

## LES PIEUX FORÉS – RÈGLES DE L'ART – VERSION 2018

### ***BORED PILES – State of the art – Version 2018***

Sabrina PERLO<sup>1</sup>, Cécile MAUREL<sup>2</sup>, Loïc LEURENT<sup>3</sup>, Philippe LAHEURTE<sup>4</sup>, Nicolas ROUXEL<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Cerema Direction Infrastructures de Transport et Matériaux, Provins, France

<sup>2</sup> Cerema Ile de France, Le Bourget, France

<sup>3</sup> Cerema Nord-Picardie, Lille, France

<sup>4</sup> Cerema Sud Ouest, Toulouse, France

<sup>5</sup> Cerema Ouest, Saint Briec, France

**RÉSUMÉ** – En raison d'avancées technologiques dans le domaine des fondations profondes, le Cerema, avec l'appui de la profession, réactualise actuellement le guide SETRA/LCPC sur l'exécution des pieux forés édité en 1978. Cet article présente le nouveau guide et succinctement les principaux items qui y sont traités, dont les nouvelles techniques ou appareillages, comme la tarière creuse ou les systèmes d'enregistrement des paramètres.

**ABSTRACT** – Owing to technological progresses in the field of deep foundations, the studies and expertise center Cerema, with the support of experts in bored piles, is currently updating the SETRA/LCPC guide on the execution of bored piles edited in 1978. This paper introduces the new guide and its main components including technological progresses such as the continuous flight auger pile (CFA) and the acquisition programs for various parameters.

### **1. Introduction**

Le guide présenté ici, constitue la mise à jour du guide « Pieux forés – Recueil des règles de l'art » du LCPC/SETRA de 1978. En effet depuis 1978, les pratiques d'exécution des pieux, le contexte normatif et le positionnement des différents acteurs ont largement évolué :

- *sur les pratiques d'exécution*, on notera notamment l'arrivée massive de la technique des pieux tarières creuses qui étaient à peine abordées dans la première version du guide, ou encore l'augmentation des dimensions (longueurs ou diamètre) des pieux pouvant être exécutés, des outils plus performants, la généralisation du kelly...
- *sur le contexte normatif des fondations profondes*, les normes d'exécution européennes (NF EN 1536:1999), la norme de justification (NF P 94-262:2012) et les règles spécifiques relatives à l'exécution (DT13-2:1992<sup>1</sup> et fascicule 68 du CCTG<sup>2</sup>) sont toutes plus récentes que le guide.

---

<sup>1</sup> En cours de refonte.

- et pour finir, l'évolution des règles des marchés privés comme des marchés publics, la mise en place de la norme relative aux missions géotechniques (qui a modifié les responsabilités de chacun) ainsi que le positionnement des maîtres d'œuvre et des bureaux de contrôle rendent bien entendu les éléments d'éclairage sur les contrats décrit dans le guide de 1978 totalement obsolètes.

Ce document s'applique à l'exécution des pieux ou barrettes forés (exécutés en place avec excavation du terrain) à l'exception des puits qui sont réalisés avec des techniques d'excavation ou de blindage différentes<sup>3</sup>. Le domaine d'application est le même que celui de la norme européenne NF EN 1536:1999 (Exécution des travaux géotechniques spéciaux – pieux forés) et correspond aux pieux de classe 1 et 2<sup>4</sup> selon la terminologie de l'annexe A de la norme française NF P 94-262:2012 (Justification des ouvrages géotechniques - norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – fondations profondes).

Concernant le domaine d'emploi des fondations couvertes par le guide, il peut s'agir indistinctement des fondations d'ouvrages de génie-civil ou de bâtiment mais aussi pour certains aspects, des fondations d'ouvrage de soutènement ou réalisés dans le cadre d'une stabilisation de pente (clouage). Il ne décrit pas les techniques de fondations profondes avec refoulement du sol (pieux vissés, pieux battus, vibrofoncés...), ni les micropieux<sup>5</sup>.

## 2. Chapitre 1 : Les différents types de pieux forés

Ce chapitre présente le domaine d'application du guide, des tableaux de synthèse simplifiés quant aux avantages et inconvénients de réalisation des forés en comparaison aux pieux refoulants<sup>6</sup>, à l'adéquation des catégories de pieux au contexte géotechnique et hydrogéologique, et à leurs avantages et inconvénients, ainsi que des schémas de phasage pour chaque catégorie de pieux forés.

