

Les

références

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 4

Le bétonnage des pieux forés



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 4

Le bétonnage des pieux forés



Collection « Les références »

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

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

- ADP : Jean-François Brie
- Apave : Nathalie Borie
- Bureau Veritas Construction : Patrick Berthelot
- Cerema : Dominique Batista, Mathieu Feregotto, Frédéric Jeanpierre, Philippe Laheurte, Sophie Legrand, Loïc Leurent, Olivier Malassingne, Cécile Maurel, Pierre Paya, Jérôme Saliba (les pilotes de groupe) - David Bicard, Bruno Boulet, Lionel Fix, Laura Kerner, Benjamin Landry, Nicolas Rouxel
- Chartreuse ingénierie : Jean-Marc Grezlak
- Durmeyer : Vincent Keller
- Directions Interdépartementales des routes (DIR) : Frédéric Marty (DIR Méditerranée et DIR Massif Central), Jean-François Messenger (DIR SO)
- 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 4 - Le bétonnage des pieux forés.* Lyon : Cerema, 2025.
Collection : Les références.
ISBN : 978-2-37180-712-9 (pdf)

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

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

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

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

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

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

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

Photo de couverture : Durmeyer.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sommaire

Remerciements 2

Avant-propos 4

CHAPITRE 1

Spécifications des bétons de pieux et de leurs constituants 11

1.1 - Définitions et spécifications 12

1.1.1 - Une grande maniabilité 12

1.1.2 - Une grande résistance à la ségrégation 13

1.1.3 - Un maintien d'ouvrabilité 14

1.1.4 - Une durabilité adaptée à l'agressivité chimique du milieu environnant 14

1.2 - Durabilité des bétons et Classes d'exposition 15

1.2.1 - Définition des classes d'exposition 15

1.2.2 - Classes XA : attaques chimiques 16

1.2.3 - Classes XH : réaction sulfatique interne (RSI) 17

1.3 - Constituants des bétons 18

1.3.1 - Les ciments 18

1.3.2 - Les granulats 19

1.3.3 - Les adjuvants 20

CHAPITRE 2

Opérations préliminaires au bétonnage 21

2.1 - La formulation 22

2.2 - L'épreuve d'étude et l'épreuve de convenance (ouvrages de génie civil) 27

2.2.1 - L'épreuve d'étude 27

2.2.2 - L'étude de la robustesse de la formule 27

2.2.3 - L'épreuve de convenance 28

2.3 - Programme de bétonnage 28

2.4 - Mise en œuvre d'enveloppe pour le bétonnage si nécessaire 29

2.4.1 - Les enveloppes pour le bétonnage 29

2.4.2 - Intérêt des chemises semi-rigides ou souples 30

2.4.3 - Mise en œuvre des chemises 31

CHAPITRE 3**Fabrication, livraison, réception et transport du béton sur chantier****33**

3.1 - Fabrication (Béton Prêt à l'Emploi et sur site)	34
3.2 - Transport et manutention	35
3.3 - Contrôle des bétons	35
3.3.1 - Plan de contrôle	35
3.3.2 - Essais à réaliser sur béton frais et sur béton durci	38

CHAPITRE 4**Mise en œuvre du béton dans le forage****39**

4.1 - Les techniques de mise en œuvre du béton	40
4.1.1 - Bétonnage au tube plongeur	40
4.1.2 - Bétonnage à la colonne de bétonnage	55
4.1.3 - Bétonnage par l'axe creux des tarières creuses (pieux de classe 2)	57
4.1.4 - Autres techniques non préconisées	66
4.2 - Le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur	67
4.2.1 - Précautions avant le bétonnage	67
4.2.2 - Précautions pendant le bétonnage	71
4.3 - Bétonnage sous conditions particulières	71
4.3.1 - Bétonnage par temps froid	71
4.3.2 - Bétonnage par temps chaud	72
4.4 - Techniques de mesure et étalonnage des paramètres d'enregistrement de bétonnage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	73
4.4.1 - Mesure du volume de béton pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	73
4.4.2 - Mesure de la pression du béton pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	73
4.4.3 - Mesure de la hauteur d'extraction de l'obturateur rétractable utilisable pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	73
4.5 - Le contrôle de mise en œuvre du béton dans le forage	74

CHAPITRE 5**Points sensibles du bétonnage****75**

5.1 - Hauteur de bétonnage pour les pieux de classe 1	76
5.2 - Curage du fond du forage pour les pieux de classe 1	77

5.3 - Purge sur béton frais	78
5.4 - Recépage des pieux forés	80
5.5 - Qualité du contact sol-pieu	84
5.6 - Surconsommation de béton	85
5.7 - Le retrait du tube de travail	87
5.8 - Le ressuage du béton	88

CHAPITRE 6

Aléas lors du bétonnage **91**

6.1 - Bétonnage en présence de sols mous ou sous charge	92
6.2 - Bétonnage en présence de circulations d'eau : risques de délavage du béton	92
6.3 - Bétonnage en présence de vides ou de karst	94
6.4 - Bétonnage en cas d'éboulement	95

Bibliographie **97**

Ouvrages	98
Fascicules du CCTG (Cahier des clauses techniques générales)	98
Normes afnor ou Fascicules de documentation	98

Le béton et le bétonnage de pieux ne peuvent se concevoir comme ceux des parties en élévation, les conditions de mise en œuvre étant trop différentes. Le béton et son ferrailage doivent transmettre au sol les charges de l'ouvrage et résister également aux sollicitations transmises par le sol (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »). Un pieu doit être réalisé avec le plus grand soin, car son contrôle est difficile, s'agissant d'une partie cachée. Le contrôle des pieux finis est généralement réalisé par des techniques de contrôle non destructives (cf. fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »). La réparation d'éventuels défauts (cf. fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés ») est difficile, onéreuse et pas toujours concluante, et le strict respect des règles de l'art présentées dans ce guide permet d'éviter un grand nombre de malfaçons.

Dans ce fascicule sont examinés :

- **les spécifications des bétons de pieux et de leurs constituants** (chapitre 1) ;
- **les opérations préliminaires au bétonnage**, permettant de valider la composition et la fabrication du béton (chapitre 2) ;
- **la fabrication, le transport et la livraison du béton** (chapitre 3) ;
- **la mise en œuvre du béton** dans le forage (chapitre 4) ;
- **les points sensibles de l'opération de bétonnage** (chapitre 5) ;
- **certains risques lors du bétonnage en raison du contexte géologique ou hydrogéologique** (chapitre 6).

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

Spécifications des bétons de pieux et de leurs constituants

1. SPÉCIFICATIONS DES BÉTONS DE PIEUX ET DE LEURS CONSTITUANTS

1.1 - DÉFINITIONS ET SPÉCIFICATIONS

Le pieu assure une fonction mécanique majeure de transmission des charges de la superstructure vers le sol et de reprise des charges géotechniques (transmises par le sol et induites par le chargement de ce dernier – Figure 4.1), entraînant une résistance du pieu en compression, traction et/ou flexion. Il ne peut accomplir correctement cette fonction qu'avec un béton de bonne qualité, sans discontinuité, alors même qu'il est mis en place sans vibration (appelée « pervibration » pour un béton). Le choix de la résistance du béton résulte aussi du calcul structural du pieu ; ce calcul prend pour données les sollicitations auxquelles est soumise la tête du pieu mais également les actions géotechniques sur son fût.

Le bétonnage des pieux (cf. chapitre 4) se fait par un tube plongeur ou une colonne de bétonnage généralement pour les pieux de classe 1 ou par l'axe creux de la tarière pour les pieux de classe 2. Le bétonnage débute en pied du forage (cf. § 4.1.1 et 4.1.2 pour les pieux de classe 1 et 4.1.3 pour ceux de classe 2).

Dès lors **le béton de pieux doit posséder des qualités bien particulières**, différentes de celles d'un béton de structure, et notamment :

- **une bonne maniabilité** (bonne aptitude à l'écoulement) permettant sa mise en œuvre en présence d'armatures et son serrage sous son propre poids (§ 1.1.1) ;
- **une grande résistance à la ségrégation et au délavage** (notamment pour les bétonnages en présence d'eau) (§ 1.1.2) ;
- **un maintien de l'ouvrabilité** (appelé aussi maintien rhéologique ou de la rhéologie) compatible avec les temps de transport et de mise en œuvre importants (§ 1.1.3) ;
- **une durabilité adaptée à l'agressivité du milieu environnant** (sol et nappes) (§ 1.1.4) ;
- **une classe de résistance mécanique** minimale fixée par le marché (*Note*).

Note : des questions d'environnement ou de résistance de calcul peuvent conduire à sélectionner une classe de résistance minimale supérieure (cf. par exemple, aux tableaux NA.F sur les recommandations des valeurs limites de composition du béton de la norme NF EN 206+A2/CN pour les classes de résistance minimale en fonction des classes d'exposition⁽¹⁾).

Figure 4.1 : Carotte⁽²⁾ de béton extrait d'un pieu mettant en évidence de la ségrégation ou du délavage



1.1.1 - UNE GRANDE MANIABILITÉ

Lors du bétonnage, le béton est mis en œuvre depuis le fond du pieu et remonte dans le volume excavé, freiné par le frottement sur les parois de l'excavation (ou du tubage) et du tube plongeur ainsi que sur la cage d'armature si elle est présente (*Note*). **De sa bonne maniabilité dépend :**

- **la compacité finale** du pieu (absence de lacunes et de défauts d'homogénéité dans le béton) ;
- **l'enrobage** des armatures en milieu confiné (Figures 4.2 et 4.3) ;
- **la rapidité d'exécution du bétonnage**.

1. Les classes d'exposition sont traitées dans le § 1.2.1.

2. Le carottage est présenté dans le § 2.2.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ».

⚠ Cette maniabilité importante doit être obtenue par un choix judicieux de granulats et l'emploi d'adjuvants (plastifiants ou superplastifiants) et, en aucun cas, par l'augmentation de l'eau de gâchage. En effet **augmenter l'eau de gâchage** :

- nuit aux qualités requises pour un béton de pieu à savoir sa résistance à la ségrégation, sa compacité et sa résistance à l'agressivité du milieu environnant ;
- conduit à une augmentation du ressuage (cf. § 5.8) et au développement des phénomènes de cheminées de délavage du béton.

Note : le béton occupe le volume excavé lors de sa remontée sous l'effet de la pression due à sa différence de niveau dans le tube plongeur et dans la fouille (cf. Figure 4.28 « Équilibre entre la colonne de béton dans le tube et le béton dans le forage » dans le § 4.1.1.3).

Figure 4.2 : Exemple de cage d'armature dans un forage de pieu

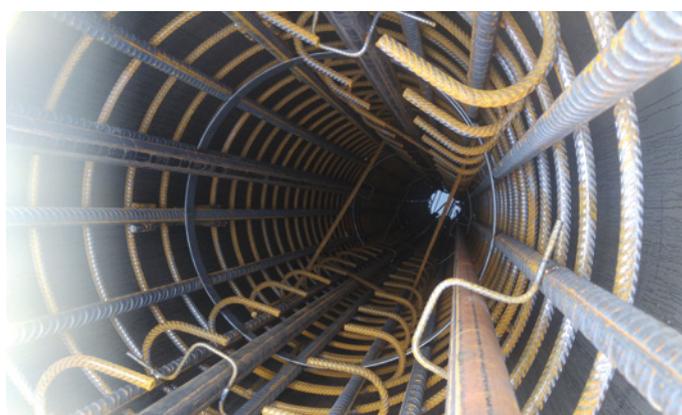
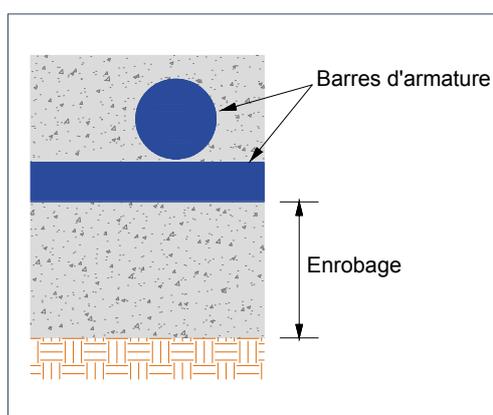


Figure 4.3 : Définition de l'enrobage



1.1.2 - UNE GRANDE RÉSISTANCE À LA SÉGRÉGATION

Origine de la ségrégation

La chute du béton (dans le tube plongeur puis au-delà) lors du bétonnage peut conduire à un phénomène de ségrégation (Figure 4.1 dans le § 1.1) : les plus gros granulats parviennent en bas en premier.

D'autres ségrégations peuvent survenir en raison de la présence d'armatures qui constituent des obstacles plus importants pour les granulats les plus gros et ou encore d'un manque de cohésion intrinsèque du béton (résultant d'un excès d'eau et conduisant à un béton instable).

Le délavage du béton par l'eau présente dans le forage constitue une forme de ségrégation particulière : on assiste à une séparation de la pâte de ciment et des granulats sous l'effet du lavage de ces derniers par l'eau.

Risques de la ségrégation

La ségrégation, quelle que soit son origine, provoque de graves hétérogénéités dans le pieu : nids de cailloux, béton poreux... (Figure 4.1 dans le § 1.1). La ségrégation accentue la sensibilité du pieu aux agressions du milieu et diminue sa résistance à la compression.

Dispositions pour résister à la ségrégation

La résistance à la ségrégation doit être recherchée lors de la formulation du béton en adoptant des dispositions appropriées : un choix judicieux de la courbe granulométrique, un dosage en eau limité, une utilisation d'agents de cohésion (colloïdes)... Cette résistance à la ségrégation doit être également recherchée lors de la mise en œuvre (cf. chapitre 4) en adoptant la technique la plus appropriée.

1.1.3 - UN MAINTIEN D'OUVRABILITÉ

Objectifs du maintien rhéologique du béton

Les opérations de bétonnage de pieu exigent **une durée de maintien rhéologique importante** du béton, pour permettre notamment :

- **des temps de transport importants** depuis des centrales BPE⁽³⁾ parfois éloignées du chantier ;
- **une maniabilité suffisante** du béton et une rhéologie permettant de la maintenir durant toute la durée de sa mise en œuvre ;
- **une prise maîtrisée** (Note) rendue nécessaire par les opérations de fin de bétonnage telles que l'extraction du tube plongeur et du tube dans le cas des pieux forés tubés.

Note : ⚠ il est aussi intéressant que la prise intervienne rapidement après la fin du bétonnage pour les pieux de classe 1 et après la fin de la mise en œuvre de la cage pour les pieux de classe 2, afin de limiter :

- le temps d'exposition du béton « frais » aux agressions du milieu extérieur (eau, pression des terres) ;
- le temps de ressuage (cf. § 5.8).

Moyens pour obtenir le maintien rhéologique du béton

Ce maintien rhéologique doit être recherché lors de la formulation du béton par un choix judicieux :

- du ciment (ou autres liants), d'additions (filler et ajouts cimentaires), des granulats (courbe granulométrique) ;
- des adjuvants (emploi éventuel d'un retardateur de prise, d'un plastifiant ou d'un superplastifiant).

Il est à noter que **des temps de prise rallongés** peuvent affecter les opérations de contrôle : par exemple, l'échéance habituelle de 7 jours pour une auscultation sonique peut devoir être augmentée.

1.1.4 - UNE DURABILITÉ ADAPTÉE À L'AGRESSIVITÉ CHIMIQUE DU MILIEU ENVIRONNANT

Les différentes sources d'agressions

Outre le cas particulier de sites pollués contenant des éléments chimiques qu'il faut analyser spécifiquement, le béton de pieu, au contact du sol, est souvent exposé à différentes agressions :

- **la circulation d'eaux plus ou moins chargées** en sels (chlorures, sulfates...) qui viennent imprégner la porosité du béton et modifier les conditions de protection des armatures ;
- **la circulation d'eaux très pures** (provoquant la lixiviation du béton) ;
- **les attaques par les sulfates** du sol (réaction sulfatique externe).

Les caractéristiques du béton pour résister aux agressions

Afin de résister à ces attaques chimiques, le béton doit présenter **une compacité élevée et une perméabilité la plus faible possible** (c'est-à-dire une porosité faible) empêchant ou limitant la pénétration des agents agressifs dans le béton et en particulier l'accès aux armatures (risques de corrosion). Ces caractéristiques doivent être obtenues en limitant la teneur en eau du béton par utilisation de (super)plastifiants adaptés et, si besoin, par un choix judicieux du ciment (par exemple sulfato-résistant).

Afin d'obtenir la durabilité nécessaire d'un béton de fondations, il faut appliquer les critères des **tableaux NA.F de l'annexe F de la norme NF EN 206+A2/CN** ainsi que les **recommandations du Fascicule de documentation FD P18-011** sur le choix du ciment en fonction de l'agressivité du milieu (cf. § 1.2).

3. BPE : Béton Prêt à l'Emploi.

1.2 - DURABILITÉ DES BÉTONS ET CLASSES D'EXPOSITION

1.2.1 - DÉFINITION DES CLASSES D'EXPOSITION

Les différentes classes d'exposition

La norme NF EN 206+A2/CN prend en compte l'exigence de **durabilité des bétons** en s'appuyant sur la notion de **classes d'exposition**, afin de traduire **les actions et les conditions environnementales** auxquelles le béton et les armatures vont être exposés pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Les actions et les conditions environnementales sont réparties en **six classes d'exposition**, définies dans l'article 4.1 de la norme NF EN 206+A2/CN :

- **les risques de corrosion des armatures :**
 - classes XC : par carbonatation du béton,
 - classes XD : par les chlorures autres que ceux de l'eau de mer (sel de déverglaçage),
 - classes XS : par les chlorures de l'eau de mer ;
- **les autres attaques :**
 - classes XF : attaque par gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage,
 - classes XA : attaque chimique.

Deux classes supplémentaires ont été définies :

- **classes XH**, relative à l'exposition à la réaction sulfatique interne (cf. les recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de l'Ifsttar⁽⁴⁾ [4.1]) ;
- **classes XAR** vis-à-vis de l'alcali-réaction⁽⁵⁾ (RAG) en fonction des actions dues à l'environnement (cf. le Fascicule de documentation FD P18-464).

Classes d'exposition des pieux

Au même titre que pour les bétons de structure, l'exposition aux actions et aux conditions environnementales des bétons de pieu est donc définie par une ou plusieurs classes d'exposition.

Si toutes les classes de la norme NF EN 206+A2/CN sont applicables aux pieux, celles ayant un impact sur la formulation du béton sont les classes XA (cf. § 1.2.2 « Classes XA : Attaques chimiques »), XH⁽⁶⁾ (cf. § 1.2.3 « Classes XH : Réactions sulfatiques internes »), XAR⁽⁷⁾ (« Alkali-réaction ») et éventuellement XF (« Attaque par gel/dégel ») pour la partie des têtes de pieux qui ne seraient pas hors gel.

Le choix de la (ou des) classe(s) d'exposition de chaque partie d'ouvrage est de la responsabilité du maître d'ouvrage. Ces classes d'exposition pour chaque partie d'ouvrage doivent être prescrites dans le CCTP. Les données nécessaires sont précisées dans le dossier d'appel d'offres. En particulier, les analyses des sols et des eaux souterraines doivent être effectuées en phase de conception, en amont de la rédaction du CCTP, par exemple au moment de l'étude géotechnique. Il est recommandé d'appliquer la norme NF P94-500 et d'anticiper ces analyses. Ces données sont indispensables pour fixer avec justesse la classe d'exposition XA1, XA2 ou XA3. L'absence de ces analyses peut conduire à un risque chimique non couvert par un choix pris de ce fait par défaut, qui se traduit généralement par un surcoût (cf. l'exemple ci-après).

4. Ifsttar (institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux) : établissement public à caractère scientifique et technologique créé en décembre 2010. Il a fusionné le 1^{er} janvier 2020 avec l'université Paris-Est Marne-la-Vallée pour créer l'université Gustave Eiffel.

5. L'alcali-réaction est un ensemble de réactions chimiques entre certaines formes de silice ou de silicates pouvant être présentes dans les granulats, et les alcalins du béton (article 4.1 du Fascicule de documentation FD P18-464).

6. Classe complémentaire à celles indiquées dans la norme NF EN 206+A2/CN, définie dans les recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de l'Ifsttar [4.1].

7. Classe complémentaire à celles indiquées dans la norme NF EN 206+A2/CN, définie dans le Fascicule de documentation FD P18-464.

Exemples de conséquences d'un mauvais choix de la classe d'exposition

Le choix d'une classe sous-évaluée par ignorance de l'agressivité du sol peut conduire à formuler un béton non durable. À l'inverse, le choix d'une classe surévaluée (par exemple XA3 au lieu de XA1) par principe de précaution en l'absence d'analyses de sol conduit à des exigences très sévères sur le béton (réduction du rapport $E_{\text{eff.}}/\text{Liant}_{\text{éq.}}^{(8)}$ de 0,55 à 0,45 par exemple pour une durée d'utilisation prévue au projet présumée de 50 ans) ayant des conséquences en termes de coût et de possibilité de production pour les centrales à béton.

Prescriptions sur la composition des bétons selon les classes d'exposition

Les classes d'exposition conduisent à des prescriptions particulières sur tout ou partie des paramètres suivants de la composition du béton :

- le rapport « $E_{\text{eff.}}/\text{Liant}_{\text{éq.}}^{(8)}$ » maximal ;
- le dosage minimal en liant équivalent ;
- le taux $A/(A+C)$ maximal de substitution du ciment par de l'ajout pour le calcul du liant équivalent avec « A » les additions⁽⁹⁾ (fillers, laitiers, cendres...) et « C » le ciment en masse ;
- la classe de résistance minimale à la compression du béton du point de vue de la durabilité ;
- le type et la classe des constituants permis ;
- la teneur en air minimale du béton.

Il est à noter que le Fascicule 65 du CCTG impose des prescriptions plus sévères que la norme NF EN 206+A2/CN, justifiées par une durée d'utilisation de projet plus élevée⁽¹⁰⁾.

1.2.2 - CLASSES XA : ATTAQUES CHIMIQUES

Détermination de la classe d'exposition XA

Le Fascicule de documentation FD P18-011 « Bétons – Définitions et classification des environnements chimiquement agressifs – Recommandations pour la formulation des bétons » donne les règles de classification de ces environnements sur la base du tableau 2 de l'article 4.1 de la norme NF EN 206+A2/CN.

Ces règles dépendent du type d'attaque chimique (sulfates, acides...), il est donc nécessaire de préciser dans le tableau de définition des bétons quelle agression est visée par la classe XA indiquée (par exemple XA2 vis-à-vis du pH).

Agressivité du sol

La réalisation de l'analyse de sol est indispensable pour fixer avec justesse la classe d'exposition XA (XA1, XA2 ou XA3). Cette dernière s'établit à partir d'une analyse chimique du sol sur la base de prélèvements représentatifs, en fonction notamment de la teneur en SO_4^{2-} et de l'acidité selon Baumann-Gully (cf. tableau 2 de la norme NF EN 206+A2/CN⁽¹¹⁾).

8. Il s'agit du rapport Eau efficace sur Liant équivalent au sens de la norme NF EN 206+A2/CN, présenté dans le § 2.1 « La formulation ».

9. Il s'agit de la part des additions prises en compte pour le calcul du rapport $E_{\text{eff.}}/L_{\text{éq.}}$ et non de la quantité totale d'additions (cf. § 2.1).

10. La durée d'utilisation de projet est de 50 ans pour la norme NF EN 206+A2/CN et de 100 ans pour le Fascicule 65 du CCTG

11. Les valeurs limites sont fournies dans le cadre de températures comprises entre 5°C et 25°C et en considérant que la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment faible pour être assimilée à des conditions statiques.

Agressivité des eaux

La réalisation de l'analyse des eaux s'établit à partir d'une analyse chimique sur la base de prélèvements représentatifs, en fonction du pH, de la teneur en CO₂ (dioxyde de carbone), SO₄²⁻ (sulfate), NH₄⁺ (ion ammonium) et Mg²⁺ (magnésium) (cf. Fascicule de documentation FD P18-011).

Les valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques par les eaux souterraines naturelles, pour des températures comprises entre 5° C et 25° C et en considérant que la vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment faible pour être assimilée à des conditions statiques sont fournies dans le tableau 2 figurant dans l'article 4.2 de la norme NF EN 206+A2/CN.

L'agressivité des différentes eaux (eaux chargées en matières organiques ou en sels minéraux, eaux acides, séléniteuses⁽¹²⁾, pures) est plus ou moins forte suivant la nature ou la concentration des éléments qui y sont dissous. On peut trouver, par exemple :

- **des eaux acides** naturelles chargées de gaz carbonique agressif ou d'acides humiques. Ce gaz carbonique est très nocif pour les ciments, car il peut former, avec la chaux libre du liant, des sels de chaux très solubles qui décalcifient le béton ;
- **des eaux plus ou moins sulfatées** (eaux séléniteuses, magnésiennes) qui attaquent les ciments par formation de sels complexes fortement expansifs et qui peuvent entraîner la désagrégation des bétons ;
- **des eaux très pures dangereuses** par leur pouvoir décalcifiant.

1.2.3 - CLASSES XH⁽¹³⁾ : RÉACTION SULFATIQUE INTERNE (RSI)

Causes et conséquences de la réaction sulfatique interne (RSI) du béton

La réaction sulfatique interne (RSI) est une cause de désordre susceptible d'endommager sévèrement le béton en raison de la formation différée d'ettringite.

Cette réaction est favorisée par la conjonction de plusieurs paramètres dont :

- **une élévation de température importante** lors de la prise du béton (par exemple, cas des pièces massives⁽¹⁴⁾ (ne permettant pas une évacuation rapide vers l'extérieur de la chaleur dégagée lors de la prise) ;
- **la présence d'eau et d'humidité** ;
- **la teneur en sulfates et en aluminates du ciment utilisé.**

Les pieux, dont le béton demeure confiné dans les sols, répondent souvent à ces contextes et présentent donc un risque important de développement de la RSI.

Niveaux de prévention

Les recommandations de l'Ifsttar [4.1] pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne (RSI) définissent quatre niveaux de prévention (As, Bs, Cs et Ds) qui dépendent de la catégorie de l'ouvrage (I à III) et de la classe d'exposition vis-à-vis de la RSI (XH1 à XH3). À chacun des quatre niveaux de prévention correspond un type de précaution à appliquer : ces niveaux de prévention impliquent une **limitation de température à cœur du béton** lors de la prise, et le cas échéant, de **la durée du maintien de cette température élevée**. La valeur de cette température maximale, définie dans le guide [4.1], est variable en fonction de la composition du béton utilisé (nature du ciment, quantité d'alcalins...). L'élévation de température d'une formule de béton pendant la prise peut être estimée par le calcul en fonction de la composition du béton et de l'exothermie du ciment utilisé (chaleur d'hydratation dégagée à 41 heures et/ou celle dégagée à 120 heures, notées respectivement Q41et Q120) selon l'annexe III du guide précité [4.1].

12. Définition de séléniteuse : qui est constitué de gypse, de sulfate de calcium [<http://www.cnrtl.fr/lexicographie>]. Des eaux séléniteuses sont donc des eaux contenant du gypse dissous, du sulfate de calcium.

13. Classe complémentaire à celles indiquées dans la norme NF EN 206+A2/CN, définie dans les recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne de l'Ifsttar [4.1].

14. À partir d'un diamètre supérieur à 1 m pour un pieu circulaire et de 0,80 m de large pour une barrette.

Pour les bétons de pieux, la classe d'exposition retenue vis-à-vis de la RSI est généralement XH3 (béton en contact durable avec l'eau, humidité élevée). Le choix de la catégorie, de la classe d'exposition vis-à-vis de la RSI et du niveau de prévention sont de la responsabilité du maître d'ouvrage. Pour le choix du niveau de prévention, le maître d'ouvrage peut s'aider du tableau 3 des recommandations RSI [4.1] sur la base de la catégorie et de la classe d'exposition. En suivant ce tableau, la classe XH3 conduit au niveau de prévention Cs pour les ouvrages de catégorie II (bâtiments et ouvrages d'art courants) et au niveau de prévention Ds pour les ouvrages de catégorie III (bâtiments et ouvrages d'art non courants : réacteurs nucléaires, viaducs exceptionnels...). Il est conseillé au maître d'ouvrage d'être accompagné d'une assistance à maîtrise d'ouvrage ou de s'assurer du recrutement d'une maîtrise d'œuvre compétente.

Cas de prise en compte de la réaction sulfatique interne (RSI)

Le retour d'expérience sur cette problématique des pieux et des barrettes montre que le phénomène doit être pris en compte de façon systématique pour les pièces massives, impliquant une estimation par le calcul de la température à cœur lors de la prise, et l'étude des moyens de la limiter si besoin par exemple par le choix d'un ciment peu exothermique notamment.

1.3 - CONSTITUANTS DES BÉTONS

Les constituants du béton doivent satisfaire les exigences de la norme NF EN 206+A2/CN.

1.3.1 - LES CIMENTS

Types de ciment autorisés

Les types de ciment autorisés sont ceux mentionnés dans l'annexe D concernant les exigences complémentaires relatives à la spécification et à la conformité du béton destiné aux travaux géotechniques spéciaux de la norme NF EN 206+A2/CN (cf. D.2.1 (2), (3) et NA.D.2.1). Seuls sont exclus le ciment prompt naturel (norme NF P15-314) et le ciment d'aluminates de calcium (norme NF EN 14647).

Les attentes vis-à-vis du ciment

Le choix du ciment doit permettre de répondre aux exigences précitées dans les § 1.1.3 « Un maintien d'ouvrabilité » (prise lente) et 1.1.4 « Une durabilité adaptée à l'agressivité chimique du milieu environnant » (résistance aux agressions extérieures), ce qui conduit à :

- éviter les ciments R (Rapide) ;
- préférer un ciment N (Normal) ;
- si la classe d'exposition l'exige, privilégier un ciment résistant aux sulfates.

Pour rappel, la norme NF EN 197-1 de 2012 introduit des classes SR relatives à la résistance aux sulfates du ciment pour le marquage CE. En France, le marquage NF-Liants hydrauliques des ciments reste plus exigeant que la norme NF EN 197-1 notamment avec le maintien des caractéristiques PM (ciment pour travaux à la mer) selon la norme NF P15-317, ES (ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates) selon la norme NF P15-319 ou PM-ES.

Par ailleurs, s'il est démontré que l'élévation de température prévisible est problématique, il convient de privilégier des ciments à faible chaleur d'hydratation tels que les ciments de type CEM III ou CEM V (effet bénéfique du laitier grâce à une vitesse de réaction et une exothermie limitées).

Principales caractéristiques des ciments en fonction de leur type

Le Tableau 4.1 présente les principales caractéristiques des ciments détaillées dans ce fascicule en fonction de leur type. Il convient de se renseigner sur la disponibilité du type de ciment, qui peut varier selon les régions.

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques des ciments en fonction de leur type

	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V	CEM VI
Autorisé par la norme NF EN 206+A2/CN	oui	oui	oui	oui ^{a)}	oui	oui ^{f)}
Chaleur d'hydratation	forte	variable	faible		faible	
Conditions complémentaires pour la résistance aux agressions chimiques selon, entre autres, le Fascicule de documentation FD P18-011, lorsque l'agression provient des sulfates	Teneurs en SO ₃ ⁽¹⁵⁾ ≤ 3,5 % pour les SR 0 et SR 3 et ≤ 2,5 % pour SR 5		oui si SR _{c, d)}			
	Teneurs en C3A et C4AF du clinker tel que (C4AF) + 2(C3A) ≤ 20 % ^{b)}		OU ES ^{e)}			
<p>a) Mais faiblement distribué en France. b) Note i du tableau NAF1 de la norme NF EN 206+A2/CN. c) Ciments SR, ciments résistants aux sulfates (norme NF EN 197-1). d) Dans la norme NF EN 197-1, les CEM III/A ne sont pas définis comme SR. e) Ciments ES, ciments pour travaux en eau à haute teneur en sulfates (norme NF P15-319). f) Non disponible au moment de la parution du guide.</p>						

1.3.2 - LES GRANULATS

Importance de la forme et de la taille des granulats

Les granulats ont une importance fondamentale sur le comportement rhéologique du béton. En effet, la forme du granulat et la continuité de la courbe granulométrique conditionnent fortement les capacités d'écoulement et donc la maniabilité du béton. Ces critères sont donc primordiaux pour les bétons de pieux, mis en œuvre sans pervibration (vibration interne du béton). Par conséquent, il convient d'utiliser des formes de granulats s'approchant le plus possible de la forme sphérique.

On favorisera (*Note*) donc l'emploi de granulats roulés, ou, à défaut, de granulats concassés présentant un coefficient d'aplatissement des gravillons (selon la norme NF EN 933-3) inférieur à 7 et un coefficient d'écoulement des sables (selon la norme NF EN 933-6) inférieur à 40 secondes sur la fraction 0,063/2 mm du sable.

Note : en fonction des régions, il peut être difficile d'obtenir des gravillons respectant les limites du coefficient d'aplatissement, ou encore, le coefficient d'écoulement des sables est rarement connu.

Nature des granulats

Les granulats d'absorption d'eau (Ab) supérieure à 2,5 % sont à éviter (*Note*). On veillera donc à disposer de granulats de code A pour l'absorption d'eau – cf. article 10 de la norme NF P18-545 portant sur les granulats pour bétons hydrauliques et mortiers.

L'article NA 5.2.3.1 de la norme NF EN 206+A2/CN indique que dans le cas général les granulats doivent présenter une absorption d'eau ≤ 2,5 % en classe XA3 (sauf étude en laboratoire spécifique ou retour d'expérience).

Note : lorsque les possibilités d'approvisionnement local ne permettent pas d'avoir des granulats présentant un taux d'absorption d'eau inférieure à 2,5 %, il conviendra de s'assurer que les granulats soient saturés en eau au moment de leur utilisation pour la fabrication du béton (teneur en eau du granulat ≥ absorption d'eau du granulat).

15. Ces valeurs proviennent du tableau NA.F.1 (g) de la norme NF EN 206+A2/CN.

Taille maximale des granulats

La dimension maximale spécifiée ne doit pas dépasser (article D.2.2 de l'Annexe D de la norme NF EN 206+A2/CN) :

- pour les pieux forés : 32 mm et 1/4 de l'espacement nu à nu des barres longitudinales ;
- en cas de mise en place en conditions immergées : 1/6 du diamètre intérieur du tube plongeur.

1.3.3 - LES ADJUVANTS

Rôle des adjuvants

Ils permettent d'améliorer certaines propriétés du béton (maniabilité, résistance au délavage, porosité...) mais leur utilisation ne doit pas pour autant se substituer à une bonne composition initiale de la formule (cf. § 2.2 « L'épreuve d'étude et de l'épreuve de convenance »).

Les différentes familles d'adjuvants

Les différentes familles d'adjuvants sont définies dans la norme NF EN 934-2+A1. Les adjuvants utilisés doivent bénéficier du marquage « NF-adjuvants » ou équivalent.

