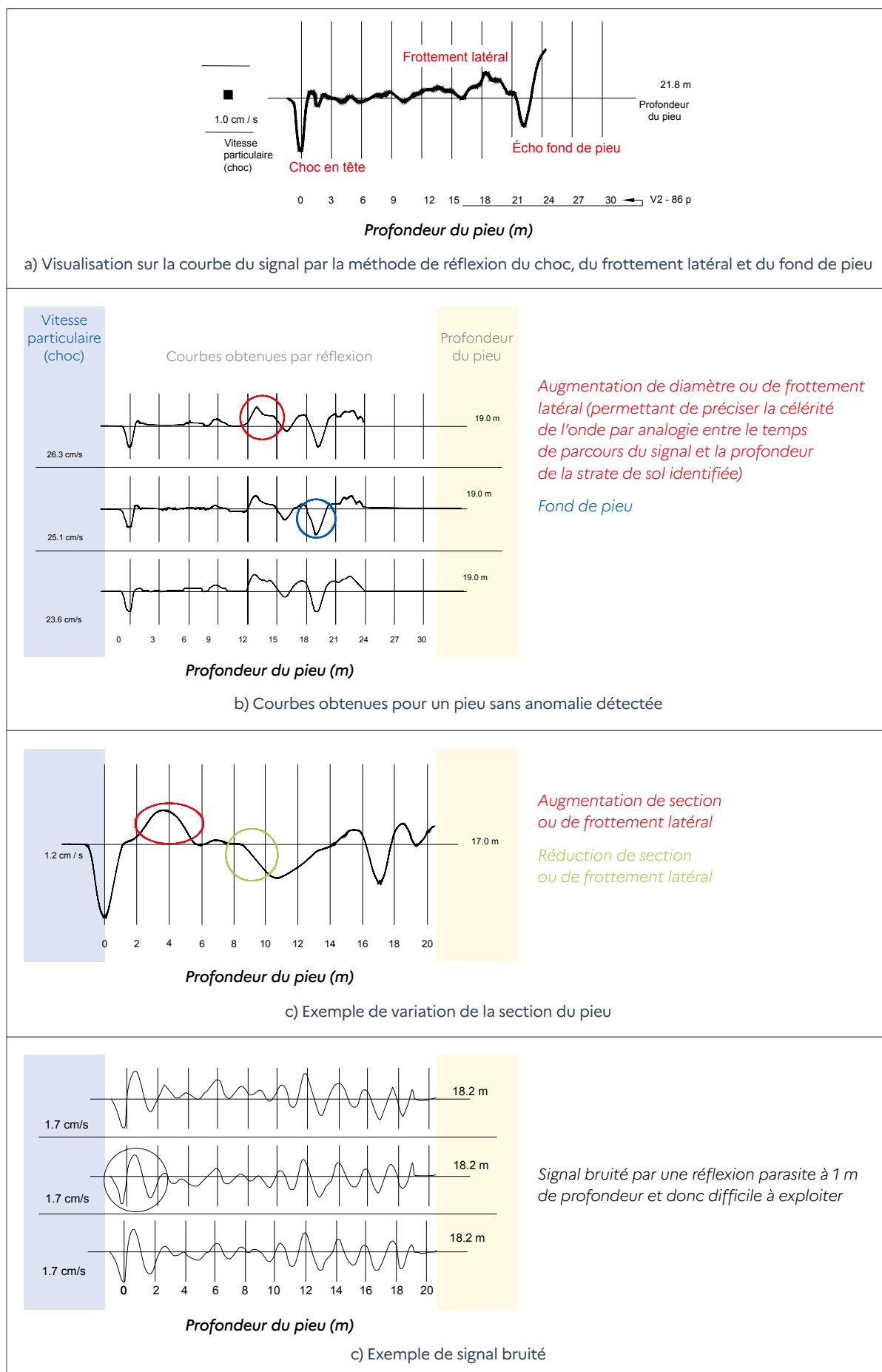
La méthode consiste à **mettre le pieu en vibration avec un choc au marteau** (force « F » enregistrée) provoqué en tête et dans la direction de son axe, et à enregistrer la réponse vibratoire « v » du pieu sous l'effet de cet impact (Figure 6.21).

Figure 6.21 : Schéma de principe de la méthode par impédance
(extrait de la norme NF P94-160-4)



31. Sous réserve d'avoir pu caler la célérité des ondes et d'avoir une célérité constante dans le pieu.

Figure 6.22 : Exemples d'interprétation de signaux obtenus par la méthode par réflexion



Vérification de la qualité des signaux de la méthode par impédance

La qualité des signaux acquis ne permet pas toujours d'interpréter l'essai. Il existe cependant **des marqueurs simples** permettant de s'en assurer :

- **l'acquisition de trois courbes identiques** lors de trois chocs au marteau consécutifs ;
- **sur la courbe de réflexion** dans le domaine temporel :
 - l'analyse de la courbe (phénomènes aléatoires de bruits),
 - la proportionnalité entre force et vitesse caractéristique du système marteau-pieu ;
- **sur la courbe d'impédance**⁽³²⁾ dans le domaine fréquentiel :
 - l'identification d'harmoniques distinctes⁽³³⁾,
 - la pente à l'origine sur le signal.

⚠ Les deux premiers critères n'étant identifiables que sur la courbe de réflexion dans le domaine temporel, il est conseillé, même si l'interprétation n'est pas faite, d'exiger la production de cette courbe pour vérifier que l'essai est bien interprétable.

Résultats de l'essai de la méthode par impédance

L'analyse de la courbe d'admittance « v/F »⁽³⁴⁾ dans le domaine fréquentiel porte sur trois paramètres (Figure 6.23) :

- **les variations de fréquence** :
 - entre minima ou maxima successifs de la courbe – afin de calculer la longueur du pieu et de la comparer à la longueur théorique communiquée,
 - permettant de détecter d'autres régimes vibratoires sur la courbe, mais avec moins de précision que la méthode par réflexion :
 - les éventuels niveaux de cassure ou de fissuration sur le pieu,
 - es éventuels niveaux de variation de diamètre du pieu,
 - d'autres niveaux particuliers (chemisage...) ;
- **la raideur du système sol-pieu**, évaluée à partir de la pente aux basses fréquences de la courbe. Ce paramètre reste très qualitatif, l'énergie du marteau ne permettant pas de mobiliser suffisamment l'interaction sol-pieu. Cette grandeur ne peut donc prétendre représenter pleinement la raideur réelle du système, mais peut toutefois constituer un indice révélateur sur la géométrie du pieu. Cette notion peut renseigner sur le contact du pieu avec le sol environnant, et notamment en pointe ;
- **l'admittance mécanique caractéristique « $(v/F)_c$ »** de la courbe correspondant à la valeur moyenne des maxima⁽³⁵⁾ et minima successifs de la courbe d'admittance. La valeur obtenue est comparée à l'admittance théorique, dont le calcul suppose une hypothèse sur la masse volumique du béton ; en l'absence de données, l'article 6 de la norme NF P94-160-4 préconise de retenir une masse volumique de 2 400 kg/m³. Cette comparaison permet de détecter :
 - les variations de section de la fondation,
 - les variations de qualité du matériau qui la constitue.

L'analyse de la réponse en fréquence consiste pour l'opérateur à identifier les fréquences propres de vibration du pieu sur sa hauteur totale.

Une hypothèse sur la vitesse de propagation des ondes planes dans le béton doit être posée ; la norme préconise 4 000 m/s en l'absence de données.

32. « L'impédance (exprimée en newton-seconde par mètre) est déterminée par le rapport entre la force générée par le choc exercé en tête de pieu et la vitesse particulière du matériau. L'impédance est fonction des caractéristiques mécaniques, géométriques et physiques du béton. » [6.3] Elle est donc fonction des caractéristiques du pieu et du terrain environnant.

33. L'écho du fond de pieu est d'autant plus visible que la différence d'impédance entre le terrain et la base du pieu est importante. [6.2]

34. Rappel : « v » est la vitesse particulière d'un point en vibration en tête de pieu et « F » la force appliquée en tête du pieu, lors de l'essai (article 2.1 de la norme NF P94-160-4).

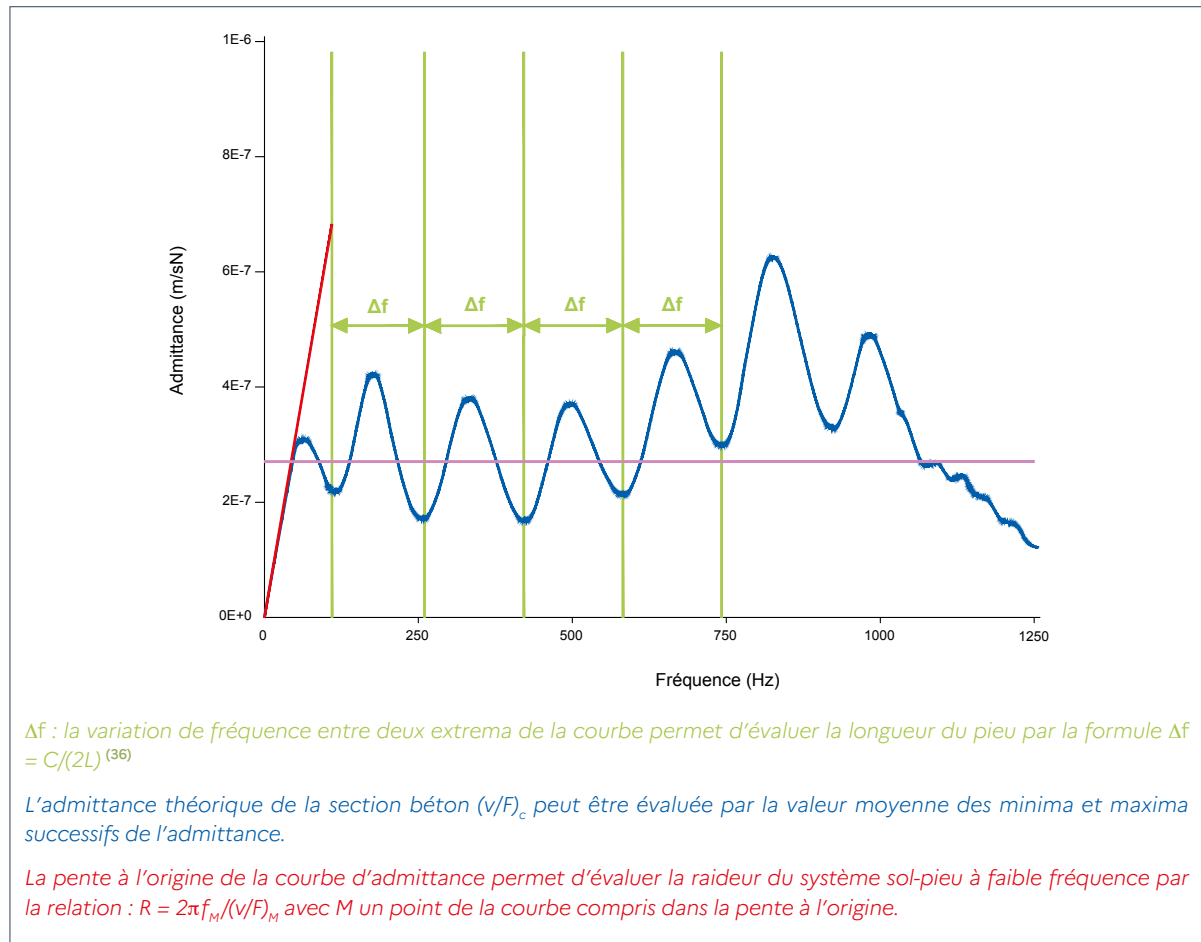
35. Les pics d'admittance correspondent aux temps d'arrivée de l'onde réfléchie, caractéristiques des singularités éventuelles et du fond de pieu.

