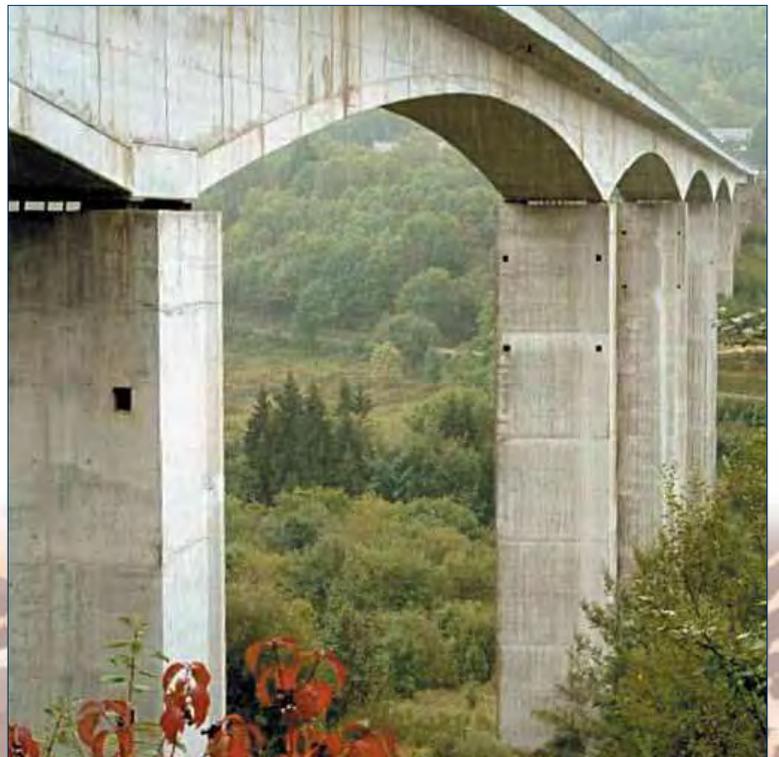




Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées

techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

**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

Les collections du LCPC

Le libre accès à l'information scientifique est essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés, l'Université Gustave Eiffel a fait le choix de numériser et de mettre à disposition en téléchargement gratuit, l'intégralité des ouvrages publiés dans les collections du LCPC de 1969 à 2014, du fait de son caractère patrimonial.

La collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées »

Issus de l'expertise du réseau scientifique et technique (RST), les ouvrages publiés dans la collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées » ont été conçus et rédigés en vue des applications sur le terrain par les professionnels du BTP. La collection se décline en deux séries : guide technique et méthode d'essai.

- La série « guide technique » réunit des synthèses de connaissances, fruits de groupes de travail nationaux associant partenaires publics et privés. Ces guides n'ont pas de valeur normative mais servent de support au développement des techniques.
- La série « méthode d'essai » réunit des méthodes à caractère normatif ou de recommandations. Les méthodes font l'objet d'une qualification par le service qualité du LCPC.

La collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées »

La collection ERLPC « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées » se décline en 8 séries thématiques : construction routière, environnement et génie urbain, géotechnique et science de la terre, mécanique et mathématiques appliquées, ouvrage d'art, physique chimie, sécurité et exploitation routières, sciences de l'ingénieur. Des mémoires de thèses ou d'habilitation à la direction de recherche, des résultats d'études générales et d'expérimentations en laboratoire et *in situ* ont été notamment publiés dans cette collection.

La collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées »

De 1969 à 1990, les travaux de recherche les plus significatifs du LCPC ont été publiés dans la collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées ». Cette collection historique a ensuite laissé la place à la collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées ».

La collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées »

Les ouvrages de la collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées » regroupent les communications présentées par les intervenants à l'occasion de manifestations scientifiques organisées ou co-organisées par le LCPC.

Les ouvrages des collections du LCPC sont diffusés sous la licence Creative Commons CC BY-NC-ND. Cette licence ne permet que la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, les documents peuvent être copiés, distribués et communiqués par tous moyens et sous tous formats.



 Attribution — Vous devez créditer l'œuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Université Gustave Eiffel vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

 Pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

 Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

**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

Avril 2006



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été élaboré par un groupe de travail composé de spécialistes :

- Jacques Aubry (LRPC de Clermont-Ferrand),
- Dominique Batista (LRPC d'Aix-en-Provence),
- Michael Dierkens (LRPC de Lyon),
- Gérard Kittel (LRPC de Lille),
- Alain Lelièvre (LRPC de Rouen),
- Bernard Naquin (LRPC de Lyon),
- Jacques Prost (LRPC de Lyon), *animateur*
- Bruno Saintot (LRPC de Nancy),
- Jérôme Saliba (LRPC d'Aix-en-Provence).

Pour commander cet ouvrage :

**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
DISTC-Diffusion des Éditions**

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15

Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 30 Euros HT

En couverture : *Le contrôle de l'intégrité des fondations profondes s'impose à tous les ouvrages, quelles que soient leurs dimensions et leur importance stratégique.*

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général
(ou de ses représentants autorisés)

© 2006 - LCPC
ISSN 1151-1516
ISBN 2-7208-2444-5

5		INTRODUCTION
7	1.	RÉALISATION DES FONDATIONS PROFONDES
8	1.1	Forage-excavation
8	1.2	Dispositions préalables au bétonnage
8	1.3	Bétonnage
10	1.4	Recépage des éléments de fondations profondes
11	2.	MÉTHODES D'AUSCULTATION DES ÉLÉMENTS DE FONDATIONS PROFONDES
12	2.1	Méthodes d'auscultation et normes associées
12	2.1.1	Méthode sonique par transparence
14	2.1.2	Méthodes par réflexion et par impédance
15	2.1.2.1	Méthode par réflexion
17	2.1.2.2	Méthode par impédance
18	2.2	Autres méthodes
18	2.2.1	Méthode sismique parallèle
19	2.2.2	Méthode par diffusion nucléaire monosonde gamma
19	2.2.3	Méthode par diffusion nucléaire monosonde neutrons
20	2.2.4	Méthode visuelle par caméra
20	2.2.5	Méthodes destructives
23	3.	DOMAINE D'EMPLOI DES MÉTHODES D'AUSCULTATION SELON LE TYPE DE FONDATION
25	4.	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MÉTHODES LES PLUS UTILISÉES
26	4.1	Méthode sonique par transparence
26	4.1.1	Avantages
26	4.1.2	Inconvénients
29	4.2	Méthodes par réflexion et par impédance
29	4.2.1	Avantages
29	4.2.2	Inconvénients
31	4.3	Tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients des méthodes d'auscultation les plus utilisées

33	5.	CONTRÔLE DE L'INTÉGRITÉ DES ÉLÉMENTS DE FONDATIONS PROFONDES
34	5.1	Dispositions communes à toutes les méthodes
35	5.2	Dispositions concernant la méthode sonique par transparence
35	5.2.1	Généralités
37	5.2.2	Mise en place et disposition des tubes de réservation
38	5.2.3	Programmation
39	5.3	Dispositions concernant les méthodes par réflexion et par impédance
39	5.3.1	Généralités
39	5.3.2	Programmation
41	6.	EXECUTION DU CONTRÔLE ET INTERPRETATION DES RÉSULTATS
42	6.1	Méthode sonique par transparence
42	6.1.1	Trajets auscultés
42	6.1.2	Conduite à tenir en cas de détection d'une singularité
45	6.2	Méthodes par réflexion et par impédance
45	6.2.1	Mesures réalisées
45	6.2.2	Conduite à tenir en cas de détection de singularité
47	7.	RÉPARTITION DES CONTRÔLES
48	7.1	Cas où le maître d'œuvre prend la totalité des contrôles à sa charge (contrôle extérieur)
48	7.2	Cas où les contrôles sont à la charge de l'entreprise (contrôle intérieur)
50		BIBLIOGRAPHIE

Ce guide concerne les pieux forés, les barrettes et les parois moulées dans le sol. Il a pour but de définir les dispositions à prendre, préalablement et pendant l'exécution des fondations profondes et de préciser les méthodes d'auscultation adaptées, permettant de vérifier l'intégrité du béton des éléments de fondations profondes.

Il précise les informations à recueillir pour réaliser le contrôle de l'intégrité du béton dans les meilleures conditions possibles.

Il apporte également quelques informations concernant l'interprétation des résultats des auscultations.

Pour cela, le guide aborde les différents points suivants :

- *le forage ou l'excavation du sol,*
- *la phase préalable au bétonnage et le bétonnage,*
- *les différentes méthodes d'auscultation,*
- *le choix de la méthode d'auscultation en fonction du type de fondation et de la géologie du sol,*
- *les dispositions générales à prendre pour la mise en œuvre des méthodes d'auscultation,*
- *les dispositions particulières relatives à chacune de ces méthodes.*



CHAPITRE 1

Réalisation des fondations profondes

1.1 FORAGE-EXCAVATION

Les informations suivantes sont nécessaires pour interpréter les résultats obtenus lors des auscultations :

- ⊙ analyse géotechnique comparative entre la nature du terrain et celle de l'étude géotechnique, mettant notamment en évidence les différences essentielles. La tenue d'une fiche de forage ou d'excavation avec le relevé des différentes couches de terrain rencontrées doit être prévue dans le marché ;
- ⊙ mode de forage : machines, outils, tube de travail... ;
- ⊙ profondeur du forage après curage, ou de l'excavation ;
- ⊙ efficacité du curage en fond de forage pour les pieux forés, celui-ci conditionne en effet la qualité du contact sol/pieu en pointe.