Les adjuvants les plus utilisés pour les bétons de pieu

Pour les bétons de pieux, les adjuvants (norme NF EN 934-2+A1) les plus utilisés sont :

- les **plastifiants/réducteurs d'eau et superplastifiants hauts réducteurs d'eau** qui permettent d'obtenir une maniabilité satisfaisante en réduisant le dosage en eau et par conséquent la porosité du béton. Ils peuvent, de plus, présenter un effet secondaire de retardateur de prise ;
- les **retardateurs de prise** permettant de différer la prise du béton :
 - autorisent donc une possibilité de recours à des centrales plus éloignées du chantier,
 - permettent aussi le bétonnage de pieux ayant de gros volumes de béton (pieux de grande longueur et/ou de gros diamètres) qui nécessitent des temps de bétonnage important,
 - peuvent, de plus, présenter un effet secondaire de plastifiant.

⚠ Attention néanmoins au surdosage qui pourrait entraîner, à l'extrême, un blocage complet de prise ;
- les **entraîneurs d'air** qui permettent d'obtenir une résistance satisfaisante aux phénomènes de gel/dégel.

⚠ On note que l'emploi des entraîneurs d'air doit être réservé à cet effet : en particulier, le recours aux entraîneurs d'air en tant que fluidifiants (effet secondaire de l'adjuvant) doit être évité compte tenu de la difficulté de maîtriser leur action (réduction de la robustesse de la formule, sensibilité au pompage...).

Désignation normalisée des adjuvants

Ci-après la désignation normalisée des adjuvants :

- EA : Entraîneur d'air ;
- PRE : Plastifiant - réducteur d'eau ;
- PRERP : Plastifiant - réducteur d'eau - retardateur de prise ;
- RP : Retardateur de prise ;
- SPHRE : Superplastifiant - haut réducteur d'eau ;
- SPHRERP : Superplastifiant - haut réducteur d'eau - retardateur de prise.

Les ajouts les plus utilisés pour les bétons de pieux

Pour les bétons de pieux, les ajouts les plus utilisés sont les **modificateurs de viscosité** (colloïdes) qui permettent d'augmenter la viscosité du béton et donc sa résistance à l'essorage en vue, par exemple, d'une meilleure introduction des armatures dans le cas des pieux réalisés à la tarière creuse. Ces ajouts sont obligatoires dans certains cas (par exemple l'utilisation du procédé tarière creuse en présence de venues d'eau) ; cependant leur emploi augmente parfois les difficultés de mise en œuvre (par exemple difficulté du béton à descendre dans le tube plongeur).

CHAPITRE 2

Opérations préliminaires au bétonnage

2. OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES AU BÉTONNAGE

La démarche décrite ci-après s'inspire de celle prévue par la norme d'exécution NF EN 13670/CN (reprise dans le Fascicule 65 du CCTG), visant à garantir la bonne qualité du béton tout en limitant les contrôles sur chantier.

Cette démarche est d'autant plus importante **pour les pieux** que **toute reprise ou réparation est difficile**, voire impossible. Les différents intervenants (maîtrise d'œuvre, entreprise) ont donc tout intérêt à s'assurer de **la bonne qualité du béton avant le premier bétonnage** en respectant la démarche prévue par la norme NF EN 13670/CN, qui est décrite ci-dessous.

Le béton utilisé pour la réalisation des fondations d'ouvrages de génie civil doit faire l'objet, selon le Fascicule 65 du CCTG :

- **d'une épreuve d'étude** (cf. § 2.2), qui permet de vérifier l'obtention des caractéristiques retenues pour le béton avec la formulation définie avant sa mise en œuvre effective ;
- **d'une épreuve de convenance** (cf. § 2.2), qui y ajoute l'étape de vérification de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre du béton, pour s'assurer que ce processus permet effectivement d'obtenir qu'il réponde aux exigences.

Pour la réalisation du béton de fondations de bâtiment, on peut s'inspirer des recommandations du Fascicule 65 du CCTG.

2.1 - LA FORMULATION

Exigences pour la formulation du béton

La formulation du béton doit intégrer les exigences contractuelles, généralement celles de la norme NF EN 206+A2/CN et du Fascicule 65 du CCTG (ou autre référentiel selon les marchés). **Ces exigences visent à satisfaire des critères :**

- **de durabilité** (dosage minimal en liant équivalent, rapport maximal Eau efficace sur Liant équivalent $E_{\text{eff.}} / \text{Liant}_{\text{éq.}}$ défini un peu plus loin...) ;
- **de mise en œuvre** (étalement à la table à choc, affaissement...).

Pour certains chantiers de fondations profondes, on peut également avoir recours au béton d'ingénierie selon la norme NF EN 206+A2/CN ou à l'approche performantielle (cf. le Fascicule de documentation FD P18-480) en respectant dans ce cas les exigences relatives du Fascicule 65 du CCTG, que ce soit pour des fondations de bâtiment ou d'ouvrages de génie civil.

À défaut d'exigences particulières, il convient de retenir les limites définies dans le Tableau 4.2 ci-après (reprises de l'annexe D de la norme NF EN 206+A2/CN).

Exigences spécifiques pour la formulation du béton des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Par rapport aux autres techniques traditionnelles, la technique de la tarière creuse (Figure 4.4) impose deux critères supplémentaires dans la définition des caractéristiques du béton :

- être pompable (Note 1) ;
- avoir une rhéologie permettant le maintien de ses propriétés suffisamment longtemps pour permettre la mise en place des armatures (Note 2).

Note 1 : pour être pompable sans difficulté, on privilégiera alors des bétons :

- avec une granulométrie étalée⁽¹⁶⁾ (Figure 4.7 – Note 3), dont la dimension maximale des granulats est :
 - généralement de l'ordre de 20 mm,
 - inférieure à 1/6 du diamètre de l'axe creux (clause 3.4.2.1 du Fascicule 68 du CCTG),
- avec une forte teneur en fine pour améliorer sa maniabilité ;
- présentant une consistance généralement S4 ou S5 (selon le tableau 3 de la norme NF EN 206+A2/CN), avec un affaissement (norme NF EN 12350-2) compris entre 180 et 240 mm⁽¹⁷⁾ ou encore à l'étalement à la table à choc (norme NF EN 12350-5 ou selon le tableau 5 de la norme NF EN 206+A2/CN) avec une valeur cible de 600 mm.

Note 2 : comme pour les autres types de pieux, l'étude du maintien de la rhéologie dans le temps est importante pour les pieux de grandes dimensions.

Note 3 : des granulats roulés sont préférables à ceux concassés.

Figure 4.4 : Réalisation d'un pieu de classe 2 (tarière creuse)



16. Une granulométrie est dite « étalée », lorsque le coefficient d'uniformité est supérieur à 2, le coefficient d'uniformité étant le rapport de D_{60} sur D_{10} avec D_i le diamètre correspondant à i % de passant (masse de tamisat cumulé).

17. La norme NF EN 206+A2/CN précise que pour un affaissement supérieur à 210 mm (c'est-à-dire de classe de consistance S5), l'essai au cône d'Abrams n'est pas pertinent et doit être remplacé par un essai d'étalement à la table à choc (NF EN 12350-5).

Tableau 4.2 : Exigences pour la formulation du béton
(extrait de l'annexe D de la norme NF EN 206+A2/CN)

Stabilité^{a)}	Teneur minimale en liant total^{b, c)} (liant total : ciment + additions ^{d)})	<ul style="list-style-type: none"> • 325 kg/m³ pour une mise en œuvre en conditions sèches^{d)} ; • 375 kg/m³ pour une mise en œuvre en conditions immergées (sous eau ou fluides stabilisateurs – cf. § 4.1.1 « Bétonnage au tube plongeur » et 4.2 « Le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur »).
	Rapport maximal $E_{eff.}/Liant_{eq.}$^{b)} avec $Liant_{eq.} = Ciment + « k »^{e)}$ x additions ^{d)}	<ul style="list-style-type: none"> • 0,60 maxi ; • respect de la valeur maximale liée aux classes d'exposition.
Durabilité	Teneur minimale en fines (particules $\leq 0,125$ mm, additions et ciments inclus) ^{c)}	<ul style="list-style-type: none"> • 400 kg/m³ si D_{max} des gravillons > 8 mm ; • 450 kg/m³ si D_{max} des gravillons compris entre 4 et 8 mm.
	Étalement à la table à choc (norme NF EN 12350-5) (Figure 4.5)	Diamètre d'étalement cible : <ul style="list-style-type: none"> • 500 mm en conditions sèches ; • 560 mm si pompage ou tube plongeur sous eau en conditions immergées ; • 600 mm si tube plongeur sous fluide stabilisateur en conditions immergées (cf. § 4.1.1 et 4.2).
Mise en œuvre	Essai d'affaissement (norme NF EN 12350-2) (Figure 4.6)	Affaissement cible : <ul style="list-style-type: none"> • 150 mm en conditions sèches ; • 180 mm si pompage ou tube plongeur ou tube plongeur sous eau^{f)} ; • 200 mm si tube plongeur sous fluide stabilisateur^{f)} (cf. § 4.1.1 et 4.2).

a) Stabilité au regard de la résistance à la ségrégation.
 b) Vis-à-vis de l'utilisation du coefficient « k » défini dans la norme NF EN 206+A2/CN, il faut distinguer l'objectif du dosage en ciment prescrit :
 • annexe D de la norme, l'objectif visé est la stabilité du béton mise en œuvre (article NA.D.3.2) ;
 • tableau NA.F1 de la norme, l'objectif visé est la durabilité du béton : les dosages mini en liant et les rapports E/C prescrits (à respecter en fonction de la classe d'exposition) s'appliquent à la quantité de liant équivalent (ciment + additions avec coefficient « k »).
 c) Ces teneurs minimales sont imposées pour la mise en œuvre et la stabilité des bétons.
 d) Généralement, ce dosage minimal est porté à 375 kg/m³ pour les ouvrages d'art (durée de vie de 100 ans).
 e) Le coefficient « k » est un coefficient qui prend en compte l'activité d'une addition de type II (pouzzolanique ou hydraulique latent).
 f) Dans la norme figure en plus l'indication « en conditions immergées ».

Figure 4.5 : Appareillage pour l'étalement à la table à choc :
table, moule et tige de piquage (dimension en mm) (d'après la norme NF EN 12350-5)

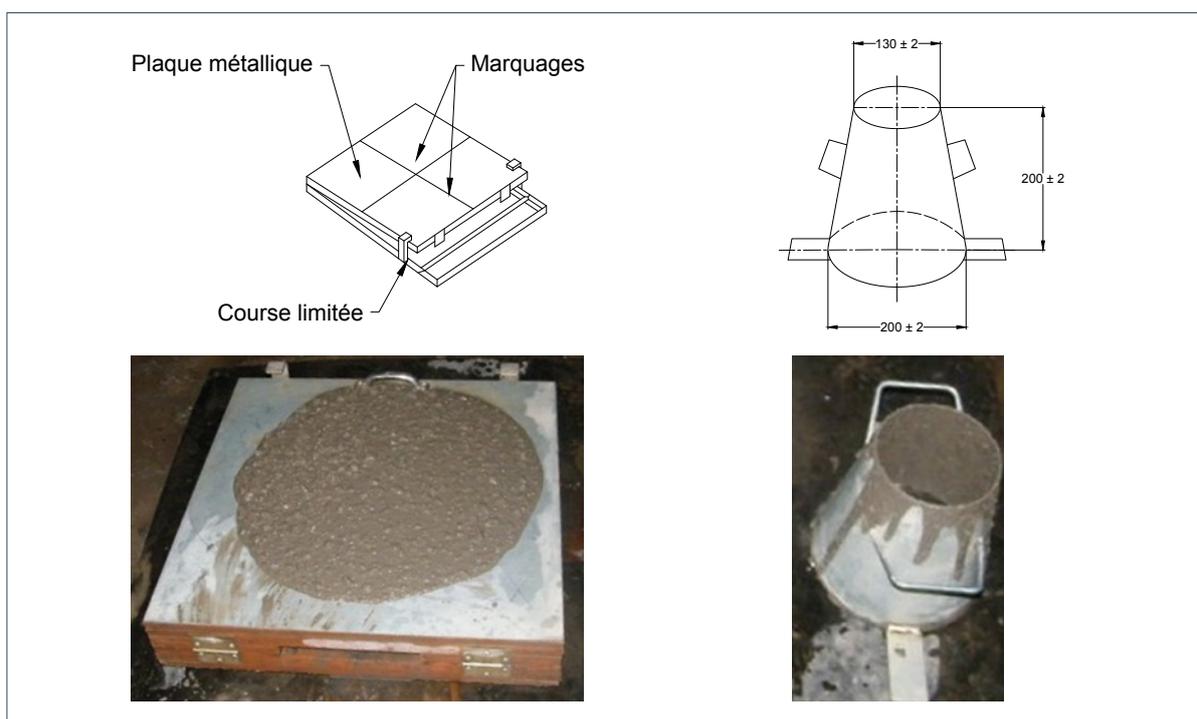
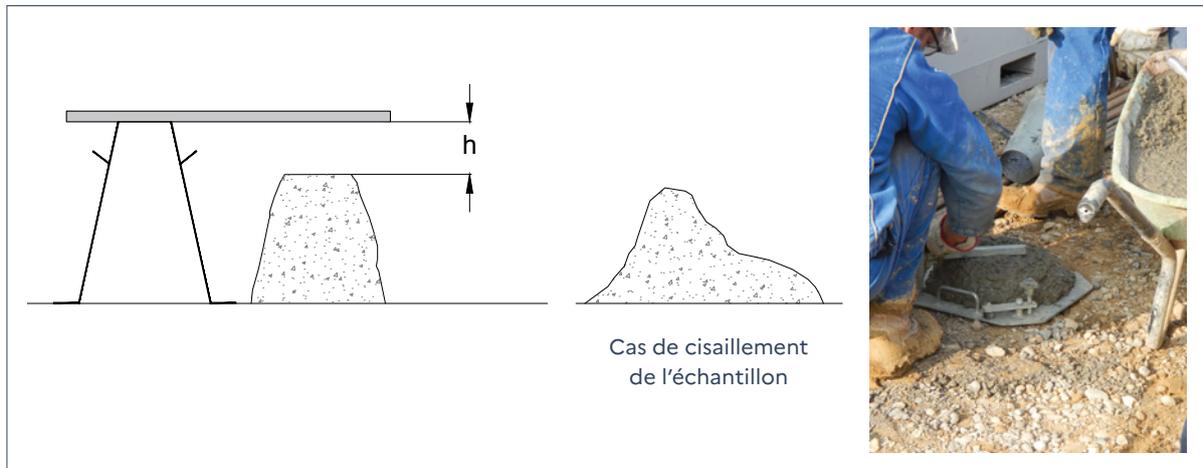


Figure 4.6 : Essai d'affaissement (en cas de cisaillement de l'échantillon, l'essai doit être refait)
(d'après la norme NF EN 12350-2)



Choix du liant pour les pieux forés

Le choix du liant doit tenir compte **des analyses chimiques de sol et de l'eau**. Les terrains pollués et/ou tourbeux notamment peuvent contenir des éléments chimiques retardant ou empêchant la prise du béton.

Teneur en liant total pour les pieux de classe 2

Que le terrain soit le siège d'une nappe ou pas, **le dosage minimal de liant total** est de 325 kg/m^3 pour les pieux forés à la tarière creuse (Notes 1 et 2).

Note 1 : pour les pieux forés à la tarière creuse, en présence de nappe, l'injection sous pression du béton simultanément à la remontée de la tarière, empêche les venues d'eau dans le béton fluide durant la phase de bétonnage. Par dérogation à la norme NF EN 206+A2/CN, on peut considérer qu'on est en condition sèche et un dosage en liant total de 325 kg/m^3 peut être retenu, mais il faut s'assurer que le béton soit pompable et que la cage d'armature puisse être mise en place. Évidemment, il faut toujours s'assurer que la base de l'âme creuse est toujours dans le béton, et donc que la remontée de la tarière soit en adéquation avec le débit du béton.

Note 2 : dans la plupart des cas, ce dosage est augmenté pour améliorer la maniabilité du béton.

Rapport $E_{\text{eff.}}/\text{Liant}_{\text{éq.}}$

On rappelle que la quantité d'eau intervenant dans ce rapport est **l'eau efficace** « $E_{\text{eff.}}$ » au sens de la norme NF EN 206+A2/CN, c'est-à-dire l'eau effectivement disponible pour l'hydratation du ciment et pour la fluidité du béton (quantité d'eau totale déduction faite de la quantité d'eau absorbée par les granulats). De même, la quantité de « $\text{Liant}_{\text{éq.}}$ » représente la quantité **de liant équivalent** au sens de la norme NF EN 206+A2/CN, c'est-à-dire avec prise en compte de tout ou partie de l'addition (c'est-à-dire dans les limites du ratio $A/(A+C)$) avec la pondération apportée par le coefficient « k » de la norme. Pour le cas général⁽¹⁸⁾ avec une durée d'utilisation de 50 ans, le tableau NA.F.1 de l'annexe NA.F sur les valeurs limites applicables en France à la composition et aux propriétés des bétons de la norme NF EN 206+A2/CN fixe également, pour chaque classe d'exposition, un taux maximum de substitution du ciment par type d'addition pour le calcul du liant équivalent.

Nota bene : Il est totalement interdit d'augmenter la quantité d'eau prévue en vue d'améliorer la maniabilité du béton, car cette dernière diminue la compacité (donc la durabilité), la résistance mécanique et augmente les phénomènes physiques connexes néfastes pendant la mise en œuvre (ségrégation, délavage...).

18. Cf. aussi les tableaux NA.F.3 et NA.F.4 de l'annexe NA.F de la norme NF EN 206+A2/CN et les autres durées d'utilisation (par exemple le Fascicule 65 du CCTG).

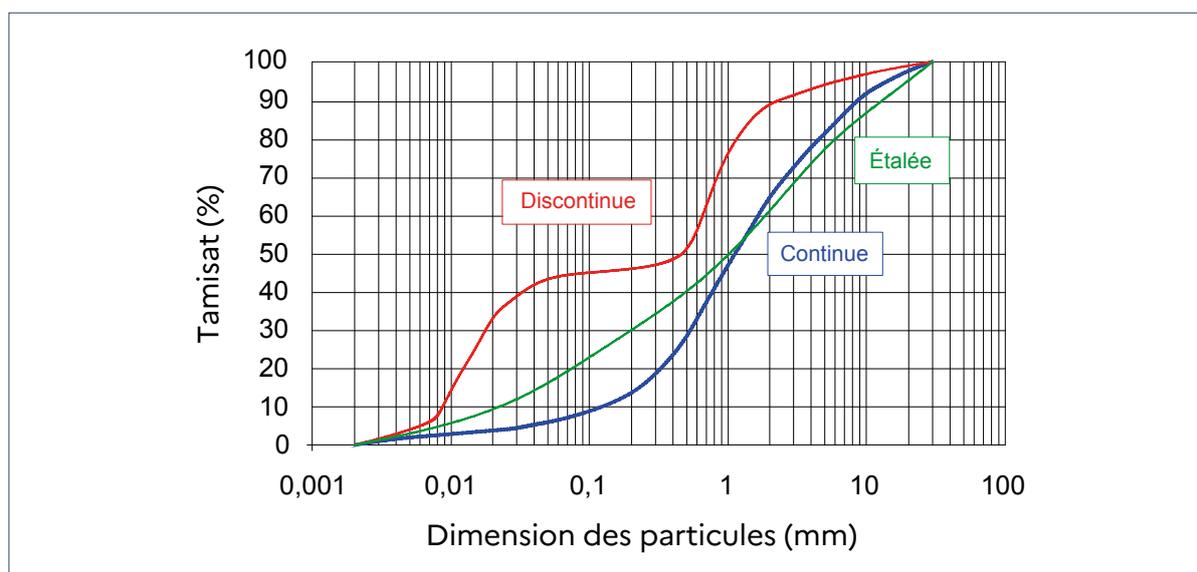
Granulométrie du squelette granulaire

La mise au point de la formule peut se faire selon les méthodes classiques (Dreux, Faury...). Les retours d'expérience actuels ne permettent pas d'orienter préférentiellement le producteur vers **une courbe granulométrique continue ou discontinue** ; toutefois, l'impact du squelette granulaire sur le comportement rhéologique du béton est avéré. **La recherche de formulation optimale et les essais associés** doivent être réalisés par des laboratoires spécialisés.

Pour obtenir une bonne régularité de la composition du béton et les meilleures compacité (dans un souci de durabilité) et **maniabilité possibles** (pour une bonne mise en œuvre), il est généralement nécessaire d'utiliser des granulats de classes granulaires⁽¹⁹⁾ continues (0/4, 4/8, 8/16). Toutefois, dans le cas d'utilisation de sables et granulats concassés de roches massives (basaltes, granites...), l'obtention d'une maniabilité satisfaisante peut être obtenue avec seulement deux classes granulaires (par exemple 0/4 et 10/20).

Une augmentation des éléments très fins (compris entre 80 et 160 μm) peut améliorer la compacité et résistance à la ségrégation (et au délavage). Ces éléments très fins peuvent être apportés par **ajout de fines** (calcaire broyé, cendres volantes...) ou par **un dosage assez élevé en ciment** (400 kg au mètre cube), ce dernier agissant en améliorant la compacité du réseau cristallin du béton.

Figure 4.7 : Exemples de courbes granulométriques continue, discontinue et étalée



Utilisation des adjuvants

Le rôle des adjuvants est **d'améliorer certaines propriétés spécifiques** (cf. § 1.3.3 « Les adjuvants ») et ils ne doivent **pas servir à compenser une faiblesse de la formulation**. En effet, la plupart des adjuvants possèdent des effets secondaires difficilement maîtrisables, d'autant plus importants qu'ils sont fortement dosés. ⚠ De la même façon, **la multiplication des adjuvants** peut, si elle n'est pas totalement maîtrisée, poser le problème des interactions entre ces divers produits (*Note*), d'où la nécessité des épreuves d'études et de convenance (cf. § 2.2).

Note : néanmoins, il n'est pas rare d'avoir une formulation composée d'un superplastifiant, d'un retardateur et d'un colloïde.

Usage de rétenteurs d'eau pour la technique de la tarière creuse

Afin de limiter les échanges d'eau entre le sol et le béton, des rétenteurs d'eau peuvent être utilisés.

19. La classe granulaire d/D représente les dimensions des plus petits « d » et des plus gros éléments « D ».

2.2 - L'ÉPREUVE D'ÉTUDE ET L'ÉPREUVE DE CONVENANCE (OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL)

2.2.1 - L'ÉPREUVE D'ÉTUDE

Objectif de l'épreuve d'étude

Le béton de pieu doit faire l'objet d'une **épreuve d'étude** visant :

- à **mettre au point la formule nominale** (cf. § 2.1 « La formulation ») ;
- à **évaluer sa robustesse** (cf. § 2.2.2 « L'étude de la robustesse de la formule »).

Cas de dérogation à l'épreuve d'étude

Il est possible de déroger à l'**épreuve d'étude** si le béton proposé dispose de références probantes, c'est-à-dire qu'il doit répondre aux trois points cités :

- **avoir déjà été fabriqué et mis en œuvre dans des conditions similaires** (conditions de transport équivalentes, mise en œuvre similaire, caractéristiques des pieux équivalentes...);
- **pouvoir justifier d'essais de maniabilité en centrale et sur chantier** conformes (affaissement, étalement à la table à choc...);
- **pouvoir justifier d'un minimum de douze résultats d'épreuve de contrôle** (en centrale et sur chantier) satisfaisant les conditions suivantes (clause 8.2.1.1 du Fascicule 65 du CCTG) :

$$- f_c > f_{ck} + K(n) \times S$$

$$- f_c > f_{ck} + 6 \text{ (MPa)}$$

où f_c est la moyenne arithmétique des résultats obtenus,

S est l'écart-type de la distribution des résistances,

f_{ck} est la résistance caractéristique souhaitée,

$K(n)$ est un coefficient, fonction du nombre de résultats selon le **tableau 8.G du Fascicule 65 du CCTG**.

Pour 12 résultats d'épreuve, cas le plus courant, $K(n) = 2$.

Les résultats doivent dater de **moins de 2 ans**.

Essais réalisés sur la gâchée nominale

L'**épreuve d'étude** comprend :

- **des essais de consistance et de maintien de consistance** pendant la durée pratique d'utilisation (cf. les essais d'ouvrabilité dans le Tableau 4.3 « Gamme des essais disponibles et des normes associées en fonction des caractéristiques de béton visées » dans le § 3.3.2 « Essais à réaliser sur béton frais et sur béton durci ») ;
- **trois essais de résistance à la compression** à 28 jours ;
- **d'autres essais ou justifications spécifiques** relatifs à la durabilité en prévention de l'alcali-réaction, des réactions sulfatiques internes...

2.2.2 - L'ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE DE LA FORMULE

L'**étude de la robustesse de la formule** est indispensable pour les chantiers importants (notamment tous les chantiers de génie civil) et pour les bétonnages prévus sur une longue durée (plusieurs mois).

Objectifs de l'étude de la robustesse de la formule

Elle consiste, après avoir calé la formule nominale par vérification des caractéristiques attendues (maintien rhéologique, maniabilité, résistances mécaniques...), à **simuler des variations de production** par l'étude de formules dérivées de la formule nominale.

Les formules dérivées ou Gâchées dérivées

Il sera étudié au minimum **des formules dérivées sur l'eau** ($\pm 10\text{l/m}^3$) selon la clause 8.2.1.2.2 du Fascicule 65 du CCTG).

Pour les bétons de pieux, il est également intéressant d'étudier **des variations de teneur en fines** (dérivées à ± 20 kg de ciment et $\pm 10\%$ de $S/(S+G)$ avec « S » pour le sable et « G » pour le gravillon) et leur effet sur la maniabilité du béton.

Ces formules dérivées seront soumises aux mêmes essais que la formule nominale.

Validation de l'étude

La formule est réputée robuste lorsque les résultats de résistance obtenus sur les formules dérivées ne diffèrent pas de plus de 15 % de ceux obtenus sur la formule nominale et lorsque les résultats de la consistance sur les formules dérivées sont compris dans la fourchette spécifiée.

2.2.3 - L'ÉPREUVE DE CONVENANCE

Objectif de l'épreuve de convenance

L'épreuve de convenance a pour but de vérifier, a priori, que **le béton**, défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier, **satisfait aux exigences du marché**. Elle doit donc être réalisée **dans les mêmes conditions que le chantier** en termes :

- **d'approvisionnement** des constituants ;
- **de fabrication** ; l'épreuve se déroule en centrale et porte sur un minimum de trois gâchées de la capacité nominale du malaxeur (ou capacité d'utilisation prévue sur chantier) pour une prise en compte de l'effet de masse ;
- **de conditions de transport** (le temps de transport est simulé en centrale par conservation du béton dans la toupie agitatrice le temps nécessaire) ;
- **de mise en œuvre** du béton (un essai de pompage est à prévoir le cas échéant), pour vérifier le maintien des propriétés rhéologiques du béton ;
- **de conditions climatiques** (températures voisines des températures attendues sur chantier).

Les essais réalisés lors de l'épreuve de convenance (cf. clause 8.2.3 du Fascicule 65 du CCTG)

Il convient de vérifier l'adéquation **des outils de fabrication, du respect des dosages**, ainsi que **la rhéologie du béton frais et la résistance à la compression** à 28 jours. Pour ces deux derniers points, on peut se référer au § 3.3.2 « Essais à réaliser sur béton frais et sur béton durci ».

2.3 - PROGRAMME DE BÉTONNAGE

Exigences pour la formulation du béton

À l'issue de l'épreuve d'étude (cf. § 2.2.3), l'entreprise doit établir **le programme de bétonnage** qui définit :

- **les conditions de fabrication** ;
- **les conditions de transport** (camions agitateurs – Figure 4.8, pompes à béton⁽²⁰⁾...) ;
- **les conditions de mise en œuvre** (à la benne, par pompage, au tube plongeur...) et le matériel prévu (cf. § 4.1) ;
- **le phasage prévisionnel** (temps maximal de mise en œuvre...) ;
- **les essais de contrôle de consistance à la réception** (type et fréquence) (cf. § 3.3 « Contrôle des bétons ») ;
- **les prélèvements** à réaliser (type et fréquence) dans le cadre des épreuves de contrôle (cf. § 3.3) ;
- **les moyens de protection** prévus (par exemple contre le gel ou les fortes chaleurs – cf. § 4.3.1 et 4.3.2) ;
- **les contrôles non destructifs** prévus (réservation pour auscultation sonore... – cf. § 2.1 du fascicule 6 «Le contrôle des pieux finis»).

20. Les pompes à béton permettent de transporter le béton du lieu de stationnement du camion agitateur via un conduit jusqu'au forage.

Ce programme de bétonnage doit permettre d'organiser une **épreuve de convenance** (cf. § 2.2.3) représentative des conditions de chantier.

Il convient aussi de vérifier l'adéquation **des sources d'énergie du chantier** (branchements électriques, groupes électrogènes, compresseurs...) avec les moyens matériels qui seront mis en œuvre et les **éventuelles solutions en cas de panne**.

Figure 4.8 : Exemple de camion agitateur



2.4 - MISE EN ŒUVRE D'ENVELOPPE POUR LE BÉTONNAGE SI NÉCESSAIRE

2.4.1 - LES ENVELOPPES POUR LE BÉTONNAGE

Deux types d'enveloppe : le tube et la chemise

Il existe deux types d'enveloppe :

- le **tube**, qui s'interpose entre le vide d'excavation et le sol (*Notes 1 et 2*) ;
- la **chemise**, qui est placée entre le béton et le sol (*Note 1*).

Note 1 : lorsque le tube est abandonné dans le forage au moment du bétonnage, il fait alors office de chemise.

Note 2 : lorsque le chemisage est réalisé par un tube métallique épais, il peut être aussi appelé « gaine ».

Intérêt du tubage et du chemisage pour le bétonnage

Le tube et la chemise sont mis en place pour assurer :

- **la stabilité des parois du forage** :
 - le tubage concerne la stabilité des parois vis-à-vis de la poussée du sol, le tube est ainsi soumis à des efforts de compression nécessitant une épaisseur importante,
 - le chemisage permet la stabilisation des parois vis-à-vis de la poussée du béton frais (*Note 1*), sollicitant ainsi la chemise en traction et de ce fait, même une faible épaisseur permet de reprendre ces efforts ;
- **la protection du béton contre les milieux agressifs** (terrain ou nappe) ;
- **l'intégrité du fût** :
 - en empêchant la surconsommation du béton (*Note 2*),
 - en évitant le délavage du béton lors de circulation d'eau (§ 6.2),
 - un impact limité des efforts parasites (frottements négatifs et poussées latérales/transversales du sol présentés dans le § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »).

Nota bene : L'intérêt des enveloppes pour le forage des pieux forés est traité dans le chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classe 1 et 2 ».

Note 1 : le béton frais, avant sa prise, va exercer une pression horizontale de type hydrostatique.

Note 2 : la surconsommation du béton peut être due à des pertes de béton dans les réseaux de fissures ou vides (§ 6.3) ou au fluage des couches molles pouvant conduire à une augmentation ou à une diminution du diamètre des pieux (§ 6.1).

2.4.2 - INTÉRÊT DES CHEMISES SEMI-RIGIDES OU SOUPLES

Définition et intérêt des chemises

Les chemises (Figure 4.9) sont des enveloppes de faible épaisseur ayant pour objectif principal de **désolidariser le béton du sol afin, entre autres, de limiter** :

- **les effets des terrains avoisinants en cas de frottements négatifs** (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») et dans certains cas de frottements positifs ;
- **la surconsommation du béton** (cf. § 6.1 « Bétonnage en présence de sols mous ou sous charge » et 6.3 « Bétonnage en présence de vides ou de karst ») ;
- **le délavage du béton** (cf. § 6.2 « Bétonnage en présence de circulation d'eau : risques de délavage du béton ») ;
- **les agressions chimiques**, dans certains cas, en constituant une barrière.

Il est aussi possible d'avoir recours à un tube métallique (plus épais qu'une chemise), appelé gaine (traité dans le chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classe 1 et 2 »), peut rendre les mêmes services.

Figure 4.9 :
Exemples de chemises souples



Fonction et matériaux de constitution des chemises

Les chemises, selon leur fonction, peuvent être :

- **semi-rigides**, et constituées d'un tube à paroi mince généralement en métal (dans certains cas, en PVC), à privilégier :
 - dans les enrochements et les terrains karstiques, les carrières souterraines, les traversées d'ouvrages enterrés (cf. § 6.3),
 - en cas de sols peu résistants, lorsque la hauteur de béton encore fluide va exercer une poussée supérieure (*Note 1*) à la contrainte de fluage du sol (cf. § 6.1 « Bétonnage en présence de sols mous ou sous charge ») (⚠ un tube de travail doit être mis en œuvre pour s'opposer au fluage de sol avant le bétonnage),
 - en cas de frottements négatifs (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux » et *Note 2*),
 - dans les sols agressifs pour protéger l'intégrité du béton dans le temps, auquel cas il faudra prévoir une épaisseur d'enveloppe suffisante si ce dernier peut, lui aussi, être attaqué ;
- **souples**, composées par différents types de matériaux (géotextile...) et ayant pour fonction :
 - d'éviter la surconsommation du béton (cf. § 5.6 « Surconsommation de béton », 6.1 « Bétonnage en présence de sols mous ou sous charge » et 6.3 « Bétonnage en présence de vides ou de karst »), en cloisonnant le béton frais,
 - d'empêcher le mélange du béton frais avec des sols peu compacts (cf. § 6.1),
 - de créer une barrière retenant les fines du béton pour éviter le délavage du béton par circulation d'eau (cf. § 6.2 « Bétonnage en présence de circulations d'eau : risques de délavage du béton »).

Note 1 : le béton frais avant sa prise va exercer une pression horizontale de type hydrostatique.

Note 2 : il est cependant difficile d'estimer le frottement axial mobilisable, à défaut d'essai préalable ou d'expérience comparable.

Épaisseur des chemises

L'épaisseur des chemises semi-rigides est généralement de 1 à 2 mm.

La chemise souple, quant à elle, doit évidemment résister à la pression du béton frais (risque d'éclatement), surtout au niveau des parties basses qui sont les plus sollicitées. À cet effet, le grammage, la résistance et la capacité de déformation de la chemise souple doivent être adaptés à la longueur de la chemise et à son diamètre.

Liaison des chemises

La jonction de deux tronçons successifs est réalisée :

- dans le cas des chemises semi-rigides, par rivetage et éventuellement manchonnage ;
- dans le cas de chemises souples de type géosynthétique, par couture ou agrafage.

2.4.3 - MISE EN ŒUVRE DES CHEMISES

Installation des chemises

Les chemises sont **mises en place dans le forage avant ou avec la cage d'armature** (Figure 4.9 dans le § 2.4.2 et *Note*) juste avant le bétonnage du pieu, parfois à l'abri d'un tube de travail.

Les chemises semi-rigides sont manutentionnées grâce à des engins de levage (cf. § 8.2 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés »).

Note : cage d'armature à laquelle elles peuvent être solidarisiées.

Hauteur de mise en œuvre de la chemise

Les chemises peuvent être mises en œuvre sur une hauteur donnée au niveau des couches nécessitant leur emploi ou sur toute la hauteur du pieu.