Renseignements obtenus à partir des trois paramètres de l'analyse fréquentielle

L'analyse complémentaire de ces trois paramètres (fréquence, raideur, admittance caractéristique) apporte les renseignements suivants sur d'éventuelles anomalies de la fondation :

- la position en profondeur ;
- la distinction entre les défauts liés à la qualité du matériau et ceux liés à la géométrie de la fondation ;
- la détermination des variations de section ou de qualité du matériau ;
- la suspicion, dans des cas favorables, des défauts de contact, en particulier en pointe.

Figure 6.23 : Exemple d'interprétation avec raideur, admittance et régime vibratoire
(méthode par impédance)



2.1.2.2 - Travaux préparatoires des méthodes par réflexion et impédance

Préparation de la tête de pieu pour les méthodes par réflexion et impédance

L'instrumentation se fait sur la tête de pieu recépée et sans eau. Après recépage des pieux pour supprimer le béton pollué ou fissuré en tête, il convient de préparer deux zones de surfaces planes⁽³⁷⁾ (50 à 100 mm de diamètre) (Note) :

- une au centre de la section, pour le choc d'impact ;
- une en périphérie, positionnée à l'intérieur du périmètre défini par les armatures, pour le capteur de vitesse ou d'accélération. (Figure 6.24).

36. « C » étant la célérité des ondes planes dans le béton (exprimée en m/s) et « L » est la distance entre le point d'émission et le point de réflexion de l'onde vibratoire (article 2.2 de la norme NF P94-160-4).

37. Pour un bon couplage entre l'accéléromètre et le béton.

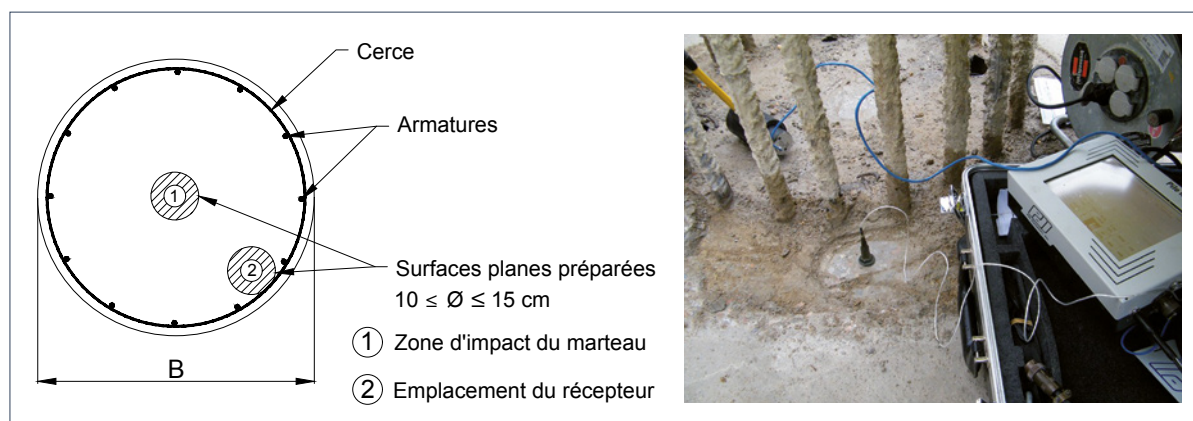
La bonne pratique de l'essai implique :

- l'application d'un produit couplant spécifique (graisse multi-usage, gel silicone...) entre le capteur de vitesse et le béton pour assurer la réception des ondes mécaniques ;
- la réalisation d'au moins trois essais successifs et enregistrés dont les résultats doivent être exploitables et semblables (répétabilité de l'essai).

⚠ La présence de béton de propreté peut introduire une vibration secondaire sur les courbes des essais qui peut avoir une incidence sur les résultats.

Note : une préparation par meulage des zones d'impact du marteau et d'application du capteur est préconisée. L'expérience montre que la mise en place de galettes de mortier en surface de pieux pour la pose des capteurs est à proscrire.

Figure 6.24 : Schéma de la tête d'un pieu préparé pour l'essai par la méthode par impédance
(extrait de la norme NF P94-160-4)



Préparation minimale du chantier pour les méthodes par réflexion et par impédance

La réalisation des essais par réflexion et par impédance mécanique nécessite **une préparation minimale du chantier**, qui doit être assurée sous la responsabilité du titulaire. Il s'agit :

- de l'accessibilité des têtes de pieu ;
- de la sécurisation de l'accès aux têtes de pieux pour les essais ;
- du recépage du béton pollué ou fissuré en tête de pieu – ⚠ le recépage définitif peut être réalisé après l'essai ;
- de l'absence d'eau sur les zones de choc au marteau et de pose du capteur ;
- d'un plan de repérage des pieux à ausculter si possible conforme au plan « bon pour exécution ».

2.1.2.3 - Principaux avantages et inconvénients des méthodes par réflexion et par impédance

Avantages des méthodes par réflexion et par impédance

Les avantages des méthodes par réflexion et par impédance sont :

- la rapidité et la simplicité de l'essai : sous réserve que la tête de pieu soit soigneusement préparée, ce qui est indispensable pour l'obtention d'un signal exploitable, la mise en œuvre de ces méthodes est rapide. ⚠ Cependant en cas de doutes sur la qualité de la fondation, le temps d'ingénierie nécessaire à l'interprétation de l'auscultation peut s'avérer important (prise en compte de la signature du sol, analyse comparative entre réflexion et impédance...) ;
- la totalité de la section auscultée : les méthodes par réflexion et par impédance donnent une imagerie globale, de type « volumique » de la fondation sur la totalité de sa section ;
- la détection des ruptures du fût : une rupture de l'élément de fondation sera décelée aisément par ces méthodes ;
- l'auscultation possible des pieux partiellement armés : l'auscultation par réflexion et par impédance est possible avec des pieux partiellement armés, d'autant que l'expérience montre que la présence des armatures ne modifie que faiblement la valeur d'impédance globale du milieu (moins de 20 %).

Inconvénients des méthodes par réflexion et par impédance

Les inconvénients des méthodes par réflexion et par impédance sont :

- **l'absence de critères normatifs de réception** : les normes d'application des méthodes par réflexion (NF P94-160-2) et par impédance (NF P94-160-4) ne définissent pas la notion de singularité et donc ne donnent pas de critères objectifs de recevabilité de la fondation, impliquant nécessairement une très bonne expérience pour pouvoir être mises en œuvre et interprétées. Par conséquent, l'analyse de ce type d'auscultation fait appel (notamment dans les cas les plus litigieux) à un avis d'expert ;
- **la longueur potentiellement limitée de pieu ausculté** : dans le cas d'un pieu présentant une rupture franche intéressant toute sa section ou un gros défaut, les méthodes par réflexion et par impédance ne permettent généralement pas d'ausculter le reste du fût notamment lorsque l'onde est entièrement réfléchi par ce premier obstacle.
 ⚠ Dans le cadre des applications des méthodes par réflexion et par impédance, l'hypothèse sur la célérité réelle de l'onde implique une incertitude minimale de l'ordre de 10 % sur la longueur du pieu. En absence de données géotechniques, pour la méthode par impédance, l'incertitude peut atteindre 15 % ;
- **l'absence de localisation d'une anomalie dans la section de pieu** : il n'est pas possible de positionner l'anomalie dans la section du pieu ;
- **l'absence de détermination de section potentiellement résiduelle** (c'est-à-dire sans anomalies) : seules des anomalies majeures affectant une large partie de la section des pieux peuvent être mises en évidence par ce type d'auscultation. Ces méthodes ne permettent pas d'évaluer précisément les pertes de section ; seules des approches très qualitatives sont envisageables ;
- **la présence de signaux parasites** :
 - une mauvaise préparation de la tête de pieu provoque des réflexions aléatoires de haute fréquence assimilables à un « bruit de fond » (Note),
 - l'acier de la cage d'armature, ainsi que la nature du sol peuvent perturber les mesures,
 - la variation de diamètre ou de forme du pieu vont perturber le signal visualisé et générer un « bruit de fond » (Note) ;
- **la difficulté parfois à déterminer le fond de pieu** : dans des contextes géotechniques contrastés, l'effet lié à la présence de l'ancrage dans des couches très compactes peut masquer la réflexion de fond de pieu ;
- **l'atténuation du signal dans des couches compactes** : lorsque les pieux sont forés plus profondément que la première couche de terrain compacte rencontrée, ceci perturbe fortement le signal mesuré⁽³⁸⁾ et rend l'interprétation difficile ; la partie supérieure de l'ancrage du pieu peut être interprétée à tort comme s'il s'agissait de son extrémité [6.3] ;
- **le temps d'ingénierie non négligeable dans certains cas et la subjectivité de l'analyse** : en raison de l'absence de critères de réception d'ordre normatif permettant de valider un élément de fondation, ces méthodes peuvent dans certains cas demander un temps d'ingénierie non négligeable, même si la stricte réalisation de l'essai est très rapide. Les analyses relèvent généralement de l'expertise et demeurent subjectives ;
- **la difficile vérification avec les autres méthodes** : dans le cadre de l'application des méthodes par réflexion et par impédance, les tubes de réservation ne sont généralement pas prévus. Dans ce cas, il est alors impossible, en cas de doute, de croiser les résultats par la méthode sonique en transparence ou le carottage de fond de pieu.

Note : lorsque le rapport signal sur bruit est trop faible, il devient alors impossible d'interpréter la courbe. Ces perturbations sont d'autant plus rédhibitoires qu'elles sont proches de la tête de pieu [6.3]. L'application conjointe d'une méthode par réflexion dans le domaine temporel et d'une méthode par impédance permet généralement de trancher sur la recevabilité de l'essai.

38. Une partie importante de l'énergie de l'onde est absorbée par ces couches compactes.

2.1.3 - MÉTHODES GAMMAMÉTRIQUES

2.1.3.1 - Principe des méthodes gammamétriques

Les deux méthodes gammamétriques

Ces méthodes font l'objet de la norme XP P94- 160-5, qui englobe **deux méthodes** :

- soit **monosonde** (section 5-1 de la norme – Figure 6.25) ;
- soit **double sonde** (section 5-2 de la norme – Figure 6.26).

Le principe de la mesure est basé sur le comptage des photons gamma qui traversent le béton. L'émission de ces derniers est produite par une source de Césium 137 placée dans un des tubes de réservation mis en place pour l'auscultation sonique par transparence.

Le nombre « C » de photons gamma qui traversent un milieu de masse volumique « ρ » et d'épaisseur « x » est : $C = C_0.e^{-\mu \cdot x}$ avec « x » le coefficient d'absorption massique qui dépend du matériau et « C0 » le nombre de photons détectés en l'absence de matériau.

Appareillage des méthodes gammamétriques

Selon la méthode :

- **monosonde**, une seule sonde comprend la source d'émission et le récepteur (Figure 6.25) ;
- **double sonde**, pour laquelle la sonde émettrice et la sonde réceptrice (Figure 6.26) réalisent une diagraphie de façon similaire à la méthode sonique par transparence.

Résultats des essais des méthodes gammamétriques

Si l'écartement des tubes est constant, le comptage est directement **lié à la masse volumique du matériau** entre les tubes. Il s'agit d'une **méthode semi-quantitative** qui donne une densité moyenne du matériau situé entre les tubes.