## 3. Chapitre 2: Aspects généraux des marchés de travaux de pieux forés

Le chapitre 2 traite des différents aspects généraux de l'exécution des pieux forés aussi bien en matière de contractualisation qu'en terme de pilotage et contrôle.

---

<sup>2</sup> En attente de son arrêté d'application, une version datant de 2016 est téléchargeable sur le lien suivant : <http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr>

<sup>3</sup> On exclut donc les puits si leur technique d'exécution est différente de celle des pieux forés décrits dans le guide (utilisation d'une pelle par exemple).

<sup>4</sup> (et donc les pieux de catégorie 1 à 6) à l'exception des puits

<sup>5</sup> qui feront l'objet d'un guide spécifique du fait d'une technicité à part notamment sur l'injection dont l'édition est prévu pour 2020.

<sup>6</sup> De classes 3 à 7 selon la nomenclature de la NF EN 94-262 (Tableau A1).

Concernant le *montage des marchés de travaux de pieux forés*, on y trouve des éléments de synthèse, des pratiques et des référentiels actuels à la fois pour les marchés publics et privés. Des recommandations sont présentées en matière de mode de rémunération, d'allotissement, de coordination et de jugement des offres ou des variantes.

Ce chapitre traite ensuite *des marchés selon leurs différentes phases de déroulement* :

- *en phase d'élaboration du DCE*, sont présentés les différents domaines connexes à prendre en compte dans les clauses contractuelles : géotechnique, environnement, avoisinants, sujétions d'exécution. Des préconisations sont fournies quant à l'application de la norme NF P 94 500 en vigueur sur les missions géotechniques.
- *en phase de préparation*, il met l'accent sur les sujets à ne pas négliger concernant l'installation de chantier ainsi que l'organisation des contrôles et du suivi environnemental.
- enfin, *en phase de déroulement du chantier*, ce chapitre traite notamment d'adaptations courantes qui surviennent en cours d'exécution des pieux forés et fait des préconisations pour leur gestion contractuelle.

#### 4. Chapitre 3 : Réalisation des pieux

Le chapitre 3 du guide traite de la réalisation des pieux de classe 1 et 2. Il aborde :

- *les techniques de forage pour les pieux de classe 1*. Dans un premier temps, les principales technologies de machines de forages et leur principe sont présentés. Un classement des différentes machines est proposé en fonction des dimensions maximale de l'élément de fondation. Il se base sur la puissance du treuil, le poids du kelly, celui de la machine, le pull-down et le couple de rotation. Puis les différents outils d'excavation sont décrits selon leur géométrie, leur principe général de fonctionnement, et leur efficacité en fonction des terrains à excaver. Le guide traite des technologies les plus courantes (tarières, buckets, carottiers, trépan, et bennes), comme de certains procédés ou technologie plus spécifiques (hydrofraises, marteaux fond de trou, trépan à molettes ou à rouleaux, procédé Symmetrix).
- *la technique de forage à la tarière creuse*, simple ou double rotation, pour les pieux de classe 2. Ce principe d'excavation, très largement utilisés en France, dispose de nombreuses spécificités matérielles : puissances des machines, systèmes d'enregistrement, tarières et outils de forage, obturateurs. Le classement proposé pour les machines de forage associées est basé sur le couple de rotation, la force d'extraction, la force d'appui effectif et la gamme de poids en mode travail. Cette technique efficace et rapide n'offre néanmoins pas les mêmes possibilités d'adaptation en cas de difficultés que pour les autres pieux forés de classe 1, c'est pourquoi ce guide alerte sur les difficultés qui peuvent être rencontrées lors :
  - du forage, en présentant sous forme de tableau de synthèse l'adéquation entre la puissance des machines et la nature des terrains et à leur niveau de compacité (exprimé par des valeurs de pression limite et parfois du module Ménard issues des mesures au pressiomètre Ménard), ainsi qu'en listant les sols susceptibles de

présenter des difficultés lors de l'excavation, comme la présence de vestiges ou encore des substratums résistants surmontés d'horizons moins résistants. La problématique de sur-excavation est présentée avec des pistes d'identification des contextes concernés

- du bétonnage en répertoriant des exemples de terrains à risque, comme ceux présentant des vides francs non traités préalablement, des compacités trop faibles, ou encore des nappes en charge.

