

Les
références

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 3

Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



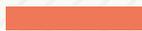
LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 3

**Exécution du forage des pieux forés
de classes 1 et 2**



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.

RREMERCIEMENTS

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 3 - Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2.*

Lyon : Cerema, 2025.

Collection : Les références.

ISBN : 978-2-37180-710-5 (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 : Franki-Fondation.

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

Introduction	11
---------------------	-----------

CHAPITRE 2

Les techniques et étapes de forage	13
---	-----------

2.1 - Les techniques de forage des pieux forés de classe 1	14
---	-----------

2.1.1 - Les deux principales techniques de déstructuration du terrain lors du forage des pieux de classe 1	14
--	----

2.1.2 - Les étapes de forage par rotation pour la réalisation des pieux de classe 1	14
---	----

2.1.3 - Les étapes de forage par percussion pour la réalisation des pieux de classe 1	16
---	----

2.1.4 - Délais entre la fin de l'excavation et le début du bétonnage pour les pieux de classe 1	17
---	----

2.2 - Les deux techniques de forage des pieux forés de classe 2 (tarière creuse)	17
---	-----------

2.2.1 - Les différentes étapes du forage à la tarière creuse simple rotation	19
--	----

2.2.2 - Les différentes étapes du forage à la tarière creuse double rotation	20
--	----

2.2.3 - Les enregistrements de paramètres des pieux de classe 2	22
---	----

2.2.4 - Spécificités du forage des pieux de classe 2 (tarière creuse)	26
---	----

2.3 - Critères de choix des techniques d'excavation	30
--	-----------

2.4 - Généralités sur le forage et difficultés associées	32
---	-----------

2.4.1 - Généralités sur le forage	32
-----------------------------------	----

2.4.2 - Les conditions d'arrêt du forage	33
--	----

2.4.3 - Adaptations possibles pour palier le refus	34
--	----

2.5 - Curage et nettoyage du forage des pieux	34
--	-----------

2.5.1 - Curage des pieux	34
--------------------------	----

2.5.2 - Principe de l'air lift ou de l'émulseur pour le nettoyage du fluide stabilisateur dans le forage	36
--	----

CHAPITRE 3

Les matériels d'excavation	37
-----------------------------------	-----------

3.1 - Les machines de forage	38
-------------------------------------	-----------

3.1.1 - Composantes des machines de forage	38
--	----

3.1.2 - Paramètres et caractéristiques des machines de forage	43
---	----

3.2 - Matériels de forage	51
3.2.1 - Le kelly	52
3.2.2 - Outils d'excavation par rotation pour la réalisation des pieux de classe 1	53
3.2.3 - Matériels d'excavation pour la réalisation des pieux de classe 2 (tarière creuse)	62
3.2.4 - Autres outils d'excavation pour la réalisation des pieux de classe 1	70
3.2.5 - Outils moins courants pour la réalisation des pieux de classe 1	81
3.2.6 - Outils pour la modification de la géométrie du pieu	82
3.2.7 - Dents équipant les outils de forage	83

CHAPITRE 4

Techniques de tenue des parois par fluide stabilisateur **85**

4.1 - Introduction	86
4.2 - Caractéristiques et principe des fluides stabilisateurs	89
4.2.1 - Les suspensions minérales	89
4.2.2 - Les solutions de polymères	92
4.2.3 - L'eau comme fluide stabilisateur	94
4.2.4 - Mélange bentonite et polymères	95
4.3 - Cycle de vie des fluides stabilisateurs	95
4.3.1 - Schéma de principe du cycle de vie des fluides stabilisateurs	96
4.3.2 - Préparation des fluides stabilisateurs	97
4.3.3 - Caractéristiques attendues des fluides stabilisateurs	105
4.3.4 - Pompage des fluides stabilisateurs	108
4.3.5 - Forage avec fluide stabilisateur	109
4.3.6 - Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs	114
4.3.7 - Contrôle des propriétés des fluides stabilisateurs	117
4.3.8 - Contrôle des fuites de fluides stabilisateurs et mise en dépôt des fluides stabilisateurs usés	118
4.3.9 - Mesures de sécurité lors de la préparation et de l'usage de fluides stabilisateurs	120
4.4 - Comparaison entre les suspensions de bentonite et les solutions de polymères	121
4.4.1 - Comparaison des suspensions de bentonite et des solutions de polymères selon leurs particularités	121
4.4.2 - Comparaison des suspensions de bentonite et des solutions de polymères concernant leur utilisation	122

CHAPITRE 5

Techniques de tenue des parois par tubage

123

5.1 - Généralités sur le tubage	124
5.2 - Les différents types d'enveloppes	125
5.2.1 - Les tubes « guide » ou viroles et murettes-guides	126
5.2.2 - Les tubes récupérés ou perdus	128
5.3 - Cas d'usage de la technique des pieux forés tubés	134
5.3.1 - En cas de vides ou de karst	134
5.3.2 - En cas d'éboulements	134
5.3.3 - En cas de frottements négatifs	136
5.3.4 - En cas de poussées latérales/transversales du sol	136
5.4 - Incidents particuliers à l'utilisation de tube	137
5.4.1 - Risques dans les sols pulvérulents noyés ou cohérents mous	137
5.4.2 - Risques en cas de substratum rocheux	138
5.4.3 - Risques associés au retrait du tube de travail	139
5.4.4 - Accrochage de l'outil de forage	139
5.4.5 - Risques associés au type de soudure des tubes	140
5.4.6 - Risque associé au recépage des tubes	140

CHAPITRE 6

Recommandations en fonction de la nature des terrains

141

6.1 - Adéquation des outils de forage aux natures de terrain	142
6.1.1 - Les outils d'excavation par rotation	142
6.1.2 - Les autres outils d'excavation	145
6.2 - Adéquation des dents et des molettes aux natures de terrain	146
6.3 - Adéquation des méthodes de tenue de parois aux natures de terrain	147
6.4 - Adéquation de la puissance des machines de forage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	148

CHAPITRE 7

Contrôles lors de l'exécution des pieux

151

7.1 - Contrôle sur site	152
7.1.1 - Contrôle au démarrage du chantier	152
7.1.2 - Contrôle en début de forage de chacun des pieux	152
7.1.3 - Contrôle en cours de forage	153
7.1.4 - Contrôle en fin de forage	154

7.2 - Techniques de mesure et étalonnage des paramètres de forage	156
7.2.1 - Mesure de la profondeur	156
7.2.2 - Mesure de la hauteur d'extraction en vue de l'éjection de l'obturateur rétractable des pieux de classe 2 (tarière creuse)	157
7.2.3 - Mesure de la verticalité du forage	157
7.2.4 - Mesure du couple de rotation	158
7.2.5 - Mesure de la rotation de la tarière creuse (pieux de classe 2)	158

CHAPITRE 8

Exemples 159

8.1 - Choix de techniques d'excavation	160
8.1.1 - Exemple 1 : Pieu foré tubé et pieu foré boue	161
8.1.2 - Exemple 2 : Pieu foré tube récupéré, tarière creuse et foré boue dans un contexte maritime	167
8.1.3 - Exemple 3 : Pieu foré tube récupéré, tarière creuse, foré boue et foré simple	173
8.2 - Avantage de la polyvalence des machines de forage	181

Annexe 183

Les essais de contrôle des fluides stabilisateurs	184
La balance à boue ou Baroïd pour mesure de la densité du fluide stabilisateur	184
Le cône de Marsh pour la viscosité du fluide stabilisateur	185
Le pH mètre ou le papier pH pour le pH	186
L'éluotriomètre pour la teneur en sable	186
Le filtre-pressé pour le filtrat (eau libre) et l'épaisseur de cake	187
Autres essais pour le contrôle des fluides stabilisateurs	188

Bibliographie 191

Ouvrages	192
Fascicules du CCTG (Cahier des clauses techniques générales)	192
Normes afnor	192
Normes étrangères	193

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

Introduction

1. INTRODUCTION

Pour équilibrer les descentes de charge qui lui sont appliquées, un pieu peut mobiliser la résistance du sol selon différents mécanismes : frottement latéral, mobilisation de la pointe pour un pieu en compression, réaction frontale en cas de sollicitations latérales. Ces mécanismes sollicitent des volumes de sol dont une part significative est potentiellement affectée par la phase d'exécution du pieu.

La performance d'un pieu foré est donc directement liée à la capacité à conserver les propriétés mécaniques du sol lors de sa mise en œuvre. Une bonne exécution du forage (au sens large, c'est-à-dire la foration, mais aussi la tenue des parois...) est donc essentielle.

L'exécution du forage nécessite de savoir travailler dans des sols ou des roches hétérogènes de natures variées (parfois très durs, parfois mous et peu stables), sous eau, sur des profondeurs et/ou des diamètres importants. Pour être bien faite, elle passe par le choix des techniques les plus appropriées, mises en œuvre avec les matériels en adéquation avec ces techniques et les contraintes du projet, et exécutées selon les règles de l'art par du personnel qualifié, capable de s'adapter aux aléas du chantier.

Les choix des techniques doivent être mûrement réfléchis en amont, pour éviter des désagréments tels qu'un changement de machine/matériel en cours de chantier, une cadence faible, une perte de capacité portante. Il est donc important de faire un diagnostic complet des contraintes inhérentes au site et au projet afin de prévoir les méthodes les plus adaptées, d'où l'importance des reconnaissances géotechniques et de l'expertise des entreprises de fondations profondes.

Dans la pratique, il est courant de combiner les approches présentées dans ce guide pour offrir la réponse la plus appropriée.

Le forage des fondations profondes peut être réalisé :

- avec un fluide stabilisateur pour maintenir les parois durant le forage et le bétonnage (cf. chapitre 4) ;
- à l'abri d'un tube (cf. chapitre 5) ;
- à sec (Note).

Note : cette situation est plutôt rare, car les terrains requérant l'usage de fondations profondes sont généralement noyés (nappe phréatique proche de terrain naturel). Elle se produit parfois dans les terrains cohérents très peu perméables.

Ce fascicule présente :

- les techniques et les étapes de forage lors de la réalisation des cinq catégories de pieux forés de la classe 1 et de la catégorie 6 de la classe 2 au sens de la norme NF P94-262 (chapitre 2) ;
- les principaux matériels d'excavation utilisés (chapitre 3) ;
- les techniques de tenue des parois pour la réalisation des pieux de classe 1 (Note) :
 - par des fluides stabilisateurs (chapitre 4),
 - par tubage (chapitre 5) ;
- les points forts et les limites des différentes techniques, des recommandations pour leur mise en œuvre et leur bonne exécution, via des tableaux de synthèse (chapitre 6) ;
- quelques éléments sur le contrôle des pieux lors de l'exécution sont fournis dans le chapitre 7 ;
- et enfin quelques exemples (chapitre 8).

Note : lorsque le contexte nécessite la mise en œuvre d'une technique de tenue des parois, il est possible de faire appel à des fluides stabilisateurs ou à un tubage. Le fluide, qu'il s'agisse d'une suspension minérale ou d'une solution de polymères requiert une emprise au sol importante pour l'installation de la centrale de fluide stabilisateur (cf. § 4.3.2.3). Quant au recours au tubage, il est conditionné par la faisabilité de mise en place et le cas échéant du retrait des tubes par vibration, rotation ou louvoiment.

CHAPITRE 2

Les techniques et étapes de forage

2. LES TECHNIQUES ET ÉTAPES DE FORAGE

2.1 - LES TECHNIQUES DE FORAGE DES PIEUX FORÉS DE CLASSE 1

2.1.1 - LES DEUX PRINCIPALES TECHNIQUES DE DÉSTRUCTURATION DU TERRAIN LORS DU FORAGE DES PIEUX DE CLASSE 1

Deux principales techniques de déstructuration du matériau à excaver peuvent être mises en œuvre dans le cadre du forage des pieux forés de classe 1 :

- **par rotation** (§ 2.1.2), dans la majorité des cas (*Note 1*) via une table de rotation (cf. § 3.1.1 « Composantes des machines ») qui transmet le mouvement (rotation et poussée) à un arbre de transmission en acier, appelé « kelly » (cf. § 3.2.1), support de l'outil de forage ;
- **par percussion** (§ 2.1.3), qui consiste à broyer le sol par l'application de chocs répétés, à l'aide d'un trépan (§ 3.2.4.1) ou de certaines bennes (*Note 2*), et qui est principalement réservé pour l'excavation des matériaux les plus résistants ou la traversée d'obstacles ou pour des besoins d'exécution de forage à une distance importante des chenilles de la foreuse ou de la grue (Figure 3.26 « Distance entre le forage et la machine de forage » dans le § 3.1.2.2 « Paramètres et caractéristiques indicatifs pour les pieux forés de classe 1 »).

Le forage par marteau fond de trou (§ 3.2.4.4) profite des avantages de la rotation et de la percussion pour pulvériser les matériaux résistants, on parle alors de roto-percussion (*Note 3*).

Contrairement aux pieux de classe 2 (tarière creuse – cf. § 2.2), le forage des pieux de classe 1 peut nécessiter une tenue des parois par :

- **fluide stabilisateur** (cf. chapitre 4) ;
- **tubage** (cf. chapitre 5) ou **chemisage** (*Note 4*).

Note 1 : la haveuse (cf. § 3.2.4.3) fonctionne aussi par rotation de ces deux roues dentées, mais cette dernière se fait selon l'axe orthogonal à celui du forage et ne se fait pas via une table de rotation.

Note 2 : la benne (§ 3.2.4.2) peut être utilisée seule ou associée au trépan.

Note 3 : la roto-percussion est surtout performante en terrain très dur. Son utilisation est peu développée en France pour les pieux.

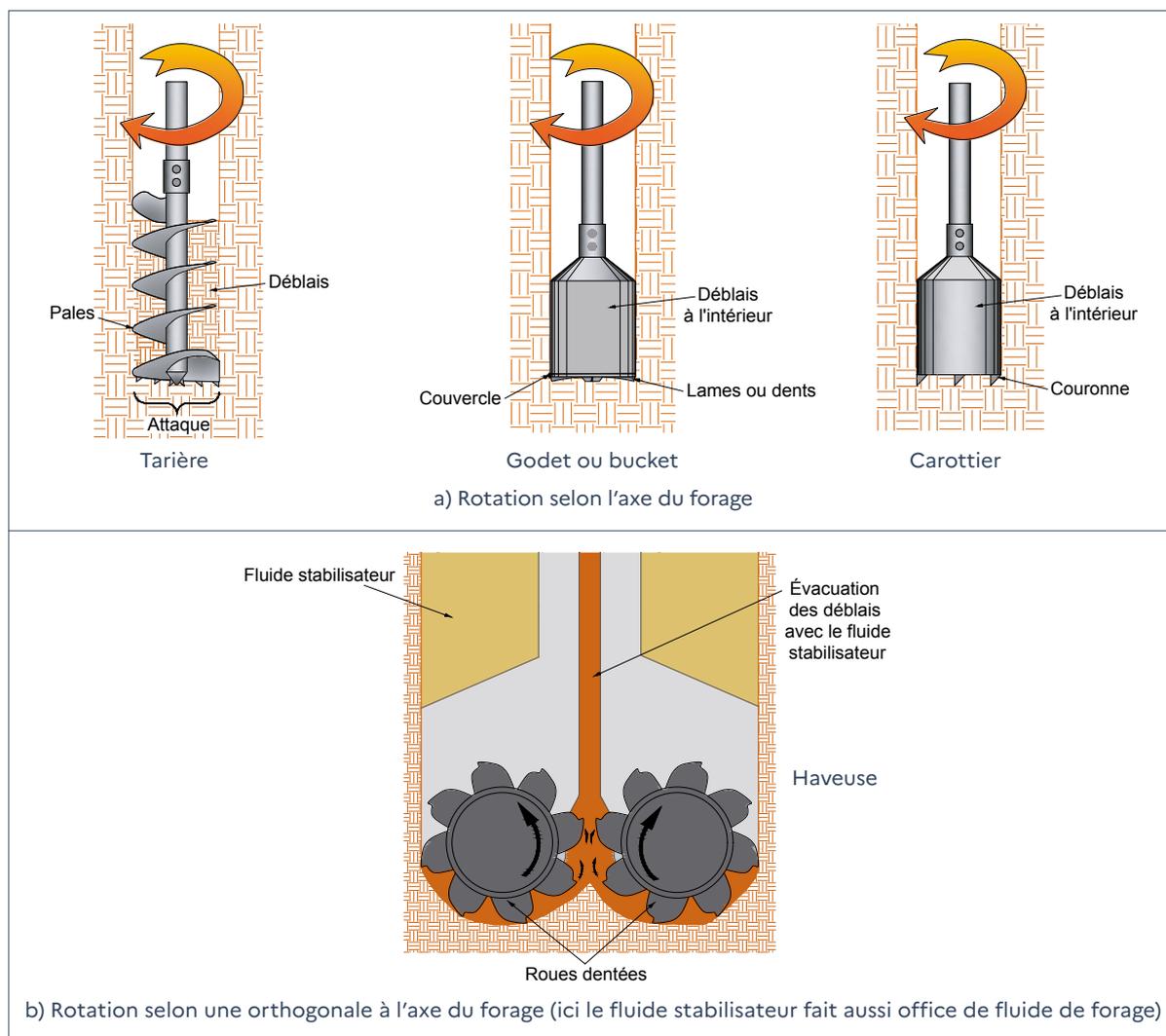
Note 4 : le chemisage ne permet pas la tenue des parois pendant le forage mais de désolidariser le béton du sol. De ce fait, il est traité dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

2.1.2 - LES ÉTAPES DE FORAGE PAR ROTATION POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 1

Le forage par rotation pour la réalisation des pieux de classe 1 peut faire intervenir différents outils de forage (§ 3.2.2), comme la tarière, le godet (appelé aussi « bucket ») ou le carottier (Figure 3.1.a). Ces outils travaillent en rotation selon l'axe de forage. En revanche, la haveuse⁽¹⁾ (§ 3.2.4.3) réalise le forage par rotation de roues dentées autour d'un axe orthogonal à celui du forage (Figure 3.1.b).

1. La haveuse est aussi appelée « fraise » (Annexe A de la norme NF EN 1538+A1). Selon les entreprises, ces machines portent des noms différents, par exemple « Hydrofraise[®] », « Rotoforeuse[®] », « Hydromill[®] », « Cutter[®] ».

Figure 3.1 : Directions de rotation des outils de forage



En fonction des outils en rotation selon l'axe du forage, les étapes de l'excavation peuvent varier et sont donc décrit ci-après.

Les différentes étapes du forage à la tarière

Le principe d'excavation avec la tarière (cf. Figure 3.1.a et § 3.2.2.1) repose sur les étapes suivantes :

1. **déstructuration du matériau** au niveau de l'attaque de l'outil ;
2. remplissage des pales par les déblais ;
3. **extraction de la tarière**, une fois les pales remplies ;
4. **dépôt du matériau excavé** à côté du forage par inversion rapide du sens de rotation de la tarière ;
5. => 1. **réintroduction de la tarière** dans le forage pour une nouvelle passe.

En fin de forage, **curage du fond de forage** par un outil adéquat (cf. § 2.5).

Les différentes étapes du forage au godet de forage

Le principe d'excavation avec le godet de forage (cf. Figure 3.1.a et § 3.2.2.2) repose sur les étapes suivantes :

1. **déstructuration du terrain** par l'action des lames ou des dents mises en rotation ;
2. **emmaganage du sol à l'intérieur du godet** via les ouvertures situées à la base de l'outil ;
3. emprisonnement des déblais par des clapets ;
4. extraction de l'outil rempli ;
5. déchargement du matériau à côté du forage par ouverture du couvercle ;
6. => 1. **réintroduction du godet** dans le forage pour une nouvelle passe.

En fin de forage, **curage du fond de forage** par un outil adéquat (cf. § 2.5).

Les différentes étapes du forage au carottier

Le principe d'excavation avec le carottier (cf. Figure 3.1.a et § 3.2.2.3) repose sur les étapes suivantes :

1. **découpage d'une carotte** par déstructuration du matériau au niveau de la couronne ;
2. **deux possibilités :**

1 ^{er} cas : le cylindre de sol remonte avec le carottier (Note 1)	2 ^e cas : le sol n'est pas remonté avec le carottier (Note 2)
--	---
3. **évacuation des déblais :**

La carotte est détruite pour vider le carottier. L'outil communément utilisé est un petit profilé métallique soudé sur un support posé sur le sol (cf. Figure 3.47.b dans le § 3.2.2.2) (Note 3).	La carotte ou les morceaux de carotte restés au fond du trou sont détruits par trépanage. Les débris en résultant sont alors extraits grâce à l'utilisation d'une benne ou d'un godet.
---	--
4. => 1. **réintroduction du carottier dans le forage** pour une nouvelle passe.

En fin de forage, **curage du fond de forage** par un outil adéquat (cf. § 2.5).

Note 1 : de petits mouvements latéraux du carottier (permis par la surlargeur de la couronne par rapport au diamètre extérieur du cylindre du corps du carottier) ont provoqué la rupture par cisaillement de la base du cylindre de roche découpé tout en laissant ce cylindre de roche coincé dans le carottier.

Note 2 : plusieurs possibilités :

- la carotte n'a pas pu être cisailée et est restée solidaire du massif de roche sous-jacent ;
- la carotte a été cisailée, mais elle a glissé du carottier et n'a pu être remontée avec lui ;
- la carotte a été cassée en plusieurs morceaux de formes variées qui n'ont pu rester de ce fait dans le carottier.

Note 3 : la carotte est percutée verticalement sur le profilé par le foreur qui utilise à cet effet tout le poids du kelly portant le carottier.

2.1.3 - LES ÉTAPES DE FORAGE PAR PERCUSSION POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 1

Les différentes étapes du forage avec alternance du trépan et de la benne

Le forage par percussion fait appel principalement à deux outils qui agissent alternativement (Figure 3.2), le trépan (§ 3.2.4.1) et la benne (§ 3.2.4.2).

Le principe d'excavation avec le trépan repose sur les étapes suivantes :

1. **déstructuration du terrain** par les chocs du trépan au fond du forage ;
2. **sortie du trépan ;**
3. **évacuation des déblais** à la benne :
 - a. récupération des déblais par activation des mâchoires,
 - b. remontée de la benne,
 - c. libération du matériau via l'ouverture des mâchoires à côté du forage (Figure 3.2) ;
4. => 1. **réintroduction du trépan** dans le forage pour répéter l'opération.

En fin de forage, **curage du fond de forage** par un outil adéquat (cf. § 2.5).

Figure 3.2 : L'utilisation alternée du trépan et de la benne



Les différentes étapes du forage à la benne

Le principe d'excavation à la benne (cf. § 3.2.4.2) repose sur les étapes suivantes :

1. **creusement du terrain** par activation des mâchoires de l'outil au fond du forage ;
2. **évacuation des déblais** ainsi récupérés en ressortant l'outil ;
3. **libération du matériau** via l'ouverture des mâchoires à côté du forage (Figure 3.2) ;
4. => 1. **réintroduction de la benne** dans le forage pour répéter l'opération.

En fin de forage, **curage du fond de forage** par un outil adéquat (cf. § 2.5).

Le forage à la haveuse

Le forage à la haveuse (cf. § 3.2.4.3) se fait en continu avec :

- **une déstructuration du terrain** par ses deux roues dentées (Figure 3.1.b) ;
- **une évacuation des déblais** par circulation inverse du fluide stabilisateur (*Note*).

Note : la suspension minérale (cf. § 4.2.1) est aspirée par une pompe située en partie inférieure de l'outil, entre les deux roues dentées, ce qui entraîne les déblais produits par ces roues. La suspension minérale (boue) et les déblais sont alors extraits de l'excavation pour aller dans une installation de dessablage séparant boue et déblais (cf. § 4.3.6). La suspension minérale dessablée est ensuite renvoyée en tête de l'excavation pour maintenir le niveau de fluide stabilisateur dans l'excavation.

Le forage au marteau fond de trou

Le principe d'excavation avec le marteau fond de trou (§ 3.2.4.4) se fait en continu avec :

- **une déstructuration du terrain** par les percussions et la rotation du marteau fond de trou au fond du forage ;
- **une évacuation des déblais** par de l'air comprimé injecté au fond du forage. Le débit d'air doit être adapté au diamètre du pieu pour permettre l'évacuation des déblais.

2.1.4 - DÉLAIS ENTRE LA FIN DE L'EXCAVATION ET LE DÉBUT DU BÉTONNAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 1

Pour les pieux de classe 1, le délai entre la fin de l'excavation et le début du bétonnage doit être aussi réduit que possible. Le forage ne doit être laissé ouvert que pendant le temps nécessaire aux opérations préalables au bétonnage, comme le rappelle l'article 8.2.1.7 de la norme NF EN 1536+A1 :

- **le nettoyage et/ou le dessablage de l'excavation** (cf. § 2.5) ;
- éventuellement **le traitement des fluides stabilisateurs** (cf. § 4.3.6) ;
- la réalisation **des diverses vérifications** (si nécessaire – cf. § 7.1.4) ;
- **la mise en place des armatures** (s'il y en a – cf. chapitre 9 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés »).

2.2 - LES DEUX TECHNIQUES DE FORAGE DES PIEUX FORÉS DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Dans la technique de la tarière creuse, les pieux de classe 2 sont réalisés au moyen d'**une tarière creuse continue**, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux exécutés dans le sol, vissée de manière continue jusqu'à la profondeur désirée, puis **bétonnés** en continu par l'âme creuse de la tarière **durant l'extraction de l'outil** de forage sans dévisser. On distingue :

- **la tarière creuse simple rotation** (Figure 3.3), comprenant une table de rotation mettant en action la tarière. **La stabilité du forage** est assurée par le matériau remplissant l'hélice de la tarière (Figure 3.4) ;
- **la tarière creuse double rotation** correspondant à une tarière creuse tubée provisoirement (*Note*), où la tarière est logée dans un tube sur toute la hauteur du forage (Figure 3.5). Le forage se réalise par une double rotation du tube et de la tarière.

L'exécution des pieux à la tarière creuse (Figure 3.6 dans le § 2.2.1 et chapitre 3 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») est régie par la norme NF EN 1536+A1.

Note : du fait du tube, certaines précautions ou dispositions données dans le présent chapitre pour la tarière simple rotation peuvent ne pas être pertinentes.

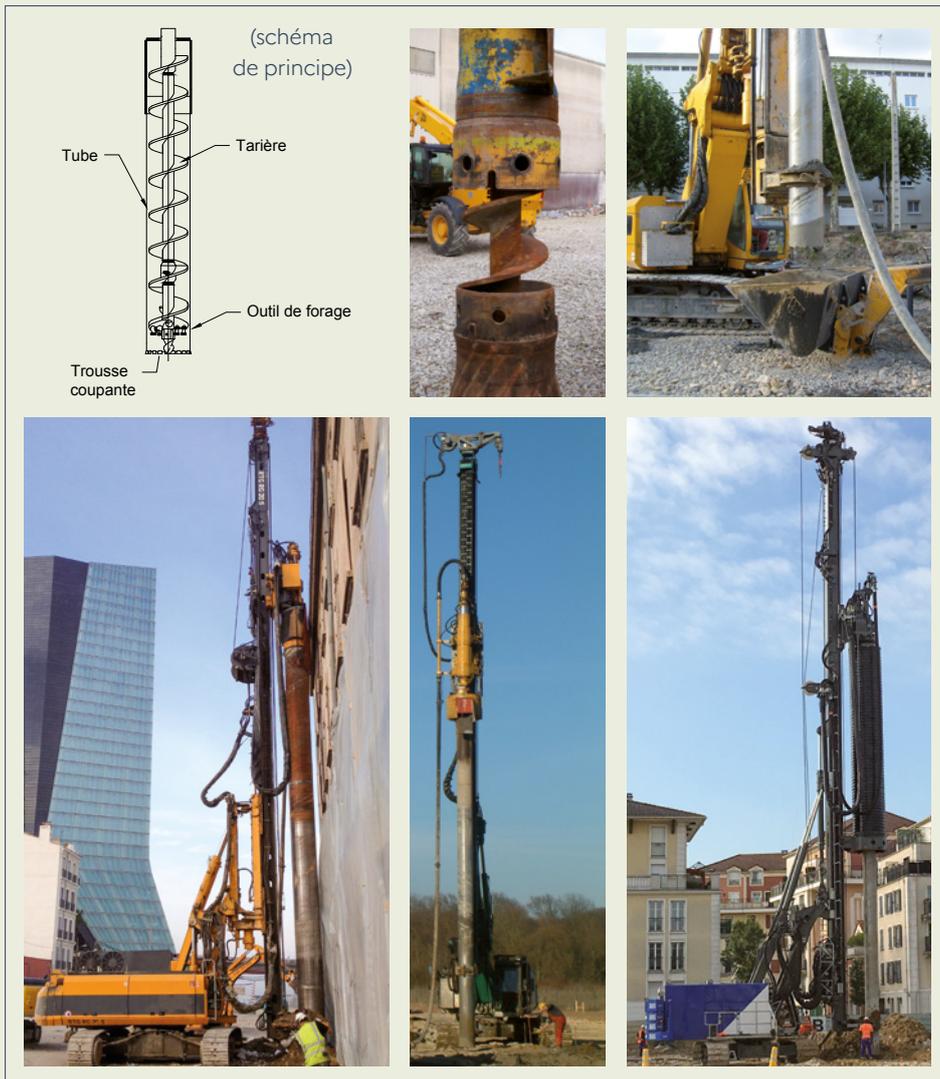


Figure 3.3 :
Exemple de tarière creuse
simple rotation

Figure 3.4 :
Matériau remplissant
l'hélice de la tarière
assurant la stabilité du forage



Figure 3.5 : Exemples de tarière creuse à double rotation



2.2.1 - LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU FORAGE À LA TARIÈRE CREUSE SIMPLE ROTATION

Le principe d'excavation repose sur les étapes suivantes (Figure 3.6) :

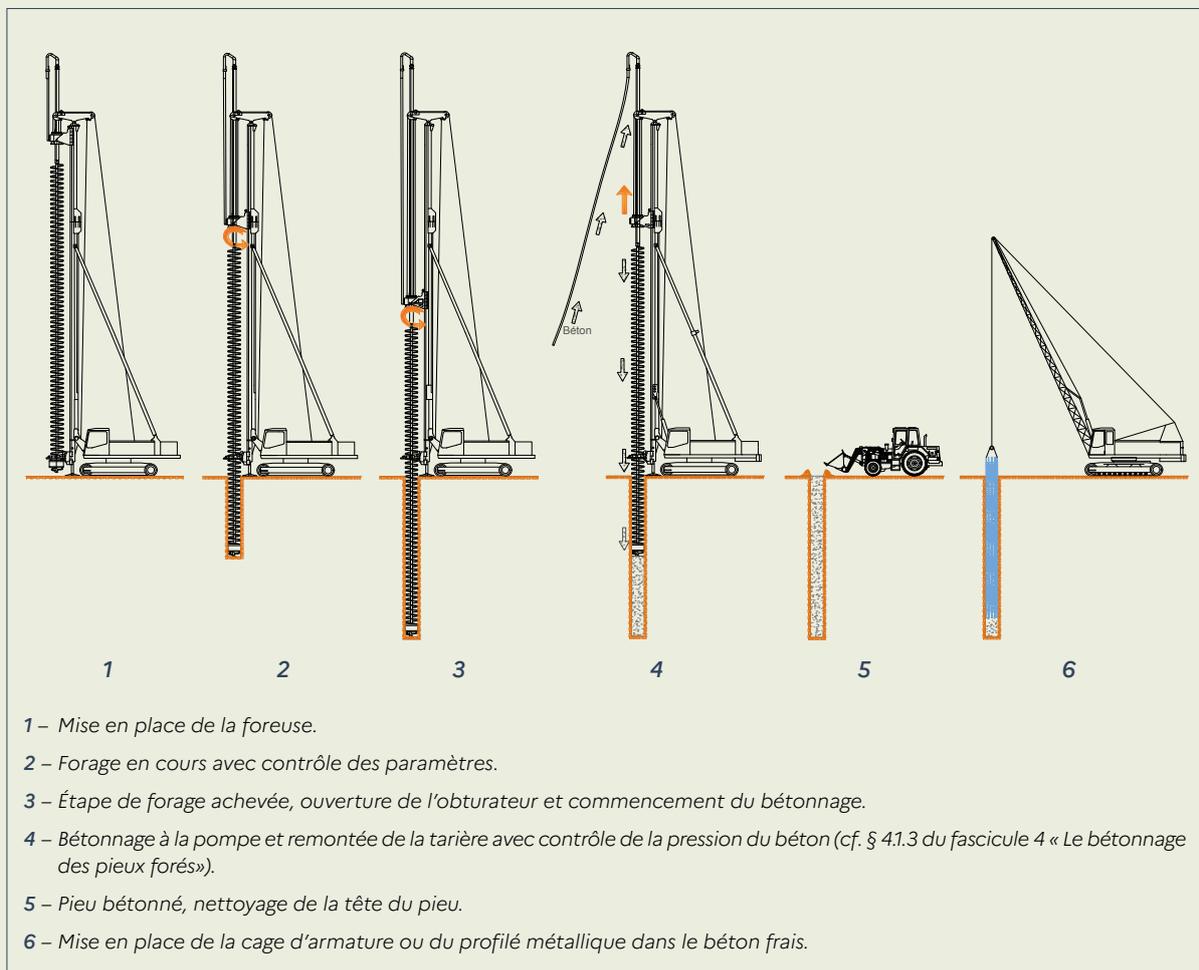
1. **déstructuration du matériau** au niveau de l'attaque de l'outil, ce qui permet la pénétration de l'outil qui est vissé dans le sol. **La hauteur de la tarière** doit permettre le forage complet du pieu. **Les paramètres de forage** sont enregistrés en continu (cf. § 2.2.3) ;
2. **forage achevé.**
3. **soulèvement et ouverture de l'obturateur situé à la base de la tarière creuse** (*Note 1* et cf. § 3.2.3.4). **Simultanément** (*Note 2*) :
 - 3.1 - bétonnage par l'axe creux de la tarière à la pompe (contrôle de la pression du béton),
 - 3.2 - remontée de la tarière sans dévissage (*Note 3*) avec enregistrement des paramètres d'extraction de la tarière et de mise en œuvre du béton (cf. § 2.2.3),
 - 3.3 - remontée des déblais par les pales (décrochage des pales – cf. § 3.2.3.6) ;
4. une fois le pieu bétonné, **nettoyage de la tête du pieu** avant la prise du béton ;
5. **mise en place éventuellement de l'équipement** (la cage d'armature ou le profilé métallique) dans le béton frais.

Note 1 : cet obturateur situé à la base de la tarière creuse empêche l'entrée de sol et d'eau en cours de forage. La tarière est relevée pour dégager l'obturateur dans le cas d'une pointe perdue ou d'un clapet pivotant, ou pour dégager la lumière de bétonnage dans le cas d'un dispositif rétractable (Figure 3.53 « Photos d'un exemple d'obturateur et de pointe rétractable » dans le § 3.2.3.4).

Note 2 : la technique de la tarière creuse présente la particularité **de réaliser le bétonnage du pieu lors de la remontée de l'outil de forage.**

Note 3 : au besoin un léger vissage peut être autorisé.

Figure 3.6 : Phasage de forage et bétonnage pour les pieux forés à la tarière creuse simple rotation (schémas de principe)



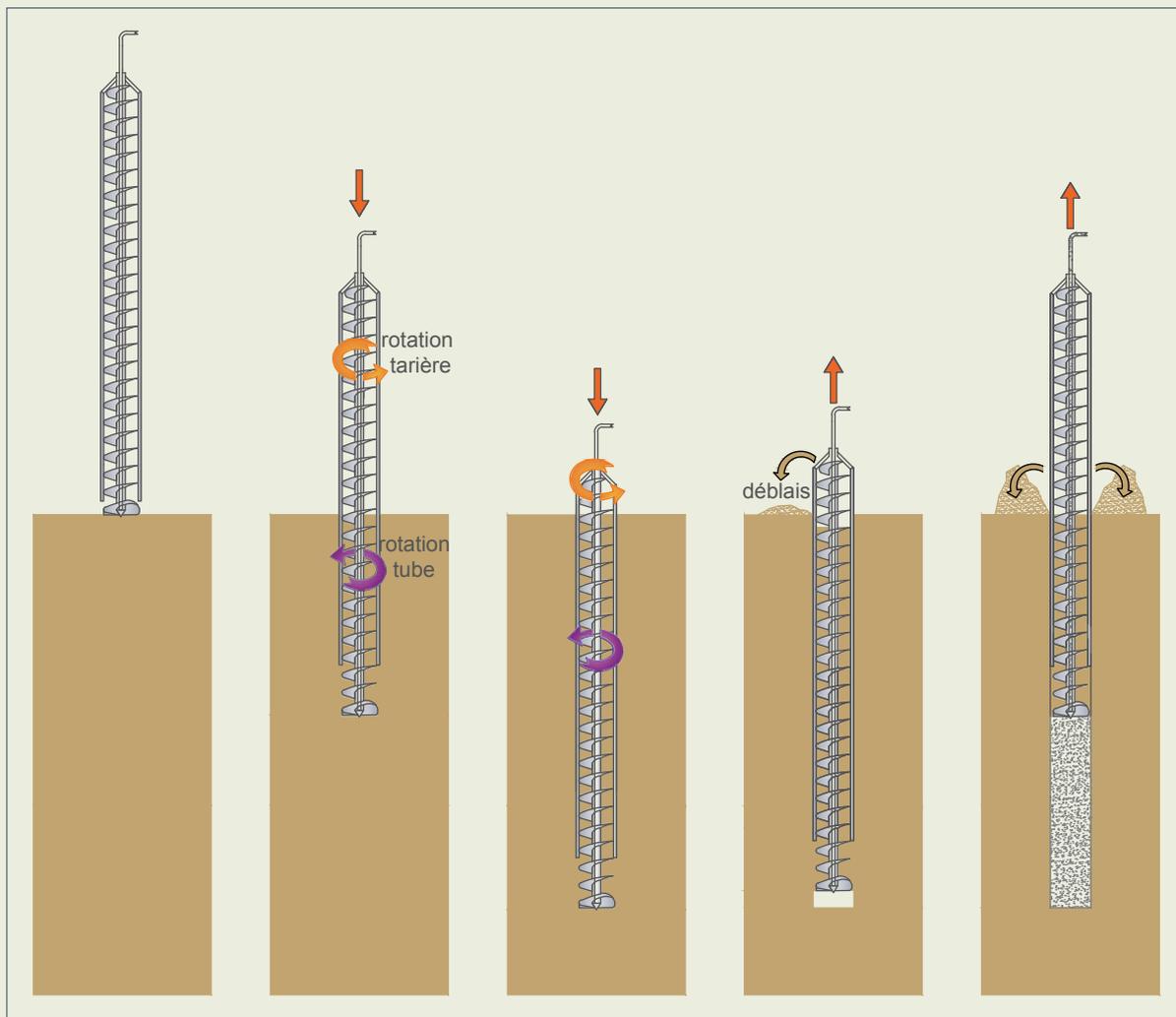
2.2.2 - LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU FORAGE À LA TARIÈRE CREUSE DOUBLE ROTATION

Les différentes étapes du forage à la tarière creuse double rotation (Pieux de classe 2)

Le principe d'excavation (Figure 3.7) est le même que pour les pieux à la tarière creuse simple rotation, à la différence du **tube récupéré** (Note), mis en rotation simultanément à la tarière mais dans le sens contraire et qui peut être en avant ou en arrière par rapport à la tarière en fonction du contexte (cf. ci-après).

Note : les tubes employés pour cette technique sont généralement équipés d'une trousse coupante permettant le carottage des points durs.

Figure 3.7 : Phasage de forage et bétonnage pour les pieux forés à la tarière creuse double rotation (schémas de principe)



Position du tube par rapport à la tarière lors du recours à la technique de la tarière creuse double rotation en phase forage

La tarière doit forer soit (Figure 3.7) :

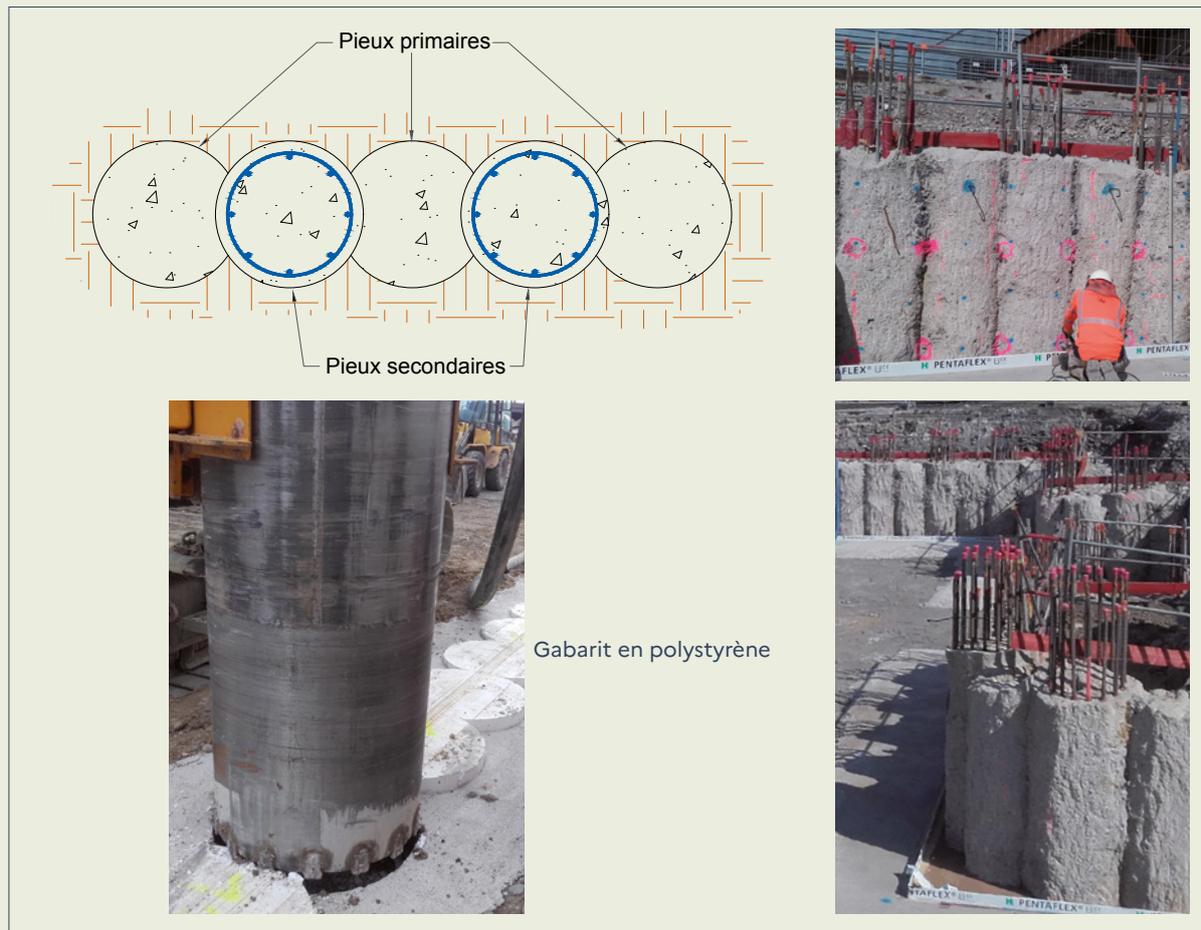
- en **avance du tube** dans les sols compacts, avec une limite d'environ 300 mm en avant du tube (Note 1) ;
- en **arrière du tube**, c'est-à-dire que le forage à la tarière a lieu à l'intérieur du tube :
 - lors du forage de restes de fondations (d'une construction ancienne non entièrement purgées) ou de pieux primaires pour la réalisation des pieux secondaires dans le cas de parois de pieux sécants (Figure 3.8 et Note 2),
 - en cas de risque de surexcavation ;
- au **même niveau ou en arrière du tube** dans les sols pulvérulents ou instables.

La tarière et le tube sont extraits simultanément pendant le bétonnage.

Note 1 : lorsque les deux têtes sont indépendantes, l'écart entre la tarière et le tube peut être nettement supérieur à 300 mm. Ce type de pieux n'est plus assimilé à un pieu à la tarière creuse double rotation : il convient alors de se référer aux spécifications des tarières creuses simple rotation et/ou des pieux tubés.

Note 2 : le tube précède le plus souvent la tarière sur les premiers décimètres pour se frayer un chemin entre deux pieux primaires tout en restant aligné avec ceux-ci et en rognant le béton des deux pieux primaires du fait d'un espace libre entre primaires plus petit que le diamètre du tube.

Figure 3.8 : Réalisation de pieux sécants à la tarière creuse double rotation
(pieux primaires non armés et pieux secondaires armés)



Les deux tables de forage superposées de la technique de la tarière creuse double rotation

Le système de forage double rotation est constitué de **deux tables de forage superposées** :

- la **table supérieure** fait tourner la tarière ;
- la **table inférieure** fait tourner le tube en sens inverse.

La variation relative de la **distance entre la base du tube et la base de la tarière** doit permettre une excavation optimale.

Selon les modèles de machines, les **tables de rotation peuvent être couplées ou découplées**.

Remontée du tube et de la tarière creuse double rotation lors du bétonnage

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.

2.2.3 - LES ENREGISTREMENTS DE PARAMÈTRES DES PIEUX DE CLASSE 2

Enregistrement des paramètres des pieux forés de classe 2 (tarière creuse) selon les normes

Les enregistrements automatiques de paramètres (Figure 3.9) peuvent être rendus obligatoires par les référentiels appliqués ou le domaine d'utilisation des pieux (*Note*).

Note : c'est le cas par exemple :

- lors de l'application du *Fascicule 68 du CCTG*⁽²⁾ ;
- pour la détermination des calculs de portance et de résistance intrinsèque du béton selon la norme *NF P94-262 COMPIL1*.

La norme *NF EN 1536+A1*, relative à la seule exécution des pieux forés, impose de faire des contrôles sans expliciter les liens aux référentiels ou au domaine d'utilisation.

Paramètres pour le contrôle de l'exécution des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Pour contrôler l'exécution de ce type de pieux, la norme *NF EN1536+A1* (article 8.4.6.7) impose que soit fourni le contrôle :

- de l'approvisionnement en béton ;
- de la pression de bétonnage ;
- de la vitesse d'extraction ;
- de l'enregistrement de la rotation de la tarière (*Notes 1 et 2*).

La profondeur du pieu doit être communiquée dans le compte-rendu de chantier (article 10.5 de la norme *NF EN 1536+A1*).

Certains appareils permettent de suivre et de contrôler d'autres paramètres :

- l'appui sur l'outil, le cas échéant ;
- la vitesse de forage ou avancement ;
- le couple de rotation ;
- la vitesse de rotation.

Le foreur dans sa machine (Figure 3.10) contrôle l'exécution et l'optimise, si nécessaire, par la visualisation en temps réel de ces paramètres (*Note 3*).

Les équipements qui sont compatibles avec une consultation en temps réel par les intervenants (impression sur site ou disponible de manière quasi instantanée sur des plateformes de téléchargement) sont recommandés. Certains logiciels d'exploitation des enregistrements de paramètres comportent une attestation de l'authenticité des enregistrements par mention sur le procès-verbal (Figure 3.11). Ces logiciels sont préconisés.

Durant le forage, la traversée d'horizons différents se traduit par une modification de plusieurs paramètres de forage (vitesse de rotation, vitesse d'avancement, couple mobilisé) et l'interprétation peut devenir délicate. Une analyse combinée des paramètres (*Note 4*) peut être source d'enseignements.

Note 1 : l'enregistrement de la rotation de la tarière durant toute la durée de réalisation du pieu ne doit pas être assimilé à une mesure de la vitesse de rotation du fait des phénomènes de lissage – cf. Figure 3.11.

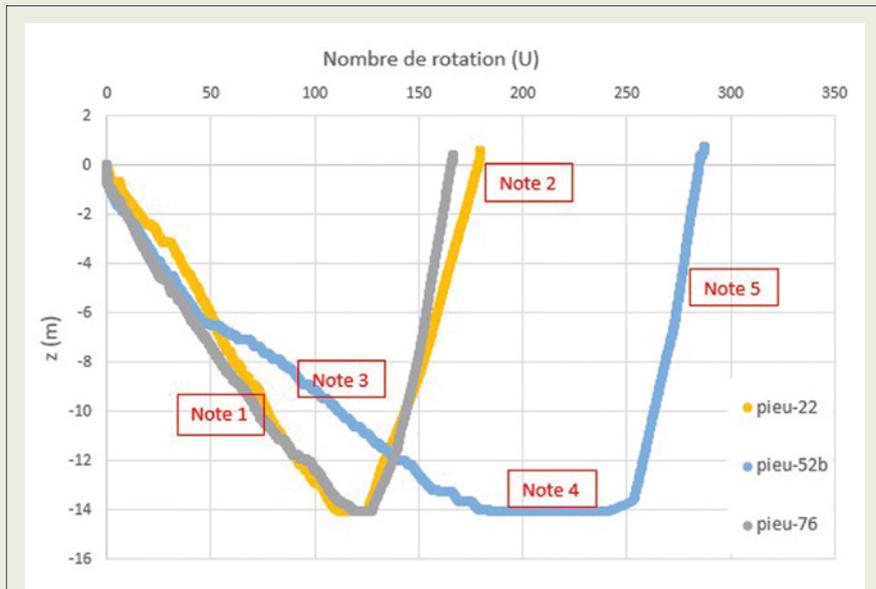
Note 2 : si l'un des systèmes de suivi (approvisionnement du béton, pression de bétonnage, vitesse d'extraction, enregistrement de la rotation) tombe en panne pendant le bétonnage du pieu, une prise de note manuelle peut être requise.

Note 3 : cette spécificité est obligatoire pour l'application du *Fascicule 68 du CCTG* et pour la réalisation de pieux de classe 2 au sens de la norme *NF P94-262 COMPIL1*.

Note 4 : il s'agit d'une pratique actuellement peu répandue.

2. CCTG (cahier des clauses techniques générales) applicables aux marchés publics de travaux.

Figure 3.9 : Exemple d'enregistrement de la rotation de la tarière creuse pour trois pieux de classe 2



Commentaires :

Note 1 : pentes identiques des courbes des pieux 22 et 76 traduisant un terrain relativement homogène sur la hauteur du pieu.

Note 2 : méthodologie d'exécution relativement identique entre le pieu 22 et le pieu 76.

Note 3 : augmentation du nombre de tours/m de la courbe du pieu 52b à partir de -6,5 m, pouvant être le fait d'un terrain de nature ou de compacité différente, d'un changement hydrique ou d'un phénomène de surexcavation.

Note 4 : nombre important de rotations de la tarière pendant l'attente de bétonnage susceptible de causer des dégradations en présence de terrains instables.

Note 5 : bétonnage sous faible rotation relativement identique aux pieux 22 et 76 conforme à la norme. L'extraction peut se faire sans rotation (courbe alors verticale) ou sous faible rotation en restant conforme à la norme.

Figure 3.10 : Exemple de tableau de bord d'une machine de forage tarière creuse avec visualisation de certains paramètres



Figure 3.11 : Exemple d'un même enregistrement de paramètres sous différents pas de restitution lors du forage et bétonnage d'un pieu de classe 2 (tarière creuse)

Pieu à la tarière creuse

Ci-dessous un même enregistrement du forage et du bétonnage d'un pieu tarière creuse selon trois pas de restitution démontrant la possibilité d'interprétations divergentes.