Figure 6.25 : Schéma de principe de la méthode par diffusion nucléaire à rayonnement gamma – Monosonde (extrait de la norme XP P94-160-5)

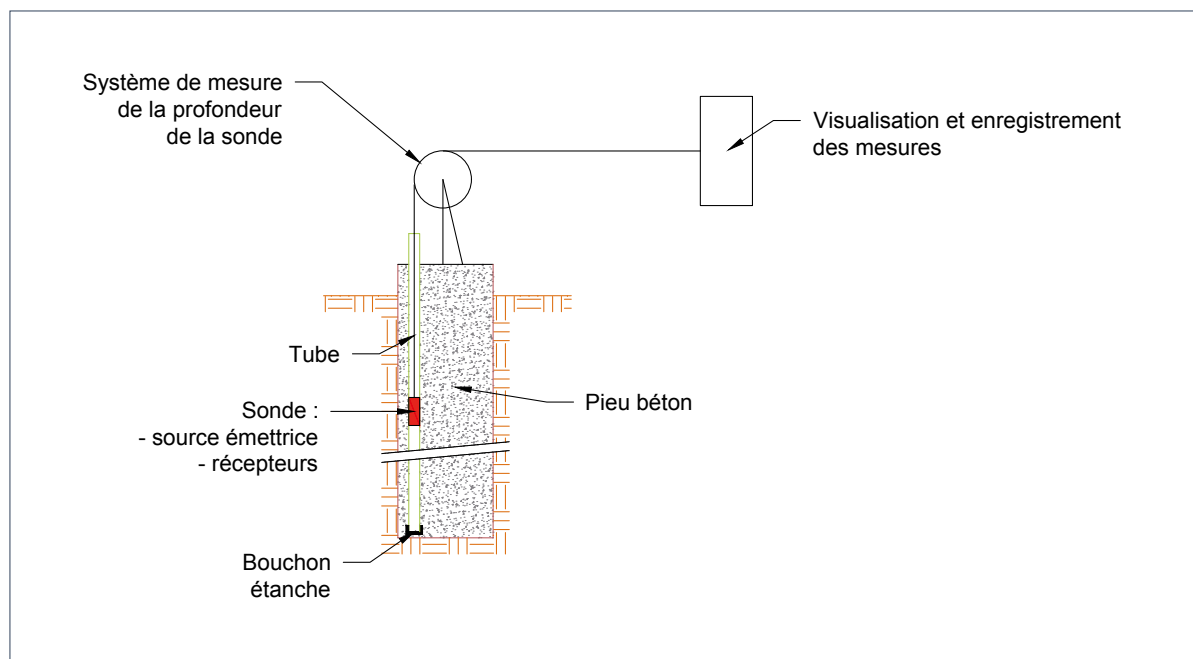
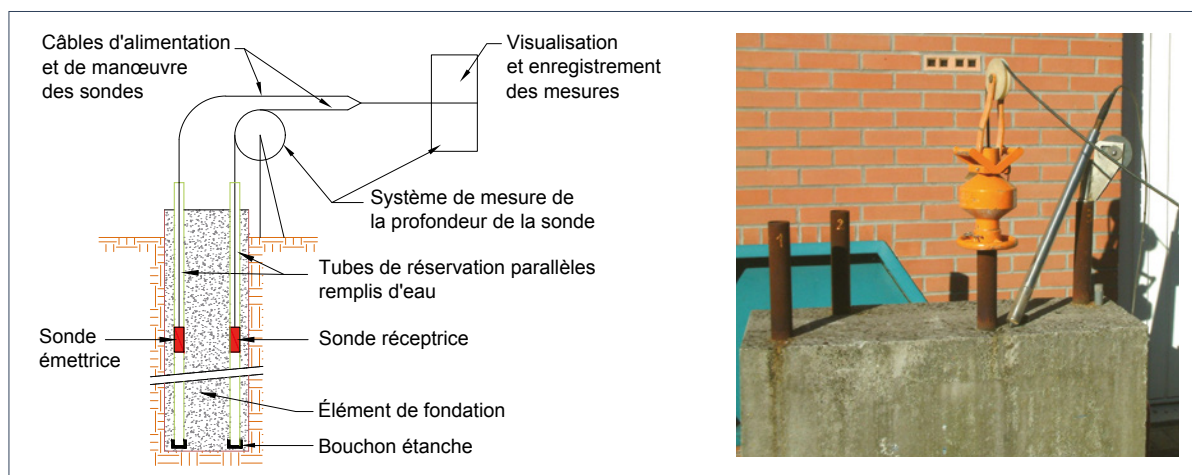


Figure 6.26 : Schéma de principe de la méthode par diffusion nucléaire à rayonnement gamma – Double sonde (extrait de la norme XP P94-160-5)



2.1.3.2 - Travaux préparatoires des méthodes gammamétriques

Ces méthodes nécessitent la mise en œuvre de réservations ainsi que d'un périmètre de radioprotection.

2.1.4 - MÉTHODE SISMIQUE PARALLÈLE

2.1.4.1 - Principe de la méthode sismique parallèle

Conditions d'utilisation de la méthode sismique parallèle

Cette méthode, qui fait l'objet de la norme NP P94-160-3, concerne essentiellement les éléments de fondation non pourvus de tubes de réservation.

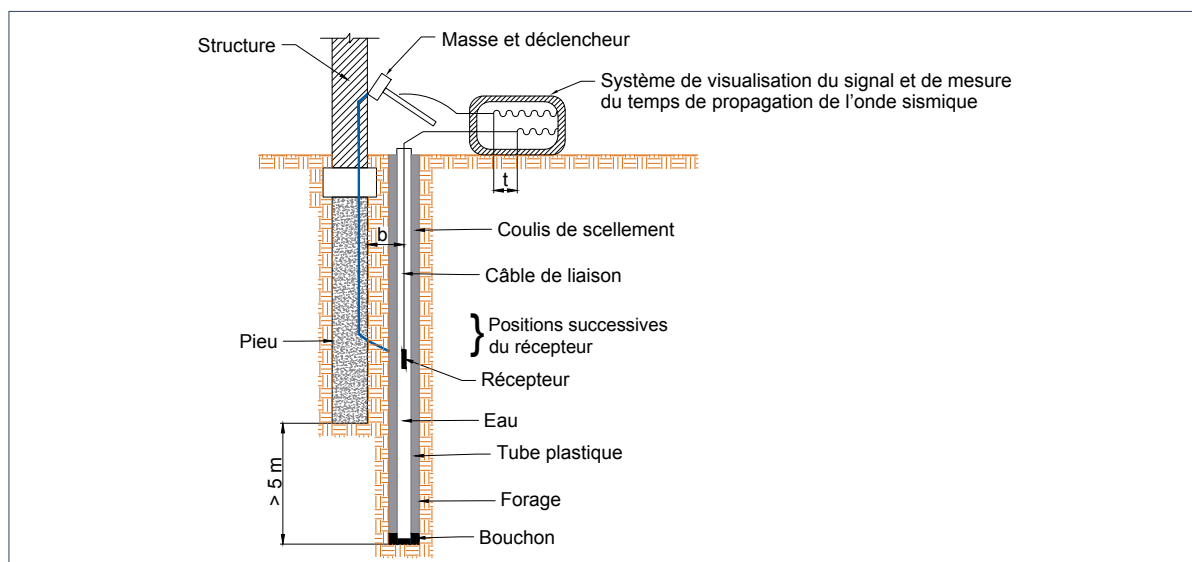
Principe de la méthode sismique parallèle

Elle consiste à déplacer une sonde réceptrice (géophone) à l'intérieur d'un forage réalisé (cf. § 2.1.4.2) à proximité de l'élément de fondation.

L'auscultation est réalisée depuis le fond de tube jusqu'au sommet, l'émission étant générée par une succession de chocs produits avec un marteau sur la tête de l'élément de fondation.

Par intervalle de profondeur régulier (avec un pas inférieur ou égal à 0,5 m selon l'article 4.5 de la norme NP P94-160-3), on mesure le temps de parcours du signal entre l'émetteur et le récepteur sur toute la hauteur de l'élément de fondation (Figure 6.27).

Figure 6.27 : Schéma de principe de la méthode sismique parallèle (extrait de la norme NF P94-160-3)



Résultats d'essai de la méthode sismique parallèle

Dans des conditions favorables (ancrage non rocheux), l'augmentation relative du temps de parcours permet de déterminer (Figure 6.28) :

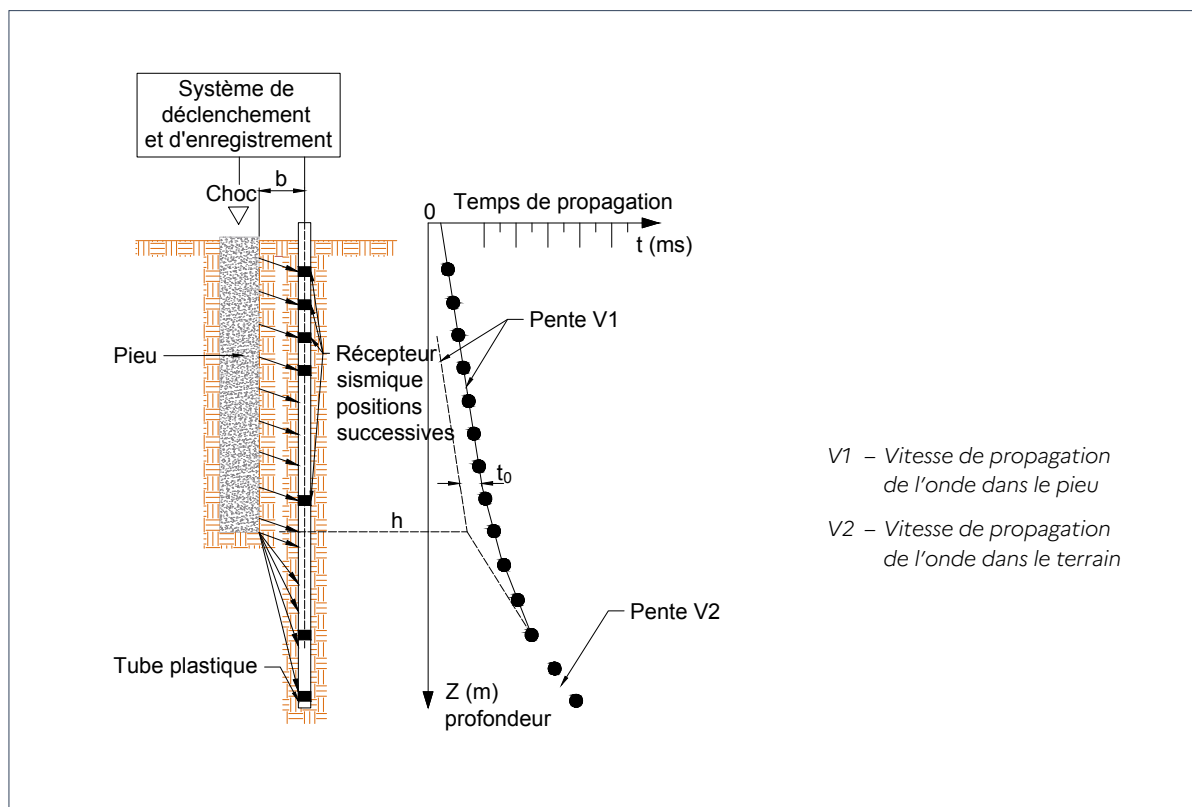
- les vitesses de propagation de l'onde de choc :
 - dans le sol sous la fondation,
 - dans la fondation ;
- la profondeur de la fondation.

Une anomalie serait caractérisée par une discontinuité des valeurs de temps « V1 » (Figure 6.28).