Bardage et dressage des chemises semi-rigides

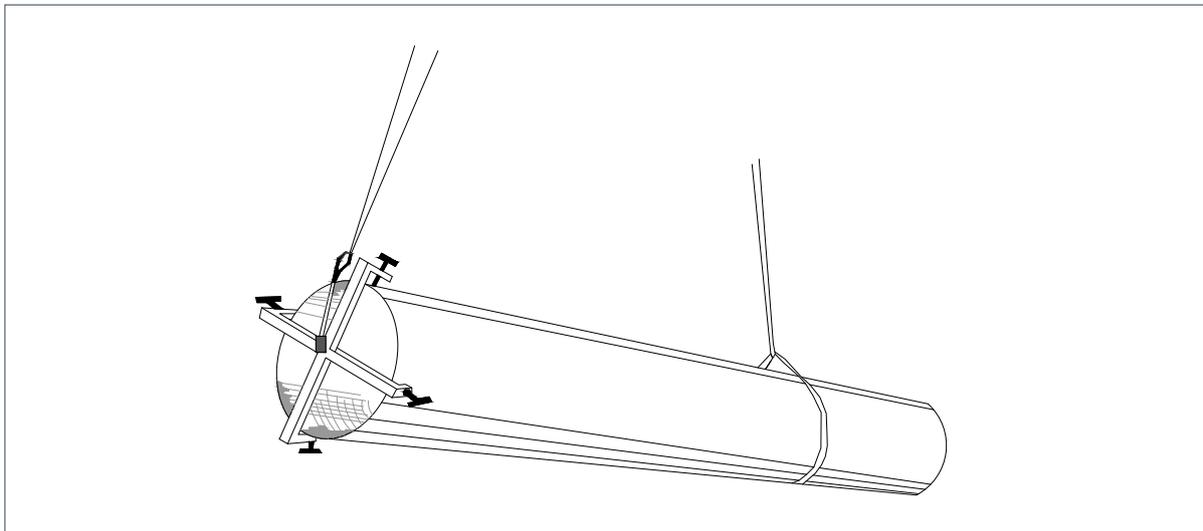
Lors des manutentions pendant le bardage⁽²¹⁾ et le dressage⁽²²⁾ (Figure 4.10) :

- **les risques** sont les chocs ou les déformations (cintrage ou ovalisation – *Note 1*) rendant la chemise incompatible avec sa fonction ;
- **les difficultés** vont dépendre de la rigidité et de l'encombrement de la chemise ;
- **les précautions** à prendre comprennent :
 - un nombre de points de levage à adapter à la longueur (*Note 2*) et à la rigidité de la chemise et,
 - l'utilisation, au point de levage inférieur, d'une sangle de préférence à une élingue traditionnelle,
 - des systèmes d'extrémité (des croisillons par exemple, comme le montre la Figure 4.10) limitant l'ovalisation. Ces derniers sont recommandés.

Note 1 : le bardage se fait avec les tubes à l'horizontale, d'où les problèmes d'ovalisation.

Note 2 : pour des chemises semi-rigides relativement longues, un raboutage vertical dans le pieu est préféré.

Figure 4.10 : Procédé recommandé pour le bardage des chemises semi-rigides



21. Le bardage fait référence à la manière de positionner horizontalement les tubes/chemises sur les remorques de transport, sur les plateformes de stockage ou les plateformes de travail.

22. Le dressage consiste à la mise en position verticale des tubes.

Centrage des chemises semi-rigides

Le centrage de la chemise semi-rigide dans le forage doit être au minimum assuré :

- **en absence de virole ou de tube**, par calage en tête ;
- **en présence de virole**, par des pièces métalliques soudées ;
- **en présence de tube de travail**, par des pièces métalliques soudées ou mieux encore, par des écarteurs répartis à raison de trois ou quatre par niveau.

Vide annulaire dans le cas de chemises semi-rigides

Le diamètre des chemises semi-rigides est généralement inférieur d'environ 100 mm au diamètre du tube de travail ou au diamètre du forage.

Le vide ainsi créé entre la chemise et le terrain :

- **engendre une réduction, voire une annulation de la capacité de réaction horizontale du pieu et du frottement latéral**, ce qui peut être recherché pour lutter contre les frottements négatifs (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »). Cependant, en fonction de leur nature, certains terrains peuvent se refermer sur la chemise. Cette réduction de diamètre doit être prise en compte dans les calculs aux états limites structuraux selon les Eurocodes (STR – ruptures/déformations) ;
- **peut être comblé**, lorsque les chemises n'ont pas pour office de réduire les frottements négatifs, en injectant l'espace annulaire. Cette opération doit être prévue au CCTP, car elle a un coût.

Fragilité des chemises souples

Il faut **faire attention à l'endommagement de ces chemises**, par déchirure ou étirement à outrance. Leur fragilité requiert des précautions particulières à la mise en œuvre (cf. l'« Épaisseur des chemises » dans le § 2.4.2).

Problématique lors du retrait du tube de travail en présence de chemise

Lors de la remontée du tube de travail (cf. aussi § 5.7 « Le retrait du tube de travail »), s'il existe, il y a des risques de déchirures ou d'entraînement de la chemise. L'extraction du tube par louvoisement est à proscrire.

Transport des chemises

Les difficultés de transport ne concernent que **les chemises semi-rigides**, en raison de :

- **leur encombrement**, identique à celui des tubes ou des armatures (cf. fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») ;
- **leur fragilité et leur déformabilité**, qui requièrent des conditions particulières lors du transport pour éviter leur endommagement.

CHAPITRE 3

Fabrication, livraison, réception et transport du béton sur chantier

3. FABRICATION, LIVRAISON, RÉCEPTION ET TRANSPORT DU BÉTON SUR CHANTIER

3.1 - FABRICATION (BÉTON PRÊT À L'EMPLOI ET SUR SITE)

Cas d'une centrale de béton prêt à l'emploi (BPE)

Le recours à une centrale de béton prêt à l'emploi est préférable sauf si le volume de béton à mettre en œuvre est suffisamment important pour mettre en place une centrale de chantier et si le planning (délais) le permet.

Il convient de privilégier une centrale admise à la marque « **NF-BPE** » (obligatoire pour les ouvrages d'art selon le Fascicule 65 du CCTG).

À la commande, il sera précisé si le pieu est réalisé en conditions sèches ou immergées.

Cas d'une centrale de chantier

Toutefois certains chantiers justifient le recours à une fabrication sur site. Dans le cas de la mise en place d'une centrale de BPE ou équivalent, il est conseillé d'exiger de la centrale **une admission particulière à la marque « NF-BPE » ou équivalent** selon les dispositions prévues par le référentiel de certification **NF 033**, pour l'ensemble des formules de béton prévues, sur la durée du chantier. Dans le cas où le béton serait produit et utilisé par l'entreprise, **la certification NF BPE** n'est pas applicable du fait de l'absence de relation client-fournisseur. On pourra alors se reporter par exemple aux spécifications définies dans l'**annexe B** du Fascicule 65 du CCTG. Dans le cas des ouvrages relevant du Fascicule 65 du CCTG, l'ensemble de ces dispositions sont obligatoires.

Critères de choix de la centrale

Le bétonnage devant être **exécuté de façon continue**, le choix de la centrale est primordial. Il faut vérifier en particulier que :

- **la capacité de production** de la centrale est suffisante pour produire les quantités journalières prévues – au besoin en réservant la centrale au seul chantier de pieux ;
- **la centrale et/ou l'entité en charge des livraisons disposent de suffisamment de toupies** pour approvisionner la totalité du béton de pieu sur chantier avant de démarrer le bétonnage. Il est d'usage de disposer d'avance de deux à trois toupies contrôlées conformes sur chantier avant de démarrer le bétonnage. => à défaut des moyens précités, il conviendra de prévoir une centrale d'appoint, pour compenser une capacité de production ou d'augmenter le nombre de toupies. Dans le cas de pieux/barrettes de grande taille, il conviendra de prévoir une centrale de secours pour pallier une panne de la centrale principale et éviter ainsi un arrêt de bétonnage pendant la réalisation d'un élément de fondation profonde. Ces centrales sont à qualifier de la même manière que la centrale principale (NF, convenances...).

Il faut surveiller de très près la régularité des paramètres du béton frais et, par conséquent, assurer un contrôle permanent de la fabrication par la centrale.

Vérification du matériel de fabrication

Il convient de vérifier **les dispositions prises par l'entreprise** en ce qui concerne le matériel de la centrale de fabrication, soit :

- **le matériel de stockage** (silos à ciments, trémies à granulats, transporteurs...);
- **les appareils de dosage** (bascules, débitmètres...);
- **le dispositif de mesure de l'efficacité du malaxage** (automatisme, humidimètre, wattmètre différentiel...).

3.2 - TRANSPORT ET MANUTENTION

Les impératifs pour le transport

En règle générale, l'organisation du transport doit répondre à deux impératifs :

- **limiter la durée de transport et assurer la maîtrise du temps de transport** compte tenu de la rhéologie du béton et d'éventuels aléas de la circulation ;
- **n'autoriser aucune interruption d'approvisionnement** sur chantier (en cas de centrale de BPE : vérification du temps de parcours et des rotations des toupies).

Le transport, depuis le lieu de fabrication jusqu'à celui de sa mise en œuvre, doit se faire **par camion agitateur**, appelé aussi bétonnière portée (toupie agitatrice – Figure 4.8 dans le § 2.3).

⚠ **L'ajout d'eau est interdit** en cours de transport ou avant toute mise en œuvre.

Les risques encourus lors du transport et de la manutention

Les effets du transport et de la manutention, comme le risque de ségrégation décelable et d'évaporation excessive, doivent être appréhendés et pris en compte lors de l'épreuve de convenance, **en fixant une durée maximale d'utilisation du béton à ne pas dépasser**.

Toute durée de transport importante non prévue, toute rupture d'approvisionnement et toute attente de camion augmentent les risques de durcissement prématuré du béton, et a des conséquences souvent fortement préjudiciables, notamment sur la mise en œuvre.

3.3 - CONTRÔLE DES BÉTONS

Nota bene : Ce chapitre ne traite que du contrôle du matériau béton à réception et de sa résistance à 28 jours. Le contrôle des pieux finis est traité dans le fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ».

3.3.1 - PLAN DE CONTRÔLE

Contrôle du béton et de ses constituants en centrale

Afin de réaliser le contrôle du béton et de ses constituants, il convient :

- **de procéder au prélèvement des composants du béton** (granulats, ciments, adjuvants) qui seront soumis à des essais si le CCTP l'exige ;
- **d'établir un système permettant de suivre la fabrication** : relevé des pesées, dosages, indications des appareils enregistreurs (imprimante, wattmètre) et autres (humidimètre), fonctionnement général de la centrale ;
- **d'effectuer éventuellement quelques contrôles sur béton frais** (cf. § 3.3.2) pour comparaison avec les mêmes caractéristiques à l'arrivée sur le poste de bétonnage.

Contrôle du béton sur le poste de bétonnage

Pour le contrôle du béton sur le poste de bétonnage, il convient de :

- **vérifier l'ouvrabilité du béton** (cf. § 3.3.2) ;
- **fabriquer les éprouvettes de béton** qui seront soumises aux essais mécaniques et aux mesures de compacité (cf. § 3.3.2) ;
- **noter les temps de transport et d'attente du béton** avant mise en œuvre.

Nombre minimal de prélèvements (Plan de contrôle minimal)

Le plan de contrôle minimal conseillé est le suivant :

- pour les ouvrages courants :
 - un prélèvement sur la toupie du premier pieu et/ou après toute interruption de travaux de plus de 2 jours,
 - un prélèvement pour le contrôle des caractéristiques du béton durci par tranche de 100 m³ de béton ;
- pour les ouvrages d'art ou pour tout chantier important :
 - un prélèvement pour contrôle des caractéristiques du béton frais sur chaque toupie,
 - un prélèvement pour le contrôle des caractéristiques du béton durci par pieu ou par groupe de pieux réalisés en une journée (Figure 4.11).

⚠ **Toute dérogation aux fréquences d'essais** devra être prévue dans le plan d'assurance qualité de l'entreprise (PAQ - cf. § 3.4 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») et justifiée.

Figure 4.11 : Éprouvettes de béton pour essais sur béton durci



Essais à réaliser pour chaque prélèvement

Chaque prélèvement comprend :

- un **essai de consistance** (étalement à la table à choc (norme NF EN 12350-5) et/ou affaissement (norme NF EN 12350-2) ou temps d'écoulement au cône d'Abrams inversé (norme XP P18-469) selon les modalités retenues en éprouve de convenance) ;
- un **essai de résistance mécanique** à 28 jours (nécessité de réaliser trois échantillons par prélèvement) (norme NF EN 12390-3).

En cas de contrôle de l'ouvrabilité du béton au cône inversé

Un contrôle de l'ouvrabilité du béton par mesure du temps d'écoulement au cône inversé (si cet essai a été réalisé en convenance) peut donner **des indications utiles pour l'acceptation du béton sur chantier et l'évaluation de sa viscosité** (Tableau 4.3 « Gamme des essais disponibles et des normes associées en fonction des caractéristiques de béton visées » dans le § 3.3.2).

Établissement de la courbe de bétonnage

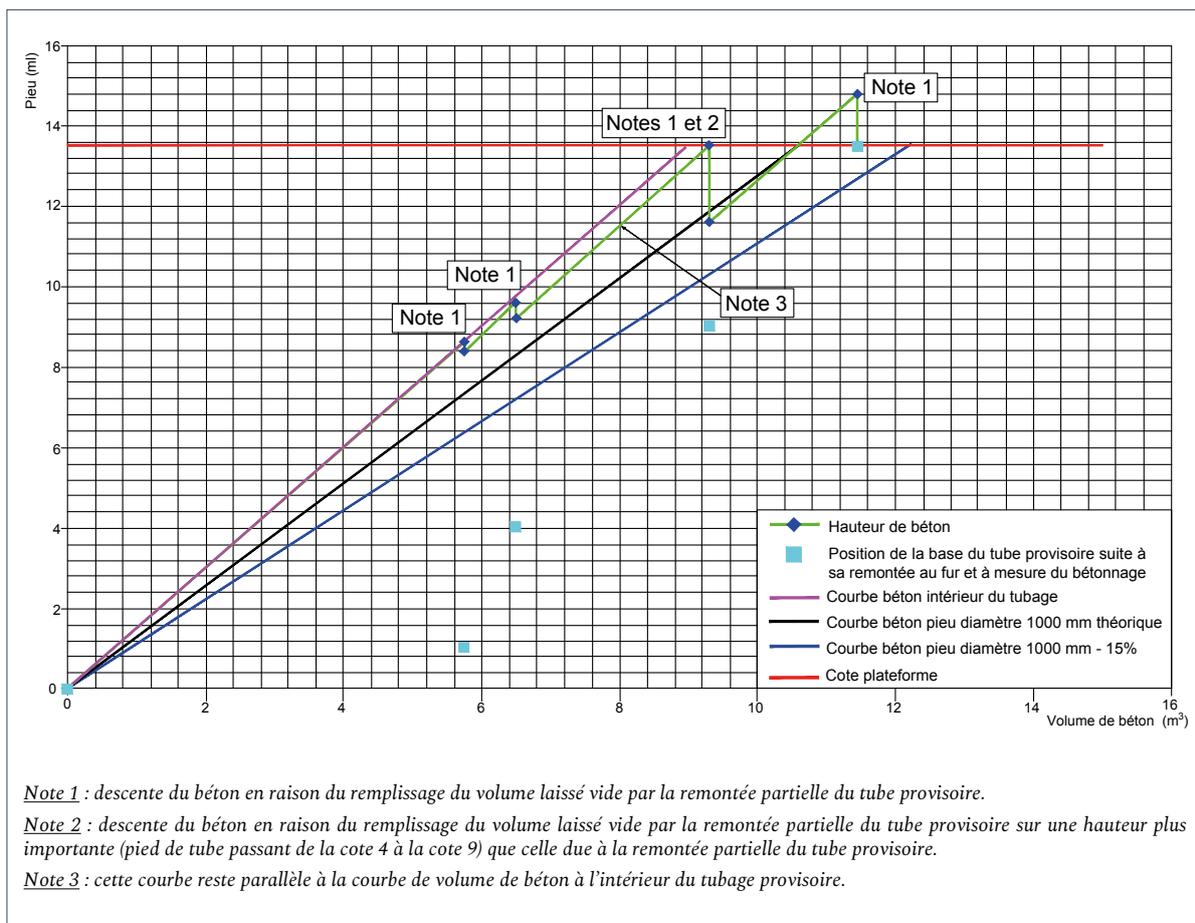
On doit relever le **volume de béton** mis en œuvre sur chaque pieu.

Il convient d'établir **pour chaque élément de fondation une courbe de bétonnage** (Figure 4.12) et de comparer les quantités théoriques avec les quantités réelles de béton mises en œuvre (*Note*).

La **courbe de bétonnage** doit indiquer les opérations particulières lors du bétonnage (indication de la longueur progressivement raccourcie du tube plongeur et éventuellement du tube provisoire – cf. § 4.1.1.3 « Bétonnage au tube plongeur ») et les incidents de chantier (interprétations et exemples fournis dans le § 5.6 « Surconsommation de béton », pour chaque élément de fondation).

Note : lorsque le volume unitaire par pieu est faible, il est difficile de réaliser une courbe de bétonnage avec plusieurs points ; le PAQ (Plan Assurance Qualité – cf. § 3.4 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») peut proposer une fréquence plus faible avec des courbes comprenant au moins cinq points.

Figure 4.12 : Exemple de courbes de bétonnage d'un pieu foré tube récupéré en cours de bétonnage avec position du bas du tube provisoire



Contrôle obligatoire de certains paramètres de forage et de bétonnage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

La norme NF EN 1536+A1 impose un **contrôle de certains paramètres de forage** (cf. § 2.2.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») et de **bétonnage** (cf. § 4.1.3 du présent fascicule), qui peut être assuré par des enregistrements graphiques (*Note*).

Note : pour cette technique, selon la norme NF P94-262 COMPIL1, certains paramètres de dimensionnement (résistance caractéristique du béton du pieu et paramètres géotechniques – frottement axial et résistance en pointe) ne sont applicables que sous réserve de l'enregistrement continu des paramètres de forage et de bétonnage avec visualisation en temps réel par l'opérateur. Faute d'enregistrement, les abaques pour FTC ne sont pas utilisables, et il faut avoir par exemple recours à des essais de chargement pour dimensionner les pieux et ceci doit être indiqué dans le marché. En cas de dysfonctionnement du système d'enregistrement sur un pieu, des contrôles supplémentaires doivent intervenir pour valider ce pieu. Des dysfonctionnements répétés et continus constituent un point d'arrêt (cf. définition sur la Figure 2.3 dans le § 2.9 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

3.3.2 - ESSAIS À RÉALISER SUR BÉTON FRAIS ET SUR BÉTON DURCI

Il convient de rappeler que ces essais doivent être réalisés par **du personnel formé et qualifié** (y compris en phase travaux). En effet, la validité de l'essai dépend de sa bonne réalisation.

Les essais sur béton frais

En fonction des caractéristiques visées, différents essais sur béton frais peuvent être envisagés. Le Tableau 4.3 présente la gamme **des essais disponibles et les normes associées, ainsi que des valeurs indicatives**, selon le type de contrôle (cf. § 2.2.1 « L'épreuve d'étude », 2.2.3 « L'épreuve de convenance » ou encore lors des travaux).

Il convient aussi de vérifier, lors des épreuves d'étude et de convenance, **le rendement du béton** (*Note*), c'est-à-dire si la composition permet bien d'obtenir un mètre cube de béton en œuvre (serrage par autocompaction).

Dans le cas où le béton de pieu proposé est **un béton de consistance SF1 à SF3 (bétons autoplaçants – BAP)**, les essais spécifiques des BAP seraient à réaliser (étalement au cône d'Abrams, boîte en L, stabilité au tamis).

Note : le rendement du béton est par le rapport entre la fraction de la masse volumique réelle du béton frais (mesurée selon la norme NF EN 12350-6) et la masse volumique théorique (issue de la formule théorique du béton). Pour les tolérances, la norme béton ne fixe pas de valeur. La tolérance est fixée dans le CCTP ou à défaut peut être prise égale à 3 % en cas de mesure individuelle et de 2 % en moyenne.

Tableau 4.3 : Gamme des essais disponibles et des normes associées en fonction des caractéristiques de béton

	Essais	Norme	Objectif visé	Valeur indicative	Type de contrôle	Observations complémentaires
Ouvrabilité	Étalement à la table à choc (Figure 4.5 dans le § 2.1)	NF EN 12350-5	À fixer par l'entreprise	600 mm ± 50 mm (*)	E C T	Ressuage et ségrégation <u>Observations</u> : • d'une auréole périphérique => ressuage • d'un tas de granulat au milieu => ségrégation
	Affaissement (« slump ») (Figure 4.6 dans le § 2.1)	NF EN 12350-2	À fixer par l'entreprise	180 mm ± 30 mm (*)	E C T	Essai non recommandé au-dessus de 210 mm car au-delà absence de précision et d'informations sur le comportement du béton (cf. article 5.4.1 de la norme NF EN 206+A2/CN)
Temps d'écoulement (ou viscosité)	Cône d'Abrams inversé	XP P18-469	À fixer par l'entreprise		E C T	Inadapté pour les BAP (béton autoplaçant)
Ressuage	Filtration sous pression (BAUER)	XP P18-475	Cf. bibliographie [4.2]		E C	À réserver aux pieux de grande profondeur (à partir de 15 m)
	Essai sur béton frais – Ressuage (Bol ASTM)	XP P18-468	À fixer par l'entreprise		E C	
Ségrégation	Fendage		Absence de ségrégation		E C	Mise en œuvre sans vibration Examen visuel de l'éprouvette fendue ⁽²³⁾

Légende : E : étude ; C : convenance ; T : travaux (*) Tolérance associée à la valeur cible.

Les essais sur béton durci

À ces essais sur béton frais s'ajoutent **les essais de compression** pour vérification de la résistance mécanique à la compression (NF EN 12390-3).

23. L'observation de ségrégation est une preuve, mais l'absence de constatation ne garantit pas de la non-ségrégation du béton.

CHAPITRE 4

Mise en œuvre du béton dans le forage

4. MISE EN ŒUVRE DU BÉTON DANS LE FORAGE

La mise en œuvre est une opération extrêmement délicate et toute erreur risque de provoquer **l'inaptitude du pieu foré**. De plus, le béton mis en œuvre dans le pieu ne peut faire l'objet d'aucun contrôle visuel que ce soit lors du bétonnage ou lorsque le pieu est fini. C'est pourquoi il convient de très bien connaître et de respecter **les règles de l'art**.

Dans ce chapitre sont abordés :

- les techniques de mise en œuvre du béton (§ 4.1) ;
- le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur⁽²⁴⁾ (§ 4.2) ;
- le bétonnage sous conditions particulières, comme par temps froid ou chaud (§ 4.3) ;
- les techniques de mesure et d'étalonnage des paramètres d'enregistrement de forage pour les pieux de classe 2 (§ 4.4) ;
- le contrôle de la mise en œuvre du béton (§ 4.5).

4.1 - LES TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE DU BÉTON

La technique de mise en œuvre du béton dans le forage, conseillée pour les pieux de classe 1 est **le bétonnage au tube plongeur** en conditions immergées (§ 4.1.1) et **à la colonne de bétonnage** en conditions sèches (§ 4.1.2). D'autres techniques pour la réalisation des pieux de classe 1 peuvent être rencontrées sur les chantiers, bien qu'elles ne soient pas préconisées. Elles doivent faire l'objet d'une attention particulière (§ 4.1.4).

La technique de réalisation **des pieux forés de classe 2** (tarière creuse) entraîne une méthode de bétonnage spécifique traitée dans le § 4.1.3.

4.1.1 - BÉTONNAGE AU TUBE PLONGEUR

Le tube plongeur (Figure 4.13) est destiné à **éviter le délavage, la ségrégation et la pollution du béton** (Figure 4.14) en recueillant son déversement dans l'entonnoir (ou trémie – cf. § 4.1.2), puis en le guidant au fond du forage jusqu'à la base immergée du tube (Figure 4.15). Ensuite **son alimentation** (Figure 4.16) est maintenue au sein de la masse du béton frais déjà en place (*Note*).

Le bétonnage au tube plongeur peut être réalisé **en conditions immergées** (cf. § 4.1.1.4), c'est-à-dire que le forage est rempli par de l'eau de nappe ou par un fluide stabilisateur (eau, suspension minérale, solutions de polymères...).

Note : le tube plongeur est relevé au fur et à mesure du coulage pour faciliter l'écoulement du béton (cf. Figure 4.31 dans le § 4.1.1.3). Mais il doit être gardé immergé dans le béton frais sur une profondeur suffisante pour que le béton pollué (généralement, un mélange de béton frais et de fluide stabilisateur) surnage.

24. « Fluide stabilisateur » est le terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (article 3.21) pour définir le « fluide utilisé au cours de l'excavation pour soutenir les parois de forage et », dans certains cas, « transporter les sédiments ». Les fluides stabilisateurs viennent s'opposer aux poussées (contraintes) horizontales exercées par les terres et l'eau.

Figure 4.13 : Tube plongeur (ou colonne de bétonnage), constitué de tronçons, suspendu en haut d'une flèche avec sa trémie tronconique (ou entonnoir)

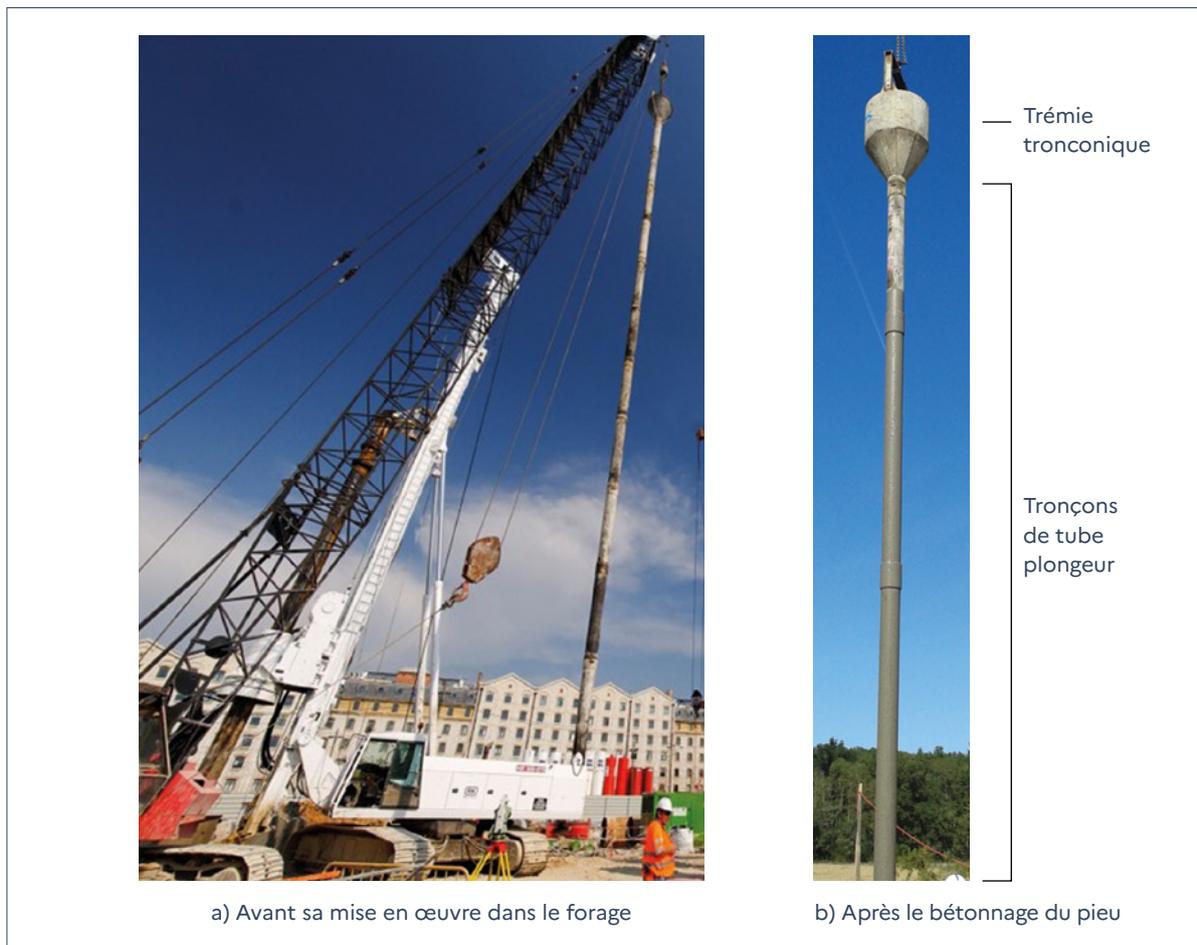


Figure 4.14 : Exemples de pollution du béton sur des carottes prélevées dans des pieux



Figure 4.15 : Tube plongeur immergé dans le béton frais



Figure 4.16 : Bétonnage des pieux via le remplissage de la trémie en tête du tube plongeur



4.1.1.1 - Le tube plongeur et la trémie

Le matériel constituant le tube plongeur

Le tube plongeur (Figure 4.13 et cf. ci-après « Caractéristiques du tube plongeur ») est **constitué de tubes métalliques surmontés par un entonnoir ou une trémie** (Note – cf. ci-après « L'entonnoir (ou trémie) ») servant à la mise en place du béton (Figure 4.16) en conditions immergées. De ce fait, **les joints** entre les différents tubes sont étanches (Figure 4.17).

Le tube plongeur reste **immergé dans le béton** en place (Figure 4.15 et cf. ci-après la « Position du tube plongeur dans les différentes phases »).

Note : l'entonnoir est destiné à recueillir le déversement du béton frais.

Caractéristiques du tube plongeur

Le tube plongeur (Figure 4.13) doit présenter **les caractéristiques usuelles** suivantes :

- être lisse à l'intérieur pour faciliter l'écoulement du béton ;
- être composé de tronçons de faible longueur (généralement inférieures à 3 m, sauf l'élément de pied, qui peut être plus long – Figure 4.18) et facilement démontables (cf. ci-après « Gestion des tronçons du tube plongeur ») : l'assemblage des tronçons peut se faire par filetage ou à l'aide de brides à montage rapide ;
- être suffisamment rigide et robuste (épaisseur minimale recommandée de 8 mm en section courante) ;
- répondre aux prescriptions et exigences de la norme NF EN 1536+A1 :
 - le diamètre intérieur du tube plongeur doit être au moins égal à la plus grande des deux valeurs (article 8.4.3.6) :
 - six fois la taille maximale du granulat,
 - 150 mm⁽²⁵⁾ ;
 - le diamètre extérieur du tube, manchon compris, est recommandé être d'au plus (article 8.4.3.8) :
 - 0,35 fois le diamètre du pieu ou le diamètre intérieur du tube de travail ou de la chemise,
 - 0,6 fois la largeur intérieure de la cage d'armature pour les pieux,
 - 0,8 fois la largeur intérieure de la cage d'armature pour les barrettes ;
 - une distance entre le tube plongeur et les armatures (ou les tubes de réservation) d'au moins quatre fois la dimension du plus gros granulat.

⚠ Ces spécifications peuvent d'ailleurs entraîner dans certains cas la réduction de la taille du plus gros granulat.

Figure 4.17 : Manchon de liaison entre tronçons de tube plongeur



25. Si le diamètre du pieu le nécessite, ce diamètre peut être réduit à 100 mm sous réserve de réduire le D_{max} du granulat pour éviter des phénomènes de blocage dans le tube plongeur.

Il est, de plus, **recommandé** :

- **d'utiliser un tube plongeur lisse à l'extérieur**, c'est-à-dire :
 - sans pièces de liaison saillantes (crochets de fixation) risquant d'accrocher la cage,
 - avec des raccordements des tronçons par filetage taillé dans la masse ;
- **de disposer d'un outillage efficace pour les montages et démontages rapides** des tronçons (cf. ci-après « Gestion des tronçons de tube plongeur dans les différentes phases ») ;
- **de prévoir un dispositif de centrage et d'immobilisation** du tube en tête du forage (Figure 4.19).

Le tube plongeur peut être **une tige de pompage** (Note 3 de l'article 8.4.3.3 de la norme NF EN 1536+A1).

Figure 4.18 : Exemples de tronçons constituant le tube plongeur



Figure 4.19 : Exemples de système de retenue et de centrage des tubes plongeurs (ou colonnes de bétonnage)



Gestion des tronçons du tube plongeur

Les tronçons de tube sont rangés dans des racks facilitant ainsi leur gestion. Ces derniers sont aussi le lieu du montage (ou potentiellement une partie du démontage) des tubes, ainsi que du lavage des tronçons et de la trémie après bétonnage (Figure 4.20).

Figure 4.20 : Gestion des tronçons constituant le tube plongeur

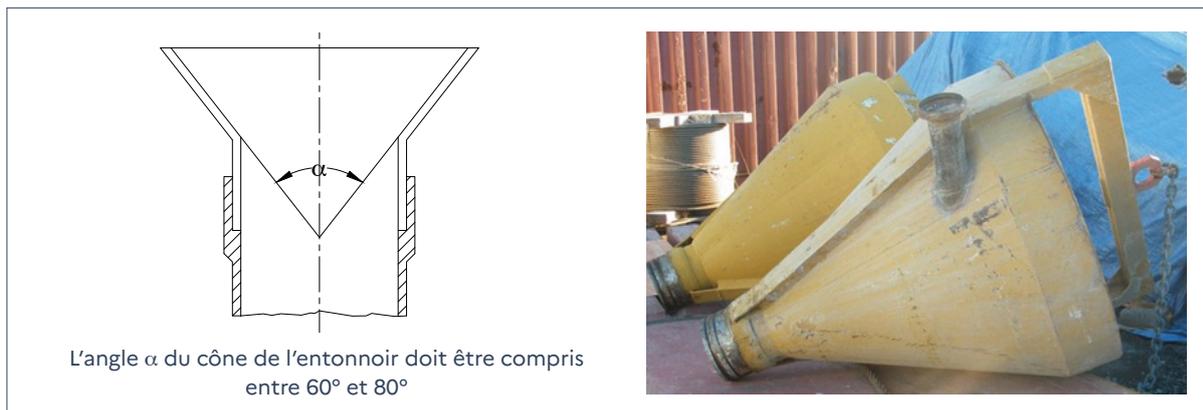


L'entonnoir (ou trémie)

L'entonnoir doit présenter les caractéristiques suivantes (Figure 4.21) :

- une forme tronconique (à préférer à la forme en tronc de pyramide) ;
- un angle au sommet du cône compris entre 60° et 80° (au-dessus de 80° , il peut se former un effet de voûte de béton pouvant saccader la descente du béton ou l'arrêter).

Figure 4.21 : L'angle « α » du cône de l'entonnoir (trémie)



Position du tube plongeur dans les différentes phases

- **Avant l'amorçage**, le tube doit reposer sur le fond du forage.
- **Avant le bétonnage** (amorçage – cf. § 4.1.1.2), le tube plongeur doit être soulevé légèrement sans dépasser une valeur égale au diamètre intérieur du tube plongeur (**article 8.4.3.13 de la norme NF EN 1536+A1**). On doit ensuite procéder rapidement au bétonnage afin de remplir complètement la base du pieu foré pour que le béton, qui a pu subir de la ségrégation en début de bétonnage, ne soit pas piégé (*Notes 1 et 2*).
- **Au cours du bétonnage**, le tube plongeur doit être relevé progressivement au fur et à mesure de la montée du béton dans le forage (cf. « Remontée du tube plongeur » dans le § 4.1.1.3), tout en maintenant constamment la base du tube plongeur immergée dans le béton frais d'au moins (**articles 8.4.3.16 à 8.4.3.17 de la NF EN 1536+A1**) :
 - 1,5 m pour les pieux de diamètre $D < 1,2$ m ;
 - 2,5 m pour les pieux de diamètre $D \geq 1,2$ m ;
 - 3 m pour les barrettes, en particulier lorsque deux tubes plongeurs ou plus sont utilisés.
- **Après achèvement du bétonnage** (*Note 3*), il convient de ne pas retirer le tube plongeur trop vite (*Note 4*).