Données :

Diamètre de pieu : 0,82 m

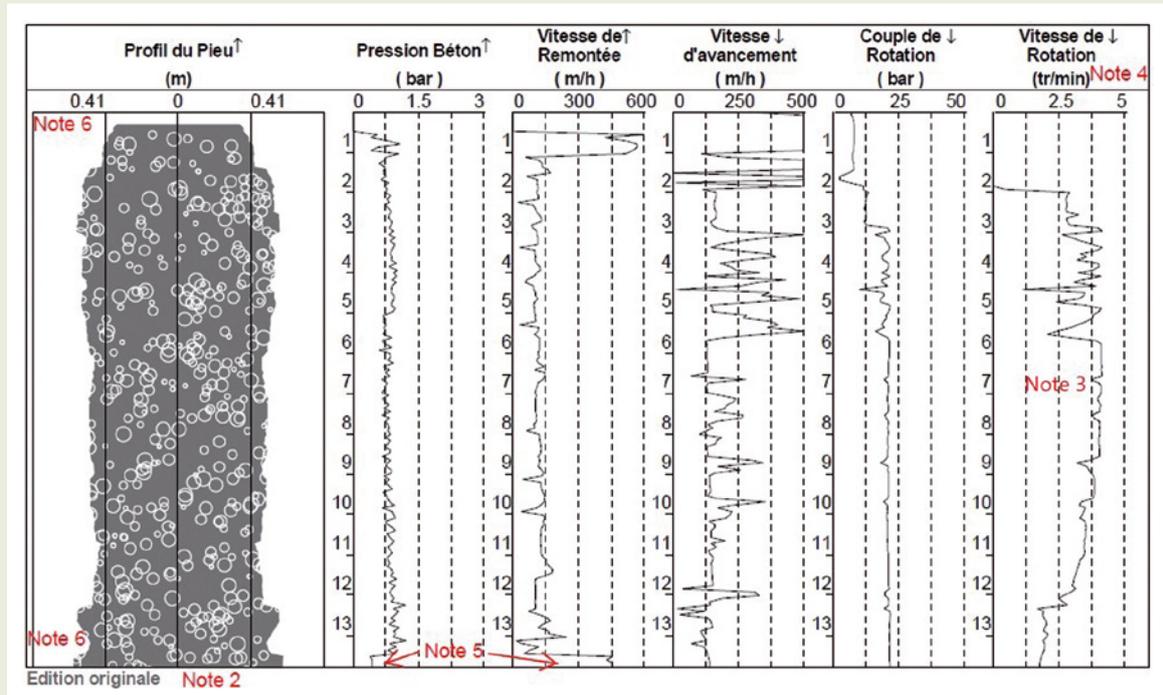
Longueur de pieu : 13,80 m

Inclinaison : 0,0° ; 0,0°

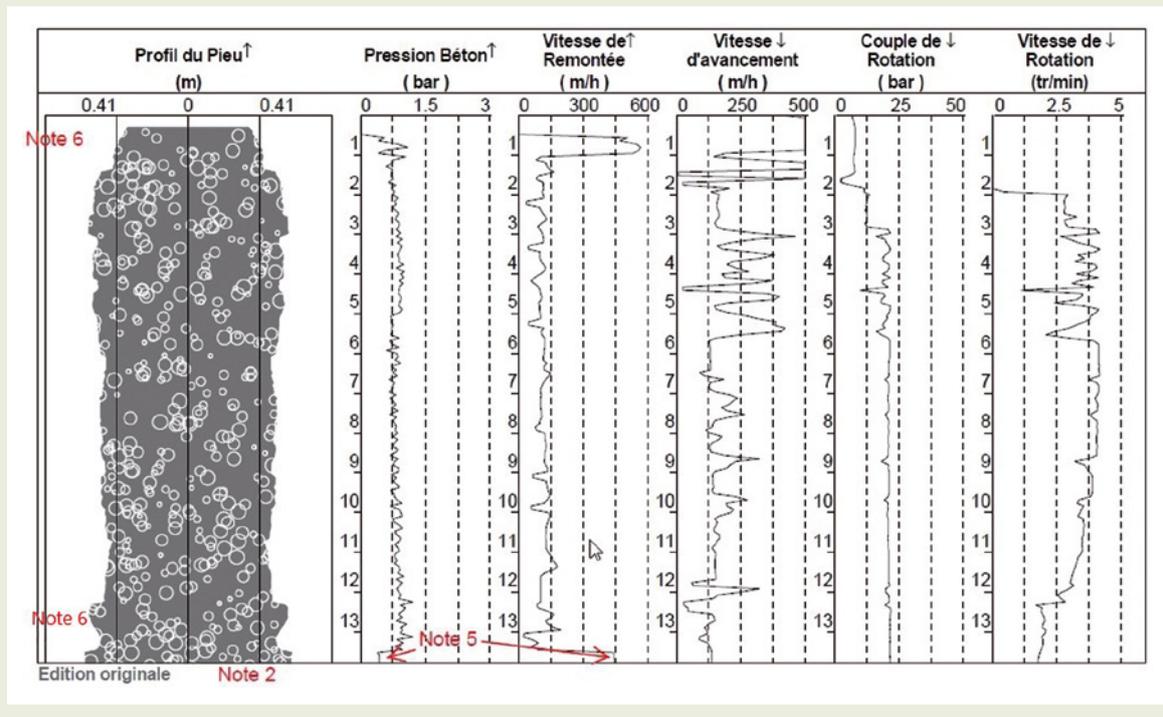
Volume de béton : 10,335 m³

Surconsommation : 48 % (Note 1)

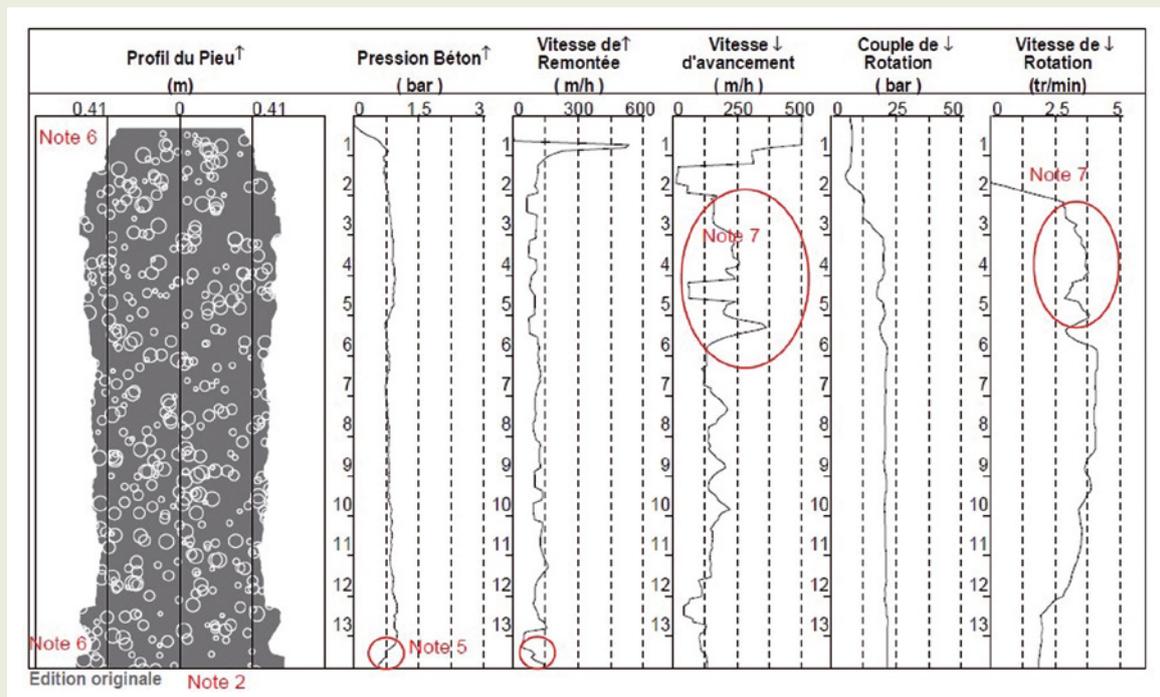
Enregistrement avec un pas de restitution de 80 mm



Enregistrement avec un pas de restitution de 300 mm



Enregistrement avec un pas de restitution de 500 mm



Remarques sur les enregistrements :

Note 1 : *surconsommation du béton importante sur toute la hauteur du pieu traduisant vraisemblablement un mauvais calibrage du volume de béton en début de chantier.*

Note 2 : *mention attestant de l'authenticité.*

Note 3 : *vitesse de rotation manifestement trop lente due soit à un mauvais étalonnage, soit en raison d'un effet de moyenne spatiale et temporelle (il faudrait vérifier avec un autre pas de restitution, si le constat reste identique, il ne s'agit pas d'une anomalie).*

Note 4 : *l'enregistrement de la rotation de la tarière lors de la remontée est également attendu. L'enregistrement du nombre de tours durant toute l'exécution du pieu peut être demandée sur des projets spécifiques.*

Note 5 : *démarrage du bétonnage : adéquation entre la remontée de l'outil et l'injection du béton visualisable uniquement sur les enregistrements avec un pas inférieur ou égal à 300 mm ; perte d'information pour le pas de restitution de 500 mm en ce qui concerne la hauteur de remontée avant bétonnage qui est non visible.*

Note 6 : *surconsommation excessive du béton en pied et trop faible en tête liée au remplissage des conduites de bétonnage (effet différé entre le béton injecté et le béton pompé) qui ne doit pas être considérée comme une anomalie.*

Note 7 : *lissage excessif des paramètres d'avancement pour ce pas de restitution éventuellement gênant.*

Informations fournies par les paramètres enregistrés lors de la réalisation de pieux de classe 2 (tarière creuse)

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).

Corrélation entre la compacité des terrains et les paramètres de forage des pieux de classe 2 (tarière creuse)

L'utilisation des paramètres de forage pour déterminer une coupe de sol au droit d'un pieu est sujette à caution. Ces paramètres même pris de manière combinée ne donnent bien souvent que **des indices qualitatifs de la compacité des sols et ne permettent pas d'obtenir une quelconque valeur chiffrée** de cette dernière (aucune corrélation avec la pression limite Ménard ou résistance en pointe au pénétromètre « q_c ») et/ou de la résistance réelle du pieu.

Définition et objectifs des moyennes glissantes des paramètres enregistrés lors de la réalisation des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Afin de donner une visualisation optimale des enregistrements de paramètres, il est **normal de recourir à des moyennes glissantes** (*Note*) pour définir la valeur des paramètres à chacune des profondeurs. Ces moyennes glissantes temporelle, spatiale ou combinée, **ont pour but d'atténuer** :

- l'effet des coups de pompe lors du bétonnage pour le calcul des pressions et du volume injecté ;
- l'effet d'actions ponctuelles du foreur sur la détermination de la vitesse d'avancement et de la vitesse de rotation.

Les données numériques doivent pouvoir être transmises sur demande.

Généralement le pas d'enregistrement des paramètres est d'environ 50 à 100 mm (*Note*). Il est conseillé que les moyennes glissantes soient effectuées sur une hauteur n'excédant pas 300 mm.

Note : il convient d'avoir **une hauteur ou un pas de temps appropriés** (en fonction du pas de l'hélice, du diamètre et selon les caractéristiques mesurées). **Ce pas de lissage est renseigné et ne doit pas être excessif pour ne pas nuire à la qualité du rendu des enregistrements** (Figure 3.11).

Vitesse de pénétration de la tarière creuse

Pour la plupart des techniques de pieux, l'adéquation d'une technique est jugée par rapport au temps qu'il convient de considérer comme raisonnable pour forer un pieu. Néanmoins, pour la technique de pieu à la tarière creuse, **un nombre trop fort de rotations par rapport à la vitesse d'enfoncement** peut provoquer le soutirage des déblais par effet de vis d'Archimède, ce qui peut avoir tendance, dans certains terrains, à dégrader les parois du forage et/ou décompresser le sol, ce qui est **nuisible au pieu et/ou à la stabilité de la plateforme**.

2.2.4 - SPÉCIFICITÉS DU FORAGE DES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

2.2.4.1 - Modalités de forage des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Spécificités de la technique de la tarière creuse

Le forage à la tarière creuse est **un forage continu**, c'est-à-dire sans possibilité d'adapter l'outil à la nature des sols traversés comme pour la plupart des pieux forés. Ce forage continu peut être régulé par la modification de certains paramètres de forage lors de ce dernier (cf. ci-après « Optimisation entre la rotation et la pression sur l'outil ») et présente ses avantages (§ 2.2.4.2) mais aussi ses difficultés (§ 2.2.4.3).

Optimisation entre la rotation et la pression sur l'outil

Deux actions permettent de forer les terrains :

- la rotation de la tarière (*Note 1*) ;
- la force d'appui (*Note 1*).

Pour traverser efficacement les terrains, c'est-à-dire en déployant le moins d'énergie, **le foreur doit adapter sa méthodologie en coordonnant plusieurs actions** :

- **en rotation seule**, en veillant à adapter sa vitesse de rotation pour permettre une vitesse d'avancement optimale (*Notes 2 et 3*) ;
- **en modulant la force d'appui appliquée** (*Note 4*) en fonction de la rotation et de la sensibilité des terrains (cf. § 2.2.4.1).

Note 1 : il faut doser l'appui pour permettre la pénétration sans la découpe du cylindre de sol. L'usage de l'appui permet de consommer moins d'énergie.

Note 2 : **une vitesse de rotation trop importante** peut conduire à une mauvaise pénétration des outils dans le sol.

Note 3 : la rotation sans avancement cisaille une surface cylindrique de sol et réduit le frottement le long de la tarière. Pour certains terrains très frottants, il est même **nécessaire de retenir l'avancée de la tarière tout en maintenant la rotation**, afin de réduire le frottement entre le sol et la tarière et ainsi empêcher le blocage de la tarière dans le terrain.

Note 4 : toutes les machines ne sont pas équipées d'un dispositif permettant d'appliquer une pression verticale sur l'outil.

2.2.4.2 - Avantages de la technique de la tarière creuse pour la réalisation des pieux de classe 2

Principaux avantages de la technique de la tarière creuse (simple ou double)

La technique de la tarière creuse présente un certain nombre d'avantages vis-à-vis des autres pieux forés :

- la rapidité d'exécution ;
- le maintien des parois sans faire appel aux fluides stabilisateurs (cf. chapitre 4) ou au tubage (cf. chapitre 5) ;
- un dimensionnement en portance plus favorable ;
- le contrôle continu et instantané des paramètres de forage et de bétonnage (cf. § 2.2.3).

Ces avantages rendant la technique de la tarière creuse très compétitive ont conduit à en faire la technique de pieux forés la plus utilisée en France dans le bâtiment.

Principaux avantages de la technique de la tarière creuse double rotation

Cette technique est utilisée avantageusement lorsque :

- les conditions de verticalité sont sévères ;
- le risque d'obstacle ou de points durs (en particulier pour une utilisation en pieux sécants) complique le guidage de la tarière (*Note*) ;
- le risque de phénomènes de surexcavation (cf. § 2.2.4.3) est fort ;
- le risque de consolidation du terrain (cf. § 2.2.4.3).

Note : les tubes employés pour cette technique sont généralement équipés d'une trousse coupante permettant le carottage des points durs.

2.2.4.3 - Difficultés de la technique de la tarière creuse pour la réalisation des pieux de classe 2

Les difficultés de réalisation des pieux de classe 2 en raison de la technique de la tarière creuse

Malgré ses avantages, comme pour les autres techniques, l'exécution des pieux à la tarière creuse peut souffrir d'un certain nombre de difficultés lors du forage, du bétonnage (cf. § 4.1.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») et de la mise en œuvre des armatures (cf. § 9.3 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») à bien identifier pour éviter qu'elles ne conduisent à des défauts pour le pieu.

Les inconvénients de la tarière creuse sont :

- l'impossibilité de changer l'outil de forage pouvant conduire :
 - à l'utilisation parfois d'un outil moins approprié (*Note 1*) pour une couche donnée mais offrant un bon compromis pour traverser toutes les couches,
 - au refus de forage (*Notes 2 et 3*) : plus encore que pour les autres techniques de pieux, les refus sur des blocs (*Note 4*) ou des couches infranchissables sont très contraignants, car ils nécessitent des adaptations souvent lourdes (cf. § 2.4.3) ;
- les risques de blocage de la tarière lors de sa remontée (*Note 2*) ;
- l'impossibilité d'interrompre et de reprendre le bétonnage (*Note 2*) ;
- les difficultés de mettre en œuvre les armatures longues dans le béton frais (*Note 2*) ;
- l'importance de la hauteur de la tarière creuse qui doit être au moins égale à la hauteur du pieu ;
- les possibilités de déviations en présence de blocs ;
- la nécessité de diamètres d'âme de tarière et d'épaisseur des pales importants (cf. § 3.2.3.2) dans certains terrains compacts pour transmettre le couple de rotation sans casse de matériels mais pouvant conduire à un effet de refoulement du sol (cf. ci-après « Risque de refus en cas de refoulement trop important du sol lors du forage des pieux de classe 2 »), consommant également la puissance de la foreuse (réduisant ainsi l'efficacité du forage).

Note 1 : l'interaction entre le sol et l'outil est maintenue sur toute la profondeur du pieu et sur toute la durée de l'exécution : la traversée de sols sensibles est donc plus pénalisante qu'avec les autres procédés de pieux forés.

Note 2 : ces impossibilités peuvent conduire à ne pas réussir à réaliser le pieu.

Note 3 : le refus de forage est généralement signe d'une inadéquation entre la machine, l'outil de forage, la méthodologie employée (quand il ne s'agit pas la technique elle-même) et les terrains rencontrés. On se reportera utilement au Tableau 3.17 (cf. § 6.4 « Adéquation de la puissance des machines de forage pour les pieux de classe 2 »). En cas de refus prématuré, la tarière est remontée par dévissage, l'empreinte laissée par l'outil est remblayée avec du terrain ou de la grave ciment.

Note 4 : les blocs peuvent être naturels ou anthropiques.

Les difficultés de réalisation des pieux de classe 2 en raison du contexte géotechnique

Si le procédé tarière creuse a l'avantage de se prémunir des problématiques générales de maintien des parois de forage, il présente toutefois dans certaines configurations, des risques vis-à-vis du sol environnant. Ces risques sont aussi valables pour les autres procédés mais, **pour les pieux à la tarière creuse, les effets sont amplifiés** par la présence de la tarière toute hauteur et par la cadence importante d'exécution.

Les principales difficultés de forage en fonction du contexte géologique sont :

- le **risque de refus** en cas de refoulement trop important du sol (détaillé ci-après) ;
- la **surexcavation** (détaillée ci-après) ;
- la **consolidation du sol**, issue d'un réarrangement de grains liés à des phénomènes de surpressions engendrés par les vibrations et les efforts de frottement entre la tarière et le sol. Ce phénomène se traduit par un **tassement du sol** (*Note*) autour du pieu.

Note : le tassement peut être nuisible aux ouvrages avoisinants mais aussi aux conditions de travail de la machine (perte de verticalité du mât, voire déstabilisation) du fait des déformations de la plateforme de travail.

Risques de refus en cas de refoulement trop important du sol lors du forage des pieux de classe 2

Les risques de refus en cas de refoulement trop important du sol peuvent être dus à :

- des **diamètres d'âme de tarière importants et de fortes épaisseurs des pales** nécessaires pour résister aux efforts générés par le vissage **dans des terrains compacts peu refoulants** ;
- la **résistance au déplacement relatif du sol** remontant dans les pales de la tarière en raison de l'obstruction de ces pales **en présence de sols argileux ou d'autres terrains cohérents** (*Note*).

Ces phénomènes nuisent à la **pénétration des outils**. Ces problèmes sont amplifiés lorsque le pas de l'hélice de la tarière est resserré.

Note : dans les terrains les plus cohérents et les plus frottants, on peut aussi rencontrer des difficultés au moment de la remontée des outils ; dans ce cas, une légère rotation lors de la remontée peut être utilisée.

Risques de surexcavation du sol lors du forage des pieux de classe 2

Le phénomène de surexcavation peut avoir lieu lors du forage des pieux de classe 2 :

- dans des **terrains instables** (cf. définis ci-après) lorsque l'exécution du forage est mal maîtrisée. En cas de suspicion de terrains instables, il peut être utile de réaliser plusieurs essais de faisabilité jusqu'à trouver les paramètres d'exécution les moins nuisibles ;
- dans des **couches supérieures à un substratum rocheux** : le substratum difficile à forer conduit généralement à un ralentissement de la vitesse d'avancement, qui, de ce fait, peut induire un phénomène de surexcavation dans les couches supérieures.

Les terrains instables sensibles au phénomène de surexcavation lors du forage des pieux de classe 2

La NOTE 1 de l'article 8.2.5.4 de la norme NF EN 1536+A1 identifie comme **terrains instables** :

- des **sols uniformes non cohérents sous nappe phréatique** (*Note 1*) présentant une granulométrie telle que $D_{10}/D_{60} < 1,5$ (*Notes 2 et 3*) ;
- des **sols lâches non cohérents** (*Note 4*) ayant une densité relative I_d (*Note 4*) $< 0,3$ ou ayant des caractéristiques pressiométriques faibles équivalentes (*Note 5*) ;
- des **argiles de grande sensibilité** ;
- des **sols cohérents** ayant une résistance au cisaillement non drainé C_u (cohésion non drainée) < 15 kPa.

Note 1 : des expériences montrent que la condition sous nappe phréatique n'est pas forcément nécessaire.

Note 2 : D_n est la dimension des particules pour n % en poids de particules soient inférieures à cette dimension (NOTE 3 de l'article 8.2.5.4 de la norme NF EN 1536+A1).

Note 3 : pour certains sols le critère atteint même $1,5 < D_{10}/D_{60} < 3,0$ (NOTE 2 de l'article 8.2.5.4 de la norme NF EN 1536+A1).

Note 4 : l'indice de densité I_d est défini comme le rapport entre $(e_{max} - e)$ et $(e_{max} - e_{min})$, avec « e_{max} », l'indice des vides⁽³⁾ maximal de ce sol, « e_{min} », l'indice des vides minimal et « e », l'indice des vides de l'échantillon dans son état naturel.

Note 5 : la norme NF P94-262 COMPIL1 (tableau B.2.1) fournit d'autres critères pour définir le caractère lâche d'un sol (q_c , résistance à la pénétration mesurée au pénétromètre statique et $N_{1,60}$, nombre de coups au pénétromètre au carottier).

3. L'indice des vides est défini comme le rapport du volume des vides sur le volume occupé par le squelette granulaire.

Conséquences du phénomène de surexcavation

Ce phénomène d'entraînement latéral du sol (Figure 3.12) est caractéristique d'une déstabilisation des parois de forage, ou en pointe (effet de la vis d'Archimède). **La surexcavation peut conduire à :**

- des pertes de portance de la plateforme ;
- des dégradations sur les avoisinants (risques de remontée des matériaux par surexcavation ou de consolidation du sol) lorsque l'entraînement se fait au voisinage des fondations mitoyennes ;
- une baisse locale de la compacité des terrains affectant la portance du pieu ;
- des défauts de verticalité des pieux liés à l'instabilité de la plateforme portant la machine (Figure 3.13) ;
- une augmentation du volume des déblais à évacuer ;
- une augmentation du volume du béton.

Figure 3.12 : Phénomène de surexcavation

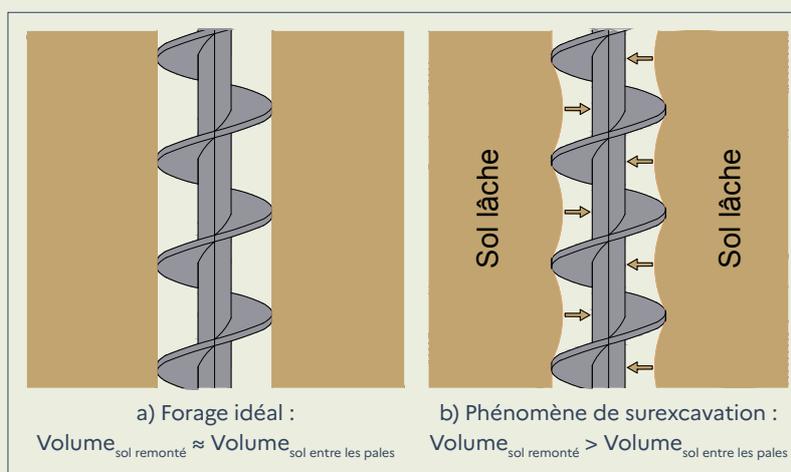


Figure 3.13 : Indice de surexcavation et défaut de verticalité associé

(il faut noter que, sur cette photo, le diamètre de l'âme ne correspond pas aux critères édictés dans le § 3.2.3.2)



Identification du phénomène de surexcavation

L'étendue de ce phénomène peut atteindre plusieurs fois le diamètre des pieux. Il est important de noter qu'une fois le phénomène amorcé, l'énergie nécessaire au forage augmente du fait de :

- la déstabilisation des parois de forage ;
- l'augmentation des frottements s'exerçant sur la tarière ;
- l'énergie consommée en extraction de déblais ;

ce qui peut avoir tendance à diminuer la vitesse de forage et à accentuer plus encore le phénomène si des dispositions ne sont pas prises.

Afin d'identifier des signes de surexcavation, il est recommandé de comparer le volume de sol extrait au volume de l'outil de forage (volume de l'âme et des pales) et non au volume du pieu (*Note 1*). Des volumes extraits supérieurs à 2 à 4 fois le volume de l'outil de forage doivent interpeller (Figure 3.13). L'article 8.2.5.5 de la norme NF EN 1536+A1 indique que l'avancement et la vitesse de rotation de la tarière doivent être ajustés en fonction des conditions de sol, de façon à ce que les volumes extraits restent limités.

=> Le cas échéant, la méthodologie de forage employée est analysée et modifiée (*Note 2*).

Le suivi du nombre de tours de rotation de la tarière nécessaire à la descente d'une hauteur de pale peut fournir des informations en cas de déstabilisation des parois dans les terrains instables. De manière générale, ce nombre de tours doit être le plus faible possible.

Note 1 : ces volumes sont relativement difficiles à mesurer en phase chantier (coefficient de foisonnement difficilement estimable, volume théorique des outils méconnu). Bien entendu, le diamètre et la longueur du pieu entrent en jeu, mais un volume de sol dépassant les axes déportés d'implantation (situés à 1 m) peut être une indication méritant de s'y intéresser (cf. § 4.1 « Processus d'implantation et de récolement des pieux » dans le fascicule 2 « Aspect généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Note 2 : en cas de suspicion de terrains instables ou d'indice de surexcavation, il est conseillé de réaliser des forages de faisabilité en faisant varier le taux de pénétration permettant d'apprécier le volume de sol extrait et à l'opérateur d'affiner sa technique de forage.

Évaluation de l'adéquation de la technique de la tarière creuse au terrain

L'adéquation de la technique tarière creuse au terrain doit être évaluée au stade de la mission géotechnique G2 AVP « Étude Géotechnique de Conception – Phase Avant-Projet » (selon la norme NF P94-500) et confirmée en mission géotechnique G2 Pro (phase projet).

L'aléa de l'adéquation de la technique de la tarière creuse peut :

- sur certains projets, être considéré comme un impondérable étant donné son caractère aléatoire ;
- sur d'autres projets, l'analyse du contexte géologique et historique du site, des reconnaissances géotechniques ou des expériences passées, peuvent être de bons signes de l'inadéquation de la technique tarière creuse.

2.3 - CRITÈRES DE CHOIX DES TECHNIQUES D'EXCAVATION

Les paramètres pour le choix des techniques d'excavation

La technique d'excavation a une influence prépondérante sur la qualité du pieu et la cadence des travaux. Ce choix doit donc faire l'objet d'une réflexion approfondie basée notamment sur les paramètres suivants :

- les terrains traversés ; en fonction des propriétés physiques des terrains, certains outils sont plus pertinents et adaptés que d'autres. Il faut chercher le meilleur compromis entre efficacité et coût de la mobilisation de l'outil ;
- la présence, la position et le battement d'une ou de plusieurs nappes phréatiques ; la présence d'eau peut écarter certaines techniques, complètement légitimes en conditions sèches ;
- le procédé de réalisation (à sec, tubage – cf. chapitre 5, fluide stabilisateur – cf. chapitre 4) ; le procédé choisi influence notamment la qualité du contact pieu-sol et la technique d'évacuation des déblais de forage ;

- **l'expérience et la pratique de l'entreprise** ; la réalisation d'un pieu foré est une opération complexe et soumise à certains aléas. Il est donc essentiel que la technique utilisée soit maîtrisée par un personnel qualifié et expérimenté ;
- **la géométrie des pieux** ; les diamètres importants et les grandes profondeurs exigent des machines suffisamment puissantes et équipées de façon à limiter les déviations ;
- **le nombre de pieux et l'homogénéité des dimensions** ; certains outils ou certaines techniques, coûteuses, peuvent devenir rentables sur la réalisation d'un grand nombre de pieux grâce à la cadence qu'ils permettent d'obtenir. Réciproquement, des changements d'outils multiples (qui peuvent aussi être liés à des profondeurs différentes) nuisent au rendement de techniques pourtant réputées productives ;
- **la puissance des machines disponibles** ; l'énergie nécessaire pour réaliser le pieu avec l'outil choisi, doit être en adéquation avec les capacités de la machine, et les conditions géotechniques du site, mais surdimensionner la machine accroît les coûts fixes et n'apporte généralement que peu de gains de production (cf. § 3.1.2 « Paramètres et caractéristiques des machines de forage ») ;
- **l'adaptabilité des machines disponibles** ; certaines machines permettent d'envisager un changement rapide de l'outil en cours de forage, ce qui peut représenter un gain de temps considérable lorsque des terrains hétérogènes sont traversés ;
- **l'emprise nécessaire** ; il convient de s'assurer que les moyens matériels nécessaires à la réalisation du chantier sont compatibles avec les emprises disponibles et les conditions d'exécution, surtout dans le cas de la technique de la tarière creuse (*Note*) (cf. § 3.1.2 « Paramètres et caractéristiques des machines de forage ») ;
- **l'expérience des pieux dans le contexte local** ; si des pieux ont déjà été réalisés dans les mêmes terrains, il est très instructif de rassembler les informations concernant l'efficacité des méthodes utilisées et les éventuelles difficultés rencontrées. En l'absence d'expérience comparable, il est fortement recommandé de réaliser des pieux de faisabilité pour tester la pertinence et l'efficacité de la (ou des) technique(s) envisagée(s), et le cas échéant sélectionner la plus appropriée.

Nota bene : Les tableaux de synthèse (cf. chapitre 6 « Recommandations en fonction de la nature des terrains ») rassemblent les recommandations sur le choix des méthodes d'excavation et de tenue des parois en fonction de la nature des sols.

Note : l'emprise est plus importante pour la réalisation des pieux de classe 2 (tarière creuse) en raison :

- **du gabarit des machines de pieux** à la tarière creuse, qui se prêtent mal au forage sur des sites et des plateformes exigües ou en limite de talus ou de médiocre qualité, du fait du poids toujours élevé des machines et de leur centre de gravité toujours haut ;
- **de la proximité de nombreux engins** (foreuse, pelle, grue, pompe à béton) qui doivent travailler ensemble pour être efficaces et nécessitant un enchaînement des tâches sans interruption (Figure 3.27 « Exemples de machine de forage à la tarière creuse simple rotation » dans le § 3.1.2.2), dont :
 - l'évacuation des déblais, sur des emprises de stockage provisoire, qui doivent être définies en dehors des zones de pieux de manière à conserver des zones de travail praticables par les engins,
 - l'approvisionnement régulier du béton, indispensable,
 - l'approvisionnement des armatures, soit avec une aire de stockage des armatures dimensionnée en prenant en compte des cadences d'exécution élevées, soit avec un approvisionnement des armatures rapide et régulier.

Les critères de choix d'une technique d'excavation des pieux forés

Le choix de la (ou des) technique(s) d'exécution du pieu est à réaliser selon une analyse multicritère (*Note*) dans laquelle la qualité du forage est un critère prépondérant. Les critères permettant de juger de la qualité du forage sont :

- **la tenue et la régularité de la paroi de forage**, gage d'un élément de fondation de dimensions conformes aux attentes ;
- **le respect du diamètre du forage** (risque de surforage avec certaines techniques) ;
- **le respect de la verticalité** ou de l'inclinaison ;
- **le respect de la profondeur d'ancrage** dans l'horizon porteur conformément au projet ;
- **le nettoyage correct de la base du forage**, afin d'obtenir le meilleur contact béton-sol en pointe de pieu (cf. § 2.5 « Curage et nettoyage du forage des pieux »).

Note : la qualité du bétonnage, le respect des contraintes du projet (environnement, emprise...), le temps de réalisation et le caractère financier sont d'autres critères à intégrer dans le choix de la technique de réalisation de pieux.

Les paramètres limitant la profondeur ou le diamètre des pieux forés

Les paramètres limitant la profondeur et le diamètre d'exécution des pieux sont :

- les possibilités de réalisation d'une plateforme de compacité suffisante pour reprendre les charges appliquées à la foration (efforts de poussée et/ou de traction) ;
- le couple de rotation, lors d'un forage par rotation, qui doit être suffisant pour entraîner l'outil jusqu'à la profondeur requise ;
- la limitation due à l'utilisation d'outils à percussion (trépans et certaines bennes) dans les roches dures ou abrasives ;
- la force d'extraction de la machine en particulier pour les pieux de classe 2, qui doit être supérieure à la force exercée par le poids de la tarière remplie du sol à évacuer, additionné aux frottements avec le sol en place lors de la remontée.

Adéquation des moyens et pieux de faisabilité

Seul le retour d'expérience de l'entreprise et/ou des pieux de faisabilité (cf. § 4.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») permettent de statuer sur l'adéquation des moyens envisagés. En cas de doute, un pieu de faisabilité préliminaire au chantier (cf. § 4.2 du fascicule 2) est conseillé dans le cas de chantiers avec des enjeux importants⁽⁴⁾ (planning tendu, validation d'un cadre forfaitaire...).

Il est conseillé de réaliser cet essai pour un pieu de diamètre et de profondeur représentatifs des dimensions les plus importantes des travaux à réaliser.

2.4 - GÉNÉRALITÉS SUR LE FORAGE ET DIFFICULTÉS ASSOCIÉES

2.4.1 - GÉNÉRALITÉS SUR LE FORAGE

Temps de réalisation du pieu supérieur à 1 journée

Selon l'article 8.2.1.8 de la norme NF EN 1536+A1, dans les terrains susceptibles de se décompresser avec le temps, si le pieu ne peut être achevé durant la journée de travail, le forage doit être arrêté, au-dessus du niveau du fond de forage prévu à une distance d remplissant les deux conditions suivantes :

- $d \geq$ à deux fois le diamètre du fût, et ;
- $d \geq$ à 1,5 m ;

de façon à être achevé le jour suivant, immédiatement avant bétonnage.

Réalisation de groupes de pieux

Lorsqu'on réalise des pieux forés en groupe pouvant interagir les uns avec les autres, il faut :

- choisir l'ordre d'exécution de façon à éviter toute détérioration des pieux forés voisins (article 8.2.1.11 de la norme NF EN 1536+A1) ;
- respecter un entraxe minimum (Note) lorsque les pieux sont réalisés dans un laps de temps inférieur à 4 heures (article 8.2.1.12 de la norme NF EN 1536+A1).

Note : il convient que l'entraxe des pieux forés réalisés corresponde au moins à :

- 4 fois le diamètre du pieu ou sa largeur (W), et ;
- 2 m.

Il peut être nécessaire d'augmenter cet entraxe en cas de constatation sur place d'un aléa sur l'exécution ou de présence de sols instables ou mous.

4. Les pieux sont très souvent sur le chemin critique des travaux, en cas de non-faisabilité, les délais et les dimensionnements de pieux seront très certainement fortement impactés.

Forage des pieux inclinés

Selon l'article 8.2.3.1 de la norme NF EN 1536+A1, lorsque l'inclinaison par rapport à l'horizontale est inférieure à 86 degrés (Note 1), les pieux inclinés doivent être tubés sur toute leur longueur, sauf s'il peut être démontré que les forages non tubés sont stables.

Sauf conditions très spécifiques, il n'y a pas de pieux à la tarière creuse inclinés (Note 2).

La tolérance de déviation d'inclinaison du forage, indiquée par la norme NF EN 1536+A1 (article 8.1.1.1), est pour des pieux inclinés de 4 à 14°, de 40 mm/m.

Note 1 : la réalisation de pieux forés inclinés est très contraignante au niveau de la capacité du matériel ; en pratique, son utilisation est au mieux restreinte à quelques configurations très particulières : efforts horizontaux très élevés associés à des limites de déformation draconiennes et pieux courts.

Note 2 : l'article 8.2.5.2 de la norme NF EN 1536+A1 limite l'inclinaison à 84° par rapport à l'horizontale pour les pieux réalisés à la tarière creuse, à moins que des mesures ne soient prises pour maîtriser la direction du forage et la mise en place des armatures. L'inclinaison de la tarière creuse présente trois risques :

- **un risque de renversement** de la machine lorsque la tarière est inclinée ;
- **un risque associé à la mise en place de l'éventuelle cage d'armature** dans le béton frais, d'autant plus lorsqu'il faut avoir recours à la vibration ;
- **un risque de déviation**, certainement plus important que pour les pieux verticaux.

2.4.2 - LES CONDITIONS D'ARRÊT DU FORAGE

Les deux conditions possibles pour déterminer la fin de forage

La fin du forage est déterminée par les critères d'arrêt de la note de calcul :

- généralement, sous la forme d'une profondeur à atteindre ;
- et/ou un ancrage minimal dans la couche porteuse (Note).

En outre, l'excavation doit être poursuivie jusqu'à ce qu'une surface de contact complète à la base du pieu soit obtenue en cas de (article 8.2.1.4 de la norme NF EN 1536+A1) :

- fondation sur du rocher ;
- stratification défavorable des couches porteuses ;
- couche porteuse à surface inclinée.

Lorsqu'un pieu foré rencontre un obstacle infranchissable avant d'avoir atteint le niveau d'assise prévu par la conception, les spécifications de conception doivent être revues (article 8.2.1.9 de la norme NF EN 1536+A1).

Pour un pieu foré à partir d'un outil de forage à base conique, la base du pieu doit être considérée comme étant le niveau atteint par la tarière non réduite.

Note : la réalisation des pieux de faisabilité est primordiale afin de vérifier la capacité de la foreuse à réaliser l'ancrage défini dans la note de calcul.

En cas d'impossibilité d'identification de la couche d'ancrage

Si, lors des essais de faisabilité, la différenciation de la couche d'ancrage n'est pas possible (peu de différence de la compacité entre les couches, machines de très forte puissance), en accord avec le géotechnicien responsable de la mission géotechnique G4⁽⁵⁾ et le maître d'œuvre, les pieux sont arrêtés sur la base de la profondeur de calcul uniquement.

5. Selon la norme NF P94-500 définissant les missions géotechniques, G4 correspond à :

- la supervision des études géotechniques d'exécution ;
- la supervision du suivi géotechnique d'exécution.

2.4.3 - ADAPTATIONS POSSIBLES POUR PALIER LE REFUS

Si elles n'ont pas été anticipées par les études de la mission géotechnique G3⁽⁶⁾, les adaptations doivent **faire l'objet d'une proposition soumise au maître d'ouvrage et à ses représentants**. Le choix des adaptations dépend généralement de la fréquence des refus : des sondages complémentaires au droit des pieux peuvent parfois s'avérer utiles.

Deux niveaux d'adaptations sont envisageables en fonction des conditions du chantier et de l'ouvrage :

- **les adaptations simples :**

- justification éventuelle d'un pieu plus court que prévu,
- changement d'outil et utilisation de dents différentes ou implantées différemment (cf. § 3.2.7 « Dents équipant les outils de forage »),
- purge d'un obstacle peu profond à la pelle et au BRH⁽⁷⁾, dans les limites d'utilisation des engins de terrassement (généralement de l'ordre de 5 m au plus pour des blocs situés hors nappe) et des possibilités vis-à-vis des avoisinants et des conditions de chantier ;

- **les adaptations lourdes :**

- modification de l'implantation, lorsque la structure portée le permet et que les obstacles sont de dimensions raisonnables,
- utilisation d'un atelier de plus forte puissance,
- modification de la technique de forage (foré tubé, foré sous fluide stabilisateur...), voire des techniques de micropieux spécialement adaptées pour terrain dur ou pieux racines ; il convient alors de révéifier le dimensionnement du ou des pieux considérés.

2.5 - CURAGE ET NETTOYAGE DU FORAGE DES PIEUX

2.5.1 - CURAGE DES PIEUX

Obligation de curage et nettoyage du forage

Le curage et le nettoyage du forage doivent être **réalisés lors de l'exécution de tous les pieux forés de classe 1**.

Pour la technique des pieux forés à la tarière creuse, il est impossible d'intervenir en fond de pieu. Il convient néanmoins de faire un tour de tarière sans pénétration avant de débiter le bétonnage.

Objectif du curage et du nettoyage du forage

Le **curage** du fond du trou consiste à éliminer correctement la totalité des déblais situés au fond de forage. Il faut également, le cas échéant, **supprimer les déblais en suspension dans le fluide stabilisateur** (cf. § 4.3.2.3 « Les centrales de fluide stabilisateur »).

Ces étapes sont fondamentales pour :

- assurer **un contact satisfaisant entre la pointe du pieu et le sol** ;
- obtenir **une bonne interface béton-sol** sur le fût ;
- **éviter le dépôt dû à la décantation ultérieure des déblais** restés en suspension dans le fluide stabilisateur et **éviter les risques d'incorporation de ces dépôts dans le béton** (cf. par exemple la Figure 4.14 « Exemples de pollution du béton sur des carottes prélevées dans des pieux » dans le § 4.1.1 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

6. Selon la norme NF P94-500 définissant les missions géotechniques, G4 correspond à l'étude et le suivi géotechniques d'exécution.

7. BRH : brise roche hydraulique (un exemple de brise roche est présenté dans le § 5.4 « Recépage » du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Curage du fond de l'excavation en fin de forage

Le curage du fond de l'excavation en fin de forage permet :

- d'obtenir la régularité du fond de forage et d'obtenir un bon contact pieu-sol ;
- d'éliminer une grande partie des déblais qui n'ont pas été évacués par l'outil et le fluide stabilisateur.

Le curage est systématiquement réalisé avec un godet spécifique ou outil adéquat (Figure 3.14, Note 1) de diamètre nominal du pieu (à l'exception des barrettes – Note 2). Il est généralement effectué quelques minutes avant l'équipement des pieux, ou en absence d'armatures, avant le bétonnage.

Note 1 : il est à déplorer que les forages :

- sont souvent nettoyés à l'aide **des procédés utilisés pour l'excavation** (soupape, trépan-benne, pompage et injection du fluide stabilisateur en tête de forage, circulation directe) mais inadaptés pour le nettoyage/curage ;
- peuvent être réceptionnés sur la foi **de critères peu significatifs** tels que l'absence de matériaux remontés à la soupape ou au trépan-benne ou encore la présence de moins de 2 % de sable inférieur à 80 μm dans le fluide stabilisateur régénéré (condition nécessaire pour le bétonnage, mais **insuffisante vis-à-vis des risques de sédimentation** des sables plus grossiers, de 5 mm à 80 μm par exemple).

Note 2 : le curage au godet est généralement impossible **pour les barrettes** à cause de leur géométrie. On a alors recours à une pompe immergée puissante à qui l'on fait parcourir l'ensemble de la surface du pied de forage de la barrette.

Figure 3.14 : Exemples de godet utilisé pour le curage de l'excavation



Malfaçons en cas de curage ou de nettoyage mal réalisé⁽⁸⁾ ou absent

Le curage et le nettoyage sont trop souvent négligés dans la pratique, alors que de nombreux exemples relatifs à des terrains et à des techniques très divers (avec ou sans tube de travail, avec ou sans circulation de suspension minérale) témoignent **des difficultés et des défauts** (cf. fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés ») **consécutifs à de mauvaises conditions de nettoyage** :

- **diminution ou absence du terme de pointe** attendu pour fonder l'ouvrage ;
- **arrêt prématuré de la cage d'armature** sur une certaine épaisseur de sédiments en raison, entre autres :
 - d'une absence de curage,
 - de façon moins importante, d'éboulements dus à un manque d'efficacité du fluide stabilisateur lorsque le fluide stabilisateur est insuffisamment dessablé ou mal régénéré ;
- **présence de sédiments** repérés par auscultation sonique ou par carottage du pieu à postériori (cf. fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

On peut trouver aussi **la présence de matériaux remaniés du fond de forage** mis en évidence par **des carottages du pieu** effectués sous la pointe du pieu après son exécution (cf. Figure 7.2 « Exemples de carotte de fond de pieu montrant un défaut de pointe » dans le § 2.1 « Les défauts de pointe » du fascicule 7 « Défauts et réparations des pieux forés »), mais n'étant pas due à la conséquence d'un nettoyage/curage mal réalisé (*Note*).

Note : il peut par exemple s'agir d'une nappe sous l'argile surmontant une couche meuble, qui remonterait dans le forage et désorganiserait le fond de forage.

8. Par exemple avec des outils inadaptés.

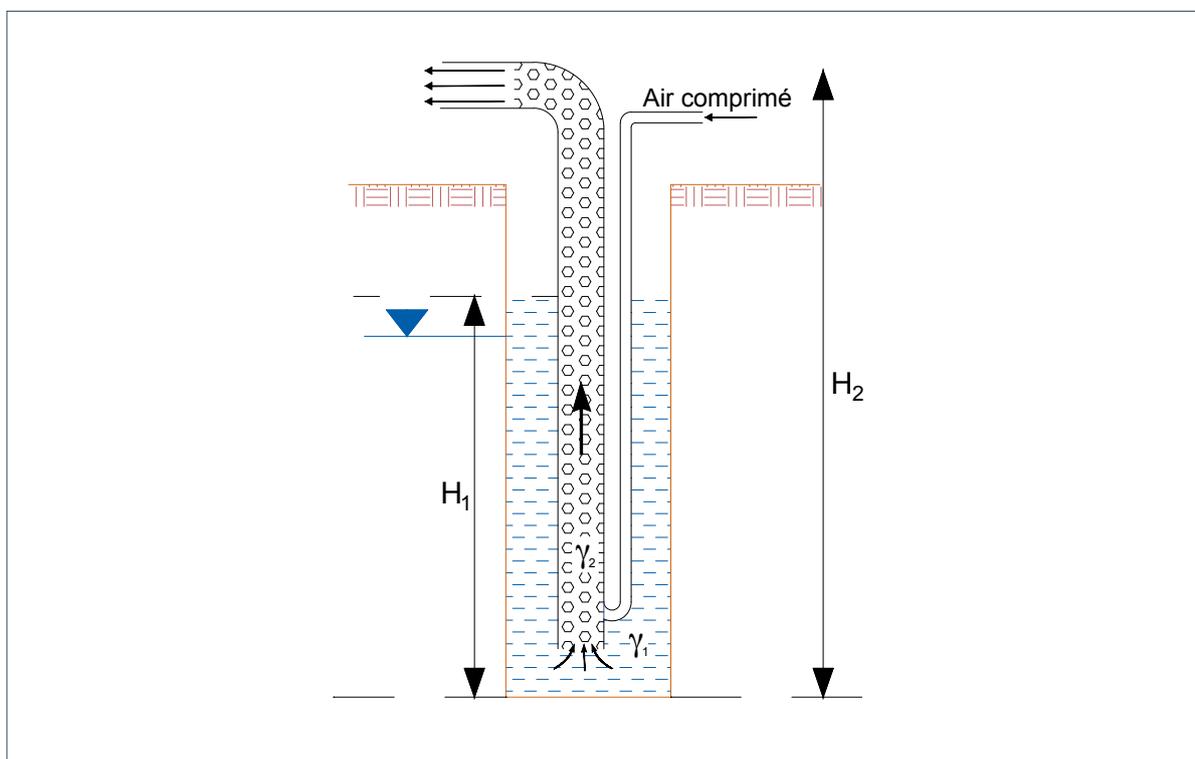
2.5.2 - PRINCIPE DE L'AIR LIFT OU DE L'ÉMULSEUR POUR LE NETTOYAGE DU FLUIDE STABILISATEUR DANS LE FORAGE

Le procédé de l'émulseur ou « air lift » consiste à **plonger verticalement un tube dans le fluide contenu dans un forage, puis à insuffler de l'air comprimé à l'intérieur du tube un peu au-dessus sa base** (Figure 3.15). Cette introduction d'air comprimé produit un dégagement de bulles qui s'élèvent dans le tube et se dilatent au fur et à mesure que décroît la pression. Le mélange eau (ou fluide stabilisateur⁹⁾-sédiments-air ainsi émulsionné présente une densité plus faible que celle du liquide ambiant. Le fluide émulsionné, moins dense (en raison de la présence des bulles d'air), est mis en mouvement par la poussée du fluide le plus dense situé en dessous, provoquant la remontée du fluide émulsionné dans le tube. La différence de densité entre le fluide chargé de poids volumique γ_1 et celui émulsionné de poids volumique γ_2 conditionne le niveau de déversement en haut du tube (H_2-H_1) (Figure 3.15).

Pour le bon fonctionnement de cette technique, un choix judicieux des caractéristiques géométriques du dispositif, de la pression et de la quantité d'air à injecter doit être réalisé.

L'usage de l'air lift avec l'eau comme fluide stabilisateur est présenté dans le § 4.2.1.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Figure 3.15 : Principe de fonctionnement de l'émulseur ou procédé air lift



9. Ce procédé est à utiliser avec précaution avec les solutions de polymères.

CHAPITRE 3

Les matériels d'excavation

3. LES MATÉRIELS D'EXCAVATION

Ce chapitre présente :

- **les machines de forage**, avec une description des différents organes et leurs rôles, ainsi que les caractéristiques entrant en ligne de compte au moment du choix par l'entreprise de la machine la plus adaptée au projet (§ 3.1) ;
- **l'ensemble des matériels d'excavation** permettant d'exécuter le forage d'un pieu. Chaque famille d'outils est décrite avec sa géométrie, son principe de fonctionnement et son domaine d'action (§ 3.2).

Cet inventaire des techniques d'excavation n'est pas exhaustif. Il est essentiel de maintenir un haut niveau de qualité de fabrication des pieux en dépit d'ouvrages et de contextes géotechniques et environnementaux de plus en plus complexes et contraignants en milieu urbain. Le domaine de l'exécution des pieux est de fait continuellement **source d'innovations et de développement de nouvelles techniques**. Celles-ci doivent être validées sur le terrain par des chantiers expérimentaux permettant d'évaluer la qualité des pieux fabriqués, notamment via des essais de chargement in situ (cf. § 2.3 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »). La **clause (9) de la section 1 de la norme NF P94-262 COMPIL1** relative à la justification des fondations profondes selon l'**Eurocode 7 – Partie 1** ouvre la possibilité de faire appel à des procédés particuliers à condition qu'ils aient fait l'objet d'un cahier des charges permettant de compléter les normes en vigueur sur la base d'un certain nombre d'essais ou d'une approche de conception et de dimensionnement optimisés. Ces cahiers de charges doivent faire l'objet d'une validation par des organismes indépendants. **Les évaluations des procédés géotechniques (EPG)⁽¹⁰⁾**, menées conjointement par l'université Gustave Eiffel⁽¹¹⁾ et le Cerema, apportent une assurance que les cahiers des charges portés généralement par les entreprises de travaux spéciaux sont conformes à cette **clause (9)**. Il existe aussi **les enquêtes de techniques nouvelles (ETN)** réalisées par les bureaux de contrôle.

3.1 - LES MACHINES DE FORAGE

On désigne par « **machine de forage** » l'**ensemble constitué de la machine et de ses accessoires qui :**

- **met en mouvement l'outil** par un entraînement qui peut être mécanique, pneumatique, hydraulique, électrique ou encore mixte ;
- **fournit à l'outil la puissance** nécessaire pour déstructurer le terrain ;
- **permet la progression** de l'outil (ou des outils utilisés – *Note*) de la surface jusqu'à la profondeur donnée ;
- **impose l'inclinaison du forage**, dans la limite des contraintes du site (par exemple, le pendage du substratum).

Ses caractéristiques dépendent du mode d'exécution et des outils d'excavation choisis.

Note : par exemple, l'usage du trépan est indissociable de la benne ou du godet, le premier déstructure le terrain, le second retire les matériaux.

3.1.1 - COMPOSANTES DES MACHINES DE FORAGE

Principaux organes des machines de forage des pieux de classe 1

Les différents éléments (détaillés par la suite) qui composent une machine de forage pour la réalisation de pieux forés de classe 1, sont les suivants :

- un « **porteur** » ;
- une « **flèche de grue** » (Figure 3.16) et/ou un « **mât de forage** » (Figure 3.17), permettant la suspension des outils de forage (trépans, bennes, soupapes...) ;
- généralement, une **table de rotation** intégrée (Figures 3.16.d, 3.17 et 3.18) ou auxiliaire, disposée sur une **plateforme fixe ou coulissante**, table éventuellement associée à un **arbre de transmission de rotation, appelé kelly**, (Figures 3.16.d et 3.17.a et § 3.2.1 « Le kelly »).

10. Le guide pour la réalisation des cahiers des charges soumis à une EPG, ainsi que la liste des évaluations des EPG et les membres de la commission sont présentés dans le dossier thématique « Évaluations de Procédés Géotechniques (EPG) » sur le site PILES du Cerema : <https://piles.cerema.fr/>

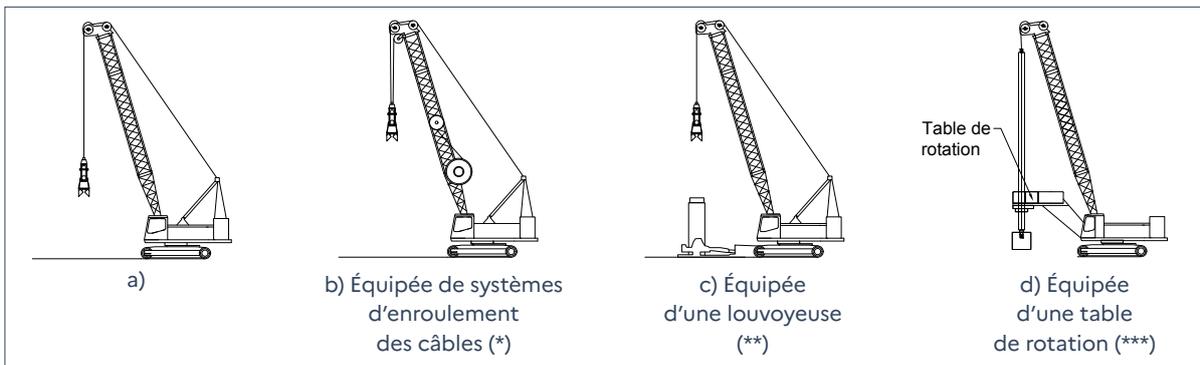
11. Depuis le 1^{er} janvier 2020, l'Ifsttar a fusionné avec cinq autres organismes pour devenir l'université Gustave Eiffel.

Les outils de forage (carottiers, tarières, godets, bennes... – cf. §3.2.2, 3.2.4 et 3.2.5) sont des dispositifs indépendants ne faisant pas partie intégrante de la machine.

Il est possible d'équiper les machines d'une **louvoyeuse** (*Note*) permettant l'enfoncement et l'extraction des tubes (Figures 3.16.c et 3.19).

Note : la louvoyeuse ou tubeuse-détubeuse assure le serrage, le desserrage et le louvoisement du tube, c'est-à-dire le fonçage par mouvements de rotation alternés successifs.

Figure 3.16 : Grue ou pelle à câbles avec ses différents équipements utilisés pour les pieux de classe 1 (schémas de principe)

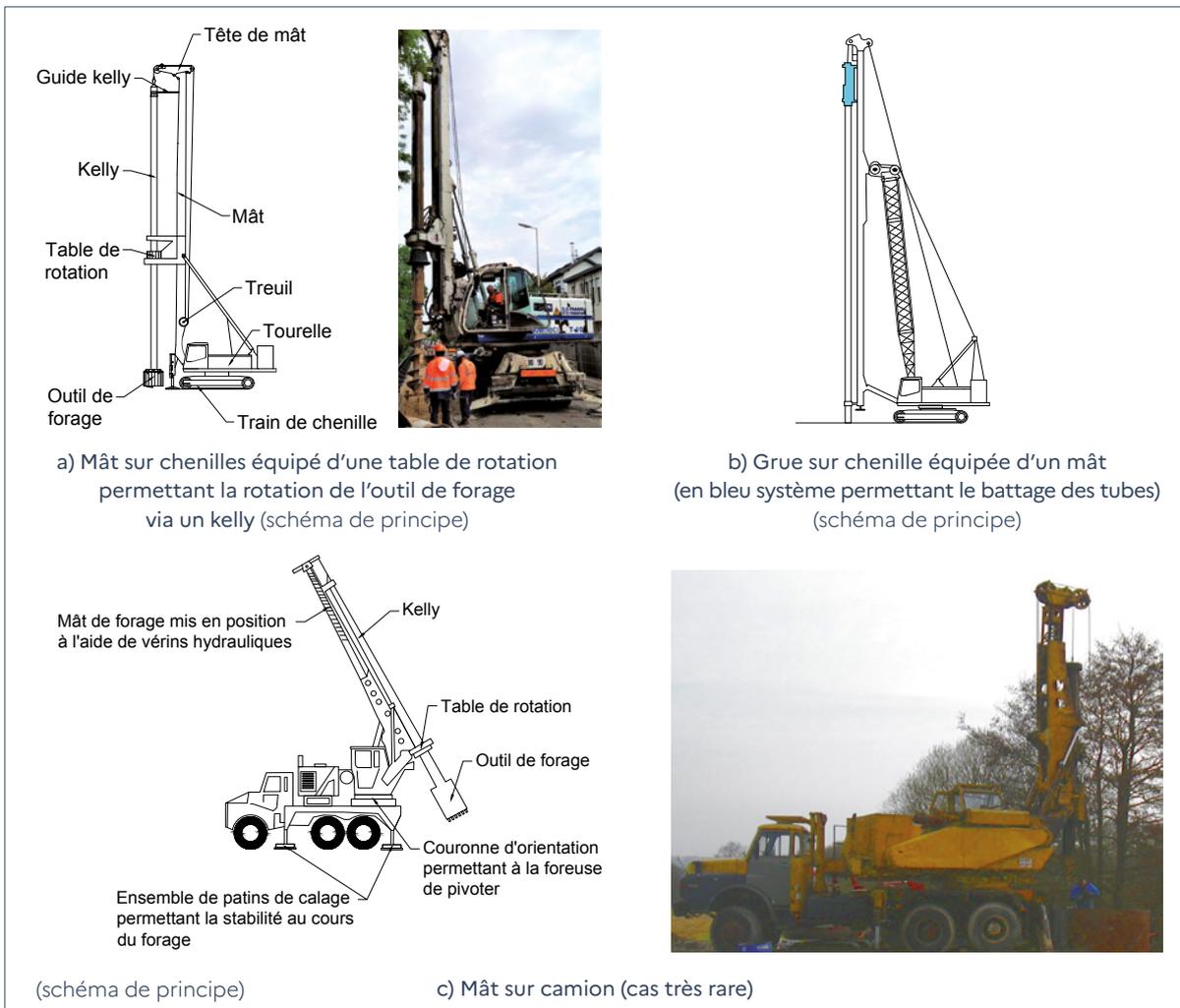


(*) permettant d'excaver plus en profondeur ou de réduire la hauteur de la flèche.