Les incertitudes sur le temps de propagation du signal au sein d'un même sol ainsi que sur la stratigraphie précise ne permettent pas un niveau de précision suffisant pour se prononcer sur l'homogénéité du béton.

L'utilité de cette méthode réside principalement dans la **détermination de la profondeur de fondations existantes** dans les cas où les méthodes par réflexion et par impédance n'ont pas permis de statuer.

Figure 6.28 : Principe de la détermination de la longueur d'un pieu dans un sol homogène par la méthode sismique parallèle (extrait de la norme NF P94-160-3)



2.4.1.2 - Travaux préparatoires de la méthode sismique parallèle

Un forage doit être réalisé :

- à une distance de l'élément de fondation de 1,5 m maximum ;
- avec une profondeur dépassant de 5 m son extrémité inférieure.

Ce forage doit être équipé d'un tube étanche avec un scellement sur toute la hauteur.

2.2 - MÉTHODES DESTRUCTIVES

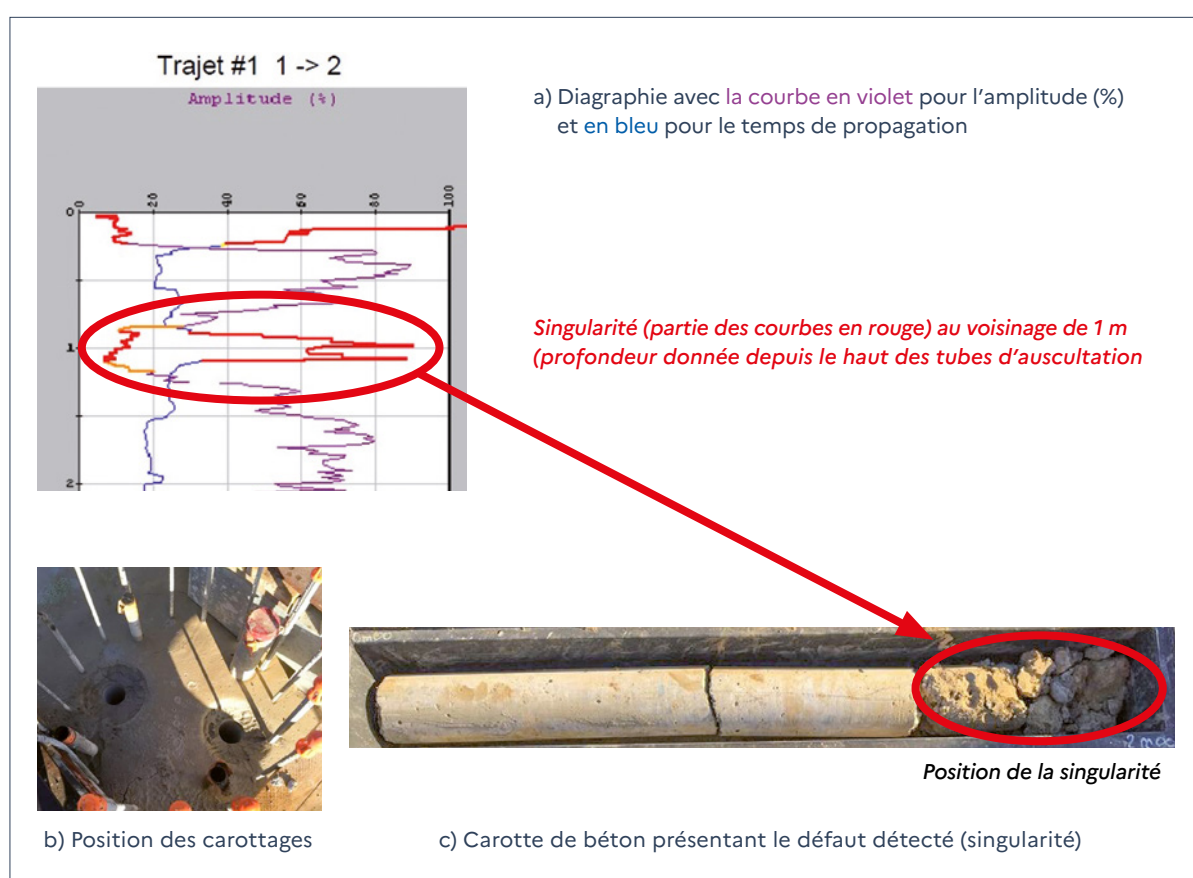
2.2.1 - SONDAGES CAROTTÉS D'ÉCHANTILLONS DE BÉTON

Cas d'utilisation des sondages carottés d'échantillons de béton

Le prélèvement d'échantillons de béton par carottage est principalement réalisé dans les cas suivants :

- le **contrôle de la qualité du béton de pointe de pieu et du contact sol-béton** ; dans ce cas le carottage est généralement effectué au fond d'un tube de réservation (détaillé plus loin) ;
- la **vérification de la résistance en compression du béton** mis en œuvre dans le pieu ;
- la **caractérisation d'une anomalie/singularité⁽³⁹⁾ détectée** par méthodes non destructives (réflexion-impédance ou sonique en transparence – Figure 6.29).

Figure 6.29 : Caractérisation par carottage d'une singularité détectée par la méthode sonique par transparence



Mode opératoire des sondages carottés d'échantillons de béton

Le carottage consiste à prélever des échantillons de béton par **forage en rotation avec injection d'un fluide** de forage (Figure 6.30).

La **norme** de référence concernant **l'examen et les essais en compression de carottes** extraites des structures en béton est la **norme NF EN 12504-1**. Cependant cette norme ne donne aucune indication sur les moyens à mettre en œuvre pour le prélèvement. La **norme NF EN ISO 22475-1**, qui traite des méthodes de prélèvement des sols et roches, fournit des indications intéressantes comme des descriptifs de matériels ou la catégorie de méthodes de prélèvements.

39. Terme défini pour les essais par la méthode sonique par transparence (norme NF P94-160-1).

La réalisation de carottages de pieu nécessite l'application de consignes particulières, détaillées ci-après, sur :

- **le choix du carottier** pour béton de pieu :
 - le carottier rotatif double ou le carottier à câble double. Pour ces méthodes la déviation verticale maximale attendue est généralement inférieure à 1 %. Le respect de ce seuil s'impose d'autant plus que la section du fût est faible,
 - le carottier à câble nécessitant la mise en œuvre d'un tubage provisoire, présente l'intérêt d'une déviation très faible (généralement de l'ordre moins de 0,5 %) ce qui en fait la méthode la plus adaptée aux pieux de diamètre inférieur à 1 m et/ou à des profondeurs carottées de plus de 20 m,
 - le carottier simple est proscrit, car il ne permet pas d'obtenir une qualité de prélèvement suffisante (l'extraction de la carotte endommage le prélèvement) ;
- **le diamètre de la carotte** : il doit être d'au moins 75 mm, mais il convient de privilégier un diamètre de carotte de 90 mm, qui est un optimum technico-économique et présente l'avantage de préserver l'intégrité des carottes ;
- **les paramètres de foration** : ils doivent être adaptés pour éviter d'altérer le prélèvement. Ils comprennent :
 - la pression du fluide de forage,
 - le couple de rotation,
 - la vitesse d'avancement,
 - la pression sur l'outil, qui doit rester la plus faible possible ;

⚠ Ces paramètres sont tributaires de la machine de forage, mais plus encore de la qualité de l'outil de découpe dénommé la « couronne ». Cette dernière doit être à imprégnation diamant. Une couronne à carbure de tungstène, notamment pour des bétons à jeune âge (7 jours maximum), peut éventuellement s'avérer efficace sous réserve d'un essai préalable de faisabilité.

⚠ L'état d'usure de la couronne doit être suffisamment faible sous peine d'altérer l'état de surface de la carotte ;
- **la qualité du prélèvement** : la méthode de prélèvement doit éviter tout remaniement de la structure de la carotte, ce qui correspond à la « catégorie A » de la norme NF EN ISO 22475-1. Le pourcentage de récupération (TCR⁽⁴⁰⁾) doit être de 100 % dans le béton. Il convient de s'en assurer en cours de forage en comparant la profondeur du forage avec les longueurs d'échantillons carottés ;
- **le système d'enregistrement des paramètres** : il est conseillé d'en équiper l'atelier en complément du prélèvement, d'autant plus si la récupération ne peut être totale (zones déstructurées, ségréguées, laitance) ;
- **les observations lors du forage** : elles doivent être consignées sur le carnet de forage : pertes partielles ou totales de fluide de forage, accroche à la rotation, chute d'outil, coloration du fluide de forage...
- **le référencement et stockage des carottes** : les échantillons de carottes sont mis en caisse. La profondeur de leur prélèvement est notée sur les caisses de manière indélébile et les échantillons sont conservés de manière à pouvoir envisager des essais sur carottes.

Notons que **ces consignes peuvent être adaptées et/ou complétées**, le cas échéant, suivant le contexte du chantier.

40. TCR : taux de carottage dans une roche, longueur totale de l'échantillon carotté récupéré (solide et non intact), exprimée en pourcentage de la longueur de la passe carottée (article 3.3.16 de la norme NF EN ISO 22475-1).

Figure 6.30 : Carottage du béton d'un pieu

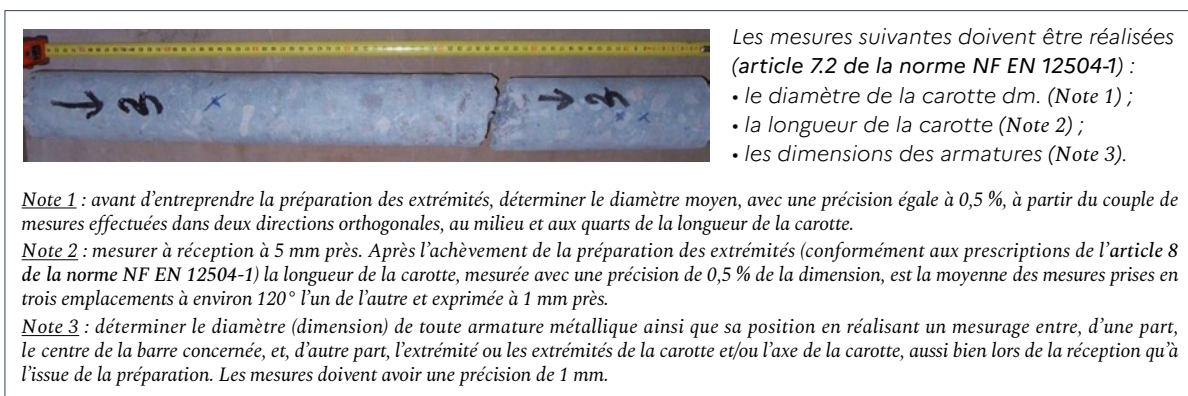


Avantages des sondages carottés pour le contrôle du béton

Les prélèvements de carottes font l'objet :

- d'une inspection visuelle et de mesurages conformément à la norme NF EN 12504-1 (Figure 6.31) ;
- de plusieurs essais permettant d'en qualifier les propriétés, dont les principales sont :
 - pour la résistance en compression, l'essai de compression uniaxiale conformément à la norme NF EN 12390-3,
 - pour la détermination de la masse volumique apparente et/ou porosité, par mesurage et pesée de la carotte. En cas de besoin, une mesure par pesée hydrostatique peut être envisagée,
 - pour la détermination de masse volumique relative⁽⁴¹⁾, par méthode gammamétrique (cf. § 2.1.3),
- d'une inspection visuelle par caméra dans le trou de forage qui peut dans certains cas s'avérer utile (cf. § 2.2.3).