1.2 DISPOSITIONS PRÉALABLES AU BÉTONNAGE

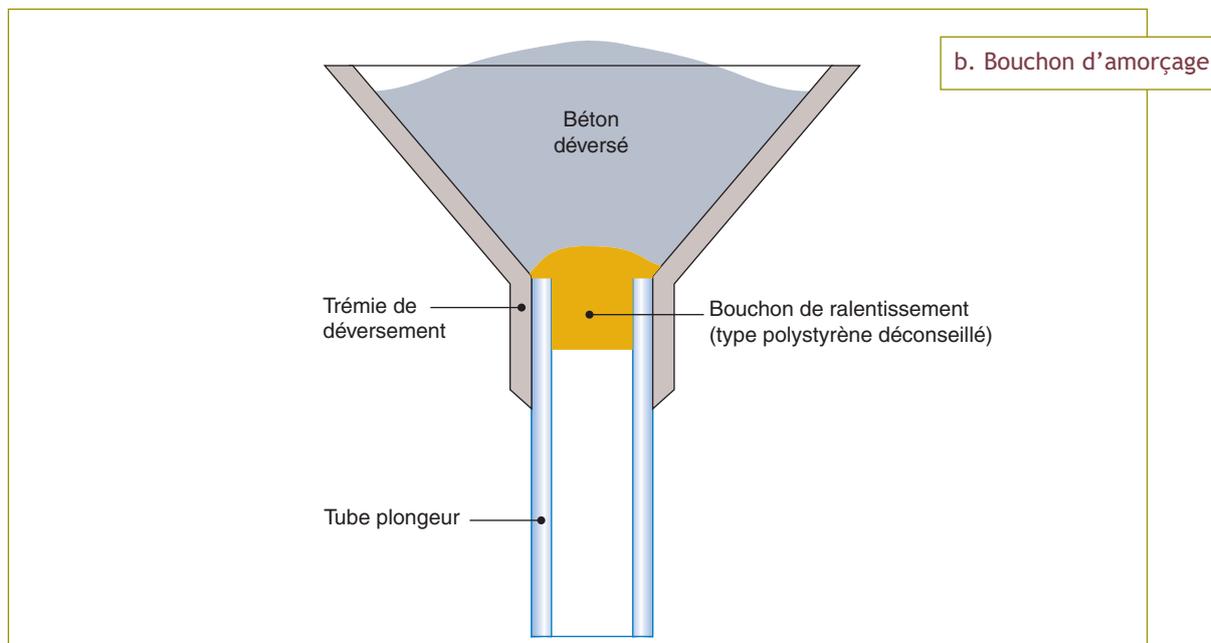
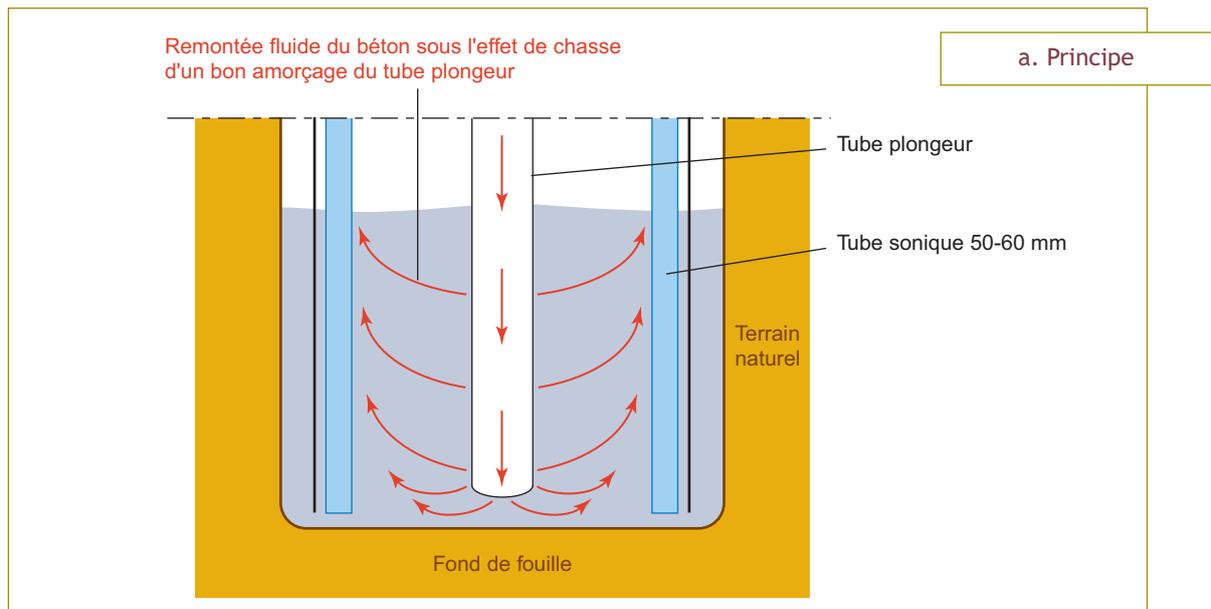
Elles portent sur :

- ⊙ la réception des tubes d'auscultation ou tubes de réservation : les préconisations citées à l'article 5-2 du présent document doivent être respectées ;
- ⊙ la préparation du bétonnage : la longueur du ou des tubes plongeurs doit être compatible avec la profondeur du forage ou de l'excavation. Le tube doit reposer au fond du forage ou de l'excavation avant de le remplir de béton ;
- ⊙ l'amorçage du tube plongeur : cette opération est très importante vis-à-vis de la qualité du béton au contact du sol. L'amorçage doit permettre d'évacuer les résidus de terrain restant au fond du forage ou de l'excavation par « effet de chasse », lorsque le tube plongeur est remonté d'une dizaine de centimètres, comme le montre la figure 1a. Il convient également de limiter les risques de ségrégation et de pollution en ralentissant la chute du béton (cf. par exemple les dispositions indiquées sur la Fig.1b) ;
- ⊙ l'extrémité inférieure des tubes de réservation : celle-ci doit être positionnée au maximum à 10 cm du fond de fouille.

1.3 BÉTONNAGE

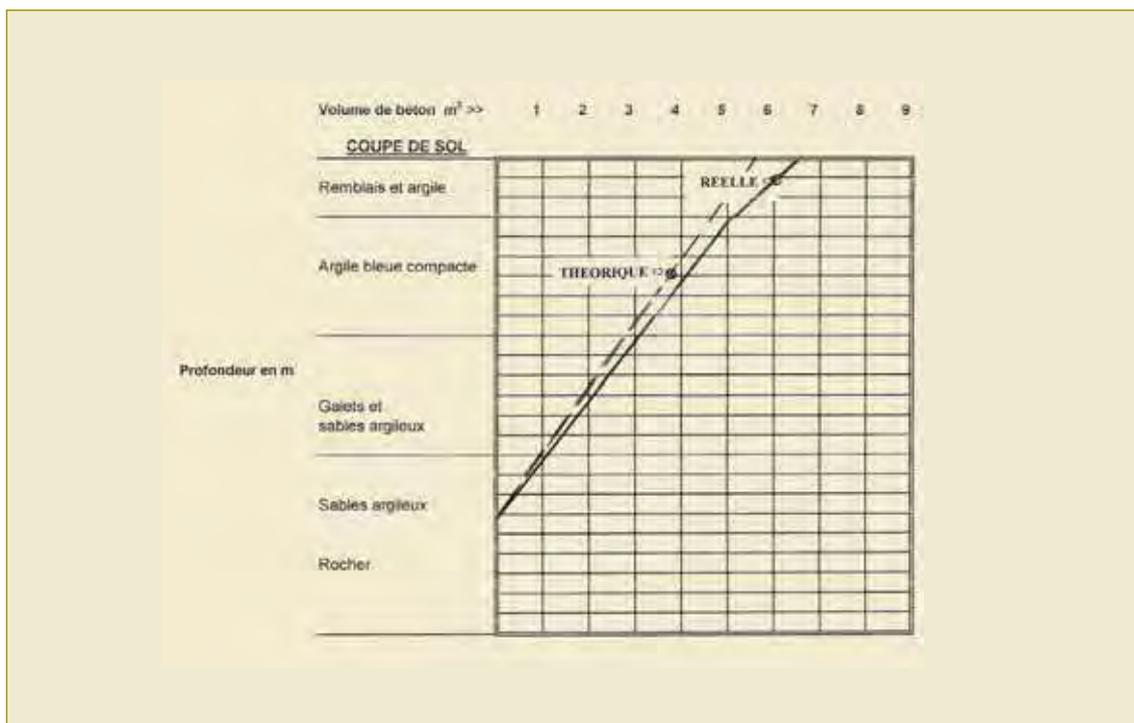
L'attention doit notamment porter sur les points suivants :

- ⊙ respect de la consistance du béton définie dans le marché passé entre le maître d'œuvre et l'entrepreneur, soit par une classe d'affaissement, généralement S4, ou une classe d'étalement, soit par une valeur cible pour l'une ou l'autre de ces caractéristiques (cf. NF EN 206-1 articles 4.2.1 et 5.4, notamment NA.5.4.1). Le contrôle de l'affaissement, est effectué selon la norme NF EN 12350-2 - Essai pour béton frais - Essai d'affaissement, pour une valeur au cône inférieure ou égale à 210 mm. Au-delà, la consistance doit être évaluée selon la norme NF EN 12350-5 - Essai pour béton frais - Essai d'étalement à la table à chocs » ;
- ⊙ maintien des cages d'armatures en position ;



▲ Figures 1a et 1b - Amorçage du tube plongeur.

- ⊙ maintien du tube plongeur dans le béton frais lors de sa remontée, afin d'éviter tout désamorçage ;
- ⊙ régularité des cadences d'approvisionnement du béton pour chaque élément de fondation ;
- ⊙ élimination du béton pollué par débordement en fin de bétonnage ;
- ⊙ respect de la cote théorique de la tête des éléments de fondations ;
- ⊙ établissement de la courbe de bétonnage (Fig. 2, donnée à titre d'exemple) pour chaque élément de fondation et comparaison des quantités réelles de béton mises en œuvre. La courbe de bétonnage doit indiquer les incidents de chantier, pour chaque élément de fondation ;
- ⊙ confection d'éprouvettes de béton destinées à déterminer la résistance mécanique à 28 jours.



▲ Figure 2 - Exemple d'une courbe de bétonnage.

1.4 RECÉPAGE DES ÉLÉMENTS DE FONDATIONS PROFONDES

Il existe plusieurs techniques de recépage :

- marteau piqueur,
- éclateur hydraulique,
- méthodes chimiques.

Ces méthodes permettent d'effectuer un recépage radial et d'éviter ainsi une microfissuration, voire une fissuration du béton, en tête des éléments de fondations.

Dans le cas de gros volumes, on peut utiliser un brise roche. Toutefois, les vingt derniers centimètres seront recépés au marteau piqueur dans le but de s'affranchir de la fissuration du béton engendrée par le brise roche.

Un exemple de recépage avec éclateur hydraulique est donné ci-dessous (Fig. 3).



▲ Figure 3 - Recépage avec éclateur hydraulique.



CHAPITRE 2

Méthodes d'auscultation des éléments de fondations profondes

2.1 MÉTHODES D'AUSCULTATION ET NORMES ASSOCIÉES

- Méthode sonique par transparence NF P 94-160-1.
- Méthode par réflexion NF P 94-160-2.
- Méthode par impédance NF P 94-160-4.

D'autres méthodes peuvent être utilisées :

- Méthode sismique parallèle NF P 94-160-3.
- Méthodes par diffusion nucléaire
à rayonnement gamma XP P 94-160-5.

Cette norme englobe deux méthodes :

- monosonde gamma : elle fait l'objet de la section 5-1 de la norme ;
- double sonde gamma : elle fait l'objet de la section 5-2 de la norme.

Cette méthode est comparable à la méthode sonique par transparence, l'émetteur d'ultrasons étant remplacé par une source de Césium 137 et le récepteur par un détecteur de photons gamma. La masse volumique entre tubes peut ainsi être déterminée. Cette méthode, peu utilisée, n'est donc que très sommairement décrite dans le présent document.

- Méthode par diffusion nucléaire monosonde neutrons.
- Méthode visuelle par caméra.
- Méthodes destructives : forage au wagon drill et/ou carottage.

2.1.1 Méthode sonique par transparence

Principe

Deux sondes sont disposées à un même niveau dans deux tubes de réservation, l'une comme émetteur d'une onde ultrasonore, l'autre comme récepteur tel que l'indique la figure 4.

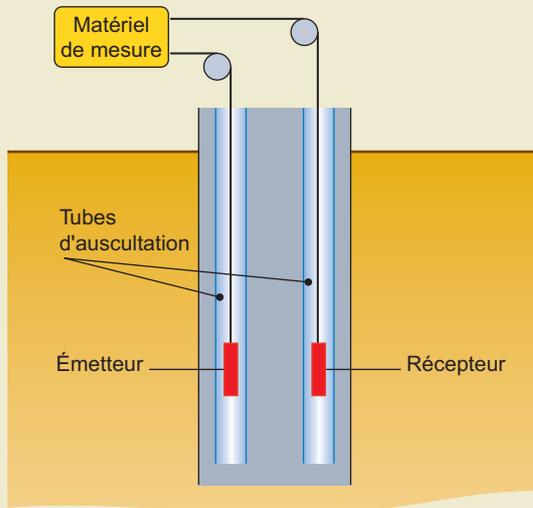
Il s'agit de mesurer, au niveau du récepteur, le temps de propagation de l'onde dans le béton et la variation de l'amplitude du signal acoustique reçu.

Le matériel est constitué d'une chaîne de mesure et de treuils permettant le déplacement des sondes dans les tubes de réservation (Fig. 5, 6 et 7).

Ces matériels possèdent, à quelques variantes près, les mêmes dispositifs, à savoir :

- une chaîne d'acquisition et de traitement du signal,
- un moyen de visualisation et de stockage des informations,
- un ou plusieurs treuils permettant la descente des sondes dans les tubes de réservation.