(**) pour enfoncer ou extraire les tubes.

(***) permettant la rotation de l'outil de forage via un kelly.

Figure 3.17 : Mât sur trois types de porteur



(schéma de principe)

c) Mât sur camion (cas très rare)

Figure 3.18 : Exemples de table de rotation



Figure 3.19 : Exemples de louvoyeuse permettant l'enfoncement et le retrait des tubes pour la réalisation des pieux forés tubés de gros diamètre ou de grande longueur (cf. « Mise en œuvre des tubes et précautions associés » dans le § 5.2.2 « Les tubes récupérés ou perdus »)



Principaux organes des machines de forage des pieux de classe 2

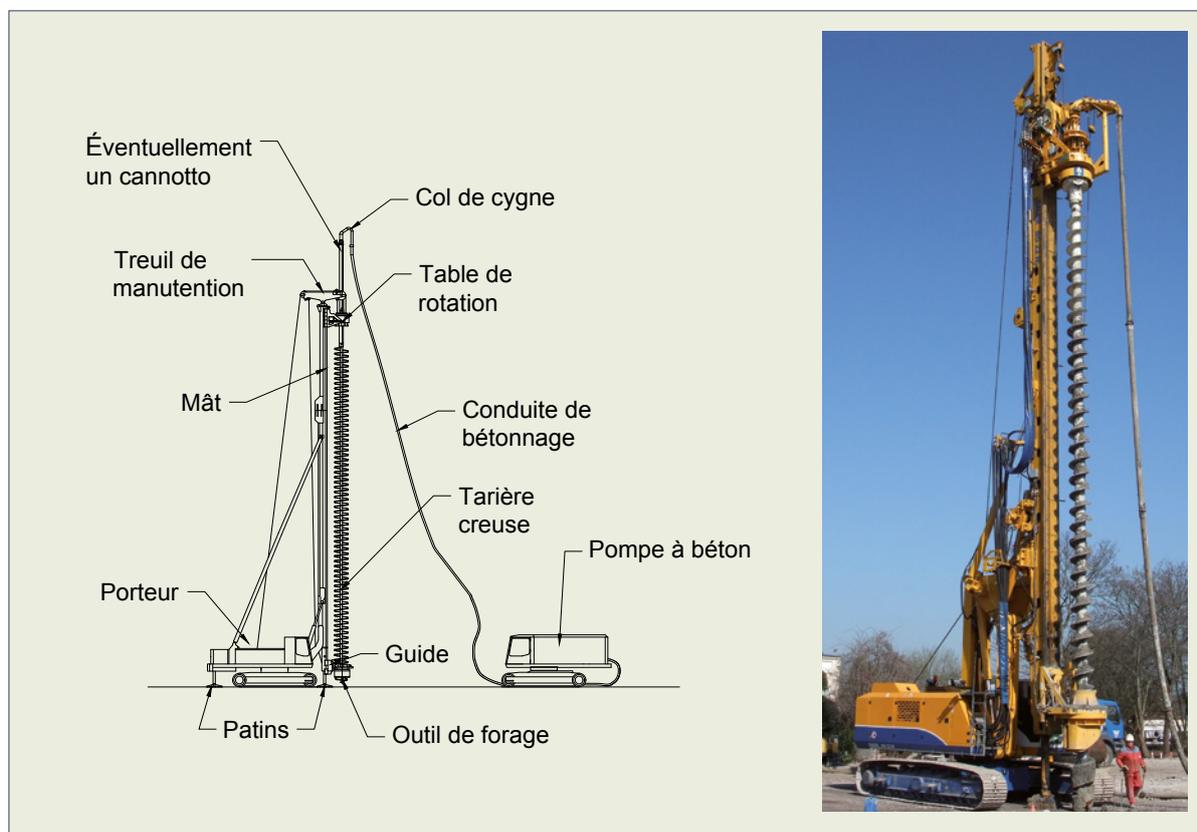
Un atelier de type tarière creuse (Figure 3.20) est constitué au minimum :

- d'un porteur ;
- d'un mât ;
- d'une table de rotation qui coulisse sur le mât ;
- d'une tarière continue à âme creuse (cf. § 3.2.3.2), montée sur la table de rotation et terminée par un outil de forage (cf. § 3.2.3.3) ;
- d'un guide (cf. § 3.2.3.5) ;
- en tête, la tarière peut être prolongée par une rallonge sans pale qui prend le nom de **cannotto** (Figure 3.51 dans le § 3.2.3.1) lorsqu'elle est coulissante à travers la table de rotation (*Note*) ;
- d'un **col-de-cygne**⁽¹²⁾ qui relie l'âme creuse et les conduites de béton permettant l'alimentation en béton à partir d'une **pompe à béton** (cf. § 4.1.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- d'un **patin** situé sous le mât mobilisant la réaction du sol lors de l'extraction de la tarière.

12. Le terme col-de-cygne provient de la forme de ce dispositif. Le béton provenant des conduites solidaires de la pompe à béton circule dans cette conduite spécifique pour faire un virage à 180° (de vertical ascendant à vertical descendant). Un joint tournant placé sous le col-de-cygne assure la liaison entre le col-de-cygne qui ne tourne pas et les éléments de tarière (ou le cannotto) qui tournent en étant solidaires de la table de rotation.

Note : certains documents tels que le Fascicule 68 du CCTG limitent la longueur de pénétration dans le sol de cette rallonge à 3 m. Dans tous les cas, la procédure d'exécution doit être mise en conformité avec les éléments de dimensionnement des pieux et réciproquement.

Figure 3.20 : Description de la machine de réalisation des pieux à la tarière creuse (classe 2)
(schéma de principe)



Le « porteur » de la machine de forage des pieux de classe 1

Le choix du porteur doit être un compromis entre le coût de la mobilisation de l'engin, la facilité de déplacement et de mise en place sur le site, et les cadences envisageables.

La machine de forage est montée sur ce porteur, et peut être :

- un mât monté sur un porteur à chenilles (Notes 1 et 2) (Figures 3.17.a et 3.21). Ces machines ne permettent que l'utilisation des outils de forage par rotation (cf. § 3.2.2) et présentent une excellente mobilité sur le chantier. Généralement, l'équipement de forage (mât) est fixé de manière permanente. Ces machines sont souvent les plus puissantes et généralement les plus rencontrées ;
- une grue ou pelle à câbles sur chenilles équipée d'un kelly ou d'un mât (Notes 1 et 2 et Figures 3.16.d et 3.17.b), cas rare, qui permet le montage d'une table de rotation avec kelly (Figure 3.22) ou d'un mât, mais qui présente généralement une puissance de pénétration moins importante qu'avec l'utilisation d'un mât directement sur porteur. Ces machines ont l'avantage principal de pouvoir réaliser le forage à distance de la machine de forage grâce à l'inclinaison de la flèche ;
- une grue (ou pelle) à câbles montée sur chenilles avec utilisation d'outils d'excavation par percussion, cas devenant rare (Figures 3.16.a, 3.16.b et 3.16.c et cf. § 3.2.4 « Autres outils d'excavation pour la réalisation des pieux de classe 1 ») ;
- un mât monté sur un camion (cas très rare) du genre poids lourd tout terrain (Figure 3.17.c), dont la mobilité est son plus grand avantage, à condition que le chantier soit praticable avec des véhicules à pneus.

Note 1 : lorsque les machines de forage sont très lourdes, il est possible que les chenilles soient retirées lors du transport sur route. Il faut donc prévoir de les réinstaller, soit sur le chantier s'il est praticable, soit hors du chantier.

Note 2 : pour la majorité des machines, les chenilles sont rétractables ; la position étendue contribue à la stabilité de la machine, et la position rétractée répond en principe aux normes de circulation en vigueur sur route lors du transport.

Figure 3.21 : Exemples de mât sur chenilles équipée d'un kelly

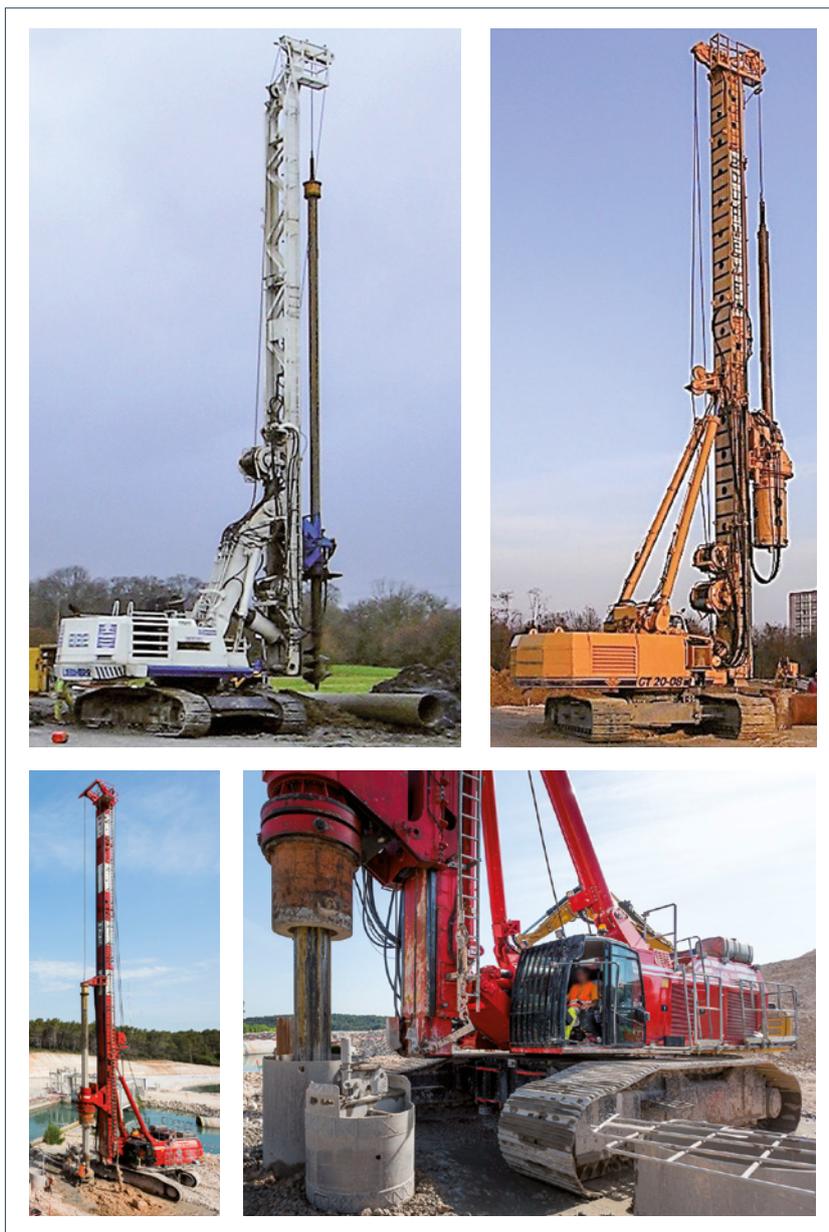


Figure 3.22 : Grue ou pelle à câbles équipée d'un kelly



Les progrès majeurs des machines de forage

Ces machines sont en constante évolution et ont connu des progrès majeurs ces dernières décennies. On retiendra en particulier :

- **l'augmentation des puissances**⁽¹³⁾ des moteurs thermiques et hydrauliques. Les moteurs thermiques présentent une technologie simple et légère et sont plutôt réservés de nos jours aux petites machines. Les moteurs hydrauliques permettent des plages importantes de couple de rotation et une facilité de mouvement accrue, mais ils sont souvent plus lourds et plus chers ;
- **la qualité du matériel** qui conditionne la verticalité du forage, mais la qualité du personnel et celle de la plateforme de travail y contribuent aussi ;
- **l'amélioration des différentes technologies, notamment pour le guidage du forage.** Les machines les plus modernes permettent de visualiser et de contrôler l'inclinaison du kelly ou de l'outil directement dans la cabine de pilotage. Il s'agit d'un élément prépondérant pour s'assurer du respect de la verticalité ou de l'angle d'inclinaison préconisé pour le futur pieu.
- **les kellys télescopiques** permettent d'obtenir des profondeurs importantes pouvant dépasser exceptionnellement les 100 m⁽¹⁴⁾. Ces kellys sont aussi plus lourds et ont besoin de porteurs plus lourds également. Des progrès conséquents ont aussi été réalisés en matière de transmission des efforts (poussée et rotation) avec **les kellys « à enclenchements »** (Figure 3.31.a dans le § 3.2.1) et **les kellys « à friction »** (Figure 3.31.b dans le § 3.2.1) ;
- **l'adaptabilité de certaines machines**, qui permettent un changement rapide et aisé de technologie en cours de chantier. Dans certaines situations, la diversité des terrains traversés fait que la meilleure solution du point de vue de la qualité du forage et de la rapidité d'exécution est d'avoir recours à plusieurs outils différents. Certaines machines étant conçues pour fonctionner avec un nombre restreint d'outils, il peut être nécessaire de mobiliser plusieurs machines pour un même forage. Dans ce cas, les coûts de l'immobilisation de plusieurs machines et du temps passé pour les mises en station lors des changements de technique de forage peuvent justifier le recours à une machine plus polyvalente. L'utilisation aujourd'hui courante de machines équipées d'un kelly a vulgarisé les machines polyvalentes.

3.1.2 - PARAMÈTRES ET CARACTÉRISTIQUES DES MACHINES DE FORAGE

3.1.2.1 - Paramètres et caractéristiques indicatifs pour les pieux forés de classe 1

Exigence de puissance des machines de forage pour la réalisation des pieux de classe 1

Il est demandé à une machine de forage de fournir la puissance suffisante pour :

- **forer les sols et les roches à traverser**, en combinant une poussée sur l'outil et un couple force-vitesse de rotation de l'outil suffisants, en particulier au moment critique de la réalisation de l'ancrage ; mais aussi éventuellement pour :
- **mettre en place et retirer le tube** (cf. § 5.2.2 « Les tubes récupérés ou perdus »), via la tubeuse-détubeuse (appelée aussi « louvoyeuse ») par louvoisement (Figure 3.19 dans le § 3.1.1), par rotation du tube (Figures 3.23.a et 3.23.b), par vibrofonçage (Figure 3.23.c), ou par battage (Figure 3.17.b dans le § 3.1.1) ;
- **extraire le cas échéant les outils chargés des matériaux excavés**, car il est alors nécessaire de fournir un effort de traction suffisant pour remonter à la surface l'ensemble constitué du kelly et de l'outil rempli de matériaux et venant frotter contre les parois du forage.

13. Même si, à puissance équivalente, les machines ont tendance à s'alléger ; l'augmentation des puissances est nécessairement associée à un alourdissement des machines.

14. Par exemple les 150 m de profondeur sont actuellement atteints avec des kellys télescopiques à cinq éléments.

Figure 3.23 : Exemples de mise en œuvre de tube



Critères de dimensionnement des machines de forage des pieux forés de classe 1

La machine est donc « dimensionnée » de façon à pouvoir réaliser l'ensemble de ces actions en fonction des contraintes du chantier : diamètre et longueur des pieux, terrains rencontrés, méthodes d'exécution et nombre de pieux prévus (par exemple, ce n'est qu'à partir d'un certain nombre de pieux, qu'il peut devenir plus économique de réaliser des pieux forés avec un fluide stabilisateur (pieux forés boue) plutôt que des pieux tubés, malgré le surcoût de l'installation et de la gestion de la centrale de bentonite) fluide stabilisateur (cf. § 4.3.2.3). Afin de sélectionner la machine de forage présentant les caractéristiques techniques suffisantes, il est possible de s'appuyer sur :

- la capacité et la vitesse du treuil, qui traduit l'aptitude à retirer l'outil du forage. Cette puissance doit être estimée en prenant en compte le poids de l'outil alourdi par les déblais à évacuer, les frottements le long de la paroi du forage et l'effet de succion en cas de forage sous fluide stabilisateur ;
- le poids du kelly (cf. § 3.2.1), qui apporte sa contribution dans l'effort de poussée mais requiert un effort supérieur de traction au moment du retrait de l'outil ;
- le poids de la machine, qui doit assurer une stabilité suffisante devant les efforts de poussée et de traction parfois très importants qui peuvent être transmis au kelly ;
- le pull down, qui exprime l'effort vertical (plus généralement axial) transmissible à l'outil afin de permettre à celui-ci de déstructurer le matériau et de pénétrer dans le terrain ;
- le couple de rotation.

En fonction du terrain et des spécifications du dossier, le titulaire du marché choisit parmi son parc de matériel la machine disposant de la « puissance machine » suffisante (Note) pour :

- l'excavation des sols ;
- la mise en place et le retrait éventuels du tube ;
- la remontée des matériaux excavés.

⚠ Ces machines sont généralement très lourdes, ce qui implique de prévoir les accès sur chantier suffisamment dimensionnés pour leur traficabilité (géométrie et résistance suffisante de la plateforme – cf. § 3.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Note : le titulaire du marché évalue la cadence associée pour déterminer le coût des travaux et proposer le meilleur rapport qualité-sécurité-coût-délai. Le choix peut, par exemple, se porter sur :

- une machine moins puissante (et donc moins coûteuse), qui va moins vite (donc plus coûteuse en durée) ou
- une machine plus puissante (donc plus coûteuse), qui va plus vite (donc moins coûteuse en durée).

Capacité des machines de forage des pieux de classe 1

Le tableau indicatif (Tableau 3.1) proposé est **destiné à fournir des ordres de grandeur** pouvant servir de référence en phase de conception, mais il est toutefois recommandé que **le concepteur fixe dans les pièces du marché une obligation de résultat laissant à l'entreprise le choix des moyens** (cf. ⚠ Note à l'intention des concepteurs).

Dans un but de clarté, **nous avons choisi de distinguer quatre capacités de machines**, numérotées de 1 (la moins puissante) à 4 (la plus puissante). La capacité des machines de forage est associée de façon indicative à la géométrie des pieux envisageables et à une valeur minimale pour chacun des cinq paramètres présentés (cependant d'autres critères plus spécifiques entrent aussi en ligne de compte).

⚠ Note à l'intention des concepteurs :

Il est **important d'éviter le travers** qui consisterait à imposer systématiquement des machines aux capacités les plus importantes dans les pièces marché dans le but de se couvrir, au risque :

- **d'augmenter de manière substantielle le coût des fondations** (coût relatif aux pieux, installation, plateforme de forage, immobilisation de chantier...);
- **de ralentir considérablement les délais de chantier** (délai relatif à la disponibilité des machines et de leur transport mais aussi de réalisation : les machines de plus petit gabarit étant bien souvent beaucoup plus maniables).

En cas d'aléa, **la responsabilité du concepteur** serait alors plus importante ou entière. Sauf cas spécifique étayé dans les pièces marché, **il est recommandé de laisser ce choix à la responsabilité des entreprises**.

Tableau 3.1 : Classification des machines de forage par rotation des pieux de classe 1 en fonction de leur performance

		Capacité des machines de forage par rotation (kelly à mât – Figure 3.24) de pieux de classe 1 ^{d)}			
		Capacité 1	Capacité 2	Capacité 3 ^{b)}	Capacité 4 ^{b, c)}
Dimension usuelle de l'élément de fondation ^{a)}	Diamètre	600 mm	800 mm	1 200 mm	2 500 mm
	Profondeur	15 m	25 m	40 m	100 m
Capacité du treuil		3 t	8 t	20 t	≥ 40 t
Poids du Kelly (la masse ici)		1 t	2 à 3 t	8 t	≥ 20 t
Poids de machine (la masse ici)		8 à 15 t	15 à 40 t	40 à 75 t	> 75 t
Pull down ¹⁵⁾		Pas de pull down	8 t	20 t	> 20 t
Couple de rotation		3 à 6 tm	8 à 12 tm	10 à 20 tm	> 20 tm

a) Il ne s'agit que d'ordre de grandeur pour la conception et non pas d'une garantie de réussite d'excavation (en cas de doute, se reporter au pieu de faisabilité ou à une expérience comparable) : le savoir-faire de l'entreprise entre aussi en jeu. À contrario, une machine moins lourde ou moins puissante peut être adaptée à une profondeur moindre et/ou à un sol propice et/ou à une technique de forage donnée (par exemple, forer à l'intérieur d'un tube requiert une plus faible énergie, toutes choses égales par ailleurs).

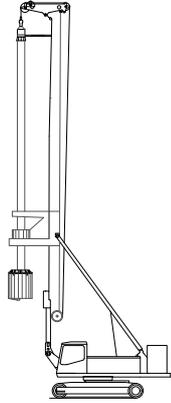
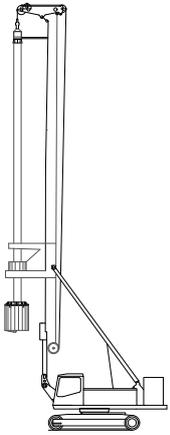
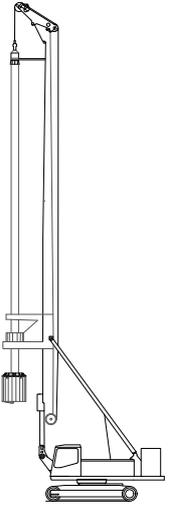
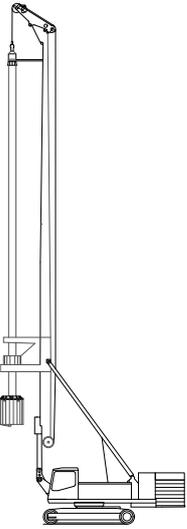
b) Pour permettre leur transport, on passe généralement en convoi exceptionnel spécifique (TE – Transport exceptionnel) à partir des machines de capacité 2. De plus, **les machines de capacité 3 doivent généralement être partiellement démontées (cf. réglementation sur les TE)**.

c) Les données de ces machines sont indicatives, et progressent régulièrement avec les évolutions technologiques.

d) En fonction du critère retenu, la machine peut être de capacité différente.

15. Le pull down exprime l'effort vertical (plus généralement axial) transmissible à l'outil afin de permettre à celui-ci de déstructurer le matériau et de pénétrer dans le terrain.

Figure 3.24 : Exemples des différents gabarits des machines de forage pour les pieux de classe 1 de type mât vertical (schémas de principe)

			
<p>Largeur : 3 - 4 m Longueur : 7,70 - 8,30 m Hauteur : de 18 à 22 m Diamètre (*) de forage : jusqu'à 1 500 mm Profondeur (*) de forage : jusqu'à 1 500 mm</p>	<p>3 - 4,30 m 8,30 - 9,50 m Entre 22 et 30 m jusqu'à 2 500 mm jusqu'à 2 500 mm</p>	<p>3,40 - 4,60 m 9,50 - 11,50 m Jusqu'à 30 m jusqu'à 2 500 mm jusqu'à 2 500 mm</p>	<p>3,40 - 4,60 m 9,50 - 11,50 m Jusqu'à 30 m jusqu'à 2 500 mm jusqu'à 2 500 mm</p>

(*) Le diamètre maximal peut être incompatible avec la profondeur maximale et réciproquement.

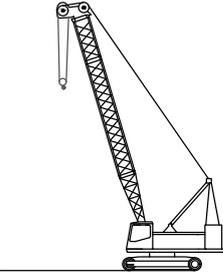
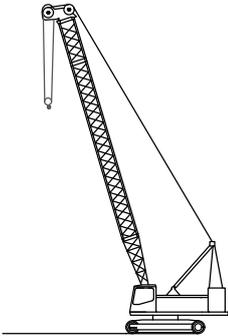
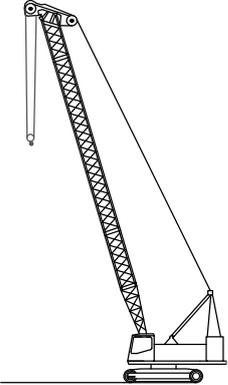
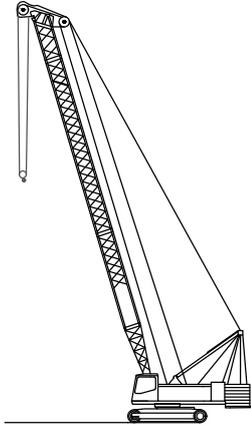
Envergure des machines de forage des pieux de classe 1 (Figures 3.24 et 3.25)

Dans certains environnements contraints, notamment en milieu urbain, **l'emprise peut être un facteur limitant pour le choix de la machine de forage**, à la fois :

- **au niveau du sol :** périmètre de la zone de travail limité par du bâti, la proximité de la circulation... ;
- **en hauteur :** travail sous un ouvrage existant, à proximité de lignes électriques...

Les recours à une benne ou à un kelly télescopique, voire à des machines compactes et/ou avec un mât court conçues spécifiquement pour ce genre d'environnement font partie des solutions régulièrement adoptées.

Figure 3.25 : Exemples de différents gabarits de grue ou de pelle à câbles (schémas de principe)

			
<p>Largeur : 5 000 mm Longueur : 8 200 mm Longueur max de la flèche : 34 m</p>	<p>5 300 mm 8 300 mm 45 m</p>	<p>6 300 mm 10 500 mm 55 m</p>	

Position de la machine de forage par rapport au forage pour la réalisation des pieux de classe 1

La position du forage (Figure 3.26) par rapport à celle de la machine est de l'ordre :

- de 1,50 m et de 2 m **dans le cas de l'utilisation d'un mât** ;
- de 4 m **exceptionnellement pour les machines sur grue équipée d'un kelly** ;
- jusqu'à 20 m **pour les bennes à câbles montées sur grue (Note)**.

Ce paramètre peut s'avérer dimensionnant dans certaines situations, notamment lorsque l'implantation des pieux à réaliser est déportée par rapport à la plateforme de travail.

Il faut noter que, selon la machine utilisée, la puissance est différente ; les machines équipées de mâts sont plus puissantes que celles sur grue avec kelly qui sont elles-mêmes plus puissantes que celles à grue ou pelle à câbles.

Note : les grues à câbles peuvent aussi être appelées « pelles à câbles ».

Figure 3.26 : Distance entre le forage et la machine de forage : forage de quatre pieux à l'aide d'une grue (ou pelle) à câbles sur une estacade



3.1.2.2 - Paramètres et caractéristiques indicatifs pour les pieux forés de classe 2 (tarière creuse)

Critères de dimensionnement des machines de forage des pieux forés tarière creuse (classe 2)

Lors du forage d'un pieu, la puissance de la machine est utilisée :

- **pour permettre la déstructuration des terrains** à la base de la tarière, et aussi pour les tarières double rotation à la base du tube (avec une trousse coupante) ;
- **pour s'opposer** :
 - dans le cas de la tarière simple rotation, aux forces de frottement sol-sol et sol-tarière s'exerçant le long de la tarière (les parois de forage sont stabilisées par le sol entre les pales de la tarière),
 - dans le cas de la tarière double rotation, aux forces de frottement sol-tube et sol-tarière à la base.

La puissance du moteur des machines de forage des pieux forés tarière creuse (classe 2)

La puissance du moteur est répartie lors du forage entre :

- **la table de rotation** (ou les tables dans le cas d'une tarière double rotation), et
- **le dispositif d'appui** (vérin ou treuil).

Capacité des machines de forage tarière creuse (classe 2)

Afin de guider le concepteur, des tableaux indicatifs (Tableaux 3.2 et 3.3) sont proposés et destinés à fournir des ordres de grandeur pouvant servir de référence en phase de conception, mais il est toutefois recommandé que le concepteur fixe dans les pièces du marché une obligation de résultat laissant à l'entreprise le choix des moyens (cf. ⚠ Note à l'intention des concepteurs).

Quatre capacités de machines de tarière creuse simple rotation (Figure 3.27) et quatre de tarière creuse double rotation (Figure 3.28) sont présentées, numérotées de 1 (la moins puissante) à 4 (la plus puissante).

Les machines de tarière creuse à double rotation sont généralement plus imposantes pour pouvoir être stables malgré le poids supplémentaire de la double table et du tube de travail. De même, elle possède une puissance supérieure pour actionner cette double table, à diamètre identique.

Les choix des caractéristiques de la machine de forage (Tableaux 3.2 et 3.3) doivent correspondre aux spécificités des pieux à réaliser et du contexte géotechnique (cf. Tableau 3.16 « Tableau fournissant un ordre de grandeur pour la phase conception des capacités des machines pour la réalisation de pieux de classe 2 dans des conditions optimales et pour des diamètres de 600 à 800 mm » dans § 6.4 « Adéquation de la puissance des machines de forage pour les pieux de classe 2 »).

Si rien ne remplace les expériences passées, et sous réserve de nombreuses mises en garde exposées ci-après, les concepteurs pourront s'inspirer du Tableau 3.16 pour vérifier la faisabilité de leur projet (cf. ⚠ Note à l'intention des concepteurs).

⚠ Note à l'intention des concepteurs :

Il est important d'éviter le travers qui consisterait à imposer systématiquement des machines aux capacités les plus importantes dans les pièces marché dans le but de se couvrir, au risque :

- d'augmenter de manière substantielle le coût des fondations (coût relatif aux pieux, installation, plateforme de forage, immobilisation de chantier...);
- de ralentir considérablement les délais de chantier (délai relatif à la disponibilité des machines et de leur transport mais aussi de réalisation : les machines de plus petit gabarit étant bien souvent beaucoup plus maniables).

En cas d'aléa, la responsabilité du concepteur serait alors plus importante ou entière. Sauf cas spécifique étayé dans les pièces marché, il est recommandé de laisser ce choix à la responsabilité des entreprises.

Figure 3.27 : Exemples de machine de forage à la tarière creuse simple rotation



Figure 3.28 : Exemples de machine de forage à la tarière creuse double rotation



Tableau 3.2 : Classification possible des machines de forage des pieux forés tarière creuse simple rotation (classe 2)

(⚠ Tableau fourni à titre indicatif, le choix de la machine est du ressort de l'entreprise)

Machine de capacité	Puissance ^{a)}	Couple de rotation (kN.m)	Force d'extraction ^{b)} (kN)	Force d'appui effective (kN)	Gamme de masse en mode travail ^{a)} (en t)
1		< 150	< 500	–	20 à 50
2		150 à 300	500 à 700	0 à 100	50 à 80
3		300 à 400	700 à 1 000	100 à 300	80 à 120
4		> 400	> 1 000	> 300	> 120 ^{c)}

a) Selon le critère retenu, le classement de la machine peut être différent.

b) Effort vertical mobilisable par la machine de forage pour remonter l'outil. Cette force est importante pour les machines de tarière creuse car elle doit permettre la remontée de la tarière et des déblais entre les pales.

c) À la date de rédaction du guide, un constructeur propose une machine atteignant une masse de 280 t.

Tableau 3.3 : Classification possible des machines de forage des pieux forés tarière creuse double rotation (classe 2)

(⚠ Tableau fourni à titre indicatif, le choix de la machine est du ressort de l'entreprise)

Machine de capacité	Puissance ^{a)}	Couple de rotation de la tarière (kN.m)	Couple de rotation du tube (kN.m)	Force d'extraction ^{b)} (kN)	Force d'appui effective (kN)	Gamme de masse en mode travail (en t)
1		≤ 60	≤ 60	0 à 200	0 à 200	40 à 60
2		≤ 80	≤ 120	200 à 300	200 à 300	60 à 80
3		≤ 150	≤ 300	300 à 800	300 à 400	80 à 120
4		≥ 200	≥ 360	≥ 1 000	≥ 400	> 120 ^{c)}

a) Selon le critère retenu, le classement de la machine peut être différent.

b) Effort vertical mobilisable par la machine de forage pour remonter l'outil. Cette force est importante pour les machines de tarière creuse car elle doit permettre la remontée de la tarière et des déblais entre les pales.

c) À la date de rédaction du guide, un constructeur propose une machine atteignant une masse de 280 t.

Envergure des machines de forage des pieux tarière simple rotation (classe 2)

On retiendra que :

- le poids de la machine participe à la stabilité de l'atelier et augmente avec la puissance développée (Note 1) ;
- les dimensions du mât déterminent la profondeur maximale atteignable (Note 2) et le couple utilisable (Note 3) ;
- l'encombrement au sol en position de travail, est d'autant plus grand que le centre de gravité de la machine est élevé, c'est-à-dire que le diamètre est grand et/ou la profondeur élevée (Notes 4 et 5) ;
- les longueurs en mode travail sont généralement comprises entre 8 et 13 m et peuvent pour certaines machines atteindre 17 m.

Note 1 : entre des machines de capacité successive, l'écart de poids est relativement important (Tableau 3.2). Il faut néanmoins garder à l'esprit que les gabarits des machines sont très variables selon les constructeurs.

Note 2 : différentes solutions permettent de limiter la hauteur du mât sans perdre en profondeur : le cannotto (Figure 3.51 dans le § 3.2.3.1 « Le dispositif de forage pour la réalisation des pieux de classe 2 ») et/ou le mât télescopique sont les plus répandues.

Note 3 : il est fréquent sur les machines les plus hautes que le couple maximal ne soit pas utilisable en tête de mât et/ou d'avoir des limitations sur le diamètre.

Note 4 : la largeur dépasse usuellement 3,5 m et peut atteindre plus de 7 m.

Note 5 : pour les machines de gabarit important :

- en plus des chenilles et du patin central situé sous le mât, une stabilisation par deux ou quatre patins périphériques peut être nécessaire ;
- certains éléments sont démontables ou rétractables afin de faciliter leur transport ;
- les délais d'obtention d'autorisation de transport sont fortement augmentés.

Profondeurs usuelles de forage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

Pour les pieux de classe 2, la profondeur atteignable est limitée par la hauteur du mât et donc le gabarit des machines.

Depuis les 20 dernières années, les dimensions des foreuses se sont accrues pour permettre d'atteindre des profondeurs de forage toujours plus importantes. La profondeur atteignable (hors problématique de puissance de forage et de diamètre de forage) est, pour les techniques de classe 2, un des facteurs limitant à vérifier par les concepteurs, pour le choix de cette technique.

Les Tableaux 3.4 et 3.5 fournissent une représentation du parc matériel existant sur le territoire français à la date de rédaction du guide.

Tableau 3.4 : Représentation du parc matériel français des machines de pieux tarière creuse simple rotation (classe 2)

Profondeur atteignable limitée à	10 m	20 m	25 m	30 m	35 m	50 m
Disponibilité des machines	-	++	+	0	-	--

Diamètre de forage (mm)	< 800	< 1 000	< 1 200	> 1 200
Disponibilité des machines	++	+	0	-

Légende :
 ++ : très répandue sur le marché français ; + : répandue sur le marché français ; 0 : disponible sur le marché français
 - : limitée à quelques foreuses sur le marché français ; -- : limitée à quelques foreuses sur le marché international

Tableau 3.5 : Représentation du parc matériel français des machines de pieux tarière creuse double rotation (classe 2)

Profondeur (m)	Diamètre (mm)	600 à 700	800 à 900	1 000 à 1 200
	10 à 12		+	0
12 à 15		+	0	-
15 à 20		0	0	-
20 à 25		0	-	-

Légende :
 + : répandue sur le marché français ; 0 : disponible sur le marché français ; - : limitée à quelques foreuses sur le marché français

Comparaison des machines simple/double rotation pour la réalisation de pieux de classe 2 (tarière creuse)

Afin d'actionner la double table, les machines pour la réalisation de pieux forés tarière creuse double rotation requièrent, à diamètre de pieu identique, une puissance supérieure à celle pour la simple rotation. En effet, la puissance hydraulique est :

- d'une part, à répartir sur deux tables de rotation et,
- d'autre part, la force d'extraction doit permettre de retirer la tarière, mais en plus la masse du tube et de la seconde table de rotation.

Les machines pour la réalisation pieux forés tarière creuse double rotation sont généralement plus imposantes pour pouvoir être stables à cause du poids supplémentaire de la double table, du tube de travail et éventuellement du système de collecte et d'évacuation des déblais (cf. § 3.2.3.6), qui font que leur centre de gravité se retrouve plus haut.

3.1.2.3 - Montage et démontage des machines de forage

À partir d'une certaine envergure (la plupart des machines de capacité 4 du Tableau 3.1 dans le § 3.1.2.1 et de capacité 3 et 4 du Tableau 3.2 dans le § 3.1.2.2), les machines doivent être partiellement démontées pour être transportées par colis au gabarit routier et assemblées sur site (Figure 3.29).

Le poids maximum pouvant être transporté par un porte-char est de 80 t utiles (soit pour un convoi, 120 t avec le porte-char compris). De ce fait, il est possible, afin d'alléger le convoi, que les chenilles soient retirées pour le transport. Dans ce cas, il faut prévoir leur remontage sur le chantier.

En fonction du type de machine, l'emprise nécessaire pour le remontage peut être variable.

Figure 3.29 : Montage (ou démontage) d'une machine de forage : mât et treuil d'une grue en attente de montage



3.2 - MATÉRIELS DE FORAGE

Comme dans le domaine des machines de forage, l'offre ne cesse de s'étoffer en ce qui concerne les outils d'excavation, permettant ainsi d'augmenter encore les diamètres et les cadences.

Selon la technique de déstructuration du matériau à excaver, la mise en œuvre du forage peut être classée en deux grandes catégories :

- par rotation (§ 3.2.2 pour les pieux de classe 1 et § 3.2.3 pour les pieux de classe 2) ;
- par percussion (§ 3.2.4).

Pour les pieux de classe 1, les outils de forage de type tarière, godet et carottier, sont mis en rotation via une barre télescopique appelée « kelly » (§ 3.2.1).

Nota bene : Les tableaux de synthèse présentés à la fin de ce fascicule (chapitre 6) fournissent des informations sur le choix des méthodes d'excavation en fonction de la nature des sols.

3.2.1 - LE KELLY

Le kelly (Figures 3.16.d, 3.17.a, 3.21, 3.22 et 3.24 dans le § 3.1.1 et Figure 3.31)

Le kelly est une tige en acier faisant office d'arbre de transmission de la poussée et de la rotation permettant le forage. Il fait le lien entre la table de rotation et l'outil de forage. Sa translation le long du mât est assurée par un câble entraîné par un treuil du porteur. La géométrie très élancée d'un kelly et sa rigidité permettent de maîtriser son inclinaison le long du mât de la machine et de limiter la déviation de l'outil en cours d'excavation par rapport à une simple tête de forage. Les kellys peuvent avoir une section circulaire ou carrée, et être composés d'un ou de plusieurs éléments télescopiques (*Note*) permettant d'atteindre des longueurs importantes, de l'ordre de 100 m. La Figure 3.30 montre le transport d'un kelly.

Note : le diamètre extérieur du kelly dépend du couple qu'il doit transmettre et du nombre d'emboîtements qu'il comprend : plus le couple est élevé ou plus la profondeur à atteindre est importante, plus le diamètre minimal de forage (nécessairement supérieur au diamètre extérieur du kelly) sera grand

Kellys à enclenchements ou à friction

Le kelly a fait l'objet de nombreux développements améliorant les capacités de forage, entre autres **en matière de transmission des efforts** (poussée et rotation) **grâce aux deux systèmes suivants** :

- **les kellys « à enclenchements »** (Figure 3.31.a), qui constituent la majorité des dispositifs rencontrés sur le marché. Le rail de guidage de chaque élément est équipé de redans permettant l'entraînement des éléments suivants au moment de la mise en rotation. Cette technologie permet le transfert des efforts de rotation et de poussée. Elle est généralement utilisée pour les forages dans des terrains résistants. L'usure de ces éléments implique de l'entretien. Une chute brutale des éléments en cas de déblocage non contrôlée de la clé de verrouillage peut endommager la table de rotation ou conduire à la rupture des câbles ;
- **les kellys « à friction »** (Figure 3.31.b). Les efforts se transmettent d'un rail de guidage à l'autre par les frottements générés par l'application d'un couple en tête du kelly. Les pertes d'énergie entre la table de rotation et l'outil d'excavation sont plus importantes qu'avec un kelly « à enclenchements », mais les profondeurs atteignables sont plus grandes, et ce système entraîne moins d'usure des éléments. Néanmoins, l'accrochage entre les éléments de tiges ne se fait que si les kellys rencontrent une résistance à la rotation au niveau de l'outil en pied ; cette technologie peut donc se révéler inadaptée pour les sols fins peu compacts qui risquent de « savonner ».

Figure 3.30 : Exemple de transport exceptionnel d'un kelly



Figure 3.31 : Exemples de kelly



3.2.2 - OUTILS D'EXCAVATION PAR ROTATION POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 1

Le forage par rotation est la technique la plus communément utilisée, car il s'agit dans la plupart des cas de la plus efficace. Les outils de forage associés les plus habituellement utilisés sont **les tarières** (§ 3.2.2.1), **les godets de forage** (§ 3.2.2.2) et **les carottiers** (§ 3.2.2.3). Ils sont fixés à l'extrémité d'un **kelly** (cf. § 3.2.1) actionné par la table de rotation.

3.2.2.1 - Les tarières pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des tarières

Une tarière est une mèche hélicoïdale (à la manière d'une vis d'Archimède) composée d'une ou de deux hélices terminées par une ou deux lignes d'attaque (*Note* et les Figures 3.32 et 3.33). Les modèles de tarières sont donc nombreux, ce qui permet de choisir une (ou des) tarière(s) sur chantier en fonction du contexte.

Les diverses tarières se distinguent par :

- **leur longueur.** L'utilisation d'une tarière plus longue augmente la longueur de la passe et de ce fait, diminue le nombre de passes nécessaires, conduisant ainsi à un gain de temps. Cependant l'augmentation de la longueur de la tarière s'accompagne de celle de la puissance de la machine de forage en raison d'une capacité d'extraction nécessairement plus importante (outil plus lourd, volume de terrain excavé accru et frottement supérieur car mobilisé sur une plus grande longueur) ;
- **leur nombre d'hélices** (Figure 3.33). La tarière peut être constituée d'une simple ou d'une double hélice. Dans ce dernier cas, le pas sera réduit ;
- **la forme des hélices**, qui peut varier en fonction de la nature des déblais à extraire. En effet, la géométrie joue un rôle essentiel dans le mécanisme de remontée des matériaux, du fait des interactions de frottements entre le matériau déstructuré, les pales, et les parois du forage ;
- **leur attaque**, celle-ci est constituée :
 - d'une pointe d'attaque, appelée aussi « mèche » ou « outil pilote » positionnée au centre et à la base de la tarière et favorisant l'attaque (Figure 3.35),
 - ainsi que d'une ou deux lignes d'attaque (*Note*) (Figure 3.33) équipées de dents (cf. § 3.2.7) ;
- **les dents, picots (ou doigts)** utilisés au niveau de l'hélice et de l'attaque (Figure 3.34).

Les entreprises peuvent développer elles-mêmes à partir de matériels achetés chez un fournisseur leur propre outil de forage pour les besoins spécifiques d'un chantier ou d'un terrain particulier. Dans le cas où l'adaptation de l'outil est efficace au point d'être généralisée sur d'autres chantiers, l'entreprise peut demander à son fournisseur de lui fabriquer cette adaptation et parfois cette demande peut être associée d'une exclusivité.

Note : l'utilisation de deux lignes d'attaque équilibre mieux les efforts autour de l'axe, ce qui permet généralement une amélioration de la verticalité.

Figure 3.32 : La tarière et sa terminologie (selon la norme NF EN 1536+A1)

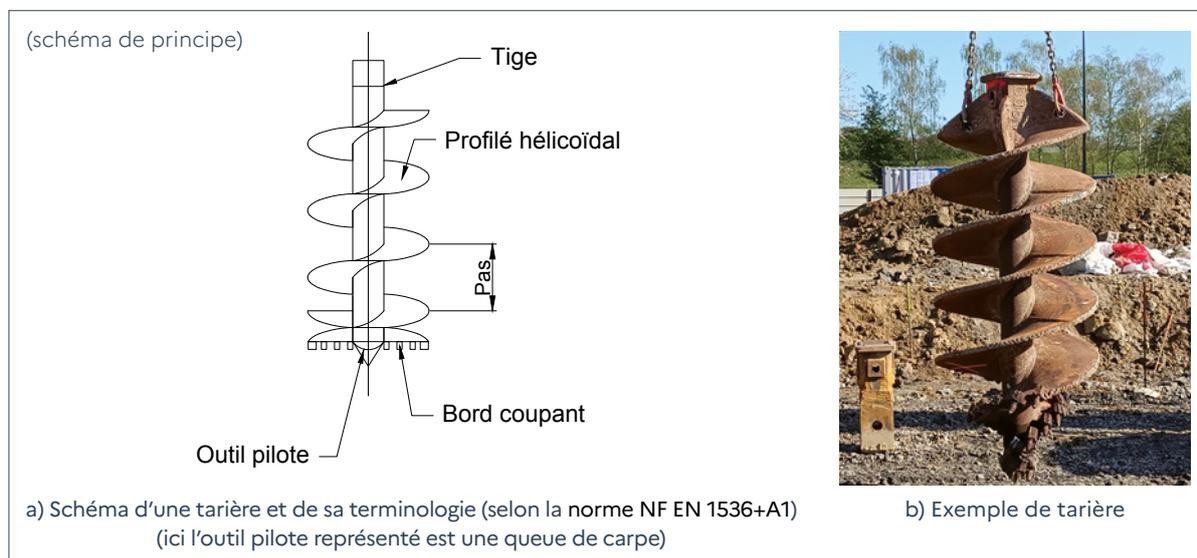


Figure 3.33 : Exemples d'hélices (schémas de principe)

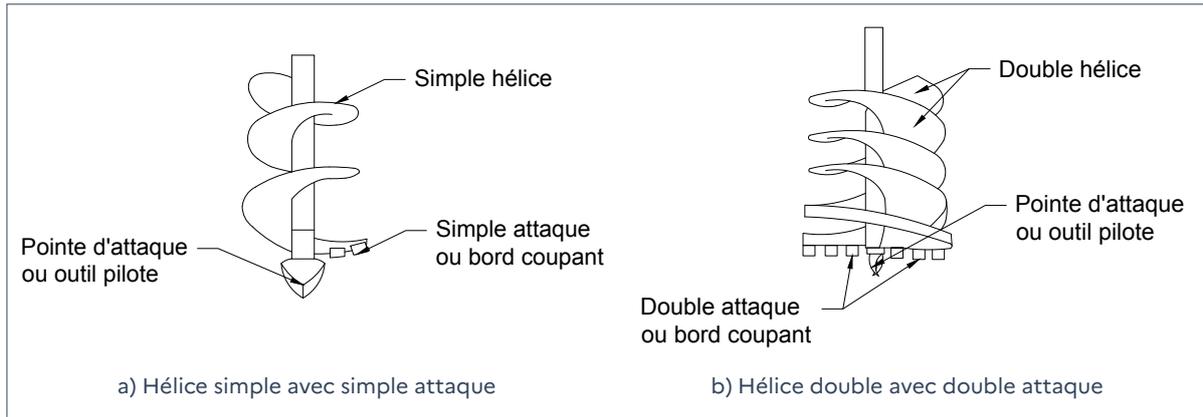


Figure 3.34 : Exemples de dents, picots ou doigts



Figure 3.35 : Exemples de pointe d'attaque appelée aussi mèche ou outil pilote à la base de l'axe de la tarière



Adéquation de la tarière à la nature du sol (cf. Tableau 3.11 de synthèse dans le § 6.1.1.1)

Ces outils conviennent généralement pour traverser des couches plutôt cohérentes (le godet de forage étant plus efficace dans les sols purement pulvérulents).

Comme décrits dans le paragraphe précédent, la **géométrie** (nombre, forme et inclinaison des hélices) **et les accessoires** (ligne d'attaque simple ou double, pointe d'attaque ou outil pilote et dents utilisées) **de la tarière sont à adapter à la nature des terrains**, par exemple :

- **en présence de blocs ou dans certaines roches suffisamment tendres** (Figure 3.36), les tarières sont généralement caractérisées par des pales plus épaisses, des dents coniques (ou dents pointues) en carbure de tungstène ;
- **pour les matériaux plus résistants, typiquement du rocher déstructuré**, les tarières à double attaque (Figure 3.33) et/ou à dents pointues (Figure 3.36) sont privilégiées ;
- **pour les roches altérées**, des dents plates peuvent être utilisées (Figure 3.37.b) ;
- **pour certains matériaux argileux et humides** (Figure 3.37.a), il peut être envisagé d'adopter une implantation particulière pour les dents les plus à l'extérieur de l'attaque, en les pointant vers la paroi du forage... Cette disposition a pour objectif de :
 - venir « gratter » en partie la couche lustrée qui peut se créer dans certains contextes (*Notes 1 et 2*),
 - décaler la surface de cisaillement sol-pieu au-delà de la zone fortement affectée par le forage.
 L'intérêt de cette disposition est à distinguer de celui ciblé pour les « pieux rainurés » (cf. § 3.2.6 « Outils pour la modification de la géométrie du pieu ») dont le rainurage dans le sol est d'environ 20 mm de surlargeur sous forme d'hélice (*Note 3*) ;
- **dans le cas d'un forage avec fluide stabilisateur et de parois potentiellement instables**, il est possible d'orienter les dents les plus à l'extérieur de l'attaque vers la paroi du forage pour limiter les efforts de mise en pression et de succion du sol lors de l'enfoncement et du retrait de l'outil, en réalisant un diamètre d'excavation légèrement plus grand que celui de la tarière ; cette surexcavation limite le « beurrage » (*Note 2*).

Note 1 : diamètre légèrement plus grand qui n'est pas pris en compte dans le dimensionnement du pieu.

Note 2 : une couche lustrée (on parle de « beurrage ») peut se former sur les parois du forage et entraîner une perte de frottement entre le fût du pieu et le sol :

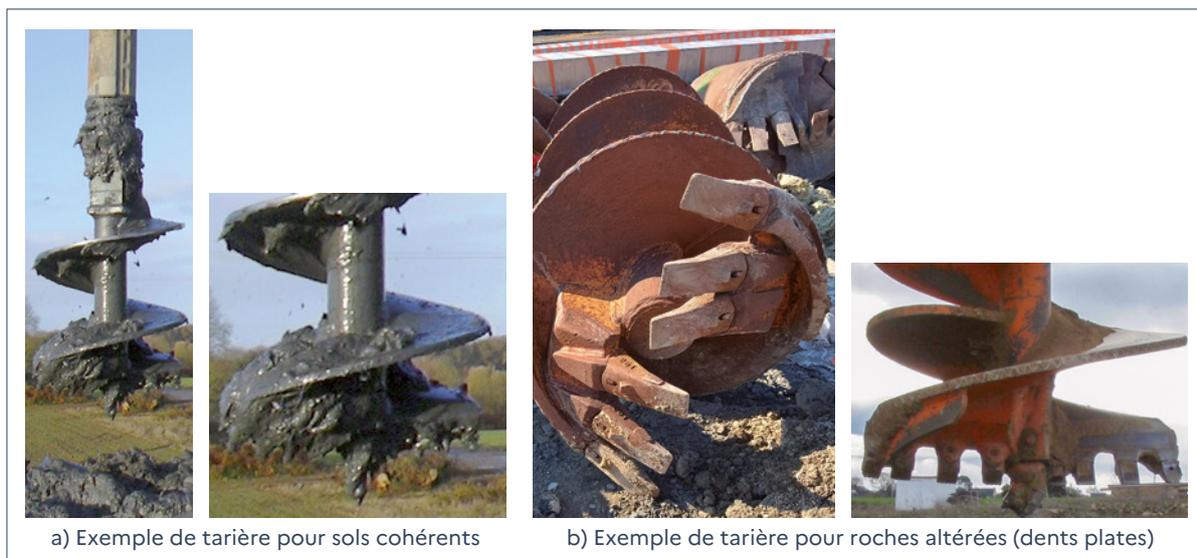
- lors de l'utilisation de la bentonite comme fluide stabilisateur ;
- avec le va-et-vient de l'outil de forage en présence de sol argileux et d'un forage rempli d'eau ou encore lors d'un forage à sec dans de l'argile saturée.

Note 3 : les pieux rainurés sont d'abord forés avec un outil sans dent extérieure pointée vers la paroi du forage. Puis on change l'outil après que le forage est réalisé en totalité et on fore à nouveau avec un outil ayant une dent extérieure pointée vers la paroi du forage de manière à créer une rainure avant le curage du forage. L'outil de curage vient ainsi récupérer les déblais ainsi créés.

Figure 3.36 : Photos de tarière double attaque à dents adaptées au rocher pour la réalisation des pieux de classe 1



Figure 3.37 : Exemples de tarière pour la réalisation des pieux de classe 1



Évacuation des déblais à la tarière

Le matériau déstructuré par l'attaque de l'outil est stocké entre les pales (Figure 3.38). Une fois les pales remplies, la tarière est retirée du forage, et le matériau est évacué sur la plateforme de travail par inversion rapide du sens de rotation de la tarière (⚠ au bruit que cela occasionne).

Figure 3.38 : Évacuation des déblais de forage présents dans les pales par rotation inverse de la tarière



3.2.2.2 - Les godets de forage ou buckets pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des godets de forage

Les godets de forage ou buckets (Figures 3.39 à 3.44) sont constitués d'un godet cylindrique comportant à sa base un couvercle bombé ou plat. Le couvercle, muni ou non d'un outil pilote en pointe, présente selon un rayon ou un diamètre une ouverture munie de lames coupantes (simples ou doubles – Figure 3.40), voire de dents ou picots (Figure 3.42) pour les sols plus résistants. Les lames ou les dents peuvent être interchangeables et remplaçables (cf. Figure 3.34 dans le § 3.2.2.1).