Figure 6.31 : Inspection visuelle et de mesurages conformément à la norme NF EN 12504-1 (article 7)



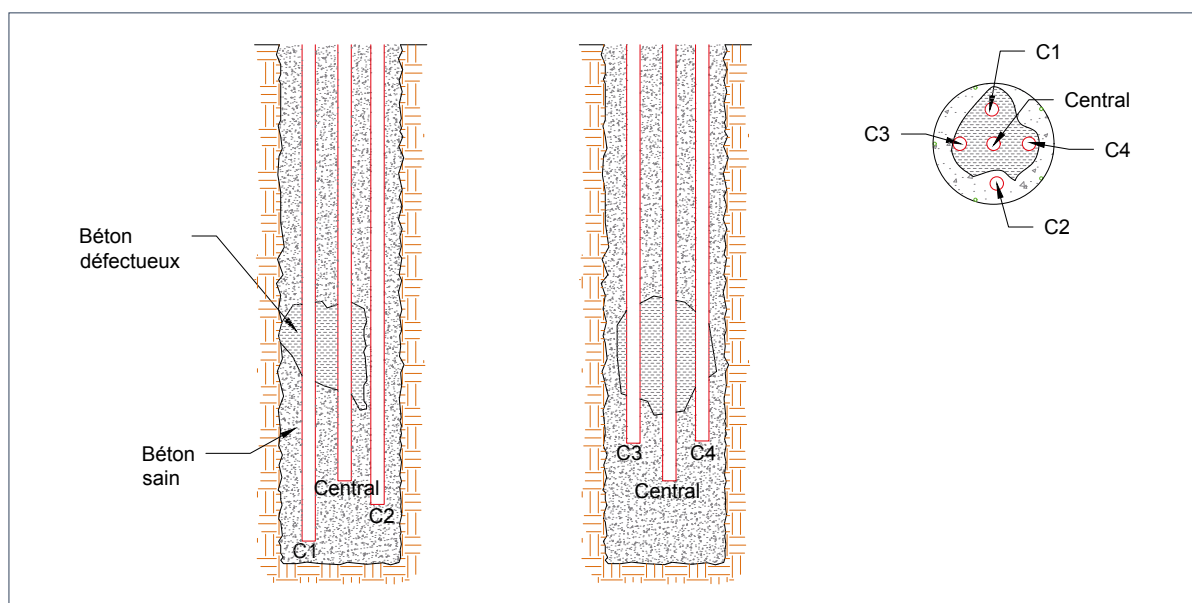
41. Si la masse volumique de la carotte doit être déterminée, l'un des modes opératoires indiqués dans la norme NF EN 12390-7 doit être utilisé avant le surfaçage des extrémités de la carotte.

Inconvénients du sondage carotté pour le contrôle du béton

Il convient de noter que :

- le sondage carotté comporte **des limites** (difficultés d'identifier certains désordres) ;
- le recours au carottage peut **nécessiter plusieurs prélèvements** avant de pouvoir conclure. Cela est dû à l'incertitude sur la localisation d'une singularité⁽⁴²⁾/anomalie (surface d'investigation du carottage faible) (Figure 6.32) ;
- les sondages carottés sans tube de réservation sont fréquemment positionnés dans l'axe du pieu qui est **la zone la moins susceptible de renfermer des désordres ou anomalies** de type inclusions ou délavage, ceci afin d'éviter de sectionner les armatures.

Figure 6.32 : Inconvénients du sondage carotté



Avantages du sondage carotté

Le sondage carotté présente l'avantage de fournir **un échantillon de béton (ou de terrain naturel)**, sur lequel il est possible de procéder à **un examen visuel ou à des essais** (notamment mécaniques sur le béton).

Le contrôle des pieux finis par sondage carotté, si réalisé en fond de pieu, peut permettre **l'identification du contact entre la pointe et le sol** (⚠ *Note*) ainsi que l'analyse du béton de fond de pieu, alors que les méthodes non destructives (sonique ou réflexion/impédance) ne le peuvent pas.

Note : le fluide de forage utilisé pour le carottage en fond de pieu peut délayer le sol, et de ce fait mettre en évidence un défaut qui n'existait pas lors de la réalisation de la fondation.

Tubes de réservation utilisés pour le carottage pour le contrôle de la pointe du pieu

Lorsque les réservations pour la méthode sonique par transparence sont également destinées au prélèvement de carottages du fond de pieux, ces réservations sont de diamètre 102/114 mm (cf. Figure 6.16 dans le § 2.1.1.2.1 « Cas des tubes de réservation prévus pour le carottage » pour les risques encourus). Il convient dans ce cas de réaliser les carottages préalablement aux auscultations, afin d'optimiser la surface de pieux pouvant être auscultée par transparence, dont la zone en fond de pieu.

Il n'apparaît pas opportun de systématiser l'équipement des cages d'armature par des tubes de 102/114 mm, sauf dans des cas particuliers (pieux travaillant majoritairement en pointe notamment et/ou campagne de carottage systématique).

42. Terme défini pour les essais par la méthode sonique par transparence (norme NF P94-160-1). Pour les autres contrôles, le terme « anomalie » est adopté.

La mise en œuvre de tubes de réservation de diamètre 102/114 mm est toutefois pleinement justifiée pour des pieux :

- d'élancement supérieur à 15 (Note 1) ;
- de diamètre supérieur ou égal à 1 200 mm (Note 2).

Note 1 : ce critère est lié au fait que la déviation maximale attendue d'un carottage de béton dans un pieu est de l'ordre de 10 à 15 mm par mètre, ce qui correspond à une vingtaine de centimètres pour un pieu de 15 m.

Note 2 : moins il y a d'espace, plus il y a de risques de coincer des inclusions de sol sous la base de ces tubes qui empêchent la bonne remontée des inclusions en fond de pieu (cf. Figure 6.16 dans le § 2.1.1.2.1). On préconise donc pour les pieux de diamètres inférieurs à 1 200 mm, d'arrêter les tubes de carottage 102/114 mm à 2 m du fond de pieu.

2.2.2 - FORAGES DESTRUCTIFS

Cas d'utilisation des forages destructifs

L'application de ces techniques destructives au contrôle des pieux **reste marginale**. En effet, si les forages destructifs peuvent présenter un intérêt économique pour identifier certains désordres (inclusions importantes), le recours à un carottage reste préférable compte tenu des enjeux.

Mode opératoire du forage destructif

Les techniques abordées dans ce chapitre sont habituellement destinées à la reconnaissance géotechnique. Elles consistent à détruire le matériau par **un outil destructif** réalisant ainsi le forage. Les débris de matériaux (**cuttings**) sont remontés en tête de pieu par l'injection d'un fluide de forage (eau, air, fluide stabilisateur). L'atelier de forage est équipé d'un **système de monitoring** permettant d'enregistrer la vitesse d'avancement, le couple de rotation, la poussée sur l'outil. La déviation habituelle dans le béton pour ces techniques (1 à 2 %) est plus importante que pour le carottage. Il convient de privilégier la technique destructive par rotation qui présente une déviation généralement plus faible que la technique par rotopercussion.

Exploitation des forages destructifs

L'interprétation de ces reconnaissances s'appuie sur les données recueillies lors du forage :

- **les cuttings** sont identifiés, récupérés, mis en sac et conservés ;
- **tout événement notable** survenu lors du forage est décrit (pertes de fluide de forage ou modification de sa couleur, chute d'outil, accroche à la rotation) et sa profondeur est notée ;
- **l'analyse des enregistrements de paramètres (diagraphies)** doit être réalisée par un personnel expérimenté. Pour que cette analyse soit pertinente, il convient que la poussée sur l'outil soit conservée constante et que l'outil de forage ne soit pas modifié (type d'outil et état d'usure). Si l'outil est modifié, il convient de le noter sur le compte-rendu ;
- **une inspection visuelle par caméra dans le trou de forage** peut s'avérer utile dans certains cas (cf. § 2.2.3).

2.2.3 - INSPECTION CAMÉRA

Mode opératoire de l'inspection caméra

La méthode consiste à descendre une caméra à l'intérieur d'un forage réalisé dans l'élément de fondation (sondage carotté ou forage destructif) ou au fond d'un tube de réservation adéquat (de diamètre 102/114 mm) après avoir percé le bouchon, afin d'obtenir une imagerie vidéo. Le sondage carotté doit être, au préalable, nettoyé à l'eau claire, sauf prescriptions contraires liées à des risques d'érosion (par exemple, sable en fond de pieu).

Résultats de l'inspection camera

La diagraphie par caméra vidéo fournit une image réelle sur toute la hauteur, sauf en cas d'utilisation de réservation. Elle peut permettre de détecter certaines anomalies (inclusion mal identifiée au carottage, fissures/ruptures) et de discriminer les cas de fissures, dans un échantillon, liées au mode de prélèvement ou à une pathologie du béton.

2.3 - ESSAIS DE CHARGEMENT DE PIEUX

Les essais de chargement de pieux

Les essais de chargement peuvent être **soit statiques, soit dynamiques**.

Dans le cadre d'essais de chargement réalisés sur des pieux de l'ouvrage, on parle d'essais de contrôle. Comme **leur mise en œuvre est rare**, nous nous limitons ici à donner les référentiels pour ce type d'essais ainsi que les principales indications.

Les normes de référence en vigueur sont :

- la norme NF EN ISO 22477-1 pour les essais de chargement statique en compression (Figure 6.33) ;
- la norme NF EN ISO 22477-2 pour les essais de chargement statique en traction (Figure 6.34).

La norme NF EN ISO 22477-4 traite de l'essai de chargement dynamique.

Les essais de chargement statique

L'essai de chargement statique de pieu consiste à **appliquer une charge en tête de l'élément et à mesurer son déplacement axial** (Figure 6.35).

Il existe **différents types d'essais de chargement statique** : préalables, de conformité et de contrôle.

Dans le cas de l'essai de chargement statique de contrôle (*Note*), il s'agit de s'assurer que la charge critique de fluage n'est pas atteinte sous les charges de service « caractéristiques ».

La Figure 6.36 présente le système d'application de l'effort.

Note : la charge maximale d'essai de contrôle est limitée au maximum de $(1,3 \cdot Q_{ELS,qp} ; 1,1 \cdot Q_{ELS,k})$ avec « $Q_{ELS,qp}$ » la valeur maximale des différentes combinaisons de charges à l'état limite de service quasi permanent, « $Q_{ELS,k}$ » la valeur maximale des différentes combinaisons de charges à l'état limite de service caractéristique. Dans tous les cas, l'essai ne doit pas être mené au-delà de la résistance de fluage R_{cr} , (article 8.9(4) de la norme NF P94-262 COMPIL).

Les essais de chargement dynamique

L'application d'essais de chargement dynamique au contrôle des pieux forés finis (NF EN ISO 22477-4) est **peu courante**. En effet, le recours à ce type d'essai n'est admis qu'après étalonnage préalable sur un essai de chargement statique. En conséquence, ce type d'essai ne peut être pertinent économiquement que dans des contextes particuliers.

Figure 6.33 : Essai de chargement en compression



Figure 6.34 : Essai de chargement en traction



Figure 6.35 : Mesure des déplacements axiaux (verticaux) lors d'un essai de chargement en compression



Figure 6.36 : Système d'application de l'effort





CHAPITRE 3

Exploitation des contrôles

3. EXPLOITATION DES CONTRÔLES

3.1 - POSITION CONTRACTUELLE DU PROBLÈME

La prise en compte des résultats des contrôles des pieux finis et plus largement leur traduction en termes de **gestion contractuelle**, peuvent poser des difficultés, principalement lorsque le marché n'a pas anticipé qu'un contrôle puisse révéler une anomalie ou une singularité⁽⁴³⁾.