Ces appareillages permettent de déterminer le temps de parcours et l'amplitude de l'onde ultrasonore sur toute la hauteur auscultée, et répondent aux exigences de la norme NF P 94-160-1.



▲ Figure 4 - Schéma de principe.



▲ Figure 5 - Matériel du réseau des LPC AVSP 2000.



▲ Figure 6 - Matériel RINCENT BTP.

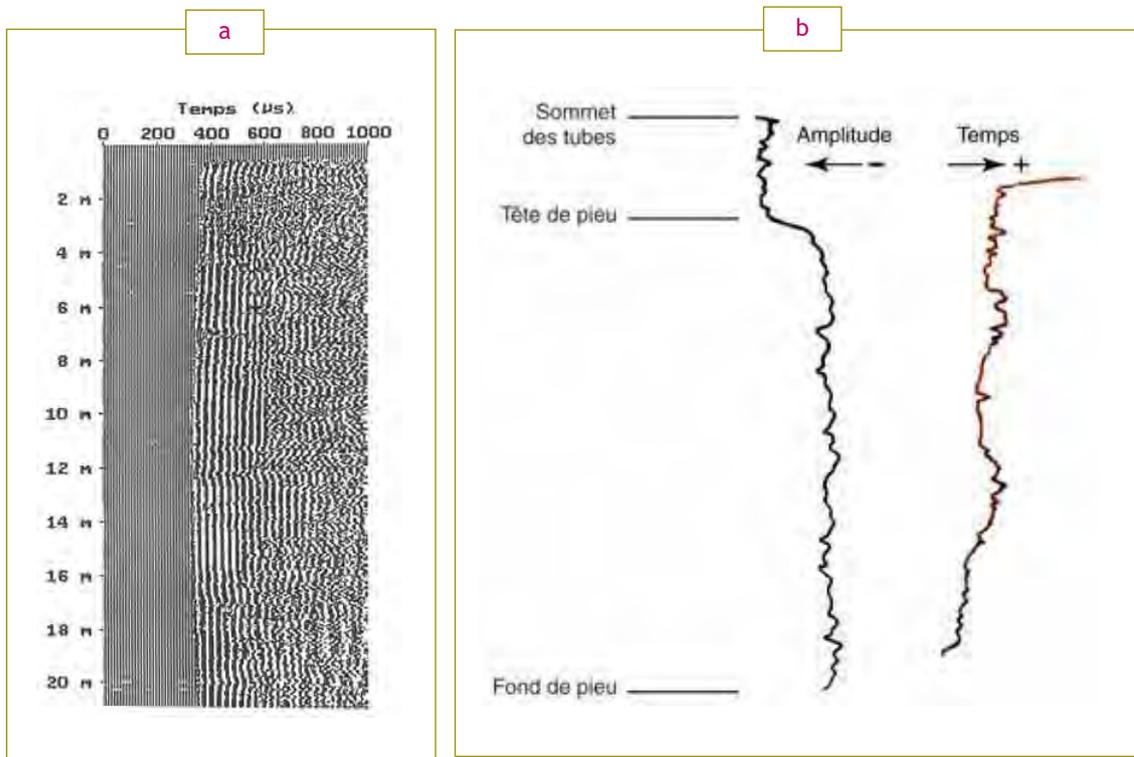


▲ Figure 7 - Matériel CEPT.

Le temps de parcours de l'onde est fonction à la fois de la distance entre tubes et de la qualité du béton. L'amplitude est peu affectée par les variations de distance mais elle l'est considérablement en présence d'une singularité.

Une singularité est caractérisée par sa position dans le fût en profondeur et en plan par rapport aux tubes. Sa nature est appréhendée à partir des informations citées au chapitre 5.

Les exemples de la figure 8 montrent l'évolution du temps et de l'amplitude sur la hauteur du pieu.



▲ Figure 8a et 8b - Exemples d'enregistrement de l'amplitude et du temps sur un pieu.

Les variations d'amplitude sont traduites sur la figure 8a par des variations de densité de gris et sur la figure 8b par des variations minimales dans le profil de la courbe.

Sur la figure 8a, on observe à 2 mètres une très légère singularité qui n'est pas due à un écartement de tubes. En effet, un écartement de tubes est peu probable sur une si faible hauteur et par ailleurs, les traces restent bien visibles.

Sur la figure 8b, la trace « temps » accuse une légère pente sur la droite : il s'agit d'un allongement de la distance entre les tubes et non d'une singularité puisque la trace « amplitude » reste stable.

2.1.2 Méthodes par réflexion et par impédance

Principe

Les deux méthodes s'appliquent essentiellement aux pieux. Elles reposent sur la génération d'une onde mécanique en tête des pieux, obtenue en provoquant un choc avec un marteau. L'onde mécanique donne naissance à une onde réfléchie au droit des discontinuités dans le fût et des zones de variation du frottement latéral, ainsi qu'en fond de pieu.

Un accéléromètre, placé en tête de l'élément de fondation, capte les réflexions de l'onde de choc générée dans le fût par le coup de marteau (cf. Figures 10 et 13). La vitesse particulière* mesurée en tête de pieu est obtenue après intégration du signal dans le temps. Avec la méthode par impédance, on mesure également la force appliquée avec un marteau instrumenté. Un accéléromètre est placé dans le marteau. Connaissant la masse du marteau, il est alors possible de calculer la force appliquée. La figure 9 montre le matériel commun aux deux méthodes.



▲ *Figure 9 - Matériel d'auscultation par réflexion et impédance : enregistrements graphiques sur micro-ordinateur.*

Il s'agit de méthodes comparatives qui prennent en compte à la fois les caractéristiques du sol et la qualité du béton. Il est donc nécessaire d'ausculter au moins cinq pieux dans un milieu homogène pour dissocier la signature du sol** de celle du béton.

L'écho du fond de pieu est d'autant plus visible que la différence d'impédance*** entre terrain et base du pieu est importante.

2.1.2.1 Méthode par réflexion

Cette méthode, dont le principe est donné sur la figure 10, donne l'évolution de la vitesse particulière de l'onde réfléchie en fonction du temps.

La détermination de la célérité de l'onde dans le béton, généralement comprise entre 3500 et 4500 m/s, permet d'établir la courbe de la vitesse particulière en fonction de l'estimation de la longueur du pieu et de l'écho de fond de pieu.

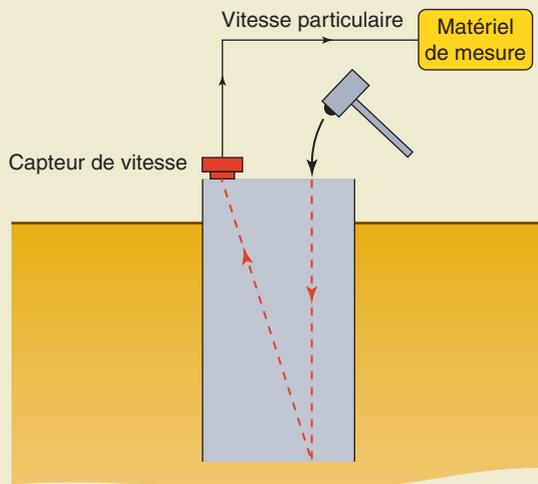
L'essai consiste à générer trois impacts successifs en tête de pieu. L'interprétation s'appuie sur la visualisation de la signature du sol (Fig. 11 et Fig. 12).

* La vitesse particulière est la vitesse de déplacement des particules constituant le béton après impact du marteau en tête de pieu.

** La signature du sol reflète l'incidence des caractéristiques mécaniques du sol sur la courbe de réponse.

*** 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.

Le diagnostic est réalisé à partir du calcul de la fonction inverse appelée admittance. Celle-ci représente la mobilité du pieu sous contrainte verticale.



▲ Figure 10 - Schéma de principe de la méthode par réflexion.



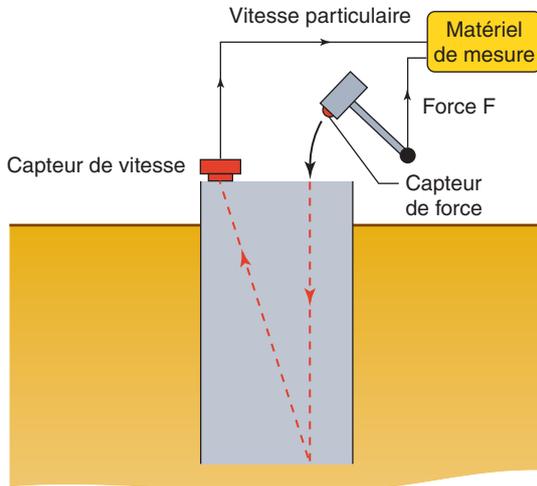
▲ Figure 11 - Photo d'écran.



▲ Figure 12 - Analyse de la courbe obtenue par réflexion.

2.1.2.2 Méthode par impédance

Cette méthode, dont le principe est donné sur la figure 13, est comparable à la méthode par réflexion. Elle consiste à étudier le spectre de fréquence de l'admittance. Elle associe la mesure de la force appliquée au marteau, lors du choc en tête de pieu, à un traitement mathématique du signal réfléchi (cf. définition de l'impédance*** page 15).

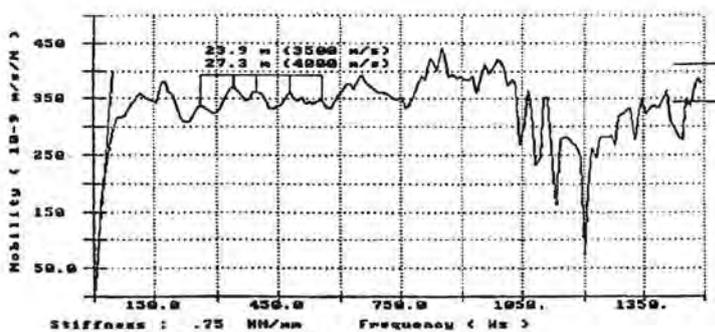


◀ Figure 13 - Schéma de principe de la méthode par impédance.

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

Cependant, contrairement à la méthode par réflexion, la relation temps/profondeur ne peut être déterminée puisque dans la quasi-totalité des cas, la signature du sol n'est pas identifiable du fait de la représentation dans le domaine fréquentiel. La longueur est calculée pour des célérités de 3500 m/s et 4000 m/s qui sont choisies arbitrairement.

La pente à l'origine est reliée à la raideur statique pour de très faibles charges, paramètre que l'on peut comparer avec la valeur théorique comme l'indique la figure 14. Notons que cette valeur de raideur est différente de celle obtenue sous forte charge.



◀ Figure 14 - Exemple d'une courbe d'admittance obtenue avec la méthode par impédance.

Unités : Ordonnée en 10^{-9} m/s/N , abscisse en Hertz.

2.2 AUTRES MÉTHODES

Lorsqu'un doute subsiste quant à la nature des singularités constatées, il est possible de faire appel à d'autres méthodes.

2.2.1 Méthode sismique parallèle

Cette méthode concerne essentiellement les éléments de fondations, non pourvus de tubes de réservation. Elle consiste à réaliser un forage à proximité de l'élément et à déplacer une sonde réceptrice à l'intérieur de ce forage. Ce forage tubé doit dépasser de 5 mètres l'extrémité inférieure 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.