Selon la géométrie du couvercle, on parle alors de godet de forage à fond conique (Figure 3.42), à fond plat (Figures 3.40 et 3.43), à fond tournant... Cette géométrie du couvercle peut avoir une influence sensible sur la cadence et la qualité du forage. Il est possible de tester différents outils, en privilégiant autant que faire se peut des forages d'essai afin de disposer d'une procédure d'exécution la plus aboutie possible au moment de l'exécution des pieux de l'ouvrage.

Figure 3.39 : Schéma d'un godet de forage (ou bucket) et sa terminologie (selon la norme NF EN 1536+A1)

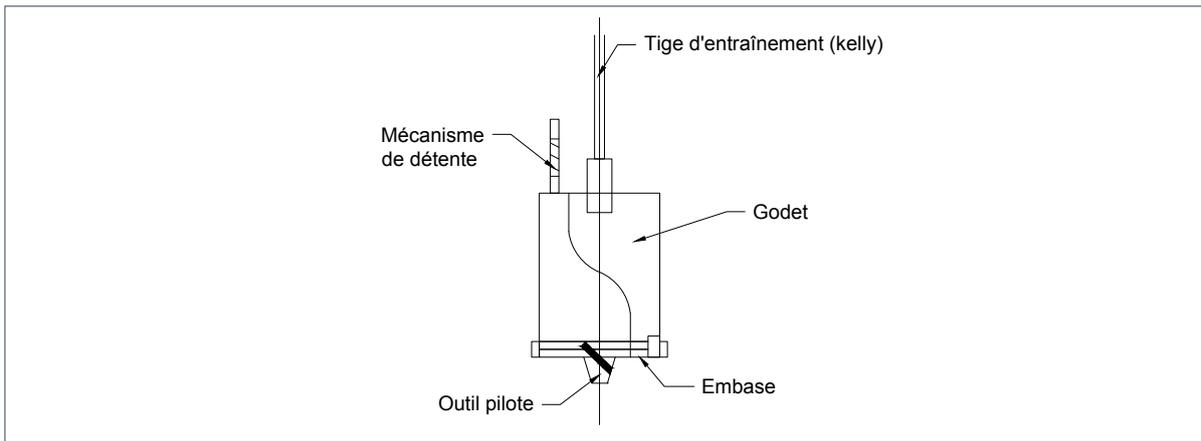


Figure 3.40 : Exemples de godet de forage (ou bucket) à fond plat avec simple ou double lame

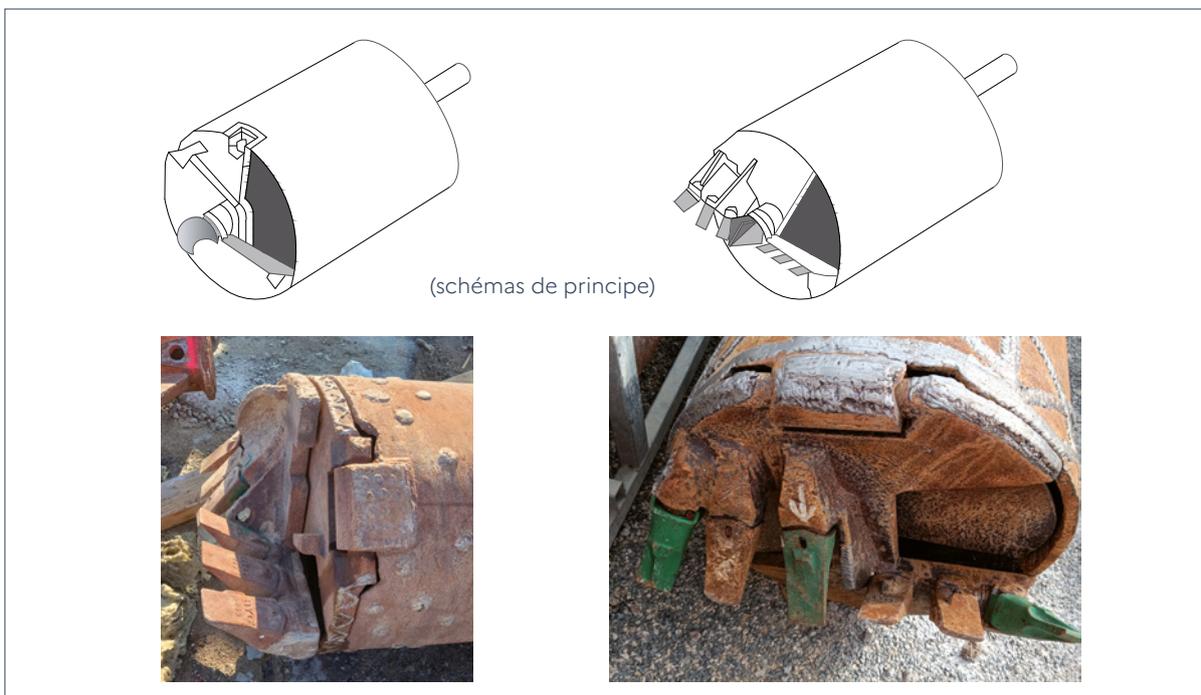


Figure 3.41 : Le godet de forage

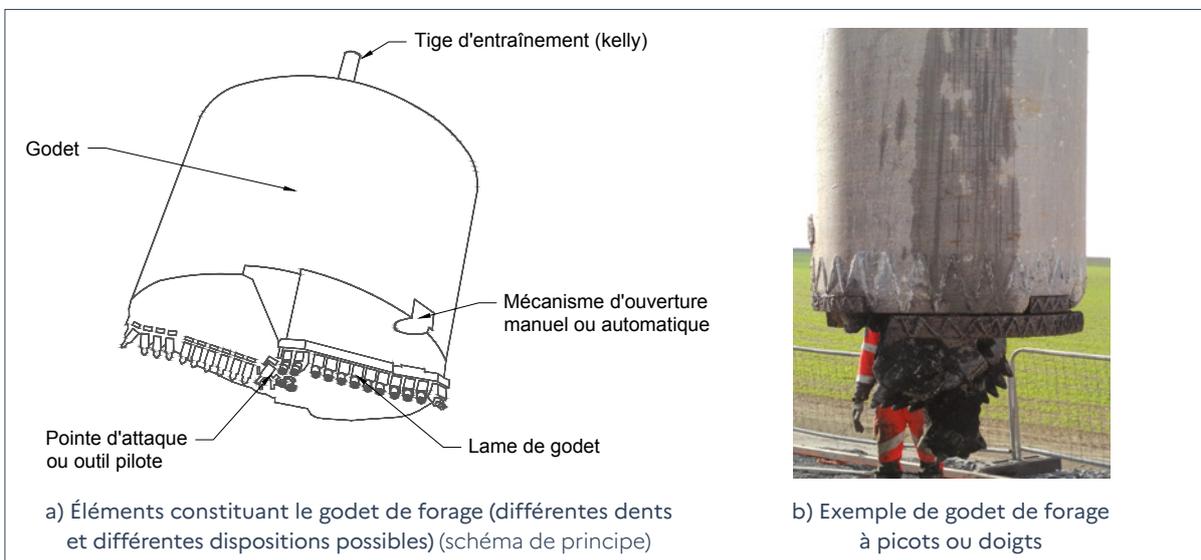


Figure 3.42 : Exemples de godets de forage à fond conique



Figure 3.43 : Exemples d'utilisation de godets de forage à fond plat



Adéquation des godets de forage à la nature du sol (cf. Tableau 3.12 de synthèse dans le § 6.1.1.2)

Les godets de forage sont **bien adaptés pour l'excavation des sols meubles**, notamment les sols granulaires et/ou sous nappe pour lesquels les autres outils s'avèrent en général peu efficaces pour l'évacuation du matériau à l'extérieur du forage.

Évacuation des déblais au godet de forage (Figures 3.43.b et 3.44)

Le matériau, déstructuré par l'action des lames ou des dents du godet mis en rotation, est emmagasiné à l'intérieur du godet via les ouvertures situées à la base de l'outil. Des clapets emprisonnent les déblais ainsi récupérés. Une fois l'outil rempli, il est ressorti du forage et le matériau est déchargé par ouverture du couvercle à la base du godet (Figures 3.43.b, 3.44.a et 3.44.b) ou avec l'ouverture en deux parties du godet dans le sens de la largeur (Figure 3.44.c).

Figure 3.44 : Exemples d'ouverture du godet de forage pour l'évacuation des déblais de forage



Curage de la base du forage lors du forage au godet de forage

Quel que soit l'outil précédemment utilisé pour réaliser le forage, il convient de réaliser le curage de la base du forage avec un godet de forage adapté, c'est-à-dire pour lequel l'efficacité est concentrée sur la capacité à produire une base homogène et à évacuer la grande majorité des déblais pour finaliser l'excavation avec une base propre. Il est donc courant de terminer un forage en substituant le godet de forage (ou tout autre outil rotatif) par un **godet spécialisé dans le curage**, c'est-à-dire à fond plat sans dents et comprenant une lame pour raser le fond du forage (Figure 3.14 dans le § 2.5.1).

3.2.2.2 - Les carottiers pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des carottiers

Le carottier (Figures 3.45 et 3.46), appelé aussi « benne de carottage », se compose d'un tube cylindrique terminé par une couronne qui constitue l'attaque. Cette couronne est équipée de porte-dents soudés comportant des dents remplaçables (Figures 3.46.a et 3.46.b) ou de dents taillées dans la masse (Figure 3.46.c et *Note*), qui vont servir à « découper » le matériau en concentrant l'effort sur une surface restreinte aux contours du cylindre, l'outil découpe ainsi un cylindre de sol. Les dents sont placées de façon à ce que le diamètre du trou ainsi formé soit légèrement supérieur à celui du cylindre, afin d'éviter les blocages intempestifs lors des déplacements de l'outil le long du forage.

En concentrant l'énergie de déstructuration sur la périphérie du volume à excaver, l'efficacité du carottage est supérieure à celle de la tarière.

Note : dans le cas de dents taillées dans la masse, en cas d'usure, elles seront reconstituées par la soudure d'éléments métalliques ou par une nouvelle coupe.

Figure 3.45 : Schéma d'un carottier et sa terminologie (selon la norme NF EN 1536+A1)

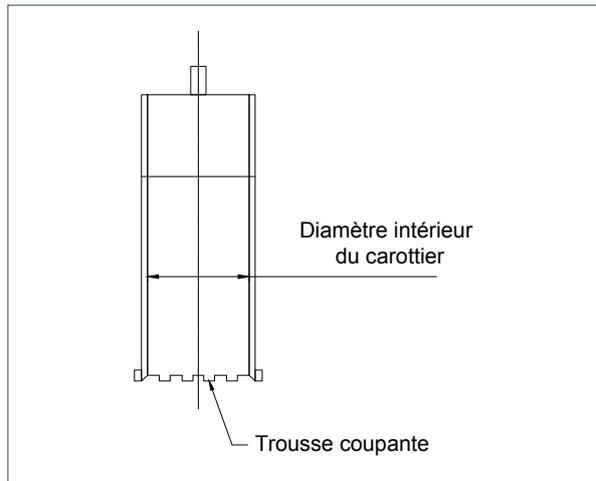


Figure 3.46 : Exemples de carottier



Adéquation des carottiers à la nature du sol (cf. Tableau 3.12 de synthèse dans le § 6.1.1.2)

Lorsque les tarières sont inefficaces, et en particulier lorsque la résistance des terrains à excaver est très importante, on utilise généralement un carottier. Cet outil est donc **particulièrement adapté dans les matériaux rocheux** pour lesquels la résistance et/ou l'abrasivité sont trop importantes pour une tarière. Il permet ainsi **un ancrage suffisant dans les substratums très résistants** ou encore il est utilisé **pour permettre le « remordu » du béton dans le cas de la réalisation de pieux sécants**.

En fonction du matériau à excaver, l'épaisseur de l'outil et la nature de l'attaque vont changer :

- les dents plates sont généralement suffisantes pour les roches tendres ;
- les dents coniques ou en forme de boutons sont adaptées pour les roches plus résistantes, grâce à l'emploi d'un acier allié plus résistant permettant l'attaque des roches sur des zones de contact plus petites ;
- les molettes dentées (type « tricône » - Figure 3.46.b) et/ou dotés de deux parois (Note) sont utilisés dans les cas les plus difficiles. Ils permettent de déstructurer les roches très résistantes et abrasives.

Note : dans ce cas, il existe deux possibilités pour le diamètre du tube intérieur (servant à extraire la carotte) :

- il est **bien inférieur à celui du tube extérieur** (équipé de la couronne d'attaque), et chacun des deux tubes est équipé de dents ;
- il est **très proche du diamètre du tube extérieur**. Les deux tubes peuvent alors être séparés par un vide annulaire dans lequel la circulation d'un fluide de forage permet d'évacuer en continu les déblais de forage, ce qui améliore le rendement de l'outil en évacuant les débris qui autrement s'accumulent entre l'outil de coupe et le rocher sain et limitent l'efficacité de l'outil.

Évacuation des déblais lors d'un forage au carottier

Ces outils découpent donc un cylindre qu'il faut évacuer à l'extérieur du forage pour pouvoir poursuivre l'excavation plus en profondeur. Deux situations peuvent se présenter :

- la carotte peut être extraite du forage par le carottier. Dans les cas les plus simples, une ou plusieurs discontinuités provoquent le détachement de la carotte du reste du terrain ; l'échantillon se retrouve alors maintenu à l'intérieur du carottier par frottement, ou par un système mécanique sur certains outils. Dans ce cas, le carottier est remonté à la surface, et le matériau est évacué à côté du forage en secouant l'outil (Figure 3.47.a) ou en venant le frapper, ou par un accessoire spécifique qui déstructure la carotte (Figure 3.47.b) ;
- la carotte ne peut pas être extraite du forage par le carottier. L'entreprise a généralement recours au trépanage ou tout autre moyen permettant d'éclater la carotte en plusieurs morceaux qui peuvent ensuite être évacués avec un autre outil. Certaines technologies de carottier intègrent l'outil permettant la déstructuration de la carotte. Il est aussi possible de réaliser une empreinte au carottier, puis d'utiliser une tarière adaptée au rocher pour déstructurer la zone découpée, et enfin de récupérer les déblais au godet.

Figure 3.47 : Évacuation des déblais du carottier et exemple d'outil utilisé pour éclater la carotte permettant ainsi son évacuation



3.2.3 - MATÉRIELS D'EXCAVATION POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

3.2.3.1 - Le dispositif de forage pour la réalisation des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Divers types de tarières et outils de forage peuvent être utilisés pour forer les pieux en fonction des caractéristiques des sols rencontrés.

Le dispositif complet de forage (Figure 3.48), hors table de rotation, comporte différents éléments :

- **une tarière** (Figure 3.49) :
 - composé d'un axe creux et des pales s'enroulant autour selon un pas donné,
 - d'une longueur totale, avec éventuellement un canotto (cf. ci-après), au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter dans le sol,
 - constituée de segments raboutés en totalité (Figure 3.50 et § 3.2.3.2) avant le forage proprement dit,
 - avec éventuellement en tête, un canotto (Figure 3.51), rallonge sans pale et qui coulisse à travers la table de rotation (*Note 1*) ;
- **un obturateur à la base** de l'âme creuse de la tarière (pointe perdue ou clapet pivotant ou dispositif rétractable – cf. § 3.2.3.4) pour empêcher l'entrée de sol et d'eau en cours de forage ;
- **un outil spécifique de forage** à la base de la tarière (§ 3.2.3.3, Figures 3.49 et 3.50) ;
- **un guide pour la tarière** (§ 3.2.3.5) ;
- **un système de décrochage** (§ 3.2.3.6) ;
- **un tube** (Figure 3.28 dans le § 3.1.2.2), **dans le cas d'une tarière à double rotation** (Figure 3.5 « Exemples de tarière creuse double rotation » dans le § 2.2), qui permet un forage tubé provisoirement (*Note 2*) au fur et à mesure de l'avancée de la tarière (cf. § 2.2.2 pour la position de tarière par rapport au tube).

Contrairement à la tarière utilisée pour le forage des pieux de classe 1, il n'existe pas de nombreuses géométries différentes de tarière (dimensions, pas des pales, diamètre et épaisseur de l'axe central), généralement **seul l'outil spécifique de forage** peut varier pour s'adapter au terrain à forer.

Note 1 : certains documents tels que le Fascicule 68 du CCTG limitent la longueur de pénétration dans le sol de cette rallonge à 3 m et demandent dans ce cas, au titulaire de préciser dans les procédures d'exécution les dispositions qu'il compte prendre vis-à-vis des paramètres de dimensionnement sur la hauteur de rallonge.

Note 2 : du fait du tubage, certaines précautions ou dispositions données dans le présent chapitre pour la tarière simple rotation peuvent ne pas être pertinentes.

Figure 3.48 : Exemples de tarière creuse simple rotation



Figure 3.49 : Description des tarières (appellation des différents éléments constituant la tarière creuse)

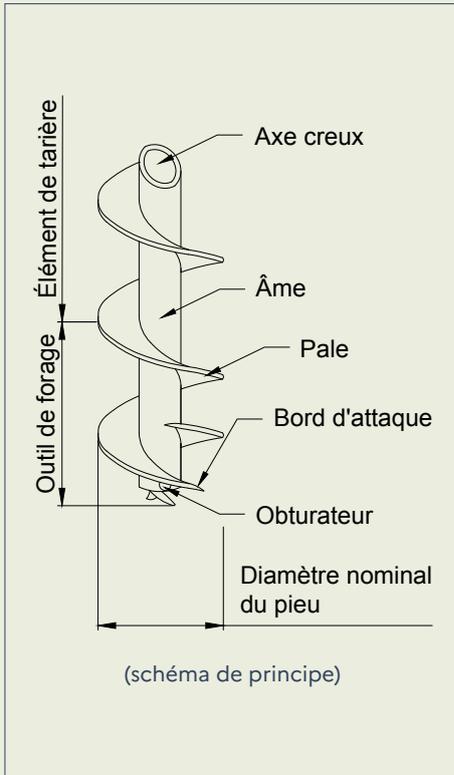
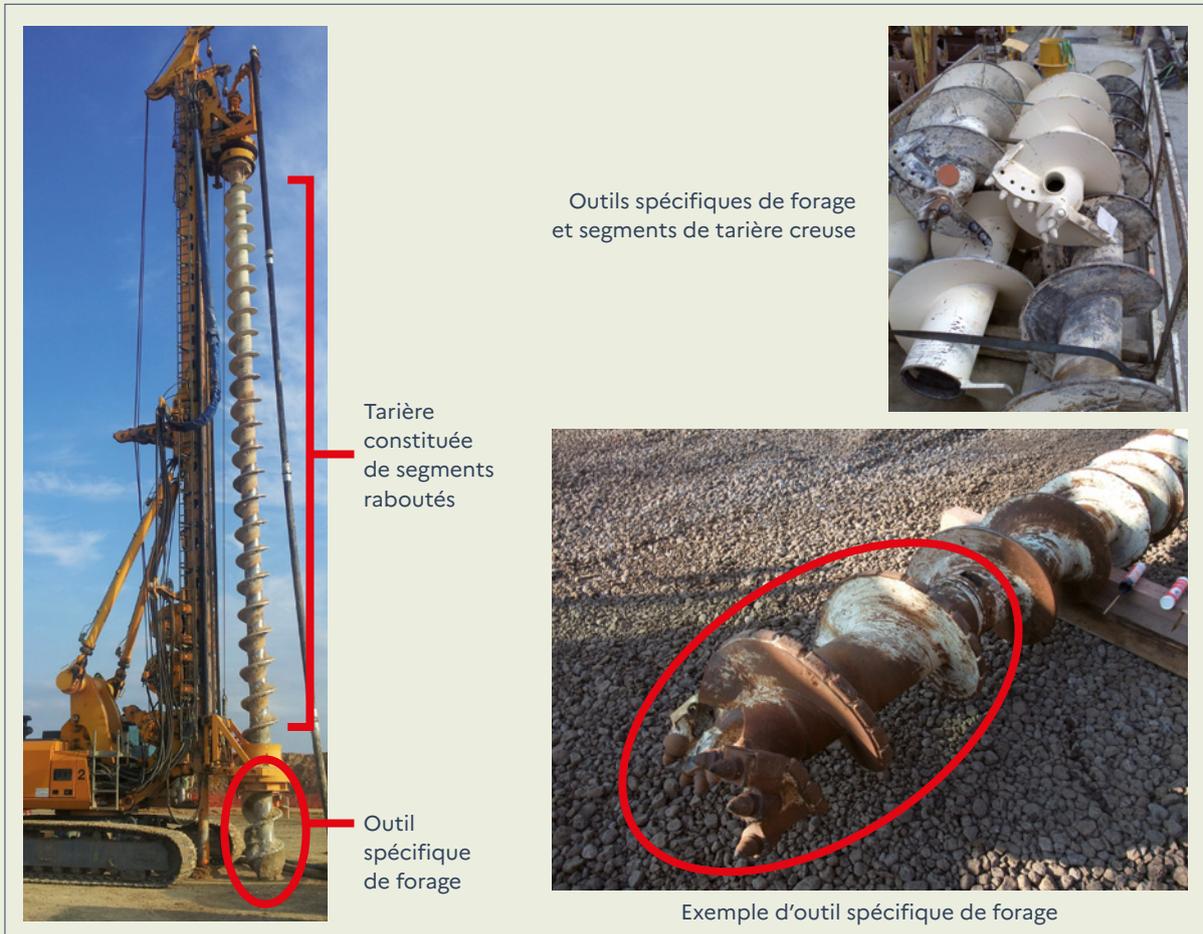


Figure 3.51 : Photos d'une tarière creuse simple rotation avec un cannotto



Figure 3.50 : Exemples d'outils spécifiques de forage et de segments de tarière creuse



3.2.3.2 - Géométrie des composants de la tarière

Diamètres et profondeurs des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Le diamètre des pieux couramment exécutés en tarière creuse se situe entre 400 et 1 000 mm (Note). Avec des machines puissantes, il est possible d'atteindre jusqu'à 1 200 mm (Note).

La profondeur courante est de l'ordre d'une vingtaine de mètres, on peut trouver des tarières creuses de plus de 30 m (au moment de la rédaction de ce guide la longueur maximale est de 50 m).

Les Tableaux 3.4 et 3.5 dans le § 3.1.2.2 fournissent une représentation du parc matériel français des machines de pieux tarière creuse respectivement simple et double rotation.

Note : on trouve plus rarement des diamètres de 1 500 mm ou sur les petites machines, des diamètres 300 mm.

La longueur totale de la tarière creuse pour la réalisation de pieux de classe 2

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). De ce fait, le matériel doit être conçu pour avoir une tarière d'un seul tenant. La longueur totale de la tarière et de l'éventuelle rallonge en tête (Figure 3.49 dans le § 3.2.3.1) est telle que le forage et le bétonnage s'effectuent de façon continue.

Les Tableaux 3.4 et 3.5 dans le § 3.1.2.2 fournissent une représentation du parc matériel français des machines de pieux tarière creuse respectivement simple et double rotation.

Note : 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).

Les éléments de tarière creuse et leur assemblage pour la réalisation de pieux de classe 2

Il convient de restreindre le nombre d'éléments de tarière pour limiter les risques de défauts de verticalité, mais tout en restant raisonnable, car des éléments de tarières trop longs compliquent les opérations de montage et peuvent nuire à la sécurité du chantier. La longueur usuelle des éléments de tarière est de l'ordre de 6 m (Note). Préalablement à l'excavation, les tarières sont assemblées entre elles verticalement :

- soit par forage et ajout des éléments supérieurs ;
- soit par emboîtement des éléments de tarière du haut vers le bas.

⚠ Il convient de ne pas réaliser l'assemblage et le démontage de ces tarières sur un pieu de l'ouvrage.

Note : des éléments courts sont toujours nécessaires pour ajuster la longueur à la profondeur à atteindre et pour utiliser au plus juste la hauteur de mât disponible.

Le pas et l'inclinaison de l'hélice de la tarière creuse pour la réalisation de pieux de classe 2

Le pas de l'hélice (article 8.2.5.7 de la norme NF EN 1536+A1) et l'inclinaison des pales doivent être identiques sur toute la longueur du train de tiges (l'outil de forage exclu).

Le diamètre du tube de l'axe central de la tarière creuse pour la réalisation de pieux de classe 2

Pour les pieux à la tarière creuse, les dimensions du tube de l'axe central doivent être telles que :

- le diamètre intérieur du tube de l'axe creux soit :
 - supérieur à 6 fois le diamètre maximal des granulats du béton,
 - usuellement d'au moins 100 mm pour permettre le libre écoulement du béton,
 - le plus constant possible, y compris au droit des jonctions de tarière ;
- le diamètre extérieur de l'âme (Figure 3.49 dans le § 3.2.3.1), hors connexion, soit le plus petit possible (Note).

Les zones d'assemblage, représentant les zones les plus faibles, doivent être compatibles avec le couple maximal de la foreuse et dimensionnées également pour reprendre les différentes sollicitations inhérentes à la réalisation du pieu de classe 2. Les pales participent aussi à la résistance de la tarière.

Note :

- le terrain doit être idéalement refoulé (plutôt que remonté par les pales) du volume de l'âme ; l'énergie pour ce faire est consommée au détriment de celle disponible pour le forage. Il est recommandé que le diamètre extérieur de l'âme soit inférieur à la moitié du diamètre ;
- des diamètres d'âmes trop importants limitent la pénétration des outils dans le sol en raison du refoulement nécessaire de ce dernier trop important et incompatible avec les possibilités du terrain (ralentissement de la pénétration ou forage impossible).

3.2.3.3 - L'outil de forage de la tarière creuse pour la réalisation de pieux de classe 2

La base de la tarière est prolongée par un outil de forage généralement de faible longueur (inférieure à 2 m). La base de l'outil de forage peut être :

- **plate** (Figure 3.52). Dans ce cas, elle est généralement composée de deux pales dont la première forme l'hélice ou la spire continue et dont la deuxième s'arrête après, le plus souvent, un demi-tour (Figure 3.52 et *Note 1*). L'outil à deux pales permet une attaque plus uniforme de l'outil et minimise les risques de déviation ;
- **conique**. Dans ce cas, il existe une réduction progressive du diamètre des pales finales sur une hauteur de une ou deux spires. Ce type d'outil est utilisé pour faciliter la foration dans les terrains compacts (*Note 2*).

Sur l'outil de forage sont fixées les dents d'attaque. Le nombre et le type sont fonction du diamètre de forage et des terrains rencontrés. Les préconisations et recommandations détaillées dans le § 3.2.2.1 dans « Adéquation de la tarière à la nature du sol » pour la réalisation des pieux de classe 1 et dans le Tableau 3.14 du § 6.2 « Adéquation des dents et des molettes aux natures de terrain » s'appliquent ici aussi.

Note 1 : la présence de cet outil de forage ne remet pas en cause la disposition de l'article 8.2.5.7 de la norme NF EN 1536+A1 qui stipule que le pas de l'hélice doit être le même sur toute la longueur de la tarière.

Note 2 : ce type d'outil conique doit faire l'objet d'une vigilance particulière lors de la détermination de la profondeur de forage exécutée puisque la longueur de la partie conique n'entre pas en compte dans la longueur du pieu.

Figure 3.52 : Photos de pointe plate



3.2.3.4 - Les obturateurs à la base de la tarière creuse pour la réalisation de pieux de classe 2

L'article 8.2.5.8 de la norme NF EN 1536+A1 impose un système d'obturation à la base de la tarière pour assurer l'étanchéité vis-à-vis du sol et de l'eau pendant le forage. Au début du bétonnage, la pression exercée par le béton conduit à l'ouverture ou à l'expulsion de l'obturateur.

Différents types d'obturateurs existent, tels que :

- le clapet pivotant ;
- le bouchon métallique (Figure 3.53.b et Figure 4.36 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ou plastique ;
- la pointe perdue ;
- la pointe rétractable (Figure 3.53.b et Figures 4.37 et 4.38.b du fascicule 4) ; certains ateliers de pieux à la tarière creuse sont munis d'un dispositif de bétonnage rétractable (*Note 1*) permettant idéalement une injection du béton au minimum à 800 mm (*Note 2* et Figure 3.54) sous la base de la tarière lorsqu'il est déployé. Cette disposition permet une meilleure qualité de bétonnage, en favorisant la remontée du premier béton potentiellement souillé (*Note 3*) en tête des pieux où il sera supprimé (Figure 3.54) ;

Certains dispositifs assurent le contrôle, sur chantier, du positionnement de la pointe rétractable durant toute l'opération de bétonnage. Ces dispositifs de contrôle sont conseillés.

Note 1 :

- la sortie de la pointe rétractable peut être due à une action mécanique ;
- ce dispositif doit être maintenu en position rétractée lors du forage (en particulier lors de la traversée de sables lâches sous nappe), pour assurer l'étanchéité au sol et à l'eau ;
- des dispositifs de bétonnage rétractables particuliers peuvent faire l'objet d'un cahier des charges⁽¹⁶⁾ (cf. § 1.8 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

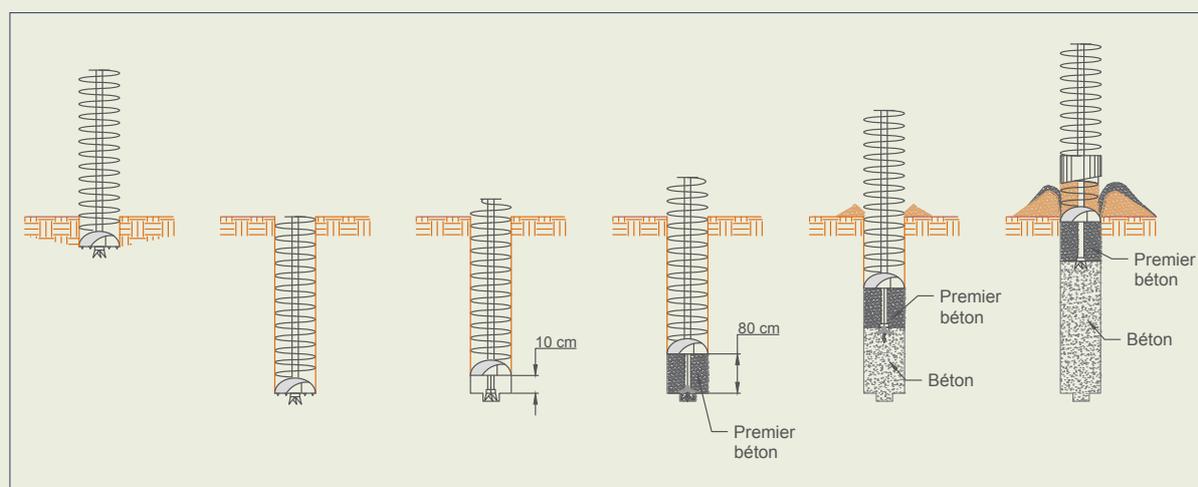
Note 2 : seules les techniques de pieux à la tarière creuse munies de ce dispositif avec cette cote de 800 mm minimum sont autorisées dans le cadre de la réalisation **des fondations profondes des ponts**, selon le Fascicule 68 du CCTG.

Note 3 : selon un principe analogue à celui du tube plongeur des pieux de classe 1.

Figure 3.53 : Photos d'un exemple d'obturateur et de pointe rétractable



Figure 3.54 : Phasage de forage et bétonnage pour les pieux forés à la tarière creuse équipée d'un obturateur rétractable (schémas de principe)



16. Des procédés de fondations non décrits dans les différentes normes de dimensionnement (NF P94-262 COMPIL1) ou d'exécution (NF EN 1536+A1) existent. Ces procédés doivent faire l'objet de cahiers des charges particuliers propres à chaque entreprise, qui comprennent les spécifications d'exécution bien précises ainsi que les valeurs des paramètres de résistance des matériaux, valeurs basées sur des justifications expérimentales. Ces cahiers des charges doivent faire l'objet d'une validation par un organisme agréé.

3.2.3.5 - Le guidage des tarières creuses (pieux de classe 2)

Le dispositif complet de forage est solidaire du mât :

- par l'intermédiaire de la table de rotation ;
- à proximité de la base (situé à environ 1 m de la base du mât), **par un guide** (Figure 3.55 et Note 1) permettant de maintenir le centrage de la tarière (Note 2).

Note 1 : ce guide de forage peut être un guide circulaire, une porte vérinée (Note 3) ou encore un décrocteur. Il est généralement spécifique à chaque diamètre de tarière.

Note 2 : ce guide permettant le blocage de la tarière en pied est important en cas de rencontre de terrain induré ou blocs pour limiter les déviations du forage (Note 4).

Note 3 : l'efficacité d'un guide vériné dépend du jeu entre les éléments qui le constituent et la puissance des vérins en position fermée.

Note 4 : un guidage efficace des tarières peut ne pas être suffisant pour assurer une verticalité adéquate des pieux en profondeur. On rappelle que la technique de la tarière creuse double rotation permet de mieux respecter la verticalité d'une part en raison d'une meilleure maîtrise des jeux au niveau du guidage du tube en pied de mât, et d'autre part en raison de l'inertie du tube, qui conjointement à celui de la tarière va s'opposer à la flexion de l'ensemble tube-pale.

Figure 3.55 : Exemples de guide de mât situé à proximité de la base



Guide circulaire

Porte vérinée

Décrocteur coulissant

3.2.3.6 - Évacuation des déblais et systèmes de décroctage des tarières creuses (pieux de classe 2)

Évacuation des déblais pour la technique de la tarière creuse simple rotation

Les déblais entre les pales de la tarière sont extraits lors de la remontée hors sol de cette tarière (Figure 3.56). Les matériaux présents entre les pales de la tarière **doivent être déblayés au fur et à mesure de la remontée de l'outil** pour ne pas compromettre la stabilité de la machine et afin d'éviter les chutes ultérieures de terres pouvant causer des accidents sur le personnel présent en pied de machine et endommager les matériels alentours.

⚠ Le décroctage manuel des tarières est pénible et doit être évité au regard de sa dangerosité (lorsque le nettoyage n'est pas parfait, subsiste toujours le risque de chute de terre sur l'opérateur occupé à décrocter).

Les systèmes de décroctage (Figure 3.57) peuvent être :

- « passifs » : les systèmes passifs (système en « étoile » par exemple) sont entraînés par la rotation de la tarière, ils nécessitent une rotation réduite de la tarière (Note) lors de la remontée et présentent une efficacité variable selon les terrains ;
- « actifs » : les systèmes actifs sont les plus performants et comprennent généralement un moteur dédié qui entraîne le système de décroctage pour un nettoyage optimal, mais réduisent significativement la hauteur utile du mât.

Note : la rotation continue de la tarière durant toute la remontée de l'outil peut conduire à amplifier un phénomène de surexcavation dans les terrains instables (cf. § 2.2.4.3 « Difficultés de la technique de la tarière creuse pour la réalisation de la classe 2 ») et doit donc être la plus faible possible.

Figure 3.56 : Déblais entre les pales remontés à la surface par la tarière creuse des pieux de classe 2 simple rotation



Figure 3.57 : Photos de systèmes de décrotteurs passifs ou actifs des pieux tarière creuse simple rotation (classe 2)



a) Exemples de systèmes de décrotteurs passifs



b) Exemple de système de décrotteur actif

Évacuation des déblais pour la technique de la tarière creuse double rotation

L'évacuation des déblais se fait tout au long de la réalisation des pieux, on peut distinguer différentes phases :

- **la phase de vissage**, où se produit l'extraction du volume de sol refoulé :
 Au début du forage, les déblais commencent par monter et remplir l'espace entre tarière et tube, puis seulement plus tard sortir par des lumières au niveau de l'entraîneur de tube. L'évacuation de ces déblais se fait selon des dispositifs :
 - sans gestion de la collecte (à éviter pour la sécurité du personnel), par la lumière au niveau de l'entraîneur de tube ;
 - avec collecteur :
 - muni d'une goulotte (Figure 3.58.a), les déblais ont une direction de sortie obligatoire et l'engin pour les récupérer est placé sous cette dernière,
 - associé à un système permettant le guidage des déblais jusqu'au sol. Ce système peut être télescopique (Figure 3.58.b) ou non ;
- **la phase de bétonnage** dans laquelle se produit peu d'extraction de déblais :
 Les déblais sont évacués **par extraction de l'ensemble tube-tarière**, complètement ou partiellement rempli de déblais (Notes 1, 2 et 3). Cette évacuation se fait par le haut (Figure 3.58) (Note 4) :
 - sans rotation de la tarière (Note 5) :
 - sans rotation du tube, dans ce cas, il faut avoir un matériel suffisamment puissant par rapport aux diamètre et longueur du pieu pour réaliser l'extraction sans rotation,
 - avec rotation du tube (possible quand les tables de rotation sont découplées). La rotation du tube doit se faire à faible vitesse et dans le même sens que lors du forage ;
 - avec rotation du tube et de la tarière (lorsque les tables de rotation sont couplées), l'extraction (et ainsi le bétonnage) se fait en tournant les outils dans le même sens que lors du forage ; il faut alors faire attention que les matériaux remontent et ne tombent pas dans le béton frais.
 L'ajout d'air comprimé injecté à la base de la colonne de déblais (depuis le col-de-cygne en passant par l'axe creux de la tarière), avant extraction et bétonnage, a montré son efficacité :
 - pour « sécher » les argiles collantes,
 - pour « agir » favorablement sur la remontée des déblais de forage à la façon du procédé émulseur ou air lift décrit dans le § 2.5.2 ;
- **la phase correspondant à la tarière entièrement sortie du sol** :
 En fin de bétonnage, les déblais encore présents entre les pales de la tarière et dans le tube doivent être extraits.
 L'évacuation de ces déblais se fait par ordre de préférence :
 - par le bas, une fois l'ensemble tube-tarière et déblais extrait, en faisant tourner le tube et la tarière en sens inverse,
 - par le haut avec leur cheminement par effet de vis d'Archimède.

Note 1 : nous rappelons que le volume ainsi dégagé à la base est rempli par du béton coulé à travers l'âme de la tarière creuse au fur et à mesure de sa remontée.

Note 2 : les déblais rajoutent un poids en hauteur, qui vient s'ajouter au poids du tube et de la tarière, et qui de ce fait conduit à la nécessité d'un porteur plus lourd et plus stable.

Note 3 : en permettant l'évacuation des déblais au fur et à mesure de la remontée du tube, on minimise ainsi leur chute sur une trop grande hauteur. Ce moyen n'est pas toujours faisable, car il demande de relever l'ensemble tube et tarière avec tout ou une partie des déblais. Ce surpoids n'est pas forcément compatible avec la puissance de traction ou la stabilité de la foreuse. L'évacuation des déblais durant cette phase reste modérée pour éviter la remontée et les pertes du béton dans la tarière.

Note 4 : les vitesses de rotation du tube et de la tarière sont des facteurs importants pour assurer la remontée efficace des déblais de forage vers le système de collecte situé sous les deux tables de rotation.

Note 5 : en cas de non-rotation de la tarière, différents moyens sont utilisés pour que les déblais ne redescendent pas dans le pieu rempli de béton frais et fluide.

Figure 3.58 : Exemples de système d'évacuation des déblais de la tarière des pieux de classe 2 (double rotation)



3.2.4 - AUTRES OUTILS D'EXCAVATION POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 1

Le forage par percussion est une technique efficace pour l'excavation des matériaux les plus résistants, que l'on tente ici de pulvériser par l'application de chocs répétés. Nous classons dans cette catégorie les trépan (cf. § 3.2.4.1) et les marteaux « fond de trou » (cf. § 3.2.4.4). La benne preneuse (cf. § 3.2.4.2), de par son poids, peut être utilisée en percussion, mais n'est pas aussi efficace que le trépan, avec lequel elle est associée pour évacuer les déblais (*Note*).

La benne preneuse (cf. § 3.2.4.2) et la haveuse (cf. § 3.2.4.3) présentées dans cette partie sont plus spécifiquement adaptées à la réalisation des barrettes.

Note : les bennes peuvent intervenir soit après trépanage, soit seules lorsque le sol le permet.

3.2.4.1 - Les trépan pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des trépan

La technique du trépanage consiste à déstructurer le matériau en le soumettant à l'impact d'un outil lourd, le trépan, en chute libre dans le forage. Les trépan les plus répandus ont une géométrie en forme de croix et se terminent par des lames qui constituent l'attaque (Figure 3.59), mais d'autres géométries existent, comme les tricônes à plusieurs molettes ou cônes présentés dans le § 3.2.5.2.

L'outil est hissé de quelques mètres grâce à un treuil disposant d'une chute libre. Ce treuil peut être celui monté en tête de mât sur toute machine de forage de pieux ou être celui d'un engin annexe, une grue treillis ou une pelle à câbles, à condition qu'il possède la chute libre.

Il faut s'assurer lors du lâcher du trépan que la machine ne soit pas endommagée par :

- les coups de fouet qui remontent le long du câble lors de chaque impact ;
- les chocs subis du fait de la modification brutale du centre de gravité.

L'outil est généralement guidé en tête de forage par une virole ou un tube de travail (Figure 3.59), qui sert aussi éventuellement au soutènement de terrains plus meubles au-dessus du terrain d'ancrage.

Le trépanage est une opération longue, difficile, coûteuse (Note 1) et génératrice de vibrations (Note 2). Il convient donc d'utiliser cette technique avec parcimonie et de vérifier la bonne adéquation du matériel choisi (type, dimensions, poids du trépan) et notamment d'éviter le trépanage à proximité d'un pieu qui vient d'être réalisé, car les vibrations sont néfastes au béton frais.

Note 1 : le trépanage devrait être réservé à des épaisseurs de terrain de deux ou trois diamètres de forage d'épaisseurs au maximum, que ce soit pour réaliser l'ancrage dans le substratum ou pour traverser des couches intermédiaires. Au-delà, pour des raisons évidentes de rendement, il est probablement plus pertinent d'avoir recours à d'autres outils, tels que des carottiers (cf. § 3.2.2.3) ou le marteau fond de trou de gros diamètre (cf. § 3.2.4.4) ou des tricônes à plusieurs molettes ou cônes (cf. § 3.2.5.2).

Note 2 : il est préconisé de réaliser des mesures vibratoires et/ou acoustiques de contrôle à proximité d'ouvrages et/ou de zones sensibles. Il faut garder à l'esprit, et ce dès la rédaction du cahier des clauses techniques particulières (CCTP), que ces mesures peuvent indiquer qu'il faut arrêter le trépanage à cause des conséquences sur les environnants, et passer à une autre technique.

Figure 3.59 : Trépan et tube de travail

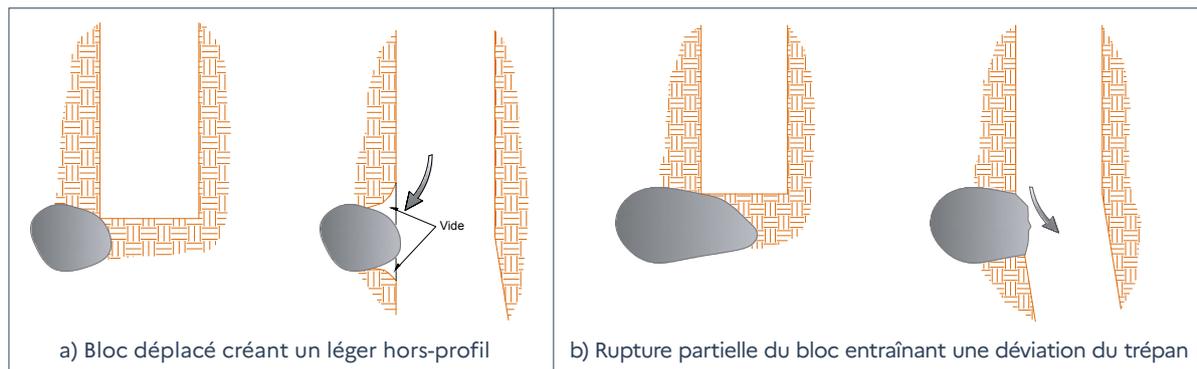


Adéquation des trépan à la nature du sol (cf. Tableau 3.13 de synthèse dans le § 6.1.2)

Le trépanage est généralement réservé pour la traversée de blocs ou d'éboulis, et pour les ancrages au rocher. Le trépan permet aussi de casser les carottes découpées au carottier (§ 3.2.2.3) ne pouvant être extraites. On doit veiller à ce que le poids du trépan soit suffisant pour assurer une cadence convenable.

En cas de traversée de blocs à cheval sur le forage, il faut apporter un soin particulier au choix de la géométrie des trépan, ceux classiques auront tendance à pousser le bloc en place sur le côté (introduisant un hors-profil – Figure 3.60.a) ou en ne le cassant que partiellement, laissant une partie du bloc qui fera glisser le trépan dessus, ce dernier va dévier en attaquant le sol plus meuble face au bloc (Figure 3.60.b). Dans ce dernier cas, le forage s'en trouvera dévié, ce qui pourra provoquer des blocages d'outils.

Figure 3.60 : Cas de traversée de blocs à cheval sur un forage lors de l'usage du trépan



Évacuation des déblais lors d'un forage au trépan

Il existe selon les configurations, trois façons d'évacuer les déblais lors de l'utilisation d'un trépan :

- **à l'aide de soupapes ou curettes** (Figure 3.61). Le fonctionnement est identique à celui d'une benne-preneuse (cf. § 3.2.4.2), à la différence que le sabot d'une soupape n'est pas destiné à déstructurer le terrain, mais uniquement à récupérer les déblais. Différentes technologies de soupapes et de clapets existent pour s'adapter aux conditions rencontrées (par exemple soupape à sable pour la traversée des terrains sableux fortement aquifères), avec généralement un clapet qui s'ouvre à la descente et se referme après introduction des déblais, et la possibilité par des manœuvres rapides de remplir le fût de la soupape. L'utilisation combinée d'un trépan simple et d'une soupape nécessite **de nombreuses manipulations d'alternance d'outils** (cf. § 3.1.2). Afin de les faciliter, il est recommandé de choisir un diamètre de soupape sensiblement inférieur au diamètre du tube de travail (100 à 150 mm de différence pour un diamètre de tube supérieur à 600 mm). Cette méthode est par conséquent peu adaptée pour un travail avec une cadence élevée ;
- **grâce au trépan-benne** (aussi appelé « **Hammergrab** ») (Figure 3.62). Cet outil est une benne preneuse dont la géométrie permet de l'utiliser comme un trépan, en position coquilles ouvertes ou fermées suivant le choix du constructeur quant à la géométrie de l'attaque. C'est donc **le même outil qui réalise à la fois le forage par trépanage et l'évacuation des matériaux**. C'est un outil plus lourd et plus coûteux que les trépans classiques, mais qui présente l'avantage de l'efficacité. Cet outil est généralement utilisé pour les roches tendres ;
- **par circulation inversée** (cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage »), via l'âme creuse du trépan spécialement destiné à cet usage (Figure 3.63). Cet outil peut aussi être appelé le « trépan-émulseur ». La technique de l'air lift (cf. § 2.5.2) est par exemple bien adaptée au forage par trépanage en milieu maritime ou fluvial. Il est réalisé à l'intérieur d'un tube préalablement mis en place par battage. L'air lift permet d'évacuer en continu les déblais de forage ; il n'est ainsi pas nécessaire de retirer régulièrement le trépan pour curer le fond des débris qui limitent l'efficacité de l'outil⁽¹⁷⁾, ce qui représente un gain de temps considérable.

L'usage du trépan-benne ou de la circulation inversée permet d'obtenir une meilleure cadence.

Figure 3.61 : Soupape ou curette utilisée pour l'évacuation des déblais



17. En créant un matelas de déblais, amortisseur des chocs.

Figure 3.62 : Trépan-benne utilisé pour le forage et pour l'évacuation des déblais



Figure 3.63 : Trépan en croix avec âme creuse pour l'évacuation des déblais



3.2.4.2 - Les bennes pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des bennes

Une benne preneuse (Figure 3.64) est munie de coquilles dont les bords d'attaque sont de forme généralement circulaire (*Note 1*) mais peuvent être aussi rectangulaires (*Note 2*) ou oblongs permettant la réalisation de pieux non circulaires (barrettes – *Note 3*). Les bords des coquilles constituent l'attaque de l'outil, qui peuvent être :

- munis de dents (Figure 3.65), taillées dans la masse ou remplaçables, s'imbriquant lors de la fermeture de la benne afin d'emprisonner le matériau excavé ;
- renforcés (Figure 3.66) afin d'être utilisés comme trépan (« trépan-benne », cf. « Évacuation des déblais lors de l'utilisation d'un trépan » ci-avant). La fonction trépan peut être obtenue en position coquilles ouvertes ou fermées suivant le choix du constructeur quant à la géométrie de l'attaque.

Ces bennes sont descendues et remontées alternativement entre le fond de l'excavation et la surface. Elles peuvent être classées selon trois grands types de technologie :

- les bennes suspendues à un câble (Figure 3.66), lui-même connecté à la flèche d'une grue ou d'une pelle. Ces bennes sont généralement caractérisées par la présence d'une jupe au-dessus des coquilles qui assure le guidage vertical de l'outil dans le forage et ajoute du poids à la benne. Le mécanisme de mise en mouvement des mâchoires est assuré par un second câble ou par un système hydraulique (vérins) ;
- les bennes fixées à un kelly (Figure 3.67) dont l'ouverture et la fermeture des mâchoires sont contrôlées par un système hydraulique. Le guidage est assuré par le coulissage du kelly dans une poutre guide fixée à la grue porteuse ;
- les bennes fixées sur bâti long, c'est-à-dire au bout d'une rallonge rigide constituée de plusieurs éléments. Un système hydraulique contrôle la fermeture/ouverture de la benne et la cinématique du bâti permettant l'extraction de l'outil. Cette technologie est réservée aux faibles profondeurs.

Les bennes rencontrées classiquement sur le marché ont un volume utile des déblais excavés qui peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines de litres.

Note 1 : généralement, la benne circulaire est utilisée à l'abri d'un tube (Figure 3.66) pour améliorer la verticalité. Les diamètres d'excavation couramment obtenus débutent à 600 mm, puis augmentent généralement par palier de 200 mm (plus rarement de 100 mm) jusqu'à atteindre 1,80 m voire plus. En dehors d'une association dans le cadre d'un travail au trépan, les bennes circulaires sont peu usitées de nos jours, en raison de leur faible cadence du fait du modeste volume extrait à chaque passe. Elle présente cependant l'avantage de permettre de travailler en déporté ou sous hauteur limitée.

Note 2 : les sections d'excavation couramment obtenues ont une longueur, suivant les constructeurs, de 2,70 m, 2,80 m, 2,85 m ou 3,00 m (rarement de 2,50 m) et une largeur allant de 0,50 m (rarement 0,40 m) à 1,20 m. Des dimensions plus importantes existent mais restent exceptionnelles.

Note 3 : les barrettes peuvent se révéler avantageuses par rapport à des pieux circulaires en présence de reprise d'efforts transversaux importants ou de fortes charges verticales ou encore pour limiter les efforts d'excentrement en cas de fortes charges en limite d'emprise.

Figure 3.64 : Schéma d'une benne et sa terminologie
(selon la norme NF EN 1536+A1)

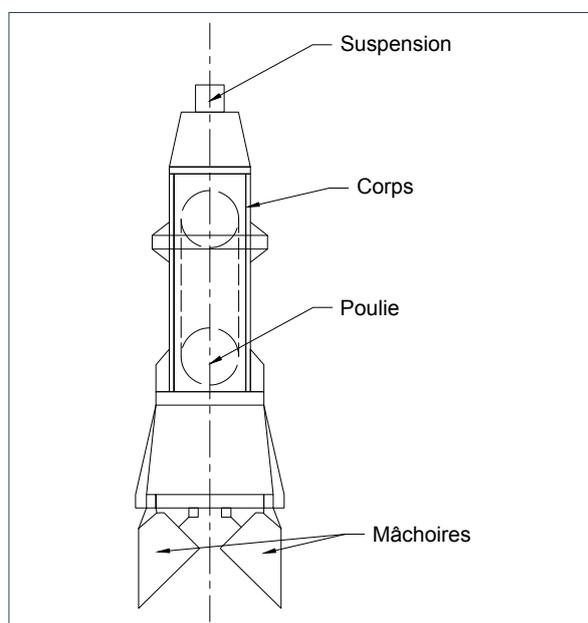


Figure 3.65 : Évacuation des déblais par ouverture des mâchoires de la benne preneuse munie de dents



Figure 3.66 : Benne preneuse à coquilles rondes suspendue à un câble



Figure 3.67 : Exemples de benne fixée sur un kelly



Adéquation des trépan à la nature du sol (cf. Tableau 3.13 de synthèse dans le § 6.1.2)

Les bennes permettent des rendements élevés dans tous les terrains meubles. Selon leur poids, elles peuvent traverser les bancs durs s'ils ne sont pas trop épais ou trop cohérents. Les blocs deviennent un problème si leur dimension est supérieure au diamètre (ou à l'épaisseur) du pieu (ou de la barrette) à réaliser. Dans ce cas, les bennes sont utilisées conjointement au trépan.

Évacuation des déblais à la benne

Une fois remplie, la benne est remontée et peut se vider après ouverture des mâchoires (Figure 3.62 dans le § 3.2.4.1 et Figure 3.65 dans le § 3.2.4.2).

3.2.4.3 - Les haveuses⁽¹⁸⁾ pour la réalisation des pieux de classe 1

Principe général et géométrie des haveuses

L'outil (Figures 3.68 et 3.69) est composé de roues dentées actionnées par un moteur hydraulique situées à l'extrémité d'un bâti de guidage (Notes 1, 2 et 3) avec aspiration en continu des cuttings mélangés au fluide stabilisateur (Note 4) au moyen de pompes situées à la base de l'outil. Le matériau est déstructuré sous les actions combinées du poids de l'outil (30 à 50 t en moyenne) et de la rotation des roues dentées (d'axe horizontal) qui tournent en sens inverse (Note 5). Il s'agit d'une machine à descente continue (Note 6), c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire de remonter l'outil en cours de forage pour l'évacuation des déblais.

Les haveuses ne sont utilisées que pour la réalisation des barrettes (rectangulaires).

Note 1 : le bâti, en plus de guider le forage, met du poids sur l'outil pour permettre aux dents de déstructurer le terrain ; plus le rocher est dur et plus le poids doit être important (Note 2), et plus le porteur doit aussi être important pour pouvoir soulever l'outil.