L'objet de cette partie est :

- de donner **des critères objectifs** permettant d'identifier une anomalie, lorsque la norme ne le fait pas ;
- de proposer **une démarche de prise en compte de l'anomalie** (Note). Pour une meilleure appropriation de cette démarche par l'ensemble des parties (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises), il apparaît efficace que ces éléments soient intégrés **dans le marché (cahier des charges)**.

Note : cette démarche consiste :

- à associer le résultat du contrôle non satisfaisant (singularité ou anomalie) à **une non-conformité** ;
- à intégrer cette problématique dans **la procédure qualité du chantier** (ouverture d'une fiche de non-conformité).

Il est important de rédiger **dans les pièces écrites du marché** un chapitre fournissant les informations sur la gestion contractuelle des anomalies ou singularités (cf. § 3.3) : rappel des définitions des singularités et des anomalies, délai d'information, consignation, document(s) à produire, traçabilité...

3.2 - CARACTÉRISATION DES NON-CONFORMITÉS

3.2.1 - MÉTHODE SONIQUE PAR TRANSPARENCE

Conditions pour l'auscultation sonique

Le contrôle des pieux finis par auscultation sonique est exécuté conformément à la **norme NF P94-160-1**, avant recépage et dès que l'âge du béton des pieux est supérieur à 7 jours (Notes 1 et 2).

Note 1 : si cet âge de 7 jours n'est pas atteint, il n'est pas possible de conclure à une singularité et il est nécessaire de renouveler le contrôle au-delà de ce délai de référence.

Note 2 : dans certains cas (notamment en cas de cinétique lente ou hétérogène de la prise des bétons), il pourra être utile de réaliser les essais à 14 jours afin de disposer d'une prise de béton plus uniforme.

Critères de validation du contrôle par auscultation sonique

Pendant ce contrôle, il est procédé à **une vérification des longueurs de pieux auscultés** (vis-à-vis des plans de ferrailage donnant le positionnement des tubes dans la cage d'armature) et à **une identification des zones à recéper**. Il est d'autre part recherché **toute singularité du signal** conformément à la norme NF P94-160-1 qui fixe **des critères de détermination d'une singularité** (Note). Si le résultat de ces auscultations est le préalable à la levée **du point d'arrêt**, il convient que **le marché** ait défini le critère de non-conformité comme équivalant à la définition de la singularité.

Note : les critères de singularité reposent sur l'écart relatif de la durée du parcours ultrasonore obtenu entre les deux tubes et le rapport de l'amplitude du signal reçu dans la zone singulière et l'amplitude maximale (article 8.4 de la norme NF P94-160-1).

43. La norme NF P94-160-1, relative à l'auscultation sonique, fixe des critères de détermination d'une singularité. Pour les autres contrôles, le terme anomalie est adopté.

3.2.2 - MÉTHODE PAR IMPÉDANCE

Conditions pour l'auscultation par la méthode par impédance

Le contrôle des pieux finis par la méthode par impédance est exécuté conformément à la **norme NF P94-160-4 (Note)**. L'analyse sera d'autant plus pertinente qu'elle portera sur un nombre de pieux important.

Note : lorsque les essais sont menés en ne suivant pas toutes les indications de la norme (par exemple, essai avant recépage, essai sur un béton de moins de 7 jours), il est recommandé de renouveler l'essai en respectant la norme avant de conclure à une anomalie.

Critères de validation du contrôle par la méthode par impédance

Les paramètres analysés sont :

- **la longueur du pieu**, calculée avec une précision de l'ordre de 10 %.
=> Une variation⁽⁴⁴⁾ de plus de 10 % de la valeur estimée par l'essai vis-à-vis de la valeur théorique peut constituer une anomalie ;
- **la raideur et l'admittance** analysées conjointement :
 - l'admittance (moyenne, minimale, maximale) : la valeur caractéristique est la moyenne (crête à crête) des extrema (Figure 6.23). La valeur théorique d'admittance, telle que définie dans la **norme (Note)**, donne une estimation de la valeur cible de l'admittance caractéristique mesurée.
=> Une valeur d'admittance caractéristique plus faible n'est pas une anomalie.
=> Une valeur d'admittance caractéristique plus élevée nécessite une analyse couplée avec la raideur,
 - la raideur du système sol-pieu : sur un chantier donné, l'analyse de la raideur se fait par comparaison des valeurs obtenues sur des pieux de géométrie identique, dans un même modèle de terrain.
=> Une valeur d'admittance caractéristique significativement plus élevée que la valeur théorique coïncidant avec une valeur de raideur anormalement faible constitue une anomalie.

Note : la valeur théorique d'admittance se calcule par la formule suivante : $\frac{V}{F} = (\rho_b \cdot C \cdot A)^{-1}$ avec ρ_b la masse volumique du béton (kg/m^3), C la célérité des ondes planes dans le béton (m/s) et A l'aire de la section droite du pieu (m^2).

Complémentarité avec la méthode par réflexion

Une analyse couplée avec les résultats de la méthode par réflexion permet d'affiner et éventuellement de conforter le diagnostic, d'autant que ces méthodes peuvent généralement être mises en œuvre avec le même matériel.

3.2.3 - MÉTHODE PAR RÉFLEXION

Conditions pour l'auscultation par la méthode par réflexion

Le contrôle des pieux finis par la méthode par réflexion (propagation d'une onde provoquée par un choc) est exécuté conformément à la **norme NF P94-160-2 (article 4.1)**, avant recépage et dès que l'âge du béton des pieux est supérieur à sept jours (*Note*).

Note : si cet âge de sept jours n'est pas atteint, il n'est pas possible de conclure à une anomalie et il est nécessaire de renouveler le contrôle au-delà de ce délai de référence.

44. Il convient dans un premier temps de confirmer cette variation de 10 % en vérifiant que la longueur théorique communiquée correspond bien à la longueur du pieu testé, recépage compris.

Critères de validation du contrôle par la méthode par réflexion

Le contrôle, exécuté conformément à la norme NF P94-160-2, consiste en :

- **la détermination de la longueur du pieu**, qui est calculée avec une incertitude de l'ordre de 5 à 10 %.
=> Une variation⁽⁴⁵⁾ de plus de 10 % de la valeur mesurée vis-à-vis de la longueur réelle du pieu au moment de l'essai constitue une anomalie dans le pieu ;
- **l'analyse des réflexions des signaux** afin d'identifier le long du pieu les points particuliers générant des réflexions (variations de frottement axial, de diamètre).
=> L'identification d'une zone de striction significative constitue une anomalie.

L'analyse sera d'autant plus pertinente qu'elle portera sur un nombre de pieux important.

Complémentarité avec la méthode par impédance

Une analyse conjointe avec la méthode par impédance permet d'affiner et éventuellement de conforter le diagnostic.

3.2.4 - SONDAGES CAROTTÉS

Objectif des sondages carottés

Le contrôle des pieux finis par carottage est principalement dédié :

- **à l'identification du contact entre la pointe et le sol ;**
- **à l'analyse du béton de pieu** (carottage au sein du béton dans le fût du pieu⁽⁴⁵⁾)
palliant l'impossibilité des méthodes non destructives (sonique ou réflexion/impédance) de les identifier. Plus rarement le carottage est réalisé sur toute la hauteur ce qui permet une analyse du béton sur un volume limité du pieu (*Note*).

Note : la hauteur carottée peut être éventuellement limitée à la profondeur d'une anomalie ou singularité⁽⁴⁶⁾ préalablement reconnue, voire à la seule hauteur de l'anomalie, sous réserve d'un forage destructif préalable arrêté au-dessus de l'anomalie.

Critères de validation du contrôle par carottage

Les critères de validation du contrôle par carottage sont les suivants :

- **identification du sol d'ancrage** : cette dernière peut nécessiter l'intervention du contrôle extérieur et/ou de l'ingénierie géotechnique assurant la mission géotechnique G4 (norme NF P94-500) ;
- **conformité du béton au CCTP** : cette conformité impose une inspection visuelle de la carotte (absence d'inclusion, ségrégation, pollution) et nécessite généralement la réalisation d'essais de laboratoire.

Une non-satisfaction des critères de validation constitue une anomalie.

Les carottes

Le carottage doit permettre l'obtention de **prélèvements de « catégorie A »** conformément à la norme NF EN ISO 22475-1, ce qui correspond notamment à une récupération de 100 %. La mise en œuvre du carottage est conforme aux consignes particulières décrites au § 2.2.1.

Après réception du carottage, **le matériau prélevé est analysé** conformément à la norme NF EN 12504-1.

45. Généralement situé au centre du pieu afin de limiter les risques de sectionner les armatures, mais qui est aussi la zone la moins sujette à pathologies.

46. Terme défini pour les essais par la méthode sonique par transparence (norme NF P94-160-1). Pour les autres contrôles, le terme « anomalie » est adopté.

3.3 - GESTION CONTRACTUELLE DES ANOMALIES OU SINGULARITÉS

Toute anomalie doit être consignée dans le rapport de contrôle de réception au même titre que la singularité. Si lors du contrôle, une singularité ou une anomalie⁽⁴⁷⁾ est détectée, le titulaire ouvre **une fiche de non-conformité** qui comporte un rapport donnant le détail de l'anomalie (profondeur, nature, ampleur...) et est tenue de traiter l'anomalie ou la singularité, afin de lever ladite non-conformité.

Si le marché n'a pas déjà décrit les mesures à prendre face à ce type de non-conformité, le titulaire soumet au moins au visa du maître d'œuvre **un programme d'investigations et/ou d'études complémentaires** (cf. § 3.4). Au préalable il convient que toutes les parties prenantes (maître d'œuvre, maître d'ouvrage et entreprise) s'accordent sur le fait qu'un résultat positif des actions correctives (*Note*) ou corrections nécessaires proposées soit suffisant **pour lever la non-conformité**.

Dans le cas où ces investigations ne permettent **pas de lever la non-conformité**, le titulaire soumet au maître d'œuvre les mesures nécessaires pour pallier ce défaut (autres investigations, études complémentaires, pieu supplémentaire, renforcement de la structure...).

Note : ces actions correctives ont pour objet de lever la non-conformité sans systématiquement supprimer la singularité ou l'anomalie⁽⁴⁸⁾.

3.4 - TRAITEMENT DES NON-CONFORMITÉS

Le traitement d'une non-conformité comporte **une ou plusieurs des actions correctives** suivantes :

- des investigations renouvelées ;
- des investigations par une autre méthode ;
- un recalcul ;
- des dispositions constructives (cf. fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés »).

Les actions correctives sont choisies en fonction des cas et du contexte et il n'existe pas d'ordre de préséance. Une analyse plus fine de la part du bureau qui a réalisé les essais contribue au diagnostic et oriente le traitement.

En complément des investigations menées dans leur cadre habituel de mise en œuvre et afin d'alimenter une aide à la décision des diverses parties prenantes, il est fréquent que le bureau qui réalise les auscultations propose des analyses et éventuellement des essais ou des auscultations annexes qui viennent préciser le diagnostic de la non-conformité.

De ce fait, par certains points de vue, le présent paragraphe constitue une introduction au fascicule 7.

3.4.1 - AUSCULTATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Une seconde auscultation peut s'avérer pertinente :

- après une attente supplémentaire de 7 à 14 jours pour des bétons de fondation présentant parfois des temps de prise assez longs ;
- lorsque les résultats du contrôle sont **en limite de singularité** vis-à-vis des valeurs seuils.

47. À l'origine, seules les singularités étaient clairement définies et donnaient lieu à l'ouverture de fiches de non-conformité, mais le développement de nouvelles techniques pour lesquelles il n'existe pas de critères explicites de singularité conduit à définir la notion d'anomalie, ce qui doit se solder par l'ouverture de fiches de non-conformité aussi.