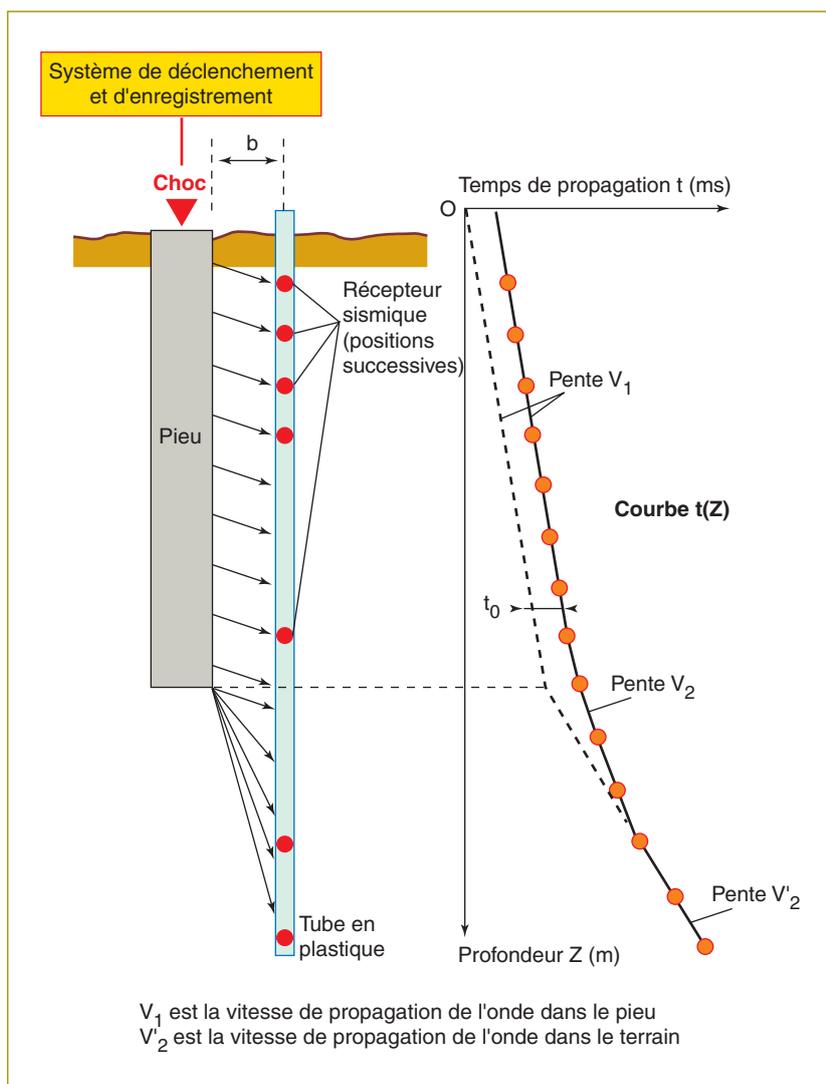
On mesure, selon un pas déterminé, le temps de parcours de l'onde entre émetteur et récepteur sur toute la hauteur de l'élément de fondation.

La figure 15 traduit les variations de temps dues à la distance parcourue par l'onde et aux discontinuités observées sur le parcours de l'onde.

Figure 15 - Graphe obtenu par la méthode sismique parallèle.

L'exemple ci-contre montre une courbe de temps de propagation de l'onde obtenue par la méthode sismique parallèle.

Une singularité serait caractérisée par une discontinuité des valeurs de temps sur la droite V_1 .



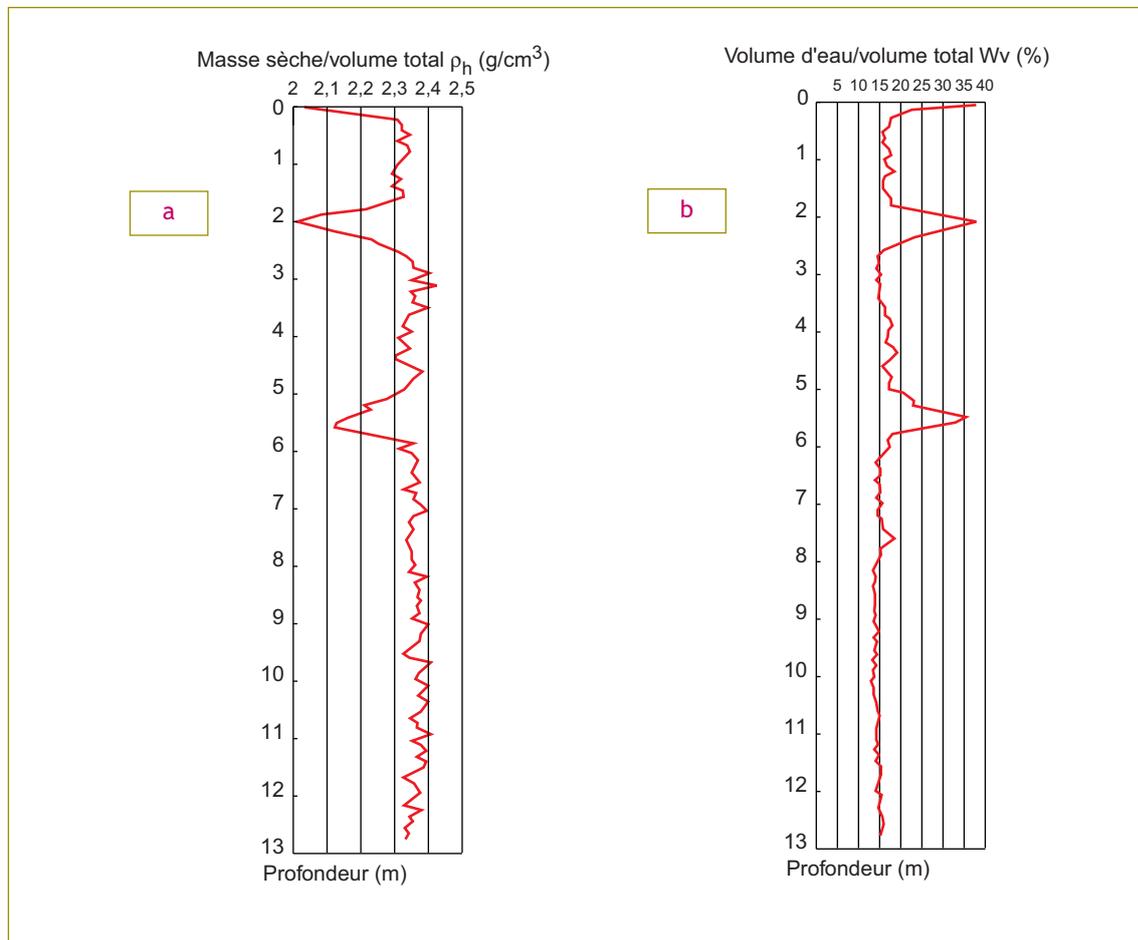
2.2.2 Méthode par diffusion nucléaire monosonde gamma

Cette méthode (Fig. 16a) peut être utilisée en complément de la méthode sonique par transparence. Elle indique la variation de la masse volumique du béton sur le trajet ausculté.

2.2.3 Méthode par diffusion nucléaire monosonde neutrons

Cette méthode (Fig. 16b) met en œuvre une monosonde neutrons. Sa particularité réside dans le fait qu'elle contient à la fois la source d'émission neutrons et le détecteur. Cette méthode permet d'obtenir la concentration en atomes d'hydrogène. Après étalonnage on obtient alors la teneur en eau du matériau ausculté.

Le volume d'auscultation est celui d'un cylindre de 300 mm de diamètre environ pour chaque tube d'auscultation. Les tubes sont sensiblement identiques aux tubes de réservation utilisés avec les méthodes soniques en transparence et la méthode par diffusion nucléaire à rayonnement gamma double sonde.



▲ **Figures 16 - Méthodes par diffusion nucléaire.**

a. *Monosonde gamma.*

b. *Monosonde neutrons.*

Les profils de mesures obtenus permettent de localiser des singularités dues à la présence de terrain naturel dans le pieu et des discontinuités comme le montrent les figures 16a et 16b.

2.2.4 Méthode visuelle par caméra

Il s'agit d'une imagerie vidéo. La méthode consiste à descendre une caméra à l'intérieur d'un forage réalisé dans l'élément de fondation ou au fond d'un tube de réservation, après avoir percé le bouchon.

Cette méthode donne une image réelle de la zone du défaut. En absence de tubage, elle donne une information sur toute la hauteur de l'élément de fondation.

2.2.5 Méthodes destructives

Il existe deux méthodes : l'une destructrice (wagon-drill), l'autre non destructive (carottage). Ces méthodes sont utilisées en reconnaissance ou en confirmation d'une singularité. Le carottage a l'avantage de fournir un échantillon de béton ou de terrain naturel, sur lequel il est possible de faire un examen visuel et des essais (essais mécaniques sur le béton notamment). Ces prélèvements permettent entre autre de déterminer la nature de la singularité observée par d'autres méthodes.

Le carottage ou le forage au wagon-drill pouvant dévier de leur trajectoire, il convient d'être vigilant sur la verticalité de l'outil.

Ces méthodes ne présentent donc pas toutes les garanties de rencontrer une singularité décelée par les méthodes non destructives.

La figure 17 montre un exemple de défaut de pointe décelé par la méthode sonique par transparence et confirmé par carottage.



▲ Figure 17 - Carotte extraite d'un fond de pieu.

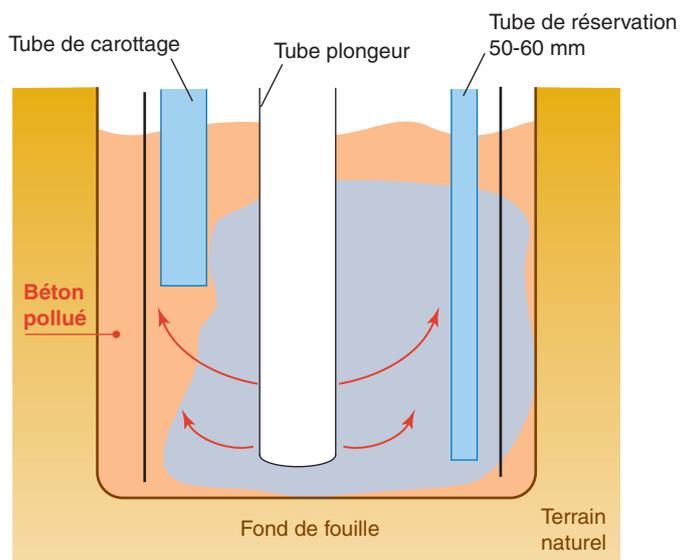
Méthode de reconnaissance du contact sol/pieu par carottage

Lorsque l'on souhaite prélever un échantillon de béton dans le but d'obtenir des informations visuelles et qualitatives à une profondeur donnée, on réalise un carottage depuis la tête du pieu.

Lorsque l'on désire effectuer uniquement un carottage en fond de pieu, il est plus économique de prévoir la pose d'un tube supplémentaire de diamètre 102/114 mm dans la cage d'armatures. Ce tube, mentionné dans le document LCPC-SETRA « Les pieux forés - recueil des règles de l'art », n'atteint pas le fond de pieu : son extrémité inférieure est positionnée à 50 cm du fond de forage. Il est alors possible de vérifier la qualité du contact pointe-substratum sans devoir carotter le pieu sur toute sa longueur.

Dans la pratique, cette vérification est rarement faite et le tube sert de tube d'auscultation alors qu'il n'est pas adapté à cet usage. Cette habitude est fort préjudiciable au contrôle sonique car il est alors impossible d'ausculter la totalité des trajets sur les 50 derniers centimètres du pieu.

La figure 18 montre qu'il subsiste, sous la base du tube de carottage, un risque d'inclusion d'éléments polluants en provenance du fond de fouille lors de la remontée du béton.



▲ **Figure 18** - Désordres occasionnés par le tube de diamètre 102/114 mm.

Pour ces raisons, l'utilisation d'un tube de carottage de diamètre 102/114 mm ne doit être envisagée que pour des pieux d'un diamètre supérieur ou égal à 1200 mm.

Remarques

Pour les pieux de diamètre inférieur à 1200 mm, la qualité de la pointe peut toujours être vérifiée à partir d'un carottage exécuté à l'intérieur d'un tube 50/60 mm.