Note 1 : cela permet d'éviter tout risque de délavage du béton. En effet, dans le cas de bétonnage sous eau ou sous fluide stabilisateur (cf. § 4.1.1.4), si le tube plongeur n'est pas situé proche du fond, il y a délavage ou pollution du premier béton. Le retour d'expérience montre que ce premier béton ne remonte pas en surface dans sa totalité en fin de bétonnage. Une partie tapisse le fond et une autre se plaque sur la paroi latérale du forage, ce qui nuit au contact sol-pieu optimal en pointe et à une mobilisation correcte du frottement axial (cf. « Intérêt d'un bon amorçage » dans le § 4.1.1.2).

Note 2 : pour garantir un bon amorçage, un volume important de béton (celui compris dans l'entonnoir) doit être envoyé en une fois en formant un bouchon de béton qui chasse le fluide stabilisateur du tube vers le bas. À la sortie du tube, il faut un espace faible pour permettre la mise en place du béton autour du tube (Figure 4.22) et l'envoi du béton du tube plongeur dans le béton, et ainsi amorcer la technique du tube plongeur en alimentant le béton au sein de la masse de béton déjà en place.

Note 3 : le bétonnage doit se poursuivre jusqu'à ce que tout béton contaminé dans la partie supérieure de la colonne de béton ait dépassé le niveau prévisionnel de recépage. Comme indiqué dans le § 5.4 « Recépage des pieux forés », le recépage a pour objectif de supprimer les zones douteuses de béton en tête et de mettre à la cote le haut du pieu.

Note 4 : en effet, la succion résultante du retrait du tube pourrait engendrer des imperfections dans le pieu foré (**article 8.4.3.18 de la NF EN 1536+A1**).

Figure 4.22 : Exemples de base de tube plongeur



Nombre de tubes plongeurs

La norme NF EN 1538+A1, dans le cadre de l'exécution des parois moulées, conseille de prévoir un tube par cage (article 8.8.3.6) et une circulation horizontale du béton inférieure à 3,00 m pour limiter le cheminement horizontal du béton (article 8.8.3.5) (Figure 4.23). Une étude spécifique est préconisée pour les pieux de grands diamètres (*Note*).

Note : avec le tube centré dans le forage, le cheminement horizontal ne dépassera pas les 3 m conseillés.

Précautions en cas d'utilisation de plusieurs tubes plongeurs

Dans le cas d'utilisation de plusieurs tubes plongeurs dans un même forage (*Note*), il faut :

- **étudier soigneusement leur emplacement** pour obtenir une remontée homogène du béton sur toute la section du forage. En effet, des tubes mal placés peuvent perdre une grande partie de leur efficacité ou nuire à la bonne remontée du béton ;
- **concevoir l'armature** pour permettre une mise en place correcte et une manœuvre aisée de ces tubes.

Note : cela concerne les grandes barrettes de plus de 6 m de longueur ainsi que les barrettes en L, en T, en X ou en H.

Tube plongeur associé à un bras articulé

Lorsque le camion de bétonnage ne peut se placer à proximité du pieu à bétonner, il est possible d'avoir recours à un bras articulé (Figure 4.24), associé à une pompe à béton, un diamètre de tube réduit et un béton pompable.

Figure 4.23 : Répartition des tubes plongeurs dans une paroi moulée

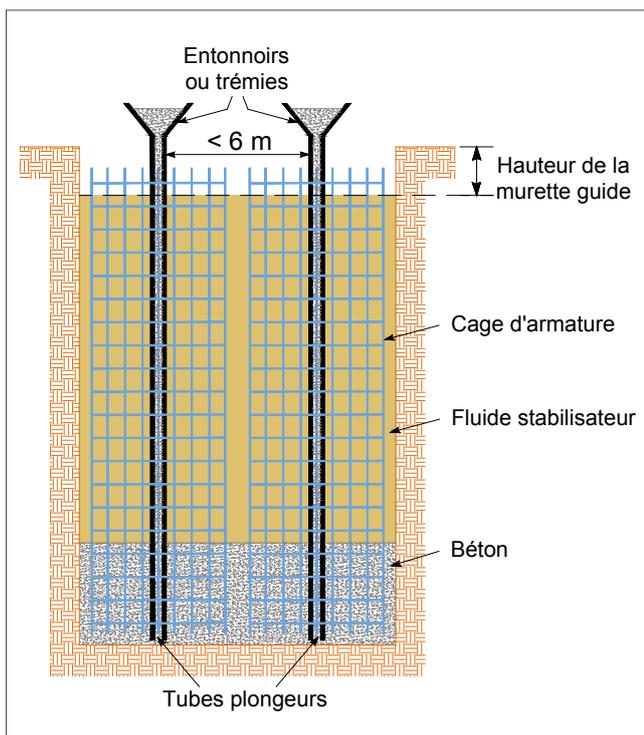


Figure 4.24 : Tube plongeur associé à un bras articulé relié à une pompe à béton



Cas particulier du tube escargot

Un matériel spécifique (tube escargot – Figure 4.25) a été développé pour éviter toute manutention nécessaire à la coupure du tube plongeur.

Le tube escargot est associé à une pompe à béton. Le diamètre du tube escargot est réduit, comme pour le bras articulé, pour ne pas nécessiter de bouchon (cf. les « Différentes techniques d’amorçage pour le bétonnage au tube plongeur » dans le § 4.1.1.2). Les tuyaux ont une composante flexible tout en restant suffisamment rigides et sont identiques à ceux utilisés pour les haveuses.



Figure 4.25 : Tube escargot

L’enroulement du tube sur lui-même permet une vitesse de remontée constante et une continuité du bétonnage optimale.

Le retour d’expérience reste faible sur ce procédé pour les pieux forés.

4.1.1.2 - L’amorçage pour le bétonnage au tube plongeur

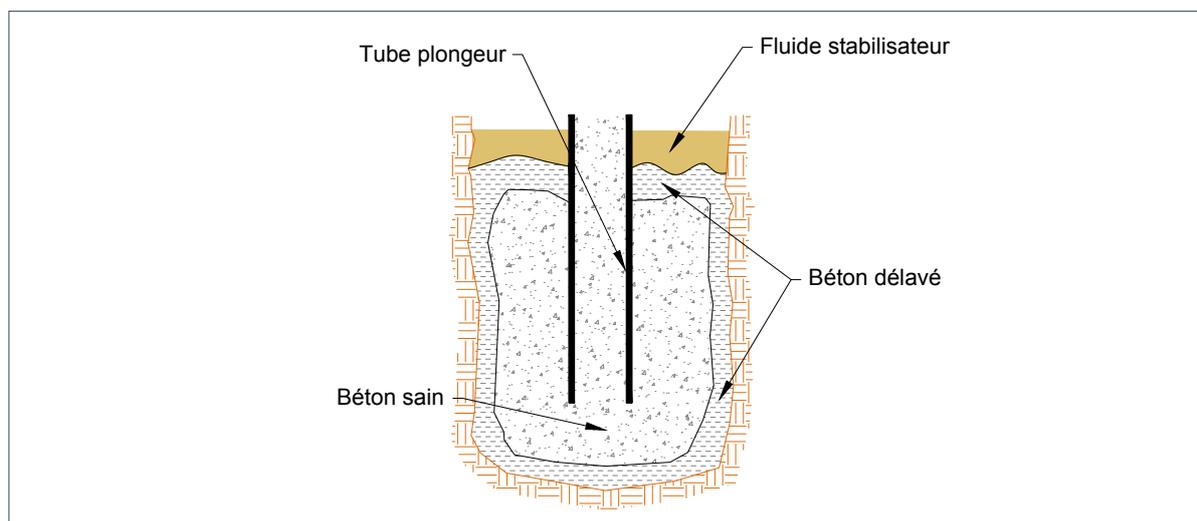
Intérêt d’un bon amorçage

Une descente saccadée du premier béton dans le tube plongeur provoque sa dispersion et sa ségrégation. En présence de fluide stabilisateur (eau, suspension minérale, solution de polymères... – cf. § 4.1.1.4), le délavage ou la pollution qui s’ensuit est d’autant plus grave que la ségrégation est plus accentuée. Il est désormais bien admis que ce béton de mauvaise qualité reste partiellement au fond et sur la paroi du forage (Figure 4.26). Pour minimiser ces inconvénients, il convient de réussir tout particulièrement la délicate opération d’amorçage qui comprend :

- la séparation par un bouchon efficace du béton et du fluide situé dans le forage (eau, fluide stabilisateur) pendant toute la descente du premier béton ;
- le remplissage homogène du tube plongeur ;
- la chasse du fluide stabilisateur en fond de forage (cf. ci-après).

⚠ Il convient de rappeler qu’un amorçage de qualité ne doit pas se substituer au curage préalable efficace du fond de l’excavation du pieu avant le bétonnage.

Figure 4.26 : Répartition possible du béton délavé à la suite d’un défaut d’amorçage



La chasse du fluide par le béton

Afin de réussir la **chasse du fluide par le béton**, il est nécessaire :

- **de créer au préalable en tête du tube plongeur un bouchon/piston de béton**, dont le rôle sera d'empêcher le mélange fluide-béton et de favoriser la constitution d'une colonne homogène et continue qui, par effet de piston, chassera l'eau ou le fluide stabilisateur et gardera l'homogénéité du premier béton dans le tube ;
- **de soulever légèrement le tube plongeur**, sans dépasser une valeur égale au diamètre intérieur du tube plongeur. On doit ensuite procéder rapidement au bétonnage afin de remplir complètement la base du pieu foré pour que le béton, qui a pu subir de la ségrégation en début du bétonnage, ne soit pas piégé (article 8.4.3.13 de la norme NF EN 1536+A1).

Conditions pour une bonne qualité de l'amorçage

Il y a **amorçage** lorsque le béton qui provient du tube plongeur sort dans le béton déjà en place qui le protège du contact avec le fluide stabilisateur ou le terrain.

La **bonne qualité de l'amorçage** peut être contrôlée par une vérification de la maîtrise :

- **du remplissage de l'entonnoir** au préalable du bétonnage ;
- **du moment de déclenchement** de l'amorçage.

Différentes techniques d'amorçage pour le bétonnage au tube plongeur

Plusieurs **techniques d'amorçage** sont pratiquées. Elles ne présentent pas toutes la même efficacité, qui peut être contrôlée facilement (*Note 1*) :

- **amorçage au moyen d'un bouchon : cas de la vermiculite⁽²⁶⁾**. Ce procédé consiste à mettre en tête de tube un bouchon de vermiculite glissant pour séparer le béton du fluide stabilisateur présent dans le tube. Cette technique demande une grande maîtrise de la part de l'entreprise, sous risque de retrouver une inclusion de vermiculite dans le béton. En effet son efficacité est conditionnée par son dosage pouvant fortement varier (*Note 2*), ainsi que par le problème de son temps de prise. Il est recommandé de détailler cette technique (précision de mise en œuvre et du dosage en fonction du diamètre du tube notamment) dans la procédure d'exécution et lors de la réalisation du pieu de convenance (cf. § 4.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »). Son contrôle lors du pieu de convenance ainsi que sur un échantillonnage représentatif des pieux à réaliser est nécessaire ;
- **amorçage à la plaque** : cette technique consiste à introduire dans le tube plongeur une plaque (perdue) en acier d'un diamètre légèrement inférieur à celui du tube. Cette plaque est maintenue en tête de pieu à l'aide de fils de fer, qui sont sectionnés pour déclencher l'amorçage. Elle présente l'avantage d'une mise en œuvre aisée sur chantier, cependant la conservation de la plaque en fond de pieu peut conduire à obtenir une zone non purgée sous la plaque, notamment pour les pieux de faibles diamètres et un risque de plaque coincée s'il y a des déformations dans le tube.

Note 1 : l'efficacité d'une technique d'amorçage peut aisément être observée par :

- la remontée du béton jusqu'à un certain niveau dans l'entonnoir avant déclenchement du bétonnage ;
- la reproductibilité de la procédure.

Note 2 : on peut observer le contournement du béton si le dosage en vermiculite est insuffisant et à l'inverse, le blocage de ce dernier si la vermiculite est dosée en excès.

26. Minéral argileux présentant des propriétés d'expansion lorsqu'elle est hydratée, utilisée sous forme de pâte visqueuse en fond de trémie.

Techniques d'amorçage proscrites ou très peu usitées

Certaines techniques d'amorçage sont proscrites ou très peu usitées :

- **sans bouchon** par exemple, l'amorçage à la pelle : cette technique est à proscrire car elle ne répond pas à l'exigence de la norme NF EN 1536 +A1 (art 8.4.3.11) quant à l'existence d'un bouchon dans le tube plongeur. Cette méthode ne permet pas la chute lente du béton dans la colonne nécessaire à la création de l'effet de chasse ;
- **avec « bouchon » pas toujours efficace** (Note 1) :
 - amorçage avec un bouchon à la base de la trémie (Figure 4.27) : de la même façon que pour l'amorçage à la pelle, le bouchon en fond de trémie ne descend pas dans le pieu. Il n'agit donc pas comme un piston (à l'inverse de la vermiculite ou de la plaque) et ne provoque pas l'effet de chasse visé. De plus, la chute du béton dans le pieu n'est pas freinée et le risque de ségrégation du béton est important pour les pieux de grande hauteur ou en présence de fluide,
 - amorçage à l'aide d'une balle en mousse ou bouchon de polystyrène : cette technique est peu employée en France en raison du risque de blocage de la balle ou du bouchon dans la cage d'armature,
 - amorçage à la pâte de ciment : cette technique est peu usitée car peu efficace, au mieux elle ralentit la chute,
 - amorçage au bouchon de papier ou de chiffon,
 - amorçage avec une première gâchée de pâte pure ou de béton surdosé déversé en vrac dans le tube (Note 2).

Note 1 : le bouchon doit empêcher la descente du béton tant qu'une certaine quantité de béton n'est pas atteinte, et ensuite il descend avec ce dernier. Ce bouchon ne doit pas provoquer d'anomalies dans le béton du pieu.

Note 2 : il s'agit d'un bouchon très imparfait.

Figure 4.27 : Bouchon à la base de la trémie

(⚠ risque de ségrégation du béton)



Risques induits par le désamorçage du bétonnage

Il y a **désamorçage** quand le tube plongeur est relevé plus haut que le niveau supérieur du béton coulé dans le pieu ; le béton qui sort du tube plongeur se déverse alors directement dans le fluide stabilisateur.

Il est important de rappeler et d'insister sur **la gravité des conséquences d'un désamorçage** accidentel du tube de bétonnage, entraînant une discontinuité dans le béton et pouvant « enfermer » dans le fût du pieu du béton de qualité médiocre (ségrégué ou délavé), des poches d'eau, de fluide stabilisateur, des sédiments ou même des éboulis.

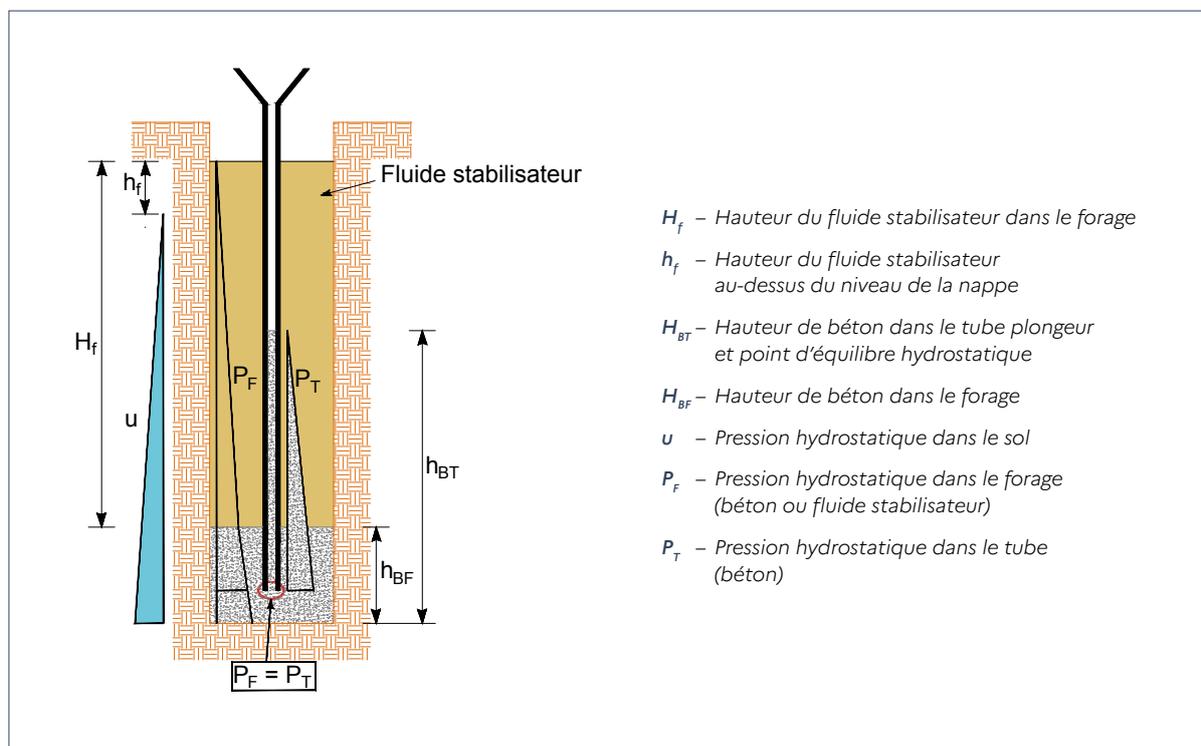
4.1.1.3 - Le bétonnage au tube plongeur

Déroulement du bétonnage

Le bétonnage au tube plongeur se déroule comme suit :

- 1 – **l'amorçage étant fait** (cf. § 4.1.1.2), **le béton reflue** par l'extrémité inférieure du tube plongeur dans le béton frais déjà en place et **remonte dans le forage** (Figures 4.15 « Tube plongeur immergé dans le béton frais » et 4.16 « Bétonnage des pieux via le remplissage de la trémie en tête du tube plongeur » dans le § 4.1.1) ;
- 2 – **le béton se met en place sous son propre poids**. Si on arrête l'alimentation en béton, il s'établit alors un équilibre entre la colonne de béton dans le tube et le béton dans le forage (Figure 4.28). Le niveau du béton dans le tube se stabilise au-dessus de celui du béton dans le forage en raison des frottements internes et également du poids du fluide stabilisateur (si présent) au-dessus du béton mis en place dans l'excavation.
- 3 – **tout nouvel apport de béton dans la trémie** provoque une nouvelle remontée dans le forage.

Figure 4.28 : Équilibre entre la colonne de béton dans le tube et le béton dans le forage
(inspiré de [4.2])



Répartition du béton au sein du forage ou mécanisme d'écoulement [4.2]

Selon le *Guide du Béton de Fondations Profondes* [4.2], il existe deux types basiques d'écoulement du béton dans le pieu lors du bétonnage au tube plongeur (Figure 4.29). Le type d'écoulement ou la combinaison de types d'écoulement dépend de nombreux facteurs dont la rhéologie du béton, l'encombrement localisé des armatures ou encore les changements dans les conditions hydrostatiques. Il semblerait que l'écoulement en « peau d'oignon » soit le plus courant, surtout en présence d'armatures et d'une surface d'excavation rugueuse (Figure 4.30), mais ce sujet fait encore l'objet de recherches.

Figure 4.29 : Schémas d'écoulement du béton lors du bétonnage au tube plongeur
(inspiré de [4.2])

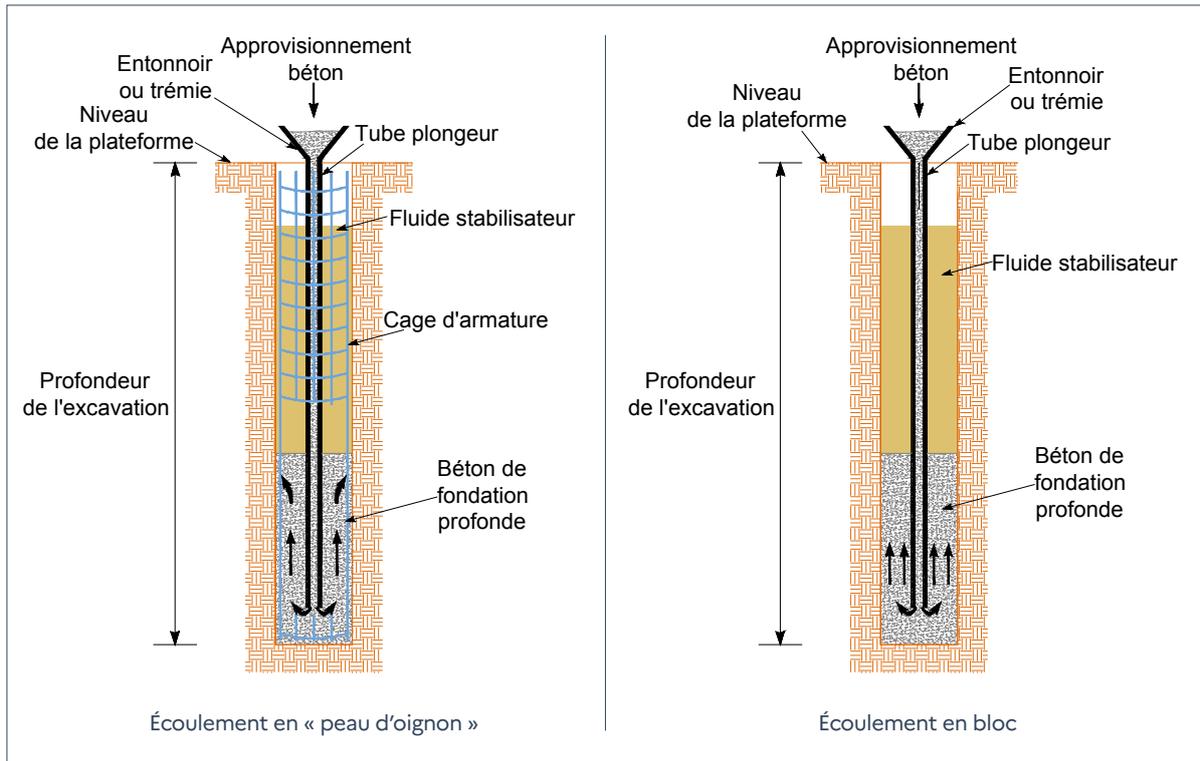
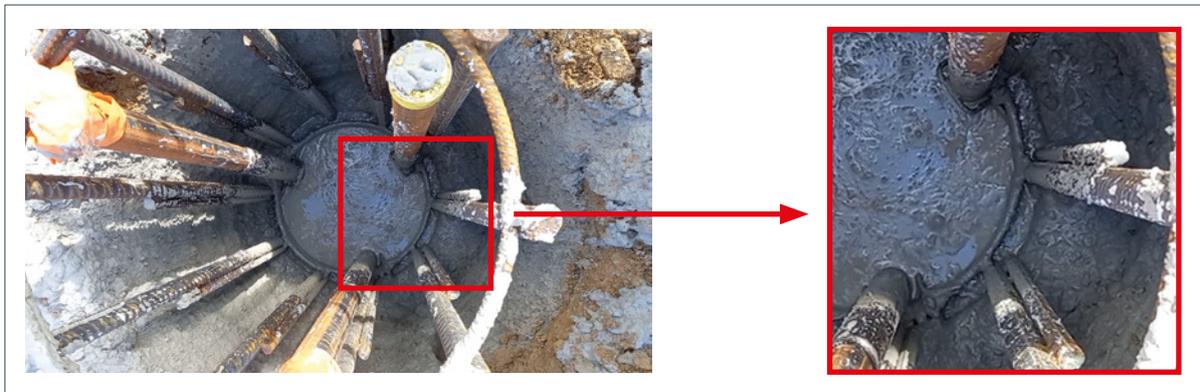


Figure 4.30 : Circulation du béton gênée par la présence des armatures



Remontée du tube plongeur

Pour s'écouler, le béton doit vaincre les frottements dans le tube plongeur, puis la résistance du béton déjà en place à la sortie du tube. Tous ces efforts à vaincre augmentent au fur et à mesure du coulage (*Note 1*). Le béton s'écoule de plus en plus lentement, ce qui augmente la durée du bétonnage. Lorsque la vitesse de coulage diminue, il convient donc **de remonter le tube plongeur** d'une certaine hauteur pour limiter la longueur de tube immergée. Puis **de démonter un ou plusieurs éléments en tête** (*Note 2* – Figure 4.31) juste après la trémie (*Note 3*). Cette dernière opération se déroule autant de fois que nécessaire pour permettre au béton de s'écouler librement hors du tube plongeur.

⚠ Cependant, il est impératif **d'éviter tout risque de désamorçage** du tube, à cette fin, il est conseillé de :

- **conserver une immersion du tube** d'au moins 6 m avant la première coupure ;
- **maintenir en permanence 3 m de tube dans le béton frais** de pieu (*Note 4*) pendant le bétonnage, indépendamment des phases de démontage de la colonne.

On constate dans certains cas (lors par exemple de la remontée du tube de travail par vibration notamment), **l'apparition d'eau en surface**, sous forme de petites sources, après arrêt du bétonnage, mais qui n'est pas problématique.

Note 1 : car la longueur du tube immergé augmente puisque la hauteur du béton en place croît.

Note 2 : afin d'éviter la remontée de la cage lors du bétonnage (cf. chapitre 9 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés »), il convient donc de limiter la garde entre la base du tube plongeur et le niveau de béton dans le forage, à une longueur raisonnable compatible avec la sécurité nécessaire vis-à-vis **des risques de désamorçage** (cf. § 4.1.1.2). À titre indicatif, un seul raccourcissement de 6 à 7 m du tube plongeur après bétonnage de 10 m permet généralement d'exécuter sans difficulté des pieux de l'ordre de 20 m et plus pour des diamètres de pieux modérés.

Note 3 : opération dénommée « coupure de la colonne de bétonnage ».

Note 4 : dans la norme NF EN 1536+A1, il est conseillé une immersion :

- jamais inférieure à 1,5 m en particulier lors du démontage des éléments du tube (article 8.4.3.16) ;
- supérieure ou égale à 2,5 m pour des pieux de diamètre, supérieure ou égale à 1,2 m ou à 3 m pour les barrettes (article 8.4.3.17).
Dans l'article 8.8.3.11 de la norme NF EN 1538+A1 relative aux parois moulées, il est précisé que le tube plongeur doit rester immergé dans au moins 6 m de béton frais avant la coupure du premier élément de colonne de bétonnage, et immédiatement après chaque coupure, la profondeur de l'immersion de la colonne ne doit pas être inférieure à 3 m.

Figure 4.31 : Remontée du tube plongeur



Délai entre la foration et le bétonnage

Il est important de limiter le délai entre la foration et le bétonnage (le dessablage du fluide stabilisateur⁽²⁷⁾ et le curage⁽²⁸⁾ du fond du forage ayant été préalablement exécutés), ceci afin d'éviter :

- un remaniement des parois (phénomène sensible dans le cas de l'argile) nuisible à l'obtention d'un bon frottement axial et d'un bon effet de pointe ;
- la dégradation chimique du cake⁽²⁹⁾ pouvant provoquer des infiltrations d'eau et des mauvaises tenues des parois de l'excavation, et de ce fait des éboulements.

Il est donc recommandé de limiter ce délai au minimum en favorisant une organisation du chantier permettant :

- idéalement d'exécuter le forage, le curage/dessablage et le bétonnage dans le même poste de travail (soit 8 heures) ;
- à défaut de réaliser au moins le curage/dessablage et le bétonnage dans le même poste de travail prolongé au-delà de 8 heures (Note).

=> dans le cas où ces conditions ne peuvent être respectées, il convient de fractionner le forage (par exemple en forant jusqu'à la cote définitive moins 2 m), puis de l'achever le lendemain et d'enchaîner alors sur le bétonnage.

27. Le dessablage du fluide stabilisateur est traité dans le § 4.3.2.3 du fascicule 3 «Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ».

28. Le curage est traité dans le § 5.2.

29. Le cake qui se forme sur les parois du forage lors de l'utilisation de suspensions minérales comme fluide stabilisateur. Il fonctionne comme une membrane sur les parois du forage (cf. § 4.2.1.2 du fascicule 3).

La problématique doit être appréciée en fonction du type de bétonnage :

- le bétonnage à sec concerne souvent des pieux courts, pour lesquels le fractionnement du forage est souvent possible ;
- le bétonnage dans un tube offre des garanties suffisantes pour augmenter les délais sauf en cas de tubage partiel ;
- le bétonnage en présence d'eau présente le plus de risques lorsque l'eau se charge en sédiments ;
- le bétonnage en présence de fluide stabilisateur, le contrôle de cette dernière avant bétonnage participe à la maîtrise de risque.

Note : ⚠ le dépassement du poste de travail au-delà de 12 heures doit rester exceptionnel et donner lieu à un essai de faisabilité sur le premier pieu.

Va-et-vient du tube plongeur (pistonage) à proscrire

Pour faciliter la descente du béton et pallier un défaut d'ouvrabilité, une pratique courante consiste à imposer au tube plongeur un mouvement de va-et-vient vertical plus ou moins violent et accentué. Cette action est à proscrire. En effet, le mouvement alterné vertical :

- favorise la ségrégation et une fluidification plus grande du béton le long du tube plongeur (effet de paroi), ce qui accentue son cheminement préférentiel le long de ce tube (Figure 4.32), mais pas sur la périphérie (Note 1) ;
- risque de provoquer le désamorçage de la colonne (cf. § 4.1.1.2), surtout en début de bétonnage (Note 2), quand la garde du tube plongeur dans le béton est encore faible.

⚠ Il convient en particulier de combattre l'idée préconçue qui attribue aux mouvements verticaux du bas du tube plongeur, la faculté de favoriser l'enrobage des armatures en s'opposant à l'effet de grille ou de matelassage (Note 3 et Figure 4.33). En fait, la qualité de l'enrobage dépend plus de la fluidité du béton que d'artifices de mise en œuvre.

Note 1 : le phénomène est d'autant plus important pour les pieux de gros diamètre, car la partie de béton rigidifié (notée « A » sur la Figure 4.32) sera d'autant plus importante.

Note 2 : il est fort probable que dans ce cas le béton ait dépassé son temps de maintien rhéologique ou qu'il n'ait jamais eu la fluidité nécessaire.

Note 3 : l'effet de grille est un phénomène dans lequel le béton remonte plus vite à l'intérieur de la cage d'armature qu'à l'extérieur et lorsque le béton à l'extérieur de la cage se fige, c'est le béton en tête de coulage, donc pollué, qui sort à travers la grille des armatures et se fige alors à son tour.

Figure 4.32 : Apparition de zones de fluidification lors des mouvements de va-et-vient verticaux imprimés au tube plongeur

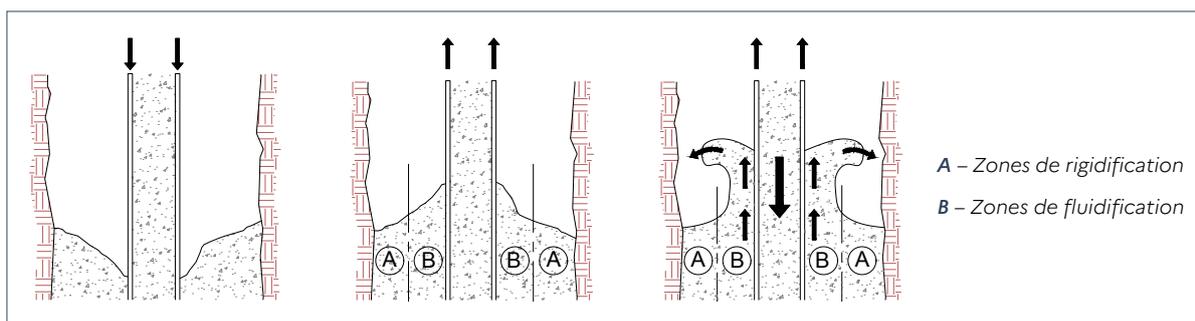


Figure 4.33 : Effet de grille ou de matelassage



Nécessité d'une alimentation régulière et continue en béton

Enfin, une attention particulière doit être requise pour **une alimentation en béton régulière et continue**, en minimisant les temps de mise en place des toupies et les temps de coupure des colonnes. Pour cela, **il est recommandé d'approvisionner la quantité de béton nécessaire** à la réalisation du pieu avant le démarrage du bétonnage pour des volumes de béton par pieu :

- **inférieurs à 15 m³** (*Note*), en disposant de toutes les toupies contrôlées conformes sur chantier avant d'autoriser le bétonnage ;
- **supérieurs à 15 m³** de disposer sur chantier d'au moins deux toupies contrôlées conformes et d'envisager la possibilité d'avoir recours à une centrale de secours.

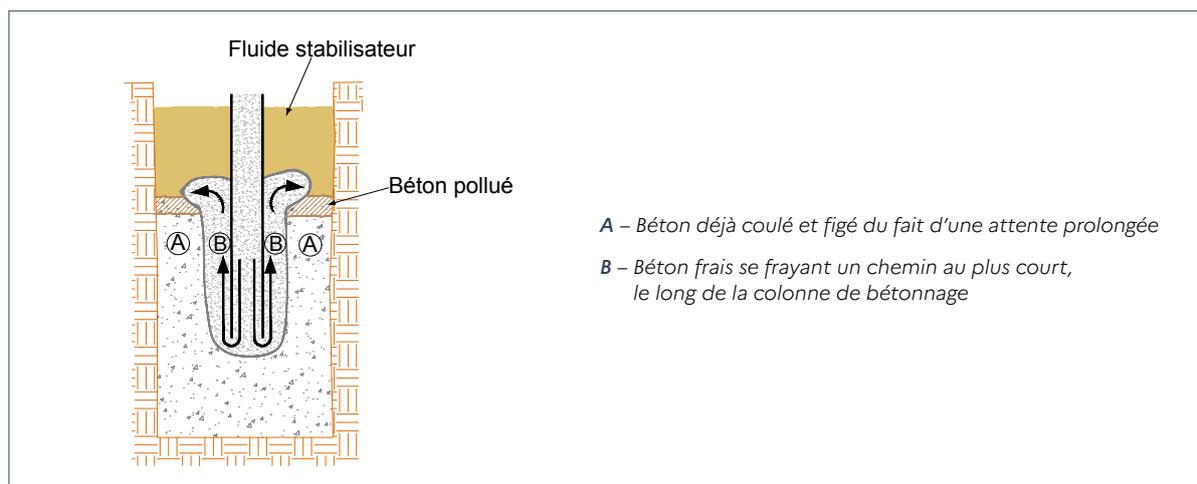
Le visa de la procédure d'exécution de bétonnage pour les gros pieux est particulièrement important, notamment vis-à-vis des moyens engagés et du planning/phasage prévisionnel...