48. Par exemple, lorsque la fondation est justifiée par un recalcul sans investigation supplémentaire.

3.4.2 - AUSCULTATION PAR UN AUTRE MATÉRIEL AVEC UNE MÉTHODE IDENTIQUE

Si un organisme différent intervient, l'essai doit être mené de façon contradictoire permettant une validation du matériel (étalonnage...) et une validation in situ des méthodes d'auscultation, notamment de la saturation du signal puis des interprétations produites (fourniture des signaux à l'oscilloscope).

Nota bene : Pour l'auscultation sonique par transparence, l'expérience montre que, bien que les matériels soient différents, les résultats sont en principe comparables, voire similaires, si la mise en œuvre de l'essai est réalisée dans les règles de l'art.

3.4.3 - AUSCULTATION PAR UNE AUTRE MÉTHODE NON DESTRUCTIVE

Il peut s'agir de la mise en œuvre :

- **d'une méthode d'auscultation par réflexion ou impédance** pouvant être motivée par :
 - la présence de réservations rendues inutilisables sur toute leur hauteur,
 - la volonté de panachage des méthodes d'auscultation (*Note 1*) ; il est alors indispensable de compléter l'auscultation complémentaire par une auscultation par réflexion/impédance (*Note 2*) sur des pieux validés par auscultation sonique ;
- **de méthodes gammamétriques** (cf. § 2.1.3), particulièrement bien adaptées en complément de la méthode sonique en transparence (cf. § 2.1.1).

Nous rappelons que lever une non-conformité n'est pas synonyme de supprimer une singularité/anomalie.

Note 1 : en effet, les phénomènes physiques étant très différents, il est tout à fait possible qu'une singularité décelée par méthode sonique par transparence ne soit pas détectée comme une anomalie par les méthodes de la réflexion/impédance et réciproquement.

Note 2 : lorsqu'il s'agit d'une auscultation complémentaire, la mise en œuvre conjointe des deux méthodes d'analyse impédance et réflexion apparaît obligatoire.

3.4.4 - SONDAGES CAROTTÉS

Exploitation des carottes de béton

Lorsque l'on souhaite confirmer ou réfuter un résultat de contrôle non conforme par un carottage, il convient de **rester conscient des limites du procédé** :

- **l'impossibilité d'identifier certains défauts** ;
- **l'investigation sur une surface réduite** (quelques pour cent de la section de l'élément de fondation) ;
- **le positionnement fréquent du sondage dans l'axe du pieu**, zone la moins susceptible de renfermer des désordres de type inclusions ou délavage, afin d'éviter de sectionner les armatures.

Lorsque l'on a recours au carottage, il convient généralement de compléter la description détaillée par des essais (cf. § 2.2.1). Dans ce cas, **en complément des investigations réalisées dans la zone douteuse**, il convient de faire un essai dans une zone de référence, en dehors de la non-conformité.

Auscultation rayonnante

Après la réalisation d'un sondage carotté, il est possible d'utiliser le trou de forage comme « réservation » afin d'y descendre une sonde pour **auscultation sonique par transparence** (*Note*). Cette approche présente un réel intérêt notamment lorsque le carottage n'a pas intercepté de pathologie pouvant expliquer la présence d'une singularité.

Note : l'ensemble des auscultations réalisées depuis le trou de carottage vers les autres tubes de réservation (auscultations rayonnantes), permet de préciser la zone impactée par la singularité (cf. « Évaluation des étendues potentielles de défauts » dans le § 3.3 du fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés »).

3.4.5 - INSPECTION CAMÉRA

Pour certains désordres (**inclusion mal identifiée au carottage, fissures/ruptures**), la diagraphie par caméra vidéo peut être un recours intéressant. En particulier, l'inspection par caméra permet de discriminer les cas de fissures de la carotte liées au mode de prélèvement ou à une pathologie du béton.

3.4.6 - SURFACES MAXIMALES POTENTIELLEMENT AFFECTÉES ET RECALCUL

Détermination des surfaces maximales potentiellement affectées

Ce sujet est traité dans le § 3.3 du fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés ».

Recalcul

Dans le cadre de la gestion de la non-conformité (anomalie ou singularité⁴⁹), il peut apparaître pertinent de **recalculer la fondation en neutralisant la zone potentiellement affectée**. Cette démarche peut toujours s'envisager, mais il convient de bien s'assurer de la vérification de l'ensemble des critères (excentrement parasites, résistance du béton, résistance des aciers...). Préalablement au recalcul de la résistance du pieu, il convient de vérifier que la descente de charges sur le pieu incriminé est correctement calculée (concomitance des actions, distribution des charges...).

Le fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés » donne les indications nécessaires à une vérification correcte de la fondation. Le recalcul de la fondation nécessite fréquemment de neutraliser une surface affectée qui peut être estimée selon les indications du § 3.3 du fascicule 7.

3.4.7 - ESSAIS DE CHARGEMENT AXIAL DE PIEUX

Le recours à des essais de chargement statique de contrôle (cf. § 2.3) peut aussi être envisagé. Il est rappelé que **ces essais ne constituent pas un essai d'intégrité, mais qu'ils vérifient la résistance de la fondation** (portance du sol et qualité du béton).

49. Terme défini pour les essais par la méthode sonique par transparence (norme NF P94-160-1). Pour les autres contrôles, le terme « anomalie » est adopté.



Annexe

ANNEXE

AIDE À LA DÉTERMINATION D'UN NIVEAU DE CONTRÔLE POUR LES PIEUX DE BÂTIMENT

DESCRIPTION DE LA DÉMARCHÉ

L'objet de cette partie est de fournir, à l'attention des maîtres d'œuvre une aide à la décision sur le niveau de contrôle requis à prescrire dans le cadre de la phase DCE/ACT. Cette démarche ne s'applique pas aux pieux des ouvrages d'art qui doivent être auscultés de façon exhaustive (cf. **clause 3.6.4 du Fascicule 68 du CCTG**). La démarche exposée est volontairement simple à mettre en œuvre. Elle est **indicative et doit être adaptée au cas par cas**. Elle consiste à **quantifier les facteurs de risques, puis à en faire l'analyse pour obtenir un niveau de contrôle** découpé en trois classes : niveau faible de contrôle, niveau modéré, niveau fort.

Le détail du programme de contrôle (nombre de pieux, nature du contrôle) dépend ensuite d'autres critères tels que le nombre total de pieux du chantier, le type de pieux ou le mode de portance des pieux (pointe, frottement). Cette méthodologie permet d'identifier les pieux les plus sensibles.

La méthode reprend donc les trois facteurs de risques : structure, pieux et terrain. **Une cote** est attribuée à chacun des critères, chacune de ces cotes est généralement affectée « à dire d'expert » et comporte à ce titre une part de subjectivité non négligeable. Ainsi, il est probable que cette démarche appliquée au même chantier par deux intervenants donne, dans une mesure acceptable, des résultats différents.

COTATION DES CRITÈRES DE FACTEURS DE RISQUES

En complément d'indications permettant la mise en œuvre de la démarche, la composition, les cotations minimales et maximales des trois critères concernés sont proposées en fonction de l'importance de chaque cas.

La liste proposée ici n'est pas exhaustive et l'utilisateur de la démarche peut ajouter tout critère qui pourrait lui sembler pertinent.

La cotation de la plupart des critères « terrain » est à moduler par l'épaisseur de la couche.

Nota bene : Certaines cotes sont négatives (pieux faiblement chargés, pieux armés) pour que les facteurs (globaux) restent représentatifs d'un état de fait.

1 - Facteur « sensibilité de la structure »

Nota bene : La valeur maximale du facteur sensibilité de la structure est écrêtée à « 4 », quelle que soit la somme des notations de chaque critère.

- **classe de conséquence de l'ouvrage** définie par le maître d'ouvrage conformément à la norme NF EN 1990 :

Classe de conséquence	CC3	CC2	CC1
	3	1	0

- **nombre de pieux par appui** : on vise ici l'impact de la défaillance partielle d'un pieu, pour des cas particuliers, ce critère peut présenter un niveau d'appréciation non négligeable.

Nota bene : Dans le cas où cette information ne serait pas connue ou variable pour un même ouvrage, nous conseillons de retenir la valeur de 1.

Nombre de pieux/appui	1	2 à 3 ou information non connue	> 3
	3	1	0

Par exemple, un bâtiment sur pieux surmontés de longrines (ou équivalent) aura généralement une cotation de 1, alors qu'on mettra 3 à un bâtiment sur poteaux isolés portés par des pieux isolés.

- **sensibilité de la structure aux déplacements** : ce critère est une appréciation globale de la capacité de la structure à redistribuer les efforts ainsi qu'à supporter des tassements différentiels. Ce critère présente un niveau de subjectivité relativement important.

Sensibilité de la structure aux déplacements	Oui	information non connue	Non
	3	1	0

2 - Facteur « pieu »

Nota bene : La cotation globale du facteur « pieu » est écrêtée à « 4 », quelle que soit la somme des notations de chaque critère (Note).

Note : un critère supplémentaire qui pourrait être rajouté dans un cas particulier n'influence pas la cotation maximale du facteur « pieu ».

- **diamètre du pieu** : les diamètres standards sont estimés non sensibles, les petits diamètres sont les plus sensibles, et les gros diamètres souffrent souvent d'un effet de chasse en pied insuffisant pour assurer une bonne qualité de la pointe et d'une stabilité des parois moindres.

Diamètre du pieu	≤ 600 mm	$600 \text{ mm} < D < 1\,200$ mm	$\geq 1\,200$ mm
	3	0	2

- **élancement du pieu** (largeur/profondeur) :

Élancement du pieu	$\leq 1/30$	$1/30 < E < 1/20$	$\geq 1/20$
	2	1	0

- **taux de travail du béton de pieu** : ce critère est basé sur une estimation du taux de travail réel du béton du pieu comparé au taux de travail maximal admissible, à l'état limite caractéristique.

Note : un bâtiment réalisé sur des pieux de différents diamètres avec des charges sur pieux variables selon les appuis a généralement une note de 0.

Taux de travail effectif du béton par rapport au taux de travail admissible à la limite	≥ 90 %	$50 \% < \text{taux} < 90$ %	≤ 50 %
	3 (2 en cas de contrôle renforcé)	0	-1

- **phasage de construction et modes constructifs :**

Ce critère tient compte de l'influence :

- des séquences de terrassement ou des modes constructifs liés aux arases basses (> 2 m par rapport à la plateforme d'exécution des pieux),
- des séquences de terrassement (hors arases basses) : la présence de terrassement à proximité de pieux peut endommager les pieux. En cas de choc ou d'effondrement de talus, des fissures ou des fractures peuvent endommager les pieux à des profondeurs importantes sans que cela soit visible depuis la plateforme de travail,
- d'emprise restreinte : la présence de talus (ou obstacle de type voile béton) à proximité du pieu (moins de 2 m) et les zones de travail exigües compliquent l'exécution.

La cotation est modulée en fonction de l'importance de l'impact : profondeur de l'arase basse, terrassements importants au voisinage des pieux de nature à générer des efforts parasites, présence de pieux non armés présentant de ce fait une sensibilité plus forte... En cas de cumul, il convient de prendre la cotation la plus défavorable.

Phasage de construction	arases basses	terrassements	emprise restreinte	sinon
	2	1	1	0

- **durée de réalisation du pieu :** la cotation de ce critère est évaluée en fonction de la durée de réalisation normalement attendue. Ainsi ce critère sera évalué au regard de la technique de construction.

Nota bene : Il s'agit d'une estimation avant réalisation, le cas du pieu singulier (par exemple, réalisé à cheval sur un week-end) n'est pas concerné.