La présence du tube 102/114 mm sera donc envisagée uniquement lorsqu'une reconnaissance de la qualité du contact pointe-substratum est nécessaire.

Le tube de carottage 102/114 mm ne doit en aucun cas se substituer à un tube de réservation destiné à l'auscultation sonore.



CHAPITRE 3

*Domaine d'emploi
des méthodes
d'auscultation selon
le type de fondation*

Le choix de la méthode d'auscultation dépend du type de fondation : pieux forés, barrettes, parois moulées, comme l'indique le tableau suivant.

Choix des méthodes selon le type et les caractéristiques des éléments de fondation

Pieux forés		
Longueur L (m)	L < 25 m	L ≥ 25 m
Diamètre D (mm)		
D ≤ 800	toutes* + **	sonique
800 < D ≤ 1000	sonique	sonique
D > 1000 ***	sonique	sonique
Barrettes et parois moulées :		
Sonique par transparence dans tous les cas		
<p>* Lorsque le frottement latéral est prépondérant et quel que soit le diamètre du pieu, seule la méthode sonique est applicable. Il en est de même pour les pieux vissés moulés.</p> <p>** L'utilisation des méthodes par réflexion et par impédance nécessite obligatoirement de connaître les résultats de l'examen préalable du dossier géotechnique (cf. paragraphe 1.1 Forage-Excavation).</p> <p>*** La norme NF P 94-160-2 fixe dans le cas général la limite de D_{max} à 1000 mm et un élancement compris entre 10 et 30 fois le diamètre.</p>		



CHAPITRE 4

*Avantages
et inconvénients
des méthodes
les plus utilisées*

4.1 MÉTHODE SONIQUE PAR TRANSPARENCE

4.1.1 Avantages

Simplicité du diagnostic

La méthode sonique par transparence n'est tributaire d'aucune contrainte liée à la nature du sol.

La définition d'une singularité est donnée dans la norme NF P 94-160-1, ce qui n'engendre aucune ambiguïté.

Longueur de pieu auscultée

La méthode par transparence permet d'ausculter un pieu fracturé sous la partie endommagée.

Corrélation possible avec les autres méthodes

À part les méthodes destructives applicables à n'importe quel type de fondation (forage au wagon drill, carottage), l'auscultation sonique par transparence est la seule qui autorise la mise en œuvre des méthodes complémentaires suivantes : diffusion nucléaire, carottage à l'intérieur des tubes.

Réparation possible de certains défauts

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 délicat et coûteux du pieu.

Contrôle de pieux recépés

La norme impose que les pieux ne soient pas recépés, contrairement aux méthodes par réflexion et par impédance. Il n'est donc pas nécessaire d'attendre la phase de recépage pour ausculter un pieu. Ceci évite de générer un retard d'exécution dans le planning de l'entreprise.

4.1.2 Inconvénients

Fracture du fût

La méthode par transparence ne permet pas de détecter directement des fractures horizontales, sauf à recommencer l'auscultation en décalant les sondes en cas d'expertise.

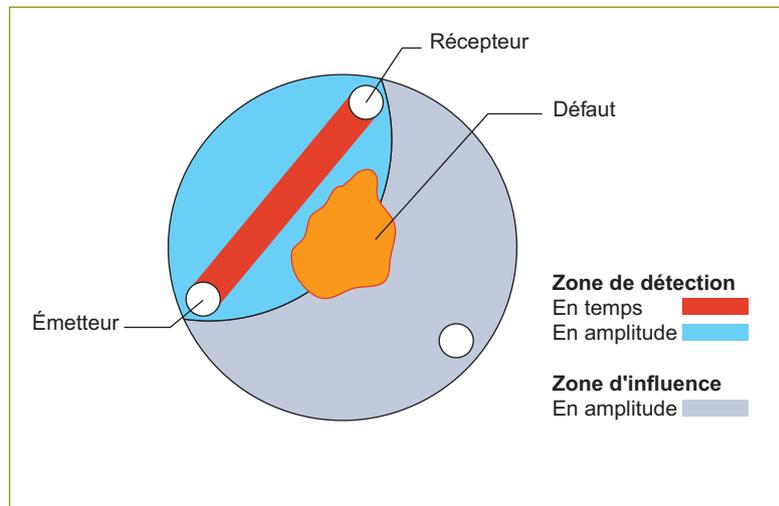
Auscultation partielle de la section du fût

Le signal recueilli est représentatif du béton situé entre deux tubes.

Dans le cas d'un pieu équipé de trois tubes, une singularité de faible volume située en partie centrale du fût risque de ne pas produire

d'allongement de temps sur les trajets directs. Cet inconvénient doit être cependant minimisé, car les défauts de réalisation des éléments de fondations se produisent rarement dans la partie centrale du fût, et si c'était le cas (cf. Fig.36), l'amplitude du signal permettrait de détecter cette singularité, car elle est globalement sensible à toutes les modifications du milieu ausculté, même situées en dehors d'un trajet direct.

En effet, quelle que soit sa position dans le plan, un défaut crée une zone d'influence identifiable par la variation d'amplitude, même lorsqu'il n'est pas situé sur le trajet direct de l'onde, comme le montre l'exemple de la figure 19, donné à titre indicatif.



▲ **Figure 19** - Propagation de l'onde dans la section d'un pieu (sur un trajet).

Remarque

Dans le cas d'un équipement de quatre tubes, la partie centrale du pieu est directement auscultée en temps et en amplitude puisque les trajets diagonaux sont également auscultés. Dans tous les cas, l'exploitation des variations d'amplitude apporte donc un complément d'information appréciable. L'exploitation conjointe de l'amplitude et du temps de propagation doit donc être appliquée à tous les trajets.

Auscultation de l'élément de fondation limitée à la longueur des tubes

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 l'un des tubes est obstrué au-dessus du fond de forage. Il faut notamment s'assurer que les extrémités des tubes sont le plus près possible du fond du forage.

La figure 20 montre la position des tubes de réservation sur la cage d'armatures. On observe un défaut de montage puisque les extrémités des tubes ne sont pas au niveau de la base de la cage.

La figure 21 donne un exemple d'une bonne disposition de l'extrémité inférieure des tubes de réservation.

Mise en place du matériel

La méthode sonique en transparence nécessite l'installation d'un matériel plus important que celui des méthodes par réflexion et par impédance. Ceci peut avoir une incidence sur la durée du contrôle, notamment si la préparation de l'intervention a mal été réalisée. Dans tous les cas, il est souhaitable d'intégrer le temps des essais dans le planning des travaux.



▲ Figure 20 - Tubes de réservation mal positionnés.



▲ Figure 21 - Exemple d'une bonne disposition relative des tubes et de la cage d'armature.



▲ Figure 22 - Matériel d'auscultation :
poste de travail.

Le poste de travail comprend tous les systèmes de commande, de visualisation et d'enregistrement du signal.



▲ Figure 23 - Matériel d'auscultation :
treuils et câbles.

Les treuils sont télécommandés depuis le poste de travail qui peut être éloigné d'une dizaine de mètres.

4.2 MÉTHODES PAR RÉFLEXION ET PAR IMPÉDANCE

4.2.1 Avantages

Rapidité et simplicité de l'essai

La mise en oeuvre de ces méthodes est rapide (Fig. 24).

Le contrôle d'un élément de fondation ne comportant pas de singularité nécessite moins de cinq minutes.



▲ *Figure 24 - Matériel d'auscultation par réflexion et par impédance - matériel de première génération.*

Totalité de la section auscultée

Les méthodes par réflexion et par impédance donnent une image globale de la fondation sur la totalité de sa section.

L'analyse des courbes obtenues par les méthodes par réflexion et par impédance (cf. figures 12 et 14) permet d'apprécier rapidement l'intégrité du pieu dans son environnement : frottement latéral, contact sol-pieu, variation des caractéristiques du fût.

Rupture du fût

Une rupture de l'élément de fondation sera décelée aisément par ces méthodes.

4.2.2 Inconvénients

Longueur de pieu auscultée

Dans le cas d'un pieu présentant une rupture, les méthodes par réflexion et par impédance ne permettent pas d'ausculter le reste du fût, à moins de démolir la partie supérieure du pieu, car l'onde est alors entièrement réfléchi par ce premier obstacle.

Dans le cadre des applications des méthodes par réflexion et par impédance, la méconnaissance de la célérité réelle de l'onde implique une incertitude de l'ordre de 12 % sur la longueur réelle du pieu.

Localisation d'une singularité dans la section de pieu

Il n'est pas possible de localiser la position d'une singularité dans la section du pieu.

Signaux parasites

Le fût a très rarement la forme cylindrique sous laquelle on le représente. En réalité, chaque section présente des variations de diamètre ou de forme qui vont perturber le signal visualisé et générer un « bruit de fond ». Ce « bruit » étant un phénomène aléatoire, 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 du pieu.

Atténuation du signal dans des couches compactes

Lorsque les impédances du sol et du pieu sont suffisamment distinctes, l'écho de fond apparaît nettement sur le signal (cf. Fig. 12). Lorsque les pieux sont forés plus profondément que la première couche de terrain compacte rencontrée, ceci perturbe fortement le signal mesuré et rend l'interprétation difficile. L'ancrage du pieu est interprété comme s'il s'agissait de son extrémité.

Vérification impossible 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 confirmer les résultats par la méthode sonique en transparence.

Réparation difficile de certains défauts

En présence d'un défaut de pointe, il est fréquent de réparer le pieu en procédant à une injection de coulis. Ce mode de réparation, lorsque ces méthodes ont été choisies, nécessite de réaliser des forages dans le pieu, ce qui est toujours techniquement difficile et très coûteux.

Importance de la qualité du recépage

Le principe de base des méthodes par réflexion et par impédance est un choc en tête de pieu provoqué par un coup de marteau. L'interprétation des mesures n'est possible que si la tête de pieu est recépée suivant les recommandations données au paragraphe 1.4 (absence de fissuration en tête et planéité de la surface d'appui du capteur, comme le montre la figure 25).

À défaut, il est possible de meuler le béton de manière à assurer la planéité des zones d'impact et d'application de l'accéléromètre.

Figure 25 - Préparation de la mesure.