Note 2 : afin de réduire son poids, une entreprise a équipé ses haveuses de « grippeurs », outil comprenant des vérins horizontaux permettant de bloquer le bâti dans le forage rocheux, et des vérins verticaux permettant d'appuyer les roues de la haveuse au fond du forage.

Note 3 : la pompe d'aspiration du marinage impose une taille minimale d'outil en largeur de 600 mm.

18. La haveuse est aussi appelée « fraise » (Annexe A de la norme NF EN 1538+A1). Selon les entreprises, ces machines portent des noms différents, par exemple « Hydrofraise », « Rotoforeuse », « Hydromill », « Cutter ».

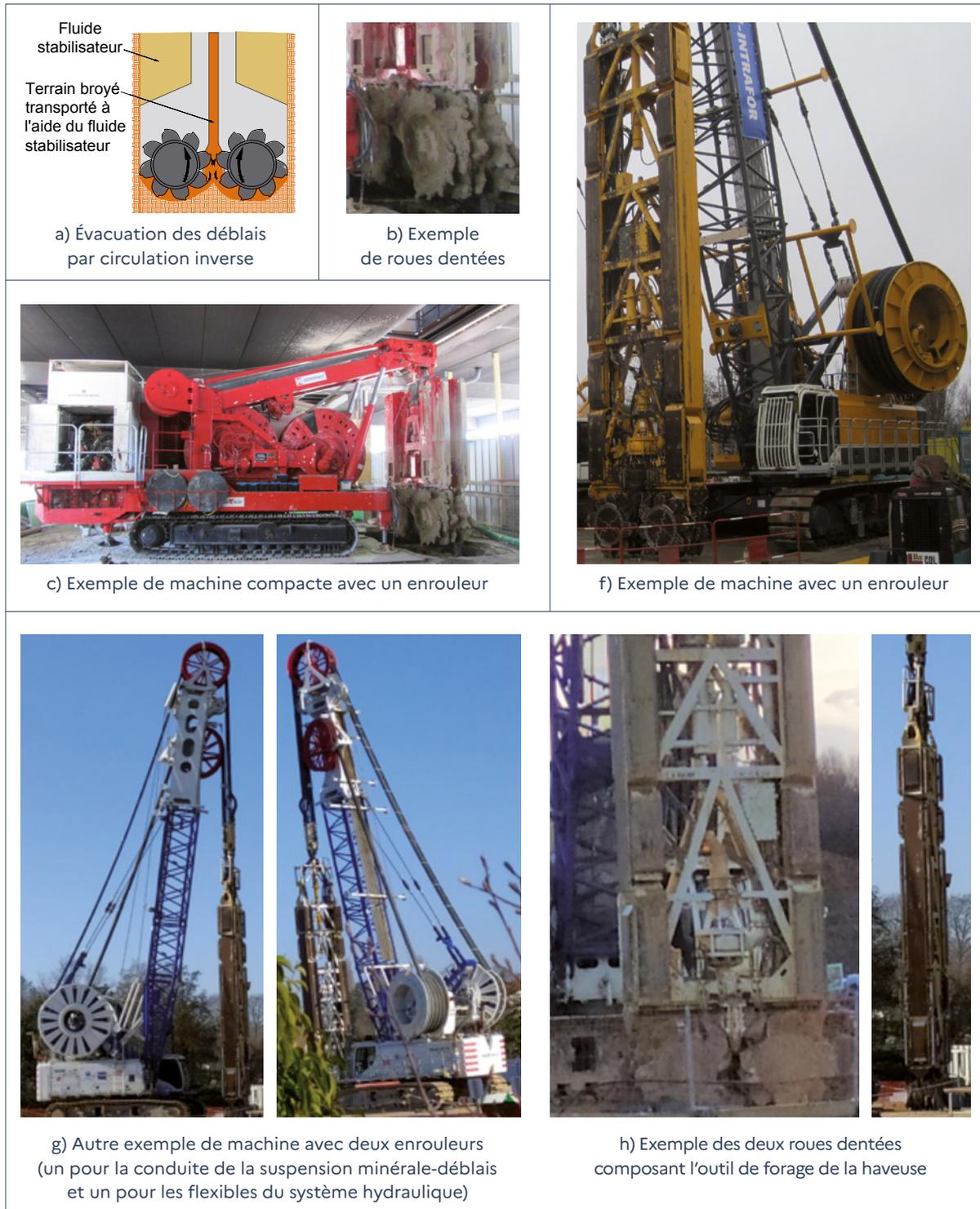
Note 4 : le forage à la haveuse exige l'utilisation du fluide stabilisateur pour l'évacuation des déblais (marinage), requérant une emprise et une logistique importantes sur le chantier (cf. ci-après l'évacuation des déblais).

Note 5 : la rotation est en sens inverse afin :

- de ramener les déblais à la pompe ;
- d'équilibrer les efforts de façon à excaver droit ;
- de rectifier certaines amorces de déviation en jouant avec les vitesses relatives des deux roues.

Note 6 : en raison de l'utilisation d'un forage en continu et sans à-coups, de nombreuses haveuses sont munies de système de mesure, voire de correction de la direction du forage visualisable instantanément par le foreur, assurant des tolérances de verticalité inférieures à la norme.

Figure 3.68 : Exemples de haveuses



Adéquation des haveuses à la nature du sol (cf. Tableau 3.13 de synthèse dans le § 6.1.1.2)

Les haveuses sont utilisables dans de nombreux sols (Notes 1, 2 et 3), ainsi que dans les roches tendres à moyennement dures. Les roues peuvent être équipées de picots (par exemple dans des sables cimentés, des conglomerats ou des roches moyennement dures), de dents plates (par exemple dans des roches tendres et certaines roches altérées) ou de molettes (plutôt pour les couches rocheuses extrêmement dures – Note 4) ou encore d'un mélange de dents de plusieurs types ayant une implantation bien pensée sur les roues.

Note 1 : si la foration présente des difficultés, il est possible :

- de changer :
 - les roues, si finalement il y a eu erreur dans le choix initial (par exemple, si des picots ont été prévus et que la roche tendre est plus facile à désagréger avec des dents plates implantées différemment). Ce changement fait perdre environ deux jours de production, mais ensuite on retrouve la cadence prévue,
 - les dents en gardant la même implantation (les picots ou les dents plates et plus exceptionnellement les molettes). Chaque changement représente un délai de chantier supplémentaire, en considérant qu'il faut sortir la haveuse du forage, puis une fois la dent changée, la redescendre dans le forage, alors que ce n'est pas nécessaire en temps normal où la haveuse ne fait que descendre au fur et à mesure de l'excavation.

Les haveuses sont donc d'autant plus adéquates que les terrains sont homogènes ; on tente, autant que possible, de conserver un même outil tout au long du forage offrant le meilleur compromis au niveau du rendement ;

- d'utiliser une benne pour les couches meubles, puis faire intervenir une haveuse pour les sols plus résistants.

Note 2 : dans les terrains argileux, il y a un risque de colmatage de l'outil de coupe. De même, la situation peut devenir très difficile dans certains sols rocheux présentant des veines d'argile, où la haveuse va rencontrer du sol rocheux, puis une veine d'argile qui va colmater l'outil, puis à nouveau du sol rocheux qui ne pourra pas être attaqué sans avoir sorti les roues pour les décolmater... et ainsi de suite.

Note 3 : dans les terrains où on a le choix entre benne et haveuse, du fait du coût d'installation et d'exploitation souvent très élevé de cette dernière, la haveuse est généralement utilisée pour les ouvrages faisant l'objet de tolérances d'implantation strictes (ouvrages très profonds...) ou pour ceux ayant un environnement sensible aux vibrations. En dehors de ces contextes, les bennes lourdes sont généralement utilisées. Cependant, avec de la roche, les bennes lourdes peuvent ne pas fonctionner même avec le recours au trépan.

Note 4 : pour les roches, afin de cibler la meilleure configuration des roues dentées (choix des dents plates et/ou picots et de leur implantation sur les roues, ou encore choix de molettes), il convient de s'intéresser (au plus tard en phase G2 Pro) à leur dureté et à leur abrasivité, et de disposer des essais de type :

- mesures de résistance à la compression simple ;
- essais d'abrasivité Cerchar (norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22) ou LCPC (norme NF P94-430-2) ;
- essais de dureté (norme XP P94-412).

Caractéristiques des haveuses

Sur porteur de type pelle à câbles ou foreuse (Figure 3.69), il existe plusieurs tailles et poids de haveuses, de puissance variable et atteignant différentes profondeurs de fraisage.

Il existe des haveuses sans enrouleurs pour des profondeurs limitées et des haveuses avec enrouleurs pour les profondeurs importantes (Figures 3.68.f et 3.68.g). Ces enrouleurs peuvent servir pour :

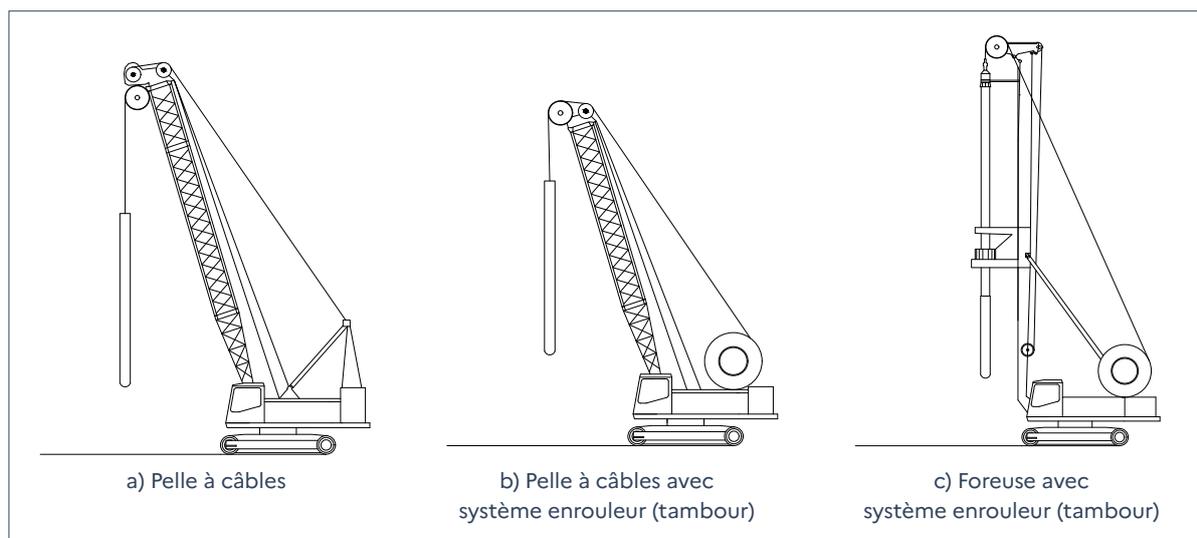
- la conduite permettant l'évacuation de la suspension minérale et des déblais ;
- tous les flexibles pour l'alimentation hydraulique (cf. ci-après « le système de guidage »).

En cas de nécessité de gabarit réduit en hauteur (Figure 3.68.c), il existe des haveuses de modèle compact, comportant obligatoirement des enrouleurs pour pouvoir gérer les flexibles en absence de flèche.

Certaines machines disposent de systèmes s'appuyant sur les parois latérales de l'excavation :

- permettant d'une part de rectifier la verticalité, et
- d'autre part, en bloquant le bâti de la haveuse et avec le recours à d'autres vérins qui poussent les roues dentées vers le bas, d'augmenter les efforts de poussée (l'effort est limité, entre autres, par la capacité de frottement du système s'appuyant sur les parois latérales de l'excavation).

Figure 3.69 : Exemples de configuration de haveuses (schémas de principe)



Évacuation des déblais lors d'un forage à la haveuse

L'évacuation de tous les déblais est assurée par circulation inverse du fluide stabilisateur (Figure 3.68.a et cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage »). Pour assurer cette circulation jusqu'en surface, une pompe de forte puissance va aspirer le fluide comportant les déblais (le marinage). En raison de l'importance des déblais à évacuer dans le fluide, la pompe et le dessableur de la centrale de traitement de la suspension minérale (cf. § 4.3.2.3) pour séparer les déblais du fluide doivent être assez puissants pour assurer un débit suffisant et ne pas pénaliser la cadence de l'excavation (cf. ci-après « Cadence de la haveuse »).

Cadence de la haveuse

Dans le cas où la pompe permettant l'aspiration du fluide chargé des déblais et le dessableur sont :

- correctement dimensionnés, la déstructuration du terrain par les roues dentées donnera la cadence ;
- insuffisamment dimensionnés, la haveuse verra sa vitesse d'avancement réduite.

3.2.4.4 - Les marteaux fond de trou pour la réalisation des pieux de classe 1

Origine des marteaux fond de trou

La réalisation de forages de pieu au marteau fond de trou (Figure 3.70) est relativement récente, en particulier pour les gros diamètres. Cette technologie est issue des sondages de reconnaissance et a pu être appliquée aux pieux forés grâce aux progrès de conception (impulsés notamment par les exploitants de carrière et les forages pétroliers) permettant de produire des outils plus gros pouvant forer aux diamètres des pieux courants. Il existe ainsi sur le marché des marteaux fond de trou de plus de 2 m de diamètre.

Figure 3.70 : Exemple de marteau fond de trou utilisé pour les forages de reconnaissance (pour les pieux les diamètres sont plus importants)



Principe général et géométrie des marteaux fond de trou

Le marteau est constitué d'un plateau muni d'un taillant à boutons (Figure 3.70) et animé d'un mouvement de roto-percussion. Il existe des multi-marteaux fond de trou (« cluster hammer » – Figure 3.71) composés d'un cylindre en rotation dont le fond plat équipé d'une série de marteaux fond de trou de petit diamètre. Cette percussion est la plupart du temps générée par un système pneumatique puissant (fort débit d'air sous pression – *Note*).

Le marteau fond de trou peut être associé à un tube, entraîné par le taillant du marteau, permettant de limiter les déviations et les pertes d'air, et de contribuer à la bonne remontée des déblais (donc d'éviter les bourrages). Le tube aura un plus petit diamètre que le taillant.

Note : ce fort débit d'air permet d'évacuer les déblais en circulation directe.

Figure 3.71 : Multi-marteau fond de trou ou « cluster hammer »



Adéquation des marteaux fond de trou à la nature du sol

Ces outils sont très coûteux, ce qui les réserve généralement aux excavations dans les roches les plus dures, typiquement le granite, ou lorsque les épaisseurs de rocher à traverser sont très importantes. Ils sont utilisés avantageusement dans les terrains très abrasifs. Ils sont bien adaptés aux roches homogènes, mais moins dans le karst ou dans des sols comportant des blocs rocheux très durs et épars ou dans les roches avec failles et veines altérées pouvant entraîner des déviations et des blocages du tube. Ils peuvent être aussi utilisés pour passer les enrochements des digues dans les sites portuaires.

Comparativement à l'utilisation du carottier ou du trépan, les cadences de forage au marteau fond de trou sont nettement plus importantes.

Ces outils sont très sensibles en particulier aux pertes d'air car dans ce cas, les cuttings ne peuvent plus être évacués, ce qui conduit au bourrage de l'outil et pour finir à son blocage.

En cas de tubage à l'avancement (cf. ci-après « Tubage à l'avancement associé au marteau fond de trou »), le marteau fond de trou peut traverser des empilements de blocs mais à condition d'entraîner un tube (ce qui limite les déviations, les pertes d'air, les blocages qui en résultent).

Évacuation des déblais au marteau fond de trou

L'air comprimé, généré par le système pneumatique (*Note*), permet l'évacuation des débris (souvent à l'état de poussière) produits par l'action des marteaux, jusqu'en surface ou par l'intermédiaire d'un panier.

Note : les installations et notamment les besoins en compresseurs et puissance électrique sont conséquentes pour cette technique. L'évacuation des débris à l'air ainsi que le bruit généré conduisent à des limites d'utilisation en fonction de l'environnement et en milieu urbain.

Tubage à l'avancement associé au marteau fond de trou

Certains procédés⁽¹⁹⁾ permettent d'associer le marteau fond de trou avec un tubage à l'avancement, c'est-à-dire que le tube est descendu entraîné par le taillant et son propre poids (Figure 3.72). À l'intérieur du tube, le forage est assuré par un marteau fond de trou.

Le tube peut être définitif (dans ce cas le sabot et la couronne sont perdus), ou récupéré.

Le tube est généralement légèrement en avance (mais cela peut dépendre du procédé) et déstructure le terrain grâce à une couronne fixée sur un sabot. La couronne détruit la roche sur un diamètre plus important que le diamètre extérieur du tube (quelques centimètres de différence), ce qui limite les frottements tube-terrain. On peut donc retirer le marteau et le taillant en laissant la couronne et le tube.

Deux cas de figure :

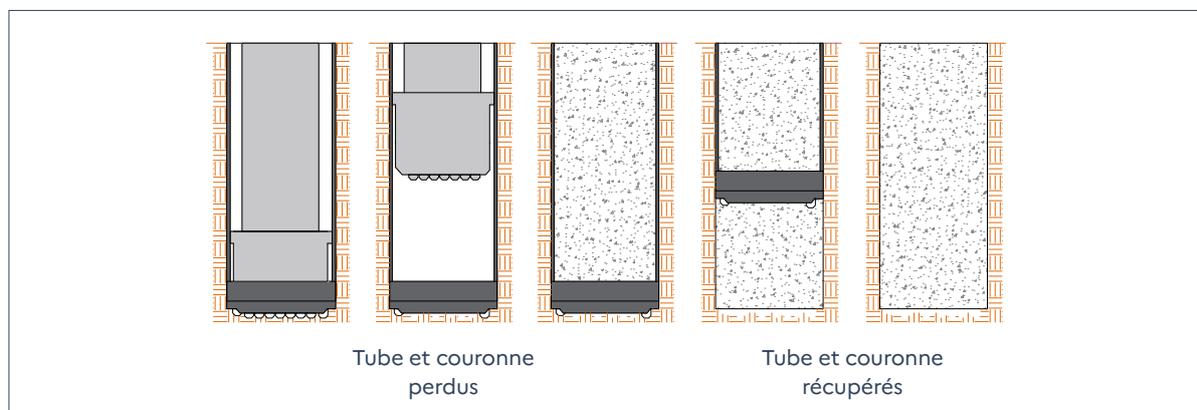
- le sol est trop hétérogène, ou boulant ou contient des vides, le tube et la couronne sont abandonnés et bétonnés ;
- le sol est rocheux et homogène, le tube et la couronne sont récupérés après bétonnage s'il le faut, comme un forage tubé classique.

Il existe une coordination entre la descente du tube et celle de l'outil d'excavation. La frappe, selon la technique utilisée, peut avoir lieu au fond du trou ou hors du trou. L'ensemble déstructure le matériau, et permet l'avancée du forage. Le tube et le train de tige sont entraînés ensemble dans la direction de la frappe, tandis que les déblais de forage sont évacués à l'intérieur du tube, par le vide existant entre la tige et le tube et grâce à l'air injecté au niveau du taillant.

C'est un procédé très efficace, qui combine la rotation et la percussion (*Note*). Il peut s'avérer très intéressant pour un chantier de pieux forés tubés d'ampleur, en raison des cadences qu'il permet si le terrain s'y prête.

Note : l'opérateur évitera d'avoir recours à la rotation et à une injection d'air trop importante au début du forage, sur une épaisseur pouvant varier de quelques centimètres à 50 centimètres selon la nature du terrain, afin de réduire les risques de déviation.

Figure 3.72 : Exemple de matériel pour le forage au marteau fond de trou avec tubage à l'avancement avec tube perdu ou récupéré



19. Les systèmes symmetrix® et ODEX® font parties de ces procédés.

3.2.5 - OUTILS MOINS COURANTS POUR LA RÉALISATION DES PIEUX DE CLASSE 1

Les techniques présentées ci-avant (cf. § 3.2.2, 3.2.3 et 3.2.4) sont les plus courantes et permettent de couvrir la grande majorité des problématiques que l'on peut rencontrer sur un chantier de pieux forés. Nous exposons ci-après **des méthodes plus marginales** mais qui peuvent s'avérer intéressantes dans certains contextes particuliers :

- les **tricônes** (§ 3.2.5.1) ;
- les **tricônes à plusieurs molettes** ou cônes (« full face rotary tool ») (§ 3.2.5.2) ;
- le **recours aux explosifs** (§ 3.2.5.3).

3.2.5.1 - Les tricônes

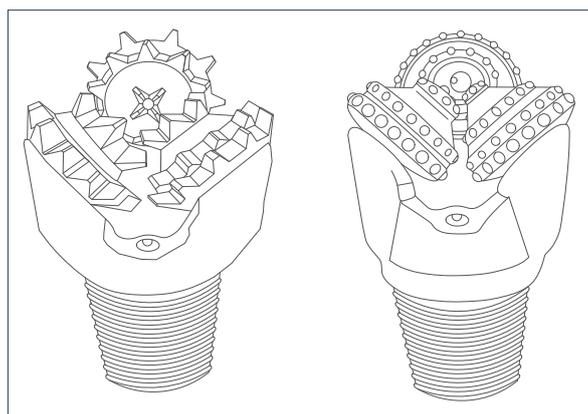
Les **tricônes peuvent être utilisés pour** ce que l'on peut appeler **des « mini-pieux »** (diamètre > 300 mm). Ils permettent de réaliser des pieux sous hauteur réduite et avec de petites emprises.

Le tricône (Figure 3.73) est composé de trois roulettes coniques comprenant :

- des **dents d'acier** pour des terrains tendres (calcaires tendres, marnes) à mi-durs (calcaires) ;
- des **picots de carbure de tungstène** pour les terrains mi-durs (schistes) à durs (granite, type roche).

Plus le terrain est dur, plus les dents ou picots sont petits.

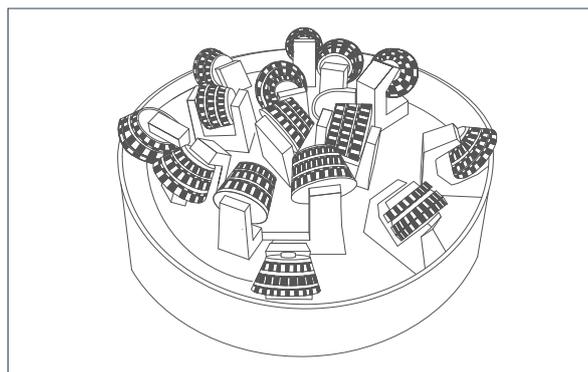
Figure 3.73 : Exemples de tricône (schémas de principe)



3.2.5.2 - Les tricônes à plusieurs molettes ou cônes (« full face rotary tool »)

Les **tricônes à plusieurs molettes** (Figure 3.74) ou cônes sont équipés sur l'ensemble de leur surface d'une **série d'éléments désagrégateurs** (« molettes ») travaillant en rotation. Ce type d'outil ne travaille pas en percussion. Il peut représenter **une alternative intéressante à la tarière au rocher ou au carottier**, notamment au niveau de la cadence. Ils sont généralement **réservés aux terrains très durs** (rochers, passage de blocs). Leur utilisation est plus aléatoire dans les terrains compacts (argiles ou marnes).

Figure 3.74 : Exemples de tricône à plusieurs molettes (schéma de principe)



3.2.5.3 - Le recours aux explosifs avant forage

Le recours aux explosifs est particulièrement délicat, car outre les questions de sécurité que cela pose, il est aussi difficile de ne pas altérer les propriétés du terrain au-delà de la zone visée et les pieux voisins. Leur utilisation doit donc **avoir lieu en dernier recours**, sous forme de micro-minage. Le recours aux explosifs pour déstructurer le rocher et permettre la réalisation des forages de pieux peut nécessiter par la suite des injections pour reconstituer une certaine homogénéité ou étanchéité de la roche.

3.2.6 - OUTILS POUR LA MODIFICATION DE LA GÉOMÉTRIE DU PIEU

Pieux « rainurés »

Ces pieux ne fonctionnent que dans des sols cohérents. Après bétonnage, le pieu obtenu idéalement a l'allure d'une vis sans fin. Cette forme particulière permet de mobiliser un frottement latéral plus important qu'avec un fût lisse à diamètre constant, améliorant ainsi la capacité portante du pieu. **À portance constante, elle permet de réduire le volume de béton à mettre en œuvre.**

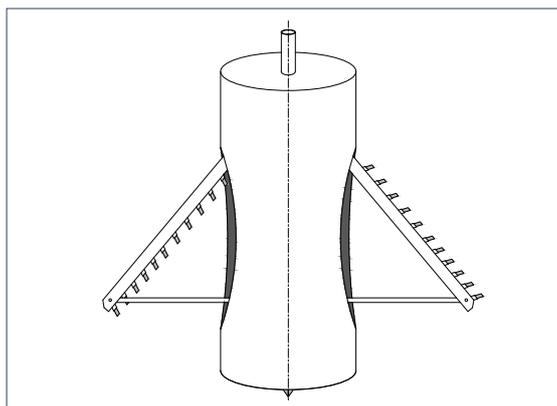
Il existe deux types de pieux rainurés :

- **les pieux de catégorie 5 « foré simple ou boue avec rainurage »**, pour lesquels la technique de rainurage « a pour objectif essentiel de décaper l'éventuelle couche de sol remanié ou d'argile qui adhère à la paroi » selon l'article A.2.5 de l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1. Ce rainurage est effectué, une fois la cote de forage atteinte, par l'utilisation d'une dent ou d'un ergot fixé en périphérie de la tarière. Il n'augmente pas la valeur du diamètre du pieu considérée pour les calculs de justification ;
- **d'autres techniques particulières** utilisant des outils de forage spécifiques permettent de créer une rainure en forme d'hélice courant sur la surface latérale du pieu. Il est important de préciser qu'en toute rigueur les pieux réalisés avec cette technique de mise en œuvre, bien qu'étant effectivement des pieux forés, **ne font pas partie de la classe 1 au sens de la norme NF P94-262 COMPIL1**. Les spécifications d'exécution et les paramètres de calcul de capacité portante de ce type de pieux font l'objet d'un **cahier des charges**, basé notamment sur des essais de chargement dans des contextes géotechniques similaires au projet.

Pieux à base élargie

Les bennes à lames extensibles (« bellings bucket ») (Figure 3.75) **comportent généralement un ou deux couteaux munis de dents, articulés et manœuvrés par l'intermédiaire du kelly afin de les déployer une fois la benne arrivée en fond de forage. La mise en rotation de l'outil permet alors la découpe du terrain avec une forme de cloche d'un diamètre supérieur à celui du forage, et le matériau ainsi excavé est récupéré à l'intérieur de la benne. Cet élargissement peut permettre d'augmenter la capacité portante du pieu et celle de résistance à la traction. Cependant cette technique n'est pas sans risque** (instabilité de la partie sous-cavée, incertitudes sur la qualité du curage du fond du pieu), et est très peu utilisée en France. Elle est réservée aux terrains cohérents, et doit faire l'objet d'un cahier des charges.

Figure 3.75 : Exemple de benne à lames extensibles
(schéma de principe)



3.2.7 - DENTS ÉQUIPANT LES OUTILS DE FORAGE

À leur base, les outils de forage sont équipés de porte-dents. Les dents sont généralement remplaçables (*Note*) et réparties sur l'attaque de l'outil de forage. Elles sont vissées, emmanchées ou soudées sur les porte-dents (Figure 3.34.b « Exemples de dents, picots ou doigts » dans le § 3.2.2.1). Suivant la nature des terrains, les dents (Figure 3.34 dans le § 3.2.2.1, Figure 3.76 et Tableau 3.14 de synthèse dans le § 6.2) peuvent être :

- **plates** notamment pour les terrains cohésifs et/ou sableux ;
- **pointues**, appelées aussi « doigts ou picots », et plutôt adaptées aux sols les plus raides type rocheux, sables grésifiés, et autres terrains compacts. Lorsque ces terrains sont abrasifs, ces dents peuvent être durcies au tungstène ;
- **auto-affûtantes**, ce qui permet de conserver une certaine agressivité malgré l'usure.

L'**inclinaison des dents** est variable et a une grande influence sur l'efficacité de l'outil ; il est possible et souhaitable de tester différentes configurations pour optimiser les cadences et cela peut être fait en particulier lors des pieux de faisabilité.

Note : on ne change pas des dents plates pour des picots : on change l'outil de forage.

Figure 3.76 : Photos dents plates et picots



Picots tungstène

Dents plates



CHAPITRE 4

Techniques de tenue des parois par fluide stabilisateur

4. TECHNIQUES DE TENUE DES PAROIS PAR FLUIDE STABILISATEUR

La distinction entre **les fluides stabilisateurs et de forage** est présentée dans le § 4.1 ci-après. Comme **le fluide de forage** est généralement aussi un fluide stabilisateur, dans la suite du texte le terme « fluide stabilisateur » est utilisé pour ces deux fonctions.

4.1 - INTRODUCTION

Les fluides stabilisateurs utilisés pour la réalisation des fondations profondes

« 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⁽²⁰⁾, « transporter les sédiments », à ne pas confondre avec le fluide de forage (cf. ci-après « Le fluide de forage » et *Note 1*). **Les fluides stabilisateurs viennent s'opposer aux poussées (contraintes) horizontales exercées par les terres et l'eau** (Figure 3.77).

Les deux fluides principalement utilisés lors du forage de pieux sont :

- **les suspensions minérales**, principalement **les suspensions de bentonite**⁽²¹⁾ (*Notes 2, 3 et 4*) (§ 4.2.1) ;
- **les solutions de polymères**⁽²²⁾ **synthétiques**, entre autres, de type PHPA⁽²³⁾ (polyacrylamide partiellement hydrolysé ou copolymère acrylamide – acrylate de sodium) (§ 4.2.2) (*Note 5*) ;

et plus rarement d'autres fluides tels que :

- **l'eau**, mais dans ce cas l'eau sert généralement à contrebalancer la pression interstitielle présente dans le sol (§ 4.2.3) ;
- **des mélanges bentonite-polymères** (§ 4.2.4).

Les fluides stabilisateurs nécessitent souvent l'adjonction d'adjuvants pendant leur utilisation ou leur recyclage afin d'obtenir ou de conserver leurs propriétés et donc leur efficacité (cf. § 4.3.6 « Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs »).

Il est à noter qu'un fluide stabilisateur ne permet **pas la tenue des terrains en tête** (pression insuffisante) et qu'**une virole** dépassant de la plateforme et plantée dans le sol sur les premiers mètres (*Note 6* et cf. § 5.2.1) **est de ce fait souvent impérative**.

Note 1 : dans le langage courant, le terme « boue » est aussi bien utilisé pour le fluide stabilisateur, que pour le fluide de forage.

Note 2 : la plupart des bentonites que l'on trouve sur le marché contiennent un peu de polymères.

Note 3 : dans certains environnements, la bentonite ne convient pas, par exemple en cas de milieu marin car elle floccule, d'autres suspensions minérales peuvent être utilisées (cf. § 4.2.1.1 « Composition des suspensions minérales utilisées pour les pieux forés »).

Note 4 : **le terme de « bentonite »** est généralement utilisé par abus de langage pour les suspensions minérales, même s'il peut s'agir d'autres minéraux.

Note 5 : certaines solutions de polymères peuvent se révéler incapables de soutenir correctement une fouille rectangulaire dans un sol donné, alors qu'elles y assurent la stabilité des parois pour des excavations circulaires de grand diamètre.

Note 6 : **la virole permet aussi :**

- **de garantir une sur-hauteur de fluide stabilisateur** par rapport au niveau de la nappe phréatique malgré l'abaissement du niveau du fluide lors de la sortie de l'outil de forage ou pour équilibrer les pressions en cas de nappe artésienne ;
- **d'éviter le débordement du fluide** lors de l'entrée de l'outil dans le forage rempli de fluide.

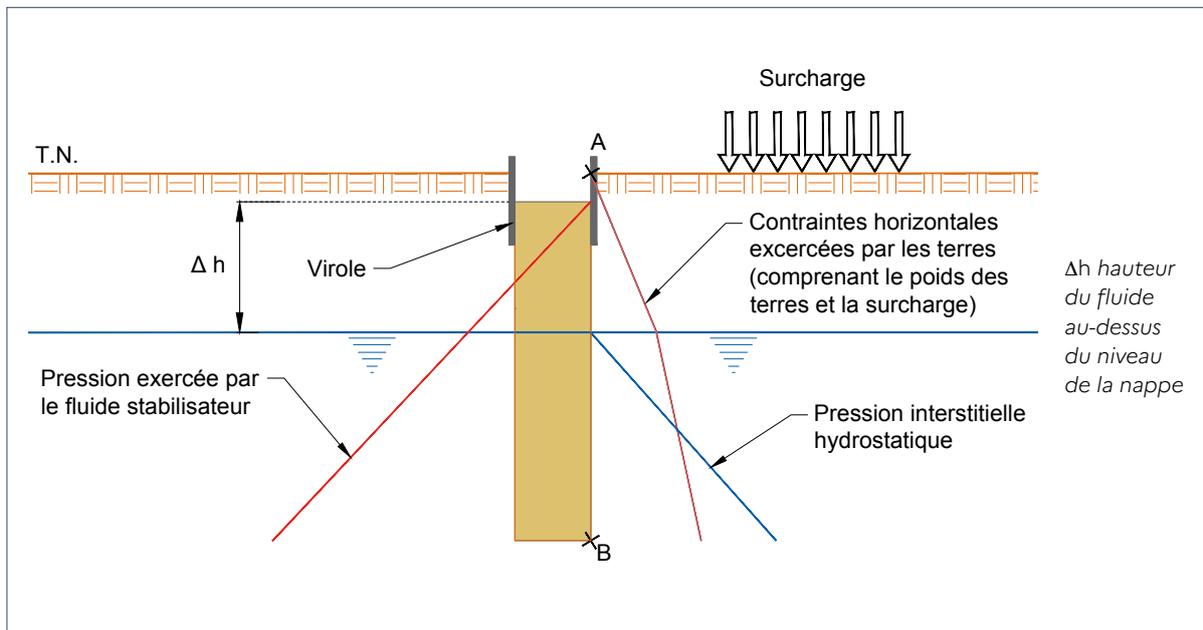
20. Dans la norme NF EN 1536+A1 (article 3.21), « dans certains cas » n'est pas indiqué.

21. Terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (NOTE de l'article 3.21), en effet des particules minérales sont en suspension dans de l'eau.

22. Terme employé dans la norme NF EN 1536+A1 (NOTE de l'article 3.21), en effet il s'agit d'un mélange homogène de polymères et d'eau.

23. Les PHPA sont des polymères synthétiques dérivées des PAM (polyacrylamide).

Figure 3.77 : Représentation des forces en présence au niveau de la paroi AB d'une excavation remplie de fluide stabilisateur
(schéma de principe)



Le fluide de forage

L'expression « fluide de forage » est réservée à la fonction de transport des cuttings, il sert souvent à refroidir l'outil et aussi généralement comme fluide stabilisateur (*Note*). Le fluide de forage peut être de l'eau, de l'air comprimé (*Note*) ou de la boue (suspension minérale, très souvent de bentonite ou solution de polymères).

Note : l'air comprimé n'est en revanche pas un fluide stabilisateur.

Limites à l'utilisation de fluides stabilisateurs pour la réalisation des fondations profondes

Le recours aux fluides stabilisateurs ne nécessite pas de justification dans les cas courants autre que celle du retour d'expérience (cf. les articles 8.2.4.5 à 8.2.4.7 de la norme NF EN 1536+A1).

L'utilisation des fluides stabilisateurs pour la réalisation des fondations profondes **dans les cas suivants est non courante et nécessite une étude spécifique** avec le recours éventuel à de l'injection, à une adaptation du fluide stabilisateur, à du jet grouting ou à d'autres solutions :

- dans les sols présentant **une perméabilité trop importante** (perméabilité $\geq 10^{-2}$ m/s) ;
- des remblais récents insuffisamment consolidés ;
- des sols très mous susceptibles de fluer (risque de rétrécissement de la section du pieu),
- des éboulis peu stables ;
- des terrains calcaires ou gypseux, dans lesquels la présence de karst ou de poches de dissolution peut entraîner, durant le forage, des pertes brutales de fluide stabilisateur, et donc des éboulements importants dans les couches supérieures ;
- des terrains/une nappe/une pollution qui, lorsqu'ils sont **en contact avec le fluide stabilisateur, en modifient fortement les propriétés** (pH, viscosité...) pouvant entraîner par exemple leur floculation ou une perte d'eau par filtration conduisant à des éboulements importants dans les couches où le fluide a perdu de son efficacité ;
- en cas de **proximité immédiate de constructions lourdes** fondées superficiellement ou sur pieux flottants interdisant toutes décompactions des sols, notamment s'ils sont pulvérulents. Bien sûr, cette dernière restriction est encore plus sévère si la traversée des couches résistantes nécessite l'emploi du trépan (cf. § 3.2.4.1).

Traçabilité et retours d'expériences

Quel que soit le fluide considéré, et comme indiqué dans la norme NF EN 1536+A1, **la composition chimique et minéralogique du fluide stabilisateur utilisée doit être indiquée**. La traçabilité et le retour d'expérience pourront être établis par la mise en place d'un **contrôle qualité** conforme aux recommandations du **tableau B1 de la norme NF EN 1536+A1** et **le suivi des bons de livraison** permettant de tracer les lots de production du fournisseur de fluide stabilisateur. Les fiches techniques et de sécurité des solutions minérales ou des suspensions de polymères du fournisseur sélectionné permettent de vérifier la conformité du produit livré par rapport aux engagements du fournisseur.

Collaboration entre l'entreprise de forage et le fournisseur du fluide stabilisateur

Pour certains projets, **une forte collaboration entre l'entreprise de forage et le fournisseur de fluide stabilisateur** est requise afin de sélectionner en amont la technique et le fluide ainsi que les ajouts appropriés dans un objectif de gérer les aléas. **Un suivi pendant le forage** est aussi nécessaire afin de modifier si nécessaire les caractéristiques du fluide. La disponibilité et la qualité du service du fournisseur doivent donc être pris en considération.

Équipements et savoir-faire associés au type de fluide stabilisateur

Les équipements requis pour **le mélange** (cf. § 4.3.2 « Préparation des fluides stabilisateurs »), **le stockage** (cf. § 4.3.2.3 « Les centrales de fluide stabilisateur »), **la circulation** (cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage ») et **le traitement** (cf. § 4.3.6) des fluides stabilisateurs représentent un investissement majeur (ou un coût de location important). Par ailleurs, les équipements nécessaires pour les suspensions de minérales diffèrent de ceux utilisés pour les solutions de polymères. Certaines entreprises de fondations spéciales ayant investi dans un type d'équipement spécifique peuvent donc n'être spécialisées que dans une technique particulière (bentonite ou d'autres argiles ou polymères). **Le savoir-faire du personnel** est aussi très important.

Les pertes de fluides stabilisateurs : quelques solutions

Le niveau des fluides stabilisateurs peut baisser de manière continue ou soudaine en raison de la présence dans le terrain de fissures, de karst, de sols très perméables sans fines ou de vides souterrains, risquant d'entraîner un éboulement des parois du forage (*Note 1*).

Cette perte doit être immédiatement comblée :

- **lorsqu'elle est faible à modérée**, par des ajouts au fur et à mesure de volumes de fluides stabilisateurs venant compenser les pertes (*Note 2*) ;
- **lorsqu'elle est importante** (coefficients de perméabilité supérieurs à 10^{-2} m/s) :
 - par imprégnation du sol par du ciment (*Note 3*),
 - par un apport immédiat de matériaux sableux (*Note 4*), lorsque la perte est soudaine,
 - par du fluide stabilisateur contenant éventuellement d'autres matériaux (*Note 5*),
 - avec du béton ou de la grave ciment ou du béton maigre en présence de cavités ou d'éboulements à remplir.

Si ce risque de perte de fluide a été identifié lors de l'investigation géotechnique, alors une injection de coulis peut être réalisée avant le forage (*Note 1*).

Note 1 : cette perte de fluide peut se révéler dangereuse pour les compagnons ou le matériel, car elle peut être accompagnée d'un affaissement de la plateforme.

Note 2 : dans ce cas, il faudra prévoir une installation permettant d'ajouter rapidement ces volumes.

Note 3 : si l'utilisation du ciment est adoptée, prendre en compte le temps de prise et son impact chimique sur le fluide stabilisateur.

Note 4 : en cas de perte soudaine, la solution de remblayer l'excavation avec un sol granulaire traité au ciment ou par un matériau offrant une faible résistance (par exemple le béton maigre) est couramment utilisée.

Note 5 : les matériaux pouvant être ajoutés au fluide stabilisateur peuvent être classés en quatre catégories [3.1] :

- les matériaux fibreux, comme les fibres de cellulose ;
- les matériaux floculeux (par exemple les copeaux de bois broyés) ;
- les matériaux granulaires tels que le gravier, le sable, les coquilles de noix... ;
- les additifs permettant d'augmenter la viscosité.

4.2 - CARACTÉRISTIQUES ET PRINCIPE DES FLUIDES STABILISATEURS

4.2.1 - LES SUSPENSIONS MINÉRALES

4.2.1.1 - Composition des suspensions minérales utilisées pour les pieux forés

Composition des suspensions minérales utilisées comme fluide stabilisateur

Les fluides stabilisateurs à base de bentonite représentent les suspensions minérales de forage les plus communément utilisées. Actuellement la suspension minérale la plus courante commercialisée est composée d'**aluminosilicates hydratés** qui sont constitués principalement de montmorillonite.

D'autres minéraux du groupe des argiles, comme l'**attapulgite** ou la **sépiolite** peuvent être occasionnellement utilisés à la place de la bentonite en présence par exemple d'eau de mer. ⚠ Ces minéraux ne se comportent pas tout à fait comme la bentonite et les recommandations relatives à cette dernière peuvent ne pas s'appliquer.

Propriétés des bentonites

La bentonite, qui est une argile, a la capacité **de gonfler au contact de l'eau pour former une suspension minérale** qui est un fluide plus ou moins visqueux lorsque cette suspension est agitée, et qui se gélifie au repos.

Choix des bentonites à utiliser

Selon son origine, la bentonite peut avoir **des caractéristiques diverses** et sa sélection se base sur des critères tels que son rendement⁽²⁴⁾ et les caractéristiques du gel formé (cf. § 4.3.3).

Il existe trois grands groupes de bentonites utilisées en tant que fluide stabilisateur (les deux groupes les plus utilisés sont présentés à la suite) :

- **les bentonites sodiques naturelles** (fortement gonflantes naturellement par absorption de l'eau), très rares à l'état naturel en Europe, donc chères et peu utilisées en France ;
- **les bentonites calciques naturelles** (moins gonflantes), généralement inadaptées aux techniques de pieux forés ;
- **les bentonites sodiques activées** (presque aussi gonflantes que les bentonites sodiques naturelles grâce à leur activation⁽²⁵⁾ par le carbonate de sodium), représentant la majeure partie des bentonites utilisées en tant que fluide stabilisateur.

Les bentonites sodiques naturelles

Les bentonites sodiques naturelles sont caractérisées par :

- une forte capacité de gonflement ;
- une forte limite de liquidité (norme NF P94-051) ;
- un faible filtrat⁽²⁶⁾.

24. En France, le rendement est le plus souvent exprimé comme le dosage en kg/m³ pour atteindre une viscosité de Marsh (cf. Annexe 3.1.2) donnée après hydratation dans la plage des 32-40 secondes généralement. À titre indicatif une bentonite sodique naturelle ou simplement activée possède un rendement généralement compris entre 40 et 60 kg/m³. Pour des rendements plus performants, des polymères sont ajoutées dans les bentonites ou on a recours à des argiles spéciales.

Dans l'ancien guide Pieux forés du Setra [3.5], le rendement d'un fluide stabilisateur était exprimé en mètre cube de fluide fabriqué à une viscosité de Marsh de 30 à 35 secondes par tonne d'argile dispersée. Il y était indiqué qu'une bentonite pure présente un rendement compris entre 15 et 18 m³/t et qu'au-delà, il s'agissait de bentonites dopées (au polymères) ou d'argiles spéciales.

25. L'activation consiste, par traitement avec le carbonate de sodium, à échanger les cations Ca ou Mg avec des ions Na [3.1].

26. Correspond à la partie d'eau libre recueillie après filtration du fluide stabilisateur. Ce filtrat (et l'épaisseur du cake) peut être mesuré au filtre-pressé (cf. Annexe 3.1.5).

Les bentonites sodiques activées

Les bentonites sodiques activées (*Note*) sont produites à partir de bentonite calcique et de carbonate de sodium. Le procédé industriel d'activation utilisé modifie la surface des particules d'argile puisque les ions calcium ou magnésium vont être remplacés par les ions sodium. **Ce type de bentonite a des caractéristiques très proches de la bentonite sodique naturelle.**

Les bentonites activées peuvent être **utilisées généralement entre 6 à 12 mois après la livraison** sous réserve d'un stockage dans les conditions de température et d'humidité indiquées dans la fiche technique produit, ensuite elles perdent leurs caractéristiques.

Note : il s'agit en fait de bentonites calciques qui ont été activées pour ressembler aux bentonites sodiques naturelles.

4.2.1.2 - Principe de fonctionnement des suspensions minérales

Rôle des suspensions minérales

La suspension minérale permet, grâce aux deux mécanismes cités ci-après,

- de limiter :
 - les risques d'éboulement (*Note*),
 - les pertes de fluide stabilisateur,
 - l'infiltration de la nappe dans le forage ;
- mais aussi **d'agir comme lubrifiant [3.2]** et ainsi de réduire :
 - la résistance à l'introduction d'un tube de forage éventuel,
 - l'usure du matériel de forage.

Note : dans la norme NF EN 1536+A1 (article 8.2.4.4), il est indiqué que la partie supérieure de l'excavation doit être protégée par une virole ou une murette-guide pour protéger le forage contre les éboulements des sols lâches de cette zone et pour la sécurité du personnel de chantier, ainsi que pour guider les outils de forage.

Deux mécanismes des suspensions minérales pour stabiliser le forage

Les suspensions minérales correctement mélangées à l'eau contribuent à la stabilité du forage, via deux actions (Figure 3.78) :

- la formation d'un **cake** (*Notes 1, 2 et 3*) qui fonctionne comme une membrane sur les parois du forage ;
- la **surpression positive induite par le fluide stabilisateur** (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 – courbe de couleur orange), lorsque le cake est formé ou que les pores du terrain sont très petits (*Notes 2, 3 et 4*), qui maintient une stabilité, continue lors du forage.

Note 1 : l'article 8.2.4.5 de la norme NF EN 1536+A1 précise que « le niveau du fluide stabilisateur doit être tel que, à tout instant, une pression interne soit appliquée afin de maintenir la stabilité des parois et empêcher la migration des particules de sol dans le forage ». Ainsi pour que le cake se forme, la pression du fluide stabilisateur dans le forage doit être supérieure à la pression interstitielle dans le terrain de manière à ce que la filtration de la suspension minérale se produise (Figure 3.77). Le niveau de la suspension du fluide stabilisateur doit être maintenu à au moins 1,5 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique ($\Delta h \geq 1,5$ m sur la Figure 3.77 et cf. aussi l'article 8.2.4.6 de la norme NF EN 1536+A1 qui précise également dans une note à cet article qu'il peut être nécessaire d'augmenter le niveau de fluide stabilisateur en cas de sables lâches ou mous).

Note 2 : lorsque les pores du sol sont trop importants, le cake ne peut pas se former et il faut trouver une autre solution pour la tenue des parois. Pour des cas courants, les particules d'argile s'accumulent dans les pores, conduisant ainsi à leur colmatage au moins en partie, et donc à une réduction de leur diamètre assurant ainsi la tenue des parois de forage [3.2]. Puis la surpression exercée par le fluide stabilisateur sur ces parois colmatées conduit à l'accumulation de particules minérales constituant ainsi le cake grâce au phénomène de filtration (concentration des particules par expulsion de l'eau libre).

Note 3 : dans les sols peu perméables, il n'y a pas colmatage (les pores étant très petits) mais le cake se forme, ce qui n'est pas le cas dans les sols très peu perméables (argile) où seule la pression du fluide stabilisateur agit.

Note 4 : une fois le cake étanche sur les parois du forage, l'infiltration des particules d'argile dans le sol et leur dépôt s'arrêtent. Tant que le cake n'est pas étanche, la filtration continue provoquant un épaissement du cake et des pertes d'eau du fluide stabilisateur pouvant conduire à des défauts lors du bétonnage. Le filtrat et le cake sont, de ce fait, mesurés pour vérifier que la suspension minérale est bien adaptée et ne conduira pas à ce type de pathologie.

Le cake et le filtrat

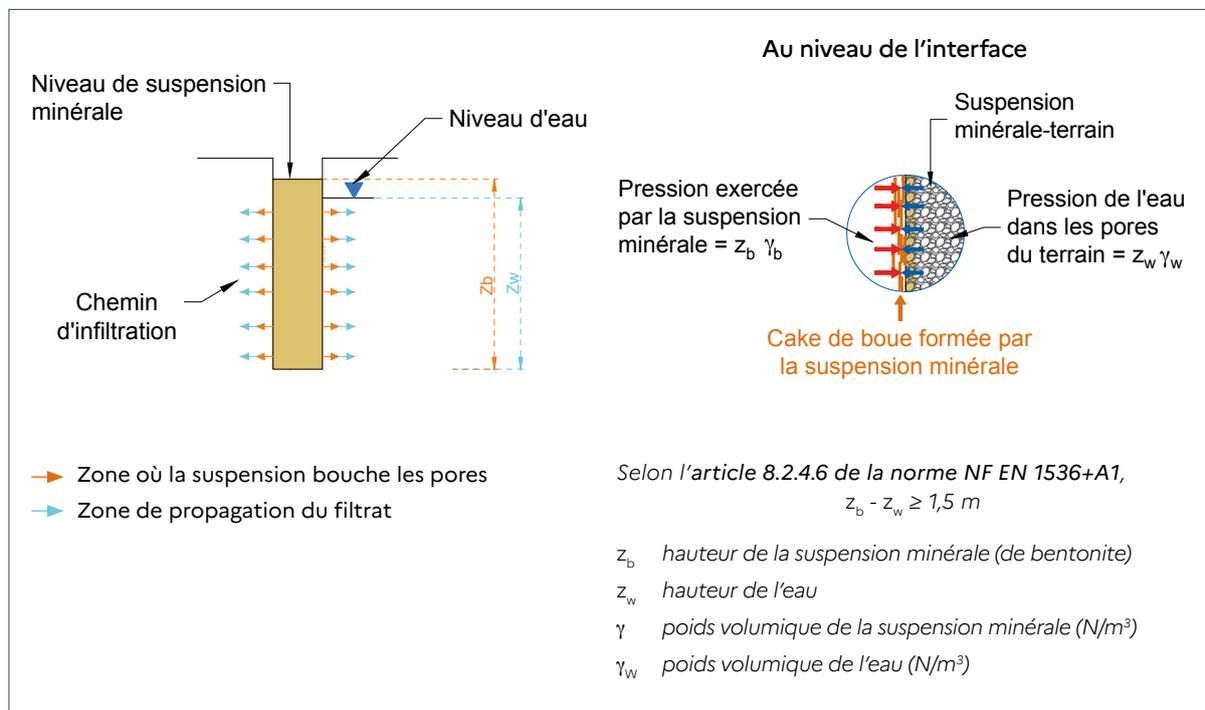
Lorsque la suspension minérale vient colmater les pores du terrain et que le cake se forme, il y a filtration de la suspension qui concentre ses particules dans le colmatage et le cake en expulsant son eau vers le sol. Cette eau expulsée constitue le filtrat.

La mesure de l'épaisseur du cake et du filtrat par l'essai au filtre-presse (cf. Annexe 3.1.5) sont nécessaires pour vérifier la formation d'un cake et que ce dernier ne soit pas trop épais (*Note*).

Il est possible de modifier les caractéristiques de la suspension minérale afin d'améliorer le pouvoir colmatant de la suspension minérale par des ajouts (cf. Tableau 3.8 dans le § 4.3.6.2).

Note : une épaisseur trop importante du cake conduit à une réduction de la section de béton mis en place et à une réduction du frottement latéral sol-béton.

Figure 3.78 : Stabilisation des parois du forage par la formation du cake et la mise en œuvre d'une pression supérieure à celle de l'eau du sol dans le cas des suspensions minérales (de bentonite) (inspirée de [3.2])



4.2.1.3 - Limites d'utilisation des suspensions minérales

L'utilisation de la bentonite (*Note*) est :

- **déconseillée telle quelle en présence de sel**, si l'eau de fabrication est saline ou dans un contexte maritime. L'utilisation de la bentonite doit faire l'objet d'un suivi et d'un traitement particulier en milieu salin. Dans ce cas, on peut avoir recours à des fluides stabilisateurs spécifiques composés, par exemple de bentonites dopées aux polymères ou d'attapulgite et de sépiolite ;
- **à surveiller en cas de contact avec le ciment** simple car l'hydratation du ciment libère des ions calcium, ce qui réduit l'efficacité de la suspension minérale. En cas de contact important comme la traversée d'anciens vides de carrières préalablement de sablon-ciment, il faut pouvoir justifier d'un traitement efficace du fluide stabilisateur pour lutter contre la contamination ou avoir recours à une autre solution ou encore à une suspension minérale dopée en polymères et adaptée à ce cas de figure ;
- **incertaine en présence de circulation d'eau** importante pouvant venir perturber ou détruire le cake.

Note : on rappelle que les fluides stabilisateurs à base de bentonite représentent les suspensions minérales de forage plus communément utilisées. Les autres minéraux d'argile pouvant constituer une suspension minérale ne se comportent pas tout à fait comme la bentonite et les recommandations relatives à cette dernière peuvent ne pas s'appliquer.

4.2.2 - LES SOLUTIONS DE POLYMÈRES

S'agissant d'une technique pour l'instant peu utilisée en France, il n'existe pas (ou peu) de recommandations françaises concernant l'utilisation des polymères. Ainsi, les parties en lien avec les polymères sont pour beaucoup basées sur les références américaines et anglaises suivantes : les guides de l'EFFC/DFI [3.1], la FHWA [3.2] et l'ICE [3.4].

4.2.2.1 - Composition des solutions de polymères utilisées pour les pieux forés

Les polymères synthétiques utilisés comme fluide stabilisateur pour pieux forés

Il existe un très grand nombre de polymères envisageables en tant que fluides stabilisateurs ou en tant qu'ajouts. Les polymères synthétiques, qui sont les plus utilisés pour les pieux forés, peuvent être divisés en deux catégories :

- les polyacrylamides partiellement hydrolysés ou copolymères acrylamides, notés **PHPA** ;
- une seconde famille correspondant à une combinaison de molécules d'acrylamide avec d'autres composés chimiques, qui ne rassemblent que des produits brevetés dont la composition et donc les caractéristiques sont connues uniquement par les fabricants.