Le guide fournit des possibilités d'adaptation en cas de rencontres de difficultés, ainsi que des éléments d'analyse sur les enregistrements des paramètres et leurs utilisations.

L'accent est aussi porté sur l'emprise nécessaire sur chantier pour la réalisation de pieux selon la technique de la tarière creuse en raison du gabarit souvent imposant des machines, de la nécessité fréquente de montage et démontage de ces dernières, et de la proximité nécessaire de nombreux engins (foreuse, pelle, grue, pompe à béton), ainsi que sur la qualité de la plate-forme de forage.

Les différentes *techniques de tenue des parois* sont présentées, que ce soit l'utilisation du tubage ou l'usage des fluides stabilisateurs que sont la bentonite ou les polymères. Les techniques de gainage/chemisage, qui peuvent constituer des solutions en cas d'efforts parasites ou de circulation d'eau par exemple, y sont aussi décrites. L'accent est porté sur l'adéquation des techniques proposées et leurs usages : présence de vides ou de karsts, de circulation d'eau, de sols mous, de poussées latérales ou de risques de frottement négatif ou d'éboulement. Sont présentés aussi les difficultés spécifiques à l'usage du tubage comme le respect de la verticalité, les conséquences sur le dimensionnement, les risques lors du retrait, ou encore les risques inhérents à la présence de certaines natures de terrain.

Le chapitre est complété par des exemples concrets, ainsi que des tableaux de synthèses donnant en fonction de la nature des terrains :

- *les outils de forage conseillés*, possibles ou déconseillés ;
- l'adéquation des *types des accessoires* à utiliser : dents plates, picots ou molettes ;
- les méthodes de *tenue des parois* conseillées, possibles ou déconseillées.

## 5. Chapitre 4 : Bétonnage des pieux forés

Dans le chapitre 4 traitant du bétonnage des pieux sont présentés :

- *la définition et la spécification des bétons de pieux*, comme leur grande maniabilité, leur grande résistance à la ségrégation, leur prise lente et contrôlée et leur résistance importante à l'agressivité chimique du milieu environnant (la durabilité des bétons et les classes d'exposition selon la norme NF EN 206/CN, ainsi que la caractérisation des constituants du béton (ciments, granulats et adjuvants) ;
- *les opérations préliminaires au bétonnage*, où sont détaillées les épreuves d'étude (formulation des bétons de pieux et étude de robustesse de la formule), le programme de bétonnage, ainsi que l'épreuve de convenance (objectifs et essais réalisés) ;

- la fabrication, la livraison, la réception et le transport sur chantier du béton frais, en décrivant les contraintes et les solutions, ainsi que le plan de contrôle des bétons avec les essais à réaliser ;
- la mise en œuvre du béton dans le forage comprenant :
  - les techniques de mise en œuvre du béton, comme l'usage du tube plongeur, avec entre autre, sa problématique d'amorçage ou de ses mouvements au sein du béton frais (Figure 1), ou encore la technique spécifique du bétonnage à la tarière creuse,
  - des préconisations en ce qui concerne le *bétonnage* sous conditions particulières (temps froid, temps chaud, conditions immergées), ainsi que les impacts en cas de leur non-respect,
  - le contrôle de la mise en œuvre en listant les opérations à contrôler, ainsi que les points à notifier, comme les observations concernant l'environnement et les conditions de travail.
- les *points sensibles du bétonnage*, à savoir :
  - la hauteur de bétonnage, avec la définition des différents niveaux et le cas particulier d'un niveau de bétonnage inférieur à la plate-forme de travail,
  - le curage du fond de fouille,
  - l'usage de la purge par débordement,
  - la problématique du recepage, avec, entre autre, ses précautions, ses techniques, les risques encourus...,
  - l'influence de la présence d'eau ou de boues de forage,
  - les difficultés à estimer correctement la surconsommation et la localisation des anomalies au sein du pieu à la seule lecture du la courbe de bétonnage,
  - les risques et précautions à prendre en cas de retrait d'un éventuel tube de travail,
  - les poussées du béton frais sur la cage d'armature au risque de la déformer.