Il est dangereux de ne pas avoir un bétonnage continu (par exemple, une attente trop importante entre deux toupies), car le béton coulé peut se figer et le nouveau béton frais risque de se placer au-dessus du béton précédent (Figure 4.34).

⚠ Par ailleurs **toute interruption de bétonnage supérieure à une heure** (panne, problème technique) doit être signalée à la maîtrise d'œuvre et analysée au niveau des conséquences sur la qualité du béton de pieu.

Note : les 15 m³ couvrent la majorité des pieux courants.

Figure 4.34 : Défaut de bétonnage lors d'un délai trop important entre deux approvisionnements de béton



Phasage de bétonnage des différents pieux

La problématique **du respect d'une distance minimale** (*Note*) **entre un pieu venant d'être réalisé et la réalisation d'un nouveau pieu adjacent** doit être étudiée. En tout état de cause, l'adaptation du phasage (ou « pianotage », c'est-à-dire un choix de l'ordre de réalisation des pieux permettant le forage d'un nouveau pieu suffisamment éloigné du dernier pieu coulé) limite l'impact de la foration sur les pieux voisins.

Les risques identifiés sont :

- **la désorganisation du sol autour d'un pieu** venant d'être réalisé lors de la foration d'un autre pieu adjacent alors que le premier n'a pas encore fait prise, entraînant une diminution du frottement axial et la fuite du béton du pieu bétonné vers l'autre pendant la foration ;
- **la déstabilisation du béton (cisaillement) d'un pieu lors du début de sa prise** en forant le pieu voisin trop tôt ou à cause de toute activité source de vibration telle que le fonçage d'un tube, le trépannage...

Note : **cette distance ou temps minimal à respecter est très difficile à évaluer car elle est fonction de différents paramètres** (vitesse de prise du béton, température, nature du sol, intensité des vibrations transmises...). Et donc, en l'absence de justification particulière (mesure de vibrations...), il convient de respecter un délai dépendant de l'entraxe entre les pieux :

- **si leur entraxe est d'au moins quatre diamètres (avec un minimum de 2 m)**, deux pieux voisins peuvent être réalisés dans un laps de temps inférieur à 4 heures (article 8.2.1.12 de la norme NF EN 1536+A1) ;
- **pour un entraxe inférieur à quatre diamètres ou 2 m**, il convient de respecter une durée minimale de 16 heures (à ajuster en fonction de la rhéologie du béton).

4.1.1.4 - Le bétonnage en conditions immergées

L'immersion peut provenir d'eau provenant de l'environnement ou d'un fluide stabilisateur.

Contexte hydrogéologique nécessitant une attention particulière pour réaliser le bétonnage

Lors du bétonnage des pieux, **une attention particulière doit être portée** dans les cas suivants cités dans la norme NF EN 1536+A1 en présence :

- **de nappes phréatiques simples ou multiples**, il convient :
 - de relever séparément le niveau piézométrique des différentes nappes du site et sur une période suffisamment longue, pour pouvoir évaluer les valeurs minimales et maximales qui peuvent être atteintes lors du chantier,
 - de vérifier l'agressivité chimique ;
- **de toute couche susceptible d'être sensible aux infiltrations d'eau**, il faudra s'intéresser à leur présence, leur étendue et leur épaisseur ;
- **de grandes vitesses d'écoulement des eaux** dans les couches souterraines (cf. § 6.2 « Bétonnage en présence de circulations d'eau : risques de délavage du béton ») ;
- **de nappes captives ou artésiennes** (cf. § 6.2).

Précautions lors du bétonnage en présence de nappe phréatique

En présence de nappe phréatique, deux situations sont possibles :

- **le niveau de bétonnage se trouve en dessous du niveau de la nappe phréatique**, alors une pression supérieure ou égale à celle exercée par l'eau doit être maintenue sur le béton non durci ;
- **le niveau du fluide stabilisateur doit être maintenu au moins à 1,5 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique** dans le cas d'une suspension minérale (cf. § 4.3.5.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 » et pour les autres fluides stabilisateurs § 4.3.5.3 et 4.3.5.4 du fascicule 3).

Précautions lors du bétonnage en présence de fluide stabilisateur

Le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur est traité dans le § 4.2.

4.1.2 - BÉTONNAGE À LA COLONNE DE BÉTONNAGE

La colonne de bétonnage

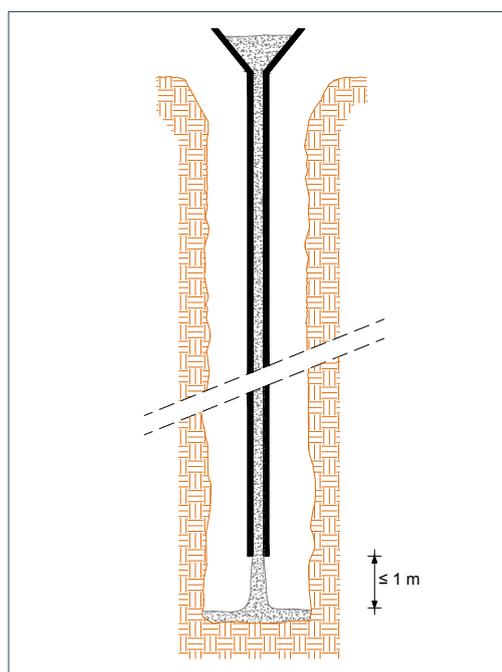
La colonne de bétonnage permet d'éviter la dégradation des parois de forage lors du bétonnage, elle est, comme le tube plongeur (cf. § 4.1.1), **constituée de tubes métalliques, surmontés par un entonnoir ou une trémie servant à la mise en place du béton**. La colonne de bétonnage **ne peut être utilisée qu'en conditions sèches** (*Note*).

Note : si de l'eau stagne en fond de forage, la colonne de bétonnage ne peut pas être utilisée. De ce fait, cette condition est à vérifier immédiatement avant le bétonnage (articles 8.4.2.1 et 8.4.2.2 de la norme NF EN 1536+A1).

Position de la colonne de bétonnage

Pendant le bétonnage, on doit maintenir la colonne au maximum 1 m au-dessus du béton frais dans le forage (Figure 4.35 et article 6.1.5 de la norme NF DTU 13.2 P1-1).

Figure 4.35 : Position de la colonne de bétonnage



Bétonnage à la colonne de bétonnage

Le béton doit être dirigé verticalement au centre du forage au moyen d'un entonnoir et d'une longueur de tube afin que le béton :

- **ne heurte pas les armatures** (cf. ci-après « Caractéristiques de la colonne de bétonnage »), ou les parois du forage ;
- **ne tombe pas librement dans le forage**, ne subisse une ségrégation ou se contamine (*Note*).

Note : la contamination peut se faire par le sol environnant (débris de sol ou éboulement).

Caractéristiques de la colonne de bétonnage

La colonne de bétonnage présente les caractéristiques usuelles suivantes :

- être **lisse à l'intérieur** pour faciliter l'écoulement du béton ;
- répondre **aux prescriptions et exigences** de la norme NF EN 1536+A1 :
 - le diamètre intérieur de la colonne doit être au moins égal à huit fois la taille maximale du granulat (article 8.4.2.4),
 - le diamètre extérieur de la colonne, joints compris, est recommandé être au moins inférieur à 0,6 fois la largeur intérieure de la cage d'armature (*Note de l'article 8.4.2.3*),
 - une distance entre la colonne de bétonnage et les armatures (y compris tubes de réservation) d'au moins quatre fois la dimension du plus gros granulat.

⚠ Ces spécifications peuvent d'ailleurs entraîner dans certains cas la réduction de la taille du plus gros granulat.

Il est, de plus, **recommandé** :

- d'utiliser **une colonne de bétonnage lisse à l'extérieur**, c'est-à-dire :
 - sans les pièces de liaison saillantes (crochets de fixation) risquant d'accrocher la cage,
 - avec des raccords des tronçons par filetage taillé dans la masse ;
- de disposer d'**un outillage efficace pour les montages et démontages rapides** des tronçons (Figure 4.19 dans le § 4.1.1.1) ;
- de prévoir **un dispositif de centrage et d'immobilisation** de la colonne en tête du forage (Figure 4.19 dans le § 4.1.1.1).

4.1.3 - BÉTONNAGE PAR L'AXE CREUX DES TARIÈRES CREUSES (PIEUX DE CLASSE 2)

Enchaînement des étapes de bétonnage de classe 2 (tarière creuse)

Comme pour les autres techniques de pieux, le bétonnage avec la technique de la tarière creuse (cf. chapitre 3 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») nécessite un enchaînement d'étapes qui doit être observé scrupuleusement pour obtenir un résultat optimal :

- **préalablement au forage du pieu**, il faut vérifier :
 - la bonne pompabilité du béton, c'est-à-dire que le béton puisse effectivement bien être pompé jusqu'à la base de la tarière, sans présenter de ségrégation, de blocage (bouchon de béton ayant perdu son eau et/ou des fines),
 - la bonne installation de l'obturateur (cf. § 3.2.3.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») à la base de la tarière sans risque de décrochage durant le forage. Dans le cas d'un dispositif rétractable, on vérifie que le système coulisse normalement ; le cas échéant on procède à son nettoyage ;
- **une fois la côte de fin de forage atteinte**, il faut s'assurer :
 - d'effectuer le bétonnage complet avec l'assurance d'une continuité de l'approvisionnement en béton (*Note 1*),
 - d'obtenir une montée en pression du béton au niveau du col-de-cygne lors du remplissage de l'axe creux de la tarière ;
- **lors de la phase initiale de la remontée de la tarière**, celle-ci est relevée tout d'abord sur une hauteur maximale de 250 mm pour expulser l'obturateur (cf. § 3.2.3.4 du fascicule 3) ou actionner le dispositif rétractable⁽³⁰⁾ ;
- **après expulsion de l'obturateur ou descente du dispositif rétractable** (Figures 4.36, 4.37 et 4.38.a) :
 - injection du béton jusqu'à obtention d'une pression minimale de 20 kPa (*Notes 2 et 3*),
 - reprise de la remontée de la tarière ;
- **durant toute la remontée de la tarière**, il faut veiller à ce que :
 - le béton soit maintenu à une pression supérieure à la pression externe (*Notes 4 et 5*) et que le débit soit suffisant, de manière à ce que le vide laissé par l'extraction de la tarière soit rempli complètement et simultanément à l'extraction (*Note 2*),
 - la remontée de la tarière soit réalisée de manière progressive :
 - dans le cas de la tarière simple rotation, il est possible d'utiliser une faible rotation dans le sens de vissage pour faciliter l'extraction de la tarière,
 - dans le cas de la tarière double rotation, autant que possible, si la puissance d'extraction de la machine le permet, le tube et la tarière doivent être remontés sans rotation. Si le frottement empêche une remontée sans rotation, alors il convient de le réduire en mettant en rotation le tube à une vitesse réduite et dans le même sens que lors du forage. Certaines machines ont leurs deux tables de rotation couplées, dans ce cas la tarière sera aussi en rotation,
 - le décrochage (cf. § 3.2.3.6 du fascicule 3 et Figure 4.38.b) de la tarière soit efficace pour éviter tout accident (chute de motte de terre) ;
- **la fin du bétonnage** s'effectue de la manière suivante (Figure 4.38) :
 - maintien de la pression d'injection jusqu'à ce que la base de la tarière (ou les événements dans le cas d'un dispositif rétractable – Figure 4.37 et Figure 4.38.a) atteigne le niveau prévisionnel du recépage du pieu (*Note 6*), sauf dans le cas de la *Note 4* si le niveau de recépage est au TN (Terrain Naturel),
 - amenée du béton jusqu'au niveau de la plateforme de forage, soit gravitairement si le volume de béton contenu dans l'âme de la tarière est suffisant, soit par poursuite de l'injection afin :
 - d'éviter tout éboulement des terrains dans le pieu,
 - de permettre la mise en œuvre de cages d'armature (Figure 4.39),
 - de faciliter la vérification de l'implantation,
 - d'éviter la striction du pieu sous le niveau de recépage sous la contrainte horizontale du sol.

Note 1 : dans le cas où la continuité de l'approvisionnement du bétonnage n'a pas pu être assurée pour un pieu, le pieu peut être refait ou un **essai d'intégrité devient obligatoire** (cf. §1.1.2 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

Note 2 : une pression anormalement élevée au niveau du col-de-cygne est représentative d'un bouchon de béton ; dans ce cas la tarière doit être dévissée, le bouchon enlevé et le pieu doit être refait.

30. À cette étape, les dispositifs rétractables actionnés mécaniquement présentent un gain en fiabilité, car ils permettent de contrôler et d'augmenter la pression du béton, avant l'expulsion du béton et d'ainsi favoriser l'effet de chasse. Des dispositifs non actionnés mécaniquement, mais disposant d'une mesure de la sortie du dispositif permettent aussi un gain de fiabilité.

Note 3 : il faut s'assurer qu'il n'y a pas de bouchon dans le circuit de bétonnage (ce qui se traduit par une pression excessive au col-de-cygne et une absence de débit).

Note 4 : on recommande qu'une **pression minimale**, mesurée au col-de-cygne, de 20 kPa, soit maintenue durant tout le bétonnage⁽³¹⁾, sauf au voisinage immédiat de la surface, lorsque le béton resurgit au niveau de la plateforme (Figure 4.38).

Des dispositifs permettant d'asservir la remontée de l'outil à l'obtention d'une pression de béton et d'un volume de remplissage existent et permettent de fiabiliser l'opération de bétonnage.

Note 5 : **l'interruption du bétonnage du pieu** dans le but d'enlever des éléments de tarière est proscrit car peut conduire à des strictions dans le pieu suite à l'interruption de la mise sous pression du béton.

Note 6 : comme indiqué dans le § 5.4 « Recépage des pieux forés », le recépage a pour objectif de supprimer les zones douteuses de béton et de mettre à la cote le haut du pieu.

Figure 4.36 : Exemple d'obturateur



Figure 4.37 : Exemple de dispositif rétractable



Figure 4.38 : Fin du bétonnage avec la technique de la tarière creuse



a) Exemple avec dispositif rétractable

b) Exemple avec décrotteur

31. Dans le cas de couches de sol localement de faible compacité et qui n'arriveraient pas à tenir la pression du béton, cette pression peut être abaissée à 10 kPa. Cette pression de 10 kPa correspond certainement à la limite d'utilisation de la technique de la tarière creuse. Néanmoins si cette technique a été retenue et qu'il faille pour un pieu descendre encore cette pression pour terminer le bétonnage, il est fortement conseillé alors de réaliser des essais d'intégrité sur ce pieu (cf. § 1.1.2 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

Figure 4.39 : Mise en place de la cage d'armature dans le forage rempli de béton (pieu de classe 2)



Cage en tête pour pieu non armé toute hauteur

Cage pour pieu armé toute hauteur

Spécificités du bétonnage à la tarière creuse (pieux de classe 2)

Les spécificités de cette technique au niveau du bétonnage sont les suivantes :

- **le bétonnage doit s'effectuer de façon continue.** Il n'est pas possible d'ajouter ou de retirer un segment de la tarière en cours de bétonnage car le béton doit être maintenu à une pression supérieure à la pression externe (article 8.4.6.6 de la norme NF EN 1536+A1) (*Note 1*) ;
- **une absence du bouchon d'amorçage,** rendue possible du fait de l'absence d'eau et de sol dans l'axe creux de la tarière en raison de l'emploi d'un système d'obturateur (cf. § 3.2.3.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ;
- **la nécessité de « graisser » l'axe creux** afin de faciliter la descente du béton (cf. ci-après « Nettoyage et/ou "graissage" du matériel (pompes et tuyaux) lors de la technique des pieux de classe 2 ») ;
- **le dégagement nécessaire de la pointe** pour l'ouverture du clapet, qui doit se faire lorsque toute la colonne est remplie de béton (Figures 4.36 et 4.37) ;
- **la pression au col-de-cygne** est conseillée être supérieure à 20 kPa⁽³¹⁾ après expulsion de l'obturateur, sauf en fin de bétonnage selon le Fascicule 68 du CCTG ;
- **une absence de curage** du fond de pieu (*Note 2*) : le sol est maintenu par les pales de la tarière, sauf au moment de la remontée de la tarière (il est conseillé que le relevage de la tarière soit limité à 250 mm) ;
- **la remontée conditionnée/asservie** par la pression de bétonnage assurant une continuité du fût ainsi qu'un bon contact à l'interface béton-sol. ⚠ L'enregistrement obligatoire des paramètres ne dispense pas d'un contrôle visuel.

Note 1 : de manière à ce que le vide laissé par l'extraction de la tarière soit rempli complètement et simultanément à l'extraction (article 8.4.6.6 de la norme NF EN 1536+A1).

Note 2 : néanmoins, lorsque la tarière atteint la cote prévue, il est recommandé d'effectuer un tour complet de la tarière, sans descente de l'outil, pour améliorer le curage du fond de pieu.

Puissance de la pompe pour le bétonnage par l'axe de la tarière creuse (pieux de classe 2)

Une pompe à béton (Figure 4.40) sert :

- à l'acheminement du béton jusqu'à la machine. La puissance de la pompe à béton doit être suffisante pour assurer le cheminement du béton sur toute la distance du bétonnage entre la pompe et le haut du mât (ou du canotto déployé, le cas échéant) ;
- au bétonnage du pieu sous faible pression.

Généralement, les pompes à béton sont équipées de pistons qui assurent :

- une pression en sortie de pompe comprise entre 3 et 8,5 Mpa⁽³²⁾ ;
- un débit atteignant 70 m³/h (Note).

Note : plus le diamètre est gros, plus le débit nécessaire est important ; un débit de 70 m³/h correspond usuellement à un diamètre moyen de 600 mm et maximal de 800 mm.

Figure 4.40 : Photos de pompes à béton



Conduites pour l'acheminement du béton au col-de-cygne de la tarière creuse (pieux de classe 2)

L'acheminement jusqu'en haut du mât (col-de-cygne) se fait au moyen de conduites généralement semi-rigides (Note) liaisonnées entre elles par des colliers. Ces conduites doivent être adaptées à la pression du béton et doivent être équipées d'un deuxième dispositif de sécurité (par exemple, chaussette, estropes⁽³³⁾, chaînes accrochées au mât) pour éviter toute chute des conduites en cas de rupture des colliers (Figure 4.41).

Note : les conduites peuvent comporter des tronçons rigides.

32. Soit 30 à 85 bars.

33. Définition du *Larousse* : anneau de cordage dont les deux bouts sont épissés (entrelacement des torons de façon à obtenir une structure continue) l'un sur l'autre.

Figure 4.41 : Photos des conduites de béton et exemple de dispositifs de sécurité des raccords de fixation des éléments de conduite



Estrope

Nettoyage et/ou « graissage » du matériel (pompe et tuyaux) lors de la technique des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Afin d'avoir de bonnes conditions de bétonnage, **certaines règles de base sont à respecter** :

- **après chaque interruption de bétonnage suffisamment longue** avec risque de prise du béton, les tuyaux de pompage et les pistons de la pompe doivent être débarrassés de tous résidus de béton (*Note 1*) ;
- **après chaque nettoyage et avant le premier bétonnage de pieu**, les tuyaux de pompage doivent être « graissés » (*Note 2*).

Note 1 : une balle en mousse envoyée sous pression est généralement utilisée pour nettoyer toutes les conduites. Lors de cette opération, la sortie des tuyaux est placée dans un endroit clos pour éviter les projections de béton et de la balle sous pression.

Note 2 : une barbotine composée de ciment, de mortier ou tout autre produit équivalent, est envoyée dans les conduites de bétonnage, poussée par le premier béton. Le volume nécessaire dépend du diamètre des tuyaux et de leur longueur. Cette barbotine doit être expulsée entièrement en dehors du pieu avant démarrage du forage.

Bétonnage en cas d'arase basse pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

Les arases basses de bétonnage sont déconseillées pour cette technique de pieu parce que des risques de pollution du béton par le sol supérieur ou des difficultés d'introduction de la cage d'armature sont à craindre si la pression gravitaire dans le béton encore frais est inférieure à la pression du sol.

Il est déconseillé d'avoir un forage vide au-dessus du bétonnage et d'essayer de descendre une armature.

Les paramètres de bétonnage de pieux de classe 2 (tarière creuse)

Pour contrôler le bétonnage, les paramètres de bétonnage suivants doivent **être visualisables instantanément par le foreur et sont enregistrés** (*Notes 1 et 2*) :

- **la courbe de bétonnage en continu** (obtenue à partir de la vitesse de remontée et du volume injecté) ;
- **la pression de bétonnage** ;
- **la vitesse d'extraction** ;
- **la rotation de la tarière** (un exemple d'enregistrement de la rotation de la tarière creuse pour trois pieux de classe 2 est présenté Figure 3.9 dans le § 2.2.3 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ;
- le cas échéant, **la position du dispositif rétractable**.

Un exemple d'enregistrement des paramètres (profil du pieu, pression du béton et vitesse de remontée) d'un pieu de classe 2 en mettant en évidence l'importance du choix du pas de restitution est présenté Figure 3.11 dans le § 2.2.3 du fascicule 3.

Note 1 : l'article 8.4.6.7 de la norme NF EN 1536+A1 impose que soit fourni pour le contrôle les quatre premiers. Si l'un des systèmes de suivi indiqués ci-dessus tombe en panne pendant le bétonnage du pieu, un contrôle manuel peut être requis.

Note 2 : on peut tirer de ces paramètres les conclusions ou données suivantes :

- **l'injection effective du béton sous faible pression lors de la remontée** ;
- **l'absence d'interruption de bétonnage sous pression** ;
- **la continuité du diamètre du pieu** ;
- **l'évolution du cumul de rotation pour l'exécution du pieu en fonction de la profondeur** (cf. Figure 3.9 dans le § 2.2.3 du fascicule 3).

Écarts aux règles de bétonnage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

Si toutes ces règles ne sont pas respectées et notamment, s'il y a :

- une impossibilité de sortie de l'obturateur ;
- l'apparition de bouchon de béton dans les conduites lors du bétonnage ;
- l'interruption du bétonnage durant l'extraction de la tarière ;
- une baisse anormale de la pression de béton qui peut être le signe :
 - d'une sous-consommation ponctuelle si le débit de la pompe à béton a chuté,
 - d'une surconsommation de béton si le débit de la pompe a augmenté, indiquant alors que le terrain encaissant ne tient pas la pression du béton ;
- le blocage de la tarière au bétonnage ;

il faut :

- dévisser entièrement la tarière sans extraction du sol (*Note 1*) ;
- remblayer le forage si nécessaire de manière à ce qu'aucun vide ou effondrement ne se produise.

Une fois les causes du dysfonctionnement établies et éliminées ou le problème matériel résolu, le pieu peut être reforé complètement au même endroit (*Note 2*) :

- si le pieu a fait l'objet d'un bétonnage même partiel, il est recommandé que ce re-forage intervienne dès que possible après le bétonnage pour éviter un refus (*Note 3*) ;
- en cas d'impossibilité de re-forage dans le pieu, le pieu doit être déplacé ou doublé et la structure adaptée en concertation avec le bureau d'études techniques de structure.

Note 1 : les enregistrements du pieu abandonné peuvent être fournis sur demande.

Note 2 : il est conseillé d'approfondir légèrement le pieu (d'environ 200 mm). Dans ce cas, il est considéré que le pieu a bien sa portance théorique.

Note 3 : dans le cas où le re-forage peut intervenir rapidement, il est possible de purger le béton déjà mis en place, mais le forage doit alors être comblé avec un matériau compatible avec le re-forage.

Points de vigilance vis-à-vis du bétonnage des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Certains terrains peuvent présenter des difficultés d'exécution lors du bétonnage :

- les terrains possédant des vides francs (cavités anthropiques ou karstiques) qui n'auraient pas ou insuffisamment été comblés préalablement ;
- les terrains ayant des vides de faible ampleur (poches décomprimées, remblais hétérogènes...) ou une fracturation importante (ouverture de vide ou des fractures supérieures à quelques centimètres), qui entraîneront une surconsommation qu'il convient d'anticiper ;
- les terrains de compacité trop faible (Figure 4.42) : l'article 8.2.5.4 de la norme NF EN 1536+A1 définit des seuils de compacité pour les terrains « instables », qui peuvent compromettre la bonne tenue du pieu fraîchement bétonné et ainsi conduire à des anomalies de continuité et d'intégrité (*Notes 1 et 2*) ;
- les terrains présentant une pression limite pressiométrique nette $pl^* < 0,2 \text{ MPa}$ (ou un effort de pointe au pénétromètre statique $qc < 1,0 \text{ MPa}$ pour l'argile et $qc < 1,5 \text{ MPa}$ pour les sables) doivent faire l'objet d'une grande vigilance. La profondeur, l'épaisseur de ces couches et/ou le rapport de l'épaisseur au diamètre utilisé peuvent être un frein à l'utilisation de cette technique (*Note 3*) ;
- les terrains présentant une nappe en charge – difficulté amplifiée en cas d'artésianisme (Figure 4.43) qui peut favoriser des circulations parasites d'eau dans le béton avant sa prise (*Notes 4 et 5*) ;
- les terrains liquéfiables (Figure 4.44).

Note 1 : en effet, leur incapacité à contenir le poids de la colonne de bétonnage peut conduire à des mouvements anormaux de transferts de sols mous sous la poussée du béton frais (pression horizontale de type hydrostatique) aboutissant soit à des impossibilités de faire remonter le béton jusqu'au niveau du terrain naturel, soit à des excroissances importantes associées à des strictions ou à des inclusions comme sur la Figure 4.42.

Note 2 : dans de telles conditions, des essais d'intégrité (cf. § 1.1.2 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ») sur chaque pieu sont obligatoires.

Note 3 : ce contexte est un frein pour les pieux à la tarière creuse du fait :

- de la mise en œuvre des cages d'armature par vibration ;
- du surcroît de pression s'exerçant sur les parois de forage, lié à la pression de bétonnage mais aussi à la charge de la colonne de béton plus importante (l'axe creux de la tarière creuse est généralement encore rempli de béton sur toute sa hauteur avec surpression au niveau du col-de-cygne lors de la traversée des couches instables).

Note 4 : une vigilance particulière sur ce point est nécessaire lors de la réalisation des reconnaissances de sol, car bien souvent la technique de pieu à la tarière creuse ne permet pas de s'apercevoir de la présence de nappe en charge et donc d'adapter le cas échéant la formulation du béton.

Note 5 : la réalisation de pieux en fond de fouille peut révéler un problème d'artésianisme qui n'apparaissait pas lors des investigations géotechniques effectuées au niveau du terrain naturel, ce qui peut potentiellement masquer la difficulté.

Figure 4.42 : Phénomène de « claquage » du terrain de faible compacité lors du bétonnage (inspiré de [4.3])

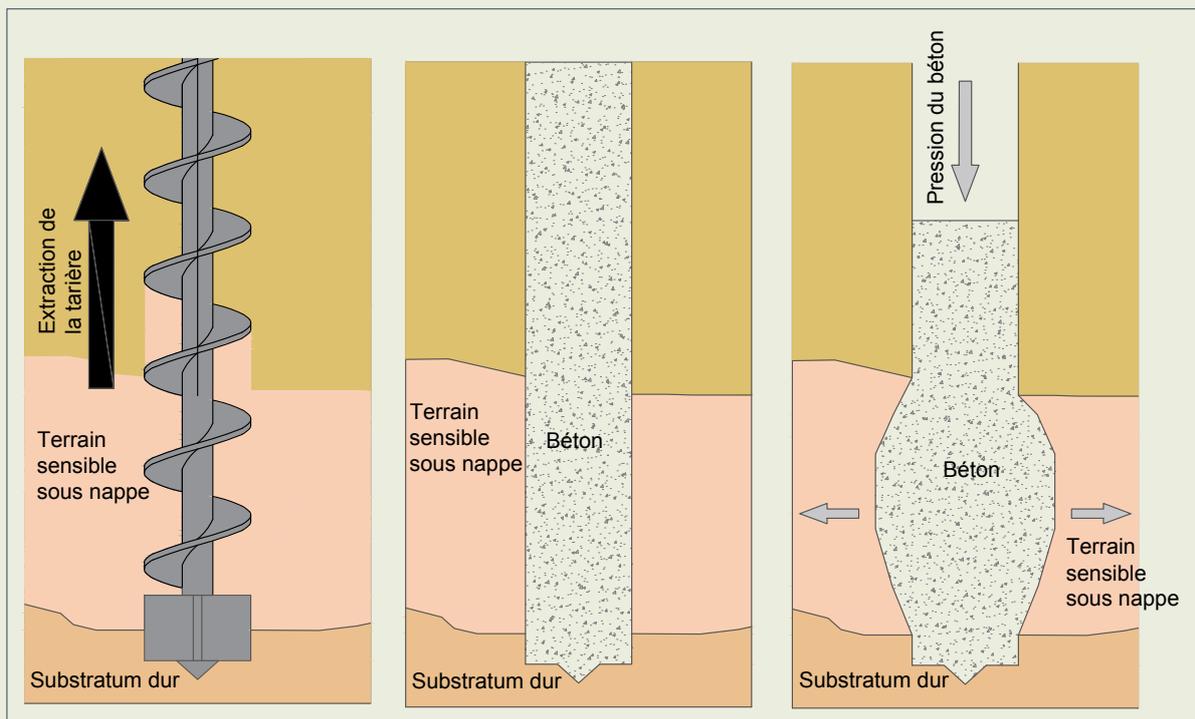


Figure 4.43 : Circulation parasitaire dans le béton encore frais due à un phénomène d'artésianisme ($P_0 < P_1$) (inspiré de [4.3])

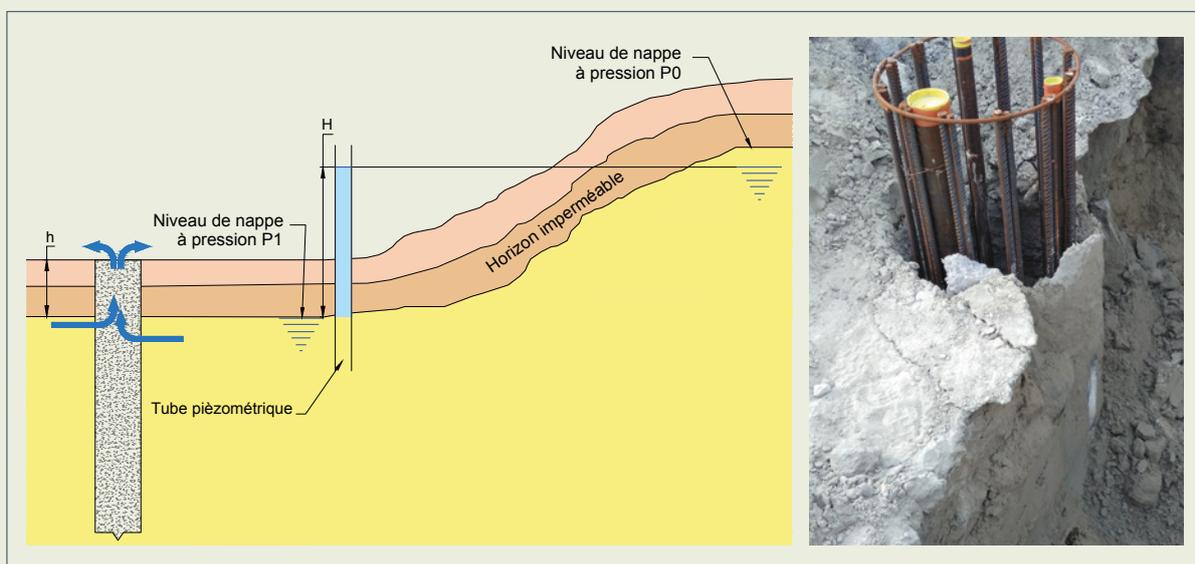
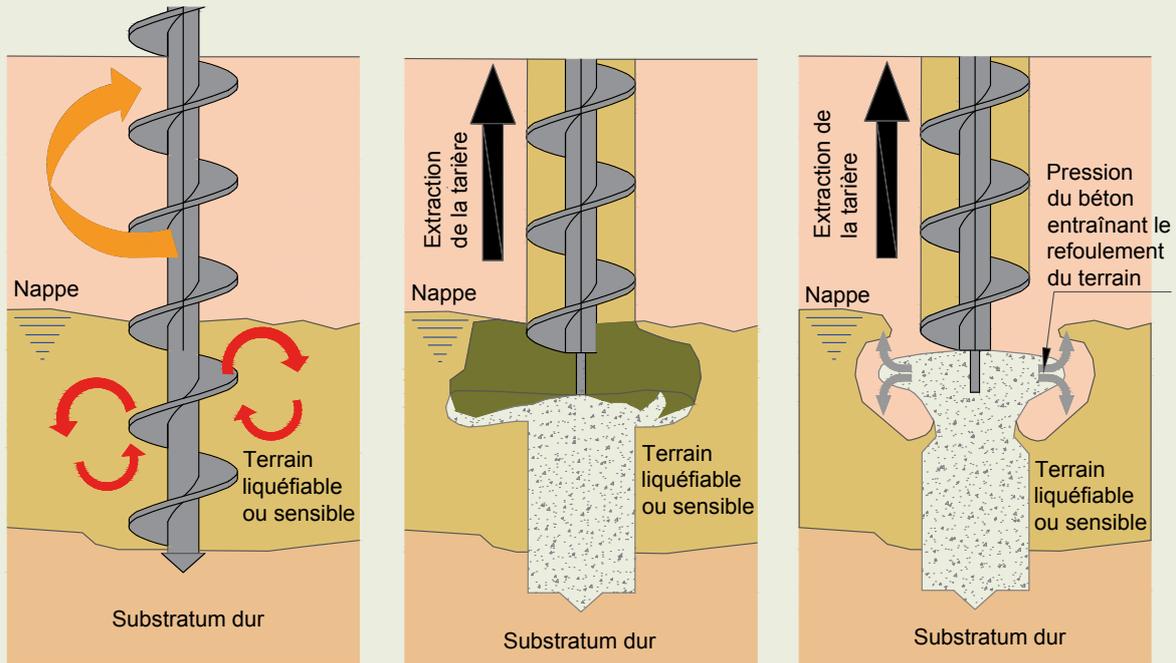


Figure 4.44 : Mélange du béton avec le sol en cas de sols « sensibles » ou déstructurés en cas de surexcavation (b et c sont des conséquences possibles) (inspiré de [4.3])



a) Déstructuration du sol par le mouvement de la tarière lors d'un phénomène de surexcavation

b) Perte de consistance du terrain => « effondrement » du béton sous pression en raison de l'écart important de densité entre le béton et le sol

c) La pression du béton conduit à un refoulement du sol qui entraîne une striction au niveau inférieur



4.1.4 - AUTRES TECHNIQUES NON PRÉCONISÉES

4.1.4.1 - Le déversement direct dans le pieu

Cette méthode évoquée par le guide « Pieux forés » de 1978 pour des pieux non armés de longueur inférieure à 10 m **est interdite**, en raison du risque important de ségrégation du béton et du risque de dégradation des parois du forage (article 6.1.5 de la norme NF DTU 13.2 P1-1).

4.1.4.2 - Bétonnage direct à la pompe pour les pieux de classe 1

Certaines entreprises procèdent par bétonnage direct dans le pieu à la pompe, en raison, entre autres, de son avantage logistique (peu de manutention) et lorsque les toupies ne peuvent accéder à la tête de pieu (par exemple dans la Figure 4.24).