Durée moyenne de réalisation d'un pieu (forage + bétonnage) à moduler en fonction de la technique de réalisation, de la profondeur et du diamètre	> 3 jours	1 jour ≤ durée ≤ 2 jours	< 1 jour
	3	1	0

- **armatures toute hauteur :** l'armature permet de faciliter la redistribution des efforts en cas de défaut de bétonnage, mais dans ce cas les aciers sont moins bien protégés et présentent alors des risques de corrosion à terme.

Pieux armés sur toute hauteur	oui	non
	- 1	0

3 - Facteur « terrain » présentant des risques particuliers

Des facteurs « terrain » sont ici proposés forfaitairement ; toutefois, en cas de traitement préalable du risque « terrain », une diminution de ces facteurs de terrain pourra être prise en compte (en diminuant, voire en réduisant la note à 0 suivant la nature et l'efficacité du traitement réalisé) :

- **présence de tourbe ou d'argiles molles :** en raison des risques de frottements négatifs sur le fût du pieu et de resserrement ou au contraire d'élargissement de la section du pieu au droit de ces couches.

Tourbe - argiles molles	oui	non
	3	0

- **présence de sols sans cohésion** : la réalisation de pieux dans un sol sans cohésion rend plus difficile la stabilité des parois lors de leur foration (éboulement, mélange fluide stabilisateur-sol, mise en œuvre du tube, retrait du tube provisoire...), ainsi que leur bétonnage (claquage, mélange sol-béton...). Ce critère peut être apprécié à partir de la valeur de la pression limite obtenue lors des essais pressiométriques Ménard ou par corrélations.

Sols lâches sans cohésion	$pl \leq 0,3 \text{ MPa}$	$0,3 \text{ MPa} < pl \leq 0,7 \text{ MPa}$	$pl > 0,7 \text{ MPa}$
	3	2	1

- **risques hydrauliques** : ce critère est une estimation du risque induit par les phénomènes d'hydraulique souterraine sur la réalisation des pieux : nappe en charge (surpression vis-à-vis de la pression interstitielle) et écoulements divers (circulations d'eau souterraine, marées, circulations locales induites par la houle...).

Nappe en charge	oui	non
	3	0

Écoulement	écoulement faible	écoulement avec vitesse importante
	0	3

- **présence de fractures, de vides, de karst et de gypse** :

Fractures, vides, karst et gypse	oui	non
	2	0

- **variations brutales du toit du terrain d'ancrage** : ce critère n'est pertinent que si l'ancrage apporte une contribution significative à la portance.

Variations brutales du toit de l'ancrage	oui	non
	2	0

- **ancrage rocheux** : ce critère n'est pertinent que si l'ancrage apporte une contribution significative à la portance.

Ancrage rocheux	oui	non
	2	0

ÉLABORATION DU PROGRAMME DE CONTRÔLE

Les cotations de chaque critère sont ensuite sommées. Rappelons que les cotations maximales des facteurs « pieu » et « sensibilité de la structure » sont écrêtées à 4 et ce, même si la somme des critères qui les composent est supérieure à 4.

Le niveau de contrôle est alors évalué à partir de la cotation globale obtenue qui détermine trois classes :

- **niveau de contrôle « faible »** : cotation ≤ 8 ;
- **niveau de contrôle « modéré »** : $8 < \text{cotation} \leq 12$;
- **niveau de contrôle « important »** : cotation > 12 .

Le tableau (Tableau Annexe 6.1) est une proposition de volume d'auscultations à prévoir en fonction de la classe de niveau de contrôle.

**Tableau Annexe 6.1 : Proposition de volumes d'auscultations
à prévoir en fonction de la classe de niveau de contrôle**

	Niveau de contrôle des pieux finis	Faible	Modéré	Important
Choix de la méthode de contrôle des pieux finis	Sonique transparence	Pas de contrôle des pieux finis (*)	10 % des pieux trois minimum	25 % des pieux trois minimum
	Réflexion/impédance		20 % des pieux cinq minimum	50 % des pieux cinq minimum
	Carottage ⁽⁵⁰⁾		si besoin spécifique ⁽⁵¹⁾	
(*) sauf si imposé par les textes normatifs				

LE CONTRÔLE DES PIEUX DURANT L'EXÉCUTION

Le résultat de cette analyse peut aussi permettre d'orienter le **contrôle des pieux durant l'exécution** ; ainsi, à partir d'une cotation :

- **de 7**, la mission géotechnique G4 est vivement conseillée (*Note*) ;
- **de 12**, un surveillant de travaux est vivement recommandé.

Note : cette recommandation ne s'applique que si la norme NF P94-500 n'est pas reprise dans le marché, car la mention de cette norme impose le respect de l'enchaînement des missions géotechniques (donc y compris la G4) quelle que soit la cotation.

50. Le carottage s'envisage en complément des autres méthodes de contrôle non destructif.

51. Méthode pertinente pour vérification du fond de pieu (béton et terrain d'ancrage).

EXEMPLES

Cinq exemples d'analyse sont présentés ci-après :

Exemple 1 : Aéroport

Structure (*)	Classe	CC3	3
	Appui	Non connu	1
	Sensibilité	Structure courante sensible	1
Pieux (**)	Diamètre	Important (forte charge)	2
	Élancement	Moyen	1
	Taux de travail	70 %	0
	Phasage	Arase basse	2
	Durée		0
	Armés		0
Terrain	Sols	Pointe dans le gypse	2
	Hydraulique		0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage		0

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 8 (*)
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 10 (*)
=> contrôle modéré

(*) la cotation « structure »
est limitée à 4.

(**) la cotation « pieux »
est limitée à 4.

Exemple 2 : Bâtiment de logement R+3 constituant un ouvrage courant

Structure	Classe	CC2	1
	Appui	Non connu	1
	Sensibilité	Structure poteaux/poutres	1
Pieux (*)	Diamètre	Petit	3
	Élancement	Moyen	1
	Taux de travail	80 %	0
	Phasage	Arase basse	2
	Durée		0
	Armés		0
Terrain	Sols	Sans risque	0
	Hydraulique	Nappe libre	0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage		0

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

(*) la cotation « pieux »
est limitée à 4.

Exemple 2bis : Bâtiment de logement R+3 constituant un ouvrage courant avec optimisation dans le calcul des pieux

Structure	Classe	CC2	1
	Appui	Non connu	1
	Sensibilité	Radier	1
Pieux (*)	Diamètre	Petit	3
	Élancement	Moyen	1
	Taux de travail	100 %	3
	Phasage	Arase basse	2
	Durée		0
	Armés		0
Terrain	Sols	Sans risque	0
	Hydraulique	Nappe libre	0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage		0

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

(*) la cotation « pieux »
est limitée à 4.

Exemple 3 : Entrepôt en charpente métallique

Structure	Classe	CC1	0
	Appui	Un pieu/appui	3
	Sensibilité	Non sensible	0
Pieux (*)	Diamètre	Petit	3
	Élancement	Important	2
	Taux de travail	50 %	0
	Phasage	Emprise restreinte	1
	Durée		0
	Armés		0
Terrain	Sols	Sans risque	0
	Hydraulique		0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage		0

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 7 (*)
=> contrôle faible

(*) la cotation « pieux »
est limitée à 4.

Exemple 4 : Bassin d'orage

Structure	Classe	CC2	1
	Appui	> 3	0
	Sensibilité	Structure rigide	0
Pieux (*)	Diamètre	Petit	3
	Élancement	Moyen	1
	Taux de travail	Faible	0
	Phasage	Arase basse	2
	Durée	Courante	0
	Armés		0
Terrain	Sols	Lentilles tourbeuses	3
	Hydraulique		0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage	Toit substratum variable	2

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 5 (*)
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 10 (*)
=> contrôle modéré

(*) la cotation « pieux »
est limitée à 4.

Exemple 5 : Passage inférieur en marché privé

Structure	Classe	CC2	1
	Appui		0
	Sensibilité	Structure très sensible	3
Pieux	Diamètre	Moyen	0
	Élancement	Moyen	1
	Taux de travail	100 %	3
	Phasage		0
	Durée	Courante	0
	Armés	Armés toute hauteur	- 1
Terrain	Sols	Sans risque	0
	Hydraulique		0
	Fractures, vides...		0
	Ancrage	Toit substratum variable	2

Résultat de la cotation :

Sans prise en compte
du terrain : 7
=> contrôle faible

Avec prise en compte
du terrain : 9
=> contrôle modéré



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [6.1] LCPC/SETRA, *Les pieux forés – Recueil des règles de l'art*, guide, Ministère des transports - Direction générale des transports intérieurs, 1978.
- [6.2] Ifsttar & Cerema, *Auscultation des ouvrages d'art – Auscultation des fondations (série C6)*, Cahiers interactifs, CII1, 2015. [Disponible en ligne : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/>, consulté en juillet 2017].
- [6.3] LCPC, *Contrôle de l'intégrité des éléments de fondations profondes de structures de génie civil et de bâtiment – Pieux forés, barrettes et parois moulées – Méthodes d'auscultation*, Guide technique LCPC, 2006.

FASCICULE DU CCTG (CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES)

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

NORMES AFNOR

- NF EN 1536+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés, 2015
- NF EN 1990** Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures et son Amendement 1, 2003
- NF EN 1997-1 COMPIL** Eurocode 7 : calcul géotechnique, 2014
Partie 1 : règles générales – texte compilé de la norme NF EN 1997-1 de juin 2005 et de son amendement A1 d'avril 2014
- NF EN 1997-2** Eurocode 7 : calcul géotechnique, 2007
Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais
- NF EN 12390-3** Essais pour béton durci, 2019
Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes
- NF EN 12390-7** Essais pour béton durci, 2019
Partie 7 : masse volumique du béton durci
- NF EN 12504-1** Essais pour béton dans les structures, 2019
Partie 1 : carottes – Prélèvement, examen et essais en compression
- NF EN ISO 22475-1** Reconnaissance et essais géotechniques
Méthodes de prélèvement et mesurages piézométriques, 2021
Partie 1 : principes techniques des travaux
- NF EN ISO 22477-1** Reconnaissance et essais géotechniques – Essais des structures géotechniques, 2018
Partie 1 : essai de pieux : essai de chargement statique en compression
- NF EN ISO 22477-2** Reconnaissance et essais géotechniques – Essais des structures géotechniques, 2023
Partie 2 : essai de pieux : essai de chargement statique en traction

- NF EN ISO 22477-4** Reconnaissance et essais géotechniques – Essais des structures géotechniques, 2018
Partie 4 : essai de pieux : essai de chargement dynamique
- NF P94-160-1** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation, 2000
Partie 1 : méthode par transparence
- NF P94-160-2** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation, 1993
Partie 2 : méthode par réflexion
- NF P94-160-3** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation, 1993
Partie 3 : méthode sismique parallèle (M.S.P)
- NF P94-160-4** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation, 1994
Partie 4 : méthode par impédance
- XP P94-160-5** Sols : reconnaissance et essais – Auscultation d'un élément de fondation, 1999
Partie 5 : méthodes par diffusion nucléaire à rayonnement gamma
- NF P94-262 COMPIL1** Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, 2018
- NF P94-500** Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications, 2013



Traduction

Bored piles for civil engineering works and building

Application guide

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

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

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

Pilotes perforados para obras de ingeniería y edificio

Guía de aplicación

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

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

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

© 2025 - Cerema

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

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

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

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

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

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

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

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : PAO Concept

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achevé d'imprimer : juillet 2025

Dépôt légal : juillet 2025

ISBN : 978-2-37180-716-7 (pdf) - 978-2-37180-717-4 (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 6 Le contrôle des pieux finis

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