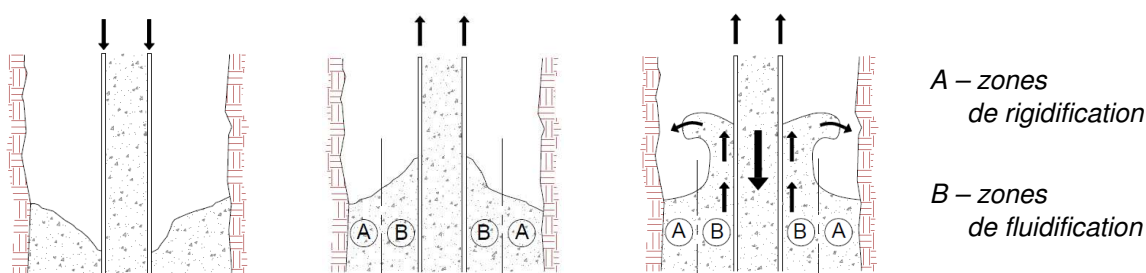


Figure 1 : Apparition de zones de fluidification lors des mouvements de va-et-vient verticaux du tube plongeur pour les pieux de diamètre important

## 6. Chapitre 5 : Armatures des pieux forés

Ce chapitre est consacré *aux armatures des éléments de fondation*, avec naturellement des informations sur le matériau « acier », mais aussi sur les autres matériaux (par exemple, le verre). Il est constitué de :

- 3 premiers sous-chapitres, traitant successivement des *cages d'armatures*, des *éléments en acier* (tubes, profilés H, palplanches...) et des *fibres pour béton*. Dans

la partie concernée par les cages, l'accent est porté sur la fonction, la géométrie et les dispositions constructives des armatures longitudinales et transversales ;

- un sous-chapitre consacré aux *dispositifs particuliers* comme les cerces de montage, les dispositifs de centrage, les armatures de rigidification, les cages de frettage, les armatures de levage et les anses de positionnement, les serre-câbles et éventuellement les tubes de réservation.
- un rappel des valeurs d'*enrobage* ;
- un sous-chapitre qui rassemble les informations pour *l'assemblage des armatures* ;
- et enfin de sous-chapitre qui s'intéresse à la manutention des armatures (leur *chargement/déchargement, leur transport, leur stockage*) ainsi qu'à leur *dressage et mise en place* dans le forage.

## 7. Chapitre 6 : Contrôle des pieux finis

Le chapitre 6 aborde les méthodes et moyens de contrôle des ouvrages réalisés, en fournissant des *éléments de choix concernant l'élaboration d'un plan de contrôle* des pieux finis (choix du type et du volume des contrôles) en fonction du contexte normatif, contractuel, géotechnique, de la complexité de l'ouvrage ou de la technique de réalisation des pieux.

Les méthodes d'auscultation des éléments de fondations présentées dans ce guide peuvent être :

- *non destructives* :
  - méthode sonique par transparence,
  - méthodes par réflexion et impédance,
  - méthodes gammamétriques,
  - méthode sismique parallèle
- *destructives* (avec éventuellement le passage d'une caméra) :
  - carottage,
  - forage destructif.

Des informations sur le principe de ces méthodes, les éventuels travaux préparatoires, les conditions de leur mise en œuvre, ainsi que leurs avantages et inconvénients sont fournies.

Les *essais de chargement des pieux* ne sont que très faiblement traités car il ne s'agit pas d'essais permettant de contrôler la bonne réalisation des fondations, mais plutôt de connaître leur comportement aux sollicitations, dont leur capacité portante.

Dans ce chapitre, sont traités aussi *l'exploitation de ces contrôles*, avec la position contractuelle du problème, la caractérisation des non-conformités selon les méthodes d'auscultation, la gestion contractuelle des anomalies ou singularités, et enfin le traitement des non-conformités, en proposant par exemples des auscultations supplémentaires, le recours à des méthodes destructives, ou l'interprétation des surfaces maximales potentiellement affectées ...

Enfin ce chapitre discute de *l'efficacité des différentes méthodes d'auscultation* en fonction du type de défauts générés par les facteurs de risques de nature géotechnique.

## 8. Chapitre 7 : Malfaçons et réparations

Les informations fournies dans le chapitre 7 permettent de traiter les anomalies détectées ou confirmées par les méthodes d'auscultation présentées dans le chapitre 6 sur le contrôle des pieux finis. Les causes les plus courantes de défaut selon les différentes étapes de la réalisation des éléments de fondation sont présentées. Puis, en fonction de la localisation de l'anomalie<sup>7</sup>, les conséquences et des propositions de réparation sont formulées.