Les polymères de type carboxyméthylcellulose (CMC) sont des polymères naturels modifiés⁽²⁷⁾, plus généralement utilisés pour le forage de barrettes avec utilisation de la haveuse (§ 3.2.4.3 et Note) ou dans les mélanges bentonites-polymères.

La solution de polymères peut être réalisée à partir d'un seul type ou d'un mélange de polymères.

Note : en effet, les solutions de polymères de type CMC supportent bien la circulation inverse et le traitement mécanique que doit subir le fluide pour sa réutilisation, à l'instar des suspensions de bentonite (par opposition aux polymères PHPA).

Choix du polymère

Pour un site donné, plusieurs solutions peuvent être adaptées. L'entreprise en charge de la réalisation des pieux forés doit faire appel à un représentant technique du fournisseur en polymère (ou une personne compétente) pour déterminer la formulation de la solution de polymères la plus adaptée au sol, à l'éventuelle nappe et aux problématiques rencontrées. Il faut aussi regarder l'outil de forage, car certains peuvent ne pas convenir à l'utilisation de certaines solutions de polymères.

Avantages des polymères synthétiques PHPA

Les polymères synthétiques PHPA recommandés pour le forage sont chargés négativement, ce qui permet de favoriser l'agglomération des particules de sol et de limiter la montée en densité de ces fluides. L'effet d'agglomération favorise la sédimentation des particules et l'opération de nettoyage du fluide préalable au bétonnage de la fondation. Ils fonctionnent relativement bien lors de l'utilisation pour le forage, par exemple, de godets (§ 3.2.3.2) mais ne sont pas appropriés pour l'usage des haveuses (§ 3.2.4.3) dont le processus met en œuvre des pompes centrifuges qui viennent casser les chaînes de polymères et dégrader la viscosité du fluide et son efficacité.

4.2.2.2 - Principe de fonctionnement des solutions de polymères

Rôles des solutions de polymères

Les solutions de polymères sont utilisées pour tenir les parois de l'excavation et présentent une bonne capacité à réduire le gonflement des argiles [3.1].

27. Polymères naturels modifiés : « naturels » car la base est la cellulose, « modifiés » car la cellulose subit une réaction chimique pour obtenir la CMC.

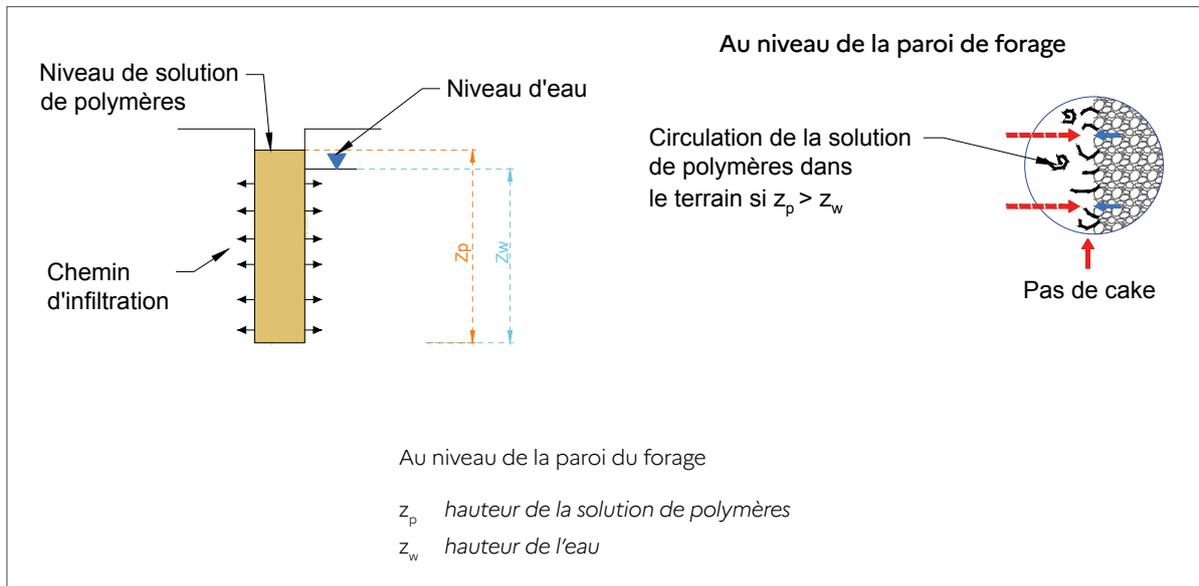
Deux mécanismes possibles selon les polymères

Deux mécanismes pour maintenir les parois de forage sont possibles selon la nature des polymères :

- **les carboxyméthylcelluloses (CMC)** vont avoir un mécanisme proche de celui de la bentonite, c'est-à-dire que les particules polymères vont former une membrane le long de la paroi de forage, limiter la perte de fluide et appliquer une pression positive sur la paroi supérieure à la pression hydrostatique de la nappe phréatique. Selon la FHWA [3.2], ce type de polymères est surtout considéré en tant qu'ajout à la bentonite ;
- **les polyacrylamides partiellement hydrolysés (PHPA)** vont interagir avec les particules de sol, créer des liaisons (forces de traction et de cohésion) et donc renforcer la stabilité (Figure 3.79). Cette force de liaison varie néanmoins fortement en fonction du type de polymères considéré. La solution de polymères va pénétrer dans la formation perméable (sable, limon, roche perméable) avec une vitesse dépendant de la viscosité du fluide et de la perméabilité du terrain (relativement faible pour les sols argileux mais pouvant être considérable pour les sables grossiers ou les graviers). Tant que le niveau du fluide dans le forage est supérieur à celui de la nappe (ou à celui de chacune des nappes) phréatique(s) présente(s) dans le sol, la paroi de forage est stable. Pendant le forage, les longues chaînes polymères (PHPA) vont s'enrouler autour des particules d'argile et de limon. Ces particules agglomérées vont s'alourdir puis se déposer au fond du forage, cependant certaines particules vont avoir tendance à rester en surface. **Les polymères synthétiques PHPA n'ont pas de rigidité donc ils ne sont pas utilisables dans des sols trop ouverts.**

⚠ Sauf mention contraire, l'appellation « polymère » dans la suite de ce fascicule correspond aux polymères synthétiques PHPA.

Figure 3.79 : Stabilisation des parois de forage par la mise en œuvre d'une pression supérieure à celle de l'eau du sol dans le cas des solutions de polymères (PHPA)
(inspirée de [3.2])



Pas de mise en suspension des particules de sol dans des solutions de polymères

En dehors de l'absence de cake sur les parois de l'excavation, la différence fondamentale qui existe entre polymère et bentonite est que les particules de sol (sable, fines...) ne sont pas en suspension dans la solution de polymères (*Note*) et vont se déposer au fond du forage par sédimentation.

Note : certaines particules peuvent néanmoins temporairement rester en suspension, ou flotter à la surface de la solution de polymères, mais elles finissent par se sédimenter [3.2].

4.2.2.3 - Limites d'utilisation des solutions de polymères

L'utilisation des solutions de polymères est :

- **déconseillée en présence de chlorure de sodium** (par exemple en cas d'eau de mer), si la teneur en chlorure est supérieure à 1 500 ppm (d'après la FHWA [3.2]) **pour les polymères synthétiques PHPA** (Note 1). Dans le cas d'eau saumâtre, le fournisseur de polymères peut proposer des ajouts aux polymères pour que ces solutions puissent être considérées. Les nouvelles formulations de polymères ont tendance à être moins sensibles à la teneur en chlorure ;
- **à surveiller en cas de contact avec le ciment** car l'hydratation du ciment libère des ions calcium, qui vont augmenter fortement la dureté⁽²⁸⁾ de l'eau. Il est donc primordial d'éviter tout contact avec le ciment (Note 2).

Note 1 : selon les cas, les sels peuvent n'avoir une influence que sur la phase d'hydratation, ou aussi dans certains cas sur la viscosité du fluide en endommageant la chaîne de polymères. Dans certaines autres configurations, ils peuvent s'avérer positifs pour le maintien de la viscosité.

Note 2 : les pompes utilisées pour la solution de polymères ne doivent pas avoir été utilisées pour du béton sans avoir été, au préalable, minutieusement lavées. On précise que les pompes centrifuges sont déconseillées pour les polymères et pour certains mélanges bentonite-polymères car elles cassent les molécules.

4.2.3 - L'EAU COMME FLUIDE STABILISATEUR

L'eau comme fluide stabilisateur lors du forage

⚠ **L'eau n'est pas à proprement parler un fluide stabilisateur** ; elle ne vient s'opposer qu'à la pression interstitielle de la nappe et non pas à la poussée du terrain (Note). Elle ne permet pas de former un cake. Elle est **plutôt utilisée pour le forage des pieux que pour celui des barrettes ou des parois moulées**.

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.

Note : comme l'eau n'équilibre pas la poussée du terrain, ce dernier doit être suffisamment cohérent et stable pour assurer la stabilité des parois du forage. L'eau permet d'équilibrer la nappe et d'éviter l'écaillage des parois de forage sous la pression de l'eau interstitielle.

Contextes autorisant l'eau comme fluide stabilisateur

La stabilité à l'eau dépend généralement du diamètre, de la profondeur et de la durée d'ouverture du forage. Il ne peut s'agir que de conditions géotechniques assez exceptionnelles, comme éventuellement :

- **des sols cohérents raides** (en l'absence de fracturations) qui garantissent la stabilité de la paroi ou à l'intérieur d'un tube ;
 - **des sites aquatiques** ;
 - **des sols argileux compressibles et non gonflants** quand le substratum d'ancrage sous-jacent très résistant ne justifie pas la poursuite du forage, ni l'allongement du tube, ni le recours au fluide stabilisateur.
- ⚠ L'utilisation de l'eau comme fluide stabilisateur **doit être validée par un essai de forage au préalable**.
- ⚠ Lorsque l'eau se charge en sédiments pendant le forage, **cette eau doit être dessablée avant bétonnage** pour ne pas créer de défauts lors du bétonnage.

Contextes n'autorisant pas l'eau comme fluide stabilisateur

⚠ Dans les sols sensibles au retrait-gonflement, l'eau peut engendrer un gonflement au niveau des parois du forage, qui vont s'ébouler, créant des dépôts de sol ou même de boue en fond de forage induisant des défauts dans le pieu.

28. La dureté de l'eau est causée par la présence des ions calcium, des ions magnésium ou des deux.

4.2.4 - MÉLANGE BENTONITE ET POLYMÈRES

Avantages du mélange bentonite-polymères

Ces fluides stabilisateurs issus d'un mélange de bentonite et de polymères sont conçus **afin de combiner les avantages des deux éléments**.

On peut différencier **deux types de mélanges bentonite-polymères** :

- **une solution de polymères auquel on ajoute de la bentonite** pour permettre la formation d'un cake, qui lui fait défaut quand il est utilisé seul ;
- **un ajout de polymères en tant qu'addition dans la suspension de bentonite** (*Note*), conduisant à de la bentonite dite « dopée », qui permet d'utiliser une quantité plus faible de bentonite pour une quantité de fluide donnée. Le fluide stabilisateur bentonite-polymères est généralement plus cher, en revanche on en met moins. Il peut paraître à première vue plus économique mais requiert une mise en œuvre plus difficile dont il faut tenir compte dans l'estimation économique. Un mélange bentonite-polymères peut être envisagé dans le cas de terrains agressifs vis-à-vis de la bentonite ou en présence d'eau de mer ou de sols injectés au ciment.

⚠ Cependant, il s'agit d'un domaine qui nécessite une grande expertise.

Note : dans ce cas, les polymères servent à améliorer les propriétés rhéologiques du fluide, à limiter la perte de fluide et à améliorer sa résistance à la pollution chimique [3.1]. Il est recommandé que la quantité de polymères dans ce mélange n'excède pas 5 % du poids de bentonite utilisée.

Les polymères naturels utilisés comme ajout à la bentonite

Certains polymères naturels comme les gommages guar (*Note*) et dérivés, la gomme xanthan [3.1] et les amidons⁽²⁹⁾ sont utilisés en tant qu'ajouts dans la bentonite. Pour différentes raisons, **la plupart des polymères naturels ne sont pas utilisés comme fluide stabilisateur** [3.2].

Note : l'utilisation des gommages guar ou de leurs dérivées, transformant les fluides en gel, est conseillée surtout lorsqu'il y a un risque important de perte de fluide [3.1].

4.3 - CYCLE DE VIE DES FLUIDES STABILISATEURS

Dans cette partie, **le cycle de vie des fluides stabilisateurs est décrit avant, pendant et après le forage**. Elle comprend :

- **le schéma du cycle de vie du fluide stabilisateur** (§ 4.3.1) ;
- **la préparation des fluides stabilisateurs** (§ 4.3.2) et **leurs caractéristiques** nécessaires (§ 4.3.3) ;
- **le pompage des fluides stabilisateurs** (§ 4.3.4) ;
- **le forage** (§ 4.3.5), dont **le contrôle des propriétés des fluides stabilisateurs** (§ 4.3.7), ainsi que **le traitement et le recyclage** de ces derniers (§ 4.3.6) ;
- **la mise en dépôt des fluides stabilisateurs usés non réutilisables** (§ 4.3.8) (*Note*).

Le bétonnage en présence de fluides stabilisateurs est traité dans le § 4.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Un tableau comparatif (Tableau 3.9 dans le § 4.4.1) permet enfin de mettre en exergue les points majeurs ou délicats en lien avec les deux types de fluides stabilisateurs (cf. § 4.4 « Comparaison entre les suspensions de bentonite et les solutions de polymères »).

Note : les fluides stabilisateurs peuvent être non usés et néanmoins non réutilisés.

29. Les amidons pour fluides stabilisateurs sont extraits des pommes de terre, du riz, du maïs, du blé et traités spécialement pour gonfler rapidement [3.6].

4.3.1 - SCHÉMA DE PRINCIPE DU CYCLE DE VIE DES FLUIDES STABILISATEURS

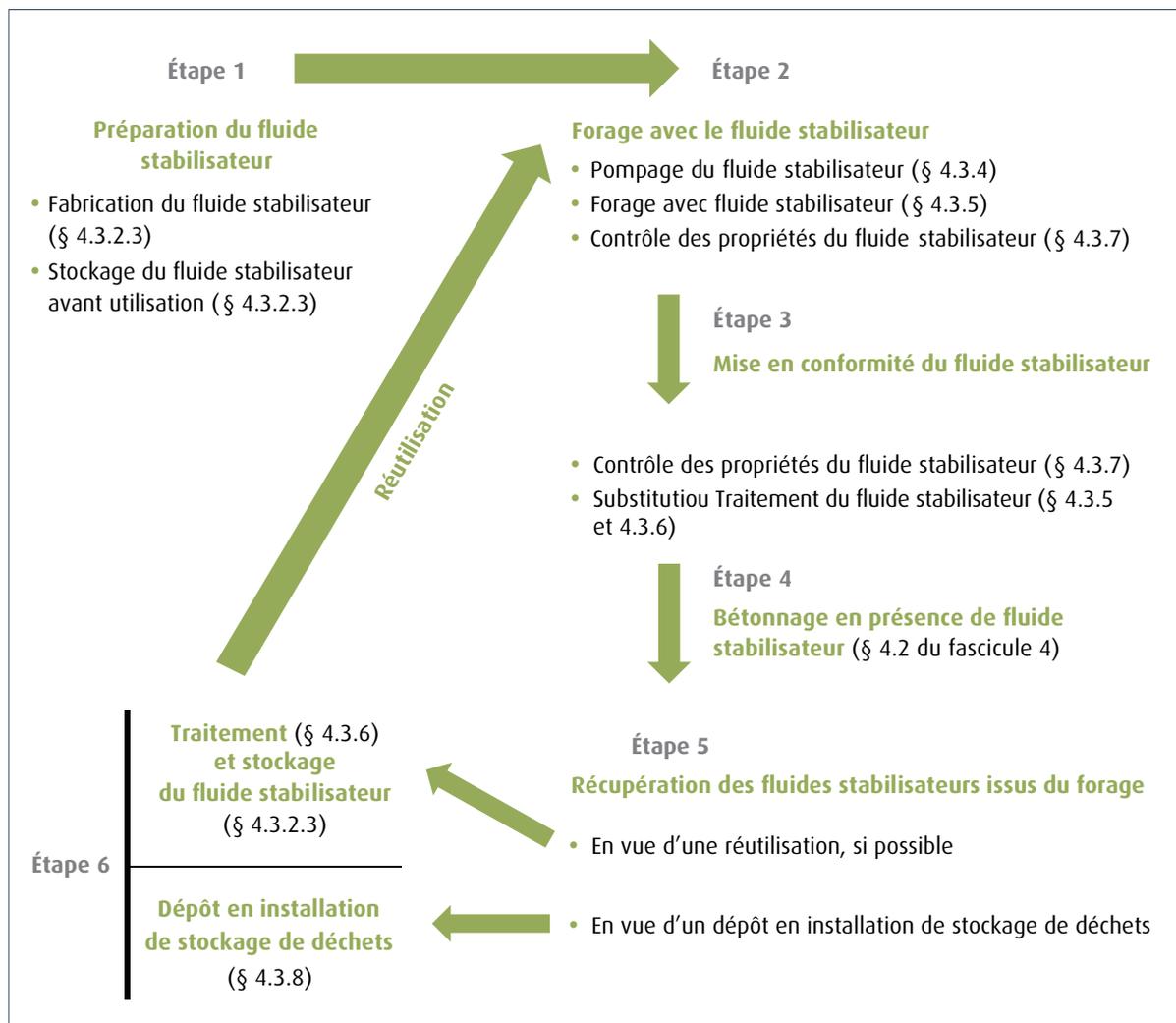
Les fluides stabilisateurs sont :

- **préparés dans une centrale de fabrication de fluides stabilisateurs** où ils peuvent subir des traitements pour répondre au contexte (§ 4.3.2 « Préparation des fluides stabilisateurs ») (*Note*) ;
- **stockés** (cf. « Le stockage de fluides stabilisateurs » dans le § 4.3.2.3 « Les centrales de fluide stabilisateur ») ;
- **pompés** pour être mise en œuvre dans le forage (§ 4.3.4) ;
- **traités si besoin au cours de leur utilisation**, car les fluides stabilisateurs peuvent être contaminés par des éléments présents dans l'eau ou dans les sols traversés (§ 4.3.6.2 et § 4.3.6.3 respectivement pour les suspensions minérales ou les solutions de polymères) ;
- **traités avant bétonnage** (mise en conformité du fluide stabilisateur § 4.2.1 du fascicule 4 « Le bétonnage de spieux forés ») ou substitués par pompage avec un fluide stabilisateur recyclé ou neuf ;
- **pompés hors du forage** pour être recyclés (§ 4.3.6 « Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs ») lors du bétonnage et stockés ou envoyés dans une installation de stockage de déchets en fonction de leurs caractéristiques (§ 4.3.8 « Contrôle des fuites de fluides stabilisateurs et mise en dépôt des fluides stabilisateurs usés »).

Ce cycle de vie des fluides stabilisateurs est résumé sur la Figure 3.80.

Note : le fluide stabilisateur est fabriqué par petites quantités et pendant un certain temps, avant d'avoir un volume suffisant pour le mettre en œuvre dans une excavation. En outre, un délai avant l'utilisation des suspensions minérales doit être laissé pour permettre aux particules minérales de gonfler (cf. « Temps nécessaire avant utilisation des suspensions de bentonite » dans le § 4.3.2.4 « Préparation des suspensions de bentonite »).

Figure 3.80 : Cycle de vie simplifié des suspensions minérales ou des solutions de polymères



4.3.2 - PRÉPARATION DES FLUIDES STABILISATEURS

4.3.2.1 - Principe et importance de la qualité de l'eau et de l'efficacité du mélange

Hydratation comme objectif principal

Le fluide stabilisateur s'obtient généralement en dispersant une masse donnée d'argile et/ou polymères par mètre cube d'eau, parfois avec des additifs (cf. § 4.3.6.2 /4.3.6.3, « Les contaminations et traitements (respectivement) des suspensions minérales/solutions de polymères »).

Les étapes pour la préparation des fluides stabilisateurs

La **préparation des fluides stabilisateurs** (suspension minérale ou solution de polymères) comprend généralement trois étapes [3.1] :

- la **dispersion** (mouillage initial) ;
- l'**hydratation** (avec ou sans mélange à fort cisaillement – *Note*) ;
- la **conservation de l'homogénéité** par une mise en mouvement contrôlé, seulement pour les suspensions minérales.

Note : les polymères PHPA utilisés au moment de la rédaction de ce guide ne tolèrent pas des cisaillements plus ou moins forts, c'est pourquoi les polymères CMC sont utilisés avec les haveuses (cf. § 4.2.2.1 « Composition des solutions de polymères utilisées pour les pieux forés »).

Qualité de l'eau nécessaire pour la préparation des fluides stabilisateurs

L'eau permettant la préparation des fluides stabilisateurs a **une influence majeure sur la qualité et les performances des fluides stabilisateurs**.

L'eau peut provenir :

- de **l'eau potable ou du réseau** (par exemple d'une borne d'incendie...). Son utilisation permet un résultat optimal, mais cela a un coût ;
- **d'une rivière, d'un étang, d'un pompage dans un puits**. L'utilisation de l'eau de la nappe ou de la rivière (*Note 1*) **nécessite de faire un dossier** (déclaration ou autorisation suivant les quantités) **et de réaliser des analyses chimiques** pour déterminer si cette eau convient (cf. « Analyses chimiques à réaliser pour vérifier la qualité de l'eau [...] », ci-après) ou si des traitements chimiques sont nécessaires avant son utilisation, comme en cas de concentrations élevées de calcium et/ou de magnésium (cf. « Les traitements de l'eau pour les suspensions de bentonite » ci-après) ;
- de **l'eau de mer**. L'utilisation de l'eau salée est à proscrire sans précautions (*Note 2*).

Note 1 : en pratique, il s'agit généralement de cas de gros chantiers ou de chantiers loin de réseaux d'eau potable disponibles.

Note 2 : dans ce cas, il faut utiliser des fluides stabilisateurs spécifiques⁽³⁰⁾ telles que l'attapulgite et la sépiolite⁽³¹⁾ qui ne flocculent pas dans l'eau salée et/ou un fort dosage en polymères.

Analyses chimiques à réaliser pour vérifier la qualité de l'eau en cas de non-utilisation d'eau potable

Lorsque l'eau utilisée dans la préparation du fluide stabilisateur n'est **pas de l'eau du réseau potable**, il convient, afin de vérifier si l'eau est adaptée ou s'il faut la traiter, **de réaliser les analyses chimiques suivantes** :

- le **pH** (*Note*) ;
- la **dureté** (teneur en ions calcium et magnésium) ;
- la **teneur en sel** ;
- la **présence de chlorure ou autres contaminants** (métaux lourds, hydrocarbures, ciment...).

Note : lorsque le pH est inférieur à 6,5 ou supérieur à 11,5, il faudra prévoir un traitement de l'eau ou un dosage accru de polymères [3.1].

30. Ces fluides stabilisateurs disposent d'une forte stabilité colloïdale dans les saumures saturées.

31. Les suspensions minérales constituées à partir de ces minéraux peuvent présenter un comportement différent de la suspension de bentonite.

Influence de la qualité de l'eau pour les suspensions de bentonite

La présence de calcium ou de magnésium (dureté de l'eau) dans l'eau potable inhibe l'hydratation de la bentonite, ce qui peut être facilement corrigé par un traitement chimique simple, mais ce dernier ne doit pas être surdosé sous peine d'empêcher une bonne hydratation.

Les traitements possibles de l'eau pour les suspensions de bentonite

L'ajout de carbonate de soude fait précipiter le calcium en carbonate de calcium.

L'hydroxyde de sodium (soude caustique – NaOH) peut être utilisé, avec certaines mesures de sécurité (Note 1) :

- pour traiter le magnésium ;
- pour augmenter l'alcalinité des suspensions de bentonite permettant une hydratation plus importante de la bentonite (Note 2).

Note 1 : elle doit être manipulée avec précaution, car elle est corrosive pour la peau et les yeux, et ne doit pas être ingérée.

Note 2 : lorsque l'eau est trop acide, une autre solution consiste à surdoser la quantité de bentonite afin d'atteindre, entre autres, la viscosité désirée au cône de Marsh (en s'hydratant les particules de bentonite gonflent et le fluide stabilisateur devient de ce fait moins fluide. Un surdosage en bentonite permet de diminuer la fluidité de la suspension de bentonite faite avec de l'eau trop acide).

Influence de la qualité de l'eau pour la préparation des solutions de polymères

La dureté de l'eau utilisée pour la préparation de solutions de polymères influence la quantité de polymères à utiliser pour obtenir la viscosité visée ; plus l'eau est dure et plus il faudra de polymères.

En cas d'usage d'eau ne venant pas du réseau, il convient de tenir compte de la présence d'éventuelles matières organiques ou de contaminants.

Les sels présents dans l'eau pour la préparation des fluides stabilisateurs ou dans le terrain, peuvent influencer le processus d'hydratation et endommager les chaînes de polymères dans le temps.

Il est difficile, même en présence d'analyse chimique de l'eau, de savoir si elle va convenir à la préparation de la solution de polymères. Il convient généralement de fournir un échantillon d'eau au fournisseur de polymères afin qu'il définisse la concentration de polymères requise pour obtenir la viscosité visée.

Importance de l'efficacité du mélange

Un système de mélange efficace doit permettre d'activer toutes les matières premières en donnant un bon rapport coût-efficacité tant pour la matière première que pour le temps de mélange. L'efficacité du mélange dépend du contact initial entre la matière première et l'eau ; il convient donc d'éviter de verser de grandes quantités de matières premières sous peine de développement d'amas non hydratés. Un fluide stabilisateur, dont le mélange initial n'a pas été correctement hydraté, n'atteindra jamais les propriétés d'un fluide dont le mélange aura permis une meilleure hydratation [3.1].

Pour la préparation spécifique des suspensions de bentonite ou des solutions de polymères, on pourra consulter respectivement le § 4.3.2.4 et le § 4.3.2.5.

Influence de la température dans l'hydratation des fluides stabilisateurs

La température a une influence sur la préparation des fluides stabilisateurs :

- pour la suspension minérale, elle est un facteur important dans son hydratation ;
- pour la solution de polymères, le temps nécessaire pour qu'elle soit utilisable après sa préparation va dépendre de la température et de la qualité de l'eau de préparation. Ainsi l'hydratation complète de polymères sous forme de poudre peut prendre entre 30 minutes et 1 heure en fonction de la température et de la qualité de l'eau [3.1].

4.3.2.2 - Conditionnement des minéraux argileux ou polymères

Conditionnement des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont majoritairement conditionnés sous forme de poudre (Figure 3.81).

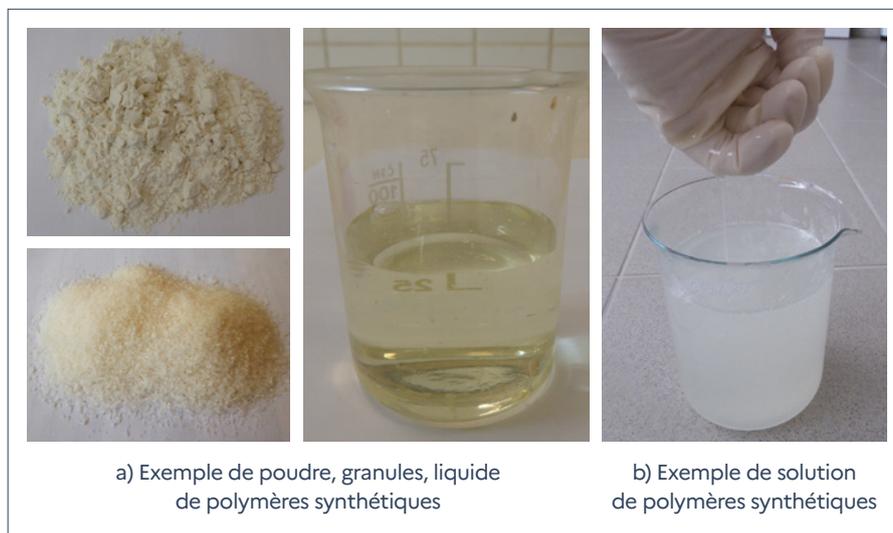
Figure 3.81 : Préparation de la suspension de bentonite



Conditionnement des polymères et formules chimiques variées

Les polymères vendus peuvent avoir **des formats variés** (Figure 3.82) : poudre sèche, granules, liquide (émulsion). La formule chimique des molécules d'hydrocarbure est elle aussi variable : masse des molécules, leur longueur, leur densité de charge de surface.

Figure 3.82 : Préparation de solution de polymères synthétiques



4.3.2.3 - Les centrales de fluide stabilisateur

Rôle et constitution des centrales de fluides stabilisateurs

Les centrales de fluides stabilisateurs permettent à la fois de **les fabriquer, les stocker et les recycler**.

La centrale de fluides stabilisateurs (Figure 3.83) est constituée :

- **d'une unité de préparation ou de fabrication**, permettant le mélange minéraux-eau ou polymères-eau (*Note*). Cette unité comprend :
 - des silos de stockage de matière première ou une aire de stockage pour les petites quantités livrées en sac (Figure 3.83.c),

- un malaxeur à haute turbulence⁽³²⁾ (Figure 3.86.b dans le § 4.3.2.4) généralement pour les suspensions minérales ou un venturi⁽³³⁾ (Figure 3.86.a) pour les solutions de polymères,
- des silos ou des cuves métalliques ou des bacs souples à ossature métallique ou des bassins pour le stockage du fluide stabilisateur neuf (Figure 3.83.d) (cf. ci-après « Le stockage de fluides stabilisateurs »);
- de bassins/silos recevant le fluide stabilisateur utilisé lors du forage ;
- d'une unité de traitement composée d'un dessableur et parfois d'un dessilteur, présentée ci-après dans « Dessableur et dessilteur pour traiter mécaniquement les suspensions minérales » (Figure 3.83.e) ;
- de bassins/silos de stockage de fluides stabilisateurs recyclés, permettant d'entreposer ce fluide qui sera remis dans le circuit d'alimentation du forage.

Note : les solutions de polymères de type PHPA à haut poids moléculaire ne peuvent être traitées via les systèmes de traitement adaptés aux suspensions minérales, car le mélange énergétique dans les hydrocyclones va casser les chaînes polymères. Les polymères ont donc tendance à encrasser la centrale de traitement.

Le stockage de fluides stabilisateurs

La forme et la géométrie des réservoirs de stockage (Figure 3.83.a) dépendent de la surface disponible en fonction de l'emplacement du chantier. Il est préférable que leur fond soit incliné.

Leur capacité de stockage dépend du volume des différents éléments de fondation à réaliser, ainsi que de la méthode et de la vitesse de construction [3.1].

Les réservoirs de stockage des suspensions minérales doivent comporter des pales mobiles ou des agitateurs pour empêcher la sédimentation des produits minéraux en suspension. Ceux pour les solutions de polymères peuvent comprendre des systèmes servant à la conservation de l'homogénéité du mélange [3.1].

Dessableur et dessilteur pour traiter les suspensions minérales

Pendant son utilisation dans le forage, le fluide stabilisateur se charge de particules en suspension et doit être allégé avant de pouvoir être réutilisé dans le forage (les caractéristiques attendues sont présentées dans le § 4.3.3). Parmi ces traitements se trouve le retrait des particules de grossières à fines (« dessablage ») ou d'éléments très fins (« dessiltage ») (Figure 3.84) :

- la succession des systèmes de dessablage :
 - pour se débarrasser des plus grosses particules, le fluide stabilisateur est passé au travers d'un tamis vibrant,
 - séparation des particules de la taille des grains de sable de la suspension par un hydrocyclone⁽³⁴⁾ (Figure 3.85). Certains systèmes comprennent un second hydrocyclone⁽³⁵⁾, voire un troisième plus petits (*Note*) ;
- le nombre nécessaire d'itérations du processus de dessablage : la capacité de dessablage des hydrocyclones est réduite en raison de l'augmentation de la masse volumique et de la viscosité (provoquée par les particules en suspension), ce qui peut nécessiter deux à trois passages pour obtenir une suspension recyclée ayant une concentration de particules en suspension adéquate.

Note : après dessablage, il est possible que la suspension contienne des particules de la taille de limon ou d'argile qui augmentent la densité du fluide. Si la concentration de particules fines dans la suspension minérale devient trop élevée, il est possible de filtrer ces particules à l'aide d'un « dessilteur » ou d'un système centrifuge. Cette dernière solution est relativement chère mais reste préférable à la mise en installation de stockage de déchets d'une très grande quantité de fluide stabilisateur usé.

32. Afin d'obtenir un bon malaxage, il faut considérer une énergie de malaxage (malaxeur à haute turbulence) et un temps de malaxage suffisants.

33. Attention, le venturi disperse mais ne malaxe pas à proprement dit, ce qui peut se révéler insuffisant pour une préparation adéquate d'une suspension minérale.

34. De la taille de l'hydrocyclone dépend son débit nominal et la taille des particules qu'il peut évacuer du fluide.

35. Plus l'hydrocyclone est petit, plus le débit est faible et plus la taille des particules traitées est réduite.

Figure 3.83 : Installation d'une centrale de fluide stabilisateur sur un chantier

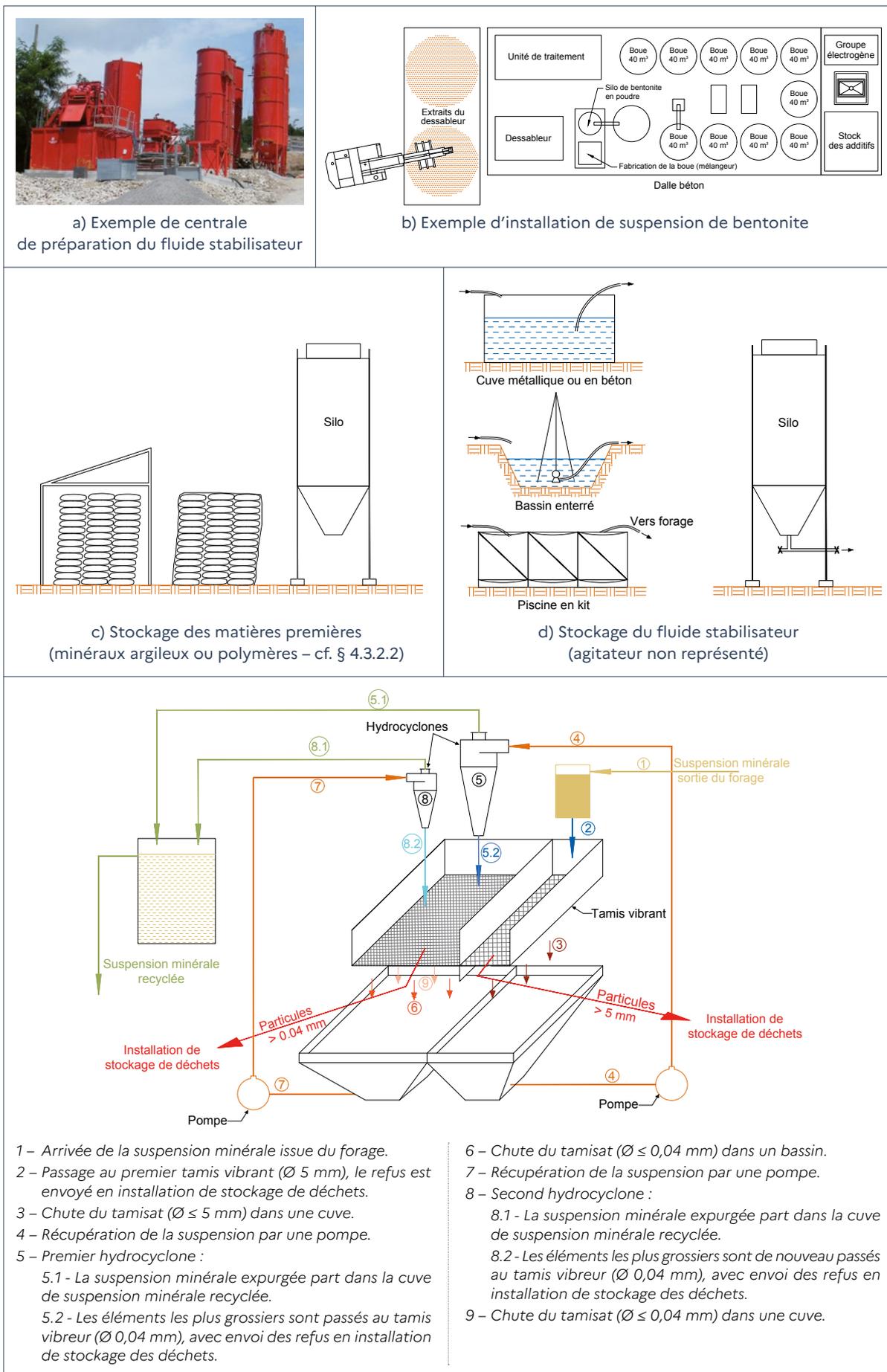


Figure 3.84 : Tailles des particules et équipements de traitement mécanique associés
(d'après un schéma de l'EFFC/DFI [3.1])

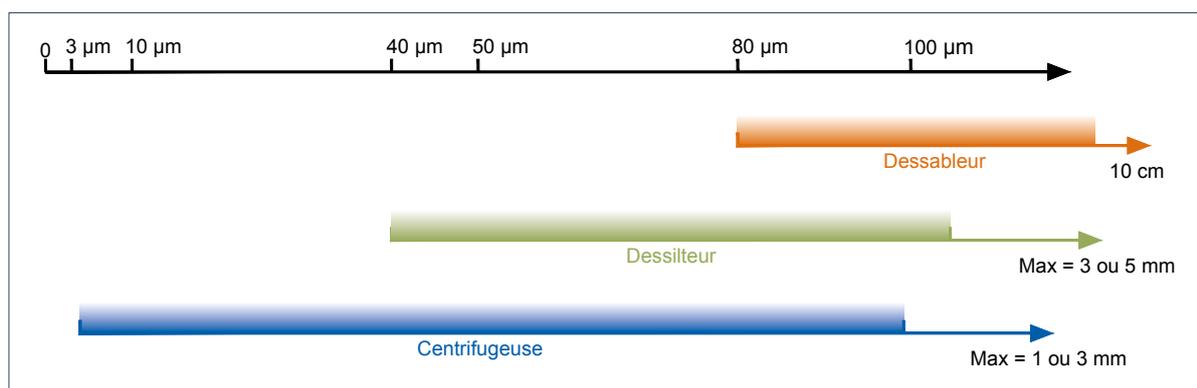
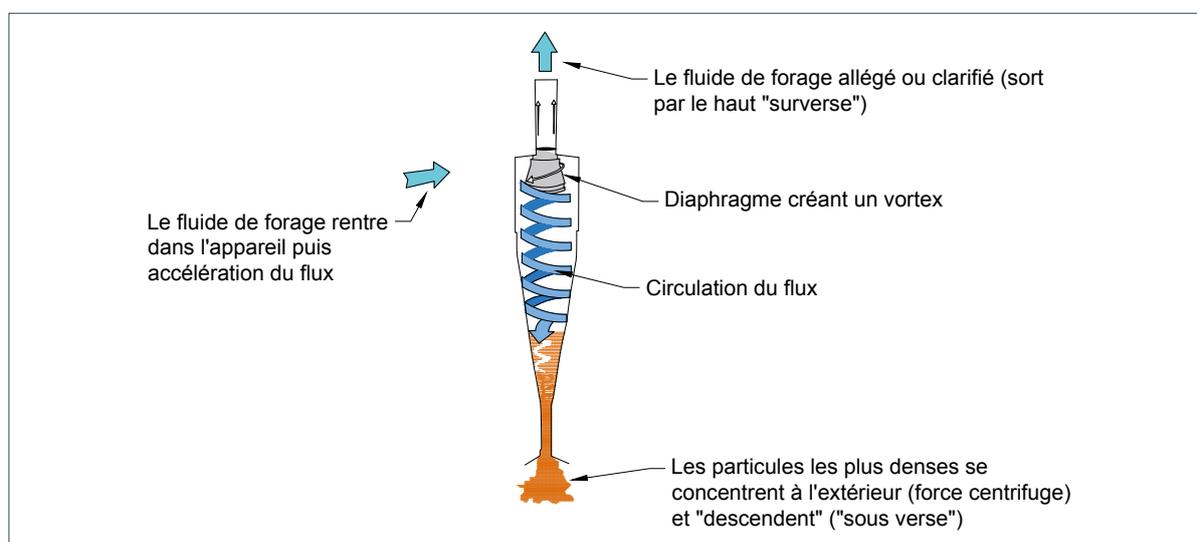


Figure 3.85 : Principe d'un hydrocyclone (schéma de principe)



Stockage des ajouts

Les ajouts doivent être stockés dans **des réservoirs étanches, surélevés par rapport au sol ou dans des silos étanches** afin d'éviter toute contamination des matériaux. Ce stockage doit être fait dans **le respect des règlements concernant le contrôle des pertes dans l'environnement.**

Quantité de fluide stabilisateur devant être disponible

L'article 8.2.4.8 de la norme NF EN 1536+A1 préconise un stockage adéquat en fluide stabilisateur devant toujours être disponible pour pourvoir à une consommation régulière et à toute perte possible de fluide dans les terrains. Il faudra adapter ce volume à celui total des éléments de fondation ouverts en même temps et au choix de gestion du fluide stabilisateur (attente du dessablage du fluide stabilisateur ou dessablage en temps masqué obligeant à avoir du fluide stabilisateur « propre » disponible en assez grande quantité de manière à faire tampon).

4.3.2.4 - Préparation des suspensions de bentonite

Principe de préparation des suspensions de bentonite

Lorsque la suspension de bentonite est préparée, l'objectif majeur est d'**atteindre une hydratation maximale de la bentonite**. Après leur dispersion dans l'eau, les particules de bentonite absorbent l'eau et gonflent. Cette absorption prenant un certain temps, **un délai est nécessaire avant son utilisation** (cf. ci-après « Temps nécessaire avant utilisation des suspensions de bentonite »). La température de l'eau est également un facteur important pour la durée de l'hydratation.

Équipement pour la préparation de la suspension de bentonite

La suspension de bentonite est généralement préparée dans une installation spécialisée comprenant un mélangeur à haut cisaillement, des réservoirs d'hydratation et un système de recirculation du fluide [3.1].

La suspension de bentonite peut être **préparée par lots ou par un processus en continu** en fonction du type d'équipement disponible.

L'équipement doit permettre la dispersion complète de toutes les particules de bentonite (approvisionnée sous forme de poudre – Figure 3.81 dans le § 4.3.2.2) dans l'eau afin de s'assurer que toutes les particules soient hydratées et ne forment pas un amas partiellement hydraté. En général, la bentonite est ajoutée à l'aide d'un **système venturi⁽³⁶⁾ ou directement dans un malaxeur haute turbulence** (Figure 3.86).

Paramètres à considérer pour une préparation optimale

Les paramètres à prendre en compte afin d'obtenir un mélange optimal de l'eau avec la bentonite sont [3.1] :

- **la qualité de l'eau** (pH, sels dissous) (cf. § 4.3.2.1 « Principe et importance de la qualité de l'eau et de l'efficacité du mélange ») ;
- **le temps de mélange** (cela a un impact sur la dispersion des particules d'argile, ce qui affecte l'hydratation initiale et le développement des propriétés des suspensions de bentonite) ;
- **l'énergie du cisaillement** pour assurer la dispersion des particules (cf. ci-après) ;
- **l'agitation de la suspension** de bentonite dans les réservoirs (surtout au début de l'hydratation).

Importance de l'efficacité du système de mélange dans la préparation des suspensions de bentonite

Les propriétés initiales de la suspension vont dépendre fortement de l'efficacité du système de mélange ; **plus l'agitation est forte et le temps de malaxage long, plus la viscosité est élevée.**

La plupart des mélangeurs pour la préparation des suspensions de bentonite sont à haut cisaillement ; d'autres méthodes peuvent être utilisées comme celles décrites pour la préparation des solutions de polymères [3.1].

Figure 3.86 : Matériels pour mélanger la suspension de bentonite lors de sa préparation



Concentration de bentonite dans l'eau

La quantité de bentonite à ajouter dans l'eau dépend de la qualité de la bentonite, du pH de l'eau (cf. « Les traitements possibles de l'eau pour les suspensions de bentonite » dans le § 4.3.2.1), **ainsi que de la viscosité recherchée** (cf. § 4.3.3.1 « Caractéristiques des suspensions minérales »). En moyenne, une masse de 20 à 60 kg de poudre de bentonite (souvent autour de 30 kg) est utilisée pour un mètre cube d'eau.

Les informations pour le mélange de la bentonite avec l'eau indiquées par le fournisseur proviennent d'une préparation en laboratoire à partir d'eau déminéralisée, de ce fait il convient de tester et au besoin d'adapter le mélange sur chantier pour obtenir la viscosité ainsi que les autres propriétés désirées (cf. § 4.3.3.1).

⚠ Un sous-dosage de poudre de bentonite dans l'eau rendrait la suspension de bentonite totalement inefficace pour maintenir la stabilité du forage.

36. Le système venturi ne malaxe pas à proprement dit, prenant ainsi le risque d'une mauvaise hydratation des argiles induisant de faibles performances du fluide stabilisateur.

Temps nécessaire avant utilisation des suspensions de bentonite

Les propriétés rhéologiques de la suspension de bentonite atteignent leur valeur cible quelques heures après le mélange. Le temps d'hydratation est fonction du type de bentonite, de la température, du pH de l'eau, de l'efficacité du système de mélange. Le taux d'hydratation peut évoluer pendant plusieurs heures.

La suspension est entreposée généralement pendant 12 heures (*Note*) avant d'être utilisée mais si nécessaire, elle peut être employée directement si les propriétés attendues (cf. § 4.3.3) sont obtenues. Comme écrit précédemment, **pour une utilisation immédiate**, il faut surdoser en bentonite de façon que, même si les particules sont moins hydratées, la suspension atteigne la viscosité désirée.

Ce délai entre la préparation et l'utilisation des suspensions de bentonite met en évidence la nécessité des réservoirs de stockage du fluide stabilisateur.

Note : le délai avant l'utilisation de la suspension de bentonite peut varier entre 4 et 24 heures [3.1].

4.3.2.5 - Préparation des solutions de polymères

Équipement pour la préparation des solutions de polymères

Les méthodes de préparation des fluides à base de polymères peuvent varier et le fournisseur doit être consulté pour obtenir les recommandations nécessaires.

Généralement les polymères sous forme sèche doivent être dispersés dans une eau mouvante pour éviter la formation de grumeaux. Ces grumeaux peuvent être évités en :

- sélectionnant les équipements de mélange appropriés (bec disperseur, système venturi – Figure 3.86.a dans le § 4.3.2.4) ;
- utilisant des polymères enrobés de produits chimiques hydrophobes évitant la formation de grumeaux. Le produit peut se trouver sous forme d'émulsion polymères-eau-huile qui se disperse presque instantanément dans l'eau sans risque de grumeaux.

Les polymères synthétiques PHPA émulsionnés peuvent être mélangés par circulation entre réservoirs.

Nota bene : Un mélange avec fort cisaillement est absolument à proscrire car il engendre la découpe des longues chaînes de molécules ce qui rend la solution de polymères inefficace.

Importance de l'efficacité du système de mélange dans la préparation des solutions de polymères

Il existe de nombreux types de mélangeurs pour les polymères et en raison de la grande diversité des polymères, il est préférable que le fournisseur indique le type d'équipement adapté à son produit [3.1].

Concentration de polymères dans l'eau

Les polymères sont utilisés à une concentration beaucoup plus faible que la bentonite.

Les polymères naturels modifiés sont utilisés à une concentration de 1,5 à 5 kg/m³, et sont préparés de la même manière que la suspension de bentonite [3.1].

Pour les polymères synthétiques PHPA, une concentration de 0,5 à 2 kg/m³ est suffisante [3.1].

Temps nécessaire avant utilisation des solutions de polymères

Si le polymère est sous forme de poudre sèche, son hydratation complète prend de 30 minutes à 1 heure selon la température et la qualité de l'eau d'appoint [3.1]. Les solutions de polymères peuvent être utilisées immédiatement après leur préparation.

4.3.2.6 - Préparation des mélanges bentonite et polymères

Le mélange bentonite-polymères peut se faire :

- sur chantier, auquel cas il nécessite la présence d'un spécialiste sur site disposant de l'expérience et de la connaissance nécessaires pour déterminer les caractéristiques techniques appropriées ainsi que les procédures de suivi (contrôle, qualité...) pour les conditions spécifiques du site. Le polymère utilisé dans ce cas est en général le CMC (carboxyméthylcellulose) ;
- à partir de produits prêts à l'emploi vendus en tant que bentonite dopée. Les propriétés des bentonites dopées dépendent fortement du type de polymères utilisé. Il est donc primordial de travailler étroitement avec le fournisseur de bentonite pour comprendre la composition et le comportement d'un tel fluide stabilisateur.

4.3.3 - CARACTÉRISTIQUES ATTENDUES DES FLUIDES STABILISATEURS

4.3.3.1 - Caractéristiques des suspensions minérales

Caractéristiques attendues des suspensions minérales

Les suspensions minérales (*Note*) ont des propriétés physiques et chimiques assez variables. Elles doivent néanmoins permettre d'accomplir les tâches suivantes :

- **maintenir les parois de forage** en exerçant une pression hydrostatique sur les parois ;
- **rester dans le forage** (c'est-à-dire limiter leur infiltration dans le sol) ;
- **mettre en suspension les sédiments** et prévenir la formation d'une couche de sédiments à la base du forage ;
- **permettre le remplacement du fluide stabilisateur par le béton**, sans mélange entre les deux ;
- **être traitables et réutilisables** ;
- **permettre un pompage** aisé du fluide stabilisateur, c'est-à-dire que sous agitation la fluidité de la suspension est telle qu'elle permet son pompage.

Note : les suspensions de bentonite sont les plus utilisées, et de ce fait celles qui bénéficient d'un plus grand retour d'expérience.

Les différentes propriétés des suspensions de bentonite et leur fonction

Les différentes propriétés à contrôler pour les suspensions de bentonite sont présentées ci-après et les valeurs visées sont récapitulées dans le Tableau 3.6 (cf. § 4.3.3.3) en distinguant les suspensions minérales neuves, pendant le forage, et en cas de réutilisation (*Note 1*) :

- **la masse volumique des suspensions de bentonite** (cf. Annexe 3.1.1), qui participe lorsqu'elle est suffisante à maintenir les parois du forage ;
- **la viscosité des suspensions de bentonite** (évaluée par la viscosité Marsh – cf. Annexe 3.1.2) qui doit être :
 - lors du forage, suffisante pour permettre le colmatage du terrain et la constitution du cake sur toute la hauteur du forage,
 - avant bétonnage, suffisamment faible (grâce au dessablage) pour permettre au béton de chasser la suspension ;
- **la résistance au cisaillement des suspensions de bentonite** (cf. Annexe 3.1.6). La suspension se présente sous forme de gel lorsqu'elle est au repos et sous l'action du cisaillement elle se fluidifie :
 - la suspension **sous forme liquide** permet de transporter des solides, par exemple dans les méthodes de forage par circulation directe ou inverse (cf. § 4.3.5.5 « Technique de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage »), où le sol est transporté à la surface par le mécanisme de suspension dans le fluide stabilisateur,
 - la suspension **sous forme de gel** sert à la stabilité du forage et à la réduction de la pénétration dans le sol, mais aussi à maintenir une faible proportion de sol en suspension ;
- **le pH des suspensions de bentonite** (cf. Annexe 3.1.3) représente un indicateur de la « bonne santé » du fluide stabilisateur et **doit donc être mesuré régulièrement**. Il intervient de différentes façons :
 - lorsqu'il est trop basique ou trop acide, il peut engendrer la floculation,
 - il est révélateur d'une potentielle contamination de la suspension par les sols ou par les eaux souterraines (formations gypseuses, eaux salées...) ; ainsi un fluide stabilisateur trop acide peut signifier la présence excessive de cations,
 - il peut interagir avec les propriétés des sols en place ; par exemple, certaines marnes gonflantes ne peuvent s'hydrater qu'en présence d'une eau fortement basique ;
- **la teneur en sable des suspensions de bentonite** (éléments supérieurs à 74 μm ⁽³⁷⁾ – cf. Annexe 3.1.4) 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 ;

37. Valeur en lien direct avec l'essai à l'éluotriomètre permettant de mesurer la teneur en sable des boues.

- **le cake et le filtrat (eau libre) des suspensions de bentonite** (cf. Annexe 3.1.5 et Note 2) :
 - le cake est le résultat de l'agglomération des particules de bentonite hydratées jusqu'à ce qu'il devienne étanche (Note 3),
 - le filtrat est l'eau qui réussit à traverser le cake dans un filtre-pressé (cf. Annexe 3.1.5), il ne doit pas dépasser un certain volume.

Note 1 : dans le Tableau 4.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés » (§ 4.2.1.2) sont présentées les valeurs visées pour les suspensions minérales selon la norme NF EN 1536+A1. On rappelle que **les solutions de bentonite** sont les solutions minérales les plus utilisées et donc bénéficiant du retour d'expérience le plus fourni.

Note 2 : le filtre-pressé permet de vérifier que le cake se forme et que l'on obtient l'étanchéité désirée ou la perméabilité désirée en un temps limité et avec une épaisseur limitée. Un filtrat trop fort indique un cake trop poreux dans le temps imparti et un filtrat adéquat avec un cake trop épais entraîne une section de béton trop faible, un enrobage des armatures insuffisant et un frottement latéral potentiellement plus faible.

Note 3 : l'outil de forage détruit le cake lorsqu'il le racle, et ce dernier se reforme par une nouvelle agglomération des particules de bentonite hydratées.

4.3.3.2 - Caractéristiques des solutions de polymères

Caractéristiques attendues des solutions de polymères

Les normes européennes ne proposent pas de valeurs caractéristiques pour les solutions de polymères bien qu'elles recommandent de contrôler **leur masse volumique, leur pH et leur viscosité Marsh** (cf. § 4.3.7 et la description des essais en Annexe 3.1). Un tableau récapitulatif des valeurs proposées par la FHWA [3.2] et l'ICE [3.4] est présenté ci-après (Tableau 3.7 dans le § 4.3.3.3).