4.3 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES AVANTAGES ET DES INCONVÉNIENTS DES MÉTHODES D'AUSCULTATION LES PLUS UTILISÉES

Caractéristiques	Méthodes	Contrôle sonique en transparence	Contrôle par réflexion
Faisabilité de la méthode en fonction de la nature des terrains traversés par l'élément de fondation.		La nature du terrain n'influence pas la faisabilité de la méthode.	Parfois impossible. Lorsque le fût traverse des couches de terrain compactes, une partie importante de l'énergie de l'onde est absorbée par ces couches. L'interprétation des courbes est alors difficile.
Mise en œuvre des mesures.		Assez lourde. Cette méthode nécessite un système de treuils et un système d'acquisition de signal.	Légère. Le matériel nécessaire est très réduit et le contrôle d'un nombre important de pieux est possible dans une journée.
Taille minimum du chantier.		Sans incidence. Il est possible d'intervenir pour un élément de fondation unique.	Nombre de pieux minimum recommandé. Pour une prestation de contrôle, il est vivement recommandé d'intervenir sur un minimum de cinq pieux dans des conditions géotechniques identiques.
Auscultation de la totalité d'une section de l'élément de fondations.		Non. Bien que des défauts réels aient toujours une zone d'influence visible en amplitude en dehors du trajet le plus direct de l'onde, il n'y aura pas « singularité » au sens de la norme. L'auscultation sonique par transparence permet de caractériser la qualité du béton situé entre les tubes de réservation.	Oui. Les échos engendrés par une singularité du pieu sont directement liés à la qualité du recépage de la tête de pieu et aux caractéristiques du béton d'une section du pieu mais ne peuvent pas être localisés dans la section du pieu, comme le fait l'auscultation sonique par transparence.
Auscultation de l'élément de fondation sur toute sa longueur.		Oui. Mais l'auscultation se limite à la longueur des tubes de réservation. Si ceux-ci, malgré les recommandations d'usage, ne descendent pas en fond de pieu, la partie située sous les tubes ne peut être auscultée.	Oui. En l'absence de singularité, l'onde se propage dans le fût, mais lorsque la fondation traverse une couche compacte ou lorsque la pointe est encastrée dans le rocher, l'écho de fond peut être altéré ou masqué.
Cas des fractures.		Possible. L'auscultation de la totalité du fût est possible sans problème. Cependant la présence d'une fissure ou d'une fracture horizontale ne peut se détecter qu'en décalant les sondes.	Possible. Toutefois, si la discontinuité est trop importante, l'auscultation de l'élément ne sera plus possible au-delà de la fracture.
Recépage.		Sans incidence puisque l'intervention est réalisée avant recépage.	Paramètre important. La qualité du recépage est primordiale.
Confirmation des singularités par d'autres méthodes.		Oui. Il est possible d'appliquer toutes les autres méthodes pourvu que les conditions d'utilisation soient respectées.	Difficile et coûteux. Il n'y a pas de tube, on ne peut donc pas utiliser une méthode classique en transparence, sauf à réaliser des forages dans le pieu.
Possibilité de réparation.		Oui. La présence des tubes facilite les réparations par injection en pointe.	Difficile et coûteuse. Comme il n'y a pas de tube, toutes les réparations par injection de coulis nécessitent un forage.
Exploitation des mesures.		Relativement facile. Le dépouillement des mesures est régi par une méthode d'analyse précise et fiable.	Parfois très difficile. Prise en compte de plusieurs paramètres dans l'analyse, dont la signature du sol. Dans certains cas, le rapport signal sur bruit est tellement faible que toute exploitation devient irréaliste.



CHAPITRE 5

Contrôle de l'intégrité des éléments de fondations profondes

Avant la rédaction définitive des documents Qualité des entreprises, il est indispensable de prévoir une réunion entre le maître d'œuvre, l'entreprise titulaire du marché, l'entreprise titulaire du marché fondations et les organismes chargés du contrôle intérieur et du contrôle extérieur.

Cette réunion a pour but de définir l'objectif du contrôle, les phases d'intervention et les contraintes de chantier afin de réunir les moyens de réaliser le contrôle dans les meilleures conditions.

5.1 DISPOSITIONS COMMUNES À TOUTES LES MÉTHODES

Planification des essais

Tous les éléments de fondations doivent être préparés pour le contrôle.

L'auscultation est réalisée sur un béton âgé d'au moins sept jours (cf. normes NF P 94-160- XX) car une auscultation sur un béton trop jeune peut entraîner des perturbations de la mesure, susceptibles d'être interprétées comme des singularités.

Néanmoins, pour des raisons liées au déroulement du chantier, les mesures peuvent, en dérogation exceptionnelle aux normes, être réalisées sur des éléments de fondations âgés de moins de sept jours. Dans l'hypothèse, où une singularité serait détectée, une seconde intervention sera effectuée lorsque les éléments de fondations auront atteint l'échéance normative de sept jours d'âge. Cet essai complémentaire permet de confirmer ou d'infirmer les premiers résultats.

Informations à fournir aux organismes chargés du contrôle

La connaissance des informations suivantes est indispensable pour mener à bien une campagne d'auscultation. Elles doivent être obtenues pour partie préalablement aux interventions et pour partie sur le chantier.

■ préalablement :

- ⊙ l'implantation et la longueur théorique des éléments de fondations sur un plan d'exécution à jour, fourni par l'entreprise ou la maîtrise d'œuvre ainsi que le nombre de tubes,
- ⊙ la technique de construction employée (méthode et moyens de forage ou d'excavation),
- ⊙ la date de bétonnage de chaque élément de fondation,
- ⊙ la cote altimétrique théorique de la base des éléments de fondations,
- ⊙ la cote altimétrique théorique après recépage,
- ⊙ la coupe géotechnique,
- ⊙ les sujétions particulières liées au chantier (horaires, accessibilité, etc.),

■ sur chantier :

- ⊙ la cote altimétrique du sommet des tubes de réservation pour chaque élément de fondation. Pour des raisons pratiques il est souhaitable que tous les tubes de réservation soient recoupés à la même hauteur,

- ⊙ la courbe de bétonnage de chaque élément de fondation,
- ⊙ la liste des éventuels incidents survenus en cours d'exécution (forage et bétonnage),
- ⊙ la cote altimétrique réelle après recépage,
- ⊙ l'assurance que les tubes de réservation ont bien été lavés, qu'ils sont étanches et remplis d'eau claire.

Les cotes altimétriques permettent de déterminer la longueur des éléments de fondations et leur position dans le contexte géologique. Elles permettent notamment de situer les cotes de fond de pieu et après recépage ainsi que les éventuelles singularités détectées au cours du contrôle.

La connaissance de la technique de réalisation ainsi que la coupe géologique sont indispensables pour interpréter les résultats des essais et expliciter la nature d'éventuelles singularités, particulièrement pour les méthodes par réflexion et par impédance.

5.2 DISPOSITIONS CONCERNANT LA MÉTHODE SONIQUE PAR TRANSPARENCE

5.2.1 Généralités

La méthode sonique par transparence est mise en œuvre avant recépage.

Cette méthode nécessite, selon la norme NF P 94-160-1, la présence de tubes métalliques d'auscultation dont l'entraxe est généralement compris entre 0,30 m et 1,50 m.

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.

Il est fortement recommandé que les éléments de tubes de réservation soient raccordés entre eux avec des manchons vissés permettant d'assurer une bonne étanchéité (Fig. 26). Le tulipage (Fig. 27), s'il est toléré, doit être étanche afin d'éviter les fuites d'eau et la pénétration de laitance. Cette technique n'est cependant pas souhaitable car elle ne garantit pas l'étanchéité entre les éléments de tubes. Or, toute perte d'étanchéité entraîne des difficultés pour maintenir le niveau d'eau assurant le couplage entre les sondes et le béton. De même, elle peut favoriser des inclusions dans les tubes, ce qui peut être préjudiciable à la qualité des contrôles et présenter des risques d'accrochage pour les sondes.

Pour les mêmes raisons, les tubes de réservation doivent être hermétiquement fermés à leurs deux extrémités par des bouchons en PVC. Un double bouchon est recommandé comme l'indique l'exemple (Fig. 28).

Les systèmes de fixation des tubes sur la cage d'armatures doivent être solides pour résister à la poussée du béton pendant le bétonnage et suffisamment proches les uns des autres (environ 3 m) pour limiter les déformations des tubes, tant au cours de la manutention de la cage d'armatures que pendant le bétonnage. Dans le cas où les tubes seraient « soudés » sur les cerces de montage par pointage, il y a lieu de faire attention à ne pas les percer et à ne pas créer de « boule » de soudure à l'intérieur.



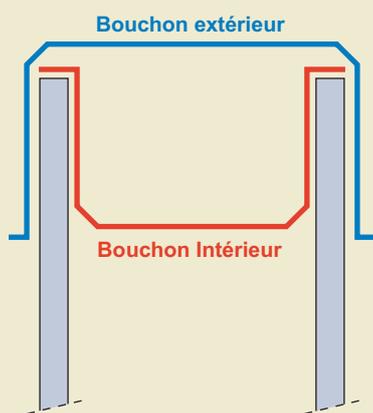
▲ **Figure 26 - Raccord vissé.**

Le raccord par manchon fileté garantit l'étanchéité et la rigidité des tubes.



▲ **Figure 27 - Raccord tulipe.**

Ce procédé est déconseillé (manque d'étanchéité et risque de rupture de la liaison entre les éléments de tubes).



▲ **Figure 28 - Extrémités des tubes.**
(double obturateur PVC).



▲ **Figure 29 - Les tubes ne doivent pas dépasser la tête de pieu de plus de 0,50 m.**

Les tubes doivent être verticaux et fixés parallèlement entre eux.

Ils doivent être le plus proche possible du fond du forage (cf. Fig. 21) et dépasser de la tête des éléments de fondations d'environ 50 cm afin qu'une partie de l'eau dans les tubes nécessaire au couplage ne soit pas chassée par l'introduction de l'ensemble câble-sonde et d'éviter l'obturation des tubes par des chutes de gravats.

Toutefois, ils ne doivent pas dépasser exagérément le sommet des éléments, afin de ne pas gêner le travail des opérateurs (Fig. 29 : exemple d'un chantier sur lequel ces dispositions ne sont pas respectées).

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

- ⊙ ils doivent être propres et exempts de souillures susceptibles de nuire à l'adhérence tube/béton. Pour cela, les cages d'armatures ne doivent pas être en contact direct avec le sol au cours de leur stockage,
- ⊙ ils doivent être lavés et remplis d'eau claire par l'entreprise, juste avant les mesures,
- ⊙ la partie des tubes dépassant de la tête des pieux doit être intacte. En cas de déformation empêchant le passage des sondes, l'entreprise devra couper les tubes sous la zone détériorée,
- ⊙ les cages d'armatures ne doivent pas être empilées sur une trop grande hauteur afin d'éviter leur déformation (Fig. 30).



Cette photo donne un exemple de préparation soignée : les tubes de réservation dépassent de 0,50 m de l'extrémité supérieure de la cage d'armatures. Les cages d'armatures, stockées sur des madriers, sont isolées de la boue et des éléments polluants.

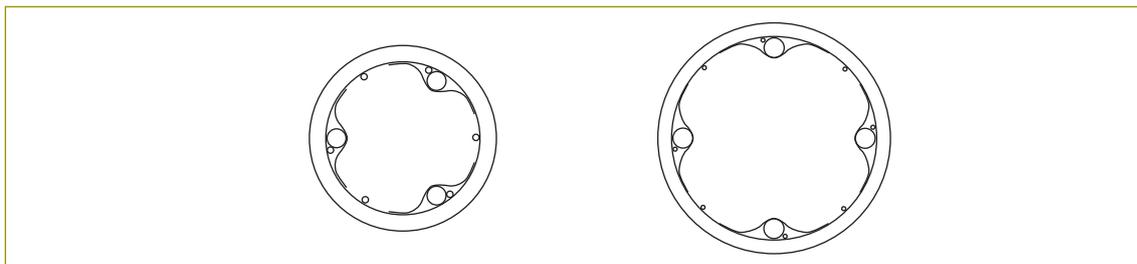
▲ Figure 30 - Stockage des cages d'armatures.

5.2.2 Mise en place et disposition des tubes de réservation

Cas des pieux

Le nombre de tubes à prévoir est fonction du diamètre du pieu (Fig. 31) :

- ⊙ $\varnothing \leq 600$ mm : 2 tubes diamétralement opposés,
- ⊙ 600 mm $< \varnothing \leq 1200$ mm : 3 tubes,
- ⊙ $\varnothing > 1200$ mm : 4 tubes au moins, avec un entraxe maximal de 1,5 m.

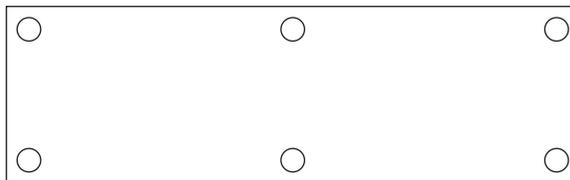


▲ Figure 31 - Implantation des tubes de réservation pour des pieux équipés de 3 et 4 tubes.

Cas des barrettes et des parois moulées

Les singularités les plus fréquentes et les plus importantes se situent dans les angles et en périphérie.

Il faut donc implanter des tubes de réservation dans ces zones. On peut retenir la disposition préconisée sur la figure 32, en respectant l'entraxe maximal des tubes qui doit aussi être de 1,50 m.