Risques encourus lors d'un bétonnage par un flexible raccordé directement au camion pompe

Le bétonnage dans le pieu par un flexible raccordé directement (*Note*) au camion pompe est spécifique et nécessite des précautions particulières, **il doit être évité** car :

- le flexible en bout de pompe ne permet pas de garantir que l'amorçage se fait en fond forage et qu'il est bien au centre du pieu ;
- il ne permet pas **un effet de chasse** satisfaisant (moins franc qu'au tube de bétonnage) ;
- contrairement à ce qui se passe avec l'utilisation du tube plongeur, il est difficile de maîtriser la position de la base du flexible en fond de pieu, du fait du manque de rigidité du flexible qui peut se déformer.

Note : il s'agit bien ici de l'utilisation d'un flexible directement lié à la pompe, ce qui n'est pas le cas, par exemple, du tube plongeur escargot (Figure 4.25 « Tube escargot » dans le cf. § 4.1.1.1).

Procédure détaillée permettant l'évaluation de la proposition de l'entreprise

Si ce mode de bétonnage par flexible lié directement au camion pompe est tout de même retenu malgré les risques, il convient d'obtenir **une procédure détaillée permettant d'évaluer la proposition de l'entreprise** vis-à-vis :

- de l'amorçage (cf. ci-après) ;
- de l'effet de chasse ;
- de la continuité du bétonnage.

Caractéristiques nécessaires au béton pompable

Pour être pompable, un béton doit posséder **certaines caractéristiques** (homogénéité, non ségrégeable) et être pompé avec **un matériel** et selon **un mode opératoire** adaptés, sous peine de voir des bouchons se former au cours des différentes phases (démarrage ou amorçage, pompage, redémarrage, nettoyage). Comme la notion de « pompabilité » d'un béton ne fait pas appel à sa seule composition mais aussi à la configuration de l'installation et au mode opératoire, il est nécessaire de réaliser **un essai de convenance** (cf. § 4.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Amorçage du pompage du béton

Afin de faciliter l'amorçage du pompage de béton (pour éviter le bouchon), il convient **de lubrifier la tuyauterie** avec de la barbotine⁽³⁴⁾ avant de commencer à pomper le béton.

L'installation de pompage

L'installation de pompage doit être **dimensionnée au regard** :

- **du débit demandé** ;
- **du parcours des conduites** (longueur – frottement du béton, différences de niveau – force de pesanteur, courbures – perte de charge en fonction du rayon, diamètre de la conduite – vitesse d'avancement) ;
- **de la consistance du béton**.

34. Une barbotine est composée de ciment, de mortier ou tout autre produit équivalent.

4.2 - LE BÉTONNAGE EN PRÉSENCE D'UN FLUIDE STABILISATEUR

On rappelle que la norme NF EN 1536+A1 (article 3.21) définit « Fluide stabilisateur » comme le « fluide utilisé au cours de l'excavation pour soutenir les parois de forage et transporter les sédiments ».

4.2.1 - PRÉCAUTIONS AVANT LE BÉTONNAGE

4.2.1.1 - Précautions lors du bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur

Afin que des déblais de forage ne soient pas susceptibles de venir polluer le béton au moment du bétonnage, des précautions sont présentées ci-dessous :

- **les propriétés du fluide stabilisateur** doivent être satisfaisantes avant le bétonnage (cf. **tableau 2 de la norme NF EN 1536+A1** définissant les caractéristiques attendues pour les fluides à base de bentonite (*Note 1*) ou Tableau 4.4 « Tableau récapitulatif des propriétés des suspensions minérales selon la norme NF EN 1536+A1 » – cf. du § 4.2.1.2 au 4.2.1.4 pour respectivement les suspensions minérales, les solutions de polymères et l'eau comme fluide stabilisateur) ;
- **la vitesse instantanée de remontée de béton** ne doit pas être inférieure à 3 m/h de manière à garder le béton un peu en mouvement pour éviter qu'il ne se fige et éviter ainsi la mise en œuvre de béton fluide par-dessus du béton figé en emprisonnant du béton pollué et/ou du fluide stabilisateur (Figure 4.34 « Défaut de bétonnage lors d'un délai trop important entre deux approvisionnements de béton » dans le § 4.1.1.3) ;
- **la consistance du béton** doit être conforme au **tableau D.3 de la norme NF EN 206+A2/CN** ;
- **un tube plongeur** doit être utilisé pour la mise en place du béton (cf. § 4.1.1) ;
- **un bouchon** en matériau approprié doit être inséré dans le tube, avant le début du bétonnage, pour empêcher le mélange entre le béton et le fluide dans le tube plongeur (cf. l'amorçage dans le § 4.1.1.2) ;
- **la suppression au fond du forage de toute sédimentation** (*Note 2*) ou de débris immédiatement avant le début du bétonnage (cf. § 4.2.1 « Précautions avant le bétonnage »).

Quelle que soit la technique retenue pour le nettoyage du fluide, **le niveau de fluide doit être maintenu constant**.

⚠ Un soin particulier doit être apporté en cas d'**utilisation de l'eau comme fluide stabilisateur** (cf. § 4.2.1.4), car les particules, mêmes fines, décantent rapidement, y compris au cours du bétonnage si elles sont toujours présentes.

Note 1 : les fluides stabilisateurs à base de bentonite représentent les suspensions minérales de forage les plus communément utilisées (cf. 4.2.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

Note 2 : soit la sédimentation est supprimée, soit le fluide stabilisateur est mis en mouvement pour éviter la sédimentation (cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage » du fascicule 3).

4.2.1.2 - Bétonnage avec une suspension minérale

Nettoyage indispensable du forage avant bétonnage lors de l'utilisation de suspensions minérales

Comme présenté dans le fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 », une fois le curage et le dessablage exécutés et les caractéristiques de la suspension minérale validées, **le nettoyage du fond du forage**, suite à l'équipement du forage (en fonction du temps d'équipement), doit être réalisé avant bétonnage. Cette opération consiste à extraire les résidus de forage non extraits lors de l'opération de curage et/ou déposés durant la phase d'équipement du pieu.

Il est possible **de substituer la totalité du fluide stabilisateur** (*Note 1*) par une suspension minérale gardée exclusivement pour le bétonnage. Dans ce cas, le fluide de substitution (cf. § 4.3.5.2 du fascicule 3) est mis en œuvre par la méthode inverse à la fin du forage et après le curage et le dessablage. Cette technique permet d'obtenir un fluide stabilisateur répondant aux attentes et un bétonnage de meilleure qualité, car ses caractéristiques sont souvent très proches de celles d'un fluide stabilisateur neuf. Cette solution permet de **réduire le temps nécessaire pour le nettoyage du fluide stabilisateur** (*Note 2*) lors de la réalisation du pieu. Cette substitution requiert un volume de fluide plus important, donc un surcoût non négligeable, mais elle est très rapide et efficace.

Note 1 : en cas de substitution totale ou tardive du fluide contaminé par du fluide neuf, même si elle répond à la contrainte d'abaisser la densité du fluide stabilisateur pour faciliter le bétonnage, entraîne le risque de favoriser des éboulements.

Note 2 : le nettoyage du fluide stabilisateur substitué pourra être réalisé en temps masqué.

Caractéristiques attendues de la suspension de bentonite avant bétonnage

En accord avec la norme NF EN 1536+A1 (article 8.4.3.1), le bétonnage ne peut être amorcé que si les propriétés de la suspension de bentonite (Note) sont satisfaisantes (Tableau 4.4). Dans le cas contraire, un traitement complémentaire (cf. § 4.3.6 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ou une substitution du fluide stabilisateur (cf. § 4.3.5.2 du fascicule 3) doit être réalisé.

Note : les fluides stabilisateurs à base de bentonite représentent les suspensions minérales de forage les plus communément utilisées (cf. 4.2.1 du fascicule 3).

Importance de la teneur en sable des suspensions minérales

La teneur en sable des suspensions de bentonite (éléments supérieurs à 74 µm – cf. § Annexe 3.1.4 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») doit être faible avant et pendant le bétonnage afin de limiter la sédimentation en fond de forage et sur le béton en cours de bétonnage.

Tableau 4.4 : Tableau récapitulatif des propriétés des suspensions minérales selon la norme NF EN 1536+A1 (tableau 2 de la norme NF EN 1536+A1 à l'exception de la résistance au cisaillement)

Propriété	Unité	Avant bétonnage
Masse volumique (cf. Annexe 3.1.1 du fascicule 3)	g/cm ³	< 1,15 ^{e)}
Viscosité Marsha ^{a)} (cf. Annexe 3.1.2 du fascicule 3)	s	32 à 50
pH ^{b)} (cf. Annexe 3.1.3 du fascicule 3)	–	NA
Teneur en sable (cf. ci-avant et Annexe 3.1.4 du fascicule 3)	% de volume	< 4 ^{f, g)}
Cake (cf. Annexe 3.1.5 du fascicule 3)	mm	NA
Filtrat ^{c)} (cf. Annexe 3.1.5 du fascicule 3)	cm ³	NA
Résistance au cisaillement ^(35) d) (cf. Annexe 3.1.6 du fascicule 3)	N/m ²	–

(NA : non applicable)

Domaine d'application : les suspensions de bentonite répondent aux conditions indiquées à l'exception des circonstances suivantes (Note 1 de l'article 6.2.1.3 de la norme NF EN 1536+A1) :

- sols ou rochers à forte perméabilité ou comportant des cavités, susceptibles de provoquer des pertes de bentonite ;
- nappes phréatiques ayant un niveau piézométrique élevé (conditions confinées ou artésiennes – cf. § 6.2 « Bétonnage en présence de circulations d'eau : risques de délavage du béton ») ;
- sables lâches ou sols mous (généralement avec $q_c^{(36)} < 300$ kPa ou $C_u^{(37)} < 15$ kPa) ;
- un environnement marin.

a) La viscosité Marsh correspond à la durée d'écoulement d'un volume de 946 ml par l'orifice du cône. Un volume de 1 000 ml peut être utilisé, mais dans ce cas les valeurs doivent être ajustées (tableau 2 de la norme NF EN 1536+A1).

b) Valeurs indicatives du pH.

c) La durée de l'essai de filtration peut être réduite à 7,5 minutes pour les contrôles de routine. Toutefois, les valeurs de filtrats et du cake doivent alors être ajustées. Le filtrat d'un essai de 7,5 minutes correspond approximativement à la moitié de la valeur obtenue dans l'essai à 30 minutes.

d) Une résistance au cisaillement minimum peut être demandée afin par exemple de réduire la pénétration du fluide stabilisateur dans le sol (NOTE 2 de l'article 6.2.1.3 de la norme NF EN 1536+A1).

e) En présence d'eau salée ou de sols très mous, une masse volumique allant jusqu'à 1,20 g/cm³ est autorisée (article 6.2.1.4 de la norme NF EN 1536+A1).

f) Dans le cas de pieux flottants ou de pieux non armés, une valeur de la teneur en sable allant jusqu'à 6 % de la masse est autorisée (article 6.2.1.5 de la norme NF EN 1536+A1). Sauf disposition contraire du marché, la teneur en sable est réduite à 3 % dans le Fascicule 68 du CCTG (clause 3.4.1).

g) Si la clause 3.4.1 du Fascicule 68 du CCTG est applicable, la teneur en sable maximale du fluide stabilisateur avant bétonnage est de 3 %, sauf disposition contraire du marché.

35. La résistance du gel correspond à la résistance au cisaillement du fluide stabilisateur au repos après hydratation. Cette mesure se réalise à l'aide de viscosimètre à lecture directe (Fann) (cf. la norme NF EN ISO 10414-1).

36. Résistance à la pénétration du cône (NF EN ISO 22476-12).

37. Cohésion non drainée.

4.2.1.3 - Bétonnage avec une solution de polymères

Nettoyage indispensable du fond du forage avant bétonnage lors de l'utilisation de solutions de polymères

Selon la FHWA⁽³⁸⁾ [4.4], le nettoyage du fond du forage consistant à extraire les résidus de forage non extraits lors de l'opération de curage et/ou déposé durant la phase d'équipement du pieu, doit être réalisé avant bétonnage afin d'obtenir une solution de polymères ayant les caractéristiques adaptées au bétonnage.

Les sédiments qui se déposent au fond du forage peuvent être retirés à l'aide :

- d'un godet de curage (cf. § 3.2.2.2 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 ») ;
- d'un pompage (cf. § 4.3.4 du fascicule 3).

Le système utilisé pour le nettoyage du fond du forage doit être adapté au fonctionnement des polymères⁽³⁹⁾ qui ne permettent pas la mise en suspension des particules de sol. Ainsi, le procédé air lift (cf. § 2.5.2 du fascicule 3) doit être utilisé avec précaution car le flux turbulent engendré risque, d'une part, de remettre les particules en suspension et, d'autre part, de cisailer les chaînes polymères. L'air lift doit être utilisé avec parcimonie et pour une durée limitée, de plus, il ne convient pas à tous les sols.

Caractéristiques attendues des solutions de polymères avant bétonnage

Avant le bétonnage, il convient de contrôler les propriétés de la solution de polymères (cf. Tableau 4.5). Il faut notamment veiller à ce qu'il n'y ait pas d'excès de particules fines (argiles et limons) qui augmenterait la viscosité du fluide stabilisateur et donc le risque de défauts dû à un mauvais déplacement de la solution de polymères lors du bétonnage (cf. § 4.3.6.3 « Contaminations et traitements des solutions de polymères » du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 »).

Tableau 4.5 : Tableau récapitulatif des propriétés des solutions de polymères selon la FHWA [4.4] et l'ICE SPERW [4.5]
(la norme NF EN 1536+A1 ne fournit pas de valeurs cibles)

Propriété	Unité	Avant bétonnage	
		FHWA ⁽⁴⁰⁾	ICE SPERW
Masse volumique (cf. Annexe 3.1.1 du fascicule 3)	g/cm ³	< 1,02	< 1,02
Viscosité Marsha (cf. Annexe 3.1.2 du fascicule 3)	s	32 à 135	90 à 120
pH (cf. Annexe 3.1.3 du fascicule 3)	–	8 à 11,5	9 à 11,5
Teneur en sable (cf. Annexe 3.1.4 du fascicule 3)	% de volume	< 1	< 1
Filtrat (cf. Annexe 3.1.5 du fascicule 3)	cm ³	NA	NA

Nota bene : Ces données sont relatives aux polymères de type Polyacrylamide (PHPA, cf. § 4.2.2 du Fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

38. FHWA : Federal highway administration.

39. Les solutions de polymères ne peuvent pas être traitées via les hydroclones adaptés aux suspensions de bentonite, car le mélange énergétique va casser les chaînes polymères et encrasser le matériel.

40. La FHWA fournit les mêmes valeurs de masse volumique, de viscosité et de pH, quel que soit le contexte.

4.2.1.4 - Bétonnage avec l'eau comme fluide stabilisateur

Risques avec l'eau comme fluide stabilisateur

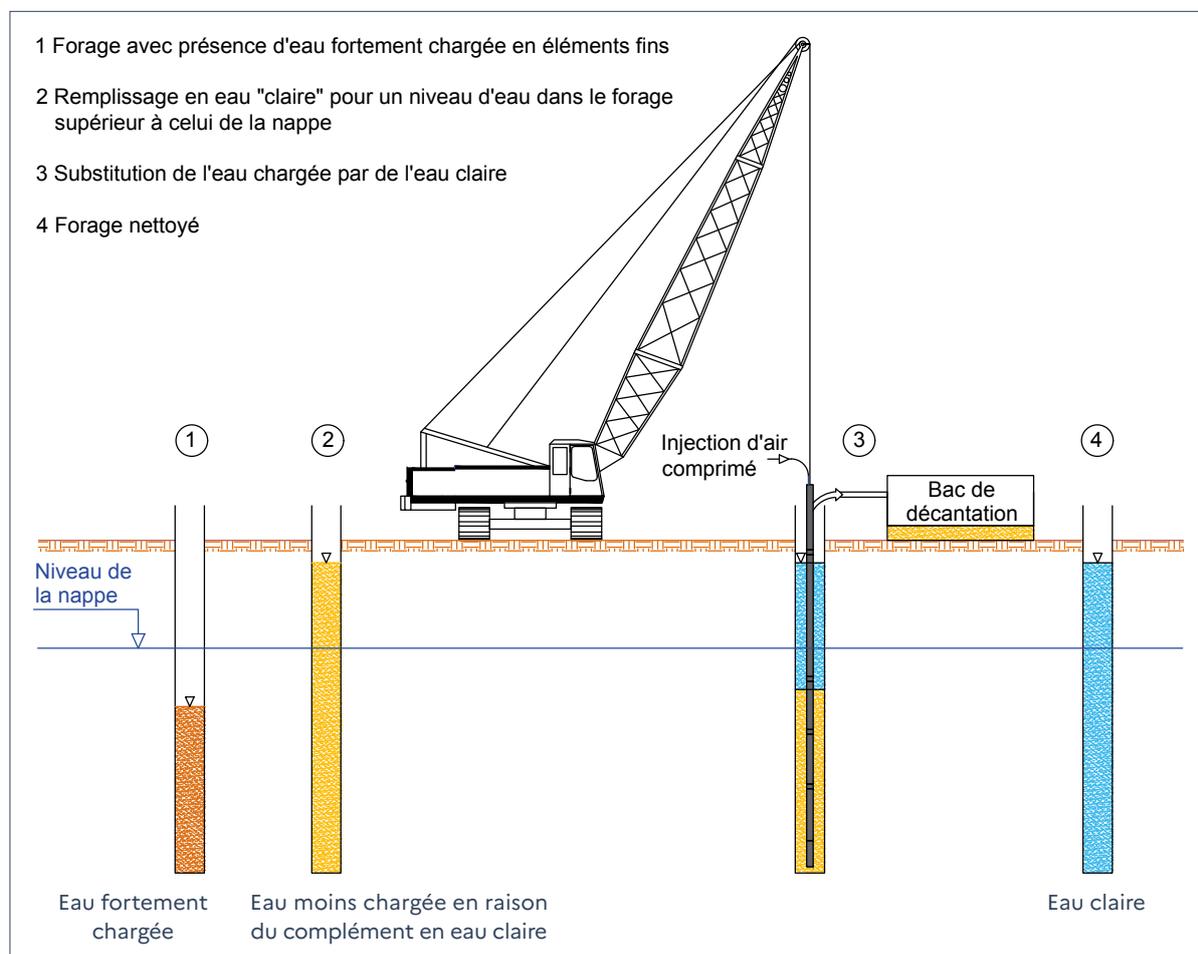
Lors du forage, l'eau ne va pas maintenir les particules de sol en suspension, bien que les particules d'argile et de limon vont se disperser dans l'eau et créer une boue non stable sensible à la décantation. Ce mécanisme **nécessite donc un curage⁽⁴¹⁾ méticuleux du fond du forage avant bétonnage** (cf. § 2.5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

En cas de présence de particules d'argile dans le terrain, comme indiqué, ces dernières peuvent se disperser dans l'eau de forage et augmenter ainsi sa viscosité (ce qui ralentira également la sédimentation des particules grossières), et pourra conduire à un défaut de bétonnage. Pour cette raison, il peut se révéler nécessaire, avant bétonnage, de remplacer complètement l'eau de forage par de l'eau propre ou alors d'utiliser des traitements favorisant la sédimentation des particules fines ou encore d'utiliser l'air lift (cf. § 2.5.2 du fascicule 3 et description ci-après).

Usage de l'air lift avec l'eau comme fluide stabilisateur

Dans le schéma 1 de la Figure 4.45, l'eau dans le forage peut provenir de l'eau de la nappe, il convient de rajouter de l'eau, ne serait-ce que pour l'équilibre des efforts au niveau de la paroi du forage (Figure 3.77 « Représentation des forces en présence au niveau de la paroi AB d'une excavation remplie de fluide stabilisateur » dans le § 4.1 du fascicule 3) de compléter le niveau d'eau (schéma 2 de la Figure 4.45), conduisant ainsi à un forage avec l'eau comme fluide stabilisateur. Sur le schéma 3 de la Figure 4.45, l'air lift (dont le principe est présenté dans le § 2.5.2 du fascicule 3) permet d'extraire les particules en suspension d'une eau trop fortement chargée, afin de permettre le bétonnage dans de bonnes conditions.

Figure 4.45 : Schéma de principe de l'air lift avec l'eau comme fluide stabilisateur en présence d'une nappe phréatique



41. Le curage est recommandé quel que soit le type de fluide stabilisateur.

4.2.2 - PRÉCAUTIONS PENDANT LE BÉTONNAGE

Différence de densité entre le béton et le fluide stabilisateur

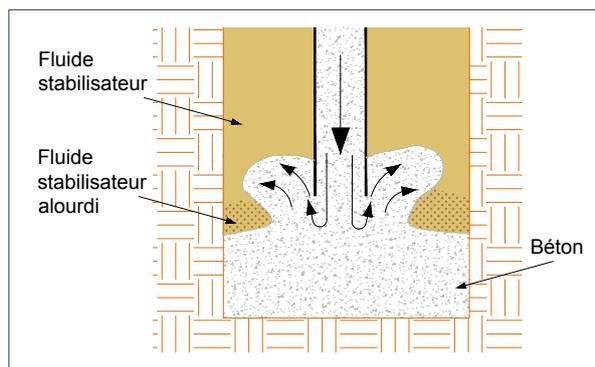
Pour éviter le mélange entre le fluide stabilisateur et le béton frais qui la remplace (*Note*), il faut maximiser la différence de densité entre ces deux fluides. Il faudra donc trouver, plus spécifiquement lorsque l'excavation n'est pas circulaire (barrettes), un compromis entre un fluide stabilisateur alourdi pour une meilleure tenue des parois et un bétonnage sans risque de mélange [4.6].

Note : à l'interface entre les deux fluides, mais aussi au niveau des fluides stabilisateurs qui auraient adhéré aux armatures [4.6].

Vitesse de remontée du béton frais en présence de fluide stabilisateur

Lors du bétonnage en présence de fluide stabilisateur, la vitesse instantanée de remontée de béton ne doit pas être inférieure à 3 m/h de manière à garder le béton un peu en mouvement pour éviter qu'il ne se fige ou qu'il ne devienne trop visqueux (en fonction de sa rhéologie) et empêcher ainsi la mise en œuvre de béton fluide par-dessus du béton figé en emprisonnant de ce fait du béton pollué et/ou du fluide stabilisateur (Figure 4.46 et cf. § 4.1.1.4 « Le bétonnage en conditions immergées »).

Figure 4.46 : Fluide stabilisateur piégé lors d'un bétonnage trop lent



Causes des risques de pollution du béton

Lors du bétonnage, il faudra faire attention aux risques de pollution du béton suivants [4.6] :

- en cas d'utilisation de la bentonite, la réaction chimique entre la suspension et les ions calcium du béton peut modifier la rhéologie du fluide stabilisateur (risque de floculation) ;
- la pollution du béton par les particules de sol soulevées au niveau du fond de l'excavation du pieu (effet de chasse) lors de la mise en œuvre du béton ;
- la pollution du béton par le fluide stabilisateur (en cas d'une solution de polymères – *Note 1*) :
 - en cas de mélange avec le béton liquide (*Note 2*),
 - au niveau du cake en cas d'utilisation de suspensions minérales (*Note 3*).

Note 1 : une forte concentration en calcium et un pH élevé du béton risquent de dégrader la plupart des polymères, et dans ce cas, tous les sédiments présents dans le fluide resteront dans l'excavation [4.6].

Note 2 : le risque est présent lorsque le béton est trop visqueux (en raison de sa rhéologie ou d'un bétonnage trop long). Dans le cas contraire, ce risque peut être écarté car le fluide stabilisateur enrobant les armatures se déplacera avec le béton sain jusqu'à la surface et ce béton pollué sera donc récupéré.

Note 3 : un cake trop épais va conduire à des anomalies au niveau de la surface de contact béton-sol, qui ne seront pas détectables à la méthode sonique (cf. § 2.1.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

4.3 - BÉTONNAGE SOUS CONDITIONS PARTICULIÈRES

4.3.1 - BÉTONNAGE PAR TEMPS FROID

Conditions de température

Les basses températures ont un impact sur la qualité finale du béton, elles doivent être considérées à la conception du béton, avant sa fabrication, son transport (faibles trajets et peu d'attente des toupies) et sa mise en œuvre.

Généralement, il est déconseillé de mettre en place du béton à des températures inférieures à -5°C . Entre -5°C et $+5^{\circ}\text{C}$, certains moyens peuvent être mis en œuvre pour prévenir des effets dommageables du froid.

Dans le cas des ouvrages d'art, les conditions de températures entraînant des dispositions particulières de bétonnage par temps froid sont fixées par le Fascicule 65 du CCTG.

Impacts du froid sur le béton

Le froid ralentit les réactions exothermiques d'hydratation du ciment, avec pour conséquence :

- un retard, voire un arrêt de **la prise du béton** ;
- une augmentation de **la durée de durcissement**, voire une absence de durcissement (*Note*).

Le gel, quant à lui provoque un gonflement entraînant une baisse de résistance, une désagrégation du béton pouvant nécessiter à terme le remplacement de l'élément de fondation atteint.

À partir d'une certaine profondeur, le sol est à une température homogène suffisamment haute, donc le béton n'est plus soumis au gel.

Note : l'intervention du gel au moment du durcissement conduit à une augmentation de la porosité, à une diminution de l'adhérence pâte-granulat, et une altération importante de la résistance mécanique (destruction des premières liaisons cristallines), ce qui peut nécessiter la démolition de ce béton.

Précautions à prendre pour bétonnage par temps froid

Afin de diminuer l'impact de la température sur la qualité du béton, il est possible :

- d'adapter la **composition du béton** (choix du ciment et son dosage augmenté, choix de granulats (*Note 1*), dosage en eau, choix d'adjuvants (*Note 2*) ;
- d'apporter et de maintenir une **quantité de chaleur** au béton frais, par chauffage de l'eau et/ou des granulats ;
- de mettre en place **des dispositions de protection et/ou d'augmenter la hauteur de recépage** ;
- de reporter la réalisation du pieu.

Note 1 : des granulats non poreux, non gélifs et non gelés.

Note 2 : des adjuvants accélérateurs de prise et entraîneurs d'air.

4.3.2 - BÉTONNAGE PAR TEMPS CHAUD

Conditions de température

Les températures élevées ont un impact sur **la qualité finale du béton** ; elles doivent être considérées dès **sa fabrication, son transport** (faibles trajets et peu d'attente des toupies) et **sa mise en œuvre**.

Généralement, des dispositions sont à prendre dès que la température **dépasse durablement 25°C**, elles deviennent encore plus contraignantes **au-dessus de 35°C**.

Dans le cas des ouvrages d'art, où les diamètres des pieux et les volumes mis en œuvre sont généralement plus importants, les conditions de température entraînant des dispositions particulières de bétonnage par temps chaud sont fixées par le Fascicule 65 du CCTG.

Impacts de températures élevées sur le béton

Dans le cas des fondations profondes, la température a un impact sur **la rhéologie du béton et son évolution, sa vitesse de prise et sa cinétique de durcissement**. L'influence de la température des constituants sur l'élévation de la température du béton est différente pour chacun d'eux (celle des granulats étant la plus impactante). Cette élévation de température modifie les propriétés physico-chimiques du béton et entraîne une perte de maniabilité/ouvrabilité. Des baisses de résistance en compression à 28 jours sont également possibles.

Précautions à prendre pour bétonnage par temps chaud

Afin de diminuer l'impact de la température sur **la qualité du béton**, il convient :

- de modifier **la composition du béton** (choix d'un ciment faiblement exothermique, choix des adjuvants – retardateurs de prise et plastifiants réducteur d'eau) ;
- d'adapter **les conditions de stockage et de protection des granulats** ;
- de refroidir **l'eau** ;
- de réduire **le temps de transport, d'attente et de stationnement des camions-malaxeurs** en plein soleil ;
- de vérifier que **la température du béton au coulage** reste inférieure à la température limite déterminée lors de l'étude de la résistance du béton vis-à-vis de la RSI.

⚠ On rappelle que **rajouter de l'eau pour pallier la perte d'ouvrabilité est interdit** sous peine de diminution de la résistance mécanique.

4.4 - TECHNIQUES DE MESURE ET ÉTALONNAGE DES PARAMÈTRES D'ENREGISTREMENT DE BÉTONNAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Après installation des matériels sur le chantier, on vérifie le **parfait état de marche ainsi que l'étalonnage des matériels** permettant la mesure et l'enregistrement des paramètres de bétonnage.

4.4.1 - MESURE DU VOLUME DE BÉTON POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Techniques de mesure du volume de béton et incertitudes

La mesure du volume de béton est obtenue :

- généralement **par comptage des coups de pompe** de la pompe à béton ;
- par un **débitmètre inductif** mais qui ne présente pas à ce jour une fiabilité supérieure.

Cette mesure est entachée d'**une certaine incertitude** (inférieure à 5 % lorsque les étalonnages sont réalisés régulièrement). Particulièrement pour des pieux de faible volume, l'imprécision sur le volume total est aussi liée au volume des conduites après le point de mesure.

Les modifications des propriétés du béton au cours d'un chantier (viscosité, température...) peuvent entraîner une variation du taux de remplissage des pistons : il convient de renouveler l'étalonnage lorsque ces modifications surviennent. C'est aussi le cas lors d'un changement de la pompe.

Étalonnage du comptage de la pompe

Au démarrage du chantier et à chaque changement de pompe ou de formulation de béton, il est procédé à un étalonnage de cette mesure. Une caisse dont le volume est connu (par exemple 500 l) est remplie par pompage pendant que, simultanément, le nombre de coups de pompe est compté. Cette méthode permet d'obtenir le volume par unité de coup de pompe. La valeur est ensuite entrée manuellement dans l'enregistreur de paramètres.

4.4.2 - MESURE DE LA PRESSION DU BÉTON POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Technique de mesure de la pression du béton lors de l'utilisation de la technique de la tarière creuse

Le capteur de pression (membrane) est généralement installé au niveau du col-de-cygne en haut de la tarière.

Étalonnage du capteur de pression lors de l'utilisation de la technique de la tarière creuse

Ce capteur doit être étalonné lors de la révision de la machine.

Après chaque révision de machine un rapport d'étalonnage doit être rédigé.

4.4.3 - MESURE DE LA HAUTEUR D'EXTRACTION DE L'OBTURATEUR RÉTRACTABLE UTILISABLE POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Les méthodes permettant **de mesurer la hauteur d'extraction de l'obturateur** sont variées : utilisation de capteur de pression hydraulique, électronique, magnétique ou encore visuelle.

Selon les technologies d'enregistrement employées, **les méthodes d'étalonnage** peuvent varier. La méthodologie utilisée pour l'étalonnage de la profondeur est mise en œuvre après étalonnage du profondimètre (cf. § 7.2.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 »).

4.5 - LE CONTRÔLE DE MISE EN ŒUVRE DU BÉTON DANS LE FORAGE

Les opérations à contrôler

Il s'agit de suivre une à une les opérations successives et de vérifier qu'elles sont bien exécutées.

On peut considérer que **ce contrôle** s'applique à :

- la réception éventuelle **des tubes d'auscultation et autres tubes de réservation** (cf. § 5.8 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés » et § 2.1.1 du fascicule 6 « Les contrôles de pieux finis ») ;
- **la préparation du matériel de bétonnage** (cf. § 4.1.1.1 « Le tube plongeur et la trémie ») ;
- **l'amorçage du tube plongeur** (tube traditionnel ou pompe). On rappelle que cette opération conditionne la qualité du béton de pieu, en particulier celui qui se trouve au contact du sol en pointe (cf. § 4.1.1.2) ;
- **la conduite du bétonnage** proprement dit pendant lequel il faut principalement veiller :
 - à la régularité de l'approvisionnement (commandes de béton en temps utile, rotation des camions...),
 - au strict respect des opérations (différentes opérations de bétonnage) et des consignes qui sont décrites dans le chapitre 3, ainsi que les différents contrôles permettant de vérifier la bonne mise en œuvre des opérations comme les mesures de la consistance du béton et la réalisation de la courbe de bétonnage,
 - au maintien du tube plongeur dans le béton frais lors de sa remontée (éviter les risques de désamorçage – Figure 4.19 « Exemples de système de retenue et de centrage des tubes plongeurs » dans le § 4.1.1.1),
 - au bon maintien des cages d'armature en position (cf. fascicule 5),
 - à la confection d'éprouvettes de béton destinées à vérifier la résistance mécanique à 28 jours (Figure 4.11 « Éprouvettes de béton pour essais sur béton durci » dans le § 3.3.1) ;
- **certaines opérations qui suivent le bétonnage** : purge par débordement, comportement du béton en cours d'extraction du tube de travail...

Contrôles spécifiques du bétonnage des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Durant la réalisation des pieux, outre les contrôles relatifs à tous les pieux forés, **les contrôles et points de vigilance spécifiques** à la technique de la tarière creuse au niveau du bétonnage (§ 4.1.3) portent sur la vérification :

- **de l'approvisionnement continu en béton** lors du bétonnage des pieux ;
- **du respect de la cinématique du bétonnage et du maintien de la pression.**

En cas de dysfonctionnement, les causes doivent être analysées et l'ensemble des intervenants doit être prévenu.

Les points à notifier

Pour chaque bétonnage de pieu, il faut enfin noter dans **un procès-verbal** :

- **les opérations effectuées dans le cadre du contrôle** ;
- **les observations faites concernant l'environnement et les conditions de travail** ;
- **les particularités, incidents et anomalies** constatés.

CHAPITRE 5

Points sensibles du bétonnage

5. POINTS SENSIBLES DU BÉTONNAGE

Comme indiqué dans le chapitre précédent, le béton mis en œuvre dans le pieu ne peut faire l'objet d'aucun contrôle visuel que ce soit lors du bétonnage ou lorsque le pieu est fini. Il est, de ce fait, d'autant plus important de prêter **une attention particulière** aux sujets suivants :

- la hauteur de bétonnage (§ 5.1) ;
- le curage du fond de fouille pour les pieux de classe 1 (§ 5.2) ;
- la purge sur béton frais (§ 5.3) ;
- le recépage (§ 5.4) ;
- la qualité du contact sol-pieu (§ 5.5) ;
- la surconsommation du béton (§ 5.6) ;
- le retrait du tube de travail éventuel (§ 5.7) ;
- le ressuage du béton (§ 5.8).