Les différentes propriétés des solutions de polymères et leur fonction

Les différentes propriétés à contrôler sur les solutions de polymères et les valeurs visées sont récapitulées dans le Tableau 3.7 (cf. § 4.3.3.3) pour la solution de polymères neuve, pendant le forage, et avant réutilisation (Note) :

- **la viscosité** (évaluée par la viscosité Marsh – cf. § 4.3.7 et Annexe 3.1.2) : la valeur de viscosité associée à un niveau de cisaillement conditionne, entre autres, la circulation des solutions de polymères, ainsi :
 - une forte viscosité sous des conditions de cisaillement faible diminue la pénétration du fluide dans le sol environnant et ralentit la sédimentation des particules de sol en suspension,
 - une faible viscosité associée à un fort taux de cisaillement permet de diminuer les pressions de pompage et de faciliter le déplacement du fluide lors du bétonnage ;
- **la dureté de l'eau** (l'eau utilisée pour le mélange ou l'eau dans le sol – cf. § 4.3.7 et Annexe 3.1.6) **ou présence en excès⁽³⁸⁾ de calcium et de magnésium dans l'eau** : les polymères synthétiques PHPA sont particulièrement sensibles à la présence de calcium et de magnésium dans l'eau, qui ne doit pas être supérieure à 50 ppm⁽³⁹⁾ d'après la FHWA [3.2] (sauf si le polymère considéré est adapté à une dureté importante) sous peine de voir les polymères s'agglomérer, les rendant ainsi inefficaces en raison de la perte de leur pouvoir de répulsion.

Note : dans le Tableau 4.5 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés » (§ 4.2.1.3) sont présentées les valeurs visées pour les solutions de polymères selon la FHWA [3.2] et l'ICE [3.4]. La norme NF EN 1536+A1 ne fournit pas de valeurs cibles.

4.3.3.3 - Tableaux récapitulatifs des propriétés des fluides stabilisateurs minéraux et polymères

Pour que les suspensions de bentonite (Note) et les solutions de polymères possèdent les qualités requises, elles doivent présenter **les propriétés** définies ci-après et récapitulées respectivement dans les Tableaux 3.6 et 3.7 ci-après. Néanmoins des ajustements dans certains cas peuvent être prévus.

Le contrôle des propriétés des fluides stabilisateurs et la fréquence de ces contrôles sont présentés dans le § 4.3.7 et la description des essais dans l'Annexe 3.1.

Note : les fluides stabilisateurs à base de bentonite représentent les suspensions minérales de forage les plus communément utilisées.

38. L'excès de ces ions engendre une eau dure.

39. ppm : partie par million servant à exprimer une fraction massique (1 ppm = 1 mg/kg).

Tableau 3.6 : Tableau récapitulatif des propriétés des suspensions de bentonite selon la norme NF EN 1536+A1 (Tableaux 1 et 2 à l'exception de la résistance au cisaillement)

Propriété	Unité	Bentonite neuve	Réutilisation
Masse volumique ^{a)} (Annexe 3.1.1)	g/cm ³	< 1,10	NA
Viscosité Marsh ^{b)} (Annexe 3.1.2)	s	32 à 50	32 à 60
pH ^{c)} (Annexe 3.1.3)	–	7 à 11	7 à 12
Teneur en sable (Annexe 3.1.4)	% de volume	NA	NA ^{f)}
Cake (Annexe 3.1.5)	mm	< 3	< 6
Filtrat ^{d)} (Annexe 3.1.5)	cm ³	< 30	< 50
Résistance au cisaillement ^(40) e) (Annexe 3.1.6)	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) ;
- sables lâches ou sols mous (généralement avec $q_c^{(41)} < 300$ kPa ou $Cu^{(42)} < 15$ kPa) ;
- un environnement marin.

a) **L'article 6.2.1.6 de la norme NF EN 1536+A1** précise qu'en cours d'excavation, lorsque la suspension de bentonite est également utilisée pour le transport des matériaux excavés, **des masses volumiques** supérieures sont permises pour l'étape de réutilisation.

b) **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**).

c) Valeurs indicatives **du pH**.

d) La durée de **l'essai de filtration** peut être réduite à 7,5 minutes pour les contrôles de routine. Toutefois, les valeurs de filtrat 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 de 30 minutes.

e) **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**).

f) Si la **clause 3.4.1 du Fascicule 68 du CCTG** est applicable, **la teneur en sable maximale** du fluide stabilisateur avant réutilisation est de 5 % et avant bétonnage de 3 % sauf disposition contraire du marché.

Tableau 3.7 : Tableau récapitulatif des propriétés des solutions de polymères (FHWA [3.2] et ICE [3.4])

Propriété	Unité	Polymère neuf		Pendant forage	Réutilisation	
		FHWA ⁽⁴³⁾	ICE	ICE	FHWA	ICE
Masse volumique (Annexe 3.1.1)	g/cm ³	< 1,02	1,01	< 1,05	< 1,02	< 1,02
Viscosité Marsh (Annexe 3.1.2)	s	32 à 135	> 90	60 à 120	32 à 135	60 à 120
pH (Annexe 3.1.3)	–	8 à 11,5	9 à 11		8 à 11,5	9 à 11,5
Teneur en sable (Annexe 3.1.4)	% de volume	–	0	< 5	–	< 2
Filtrat (Annexe 3.1.5)	cm ³	–	NA	NA	–	NA

NA : non applicable

40. 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 Fann**, la procédure de cet essai est détaillée par la FHWA [3.2].

41. Résistance à la pénétration du cône (NF EN ISO 22476-1).

42. Cohésion non drainée.

43. La FHWA fournit les masses volumiques en lb/ft³ qui ont été converties en g/cm³.

4.3.4 - POMPAGE DES FLUIDES STABILISATEURS

Interventions du pompage

Le pompage intervient pour déplacer les fluides stabilisateurs d'un point à un autre ou pour les garder en mouvement, faisant, de ce fait, office d'agitateur afin de les mélanger en continu (Note 1).

Le fluide stabilisateur est pompé à différentes étapes :

- le fluide stabilisateur neuf est pompé pour être stocké dans les réservoirs ;
- le fluide stabilisateur stocké (Figure 3.83.d « Installation d'une centrale de fluide stabilisateur sur un chantier » dans le § 4.3.2.3) est amené au forage soit par gravité soit par pompage ;
- le fluide stabilisateur ayant été utilisé dans le forage, est envoyé par pompage à la station de traitement (Note 2) ;
- dans l'unité de traitement (cf. § 4.3.2.3), le fluide est pompé à plusieurs reprises ;
- le fluide stabilisateur recyclé est pompé pour être stocké avant d'être réutilisé dans le forage.

Note 1 : pour les solutions de polymères synthétiques, le cisaillement doit être minimisé et la recirculation évitée [3.1].

Note 2 : on rappelle que le niveau du fluide stabilisateur dans le forage doit être maintenu par adjonction de fluide neuf ou recyclé.

Propriétés des fluides stabilisateurs impactant le pompage

La facilité, ou à contrario la difficulté, de pompage va dépendre de la viscosité du fluide stabilisateur (essai pour mesurer la viscosité – cf. Annexe 3.1.2).

En fin de forage et avant le bétonnage, ce pompage, pour envoyer le fluide stabilisateur en station de traitement pour le nécessaire dessablage, peut s'avérer difficile surtout en cas de forage très profond, car le fluide stabilisateur est le plus chargé en sédiments et donc plus visqueux.

Pompage des suspensions minérales

Pour les suspensions minérales, les pompes de type centrifuge ou à piston (Figure 3.87) sont généralement utilisées.

Figure 3.87 : Exemple de pompe à fluide



Pompage des solutions de polymères ou mélange bentonite-polymères

Les pompes à membrane sont recommandées pour le déplacement des solutions de polymères ou des mélanges bentonite-polymères (cf. § 4.2.4) des réservoirs vers le forage, puis du forage vers les réservoirs. Ce type de pompe n'endommage pas les chaînes polymères aussi sévèrement que les pompes de type piston ou centrifuge.

En revanche, les pompes de type centrifuge sont généralement utilisées lors du bétonnage pour retirer les solutions de polymères de l'excavation en raison de l'importance du débit.

Critères de choix pour les pompes utilisées pour les fluides stabilisateurs pour la réalisation d'un pieu

Le choix de la pompe doit être réalisé, entre autres, **en fonction du débit nécessaire**, or ce dernier dépend de la phase de réalisation de la fondation profonde ; il convient donc de distinguer le débit nécessaire lors du forage (cf. § ci-après) de celui du bétonnage, qui doit s'adapter à la vitesse de bétonnage (*Note*). Les pompes à débit variable peuvent donc présenter un certain avantage.

Note : comme pour le choix de la pompe pour le forage, il faudra considérer la distance et la différence d'altitude entre la centrale et le lieu de réalisation de la fondation profonde.

Critères de choix pour les pompes utilisées pour les fluides stabilisateurs lors du forage

En plus de l'adaptation à la nature du fluide stabilisateur, il faut tenir compte du **taux d'excavation par heure dans le contexte du chantier**. La capacité de la pompe est normalement choisie de manière à ne pas pénaliser la production et doit être adaptée au taux d'excavation prévu le plus élevé [3.1].

En règle générale, le **taux d'excavation varie en fonction [3.1]** :

- **de la profondeur d'excavation** : plus l'excavation est profonde, plus la progression sera faible (*Note 1*) ;
- **de la compacité du sol** : plus le sol est dur et compact plus la vitesse d'excavation est lente ;
- **de l'importance de la section transversale** : la vitesse d'excavation diminue avec l'augmentation de la section transversale ;
- **de la distance et de la différence d'altitude entre la centrale et l'excavation** : la pompe doit pouvoir atteindre le débit nominal maximum dans les zones les plus éloignées du site et surmonter les éventuelles différences d'altitudes (*Note 2*) ;
- **du choix de la technique de mise en œuvre des fluides stabilisateurs au sein du forage** (cf. § 4.3.5.5) :
 - avec la circulation directe (utilisation de godets de forage, de bennes ou encore de tarières – cf. § 3.2.2 et 3.2.4), le débit d'approvisionnement doit permettre le remplissage de l'excavation (*Note 3*),
 - avec la circulation inverse (utilisation de haveuses ou d'autres outils avec aspiration à la base de l'outil de forage ou par injection d'air comprimé), le pompage retire aussi les déblais, requérant des débits plus importants qu'avec la circulation directe (*Note 4*).

Note 1 : les 10 à 20 m initiaux d'excavation sont normalement beaucoup plus rapides.

Note 2 : par exemple si la pompe est située à un niveau inférieur à celui de l'excavation.

Note 3 : la capacité de pompage est généralement de l'ordre de 100 à 150 m³/h [3.1].

Note 4 : la capacité de pompage est plutôt de l'ordre de 200 à 300 m³/h [3.1].

4.3.5 - FORAGE AVEC FLUIDE STABILISATEUR

4.3.5.1 - Introduction

Vitesse de forage en fonction du mode de fonctionnement du fluide stabilisateur

La vitesse de forage lors de l'utilisation de suspensions minérales doit s'adapter au mode de fonctionnement du fluide stabilisateur (cf. § 4.2.1.2 pour les suspensions minérales et § 4.2.2.2 pour les solutions de polymères). Elle doit, par exemple, lors de l'utilisation de suspensions minérales, pouvoir permettre la constitution du cake qui contribue à la stabilisation des parois.

Choix du fluide stabilisateur en fonction de la préservation du terrain

Lors de l'excavation, le fluide stabilisateur ne doit pas détériorer ou ramollir le terrain en place.

Évolution des caractéristiques des fluides stabilisateurs durant le forage

Les fluides stabilisateurs une fois dans l'excavation verront leurs caractéristiques (cf. § 4.3.3) se modifier, il convient donc de le contrôler (cf. § 4.3.7) et d'agir en conséquence (cf. § 4.3.6 « Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs ») afin que la stabilisation du forage reste assurée durant l'excavation et le bétonnage.

Caractéristiques des fluides stabilisateurs en fonction des modes ou des outils de forage

Certaines caractéristiques attendues des fluides stabilisateurs vont dépendre du choix de l'outil :

- pour la tarière, le fluide doit faciliter la remontée des déblais dans les pales ;
- pour le godet de forage, le fluide stabilisateur doit privilégier la sédimentation au fond du forage ;
- pour la haveuse, le fluide doit contenir les déblais afin de favoriser leur remontée à la surface par circulation inverse ;
- pour les outils à percussion, le fluide va servir de lubrificateur.

Lors de l'utilisation des techniques de circulation inverse ou d'air lift (cf. § 2.5.2), le fluide doit contribuer à empêcher que les tuyaux permettant la circulation du fluide se bouchent.

Impacts d'un fluide chargé en particules sur la vitesse d'excavation et sur l'outil de forage

La présence de particules issues du terrain dans les fluides stabilisateurs (Note) peut [3.1] :

- réduire l'efficacité du forage (ralentissement de l'outil dans le forage et réduction de la pression de contact au niveau des dents) ;
- augmenter l'épaisseur du cake lors de l'utilisation de suspensions minérales, impactant le mouvement d'aller-retour de l'outil dans le forage ;
- augmenter l'usure du matériel permettant le forage.

Note : l'exécution du forage avec des solutions de polymères (ou des mélanges bentonite-polymères) est moins impactée par la présence de particules qu'avec des suspensions minérales. Effectivement, les particules de sol sont moins en suspension et les polymères limitent le gonflement des argiles. En revanche, il faut prévoir de rajouter du fluide stabilisateur neuf. Cet ajout doit être dicté par les contrôles réalisés sur le fluide stabilisateur (cf. § 4.3.7) [3.1].

4.3.5.2 - Forage avec la suspension de bentonite

Différentes étapes de forage sous suspension de bentonite pour la réalisation de pieu

Les différentes étapes de forage de pieux sous suspension de bentonite (cf. § 2.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») sont :

- le forage du pieu (tous les outils de forage sont permis) avec :
 - la gestion des déblais par le fluide stabilisateur (circulation directe, circulation inverse du fluide ou substitution générale – § 4.3.5.5),
 - le recyclage du fluide stabilisateur (cf. § 4.3.6),
 - les différents contrôles, pendant le forage et surtout après dessablage (cf. § 4.3.7) ;
- le curage du fond du forage et le dessablage du fluide stabilisateur (cf. « Dessableur et dessilteur pour traiter les suspensions minérales » dans le § 4.3.2.3 « Les centrales de fluide stabilisateur ») ;
- l'équipement du pieu (cf. chapitre 9 du fascicule 5 « Les armatures des pieux forés ») ;
- la mise en circulation du fluide stabilisateur afin d'extraire les éventuels petits éboulements liés à la mise en place de l'équipement, étape cruciale pour obtenir un bon bétonnage (cf. ci-après) ;
- le bétonnage du pieu au tube plongeur (cf. § 4.1.1 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »), après arrêt de la circulation de la suspension de bentonite ;
- le retrait de la virole (laquelle est nécessaire pour améliorer l'implantation au niveau de la plateforme – cf. § 5.2.1).

Les contrôles de la suspension de bentonite avant bétonnage sont traités dans le § 4.2.1 du fascicule 4.

Gestion du fluide stabilisateur lors de la réalisation de barrettes à la haveuse

Lors de l'utilisation d'une haveuse pour la réalisation de barrettes (cf. § 3.2.4.3), le fluide stabilisateur qui sert à évacuer les déblais (marinage) est dessablé, mais il ne l'est jamais totalement avant sa réutilisation pour le forage. À la fin du forage, elle est substituée par du fluide stabilisateur « propre » permettant le bétonnage (cf. ci-après « Substitution partielle ou totale du fluide stabilisateur »).

Niveau de la suspension de bentonite requis dans le forage

Il convient de maintenir une hauteur suffisante de fluide stabilisateur dans le forage ; la différence de hauteur entre le niveau de la suspension et le niveau de la nappe phréatique libre ou captive doit être supérieure à 1,5 m selon la norme NF EN 1536+A1 (article 8.2.4.6) pour permettre une surpression du fluide par rapport à la nappe, y compris pendant la sortie de l'outil rempli de déblais (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).

Si le forage rempli de fluide stabilisateur est laissé durant la nuit ou le week-end sans surveillance, il faut mettre en place un système de flotteur associé à une pompe de manière à compléter automatiquement le volume de fluide durant ce laps de temps.

En cas de stagnation de 12 à 48 heures, et plus de la suspension de bentonite dans le forage

Lorsque le forage rempli de fluide stabilisateur est laissé durant la nuit ou le week-end (soit plus de 48 heures), il convient de vérifier que les propriétés du fluide ne se retrouvent pas au point de ne plus être en capacité de maintenir les parois de forage. Cette contrainte doit être prise en compte pour déterminer la composition adéquate de la suspension de bentonite.

Nous rappelons que le niveau de la suspension doit aussi être maintenu durant ce laps de temps (cf. ci-avant « Niveau de la suspension de bentonite requis dans le forage »). La stagnation de 12 à 48 heures du fluide stabilisateur est, si possible, à éviter. Lorsque cela s'avère impossible, ce qui est assez courant en cas de réalisation de barrettes ou de pieux profonds de gros diamètre (12 heures en semaine et 48 heures le week-end), il est préférable de limiter la stagnation de la suspension dans le forage et de ce fait, de maintenir le fluide stabilisateur en circulation la nuit ou le week-end en le pompant au fond et en le rejetant en tête, voire en le renvoyant dans le stock pour en faire revenir un autre.

Substitution partielle ou totale du fluide stabilisateur

Le fluide stabilisateur se charge en sédiments et ses propriétés initiales se modifient, ce qui peut, en fonction de la nature du sol, provoquer entre autres une augmentation de l'eau libre (comme parfois dans le cas des sols sableux) ou un épaissement du cake (potentiellement dans les sols argileux) (cf. § 4.3.6.2 « Les contaminations et traitements des suspensions minérales »). Ces augmentations à elles seules ne remettent pas en cause la tenue des parois.

La régénération du fluide stabilisateur contaminé par les matériaux traversés qui ne sont pas neutres chimiquement (présence de gypse par exemple) ne doit pas attendre nécessairement la fin du forage si le fluide stabilisateur ne tient plus correctement les parois du forage.

En cas de substitution totale (Note) 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 : lorsque la haveuse est utilisée, le dessablage réalisé au fur et à mesure de l'excavation, n'est pas complet pour respecter la cadence de forage. On réinjecte donc au fur et à mesure en tête une suspension minérale encore chargée et inappropriée pour réaliser le bétonnage à la fin de l'excavation. De ce fait, la substitution totale de la suspension minérale est nécessaire et le traitement de la suspension chargée peut être réalisé en temps masqué, ce qui optimise le rendement.

Instabilités des parois en cas d'utilisation des suspensions minérales

Les instabilités des parois peuvent être imputables à :

- un filtrat et/ou un cake non conforme(s) : filtrat trop important ou cake non formé dans un sol poreux, ou au contraire trop épais (Note) ;
- un niveau du fluide stabilisateur ne respectant pas la garde de 1,5 m au-dessus de celui de l'eau (article 8.2.4.6 de la norme NF EN 1536+A1) ;
- une pression du fluide stabilisateur pouvant se retrouver inférieure à celle de la poussée du sol et de l'eau en raison d'un pistonnage du fluide. Ce dernier intervient lorsque l'outil est retiré trop rapidement, ce qui ne permet pas au fluide de contourner l'outil, conduisant ainsi à une diminution de la pression du fluide.

Note :

- une chute de la viscosité de la suspension, occasionnée, par exemple, par une contamination physico-chimique, pourra être accompagnée d'une augmentation de son filtrat et du cake ;
- dans le cas de sols fins, un filtrat trop important générera plus facilement des phénomènes d'hydratation du sol et des risques de perte de stabilité, mais généralement ces problèmes sont aussi associés à des temps d'ouverture de l'excavation trop longs.

4.3.5.3 - Forage avec les solutions de polymères

Il faut noter qu'au moment de la rédaction de ce guide, l'usage des polymères pour la réalisation de fondations profondes étant peu fréquent, il n'existe pas (ou peu) de recommandations françaises. Ainsi, de nombreuses informations sont issues de références américaines et anglaises.

Niveau de la solution de polymères requis dans le forage

Il convient de maintenir une hauteur suffisante de la solution de polymères dans le 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) ; la différence de hauteur entre le niveau de la solution et le niveau de la nappe phréatique doit être au minimum de 2 m (selon l'ICE [3.4]) et de préférence de 3 m (d'après la FHWA [3.2]). Comme le fluide va avoir tendance à s'infiltrer dans le sol environnant, il faut, si nécessaire, compléter avec une solution de polymères neuve. Une réserve suffisante de solution de polymères neuve doit donc être assurée.

En cas de stagnation de 12 à 48 heures de la solution de polymères dans le forage

Si le forage rempli de solution de polymères doit être laissé durant la nuit ou le week-end sans surveillance, il faudra mettre en place un système de flotteur associé à une pompe permettant de compléter de manière automatique le volume de fluide stabilisateur durant ce laps de temps.

Précautions lors de l'usage de solutions de polymères

Selon la FHWA [3.2], il est fortement conseillé de tester l'efficacité de la solution de polymères dans un forage test avant de réaliser les pieux réels. Une personne compétente (par exemple, un représentant du fournisseur en polymères) doit d'être présente lors de cet essai et lors de la réalisation des premiers pieux forés pour s'assurer du bon fonctionnement du fluide et modifier la composition de la solution de polymères le cas échéant.

Forage sans circulation avec les solutions de polymères

Avec les solutions de polymères, les particules de sol se décantent rapidement en fond de forage.

Un forage sans circulation (*Note*) est à privilégier, car les pompes utilisées pour la circulation risquent d'endommager les chaînes de polymères. Il est donc impératif de réaliser des contrôles régulièrement en cours de forage (cf. § 4.3.7 traitant des essais, de leur fréquence et des lieux de prélèvement) afin de vérifier les propriétés de la solution de polymères (cf. § 4.3.3.2). Si nécessaire, il faut la renouveler par substitution.

Note : « sans circulation » signifie qu'une fois mis en place dans l'excavation, le fluide stabilisateur n'est pas utilisé pour transporter les déblais de forage (cf. « Sans circulation de fluide stabilisateur au sein du forage » dans le § 4.3.5.5 « Technique de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage »).

4.3.5.4 - Forage avec l'eau comme fluide stabilisateur

Niveau d'eau requis dans le forage

Le niveau d'eau doit être maintenu au cours du forage grâce à une virole (cf. § 5.2.1), au-dessus de celui de la nappe phréatique (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) de façon à ce que l'écoulement soit dirigé du trou vers le sol afin d'assurer la stabilité de la paroi sous peine de voir les forces de percolation augmenter le risque d'éboulement.

Tubage et eau comme fluide stabilisateur

Le tubage peut être partiel ou sur l'ensemble de la longueur de l'excavation. Le tubage doit être bien scellé dans une couche de sol dur ou au rocher afin d'assurer que ce sol ne se désagrège pas à l'arrière du pied du tubage vers l'intérieur du trou de forage pendant l'excavation. Cette désagrégation peut engendrer la création de cavités, qui vont se former autour du tubage et un mélange de sol et d'eau avec le béton lors de l'enlèvement du tubage [3.1].

4.3.5.5 - Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage

Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage

Il existe deux approches pour la mise en œuvre de la suspension minérale lors du forage (détaillées ci-après) :

- **sans circulation de la suspension minérale** au sein du forage, procédé adapté aux divers outils traditionnels de forage ;
- **avec circulation**, dans ce cas, la suspension minérale sert aussi à évacuer les déblais broyés par l'outil de forage. On distingue la circulation (*Note*) :
 - directe, correspondant à la sortie de la suspension sous pression au fond du forage, et à sa récupération en tête de forage avec les déblais,
 - inverse, c'est-à-dire que la suspension est remontée avec les déblais à travers l'outil de forage puis reversée, après traitement, directement dans le forage en tête.

Note : le choix est surtout lié à la vitesse d'entraînement des matériaux et à l'homogénéité de cette vitesse ; si le volume de suspension minérale est important, des zones de stagnation des matériaux peuvent se créer, la circulation inverse est alors adoptée, sinon, la circulation directe sera préférée.

Sans circulation de fluide stabilisateur au sein du forage

Le fluide stabilisateur n'est pas mis en circulation, mais est néanmoins brassé par les va-et-vient des outils entre la surface et le fond de l'excavation.

Durant le forage : déversement du fluide stabilisateur directement en tête dans le forage. Il s'agit du simple remplacement d'un volume de sol excavé par un volume équivalent de fluide stabilisateur lorsque l'outil rempli de déblais sort de l'excavation.

Évacuation des déblais : le fluide stabilisateur n'est donc pas régénéré en continu et se charge progressivement en particules du sol excavé.

Vérification des propriétés du fluide stabilisateur : il faut vérifier pendant le forage que les propriétés de la suspension de bentonite permettent la formation du cake et que le bon niveau de la suspension est maintenu par rapport à la nappe. En ce qui concerne les solutions de polymères, l'ICE [3.4] fournit des valeurs de caractéristiques à vérifier au cours du forage (cf. Tableau 3.7 dans le § 4.3.3.3).

Outils usuels de forage : divers outils traditionnels de forage.

Avec circulation directe de fluide stabilisateur au sein du forage

Durant le forage : le fluide stabilisateur sort en fond de forage sous pression à travers l'outil de forage ce qui permet un débit de refoulement et une remontée des cuttings dans l'espace annulaire du forage (*Note*) entre les parois du forage et les tiges (Figure 3.88.a).

Évacuation des déblais : elle peut être faite en continu par cette méthode en raison de la circulation du fluide stabilisateur chargé de déblais.

Outils usuels de forage : par rotation au tricône (cf. § 3.2.5.1) ou au tricône à plusieurs molettes ou cônes (cf. § 3.2.5.2).

Note : la circulation directe n'est possible que si l'espace annulaire est faible, permettant ainsi une bonne vitesse du fluide et une bonne remontée des déblais. Quand l'espace annulaire est trop grand, la vitesse est trop faible, les déblais ne sont pas évacués et le forage bourre, il faut alors avoir recours à la méthode par circulation inverse.

Avec circulation inverse du fluide stabilisateur au sein du forage

Durant le forage : le fluide stabilisateur (*Note 1*) est déversé dans le trou de forage en tête dans l'espace annulaire compris entre les parois du forage et les tiges, et **est remonté, chargé de sédiments, par ascension centrale dans les tiges de forage selon deux techniques au choix** :

- **par aspiration depuis la surface** (Figure 3.88.b), à l'aide d'une pompe aspirant le fluide stabilisateur et les déblais à la base du train de tiges en fond de forage. Il faut noter que lors de l'utilisation d'une haveuse (cf. § 3.2.4.3), la pompe se trouve au niveau de l'outil ;
- **par injection d'air comprimé** à la base du train de tige (Figure 3.88.c).

Avantages de la circulation inverse : le forage en continu sans sortir l'outil pour évacuer les déblais.

Évacuation des déblais : elle peut être faite en continu par cette méthode en raison de la circulation du fluide stabilisateur chargé de déblais.

Outils usuels de forage : par rotation au tricône à molettes ou cônes ou la haveuse (*Note 2*) ou le trépan (Figure 3.63 « Trépan en croix avec âme creuse pour l'évacuation des déblais » dans le § 3.2.4.1).

Note 1 : en cours de forage, le process de forage par circulation inverse génère plus de pollution physique et une augmentation plus marquée de la densité de la boue en cours de forage.

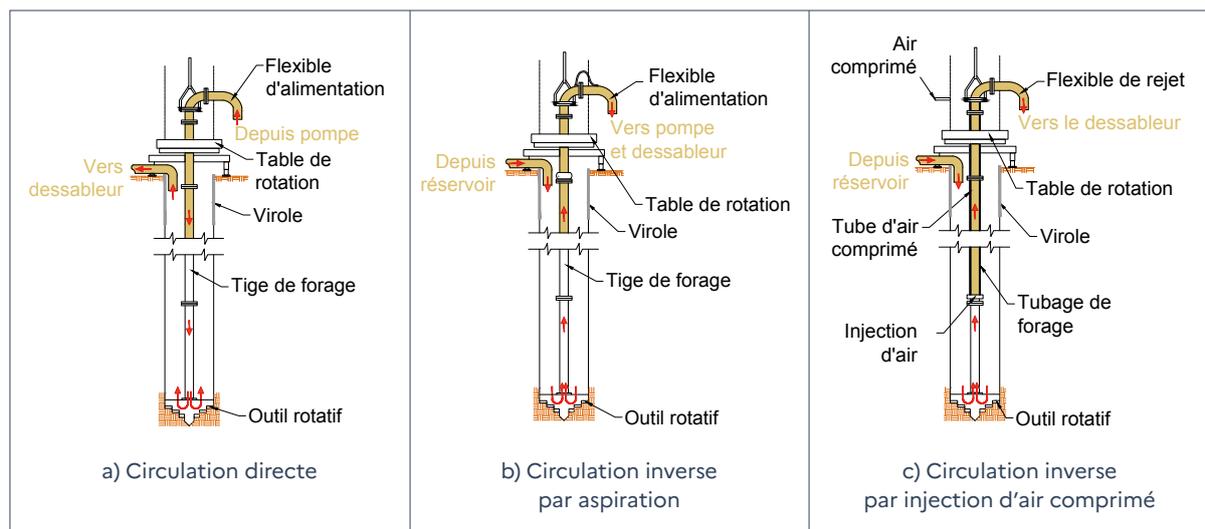
Note 2 : dans le cas de la haveuse, une pompe est positionnée dans l'outil.

Avantages et inconvénients de la circulation du fluide stabilisateur (méthode directe ou indirecte)

La circulation directe ou indirecte de la suspension minérale par rapport à l'absence de circulation présente :

- **les avantages :**
 - d'éviter les remontées incessantes de l'outil de forage,
 - de refroidir efficacement l'outil ;
- **les inconvénients :**
 - d'une plus grande difficulté pour changer d'outil en cours de forage,
 - d'un chargement en fines plus important des fluides stabilisateurs.

Figure 3.88 : Schémas de principe de circulation du fluide stabilisateur



4.3.6 - TRAITEMENT ET RECYCLAGE DES FLUIDES STABILISATEURS

4.3.6.1 - Taux d'utilisation et recyclage des fluides stabilisateurs

Taux d'utilisation du fluide stabilisateur

Le **taux d'utilisation** correspond à la capacité du fluide stabilisateur à être utilisé à de multiples reprises lorsqu'il est mélangé et traité correctement. Il est calculé comme le rapport entre le volume total fabriqué et le volume total théorique excavé. Il dépend de nombreux facteurs comme la méthode d'excavation et les caractéristiques du sol (*Note*) et de la nappe. Il intègre le stock du fluide stabilisateur restant après travaux et aussi les pertes :

- **par infiltration** dans les couches de terrain trop ouvertes (trop perméables ou aux fissures trop ouvertes), y compris celles dues aux circulations de la nappe dans ces couches ;
- **nécessaires au colmatage des parois de l'excavation** et à la formation du cake (cas des suspensions minérales) ou s'infiltrant dans le sol (cas des solutions de polymères) ;
- **liées à la pollution** qui nécessite le remplacement du fluide devenu impropre à son usage ou qui modifie la fluidité du fluide stabilisateur en augmentant de ce fait les pertes par infiltration ;

- le volume des hors-profils d'excavation ;
- provenant du fluide stabilisateur contenu dans les déblais évacués.

Pour certains terrains instables, il peut se révéler nécessaire de définir dans les pièces du marché ce qui est considéré comme une surconsommation anormale. À titre indicatif, l'ancien Fascicule 68 du CCTG : 1993 définissait comme une surconsommation anormale prudente, une surconsommation de bentonite supérieure à 1,2 fois le volume excavé (correspondant à un taux d'utilisation 0,83).

Note : il s'agit de s'intéresser à sa composition chimique comme la présence de gypse.

Recyclage des suspensions minérales

Les suspensions minérales peuvent être réutilisées de façon répétée tant que leurs propriétés se situent dans la plage de valeurs acceptables (Tableau 3.6 dans le § 4.3.3.3). Ainsi, en plus du dessablage (et éventuellement dessiltage), il est potentiellement nécessaire, pour tous les fluides stabilisateurs, d'ajuster certains paramètres tels que la masse volumique, la viscosité, le pH... Les ajouts utilisables sont détaillés dans le § 4.3.6.2 pour les suspensions minérales. Il faut procéder aux contrôles des propriétés (cf. § 4.3.7) avant et après traitement.

Recyclage des solutions de polymères

Les solutions de polymères peuvent être utilisées plusieurs fois.

Lors du bétonnage, la solution de polymères en surface est relativement propre. Pour le reste de la solution, il est conseillé de la stocker pendant plusieurs heures dans un réservoir afin de laisser les particules solides décanter. La solution de polymères peut ensuite être réutilisée après vérification de ses propriétés (cf. Tableau 3.7 dans le § 4.3.3.3) et, si nécessaire, en ajoutant de la solution de polymères neuve.

Afin d'obtenir les propriétés de solution de polymères nécessaires, certains traitements (cf. § 4.3.6.3) peuvent être réalisés. Les ajouts utilisables sont détaillés dans le § 4.3.6.3.

4.3.6.2 - Les contaminations et traitements des suspensions minérales

Les différentes interventions du traitement des suspensions de bentonite

Le traitement du fluide stabilisateur (suite à son contrôle – cf. § 4.3.7) intervient à différents moments de la vie du fluide stabilisateur (Figure 3.80 dans le § 4.3.1 « Schéma de principe du cycle de vie des fluides stabilisateurs ») :

- en cours de forage ;
- en fin de forage afin de permettre le bétonnage ;
- en vue d'une réutilisation ultérieure ;
- en vue d'un dépôt en installation de stockage de déchets.

Conséquences de la contamination des suspensions de bentonite

La contamination provenant des couches de sols traversées lors du forage est la principale contamination des suspensions minérales de forage.

On considère qu'une suspension minérale est contaminée lorsque la contamination vient sensiblement modifier les propriétés des fluides stabilisateurs.

Cette contamination peut entraîner une perte de la tenue de la paroi du forage.

Les conséquences de la contamination peuvent être :

- la floculation de la suspension minérale consistant en l'agglomération des particules minérales et conduisant à un cake perméable puisqu'il y a davantage d'espace entre les particules agglomérées ;
- des particules minérales de la suspension plus petites, car moins « gonflées » en raison de la diminution du pH, conduisant à un fluide stabilisateur plus fluide, qui d'une part, s'infiltré davantage dans les parois du forage et d'autre part, perd plus facilement son eau (le filtrat augmente). La diminution du pH peut être due à la présence de gypse ou de tourbe ou tout simplement d'une eau très acide qui acidifie la suspension minérale.

Traitement mécanique et chimique des suspensions de bentonite contaminées par les particules en suspension

Lors du forage, il est possible d'intervenir sur la suspension de bentonite :

- en traitant mécaniquement (cf. « Dessableur et dessilteur pour traiter les suspensions minérales » dans le § 4.3.2.3 « Les centrales de fluide stabilisateur ») :
 - en dessablant pour retirer les particules lorsque la présence des particules empêche le cake de se former correctement,
 - éventuellement le dessiltage pour enlever les particules d'argile et de limon ;
- en ajoutant un fluidifiant ou un dispersant organique ou des polyphosphates (cf. ci-après les ajouts) pour défloculer la suspension ;
- en modifiant les propriétés des suspensions de bentonite par des ajouts (cf. Tableau 3.8 ci-après).

Contaminations chimiques des suspensions de bentonite

Certaines contaminations des suspensions de bentonite nécessitent d'être surveillées telles que :

- la contamination au chlorure de sodium (eau de mer, eau de la nappe ou eau pour fabriquer la suspension minérale) ;
- la contamination par le gypse ou l'anhydrite ;
- la contamination par le ciment : en dehors des deux à trois derniers mètres de fluide stabilisateur surmontant le béton qui sont à éliminer (clause 3.4.1 du Fascicule 68 du CCTG) ;
- la contamination par la tourbe.

Les ajouts et leurs actions sur les suspensions de bentonite

Un récapitulatif des ajouts pouvant être utilisés et de leur action sur la suspension de bentonite est présenté dans le Tableau 3.8.

Les ajouts, selon les cas, ont pour but :

- d'améliorer le pouvoir colmatant ;
- d'alourdir la suspension ;
- d'accroître la viscosité de la suspension ;
- de diminuer (fluidifier) la viscosité de la suspension ;
- de diminuer le pH de la suspension ;
- d'augmenter le pH de la suspension ;
- de diminuer l'épaisseur du cake et le volume de filtrat.

Tableau 3.8 : Tableau récapitulatif des ajouts de traitement pour les suspensions de bentonite

Propriétés (évolution recherchée de la valeur)	Ajouts
Masse volumique (augmentation)	Barytine, hématine, pyrite, sidérite, galène
Viscosité (diminution)	Tanins (québracho), polyacrylates de sodium, polyphosphates (pyro, tetra et hexamétophosphates)
pH (diminution)	Acide pyrophosphate, bicarbonate de soude
pH (augmentation)	Carbonate de soude ou de sodium
Augmentation du pouvoir colmatant	Gomme de guar, les résines polymérisables ou des substances solides (fibres, sciure de bois, perlite expansée, poudre ou paillette de mica)
Épaisseur du cake et filtrat (diminution)	Colloïdes organiques (alginate de soude, extrait des algues marines, carboxyméthylcellulose (CMC), amidon, lignosulfonates ⁽⁴⁴⁾)

44. Les lignosulfonates sont extraits de la pâte à papier de conifères par traitement de la pulpe à l'aide d'un acide sulfatique de métal lourd [3.6].

4.3.6.3 - Les contaminations et traitements des solutions de polymères

Traitements mécanique et chimique des solutions de polymères contaminées par les particules en suspension

Le traitement mécanique utilisé pour les suspensions minérales (cf. § 4.3.6.2) est inadapté pour les solutions de polymères, car les polymères auront tendance à boucher les tamis et à être détériorés par les actions de cisaillement [3.1].

En cas d'une quantité trop importante de limon (Note 1), il est possible :

- de remplacer la solution de polymères par un mélange neuf (Note 2) ;
- d'incorporer des ajouts permettant d'agglomérer (puis de faire sédimenter) ces limons.

Note 1 : les particules de limon restent en suspension pendant une plus longue période que les sables et sont difficiles à nettoyer en fond de forage.

Note 2 : il convient alors de pomper à la base de l'excavation le fluide contaminé et de l'envoyer dans des réservoirs de stockage où la décantation pourra avoir lieu [3.1].

Les ajouts et leurs actions sur les solutions de polymères

La dureté (teneur en ions calcium et magnésium) peut être réduite en ajoutant à la solution de polymères du carbonate de soude qui augmente le pH⁽⁴⁵⁾ mais qui n'est pas adapté à tous les types de polymères (consulter le fournisseur avant d'utiliser cet ajout).

4.3.7 - CONTRÔLE DES PROPRIÉTÉS DES FLUIDES STABILISATEURS

En lien avec les caractéristiques des fluides stabilisateurs (Tableaux 3.6 et 3.7 dans le § 4.3.3.3) à suivre tout au long du cycle de vie des fluides stabilisateurs, les essais permettant de mesurer ces valeurs sont présentés de manière synthétique en Annexe 3.1. Pour plus de détails, les essais et leurs procédures sont détaillés dans la norme NF EN ISO 10414-1.

4.3.7.1 - Les essais et lieux de prélèvement pour le contrôle des fluides stabilisateurs

Les essais de contrôle à réaliser

Les essais de contrôle selon les procédures classiques sont l'évaluation de :

- la densité (cf. Annexe 3.1.1) ;
- la viscosité (cf. Annexe 3.1.2) ;
- le pH (cf. Annexe 3.1.3) ;
- la teneur en sable (cf. Annexe 3.1.4) ;
- le filtrat et l'épaisseur de cake (cf. Annexe 3.1.5).

Les valeurs attendues sont présentées pour les suspensions minérales et les solutions de polymères, respectivement dans le Tableau 3.6 (issu de la norme NF EN 1536+A1) et le Tableau 3.7 (cf. § 4.3.3.3).

Les essais moins courants, pouvant être réalisés, s'intéressent à la détermination de (cf. Annexe 3.1.6) :

- la dureté ;
- la teneur en eau ;
- la compatibilité de l'eau ;
- la résistance au cisaillement.

45. Le contrôle du pH peut être une évaluation indirecte de la dureté.

Lieu de prélèvement des échantillons de fluide stabilisateur pour les contrôles

- **Avant introduction dans le forage**, le fluide stabilisateur est échantillonné directement à différents emplacements dans les réservoirs où il est stocké ;
- **durant le forage**, les échantillons (*Note 1*) peuvent être prélevés :
 - pour les suspensions de bentonite, en haut et en fond de pieu, et en plus à mi-hauteur en cas de déversement de fluide stabilisateur sans circulation (cf. § 4.3.5.5 « Techniques de mise en œuvre des suspensions minérales au sein du forage ») ; en cas de premier contrôle donnant des valeurs hors plage de celles attendues, ces prélèvements sont à multiplier au cours de l'exécution (*Note 2*),
 - pour les solutions de polymères, à mi-hauteur et à proximité du fond du forage (*Note 2*).

Note 1 : à cet effet, on utilise des bouteilles à prélèvement de capacité suffisante (≈ 2 l) pour permettre de réaliser les différents contrôles de qualité du fluide stabilisateur. L'échantillonneur doit être bien étanche pour éviter la perte du fluide, d'autant plus en cas de solution de polymères [3.1].

Note 2 : l'échantillonnage à différents niveaux du pieu permet de vérifier l'absence de gradient de densité (sauf lors du forage).

4.3.7.2 - Fréquence des essais

Que ce soit pour les suspensions de bentonite ou pour les solutions de polymères, la norme NF EN 1536+A1 (tableau B1 de l'annexe B) préconise la vérification des caractéristiques suivantes (*Note 1*) :

- la masse volumique (cf. Annexe 3.1.1) ;
- la viscosité Marsh (cf. Annexe 3.1.2) ;
- le pH (cf. Annexe 3.1.3) ;
- le filtrat et épaisseur du cake – uniquement pour la suspension de bentonite (cf. Annexe 3.1.5).

Ces caractéristiques doivent être vérifiées dans les cas suivants :

- un nouveau fluide stabilisateur (*Note 2*) ;
- avant-bétonnage ;
- après dessablage (*Notes 3 et 4*) ;
- avant réutilisation.

Note 1 : en présence de contaminants, des essais supplémentaires pour connaître le comportement du fluide stabilisateur peuvent être réalisés.

Note 2 : par exemple, les contrôles pour la bentonite peuvent être effectués directement après le mélange, 1 heure et 24 heures pour mettre en évidence l'évolution des caractéristiques de la suspension avec le temps [3.1].

Note 3 : il faut distinguer le fluide stabilisateur dessablé et réutilisé dans le forage, de celui réutilisé pour le bétonnage.

Note 4 : la qualité du fluide stabilisateur avant bétonnage (cf. § 4.2.1 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») va conditionner un bon bétonnage et de ce fait contribuer à la qualité du pieu.

4.3.8 - CONTRÔLE DES FUITES⁽⁴⁶⁾ DE FLUIDES STABILISATEURS ET MISE EN DÉPÔT DES FLUIDES STABILISATEURS USÉS

4.3.8.1 - Contrôle des fuites de fluides stabilisateurs

Objectif du contrôle des fuites des fluides stabilisateurs

De manière générale, les fluides stabilisateurs doivent être manipulés avec soin (cf. § 4.3.9 « Mesures de sécurité lors de la préparation et de l'usage de fluides stabilisateurs ») et **ne doivent pas s'écouler sans traitement dans le terrain ou dans les nappes d'eau** pendant tout le processus, de son mélange à son élimination.

Précautions pour éviter les fuites des fluides stabilisateurs

Une certaine quantité de suspensions minérales (*Note 1*) peuvent être perdues dans le sol lors de l'excavation ou avec les déblais (*Note 2*) [3.1]. Afin d'éviter ces fuites, il faut travailler au maximum en boucle fermée si le chantier possède une fosse de décantation. Il convient de mettre en place des mesures de confinement (tranchées, barrières...) afin de circonscrire l'excavation et de limiter ainsi les pertes lors par exemple des mouvements d'entrée et de sortie de l'outil de forage (le godet, la tarière ou la benne).

46. Il ne s'agit pas ici de perte de fluide stabilisateur dans le terrain qui est traité en 4.1 de ce fascicule.

De petites quantités de fluides stabilisateurs peuvent être emportées par le vent et se déverser sur le terrain adjacent.

Note 1 : la quantité de fluide perdue est très difficile à évaluer et cette perte est très dépendante du type de terrain. Une perte d'environ 30 % du volume théorique de l'excavation est courante. Une perte supérieure à 50 % doit être jugée anormale.

Note 2 : si les déblais ne sont pas déposés directement dans des camions à benne pour être évacués, il est essentiel de les confiner [3.1].

4.3.8.2 - Mise en dépôt des suspensions de bentonite usées

Définition des suspensions de bentonite usées

La suspension de bentonite est considérée usée lorsque l'une au moins de ses caractéristiques (densité, viscosité, pH, teneur en sable, filtrat/cake...) sort de la plage d'utilisation et ne peut être modifiée sur chantier avec un traitement physique ou chimique suffisamment économique. Dans ce cas, la suspension de bentonite doit être envoyée en installation de stockage de déchets.

Conditions de mise en dépôt des suspensions de bentonite usées

Les suspensions de bentonite usées doivent être évacuées rapidement des zones de travaux. Le dépôt de ces suspensions est soumis à la législation en vigueur. La méthode autorisée la moins coûteuse revient à déposer la suspension de bentonite dans **une installation de déchets approuvée** (Notes 1 et 2) avec évacuation de la suspension par un transporteur agréé. Cependant, le nombre de centres agréés est limité.

Note 1 : les installations de déchets inertes (ISDI) n'acceptent pas les déchets non pelletables, ce qui conduit à traiter la suspension pour la rendre moins liquide (cf. § suivant). Le choix du site de stockage doit alors se faire en comparant le coût global « traitement et dépôt en installation de déchets inertes (ISDI) » et le coût d'un dépôt en site spécifique (cf. § 2.2 « L'environnement dans le Document de consultation des entreprises » du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Note 2 : avant évacuation dans une installation de stockage des déchets, il faut s'assurer que la suspension de bentonite qui est entrée en contact avec des sols pollués, présente des taux de contamination inférieurs aux taux réglementaires.

Traitement possible des suspensions de bentonite usées pour les rendre pelletables

L'objectif du traitement des suspensions de bentonite usées est de permettre de la stocker en tant que **déchet solide** et donc d'en diminuer le caractère liquide. On peut compter **parmi les méthodes disponibles** :

- **l'addition de ciment** afin de former un produit argileux avec une teneur solide de 30 % minimum. Cette opération est généralement réalisée dans une fosse creusée sur chantier ;
- **la filtration en continu** afin d'obtenir un produit argileux avec une teneur solide d'environ 65 % ;
- **la décantation en centrifugeuse** afin d'obtenir un produit équivalent au système de filtration du point précédent.

4.3.8.3 - Mise en dépôt des solutions de polymères usées

Obsolescence des solutions de polymères

De façon générale, **tout type d'agitation mécanique va endommager les chaînes polymères**. Ainsi, la solution de polymères **ne peut pas être réutilisée indéfiniment**.

Dépôt des solutions de polymères usées

Le dépôt des solutions de polymères usées doit être réalisé en accord avec les réglementations locales au regard du dépôt de matériaux. Les solutions de polymères nécessitent **parfois d'être traitées avant leur dépôt en installation de stockage de déchets**. ⚠ Le caractère biodégradable ne permet pas forcément directement un dépôt en installation de stockage de déchets (*Note 1*). On rappelle que tous les déchets doivent être analysés avant leur mise en dépôt.

⚠ Pour tous les cas de figure, **c'est du ressort de la responsabilité de l'entreprise de déterminer les règlements à appliquer, d'obtenir les autorisations nécessaires et de stocker la suspension de polymères** comme il se doit.

Dans certains cas, sous réserve de résultats d'analyses chimiques (*Note 2*), il est possible d'obtenir l'autorisation des gérants des eaux usées pour déposer les solutions de polymères :

- dans le système des eaux usées ;
- dans une usine de traitement des eaux usées, parfois à condition de dépolymériser (ou de casser) les polymères.

Note 1 : la dégradation peut ne pas être encore suffisamment faite.

Note 2 : ⚠ Quelle que soit l'option choisie, il est nécessaire d'envoyer un échantillon représentatif à un laboratoire pour certifier la composition du fluide et **obtenir l'autorisation**.

Traitement des solutions de polymères usées

Pour optimiser la mise en dépôt, une réduction des quantités à éliminer est recherchée. Pour y parvenir, il convient de séparer l'eau des matériaux solides et on peut compter parmi les méthodes de traitement [3.1] :

- la sédimentation par gravité des particules en suspension et leur élimination sous forme de déchets solides ;
- la rupture chimique de la viscosité de la solution de polymères à l'aide d'un agent désactivant (l'eau de Javel fonctionne pour la plupart des types de polymère – *Note 1*) et la sédimentation des matériaux en suspension avec leur élimination sous forme de déchets solides (*Note 2*) ;
- le traitement chimique des solutions de polymères à faible teneur en solides (neutralisation de l'eau de Javel – *Note 1* – et ajustement du pH) et rejet dans les eaux usées (après approbation) ;
- le traitement mécanique des solutions de polymères afin de briser la chaîne de polymères à l'aide d'un équipement de centrifugeuse et/ou de filtre-presses séparant les fines de l'eau.

L'élimination des solutions de polymères peut souvent être réalisée avec relativement peu de frais et d'efforts par rapport aux suspensions minérales, ce qui constitue un avantage pour ce fluide stabilisateur [3.1].

Note 1 : l'eau de javel est un polluant.

Note 2 : dans ce cas, les déchets solides pourront être ajoutés au sol excavé.

4.3.9 - MESURES DE SÉCURITÉ LORS DE LA PRÉPARATION ET DE L'USAGE DE FLUIDES STABILISATEURS

Points de vigilance lors de l'usage de fluides stabilisateurs

Au regard de l'environnement, de la sécurité et de la santé, lors de l'usage de fluides stabilisateurs comme les suspensions minérales ou les solutions de polymères, il conviendra de veiller à [3.1] :

- la santé et la sécurité lors de la manipulation, de la manutention et du stockage des matériaux ;
- l'impact environnemental du fluide stabilisateur sur les terrains et les nappes ;
- l'impact environnemental lors de la manipulation, du stockage et de l'élimination des fluides stabilisateurs et des matériaux excavés (*Note*).

Note : il faudra prendre en compte l'éventuelle contamination du sol, dont la pollution se trouvant dans les matériaux excavés.

Mesures de sécurité avec les fluides stabilisateurs

Des mesures de sécurité spécifiques pour la préparation des suspensions de bentonite et pour les solutions de polymères doivent être considérées. Certains constituants sont irritants pour les yeux et les voies respiratoires et nécessitent l'utilisation d'équipements adaptés aux produits chimiques en question (vêtements, gants résistants aux produits chimiques, lunettes de protection, masque avec filtres, écran facial...), notamment lors de leur préparation (cf. § 4.3.2). Ces équipements doivent aussi être adaptés à l'utilisation des adjuvants, en général des produits chimiques potentiellement irritants ou nocifs.

Risques liés à la manutention lors de la préparation des fluides stabilisateurs

Lors de la préparation des fluides stabilisateurs, il convient d'évaluer les questions de sécurité liées au levage éventuel des seaux de produits vers la trémie de mélange.

Systèmes d'intervention en cas d'accident avec les fluides stabilisateurs

Si le fluide stabilisateur peut s'avérer dangereux pour la santé des compagnons, **le chantier doit disposer de systèmes permettant une intervention** en cas de contact avec les yeux, comme des bains oculaires en quantité suffisante ou des douches d'urgence (*Note*).

Une communication auprès des compagnons sur les risques, les précautions et le comportement en cas d'accident doit être réalisée.

Note : dans les conditions de chantier de fondation, il peut s'avérer difficile de mettre en place une douche d'urgence. Cette difficulté peut être accrue en hiver en raison du gel (maintien de l'eau tiède et risque potentiel d'hypothermie pour les compagnons).

4.4 - COMPARAISON ENTRE LES SUSPENSIONS DE BENTONITE ET LES SOLUTIONS DE POLYMÈRES

4.4.1 - COMPARAISON DES SUSPENSIONS DE BENTONITE ET DES SOLUTIONS DE POLYMÈRES SELON LEURS PARTICULARITÉS

Le Tableau 3.9 propose une comparaison entre une suspension de bentonite et une solution de polymères synthétiques PHPA mettant en exergue les points majeurs ou délicats en lien avec ces deux types de techniques.

Tableau 3.9 : Comparaison des suspensions de bentonite et des solutions de polymères mettant en exergue les points majeurs ou délicats

	Suspensions de bentonite	Solutions de polymères (PHPA)
Mécanisme	<ul style="list-style-type: none"> Formation d'un cake assurant le colmatage et la stabilité des parois Mise en suspension des particules 	<ul style="list-style-type: none"> Interaction avec les particules de sol en créant des liaisons Dépôt des particules de sol au fond du forage par sédimentation
Quantité de produit par m ³ d'eau	De 25 à 50 kg de bentonite	De 0,5 à 2 kg de polymères
Eau	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de l'eau potable fortement recommandée Contrôle de la dureté de l'eau (<i>Note 1</i> et cf. Annexe 3.1.6 pour l'essai) 	
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> Masse volumique, viscosité, pH, teneur en sable Cake, filtrat De nombreuses procédures d'essais et de contrôles sont disponibles (Annexe 3.1)	Valeurs de contrôle fournies seulement par la FHWA [3.2] et l'ICE [3.4]
Points de vigilance	<ul style="list-style-type: none"> Sensibles à la présence d'eau salée Sensibles au gypse Sensibles aux sols organiques (tourbe) Adaptables en eaux saumâtres À surveiller si contact avec du ciment 	
Environnement (cf. § 4.3.8)	<ul style="list-style-type: none"> Déchets non dangereux mais mise en dépôt en installation de stockage de déchets avec la problématique de déchets liquides (cf. § 4.3.8.2) Polluant dans les environnements aquatiques Selon les cas, dépôt en installation de stockage de déchets ou sur site 	<ul style="list-style-type: none"> Certaines solutions de polymères sont biodégradables (<i>Note 2</i>) (avec un faible traitement), mais pas toutes (cf. § 4.3.8.3)

Note 1 : il convient de vérifier la dureté de l'eau de gâchage qui peut influencer le taux d'hydratation de certaines bentonites. Dans le cas des polymères, l'impact sera uniquement sur la concentration en polymères à ajouter pour obtenir la viscosité requise (risque de consommation importante de polymères).

Note 2 : la désignation « biodégradable » ne conduit pas forcément à ce que le fluide stabilisateur soit en conformité avec les réglementations du site receveur (cf. § 4.3.8.3).

4.4.2 - COMPARAISON DES SUSPENSIONS DE BENTONITE ET DES SOLUTIONS DE POLYMÈRES CONCERNANT LEUR UTILISATION

Le Tableau 3.10 propose une comparaison entre les suspensions de bentonite et les solutions de polymères (PHPA) selon leur utilisation.