Un sous-chapitre est consacré à l'opportunité de la réparation avec en exergue la différenciation entre anomalie/singularité et artefact. Comme la nature du défaut conditionne pour beaucoup la gravité de la malfaçon et les techniques de réparation nécessaires et envisageables, une démarche méthodologique est conseillée, sous forme de deux arbres de décision :

- de la *détection à la vérification par calcul ou levée de la non-conformité* ;
- de la *vérification par le calcul à la solution proposée*.

Par exemple, une approche sur l'évaluation des sections potentielles maximales potentiellement affectées à l'issue d'auscultation par la méthode sonique en transparence est proposée (Figure 2).

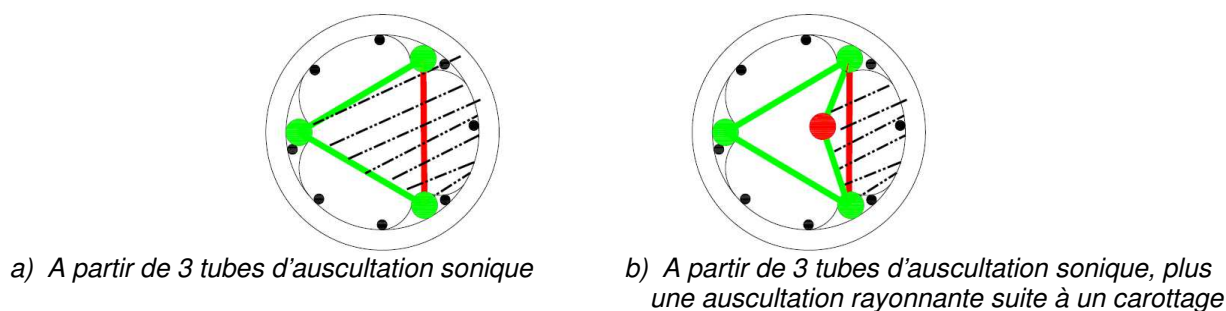


Figure 2 : Evaluation d'une section potentiellement défectueuse  
(en vert les trajets non singuliers et en rouge les trajets singuliers,  
en hachuré les zones potentielles de défaut)

Différents modes de réparation sont présentés, avec à chaque fois, le domaine d'utilisation, la mise en œuvre, lorsque nécessaire, le contrôle de la réparation. Y sont traités, parmi les techniques les plus courantes :

- l'injection ;
- le scellement de barre d'acier ;
- le jet-grouting ;
- la réalisation de fondation complémentaire ;

<sup>7</sup> en pointe, au niveau du fût ou en partie haute du pieu.

- l'exécution de micropieux en pointe (micropieux racines).

Des exemples de réparation sont aussi proposés avec le résultat d'une première constatation de défaut, puis éventuellement la proposition d'essais d'auscultation complémentaires pour venir affirmer/confirmer ou préciser l'étendue et la localisation du défaut, et enfin la mise en œuvre de la réparation, ainsi que son contrôle.

## **9. Conclusions**

Ce guide traite de tous les aspects inhérents à la réalisation des pieux forés. Il a pour objectif, d'une part, d'être un support et un référentiel technique en priorité au service des maîtres d'ouvrages, des concepteurs, des maîtres d'œuvre, mais également à l'ingénierie géotechnique au sens large (bureaux d'études, d'essais, de contrôle, entreprises de fondation ...), et d'autre part, de favoriser la qualité des pieux et de fournir des indications claires pour leur contrôle, limitant ainsi les sources de litige.

## **10. Références bibliographiques**

« Pieux forés, recueil des règles de l'art », SETRA-LCPC, 1978, 195 p.

DTU 13.2. Travaux de bâtiment – Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Partie 2 : cahier des clauses spéciales, en cours de refonte.

Fascicule 68 du Cahier des clauses techniques générales (CCTG) applicable aux marchés de génie civil – Exécution des travaux de géotechniques des ouvrages de génie civil, version provisoire, 30/03/2016.

NF EN 206/CN. Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, 2014.

NF EN 1536+A1. Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés, 2015.

NF P 94-262. Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, (Tirage 2) 2013.

NF P 94-500. Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications, (Tirage2), 2014.