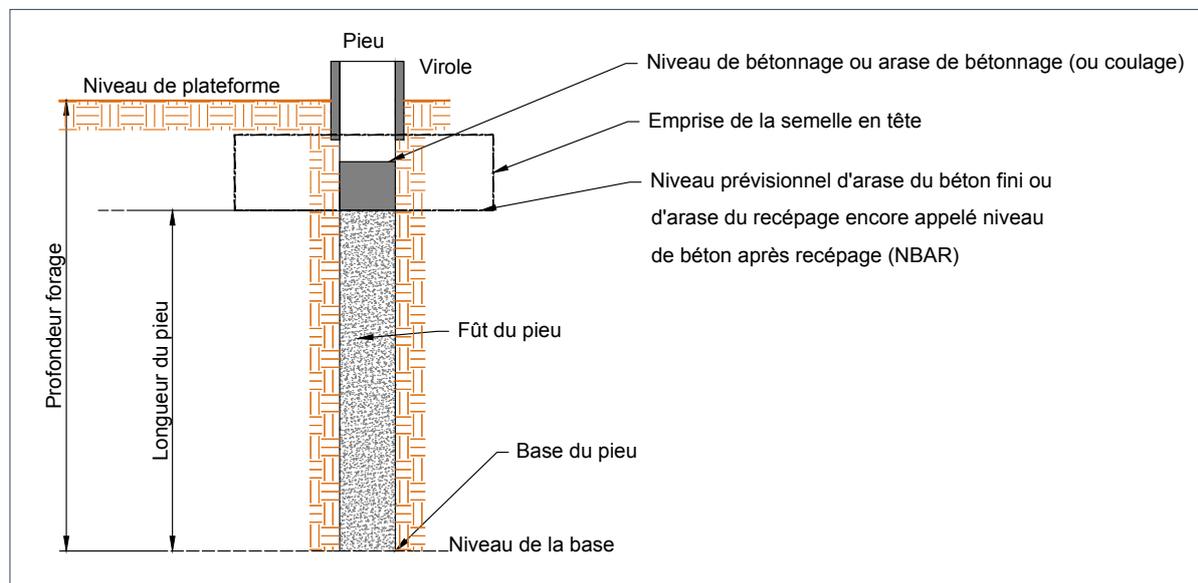
Certains risques lors du bétonnage en raison du contexte géologique et hydrogéologique sont traités dans le chapitre suivant.

5.1 - HAUTEUR DE BÉTONNAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 1

Les différents niveaux : plateforme, bétonnage, arase ou recépage

La Figure 4.47 présente les différents niveaux à définir en élévation pour chaque pieu.

Figure 4.47 : Définition des différents niveaux : plateforme, arase ou recépage (cf. § 5.4)



Hauteur de bétonnage

Selon l'article 8.4.1.19 de la norme NF EN 1536+A1 : il convient d'**augmenter la hauteur du niveau de bétonnage au-dessus du niveau de recépage** (Figure 4.47) dans les situations suivantes :

- le niveau de recépage se trouve nettement en dessous de la plateforme de travail (cf. § 5.4) ;
- le bétonnage est effectué dans **des conditions immergées** ;
- les tubages provisoires sont récupérés.

Les quantités au marché doivent tenir compte de cette surconsommation volumique.

Cas d'un niveau de bétonnage inférieur à la plateforme de travail

Selon l'article 8.4.1.21 de la norme NF EN 1536+A1 lorsque le niveau de bétonnage final se situe en dessous de la plateforme de travail, il convient de protéger le béton frais contre toute contamination venant du dessus :

- en bétonnant jusqu'à un niveau supérieur au niveau de recépage ;
- pour la partie de forage vide au choix :
 - en la remblayant avec un matériau convenable (*Note*),
 - en maintenant un fluide stabilisateur au-dessus du béton frais, jusqu'à la prise du béton.

Note : cette solution est la seule qui élimine définitivement le risque de chute des personnes dans un trou non comblé. Il est également possible de mettre des garde-corps ou un platelage pour sécuriser provisoirement l'endroit.

5.2 - CURAGE DU FOND DU FORAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 1

On a insisté dans le § 2.5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 » sur l'importance capitale que revêtent les opérations de curage et de nettoyage du fond de forage, car elles conditionnent la **qualité du contact béton-sol en pointe du pieu**.

Quand réaliser le curage du fond du forage ?

Cette opération doit être effectuée immédiatement avant la mise en place des armatures. Ce curage n'étant plus possible par la suite, il importe que le bétonnage soit réalisé immédiatement après la mise en place des armatures.

Objectifs du curage du fond du forage

La réalisation d'un curage efficace permet de participer à un bétonnage dans des conditions satisfaisantes (*Note*) et en particulier d'obtenir **un bon contact « béton-sol » en pointe**.

Un bon curage consiste à :

- éliminer la **totalité des déblais** situés au fond du forage ;
- régulariser la **forme du fond de forage**.

Note : il faut aussi éliminer les déblais en suspension dans le fluide stabilisateur (cf. § 4.3.6 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

Les différentes étapes pour obtenir un bon nettoyage du forage avant le bétonnage

Les différentes étapes pour obtenir un bon nettoyage du forage avant bétonnage sont les suivantes et détaillées par la suite :

- **étape 1** : curage du fond de l'excavation en fin de forage (cf. § 2.5 du fascicule 3) ;
- **étape 2** : en cas d'utilisation de fluide stabilisateur, mise en conformité de ce dernier avant bétonnage (cf. ci-après et § 4.2 « Le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur ») ;
- **étape 3** : mise en place de la cage d'armature (cf. ci-après et chapitre 9 du fascicule 5) ;
- **étape 4** : en cas de présence d'éventuels petits éboulements consécutifs à la mise en place de l'équipement, un nettoyage du fond du forage par mise en circulation de la suspension minérale (cf. § 4.3.5.5 du fascicule 3) ou par le procédé air lift (cf. § 2.5.2 du fascicule 3 pour le principe et le § 4.2.1.4 du présent fascicule avec l'eau comme fluide stabilisateur) ;
- **étape 5** : arrêt de la mise en circulation du fluide stabilisateur ;
- **étape 6** : mise en place du tube plongeur (ou de la colonne de bétonnage – cf. § 4.1.2) et bétonnage (cf. § 4.1.1).

Mise en conformité du fluide stabilisateur (étape 2)

Il s'agit de régénérer le fluide stabilisateur pollué en cours de forage par les sables, les limons ou les argiles (*Note*), en la dessablant et éventuellement en la traitant afin qu'elle présente les caractéristiques attendues pour sa bonne utilisation (cf. § 4.2 « Le bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur »).

Note : ces éléments augmentent la densité du fluide stabilisateur et éventuellement l'épaisseur du cake, et ils diminuent la fluidité du fluide stabilisateur.

Mise en place des armatures (et chemisage) et les risques associés (étape 3)

L'équipement du forage avec son armature (cf. fascicule 5 « Les armatures des pieux forés »), voire son chemisage (cf. § 2.4.3), intervient après la mise en conformité du fluide stabilisateur. Cependant leur mise en place est **une étape sensible pour la qualité du trou de forage** par :

- **sa durée** (*Note 1*), dont dépend le degré de sédimentation au fond du forage des déblais restant encore potentiellement en suspension dans le fluide stabilisateur ou dans l'eau (en présence d'une nappe – *Note 2*) malgré le nettoyage/curage ;
- **les inévitables contacts avec les parois du forage** qu'elle génère. Ces contacts vont provoquer des éboulements qui vont polluer le fond du forage.

Note 1 : pour les pieux longs, l'équipement peut prendre plusieurs heures.

Note 2 : l'eau dans le forage provenant de la nappe doit être elle aussi dessablée sous peine de risques au moment du bétonnage. La décantation des matières en suspension y est plus rapide que dans une suspension minérale.

Nettoyage du forage après équipement (étape 4)

Il n'est plus possible d'introduire le godet de curage. **L'évacuation des déblais de forage** (éboulés et/ou sédimentés pendant les délais nécessaires à l'installation des équipements) doit être réalisée par **circulation inverse** (cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage » du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ou **par émulseur** (aussi appelé « **air lift** » – *Note 1*) qui présente l'avantage de pouvoir atteindre des profondeurs plus importantes).

La technique choisie est **maintenue le temps nécessaire au nettoyage complet du forage**, et ensuite on assure la poursuite de la circulation du fluide stabilisateur si le bétonnage ne peut avoir lieu immédiatement après.

⚠ Il est important de noter que ce nettoyage ne doit pas se cantonner aux pieux pour lesquels le forage a déjà recours à une technique de circulation inverse ou d'air lift. **Une circulation du fluide stabilisateur doit être mise en œuvre à chaque fois que des déblais de forage sont susceptibles de venir polluer le béton** au moment du bétonnage et dans le cas où le bétonnage se fait attendre (cf. § 4.2.1.1 « Précautions lors du bétonnage en présence d'un fluide stabilisateur »).

Dans le cas des barrettes, du fluide stabilisateur peut être mis en mouvement. En revanche, si la mise en place de la cage d'armature a entraîné des éboulements notables (généralement pas le cas – *Note 2*), comme il est difficile de nettoyer le sol éboulé en raison de la présence des cadres, il peut être plus simple et plus efficace de ressortir la cage, puis de nettoyer l'éboulement avant de remettre la cage.

Note 1 : le § 2.5.2 du fascicule 3 présente le principe de l'air lift et le § 4.2.1.4 de ce fascicule l'usage de l'air lift avec l'eau comme fluide stabilisateur.

Note 2 : généralement les va-et-vient de l'outil d'excavation ont fait chuter la partie de sol susceptible de tomber.

5.3 - PURGE SUR BÉTON FRAIS

Distinction entre « purge » et « recépage »

L'entreprise de fondations spéciales doit la mise en place d'**un béton sain jusqu'au niveau du futur recépage**. Donc l'arase de bétonnage est supérieure au niveau du béton après recépage.

Il convient de distinguer la purge et le recépage. Même s'ils peuvent se révéler complémentaires, ils relèvent d'un phasage différent lors d'un chantier :

- **la purge** concerne le béton frais. Elle est réalisée par l'entreprise de fondation, soit par débordement, soit par enlèvement directement dans le forage et vise à éliminer le béton pollué ou du béton sain. La purge vise à éliminer du béton à moindre coût quand il n'a pas encore fait prise. On obtient généralement une cote de pieu purgé supérieure à la cote de reprise visée ;
- **le recépage**, qui n'est réalisé que sur du béton durci, est généralement exécuté par l'entreprise de génie civil ou de gros œuvre du bâtiment, et a pour but, d'atteindre la cote visée et un béton de qualité, tout en permettant la reprise de bétonnage.

Purge par débordement ou par curage

La purge du forage (Figure 4.48) permet d'évacuer :

- les sédiments ;
- le fluide stabilisateur, si présent ;
- la laitance ;
- l'eau de ressuage qui surmonte le premier béton arrivant en surface (par exemple lors de la remontée du tube de travail par vibration) ;
- le premier béton arrivant en tête, pollué ou partiellement délavé malgré les précautions prises à l'amorçage.

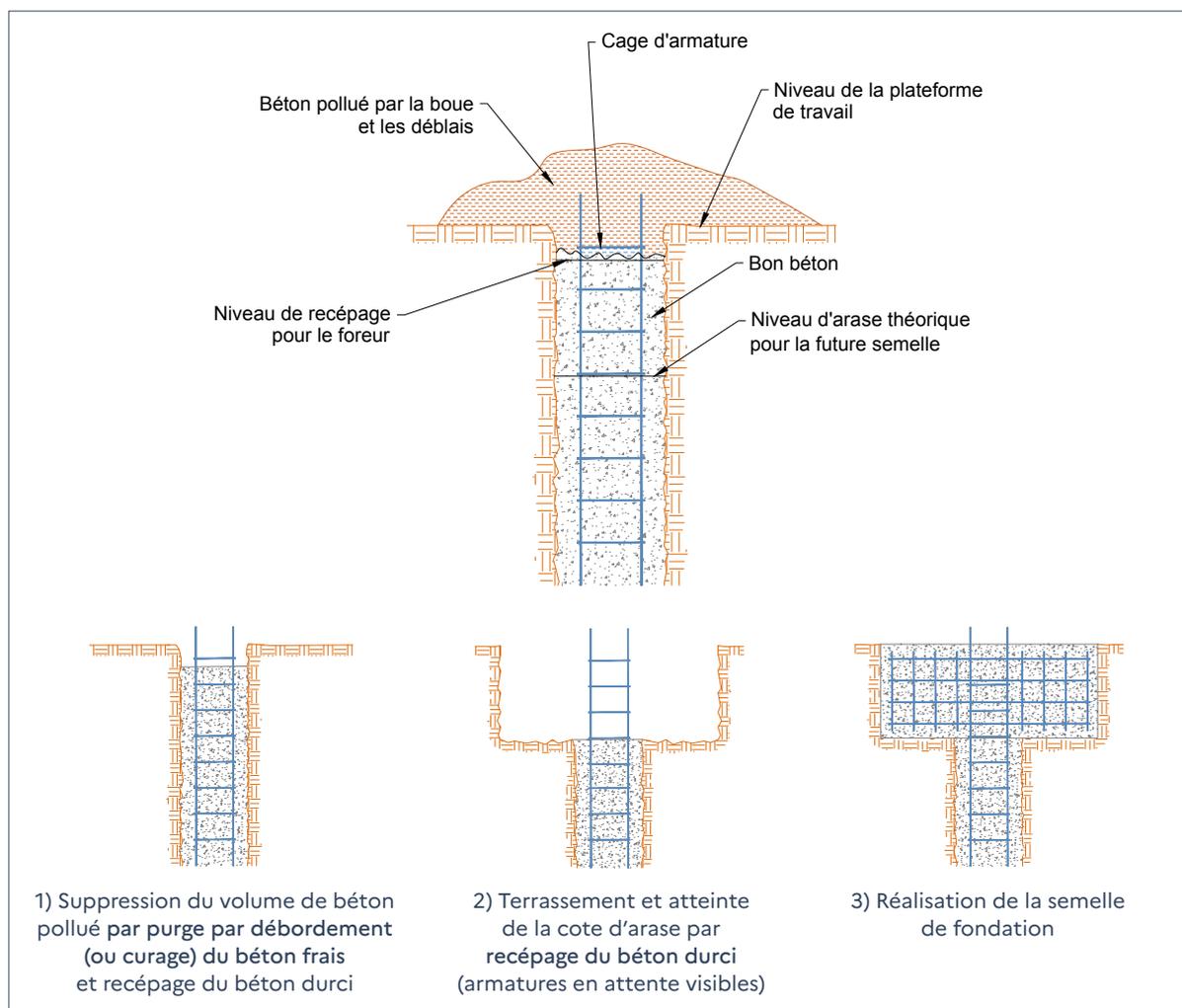
Si la plateforme est :

- légèrement au-dessus du niveau du béton après recépage (NBAR), le béton va naturellement se répandre sur la plateforme. Ce béton sera supprimé avant prise de façon à éviter (ou limiter) le recépage par démolition, d'où le terme de « purge par débordement » ;
- bien au-dessus du niveau du béton après recépage (NBAR), il est nécessaire de couler le béton jusqu'à une cote supérieure à la cote de reprise en vue d'un recépage ultérieur (cf. Figure 4.48). La hauteur de béton à démolir (recépage) peut être réduite en enlevant du béton encore frais directement dans le forage.

Un nettoyage de la tête de forage est nécessaire lorsque les armatures sont introduites dans le béton frais. Le bétonnage jusqu'à la plateforme de travail est la procédure recommandée avec la tarière creuse : la purge de béton frais dans le forage est alors utile pour minimiser les coûts de recépage.

La procédure d'exécution doit bien indiquer les moyens employés pour maintenir le site propre et respecter les conditions environnementales éventuellement indiquées dans le contrat de travaux.

Figure 4.48 : Purge suivie d'un recépage



5.4 - RECÉPAGE DES PIEUX FORÉS

Objectifs du recépage

Le recépage (Figure 4.49) a pour but **d'éliminer, sur une certaine hauteur, le béton en tête du pieu.** Il a deux fonctions :

- **supprimer les zones douteuses en tête** (polluées, délavées, ségréguées) ;
- **mettre à la cote le haut du pieu afin d'atteindre :**
 - la cote prévue au projet,
 - un état de surface compatible avec la reprise de bétonnage lors de l'exécution de la structure.

⚠ La suppression du béton douteux peut conduire à descendre en dessous du niveau d'arase théorique. Dans ce cas, il faut compenser cette hauteur par reconstitution du fût du pieu ou approfondissement du massif en tête de pieu.

Figure 4.49 : Exemple de blocs de béton recépié



Blocs extraits de béton recépié par méthode RECEPIEUX® provenant de pieux coulés jusqu'au niveau de la plateforme de travail

Quand réaliser le recépage

Il ne faut pas exécuter l'opération :

- **trop tard**, car le béton présenterait une résistance élevée demandant une forte dépense d'énergie ;
- **trop tôt**, sous peine de microfissuration du béton de tête de pieu, surtout par manque de résistance à la traction.

Précautions à suivre lors du recépage

L'opération de recépage, quelle que soit la méthode employée :

- ne doit **pas altérer le béton sous-jacent** ;
- doit **dégager, nettoyer et préparer les armatures** (*Note*) pour recevoir le béton de la superstructure.

Note : les armatures adhérentes au béton ne devront pas être sollicitées de manière importante lors du retrait du béton durci à recéper.

Volume minimum à recéper

Selon le Fascicule 68 du CCTG (clause 3.5.4.5), le volume total recépié (*Note*) ne peut être inférieur à celui correspondant à la hauteur :

- d'un diamètre de pieu ;
- d'une largeur de barrette.

Selon la norme NF DTU 13.2, il n'y a pas de volume total recépié (*Note*) minimal, seulement une exigence d'un recépage (sur béton durci) de 100 mm.

Note : le volume recépié comprend le volume de béton purgé et celui durci qui a été démoli.

Cas d'un niveau de recépage au-dessous du niveau théorique

Si l'élimination du béton de qualité insuffisante amène le niveau réel de recépage au-dessous du niveau d'arase théorique, le titulaire soumet au visa du maître d'œuvre la procédure de reprise (reconstitution du pieu jusqu'au niveau d'arase par exemple) (clause 3.5.4.5 du Fascicule 68 du CCTG).

Les principales techniques de recépage

L'entreprise en charge du recépage doit préciser **dans la procédure d'exécution** les moyens de recépage et les dispositions qu'elle compte prendre pour assurer la qualité du béton à la cote d'arase.

Il s'agit de privilégier **un recépage évitant une microfissuration, voire une fissuration vers le bas du béton en tête des éléments de fondation**. De ce fait, certaines techniques risquent de fragiliser le haut du pieu et doivent être réalisées en laissant une garde de 100 à 200 mm au-dessus du niveau de béton après recépage (NBAR). Ces 100 à 200 mm seront ultérieurement supprimés par un recépage de finition de mise à la cote. Ce recépage fin est réalisé à l'aide de marteaux piqueurs à énergie adaptée.

Les principales techniques de recépage actuellement employées sont :

- **l'éclateur hydraulique ou vérin hydraulique** (Figure 4.50) : il donne de bons résultats, car il n'occasionne pas de microfissurations du béton en dehors du plan dans lequel l'éclateur est mis en œuvre. Comme son nom l'indique, il fonctionne par éclatement du béton, mettant à profit la faible résistance du béton à la traction. Un trou (ou plusieurs si le diamètre du pieu est important) est (sont) foré(s) à la cote dans le plan de recépage, puis on y introduit l'éclateur hydraulique ; ce dernier insère un coin de force provoquant une traction perpendiculaire à la surface à recéper, provoquant par la suite la rupture du béton selon cette surface. Cette technique nécessite d'avoir de la place autour du pieu pour la mise en œuvre de l'éclateur, car sa profondeur d'action est limitée, impliquant l'usage de plusieurs trous ;
- **par cisaillement**, en exerçant des efforts de compression régulièrement répartis tout autour du pieu au niveau du NBAR. Lorsque le diamètre du pieu est suffisamment important, il est possible d'utiliser un brise-pieux hydraulique, constitué d'une couronne équipée de couteaux et de vérins hydrauliques, dont les axes convergent avec l'axe du pieu (Figure 4.51 – *Note*) ;
- **le marteau piqueur** : il permet de ne pas endommager le béton à conserver, mais ne convient qu'à de faibles hauteurs de béton à recéper en raison de la pénibilité du travail pour l'opérateur. Il peut aussi être utilisé en finition d'autres procédés de recépage comme l'éclateur hydraulique ou le BRH (brise roche hydraulique), pour éliminer les 100-200 millimètres restant pour atteindre le NBAR ;
- **les explosifs** : ce dispositif complexe met en œuvre de nombreuses micro-charges à explosions décalées de quelques microsecondes (cf. ci-après « Les risques associés aux vibrations générées par certains procédés de recépage »), ce qui évite toute secousse nuisible à l'environnement. Ce procédé est plutôt utilisé pour les puits⁽⁴²⁾ de grand diamètre ;
- **les agents expansifs** :
 - les ciments expansifs sont mis en œuvre par introduction dans des forages radiaux (dont le nombre dépend du diamètre du pieu et de l'âge du béton) à la cote où l'on souhaite recéper. Ils semblent de moins en moins utilisés, car leur efficacité n'est pas garantie en fonction de la profondeur et ce procédé se révèle souvent long,

42. Selon la définition fournie dans la norme NF P94-262 COMPIL1 (article 3.1.6), un puits est une fondation profonde ou semi-profonde, de diamètre d'ordre métrique, creusée à la pelle ou à la benne preneuse. Les puits sont compris au niveau de leur technique de mise en œuvre dans la classe 1 catégorie 5.

– le procédé recépieux® est un recépage mécanique qui utilise des éclateurs plastiques perdus (Figure 4.52), en forme de toupies qui peuvent être :

- soit enfoncés manuellement dans le béton frais à l'altitude du recépage,
- soit positionnés à l'altitude de recépage dans la cage d'armature à l'aide de platines fixées sur la dernière cerce de la cage d'armature.

Ces éclateurs fonctionnent à l'aide d'un effort en traction générée par un agent expansif introduit dans les éclateurs après une prise suffisante du béton (minimum 3 jours), ce qui induit une fissure horizontale et propre séparant le bloc à éliminer du pieu en place, sans choc ni vibration.

- le procédé FARL® qui consiste à positionner dans le béton frais (après purge) une réservation horizontale ; le plan de la réservation est un plan de fragilité que le moindre effort transversal transforme en plan de fissuration du béton. Le Cerema n'a pas de retour d'expériences sur cette technique.

Nota bene : Le BRH – Brise Roche Hydraulique : utilisé pour les gros volumes de béton à recéper, son principe de fonctionnement est semblable à celui du marteau piqueur de grande taille. Il se connecte à l'extrémité d'un bras articulé de pelle hydraulique (ou mécanique). L'emploi du BRH est souvent interdit dans les marchés car son utilisation peut provoquer des fissurations intempestives, voire la cassure horizontale du pieu sous le niveau du NBAR. Son utilisation avec attaque perpendiculaire au plan de recépage engendre des fissures vers le bas pouvant ainsi endommager le pieu en dessous du NBAR. L'énergie du BRH doit être limitée (cf. ci-après « Les risques associés aux vibrations générées par certains procédés de recépage »). Cette technique peut conduire aussi au pliage des aciers en attente, qu'il faudra redresser par la suite, voire remplacer en cas d'endommagement.

Note : les petits diamètres de pieux ne sont généralement pas adaptés à la mise en œuvre des couronnes. Et dans les remblais de tête, il y a souvent des hors-profils béton qui peuvent considérablement gêner l'usage des couronnes, voire l'empêcher.

Figure 4.50 : Exemple d'éclateur hydraulique et principe d'éclatement du béton

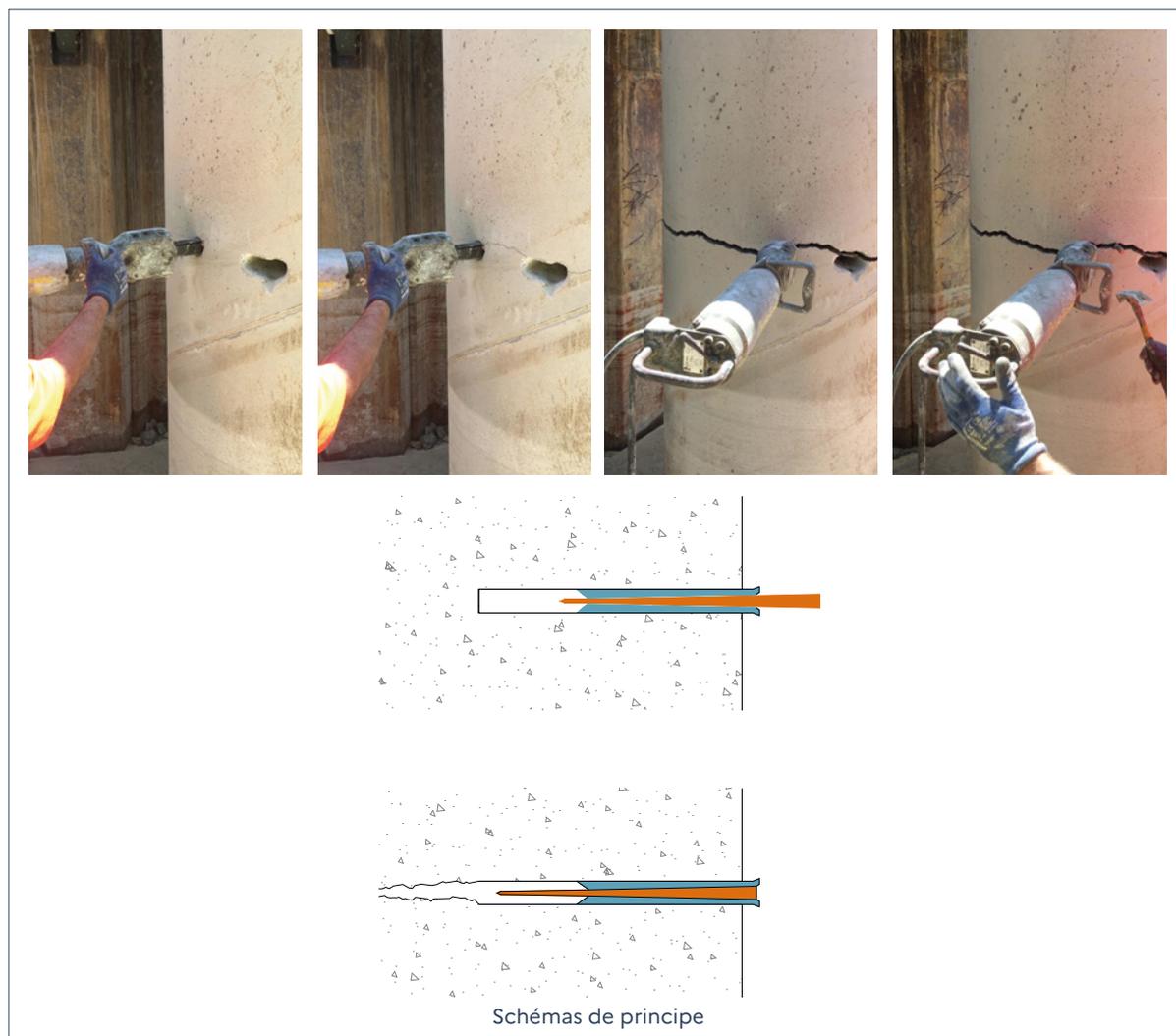


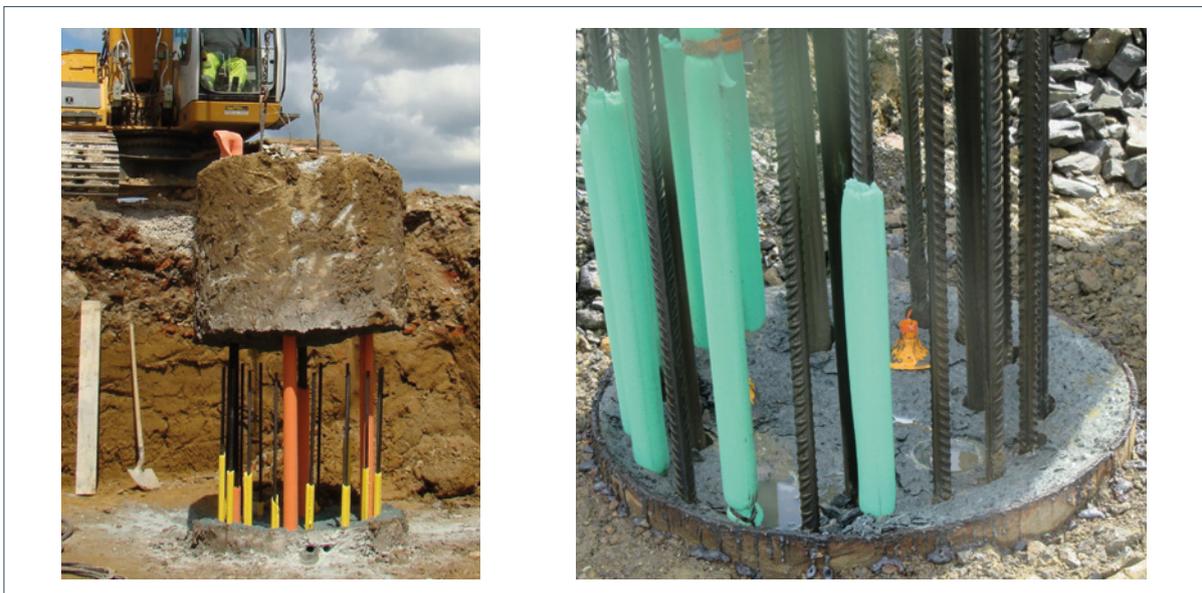
Figure 4.51 : Exemple de recépage par cisaillement à l'aide d'un brise-pieux hydraulique



Figure 4.52 : Le procédé recépieux®



Figure 4.53 : Protection des armatures par des gaines/fourreaux au niveau de la zone à recéper



Précautions à prendre au niveau des armatures lors du recépage

Dans le cas où le recépage consiste à extraire un volume de béton durci en tête de pieu, il est nécessaire pour y parvenir que :

- **les aciers longitudinaux sur la hauteur à recéper** (ainsi que les éventuels tubes de réservations) soient protégés par des « gaines-fourreaux » (Figure 4.53) lorsque la technique de recépage produit un bloc de béton à extraire (*Note 1*) ;
- **les cerces au-dessus du niveau d'arase**, présentes généralement en cas d'erreurs (*Note 2*) ou de modifications de la cote d'arase après réalisation du pieu soient repérées et découpées avant enlèvement du bloc constitué du béton à recéper (*Note 3*).

Le bloc de béton, ainsi découpé, est extrait grâce à un engin de levage.

Note 1 : en effet, les aciers sans gaine limitent la mise en traction du béton et de ce fait empêchent la propagation de la fissure générée par les techniques de recépage telles que le recépage à l'éclateur, celui par cisaillement et celui par des agents expansifs. Le cylindre de béton à recéper est alors impossible à extraire, d'une part du fait que la fissure n'est pas complète en partie inférieure et d'autre part parce que le cylindre à extraire est solidaire des aciers en attente.

Note 2 : des erreurs dans la réalisation de la cage d'armature ou dans la position de cette dernière.

Note 3 : le découpage est une opération qui peut s'avérer dangereuse pour l'opérateur (risque de heurt par la galette de béton).

Les risques associés aux vibrations générées par certains procédés de recépage

Les vibrations pouvant engendrer de la fissuration, notamment lors de **l'emploi de BRH et d'explosifs**, sont :

- **à proscrire au voisinage de la cote d'arase** ;
- **envisageables**, mais avec beaucoup de précautions (limitation de la puissance), **bien au-dessus de la cote d'arase** pour éliminer de grandes quantités de béton avant recépage plus fin au voisinage de la cote d'arase. Il convient alors de réaliser un piquetage au BRH plutôt vertical que de biais ou perpendiculaire au fût. ⚠ Il faut néanmoins s'assurer que la fissuration ne se développe pas dans le sens de l'axe des pieux pour ne pas risquer des fissures sous le niveau de béton après recépage (NBAR).

Co-activité avec le terrassement

Le terrassement a lieu soit :

- **avant le recépage** des pieux : cet enchaînement des tâches permet de s'affranchir des risques de chute dans les fouilles ou de stabilité provisoire de talus, mais le pieu est encore fragile et tout choc ou effort transversal doivent être évités ;
- **de manière concomitante au recépage** avec un terrassement par passes successives : cette simultanéité, même si elle est parfois obligatoire en raison du contexte, doit conduire, pour éviter des éboulements ou des risques de chutes pour les opérateurs venant réaliser le recépage, à des précautions particulières :
 - les banquettes successives doivent avoir leurs parois talutées,
 - éviter la superposition des tâches dans le temps et dans l'espace,
 - en cas de nécessité d'intervention d'opérateurs dans une fouille, s'assurer du blindage de cette dernière.

5.5 - QUALITÉ DU CONTACT SOL-PIEU

Importance d'un bon contact sol-pieu

Un bon contact sol-pieu est impératif **pour une bonne reprise des charges du pieu** :

- **en pointe**, pour assurer un bon transfert des charges au substratum ;
- **latéralement**, pour mobiliser le frottement axial.

Vérifications à réaliser

Afin d'obtenir un bon contact sol-pieu, **il est nécessaire** :

- **de vérifier la propreté du fond du forage après curage** (cf. § 2.5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ;
- **d'éviter le délavage du premier béton ou sa pollution** par les fluides stabilisateurs, potentiellement provoqués par un amorçage défectueux (*Note*).

Note : ce premier béton, comme signalé sur la Figure 4.26, tapisse en grande partie le fond et la partie inférieure de la paroi latérale du forage et se retrouve également en tête.

Origines des inclusions de fluide stabilisateur ou d'éboulis dans le béton

Les inclusions de fluide stabilisateur ou d'éboulis dans le béton peuvent se produire :

- en cas **de désamorçage du tube plongeur** en cours de bétonnage (cf. § 4.1.1.2) ;
- lors d'**une remontée irrégulière du béton**. Ce phénomène est à appréhender :
 - pour les pieux de grand diamètre (et les barrettes),
 - lorsque le tube plongeur est animé de mouvements trop nombreux – normalement proscrits. Il se constitue ainsi un bourrelet central qui s'effondre bientôt en emprisonnant eau, fluide stabilisateur ou sédiments (phénomène de vague – Figure 4.32 dans le § 4.1.1.3) ,
 - par la suite d'effondrements locaux de la paroi en l'absence de tube de travail, de gaine ou de chemise,
 - si la fluidité du béton n'a pas les qualités requises ou les a perdues.

5.6 - SURCONSOMMATION DE BÉTON

Exploitation de la courbe de bétonnage

Les **caractéristiques d'un bétonnage satisfaisant** étant la rapidité, la continuité et la régularité, il est primordial de contrôler la consommation de béton au fur et à mesure du bétonnage par établissement in situ d'une courbe de bétonnage (Figure 4.12 dans le § 3.3.1 et Figure 4.54), qui doit alerter sur toute surconsommation de béton (qui reste néanmoins difficile à mesurer, cf. ci-après « Estimation de la surconsommation »). Il est surtout compliqué de déterminer à quelle profondeur elle se produit sans analyse du contexte géotechnique.

Estimation de la surconsommation

La **valeur indicative de la surconsommation** V_s est donnée par $V_s = V - V_e - V_p - V_t$ avec :

- **V le volume du béton livré** par la centrale de fabrication ;
- **V_t le volume théorique du forage** d'après les dimensions des outils et non d'après les cotes des plans qui en diffèrent souvent ;
- **V_e le volume de béton excédentaire** resté dans le dernier camion ;
- **V_p le volume rejeté à la purge**.

Néanmoins cette valeur ainsi estimée ne tient pas compte du **survolume ΔV** , relatif aux seuls agrandissements du forage, sachant que le diamètre du forage est toujours supérieur au diamètre de l'outil quelle que soit la méthode utilisée. Ceci implique que le volume réel V_r est plus grand que le volume théorique V_t ($V_r = V_t + \Delta V$).