▲ **Figure 32** - Exemple d'implantation des tubes de réservation pour une barrette équipée de 6 tubes.

5.2.3 Programmation

La programmation des campagnes d'auscultation doit être prévue dans le planning du chantier. Il est souhaitable que les interventions de l'organisme de contrôle puissent être faites appui par appui.

À titre indicatif, dans des conditions normales de chantier, il est possible de réaliser le contrôle de 600 mètres linéaires de trajet de mesure par jour, sans changer d'appui et en l'absence de difficulté particulière ou de singularité du signal, ce qui représente environ dix pieux de 20 mètres équipés de trois tubes. Inversement, le temps de mesure peut être sérieusement allongé lorsque les conditions d'intervention sur chantier ne sont pas respectées, comme le montre l'exemple de la figure 33 ci-dessous.



▲ **Figure 33** - Exemple de mauvaises conditions d'intervention sur le chantier.

Tubes tordus et dépassant exagérément la tête des pieux, recépage en cours, pieux recépés, fouille de l'appui réalisée (mauvaise accessibilité).

5.3 DISPOSITIONS CONCERNANT LES MÉTHODES PAR RÉFLEXION ET PAR IMPÉDANCE

5.3.1 Généralités

La tête des pieux doit être obligatoirement hors d'eau et accessible.

La fiabilité des mesures dépend de la qualité du recépage réalisé avant l'intervention. Le béton de la tête de pieu, après recépage, doit donc être d'excellente qualité et homogène, en particulier, il ne doit pas présenter de fissures qui auraient pour effet de perturber la propagation de l'onde.

5.3.2 Programmation

La programmation des essais doit être prévue dans le planning du chantier. Il est souhaitable que les interventions de l'organisme puissent être faites appui par appui.

À titre indicatif, dans des conditions normales de chantier (tête de pieux préparées et facilement accessibles), on peut réaliser le contrôle d'une cinquantaine de pieux dans la journée.



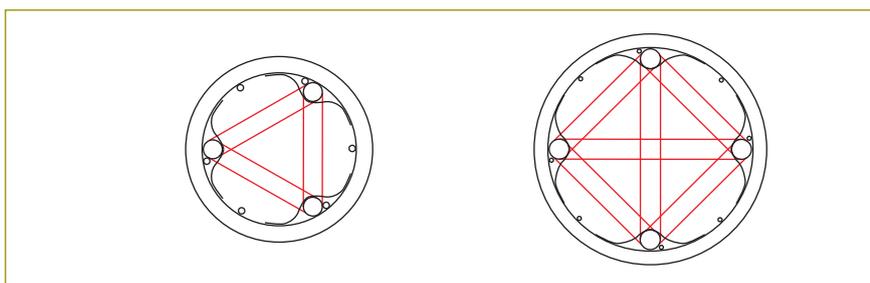
CHAPITRE 6

Exécution du contrôle et interprétation des résultats

6.1 MÉTHODE SONIQUE PAR TRANSPARENCE

6.1.1 Trajets auscultés

L'auscultation doit être réalisée sur l'ensemble des trajets disponibles tels que définis dans la norme NF P 94-160-1 (cf. Fig. 34 et 35).



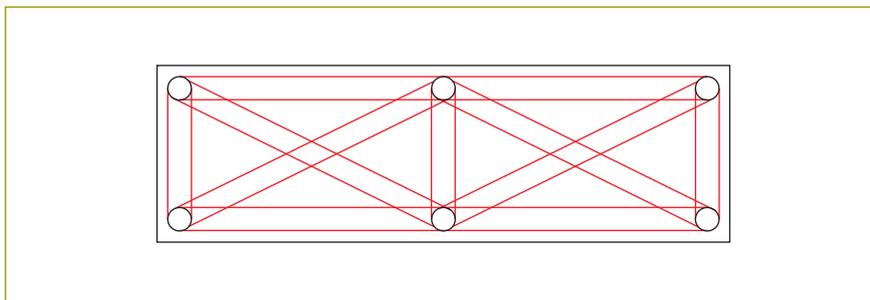
▲ **Figure 34 - Cas des pieux.**

Distance maximale entre tubes : 1,50 m.

si $\varnothing \leq 600$ mm. : 2 trajets

si $\varnothing > 1200$ mm. : 6 trajets

si 600 mm. $< \varnothing \leq 1200$ mm. :
3 trajets



▲ **Figure 35 - Cas des barrettes.**

Distance maximale entre tubes : 1,50 m.

Il est possible d'ausculter 11 trajets.

6.1.2 Conduite à tenir en cas de détection d'une singularité

Dans tous les cas, le temps de propagation et l'amplitude du signal sont mesurés.

Une singularité au sens de la norme se traduit par une altération du signal entraînant *simultanément* sur le graphe :

○ une *augmentation relative du temps* supérieure à 20 %, exprimée en $(\Delta T/T)$, T étant le temps de propagation des ondes exprimé en μs ,

☉ une *chute d'amplitude* supérieure à 80 % lorsqu'elle est exprimée en mV sur une échelle linéaire, ou bien supérieure à 14 dB lorsqu'elle est exprimée sur une échelle logarithmique.

La variation d'un seul des deux paramètres ne peut en aucun cas suffire à caractériser une singularité.

Rappel

Une singularité est caractérisée par sa position dans le fût, en profondeur et en plan par rapport aux tubes ainsi que par sa nature. Cette caractérisation est rendue possible si l'on dispose des informations citées au paragraphe 5.1 « Dispositions communes à toutes les méthodes ».

Les figures 36, 37, 38 et 39 montrent des exemples de singularités confirmées et des exemples d'altération de signal.



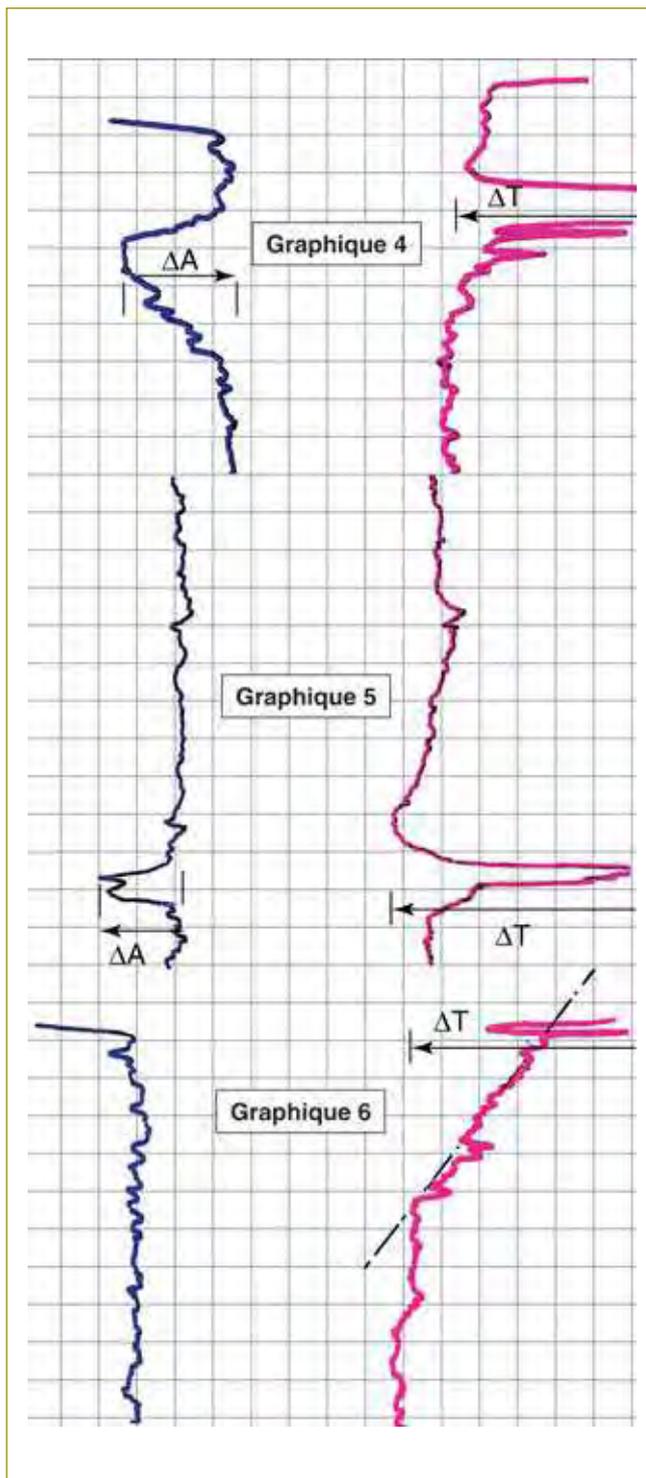
▲ *Figure 36 - Cavité importante en tête de pieu.*

La figure 36 montre une cavité importante en tête de pieu, qui engendre une incidence sur les traces temps et amplitude (Fig. 37, graphique 4).

Points d'arrêt

L'auscultation constitue un point d'arrêt. La détection d'une singularité constitue un autre point d'arrêt, jusqu'à ce qu'il soit démontré qu'elle n'entraîne pas de risque pour la fondation. En cas de singularité susceptible d'entraîner un risque pour la fondation, l'entreprise consultera le bureau d'études après évaluation des caractéristiques de la singularité, afin d'en analyser l'incidence sur le comportement et la pérennité de la fondation. Elle remettra un avis au maître d'œuvre, lequel pourra demander le cas échéant des investigations complémentaires, pour compléter le diagnostic.

Lorsqu'une réparation est nécessaire, elle doit être validée par de nouvelles mesures d'auscultation sonique, voire éventuellement par des investigations complémentaires (autres méthodes d'auscultation, carottages de reconnaissance, essais de laboratoire, etc.).



▲ **Figure 37** - Exemple de graphes issus du matériel de première génération.

ΔA = chute d'amplitude,
 ΔT = allongement du temps.

GRAPHIQUE 4

FIN DE BÉTONNAGE NON CONVENTIONNELLE

Allongement de temps important et chute d'amplitude en partie supérieure d'un élément de fondation. La trace temps, située à droite du graphique, s'allonge tandis que la trace amplitude, située à gauche, accuse une chute progressive correspondant au béton pollué. Le retour à la normale de l'amplitude et du temps est significatif d'une fin de bétonnage effectué à la goulotte, après extraction du tube plongeur. Le béton pollué est emprisonné sous la zone à recéper (cf. poche de sable, Fig. 36).

GRAPHIQUE 5

INCLUSION DE TERRAIN NATUREL

Les traces temps et amplitude évoluent dans des proportions respectives, en relation avec la gravité et la taille de la singularité.

Une rupture du fût ou un désamorçage du tube plongeur auraient produit une chute de signal avec un allongement de temps et une chute d'amplitude plus marqués en cas de venue d'eau ou lorsque l'attente de l'approvisionnement du béton a été longue.

GRAPHIQUE 6

PARALLÉLISME DES TUBES

La trace temps traduit un allongement du temps progressif et lent. L'amplitude reste stable : il n'y a aucune singularité dans le pieu, mais les tubes, mal fixés en tête, s'écartent et le temps augmente.

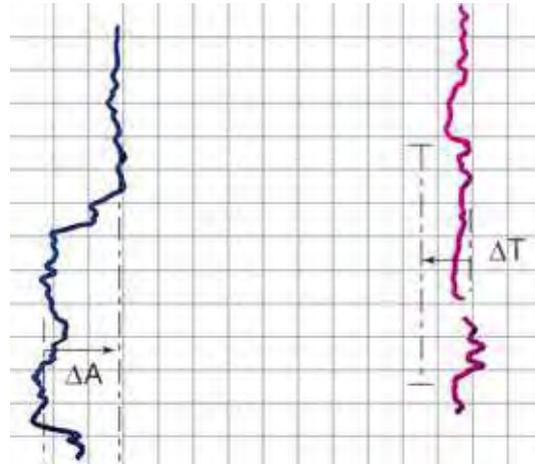
Toutefois, une chute de l'amplitude, avec un allongement de temps modéré, peut être aussi le signe d'un décollement de tubes en tête de pieu ou d'un béton ségrégué qui n'adhère pas aux armatures.