Analyse des surconsommations de béton pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

Une **surconsommation globale de béton** :

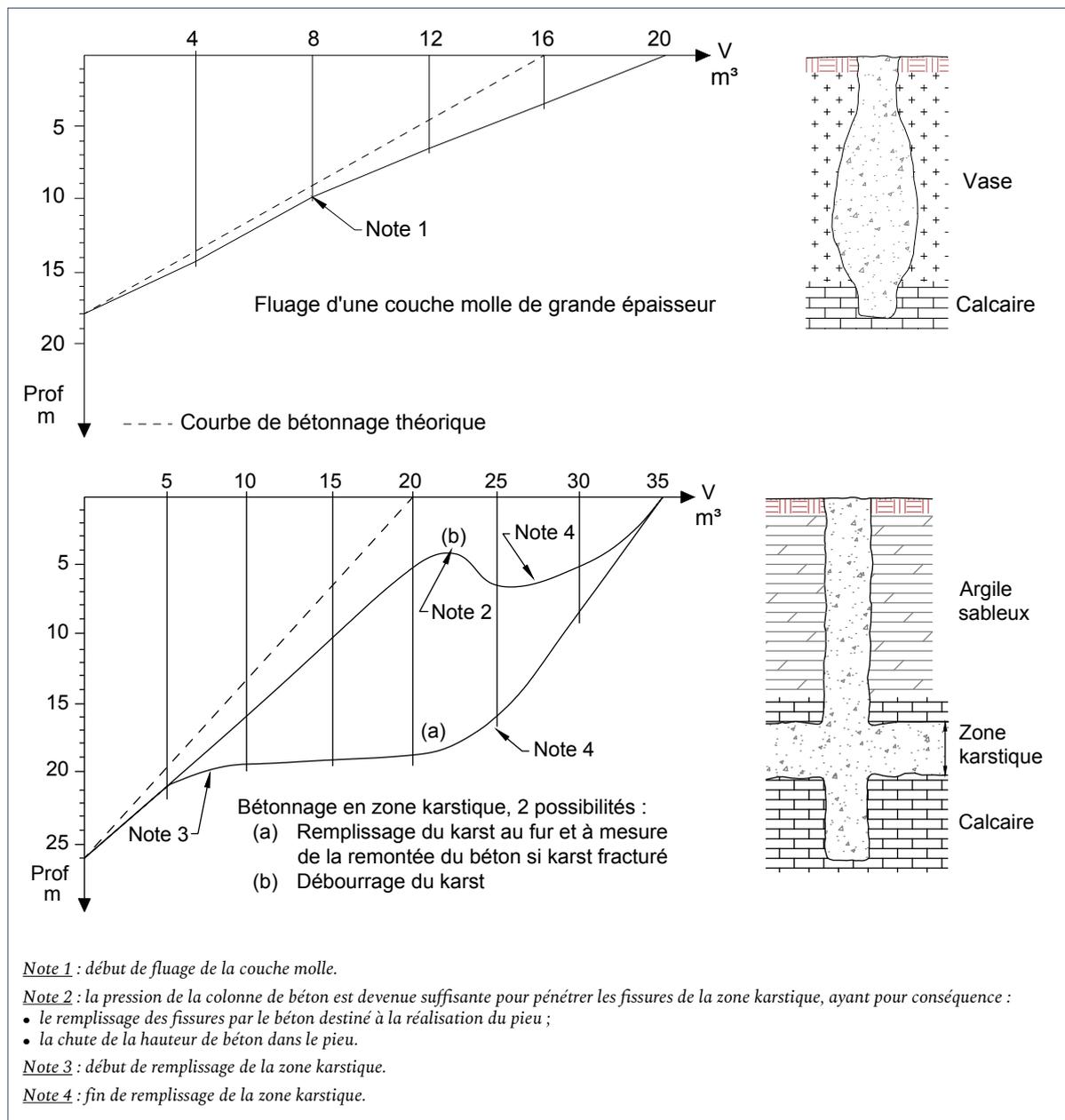
- **inférieure à 5 % du volume théorique peut être signe de malfaçon**, car un survolume est notamment nécessaire pour la bonne finition du pieu ;
- **de l'ordre de 15 à 20 %** (pouvant atteindre 30 % pour les plus petits diamètres < 600 mm) du fait du débordement du béton en fin de forage et des excroissances dans les terrains mous, **est habituelle** ;
- **au-delà de 30 %** (ou 40 % pour les plus petits diamètres < 600 mm) peut être jugée comme anormale, et **doit faire l'objet d'un point d'arrêt**, sauf dans certains terrains mous ou fortement fracturés (*Note*).

Note : pour ces terrains, où des surconsommations importantes sont attendues, la méthodologie d'exécution doit être adaptée (pression de bétonnage ajustée) et les contrôles post-exécution appropriés doivent être programmés.

Limites de l'évaluation des surconsommations

Les véritables surconsommations accidentelles, imputables aux fissures, au karst ou au fluage des sols mous ne peuvent donc être calculées avec précision que si le survolume ΔV peut être estimé. Malheureusement, l'expérience montre que ce dernier varie de façon tout à fait aléatoire en fonction des machines et des outils utilisés, des profondeurs de forage, et de la consistance des sols.

Figure 4.54 : Exemples de courbes de bétonnage présentant des surconsommations



Incertitudes sur l'estimation des surconsommations et la localisation des anomalies

Il est du plus haut intérêt de pouvoir localiser les niveaux des surconsommations et par suite d'en déduire les causes, or il est difficile d'établir une courbe de bétonnage significative à partir des mesures discontinues du volume du béton mis en œuvre et de la cote atteinte par le béton dans le pieu. Il reste encore difficile de réaliser de telles mesures pour des raisons technologiques dans les cas et pour les causes suivantes :

- dans le cas de pieux exécutés avec des tubes de travail, les mesures de niveau sont réalisées lors du bétonnage alors qu'il faudrait pouvoir les effectuer lors du retrait du tubage, ce qui est pratiquement irréalisable ;

- **dans les sols très mous ou en présence d'un réseau karstique partiellement obstrué**, le fluage ou le débouillage n'intervient que pour une hauteur de béton suffisante, c'est-à-dire très au-dessus du niveau de l'anomalie dont la position ne peut alors plus être décelée. De ce fait, même établie dans des conditions idéales, la courbe de bétonnage ne permet pas toujours de situer les surconsommations. Néanmoins l'allure de la courbe de bétonnage (Figure 4.54) renseigne sur la nature de l'incident et, en fonction des données géotechniques, les couches qui sont susceptibles d'en être affectées peuvent être localisées, mais sans grande précision.

5.7 - LE RETRAIT DU TUBE DE TRAVAIL

Phasage du retrait du tube de travail

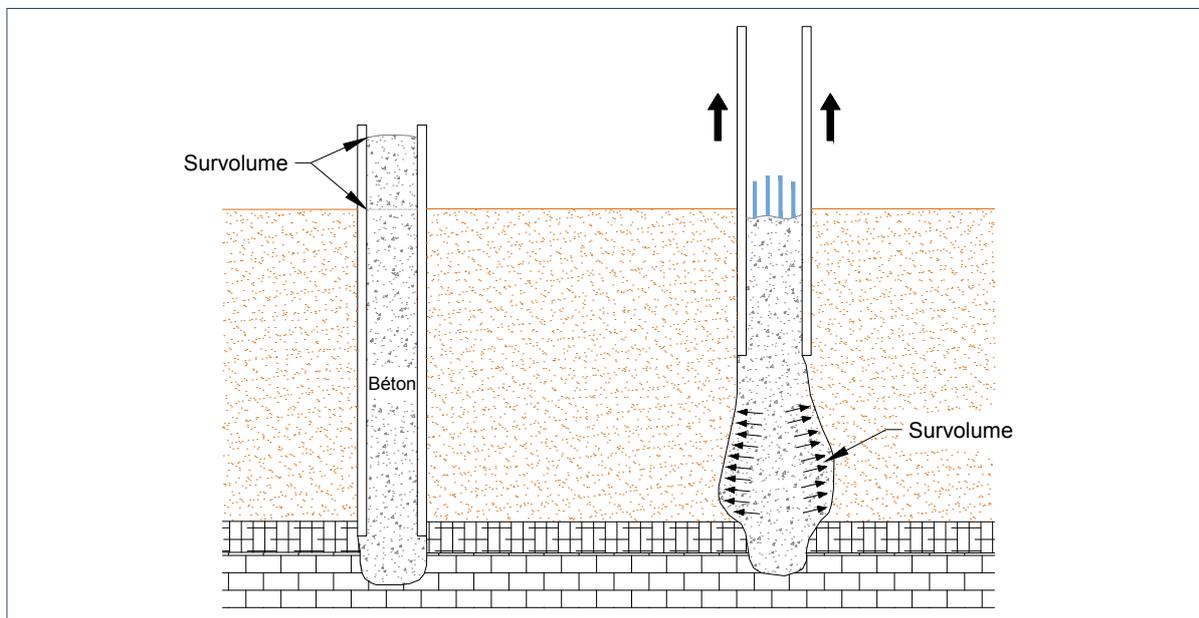
Lorsqu'on utilise la technique de forage et de bétonnage à l'abri d'un tube de travail (qui sert de coffrage au cours de ces opérations), **il convient de retirer ce tube** :

- **partiellement en cours de bétonnage** (en gardant un niveau de béton suffisant dans le tube) ;
- **totalemment dès la fin du bétonnage** et dans tous les cas avant la prise du béton.

Lors de l'extraction du tube, le béton vient occuper non seulement la place du tube, mais tous les vides importants du sol et/ou le volume dû au déplacement des parois de l'excavation en raison de la poussée du béton frais (pression horizontale de type hydrostatique). De ce fait, le niveau du béton dans l'excavation (ou le tube) baisse. Un sur-volume dans le tube doit donc être présent pour éviter tout désamorçage du béton à l'extraction du tube (Figure 4.55). Tout particulièrement, lorsque l'extraction du tube est accompagnée d'une vibration, il est conseillé d'extraire les premiers mètres de tube par paliers.

⚠ Lors de cette opération, il convient de s'assurer par un contrôle de nivellement, que la cage d'armature ne soit pas entraînée.

Figure 4.55 : Fluage d'une couche molle lors du retrait du tube provisoire



Vérifications à réaliser lors du retrait du tube de travail

Lors de la remontée du tube de travail, il convient de :

- **vérifier qu'aucune baisse significative du niveau de béton** (inférieur au niveau du recépage prévu) ne survienne ;
- **contrôler la hauteur de béton par rapport au niveau de nappe** (pression positive – cf. « Extraction du tube de travail en présence d'une nappe » ci-après).

Extraction du tube de travail en présence d'une nappe

En cas de baisse significative du niveau de béton en présence de pression de la nappe trop importante, il convient alors de prévoir préalablement au retrait du tube, une surhauteur de béton compensant le volume du tube et l'élargissement du diamètre du pieu (Figure 4.55). Si la quantité de béton est insuffisante, et que ce dernier descend sous le niveau de la nappe, le sol et la nappe risquent de se refermer au-dessus du béton et de se mélanger avec lui ou de créer des circulations dans le pieu.

Risques induits par l'extraction tardive des tubes de travail

Une tentative d'extraction tardive peut entraîner :

- la perte du tube ;
- des désordres graves comme :
 - des ruptures du béton avec possibilité d'éboulements et d'inclusions (*Note 1*),
 - une désorganisation de l'armature (*Note 2*),
 - un soulèvement du fût avec suppression du contact de pointe et du frottement axial,
 - un arrachage total ou partiel du pieu.

Note 1 : en effet, en raison de la répartition complexe des couches de béton, il peut se créer des surfaces de discontinuité dans la prise du béton : une couche « jeune » peut se trouver au contact d'une couche « ancienne » dont la prise est commencée. Ces surfaces constituent des zones préférentielles de ruptures par traction ou cisaillement lors de l'arrachage du tube de travail.

Note 2 : une couche de béton dont la prise est commencée peut présenter une adhérence non négligeable avec le tube de travail d'une part et l'armature d'autre part. Le tube, lors de l'arrachage, peut ainsi entraîner l'armature et, en plusieurs endroits, « déchiqeter » le pieu.

Mesures sur le bétonnage pour limiter les risques

Les *Notes 1 et 2* précédentes soulignent donc l'intérêt :

- d'un bétonnage rapide, continu, régulier et bien réglé ;
- d'une maîtrise totale du retard de prise du béton pour que cette prise ne se fasse pas trop tôt.

5.8 - LE RESSUAGE DU BÉTON

Le ressuage

Le ressuage consiste en une migration de l'eau au sein du béton frais. L'origine du ressuage peut être à la fois « naturelle », par migration ascendante verticale de l'eau, soit « imposée », sous la pression du poids propre du béton⁽⁴³⁾.

Les essais relatifs à la mesure du ressuage sont présentés dans le Tableau 4.3 « Gamme des essais disponibles et des normes associées en fonction des caractéristiques de béton visées » (cf. § 3.3.2 « Essais à réaliser sur béton frais et sur béton durci »).

Méthodes pour limiter le ressuage

Les phénomènes de ressuage peuvent être limités par :

- l'augmentation des quantités de fines dans le béton ;
- une modification du squelette granulaire ;
- des limitations des proportions d'eau dans le béton ;
- l'utilisation d'adjuvants spécifiques.

43. Ordre de grandeur : une hauteur de 10 m de béton frais correspond à une pression hydrostatique de plus de 0,2 MPa.

Impact du ressuage du béton

Le problème du ressuage est inhérent au béton et il est le même pour tous les types de pieu. Le ressuage ne peut pas être empêché mais doit être limité pour éviter des désordres. Ces derniers peuvent cependant être différents selon la perméabilité du terrain et/ou le type de pieu. **Quand le ressuage est faible**, les désordres ne sont pas concrètement observables et leurs conséquences sont intégrées dans les coefficients de sécurité pris sur les caractéristiques du béton. En revanche, **si le ressuage est trop important**, il va entraîner une hétérogénéité des propriétés du béton impactant notamment sa durabilité et sa résistance mécanique :

- **dans les terrains peu perméables ou avec la technique du pieu foré chemisé ou tubé (tube perdu) ou dans les terrains semi-perméables et avec la technique du pieu foré boue**, l'eau de ressuage suit les parois ou le cake (*Note 1*) créant des désordres à la périphérie du béton (*Note 2*). On peut aussi avoir des remontées le long des tubes soniques conduisant à des défauts de signal sonique (cf. § 2.1.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux forés » pour la présentation de la méthode sonique) ;
- **dans les terrains perméables, avec la technique du pieu foré tubé provisoire**, l'eau s'évacue dans le sol pouvant entraîner une baisse du niveau du béton.

En tarière creuse, cela conduit surtout à des risques de blocages dans la descente de la cage, car le béton n'est plus assez fluide (la perte d'eau par essorage conduit à un raffermissement du béton).

Note 1 : le cake a floclé sous le pH du béton.

Note 2 : les cheminées de remontée d'eau délavent le béton, particulièrement visibles en cas de terrassement.



CHAPITRE 6

**Aléas lors
du bétonnage**

6. ALÉAS LORS DU BÉTONNAGE

Le contexte géologique et hydrogéologique peut rendre plus risquée la bonne mise en œuvre du béton dans le forage, dont le bétonnage, en présence :

- de sols mous (§ 6.1) ;
- de circulations d'eau (§ 6.2) ;
- de vides ou karst (§ 6.3) ;
- d'éboulement (§ 6.4).

6.1 - BÉTONNAGE EN PRÉSENCE DE SOLS MOUS OU SOUS CHARGE

Les sols mous ou sous charge peuvent fluer, conduisant à :

- une augmentation de la section du pieu sous la poussée de la colonne de béton frais (*Note 1*) amplifiant les frottements négatifs (*Notes 2 et 3*), pouvant amener selon les cas, pour le limiter, à aucune précaution (*Note 4*) ou à l'usage d'une chemise (*Note 5*) ou d'un tube définitif ou provisoire (cf. chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classe 1 et 2 » et *Note 6*) ;
- une réduction locale de la section du pieu engendrée par les poussées horizontales (dites aussi « latérales » ou « transversales ») du sol (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») dans le cas particulier de pieux exécutés en bordure ou à travers des remblais édifiés tardivement sur une couche de sol compressible sans précautions particulières.

Ce phénomène peut aussi survenir avec la technique de réalisation des pieux tarière creuse (classe 2). Il est traité dans le § 4.1.3.

Note 1 : le béton frais, avant sa prise, exerce une pression horizontale de type hydrostatique.

Note 2 : la notion de frottements négatifs est présentée dans le fascicule 1 (§ 1.2).

Note 3 : la surconsommation conduit le pieu à adopter une forme tronconique, ce qui augmente la surface de frottement. L'effort dû aux frottements négatifs s'appliquant sur une surface augmente avec celle-ci, donc la surconsommation est préjudiciable à la portance du pieu en augmentant les frottements négatifs.

Note 4 : les frottements négatifs devront alors être considérés pour l'évaluation de la capacité portante du pieu.

Note 5 : en effet, la hauteur de la colonne de béton frais peut s'avérer insuffisante pour s'opposer au fluage du sol. Dès lors, l'emploi d'une chemise semi-rigide peut être envisagé.

Note 6 : dans le cas de l'usage d'un tube provisoire, il faudra prendre des précautions lors de son retrait (cf. § 5.7).

6.2 - BÉTONNAGE EN PRÉSENCE DE CIRCULATIONS D'EAU : RISQUES DE DÉLAVAGE DU BÉTON

Origines des circulations d'eau horizontales ou verticales

On peut trouver des circulations d'eau :

- importantes au sein de la nappe phréatique présente dans les formations alluviales grossières (*Note*) ;
- dans des fractures rocheuses ou dans des vides de dissolution de roches solubles ;
- ascendantes, voire artésiennes, générée par des nappes en charge (cf. ci-après) ;
- lorsqu'on travaille sous le niveau de l'eau, en effet les nappes sont alors en charge :
 - à l'abri d'un batardeau (cas des piles de pont en rivière par exemple),
 - sous le niveau de la nappe phréatique à l'abri d'un soutènement étanche d'une fouille terrassée (pieux d'ancrage de radier pour contrebalancer la poussée hydrostatique par exemple).

Note : il s'agit de couches très perméables noyées, de formations comportant des éléments de plus ou moins grandes dimensions tels que remblais rocheux, enrochements, éboulis de pentes, alluvions fluvio-glaciaires.

Cas d'une nappe artésienne avec fluide stabilisateur

En présence d'une nappe artésienne, la suspension de bentonite peut être alourdie par des ajouts augmentant la masse volumique (cf. Tableau 3.8 « Tableau récapitulatif des ajouts de traitement pour les suspensions de bentonite » dans le § 4.3.6.2 « Les contaminations et traitements des suspensions minérales » du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») pour s'opposer à la circulation ascendante de l'eau. Il faut alors faire attention aux risques de mélanges fluides et béton frais. Sinon, il peut être choisi de substituer, avant le bétonnage, cette suspension alourdie par un fluide stabilisateur classique en utilisant un tube dans lequel le niveau de la suspension sera maintenu à 1,5 m au-dessus du niveau piézométrique de la nappe artésienne (*Note*). Il faudra alors curer soigneusement le fond du forage, ainsi que le cake.

Note : le plus simple, dans de nombreux cas, consiste à créer une plateforme plus haute (remblai ou échafaudage) pour y positionner la foreuse et fichier un tube dans le sol pour permettre de maintenir le niveau d'eau ou de fluide stabilisateur nécessaire dans le tube.

Impact du délavage du béton en présence de circulations d'eau

Le risque en présence de circulations d'eau horizontales ou verticales est un délavement sur une hauteur plus ou moins importante du béton pendant sa mise en œuvre et jusqu'à sa prise (*Note*), pouvant conduire, entre autres, à une perte importante de résistance, à des vides (Figure 4.56) ou à une hauteur de recépage trop importante.

Note : le délavement a lieu jusqu'à ce que la prise du béton soit suffisante pour résister à l'entraînement des fines.

Figure 4.56 : Exemple de vide au centre du pieu créé par une circulation d'eau



Solutions en présence de circulations d'eau lors du bétonnage

Au moment de la conception des fondations, le calcul du gradient hydraulique doit être réalisé.

Afin de contrebalancer les circulations dans le fût du pieu en cours de bétonnage, il convient :

- pour des circulations verticales, de maintenir dans le forage un niveau d'eau (*Note 1*) supérieur ou égal à celui environnant, ou celui auquel l'eau s'est stabilisée dans le pieu (cas des nappes en charge ou artésiennes) ;
- pour des circulations horizontales, d'avoir recours à un chemisage (*Note 2*) avec éventuellement un tube provisoire (*Note 3*), ou bien à un tube définitif (*Note 4*) dans les cas les plus défavorables. Le choix entre ces techniques doit se faire en fonction de la perméabilité des formations et de la vitesse de ces circulations d'eau.

Note 1 : l'article 8.2.3.6 de la norme NF EN 1536+A1 préconise une surpression interne à l'intérieur du tube d'au moins 1 m au-dessus du niveau piézométrique le plus élevé, par une charge d'eau ou par tout autre fluide approprié, et elle doit être maintenue jusqu'à ce que le pieu foré ait été bétonné. L'article 8.2.3.7 précise cependant que cette charge peut être réduite :

- si une avance suffisante de tubage est mise en place ; ou
- si une hauteur suffisante de béton est maintenue pendant le bétonnage.

Note 2 : le type de chemisage (cf. § 2.4) doit être choisi en fonction de la nature du terrain :

- **dans les formations pulvérulentes et les rochers fissurés**, les chemises souples peuvent constituer pour un prix modique une protection efficace, tout en maintenant une valeur acceptable du frottement latéral (hors vide et frottements négatifs) et en limitant pour les surconsommations de béton ;
- **dans les enrochements et les terrains karstiques**, les chemises semi-rigides, bien que plus onéreuses et plus pénalisantes vis-à-vis du frottement latéral, sont préférables parce que moins fragiles et de mise en place plus facile.

Note 3 : dans le cas d'un tube provisoire (cf. chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 »), si la probabilité de circulation est forte, il convient, par prudence, de prévoir le chemisage du fût (cf. § 2.4) jusqu'à la base de la couche intéressée.

Note 4 : selon l'article 8.2.3.8 de la norme NF EN 1536+A1, si la couche porteuse peut être protégée de toute arrivée d'eau par la mise en place d'un tube fiché dans un sol de faible perméabilité (ou un sol ayant des fines couches perméables), alors le forage sous nappe peut être réalisé dans des conditions sèches. La réalisation d'un forage dans de telles conditions exige des vérifications supplémentaires pour détecter d'éventuelles arrivées d'eau et si ces arrivées surviennent, le forage doit être poursuivi sous charge d'eau (article 8.2.3.9 de la norme NF EN 1536+A1).

6.3 - BÉTONNAGE EN PRÉSENCE DE VIDES OU DE KARST

Risques pour le bétonnage en présence de vides ou de karst

Les risques lors du bétonnage (*Note*) de pieux dans des terrains présentant des vides ou de karst consistent essentiellement en la surconsommation parfois importante de béton.

Lors du bétonnage de pieux dans les terrains karstiques :

- **si le forage traverse le karst**, le béton fluide va remplir les fissures, et en cas de surconsommation plus importante, il convient d'intervenir en amont pour la limiter ;
- **si le karst se trouve au voisinage du forage**, la pression du béton fait céder la paroi de terrain séparant le forage du vide ou par ouverture des fissures et diaclases, il se produit des mouvements non maîtrisés du béton encore fluide susceptibles de générer des inclusions de sol ou de fluide stabilisateur dans le fût du pieu.

Note : les risques en présence de vides ou de karst lors du forage du pieu sont traités dans le § 5.3.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ».

Difficulté de connaître la géométrie du réseau des terrains karstiques

Il est difficile de décider de la technique optimale (efficace et la moins onéreuse) à utiliser pour la réalisation du pieu en terrain karstique, car les méthodes de reconnaissance de sol au moment de la rédaction du guide ne permettent pas d'identifier avec précision la géométrie du réseau karstique (position, géométrie et ampleur – *Note*). Il convient néanmoins de multiplier le nombre de sondages.

Note : les cavités peuvent être de l'ordre de quelques décimètres cubes à plusieurs mètres cubes.

Solutions pour le bétonnage en présence de vides ou de karst

En cas de présence de vides ou de karst, **le recours à un tubage (*Note 1*) ou à une chemise semi-rigide (*Note 2*)** permet de **limiter les pertes au cours du bétonnage**, risque de surconsommation parfois très importante de béton. En cas d'utilisation de tube de travail, il faudra faire attention lors de son retrait (cf. § 5.7).

En cas de vide important, afin de se prémunir contre les risques de surconsommation de béton :

- **les vides peuvent être préalablement colmatés**, avant reprise du forage (et éventuellement du tubage – cf. chapitre 5 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») à travers ce terrain ainsi reconstitué (Figure 4.57). Le remplissage peut se faire :
 - par des matériaux sablo-graveleux compactés à l'aide du trépan,
 - par une grave ciment (plastique et autodurcissante),
 - par des matériaux décomprimés, peu compacts, voire mous, ce qui pose de grosses difficultés, surtout en cas de vides importants,
 - par un béton maigre (*Note 4*) ;
- **le terrain peut être injecté** préalablement de coulis sous pression à partir d'un forage pilote.

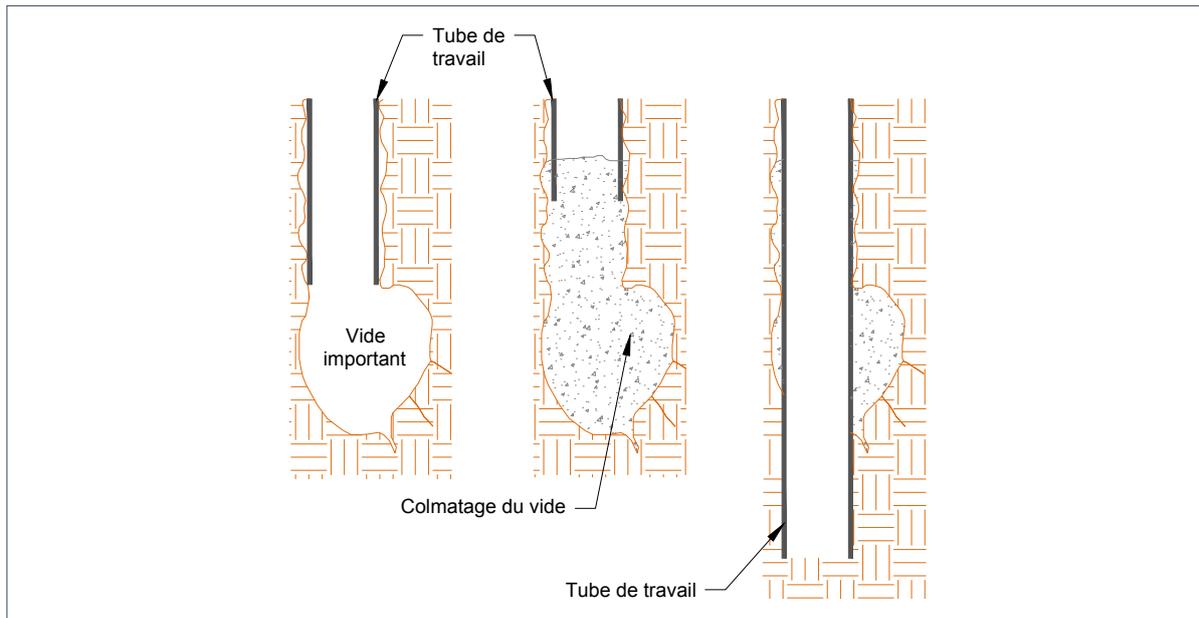
Note 1 : le tubage peut aussi permettre de réduire la déviation du forage (cf. § 5.3.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux de classes 1 et 2 »).

Note 2 : l'utilisation des chemises n'est valable que pour limiter les pertes de béton (sous réserve qu'elles puissent résister à la pression du béton) et dans la mesure d'une cavité de volume limité (Note 3), en cas de cavité importante, il est préférable d'utiliser les méthodes de forage à l'abri d'un tube de travail ou définitif suffisamment épais pour supporter un enfoncement par havage après un forage préalable ou par battage, sauf en cas de milieu karstique (cf. ci-après).

Note 3 : mais difficile à identifier, cf. « Difficulté de connaître la géométrie du réseau des terrains karstiques » ci-avant.

Note 4 : après la prise du béton (soit une demi-journée plus tard), on peut recommencer à forer (et éventuellement à tuber) au travers du béton maigre qui a comblé la cavité.

Figure 4.57 : Schéma de principe d'un remplissage de karst



6.4 - BÉTONNAGE EN CAS D'ÉBOULEMENT

Éboulements associés à la nature du sol, à la présence d'eau et aux conditions d'exécution

Les éboulements sont liés à la nature du sol, à la présence d'eau et aux conditions d'exécution, et plus précisément :

- dans les sols cohérents de consistance moyenne à faible en raison des circulations d'eau dans les nappes en charge (Note 1) au sein des lits sableux ou graveleux souvent présents dans ces formations, et conduisant à des éboulements localisés ;
- dans les remblais construits trop récemment sur sols compressibles et sans précautions particulières, en raison des poussées latérales qu'ils engendrent, pouvant provoquer l'éboulement des forages exécutés à leur pied ;
- dans les formations cohérentes très peu consistantes forées avec un fluide stabilisateur, lorsque la proportion de sable augmente, l'efficacité du fluide stabilisateur devient souvent aléatoire, conduisant ainsi à une perte de tenue des parois ;
- dans les terrains pulvérulents sous nappe (§ 5.4.1 du fascicule 3 « Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2 ») ;
- dans les terrains pulvérulents hors d'eau comportant des éléments de grandes dimensions de type remblais rocheux, enrochements, éboulis de pente, alluvions fluvio-glaciaires (Note 2).

Note 1 : seules des reconnaissances géotechniques et des études hydrogéologiques préalables permettent d'apprécier la probabilité de telles circulations.

Note 2 : la seule solution est le recours au tube provisoire, qu'il convient de mettre en place par louvoisement plutôt que par battage ou par vibration, et il faut préférer aux ensembles trépan-soupape des outils plus élaborés tels que les trépans-bennes ou les trépans rotatifs.

Risques en présence d'éboulement lors du bétonnage

Les éboulements en cours de bétonnage sont parmi les plus importants incidents susceptibles d'affecter la réalisation d'un pieu exécuté sans tube de travail. Si l'éboulement est détecté avant la fin de la réalisation du pieu, il est par exemple envisageable de sortir la cage, de réexcaver le béton avant la prise, puis de refaire le pieu.

Solutions aux risques d'éboulements

Les solutions vont dépendre de la technique choisie pour la tenue des parois :

- **dans le cas du tube provisoire**, justement choisi dans le but d'empêcher de tels éboulements, la mise en œuvre d'une chemise ne s'impose pas, puisque l'on pallie les incidents éventuels, précisément par le choix du tube de travail ;
- **dans le cas d'un forage sous fluide stabilisateur**, ce procédé devrait permettre une tenue correcte des terrains (*Note 1*) sans qu'il soit nécessaire d'adjoindre par la suite une chemise ;
- **dans le cas de technique de forage mal adaptée**, le recours à des chemises semi-rigides (cf. § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») en cours d'exécution permet d'éviter une surconsommation excessive de béton qui pourrait se révéler plus coûteuse (*Note 2*) que la mise en œuvre de la chemise.

Note 1 : on peut d'ailleurs dire que, même si certains éboulements se produisent en cours de forage, il est conseillé de laisser le béton remplir les vides formés (en dépit des surconsommations qui en résultent), afin d'assurer un bon contact, nécessaire à la mobilisation du frottement latéral et à une meilleure stabilité horizontale.

Note 2 : on n'oubliera pas toutefois d'inclure dans cette estimation le prix des dispositions confortatives (injections, remplissage de l'espace annulaire...).

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [4.1] Ifsttar, *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, Marne-la-Vallée, coll. « Techniques et méthodes » (GTI5), 2017.
- [4.2] EFFC/DFI, *Guide du Béton de Fondations Profondes – Mis en Œuvre au Tube Plongeur*, Groupe de Travail Béton conjoint EFFC/DFI, second edition, 2018 ; version française, 2021.
- [4.3] Cardona G., Glandy M. & Demarcq B., *Pathologies des pieux réalisés à la tarière continue, Sinistres en géotechnique, Publication de la Géotechnique suisse*, Journée d'étude, Zürich, 26 mai 2016.
- [4.4] FHWA-NHI-10-016, *Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods*, 2010.
- [4.5] ICE (Institution of Civil Engineers), *Specification for Piling and Embedded Retaining Walls*, third edition, 2016.
- [4.6] EFFC/DFI, *Guide to Support Fluids for Deep Foundations*, Groupe de Travail Béton conjoint, first edition, 2019.

FASCICULES DU CCTG (CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES)

Fascicule 65 du Cahier des clauses techniques générales (CCTG) – Applicable aux marchés de génie civil, *Exécution des ouvrages de génie civil en béton*, décembre 2017 (paru en mai 2018)

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 OU FASCICULES DE DOCUMENTATION

- FD P18-011** Béton – Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons, 2022
- FD P18-464** Béton – Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction, 2021
- FD P18-480** Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, 2022
- NF DTU 13.2 P1-1** Travaux de bâtiment - Fondations Profondes – Partie 1-1 : éléments relatifs à l'exécution - Cahier des clauses techniques types, 2020
- NF EN 197-1** Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2012
- NF EN 206+A2/CN** Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206+A2, 2022

- NF EN 933-3** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement, 2012
- NF EN 933-6** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 6 : évaluation des caractéristiques de surface - Coefficient d'écoulement des granulats, 2014
- NF EN 934-2+A1** Adjuvants pour bétons, mortier et coulis – Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 2012
- NF EN 1536+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés, 2015
- NF EN 1538+A1** Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Parois moulées, 2015
- NF EN 12350-2** Essais pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement, 2019
- NF EN 12350-5** Essais pour béton frais – Partie 5 : essai d'étalement à la table à choc, 2019
- NF EN 12350-6** Essais pour béton frais – Partie 6 : masse volumique, 2019
- NF EN 12390-3** Essais pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, 2019
- NF EN 13670/CN** Exécution des structures en béton - Complément national à la NF EN 13670 : 2013, 2013
- NF EN 14647** Ciment d'aluminates de calcium - Composition, spécifications et critères de conformité, 2006
- NF EN ISO 10414-1** Industries du pétrole et du gaz naturel - Essais in situ des fluides de forage – Partie 1 : fluides aqueux, 2010
- NF EN ISO 22476-12** Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place – Partie 12 : essai de pénétration statique au cône à pointe mécanique, 2010
- NF P15-314** Liants hydrauliques - Ciment prompt naturel, 1993
- NF P15-317** Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer, 2021
- NF P15-319** Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, 2014
- NF P18-545** Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, 2021
- NF P94-500** Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications, 2013
- NF P94-262 COMPIL1** Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, 2018
- XP P18-468** Béton - Essai pour béton frais - Ressuage, 2022
- XP P18-469** Béton - Essai pour béton frais - Temps d'écoulement au cône, 2019
- XP P18-475** Béton - Essai pour béton frais - Ressuage forcé, 2022



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 : 978-2-37180-712-9 (pdf) - 978-2-37180-713-6 (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 4 Le bétonnage des pieux forés

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

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

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



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