▲ **Figure 38**

Mauvais enrobage des aciers constaté par auscultation sonore sur une barrette, conséquence de difficultés de mise en œuvre du béton entre le terrain et la cage d'armatures (béton vraisemblablement trop sec et/ou distance de bétonnage trop longue). Les tubes de réservation sont également mal enrobés.

L'examen après terrassement confirme le diagnostic.



▲ **Figure 39**

Mesure transversale sur un trajet long : une partie de l'onde contourne le défaut. Sur une grande distance, on remarque sur la trace de droite un allongement modéré du temps de propagation, alors que l'énergie reçue est considérablement affectée (diminution notable de l'amplitude sur la trace située à gauche de la figure).

Un mauvais enrobage des tubes de réservation se traduit également par une variation modérée de la trace temps.

*D T = allongement du temps,
D A = chute d'amplitude.*

6.2 MÉTHODES PAR RÉFLEXION ET PAR IMPÉDANCE

6.2.1 Mesures réalisées

Chaque pieu fait l'objet de trois essais successifs. Pour que la mesure soit validée, trois enregistrements graphiques du signal doivent être similaires.

6.2.2 Conduite à tenir en cas de détection de singularité

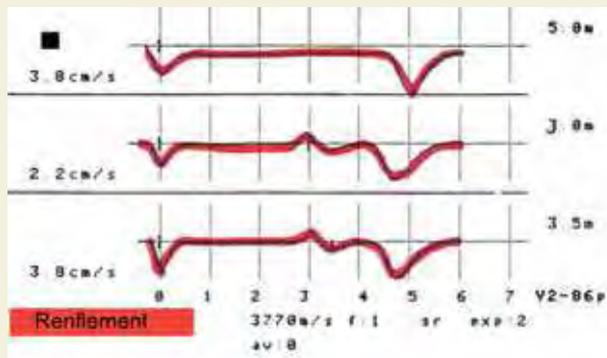
La singularité est caractérisée par l'apparition d'une inflexion de la courbe du signal enregistré, comme l'indiquent les exemples suivants (Fig. 40, 41 et 42). Il est ainsi possible de comparer, pour chacun des graphiques, la courbe du haut (référence) avec les deux suivantes (singularités diverses).

EXEMPLES D'EXPLOITATION DE COURBES OBTENUES AVEC LA MÉTHODE PAR RÉFLEXION

Pieu exempt de singularité

Survolume à 3 m

Retour au diamètre nominal à 3,5 m



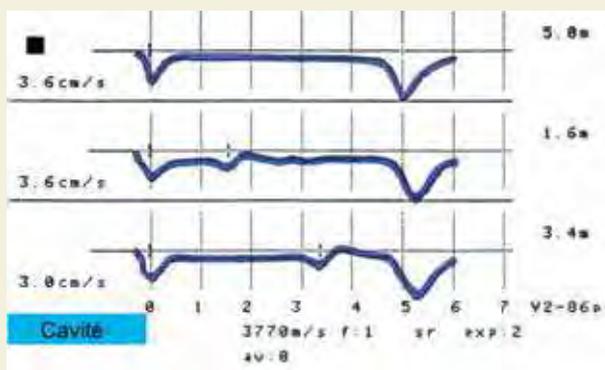
Profondeur en mètres

▲ Figure 40 - Survolume dans la section du fût : inflexion de la courbe vers le haut.

Pieu exempt de singularité

Striction à 1,60 m

Striction à 3,40 m



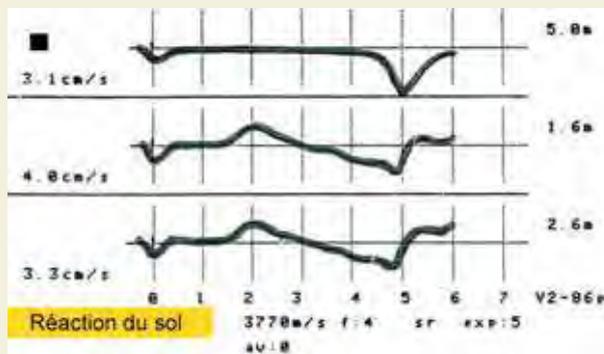
Profondeur en mètres

▲ Figure 41 - Striction dans la section du fût : inflexion de la courbe vers le bas.

Pieu exempt de singularité

Accroissement de la réaction du sol à 1,60 m

Diminution de la réaction du sol à partir de 2,60 m



Profondeur en mètres

▲ Figure 42 - Incidence de la réaction du sol sur la propagation du signal (inflexion de la courbe vers le haut suivie d'une inflexion durable vers le bas jusqu'au fond de pieu).



CHAPITRE 7

Répartition des contrôles

Dans tous les cas, une réunion préparatoire entre le maître d'œuvre, les entreprises et les organismes chargés du contrôle intérieur et du contrôle extérieur doit être programmée avant le démarrage des travaux. Cette réunion vise à informer les intervenants sur le déroulement des contrôles et les sujétions qui en découlent.

7.1 CAS OÙ LE MAÎTRE D'OEUVRE PREND LA TOTALITÉ DES CONTRÔLES À SA CHARGE (CONTRÔLE EXTÉRIEUR)

Le maître d'œuvre confie la réalisation des mesures et l'interprétation des résultats à un organisme de contrôle de son choix. Il veille aux points suivants :

- ⊙ examen critique des documents qualité et des procédures de l'entreprise exécutant les éléments de fondations profondes, ainsi que ceux et celles de l'organisme de contrôle choisi,
- ⊙ vérification sur chantier de l'application de ces documents qualité et de ces procédures.

À la fin de chaque journée, l'organisme de contrôle doit transmettre au maître d'œuvre un avis verbal sur les résultats de son contrôle. Cet avis, auquel seront joints les graphes en cas de singularité, doit être confirmé par télécopie dans les plus brefs délais. En effet, les singularités engendrent un point d'arrêt qui ne peut être levé que par le maître d'œuvre.

7.2 CAS OÙ LES CONTRÔLES SONT À LA CHARGE DE L'ENTREPRISE (CONTRÔLE INTÉRIEUR)

L'entreprise désigne un organisme de contrôle spécialisé pour effectuer les mesures et interpréter les résultats.

Le maître d'œuvre fait appel, dans le cadre du contrôle extérieur, à son propre organisme de contrôle pour vérifier la bonne exécution des mesures et l'interprétation des résultats de l'entreprise. Il veille aux points suivants :

- ⊙ examen critique des documents qualité et des procédures de l'entreprise exécutant les pieux et de l'organisme de contrôle,
- ⊙ vérification sur chantier de l'application de ces documents qualité et de ces procédures,
- ⊙ validation des résultats obtenus par l'organisme du contrôle intérieur à partir d'essais croisés effectués conjointement avec l'organisme de contrôle du maître d'œuvre. Ce point, très important, est précisé dans le paragraphe ci-après intitulé « essais croisés »,
- ⊙ examen des résultats produits par l'organisme de contrôle de l'entreprise (procès-verbaux et graphes) au fur et à mesure de l'exécution des éléments de fondations (soit individuellement, soit par lot).

À la fin de chaque journée, l'entreprise doit transmettre au maître d'œuvre un avis verbal sur les résultats du contrôle. Cet avis, auquel seront joints les graphes en cas de singularité, doit être confirmé par

télécopie dans les plus brefs délais. En effet, les singularités engendrent un point d'arrêt qui ne peut être levé que par le maître d'œuvre, après avis de son organisme de contrôle et du bureau d'études.

Essais croisés

Il s'agit d'un contrôle réalisé le même jour, sur le même élément de fondation, par l'organisme de contrôle désigné par l'entreprise et l'organisme de contrôle du maître d'œuvre. Les essais croisés sont indispensables car ils permettent :

- ⊙ de s'assurer de la bonne exécution des contrôles de l'entreprise et d'appréhender, le cas échéant, l'incidence sur les résultats des dérives opératoires, par rapport à la norme,
- ⊙ de valider les résultats du contrôle intérieur.

Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LCPC) dispose d'une station de pieux d'essais située à Mittersheim (Moselle). Sept pieux sont disponibles, un pieu ne comporte pas de défaut (pieu témoin), les six autres comportent des défauts telles que des variations de section (rétrécissement, excroissance), des inclusions de terrain, une rupture, etc.

Cette station permet de réaliser la mise au point du matériel d'auscultation et de le qualifier. Elle est également utilisée dans le cadre de la formation permanente dispensée au sein du réseau des LPC préalablement à la qualification du personnel chargé des auscultations.

La station de pieux d'essais est gérée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Auscultation d'un élément de fondation : méthode par transparence NF P 94-160-1.
- 2 - Auscultation d'un élément de fondation : méthode par réflexion NF P 94-160-2.
- 3 - Auscultation d'un élément de fondation : méthode sismique parallèle NF P 94-160-3.
- 4 - Auscultation d'un élément de fondation : méthode par impédance NF P 94-160-4.
- 5 - Les pieux forés - Recueil des règles de l'art - LCPC et SETRA - décembre 1978.
- 6 - Fondations profondes pour le bâtiment P 11-212 Référence DTU 13 2.
- 7 - Exécution des travaux de fondations des ouvrages en génie civil - Fascicule 68 du CCTG.
- 8 - Norme NF EN 1536 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés.
- 9 - Norme NF EN 1538 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Parois moulées.
- 10 - Fiches MEMOAR diffusées par le SETRA :
 - Fiche n° II-2 « Les parois moulées et les barrettes ».
 - Fiche n° II-4 « Les pieux forés ».

Document publié par le LCPC sous le numéro C1502444
Conception et réalisation LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré
Dessins LCPC-DISTC, Philippe Caquelard
Impression JOUVE - N°
Dépôt légal 2e trimestre 2006



Ce document, conçu initialement comme un guide destiné aux maîtres d'œuvre, s'adresse également aux maîtres d'ouvrage, aux entreprises et d'une manière générale à tous les acteurs participant à la réalisation de fondations profondes, soucieux du contrôle de leur bonne exécution.

Il rappelle tout d'abord les règles de l'art qui s'appliquent en la matière et les précautions à prendre lors de la réalisation des fondations profondes pour en permettre le contrôle. Ce guide comporte ensuite une synthèse exhaustive de toutes les méthodes d'auscultation couramment pratiquées. Il permet également de choisir la méthode la plus adaptée aux types de sols et de fondations rencontrés et donne des conseils précis pour l'interprétation des résultats du contrôle. Afin de rendre le contenu du guide plus accessible, une attention particulière a été portée à la présentation de nombreux exemples graphiques de défauts et de singularités.

Cet ouvrage sera ainsi d'une très grande utilité aux concepteurs, aux constructeurs et aux organismes de contrôle ayant la charge des auscultations.

This document, designed initially as a guide for the project superintendents, is also intended for the building owners, the companies and generally all the actors taking part in the realization of deep foundations, concerned with the assessment of their quality.

It first of all recalls the code of practice which applies and the precautions to take during the execution of deep foundations to allow an efficient quality control. This guide includes an exhaustive synthesis of all the usual methods of sounding. It gives also precise advices for the choice of the method best suited to the types of grounds and foundations encountered and for the interpretation of the results. In order to make the content of the guide more accessible, a detailed attention was paid to the presentation of many graphic examples of defects and singularities.

This book thus seems essential as well for the designers and the constructors as for the organisms in charge of the assessment of the foundations.