Tableau 3.10 : Comparaison des suspensions de bentonite et des solutions de polymères sur leur utilisation

Suspensions de bentonite	Solutions de polymères
<i>Technique éprouvée et maîtrisée</i> par les entreprises	Consultation avec le fabricant : Nécessité de l'expertise du fabricant pour établir les caractéristiques de la solution de polymères en adéquation avec les caractéristiques du sol
Mélange et manipulation	
<ul style="list-style-type: none"> Examen de l'eau : teneur en sable, pH, dureté, teneur en chlorure Mélange avec un fort cisaillement et un temps d'hydratation adéquat Contrôle des propriétés de la suspension de bentonite (Tableau 3.6 dans le § 4.3.3.3) Préparation plusieurs heures avant utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> Lors de l'utilisation d'équipements de brassage ou de malaxage à fort cisaillement, risque de briser les polymères et donc de rendre la solution de polymères inefficace Peu adaptées à un forage avec circulation (directe ou inverse) pour évacuer les déblais Utilisation immédiate de la solution de polymères après préparation
Avant bétonnage (cf. § 4.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »)	
<ul style="list-style-type: none"> Bétonnage à réaliser rapidement après la fin du forage sous peine d'une dégradation du contact sol-pieu 	<ul style="list-style-type: none"> Bétonnage à réaliser rapidement après la fin de forage afin de limiter l'infiltration de la solution de polymères dans le sol
Mise en conformité du fluide stabilisateur	
<ul style="list-style-type: none"> Maintien des limites en viscosité et teneur en sable (lien direct entre la teneur en sable et la qualité du bétonnage) Importance du nettoyage du fond du forage pour ne pas piéger la suspension de bentonite et les sédiments sous la base du pieu, ce qui engendrerait le cas échéant, une diminution du terme de pointe Nécessité d'un temps de dessablage ou d'un temps de substitution 	<ul style="list-style-type: none"> Les particules mises en suspension décantent Nécessité d'un temps de sédimentation suffisamment long : entre 30 minutes et 2 heures (d'après la FHWA [3.2]) selon la taille du forage, la quantité de sédiments et le polymère Importance du nettoyage du fond du forage à l'aide d'un godet de curage ou de l'air lift⁽⁴⁷⁾ (cf. § 2.5.2 de ce fascicule et § 5.2 du fascicule 4) pour extraire les particules sédimentées en fond de pieu et ainsi ne pas diminuer le terme de pointe
Pression en tête du forage	
<ul style="list-style-type: none"> Introduction du fluide stabilisateur avant que l'excavation n'atteigne une profondeur provoquant des instabilités Maintien d'une hauteur suffisante des fluides stabilisateurs (<i>Note</i>) ; la différence de hauteur entre le niveau du fluide et le niveau de la nappe phréatique doit être au minimum de 1,5 m pour les suspensions de bentonite et de 2 à 3 m pour les solutions de polymères <p><i>Note : ce critère est important pour les suspensions de bentonite et particulièrement critique pour les solutions de polymères en raison de leur faible densité.</i></p>	
Principales difficultés	
<p>(causes et effets)</p> <ul style="list-style-type: none"> Un mauvais mélange ou maniement de la suspension de bentonite engendrant l'instabilité du forage Une épaisseur du cake excessive réduisant la résistance des parois Un curage du fond du trou inadéquat conduisant à un mauvais contact pointe-sol (cf. § 2.5) Une mauvaise qualité de la boue présente au moment du bétonnage ne permettant pas la bonne substitution de la suspension de bentonite par le béton (cf. § 4.2 du fascicule 4) 	<p>(causes) conduisant à une instabilité du forage</p> <ul style="list-style-type: none"> Une incompatibilité avec les conditions du sol Un endommagement des chaînes polymères avec un système de mélange non adapté Une pression du fluide en tête du forage insuffisante Un temps de sédimentation trop court Un curage inadéquat conduisant à un mauvais contact pointe-sol Le manque d'entreprises expérimentées

47. À utiliser avec précaution (cf. § 2.5.2).

CHAPITRE 5

Techniques de tenue des parois par tubage

5. TECHNIQUES DE TENUE DES PAROIS PAR TUBAGE

La distinction entre les deux types d'enveloppes (tube et chemise) et leur usage respectif sont présentés dans le § 5.1. Les différents tubes et chemises généralement utilisés sont détaillés respectivement dans le § 5.2 du présent fascicule et dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Le recours au tube pour la tenue du forage est avant tout lié aux conditions géologiques ou hydrogéologiques de l'ouvrage (§ 5.2.3 du fascicule 1 « Les différents types de pieux » et § 5.3 du présent fascicule). Son usage peut comporter certains risques détaillés pour le forage dans le § 5.4.

Pour le **retrait des tubes de travail provisoires lors du bétonnage**, il convient de se référer au § 5.7 du fascicule 4.

⚠ Ce chapitre concerne uniquement les pieux circulaires et les deux types d'enveloppe sont des cylindres circulaires ou pseudo-circulaires dans le cas des chemises souples.

5.1 - GÉNÉRALITÉS SUR LE TUBAGE

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 (*Note 1*). Lorsque le tube ne concerne qu'une petite partie du pieu et particulièrement lorsqu'il vise la tenue des horizons superficiels uniquement, il est appelé « **virole** ». Il convient de bien distinguer le « **tube perdu** » – qui est un tube de travail à usage unique – et le « **tube définitif** », plus communément appelé « **gaine** » (*Note 2*) ;
- la **chemise**, qui est placée entre le béton et le sol (*Notes 1 et 3*).

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

Note 2 : il convient de distinguer le tube, ici décrit par sa fonction, du tube en tant que produit métallurgique ; le tube – produit métallurgique – mis en place après forage du pieu (comme une chemise) est aussi appelé « **gaine** ». Les gaines peuvent servir, entre autres, à limiter les frottements sol-pieu ou à protéger le béton d'un environnement trop pollué.

Note 3 : le chemisage permet de désolidariser le béton du sol, de fait, il est traité en détail dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Intérêt du tubage pour l'exécution du forage

Le tube est mis en place, entre autres, 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 ;
- la **suppression de l'interaction entre la réalisation du pieu et le terrain ou la nappe** (par exemple, permettre de forer et de bétonner à sec sous nappe lorsque le tube est ancré dans une couche peu perméable) ;
- un **impact limité des efforts parasites en cas de tube perdu** (frottements négatifs – § 5.3.3, poussées latérales/transversales du sol – § 5.3.4).

Nota bene : L'intérêt des enveloppes pour le bétonnage des pieux forés est traité dans le § 2.4 du fascicule 4.

Importance du respect de la verticalité lors de la mise en place d'un tube

Un soin tout particulier doit être apporté lors de la mise en place d'une virole ou d'un tube (de travail ou définitif), car toute inclinaison entraîne une **déviabilité de l'intégralité du forage** (Figure 3.89). Le contrôle de la mesure de l'inclinaison du tube est présenté dans le § 7.2.3.

Lorsque le forage doit se poursuivre sous le tube, il existe un risque que **l'outil qui poursuit le forage s'accroche à la base du tube lorsqu'il est extrait, voire qu'il se bloque sous le tube** (Figure 3.106 dans le § 5.4.4), entre autres, en cas de tube foncé dans le sol avec une déviation importante, car la poursuite du forage au-delà du tube a souvent tendance à revenir à davantage de verticalité.

Un soin particulier doit être apporté au choix de la technique utilisée afin d'éviter toute déviation brusque du forage au niveau de la base du tube. **Cette déviation peut être générée par :**

- la technique de mise en place du tube ;
- la rencontre d'un bloc à faible profondeur dans des remblais de tête (*Note*), ou encore en présence d'un substratum rocheux incliné ou fracturé.

Note : la purge d'obstacles en tête, particulièrement des enrochements, est généralement la méthode de prévention privilégiée vis-à-vis des déviations.

Figure 3.89 : Tube foncé non verticalement provoquant une déviation de forage et traduite par un désaxement du kelly au niveau de la tête du tube



5.2 - LES DIFFÉRENTS TYPES D'ENVELOPPES

Différents types d'enveloppe en fonction de leurs caractéristiques

Les deux types d'enveloppe peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur épaisseur (*Note*), des matériaux qui les composent et de leur destination :

- les tubes :
 - les tubes « guide » ou viroles (§ 5.2.1),
 - les tubes récupérés (de travail) ou perdus (définitifs) (§ 5.2.2) ;
- les chemises semi-rigides et souples (cf. § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Note : l'épaisseur de ces enveloppes va dépendre du niveau de sollicitations ; ainsi les tubes qui doivent maintenir les parois durant l'excavation sont plus épais que les chemises.

Différents types d'enveloppe en fonction de leur hauteur de mise en œuvre

En fonction de la raison de son emploi, l'enveloppe peut être mise en œuvre :

- sur une hauteur limitée (*Note 1*) :
 - en partie supérieure du pieu, sous forme de tube ou chemise (*Note 2*),
 - sur une portion du pieu, ce qui peut présenter un gain économique non négligeable (par exemple, en cas de vide en profondeur) ;
- sur toute la hauteur du pieu sous forme de tube ou chemise (*Note 2*).

Note 1 : lorsqu'il s'agit d'un tube de longueur limitée en tête, alors il est appelé « tube guide » ou « virole » (§ 5.2.1).

Note 2 : les chemises sont traitées dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

5.2.1 - LES TUBES « GUIDE » OU VIROLES ET MURETTES-GUIDES

Définition de la virole et de la murette-guide

La virole, appelée aussi « tube guide » (Figures 3.90 et 3.92), est généralement un élément métallique, parfois muni d'un rebord, installé en tête du pieu. La virole ayant une utilité uniquement provisoire, elle est généralement constituée d'un tube épais (> 10 mm) pour faciliter son réemploi lors de la réalisation de nouveaux pieux. Elle est obligatoire pour les pieux forés à sec (sauf cf. *Note*) ou avec un fluide stabilisateur (article 8.2.4.4 de la norme NF EN 1536+A1).

Dans certains cas, la virole peut être remplacée par un ouvrage en béton armé, appelée alors « murette-guide ».

Dans le cas des barrettes dont la forme ne permet pas l'utilisation de viroles, des murettes-guides rectangulaires (Figure 3.91) sont adoptées. Mais il existe également la possibilité de mettre en œuvre des viroles métalliques rectangulaires, appelées « baignoires ».

Note : la partie supérieure de l'excavation doit être protégée par une virole, à moins que les deux conditions suivantes ne soient remplies (article 8.2.6.3 de la norme NF EN 1536+A1) :

- le forage est uniquement effectué dans un sol ferme ;
- le diamètre du pieu est inférieur à 0,6 m.

Figure 3.90 : Tube de travail inséré dans une virole



Figure 3.91 : Exemple de murette-guide



Fonction de la virole pour les pieux circulaires

La virole remplit trois principaux objectifs :

- éviter les éboulements en tête de forage ; lorsque les plateformes de travail sont en matériaux granulaires, la virole prévient l'éboulement dans le forage des éléments constituant cette plateforme ;
- guider l'outil sur les premiers mètres et faciliter ainsi le respect des tolérances (Note 1) ;
- éviter les risques de chute dans le forage (dispositif de prévention).

De plus, la virole a toute son utilité en cas d'absence de tube de travail ou de la chemise semi-rigide (Note 2) :

- pour servir de calage de la cage d'armature, on évite ainsi :
 - le poinçonnement du fond de forage par la cage ou les risques de flambement de cette dernière en contact avec le fond du forage,
 - un mauvais calage en altimétrie de la cage d'armature,
 - la descente ou la remontée de la cage d'armature lors du bétonnage ;
- dans le cas d'un forage avec fluide stabilisateur, la virole :
 - facilite le maintien du niveau du fluide dans le forage au-dessus de celui de la nappe phréatique,
 - protège les parois des éboulements liés au battillage lors de l'entrée et la sortie des outils de forage.

Note 1 : une virole mise en place préalablement par des moyens spécifiques et adaptés, puis vérifiée par un géomètre avant tous travaux de forage du pieu, améliore la précision de l'implantation au niveau de la plateforme de forage.

Note 2 : les chemises sont présentées dans le § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Fonction de la murette-guide

Les murettes-guides, généralement utilisées pour la réalisation de barrettes, sont provisoires et servent à :

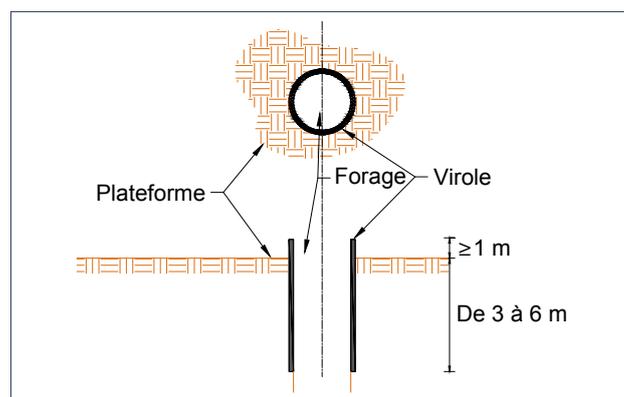
- diriger correctement l'outil de forage ;
- éviter tout éboulement de la tranchée en tête de forage ;
- garantir l'alignement ;
- suspendre la cage d'armature.

Positionnement de la virole

La virole est placée en tête du forage jusqu'à généralement 3 à 6 m de profondeur et dépasse de la plateforme d'1 m ou plus (Figure 3.92) (Note).

Note : lorsque la plateforme est plus haute que le niveau du sol (cas des travaux en site aquatique en général), en l'absence de tube récupéré ou perdu, la hauteur de la virole doit être augmentée afin de couvrir la distance comprise entre la plateforme et le sol existant (par exemple, lit de la rivière ou fond de la mer) et présenter une sur-hauteur de 1 m minimum par rapport au niveau des plus hautes eaux

Figure 3.92 : Position de la virole



Positionnement de la murette-guide

La murette-guide utilisée pour les barrettes ne dépasse pas le niveau de la plateforme (Figure 3.91) et mesure généralement entre 0,7 et 1,5 m de hauteur.

Mise en place et extraction de la virole

La virole est mise en place par fonçage, éventuellement avec un préforage.

La virole est extraite à la fin du bétonnage et avant la prise du béton.

5.2.2 - LES TUBES RÉCUPÉRÉS OU PERDUS

Définition des tubes

Les tubes métalliques (Figure 3.93) peuvent être :

- laissés en place, il s'agit alors d'un tube définitif dit « perdu » (foré tubé perdu « FTP » selon l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1) ;
- provisoires et récupérés après bétonnage (cf. § 5.7 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») appelé aussi « tube de travail », correspondant à l'appellation de pieu foré tubé récupéré, noté « FTR » selon l'annexe A de la norme NF P94-262 COMPIL1).

Figure 3.93 : Exemples de tubes métalliques définitifs (avec ici fers en attente pour liaison avec la semelle)



Fonction des tubes perdus

Le forage peut être réalisé à l'abri d'un tube métallique perdu :

- pour faire office de chemise (en cas de cavités ou karst ou d'environnement très agressif vis-à-vis du béton, c'est-à-dire > XA3 – cf. § 1.2.2 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés » sur les « classes XA : attaques chimiques ») ;
- en présence de sols mous ou bouillants ou très perméables, avec ou sans circulation d'eau ;
- lorsque la tête des pieux est hors sol (par exemple en site aquatique).

Les pieux inclinés doivent être tubés sur toute leur longueur lorsque l'inclinaison par rapport à l'horizontal est inférieure à 86°, sauf s'il peut être démontré que les forages non tubés sont stables (article 8.2.3.1 de la norme NF EN 1536+A1). Dans la pratique française, les pieux sont rarement inclinés.

Épaisseur des tubes (Figure 3.94)

Le choix de l'épaisseur du tube est du ressort de l'entreprise, particulièrement en cas de tube récupéré.

Les tubes doivent être :

- dans le cas des tubes de travail, d'épaisseur minimale de 10 mm au minimum et plus pour les gros diamètres pour résister sans se déformer aux efforts auxquels ils sont soumis durant leur mise en œuvre et le forage (ovalisation, déformations et déchirures des extrémités) et permettre leur réemploi (Note 1) ;
- dans le cas des tubes perdus, qui peuvent être des tubes de travail perdus (Note 2) :
 - d'une épaisseur minimale de 5 mm à adapter, généralement en fonction de leur diamètre et du mode de mise en œuvre (Note 3) ;
 - d'épaisseur qui tient compte de l'usure et de l'épaisseur sacrifiée à la corrosion (Notes 4 et 5), en particulier en site maritime.

Note 1 : il existe aussi des tubes qui sont livrés en éléments de longueur limitée et qui s'assemblent par clavetage et/ou vissage (Figure 3.95.b) ; l'assemblage (du fait des clavettes ou des vis) requiert une épaisseur supérieure (par exemple, diamètre extérieur 1 080 mm et intérieur 1 000 mm) ; ces tubes ne sont jamais définitifs.

Note 2 : dans ce cas, les tubes perdus jouent le même rôle que les tubes de travail (par exemple lors de fondations en rivière), ce qui peut s'avérer inefficace ou trop coûteux en terrain difficile, vu l'épaisseur à donner aux tubes (du fait de la présence de blocs de rocher ou de maçonnerie, bancs durs...).

Note 3 : en première approche au stade de la conception, une épaisseur d'acier correspondant à 1 % du diamètre du pieu peut être retenue, épaisseur à adapter en fonction des conditions de chantier :

- puissance du matériel ;
- contexte géologique (présence de blocs ou de bancs durs) ;
- poussées latérales (remblais) sur le fût (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux ») ;
- risques de corrosion ;
- ...

Note 4 : il faut faire d'autant plus attention à la conservation d'une épaisseur minimale du tube, lorsque ce dernier a un rôle structural (reprise des sollicitations).

Note 5 : en effet, ces pieux réalisés pour des piles de pont en rivière peuvent être découverts par des affouillements. Une protection contre les transports solides des sédiments par le flux des eaux est nécessaire pour protéger le béton de pieux.

Figure 3.94 : Vue de la section d'un tube de 1 m de diamètre



Base des tubes

Les tubes sont **ouverts à leur base**.

Liaison des tubes

Les tubes au-delà de 15 m de longueur doivent être transportés par convois exceptionnels s'ils ne dépassent pas 22 m (*Note 1*) ou alors découpés en tronçons qu'il faudra assembler sur chantier ; les longueurs désirées doivent donc être obtenues par découpage et/ou assemblage.

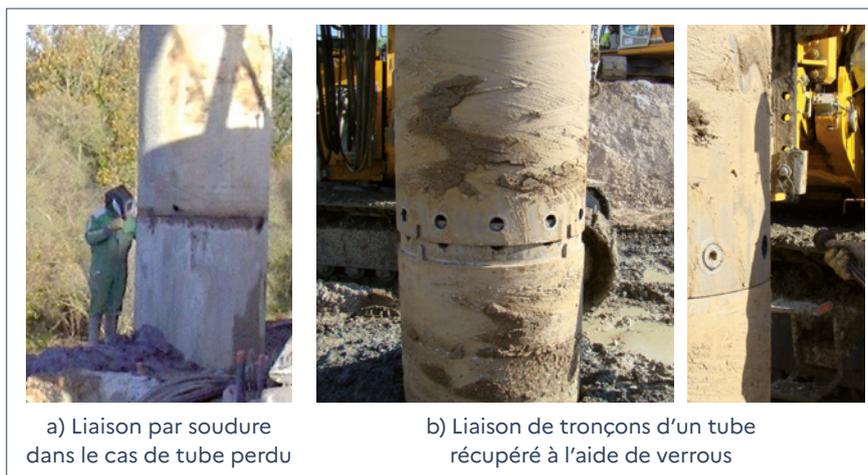
La technique d'assemblage peut être différente selon le type d'enveloppe :

- **dans le cas des tubes perdus**, cet assemblage doit se faire par soudure continue (*Note 2*). Cette soudure est réalisée sur site :
 - soit préalablement à la mise en œuvre avec les tronçons de tube positionnés horizontalement sur une aire propre et plane sur site,
 - soit pendant la mise en œuvre, en mettant en place le tronçon inférieur dans le sol pour positionner dessus et verticalement les suivants avant de les souder (Figure 3.95.a) ;
- **dans le cas des tubes récupérés**, l'assemblage peut être obtenu grâce à des verrous (Figure 3.95.b) ou par vissage ou plus rarement par soudage.

Note 1 : les difficultés de transport sont dues à l'encombrement des tubes, qui est du même registre que celui des armatures (cf. fascicule 5 « Les armatures des pieux forés »).

Note 2 : les soudures peuvent constituer un point de fragilité lors de la mise en œuvre ou du retrait du tube en raison des techniques employées ; il convient en particulier d'attendre le refroidissement du métal avant de solliciter intensément la soudure.

Figure 3.95 : Exemples de liaison entre tronçons de tubes durant leur mise en œuvre



a) Liaison par soudure dans le cas de tube perdu

b) Liaison de tronçons d'un tube récupéré à l'aide de verrous

Mise en œuvre des tubes et précautions associées

Les tubes sont mis en œuvre par **louvoisement** (*Note 1* et Figure 3.96), **battage** (dans toute nature de sols meubles), **havage** (*Note 2*), **rotation** (Figures 3.23.a et 3.23.b dans le § 3.1.2.1) ou **vibrofonçage** (dans toute nature de sols meubles baignés par une nappe ou non – Figure 3.97). Le **vérinage** ou le **lançage** (*Note 3*) peuvent être employés dans des cas particuliers.

Il est à noter que, bien que le **vibrofonçage** (*Note 4*) haute fréquence limite les vibrations, des restrictions d'utilisation à proximité d'ouvrages sensibles comme les voies ferrées, sont souvent préconisées.

Les tubes peuvent être :

- **descendus au fur et à mesure de l'excavation**,
 - en avance sur l'outil de forage, pour la traversée des sols lâches susceptibles de se décompresser, de s'ébouler facilement ou de se remanier sous la base du forage,
 - en retard sur l'outil de forage (*Note 5*), dans le cas de terrains compacts, le plus souvent cohérents, de terrains durs ou comportant des blocs, et nécessitant fréquemment l'utilisation d'un trépan ;
- **directement descendus à leur cote finale**, dans les sols meubles. Ce procédé permet de séparer les phases de mise en place du tube (pouvant alors être réalisé en une seule fois) et d'extraction des déblais, évitant ainsi des pertes de temps parfois considérables et l'immobilisation coûteuse du système d'enfoncement du tube (*Note 6*).

Note 1 : la **louvoyeuse** ou **tubeuse-détubeuse** assure le serrage, le desserrage et le louvoisement du tube, c'est-à-dire le fonçage par mouvements de rotation alternés successifs associés généralement à un vérinage vertical.

Note 2 : le **procédé par havage** consiste à exécuter le forage à l'aide d'une soupape ou curette, soit à l'aide d'une benne preneuse ou encore d'un trépan-benne, à l'intérieur d'un tube de travail descendant sous son propre poids ou aidé par battage.

Note 3 : le **lançage** consiste à l'enfoncement par battage dans un sol pulvérulent fluidifié par injection d'eau [3.7].

Note 4 : le contrôle de la puissance du vibrofonçage est recommandé en présence de craie ou de sols limoneux ou vaseux sous nappe.

Note 5 : lors du forage, il est préférable que le tube soit en avance par rapport au forage. En cas de retard, des désordres peuvent être observés tels que les affaissements autour du tube, en présence de sols bouillants notamment ; les outils de forage aussi peuvent se retrouver coincés dans le forage (par exemple, blocs s'intercalant entre le godet et le tube ou encore le godet accrochant le tube et le tordant réduisant ainsi son gabarit de passage intérieur).

Note 6 : cet avantage peut être limité en cas d'arrêt de l'enfoncement du tube (présence de couches compactes ou de blocs) impliquant un vidage du tube en plusieurs phases.

Figure 3.96 : Exemples de louvoyeuse



Figure 3.97 : Mise en place d'un tube de travail par vibrofonçage à l'aide du vibrofonçeur⁽⁴⁸⁾

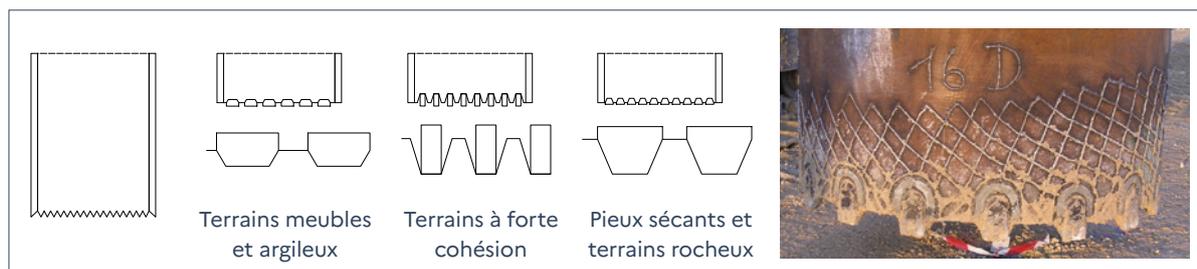
Enfoncement du tube en cas de surface de rocher inclinée

En cas de surface rocheuse inclinée, il peut s'avérer nécessaire d'enfoncer un tube jusqu'à obtention d'un contact complet avec le rocher et de le sceller au rocher (NOTE 2 de l'article 8.2.1.5 de la norme NF EN 1536+A1).

Caractéristiques de la base des tubes

En cas de mise en place par louvoisement, par rotation ou par havage, afin de faciliter la mise en œuvre du tube, la base de ce dernier peut être munie d'une **trousse coupante** (Figure 3.98) adaptée à la nature des terrains à traverser. Cette disposition n'est généralement adoptée que pour des tubes récupérés.

Figure 3.98 : Exemples de tubes métalliques munis d'une trousse coupante



48. Le terme vibreur peut aussi être utilisé.

Manutention et dressage des tubes

La mise en œuvre des tubes nécessite de passer fréquemment d'une position de stockage horizontal à une position verticale de fonçage (dressage – Figure 3.99) ou d'une position verticale après extraction à un stockage horizontal (couchage). La difficulté du dressage (ou du couchage) va dépendre de l'encombrement des tubes. **Il est important que le tube ne se déforme pas de manière irréversible** lors du passage de la position horizontale à celle verticale (ou inversement). Pour cela il est possible, par exemple, d'augmenter l'épaisseur du tube, d'utiliser un palonnier ou encore des élingages intermédiaires. Certaines organisations de chantiers permettent cependant d'extraire un tube et de le foncer immédiatement dans le sol à l'emplacement d'un autre pieu à réaliser, évitant ainsi le passage intermédiaire par la position horizontale.

Récupération des tubes provisoires

Généralement, on utilise la même méthode que celle utilisée pour le fonçage (rotation, vibrofonçage ou louvoiment) pour faciliter l'extraction.

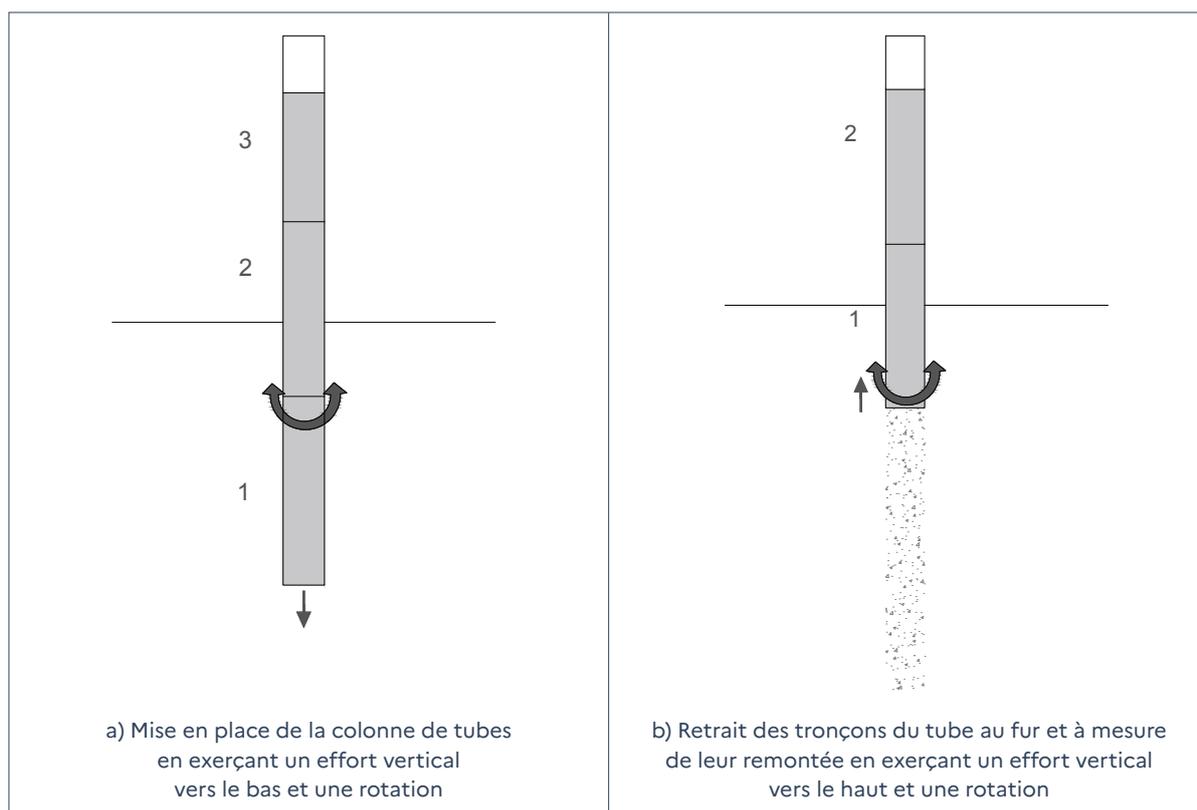
Dans le cas de tubes récupérés constitués de plusieurs tronçons, ces derniers sont démontés au fur et à mesure de leur remontée (Figure 3.100).

Il faudra se référer au § 5.7 du fascicule 4 pour le sujet du retrait du tube de travail provisoire lors du bétonnage.

Figure 3.99 : Exemples de dressage d'un tube



Figure 3.100 : Montage et démontage des tubes récupérés constitués de plusieurs tronçons (schémas de principe)



Vide annulaire dans le cas d'utilisation d'un tube récupéré avant le définitif

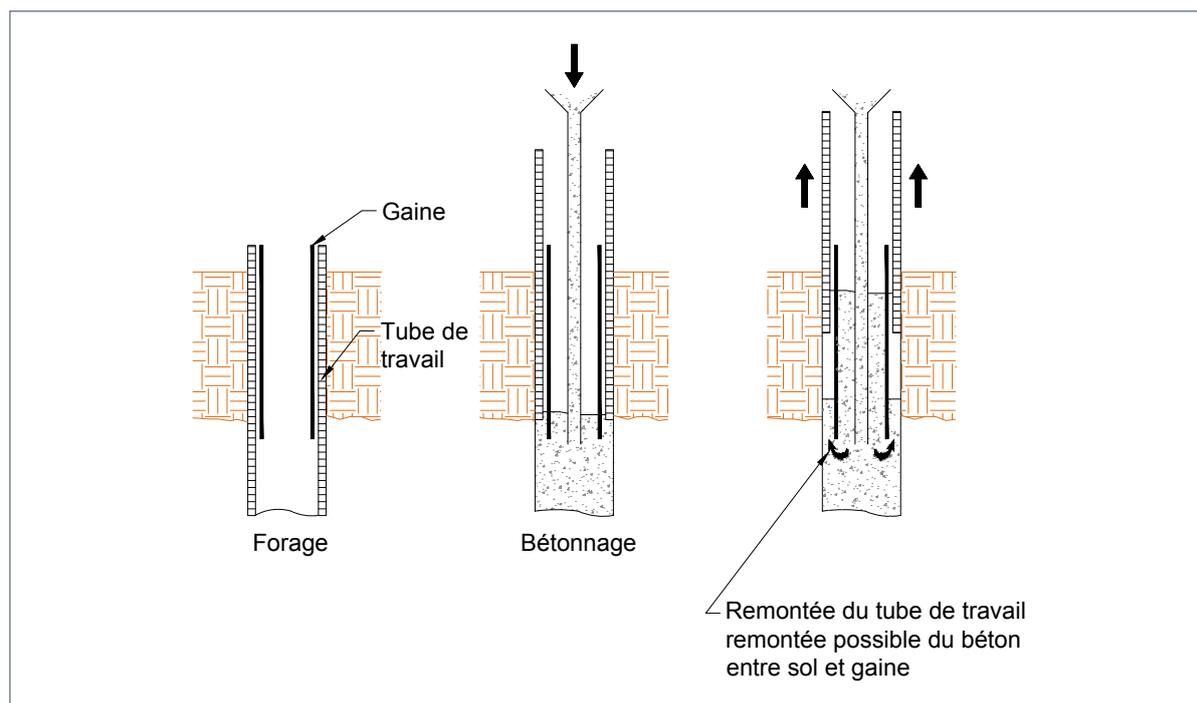
Afin d'éviter les risques d'accrochage le long de la paroi, le diamètre intérieur du tube récupéré (de travail) doit être supérieur (d'environ 100 mm) au diamètre extérieur de la gaine dans ce cas. L'espace annulaire ainsi créé va se remplir partiellement (souvent faiblement – *Note*), lors du bétonnage, sur une hauteur qui est fonction des diamètres relatifs pieu-gaine ainsi que de la hauteur bétonnée (Figure 3.101).

Cette configuration est complexe et demande une analyse soignée au cas par cas, dont ci-après quelques sujets d'attention :

- le comblement du vide annulaire. Sans comblement, ces vides restants vont engendrer des tassements en périphérie du pieu ;
- le comblement du vide annulaire où ce dernier serait en communication avec un vide (karst ou carrière souterraine) ;
- la rigidité de la gaine vis-à-vis de la poussée du béton est à vérifier, car elle peut se déformer ;
- l'absence de communication des nappes est à étudier ;
- la reprise des efforts horizontaux est à vérifier, car elle s'en trouvera modifiée. Cette configuration n'est donc pas conseillée dans ce cas.

Note : si la remontée du béton à l'extérieur du tube perdu est trop importante (comblement du vide annulaire), l'efficacité de l'enveloppe vis-à-vis des frottements négatifs (cf. § 5.3.3) éventuels peut être compromise.

Figure 3.101 : Remontée du béton dans l'espace annulaire compris entre la gaine et la paroi du forage



Difficulté d'approvisionnement

En raison des faibles quantités mises en œuvre, l'approvisionnement en tubes perdus neufs de dimensions spécifiques peut se révéler long (plusieurs mois – *Note*). Ce délai peut conduire à utiliser des tubes de second choix, voire de réemploi (selon les disponibilités) pour des chantiers rapides sans avoir le choix de l'épaisseur et, parfois, du diamètre.

Note : il est toujours souhaitable de se référer aux standards de production, qui sont rarement métriques (par exemple, 609 mm et non 60 cm, ou 812 mm et non 80 cm). Le diamètre des tubes indiqué est le diamètre extérieur et il faut tenir compte de l'épaisseur pour avoir le gabarit disponible pour le passage des outils venant excaver à l'intérieur du tube.

5.3 - CAS D'USAGE DE LA TECHNIQUE DES PIEUX FORÉS TUBÉS

La technique du tubage peut être recommandée en cas :

- de vides ou de karst (§ 5.3.1) ;
- d'éboulements (§ 5.3.2) ;
- de frottements négatifs (§ 5.3.3) ;
- de poussées latérales/transversales du sol (§ 5.3.4).

5.3.1 - EN CAS DE VIDES OU DE KARST

Risques en présence de vides ou de karst

Il peut résulter de la présence de vides ou de karst :

- des pertes de stabilité des parois du forage (en cas de perte brutale de fluide stabilisateur) ;
- des risques de perte d'intégrité du fût du pieu ou des surconsommations importantes de béton (traités dans le § 6.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

On peut craindre aussi un impact négatif sur le dimensionnement (frottements négatifs – cf. § 5.3.3, striction, frottement insuffisant) même si la fondation en tant que telle est rarement mise en péril tant que ces phénomènes ne règnent qu'au-dessus du niveau d'ancrage. En revanche, le danger est considérablement aggravé si la probabilité de tels risques s'étend sous la base des pieux.

Difficulté de connaître la géométrie du réseau des vides et karst

Plusieurs cas peuvent se présenter sur le chantier lors du forage :

- une identification de vide ou karst, il convient alors de colmater les vides. La technique à utiliser dépend de la nature et de l'étendue des vides (fissures, cavités...) ;
- aucune détection de vide ou karst, mais en présence de vide ou karst au voisinage du forage, une surconsommation du béton peut survenir en raison de la pression exercée par ce dernier (cf. § 6.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Solutions pour le forage des pieux en présence de vides ou de karst

En cas de présence de vides ou de karst, le recours au tubage (*Note*) permet de :

- réduire les déviations en cours de forage (Figure 3.60.b « Cas de traversée de blocs à cheval sur un forage lors de l'usage du trépan » dans le § 3.2.4.1).
- réduire la perte de fluide stabilisateur en cas de techniques mixte (recours à un fluide stabilisateur pour la suite du forage au-delà des vides).

Note : le tube perdu peut aussi permettre de limiter les pertes de béton au cours du bétonnage (cf. § 6.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Forage en cas de cavités importantes

En cas de cavités importantes, 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 (*Note*).

Note : en cas de karst, le battage des tubes dans du calcaire dur risque de les faire plier, dévier ou encore de les coincer, car les tubes sont vides et le karst n'est pas forcément centré sur le forage (cf. Figure 3.60 « Cas de traversée de blocs à cheval sur un forage lors de l'usage du trépan » dans le § 3.2.4.1).

5.3.2 - EN CAS D'ÉBOULEMENTS

Éboulements associés à la nature de 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*) au sein des lits sableux ou graveleux souvent présents dans ces formations, et conduisant à des éboulements localisés ;

- **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 ;
- **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 ;
- **les terrains pulvérulents sous nappe** (§ 5.4.1) ;
- **les terrains pulvérulents hors d'eau comportant des éléments de grandes dimensions** de type remblais rocheux, enrochements, éboulis de pente, alluvions fluvioglaciales.

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

Détection d'éboulement au cours du forage

La détection d'un éboulement est plus ou moins facile en fonction des conditions de forage :

- **à sec**, un examen visuel rend compte instantanément de la situation et de la gravité de l'éboulement ;
- **sous l'eau**, l'éboulement est généralement détecté parce que l'outil ne redescend pas au niveau qu'il avait atteint précédemment. L'importance de l'éboulement peut être déterminée par des mesures plus fines de profondeur et par des mesures de diamètre dans les zones les plus vulnérables révélées par les reconnaissances préalables ou en cours de forage ;
- **sous suspension de bentonite** :
 - par le refus de l'outil de descendre à la cote précédente (comme pour l'eau),
 - par les contrôles de la qualité de la suspension (*Note 1*) et de l'évolution de ses propriétés (densité, viscosité, teneur en sable).

⚠ **Si les instabilités sont récurrentes**, il convient de modifier le fluide stabilisateur (*Note 2*) ou de changer la méthode de forage (*Note 3*). **Ces instabilités peuvent être dues** :

- **au changement des propriétés chimiques du fluide stabilisateur au contact du sol** (sol avec du gypse ou avec beaucoup de tourbe ou encore présentant certaines pollutions) ;
- **à des passages plus grossiers ou très perméables dans le sol**, dans lesquels le cake se développe très mal, voire pas du tout.

Note 1 : il est difficile de détecter directement les éboulements par le contrôle du fluide stabilisateur. En effet, quand on excave, la suspension de bentonite se charge de sédiments en suspension (encore plus si on utilise une haveuse) changeant ainsi de densité, de viscosité et de teneur en sable. Mais l'éboulement ne charge pas particulièrement plus le fluide stabilisateur que le forage lui-même. En revanche, un fluide stabilisateur n'ayant pas les caractéristiques nécessaires (fluide trop faiblement dosé, fluide avec un pH trop faible entraînant un cake plus perméable...) peut entraîner des éboulements.

Note 2 : le fluide stabilisateur peut être modifié :

- en changeant de nature de bentonite pour, par exemple, s'adapter à la présence de gypse ou encore de pollution ;
- par des ajouts (sable fin ou plus grossier, ciment...) pour colmater des passages de sols plutôt perméables.

Note 3 : l'abandon de la technique pieu foré boue n'est pas toujours possible (en barrettes par exemple), une solution pourrait être l'injection préventive des sols.

Risques pour la bonne réalisation du pieu associés aux éboulements

Les éboulements en cours de forage sont parmi les plus importants incidents susceptibles d'affecter la réalisation d'un pieu exécuté sans tube de travail. Faute d'une détection d'instabilité en cours de forage, **la découverte d'un éboulement, une fois le pieu terminé**, pourra conduire à des réparations onéreuses, comme la réalisation de pieux supplémentaires à proximité, voire à une réfection complète du pieu.

Un éboulement pendant le forage conduira à des hors-profilés béton. S'il se répète :

- **lors d'un forage à sec**, il faut alors prévoir l'usage d'un fluide stabilisateur ou d'un tube ;
- **lors d'un forage sous fluide stabilisateur**, le fluide choisi n'est alors pas adapté (utiliser un autre fluide stabilisateur) ou il a perdu son efficacité (vérifier ses propriétés).

Dans les terrains pulvérulents hors d'eau comportant des éléments de grandes dimensions de type remblais rocheux, enrochements, éboulis de pente, alluvions fluvioglaciales, la seule solution est le recours au tube récupéré, 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 (cf. § 3.2.4.1 « Les trépans pour la réalisation des pieux de classe 1 »).

Ces éboulements qui peuvent être très conséquents deviennent particulièrement nocifs **quand les pieux sont exécutés en pied de remblai ou sur des pentes** dont la stabilité risque alors d'être mise en péril.

Nota bene : L'impact des éboulements sur le bétonnage du pieu est traité dans le § 6.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ».

Solutions aux risques d'éboulements

Différentes techniques peuvent être choisies pour la tenue des parois :

- un tube récupéré ;
- l'usage d'un fluide stabilisateur, ce procédé devrait permettre une tenue correcte des terrains (*Note*) sans qu'il soit nécessaire d'adjoindre par la suite une chemise.

Note : 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.

5.3.3 - EN CAS DE FROTTEMENTS NÉGATIFS

Action du tube ou d'une chemise semi-rigide sur les frottements négatifs

La mise en place d'une gaine ou d'une chemise semi-rigide (cf. § 2.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») permet de réduire les frottements négatifs (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »), car l'acier présente un coefficient de frottement moindre par rapport au béton. Ce tube ou cette chemise doit être disposé(e) sur toute la hauteur des couches compressibles et celles sus-jacentes, mais ne doit à priori pas être prolongé(e) dans les couches incompressibles sous-jacentes et à fortiori les couches porteuses.

Utilisation de couche bitumineuse⁽⁴⁹⁾

On utilise parfois des tubes revêtus par exemple par une couche bitumineuse (*Note 1*) d'au moins 10 mm d'épaisseur sur le tube perdu ou gaine, pour réduire le frottement métal-sol (si le principe de réduction du frottement négatif est avéré, il reste généralement à en mesurer l'efficacité – *Note 2*) ; cependant, il convient d'examiner au cas par cas la mise en œuvre, car certaines techniques ou certains sols sont plus dommageables pour le revêtement que d'autres.

À cause de cette mise en œuvre complexe, du faible retour d'expérience de ce type de dispositif (*Note 2*) et étant donné l'amélioration des matériels de forage qui permettent de faire des pieux plus gros et plus profonds avec une plus grande capacité portante, les projets sont actuellement plutôt conçus avec la prise en compte des frottements négatifs maximaux.

Note 1 : par son aptitude à fluier sous sollicitations lentes, le bitume, interposé entre le sol et le fût du pieu, permet de diminuer le frottement négatif.

Note 2 : la mise en œuvre de cette couche est délicate, en particulier sur chantier. En outre, il est difficile de préserver l'intégrité de la couche lors de la mise en place du tube dans le forage en raison de la nécessité de ne pas laisser de vide annulaire entre le bitume et le sol. De plus, en l'état actuel des connaissances, aucune information fiable ne peut être donnée sur la nature du bitume, ni sur sa mise en œuvre, et non plus sur le gain de ce procédé.

5.3.4 - EN CAS DE POUSSÉES LATÉRALES/TRANSVERSALES DU SOL

Actions contre les poussées latérales/transversales

Dans le cas des ouvrages d'art, afin de limiter les poussées latérales/transversales (cf. § 1.2 du fascicule 1 « Les différents types de pieux »), il est recommandé **de consolider au maximum les couches compressibles** par construction préalable des remblais ce qui limite ou élimine la cause.

49. Couche bitumineuse ou bitumeuse.

En présence de poussées latérales/transversales, les forages à l'abri d'un tube de travail sont préférables aux forages exécutés sous la seule protection d'un fluide stabilisateur.

Il est possible de prévoir **un vide annulaire entre le béton et le sol** par la mise en œuvre d'un double tube, ce qui limite ou élimine l'effet.

Ces solutions sont en même temps efficaces vis-à-vis du frottement négatif.

5.4 - INCIDENTS PARTICULIERS À L'UTILISATION DE TUBE

5.4.1 - RISQUES DANS LES SOLS PULVÉRULENTS NOYÉS OU COHÉRENTS MOUS

Risques dans les sols pulvérulents noyés ou cohérents mous

Le forage à l'abri d'un tube dans des sols pulvérulents noyés (Figure 3.102) peut créer **par effet de soupape**, l'extraction de matériaux au pourtour de la base du pieu pouvant conduire à des risques **d'affouillement ou d'éboulement** autour du pieu et **éventuellement au développement d'un phénomène de renard** à la base du pieu. Ces phénomènes peuvent se révéler dangereux pour les compagnons et pour les matériels.

Solutions pour limiter le phénomène de renard dans les sols pulvérulents noyés

Pour limiter le phénomène de renard, il convient **conjointement** :

- **d'augmenter la garde entre la base du tube et la base de l'outil de forage** ;
- **de maintenir un niveau d'eau** dans le tube supérieur à celui de la nappe phréatique (*Note*). Ce dernier point, extrêmement important, est souvent négligé car délicat à réaliser en cours de forage.

Note : 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.

Solutions pour limiter l'effet de soupape dans les sols pulvérulents noyés ou les sols cohérents mous

Pour limiter l'effet de soupape, il convient **de diminuer le diamètre de l'outil** en laissant du jeu par rapport au diamètre intérieur du tube, permettant ainsi au fluide stabilisateur de passer du dessus au-dessous de l'outil lors de sa remontée.

Figure 3.102 : Bétonnage d'un pieu foré en rivière préalablement rempli d'eau



5.4.2 - RISQUES EN CAS DE SUBSTRATUM ROCHEUX

Risques en cas de substratum rocheux

La rencontre du substratum rocheux peut entraîner deux types d'incidents :

- une **déformation du tube** lors de sa mise en place, liée par exemple à un fonçage particulièrement énergique. La poursuite du forage peut s'en trouver compromise, voire empêchée, sans mesures correctrices (Figure 3.103) ;
- une **non-fermeture du tube dans le substratum rocheux** à l'interface substratum-terrains sus-jacents, occasionnant des arrivées de sols pulvérulents. On parle alors de « renards solides ». Elle peut être causée par :
 - un ancrage insuffisant :
 - afin de ne pas déformer le tube de travail,
 - car le toit rocheux est rarement plan et présente souvent des indentations, des fractures ou un pendage par lesquels des sédiments peuvent s'immiscer,
 - ou encore dans le cas de pieux inclinés,
 - un forage dans un rocher aux parois irrégulières, avec hors-profils et sous-profils, notamment dans sa partie supérieure souvent très ébréchée (Figure 3.104), en raison de l'emploi du trépan. Ce dernier a été utilisé en raison du refus atteint par le tube au toit du substratum. Il en résulte entre le tube et le rocher des interstices parfois importants par lesquels peuvent s'ébouler en plus ou moins grandes quantités les matériaux pulvérulents sus-jacents.

Détection d'une non-fermeture du tube dans le substratum

Seule une **observation attentive des produits des déblais** permet de déceler ce problème lors du curage du fond de pieu.

Solution pour une non-fermeture du tube dans le substratum rocheux

Pour remédier à un souci de fermeture du tube, il convient d'appliquer **la méthode dite du « corroi d'argile »** qui consiste à introduire dans le forage du béton maigre, remonter légèrement le tube, repousser le béton à l'extérieur du tube, attendre que le béton fasse prise, puis refoncer le tube et reprendre le forage (Figure 3.105).

Figure 3.103 : Suspicion d'ovalisation sur un tube après un vibrofonçage dans le rocher



Figure 3.104 : Schéma type de l'arrivée de sable sous un tube de travail en contact avec le substratum

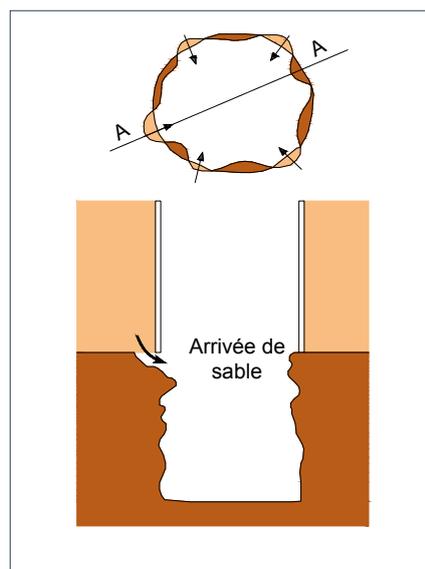
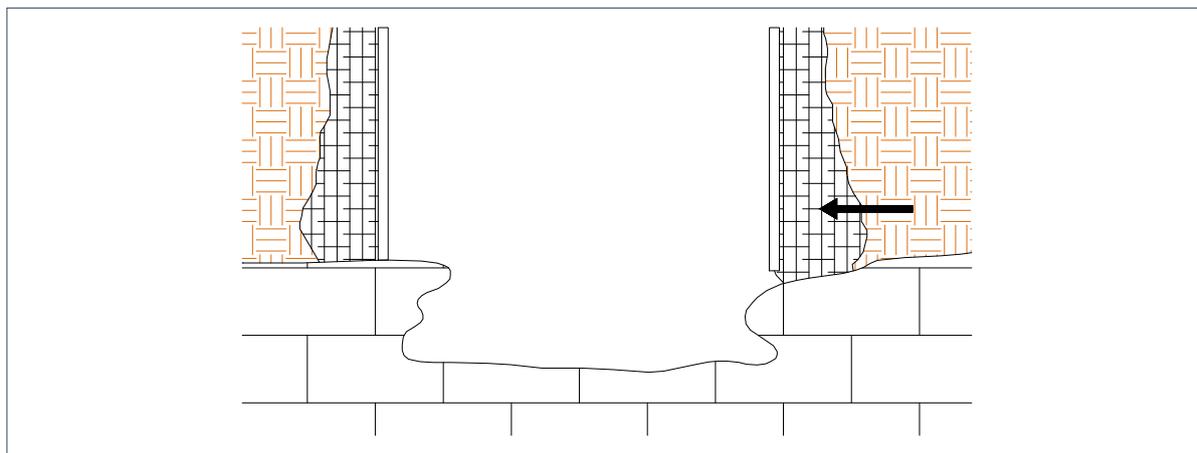


Figure 3.105 : Exemple de fermeture du tube de travail par « corroi d'argile »



5.4.3 - RISQUES ASSOCIÉS AU RETRAIT DU TUBE DE TRAVAIL

Phénomènes associés au retrait du tube de travail

Le retrait du tube de travail peut poser quatre problèmes :

- **la non-tenue des parois** excavées sous la poussée du béton (cf. § 5.7 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- **l'impossibilité de retirer le tube** :
 - dans le cas où le frottement latéral entre le sol et le tube récupéré s'oppose à l'extraction de ce dernier, donc la faisabilité de l'extraction va dépendre :
 - de la puissance d'extraction des machines,
 - du temps écoulé entre son introduction dans le sol et son extraction,
 - du diamètre des tubes, dont l'augmentation entraîne l'accroissement très rapide du frottement latéral,
 - de la profondeur, qui augmente la poussée du sol et donc le frottement latéral,
 - de la nature des sols (par exemple dans les sables et graviers, pour des épaisseurs supérieures à 20 m, il devient difficile de foncer et d'extraire des tubes de travail en raison de la densification du sol lors du fonçage),
 - dans le cas où le béton s'est rigidifié ou a commencé sa prise (cf. aussi § 5.7 du fascicule 4) :
- **l'entraînement de la chemise (souple ou semi-rigide) ou de la gaine** lors de la remontée du tube de travail, en raison d'une prise prématurée du béton ou de la présence de granulats (accentué dans le cas du louvoisement du tube pour son extraction). Ce phénomène est favorisé par un faible espace annulaire ;
- **le remplissage du vide annulaire** créé entre l'enveloppe (chemise ou gaine) et les parois du forage.

Phénomènes associés au retrait du tube de travail

Le risque de devoir laisser le tube provisoire en place entraîne :

- **un surcoût**, car ces tubes sont souvent plus épais que ceux utilisés dans le cas de tubages perdus ;
- **une diminution du frottement latéral mobilisable** et donc de la capacité portante du pieu ;
- **une perte de cadence** par manque de tube de travail, voire un arrêt de chantier jusqu'à réapprovisionnement pour les autres forages à effectuer.

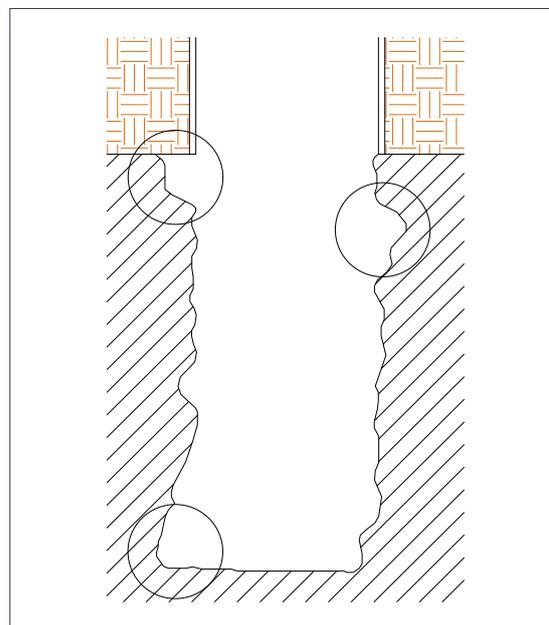
Il convient de s'assurer avant le bétonnage qu'il est possible de retirer le tube (matériel suffisamment puissant).

5.4.4 - ACCROCHAGE DE L'OUTIL DE FORAGE

Lorsque l'excavation est poursuivie au-delà du tubage, l'outil de forage peut accrocher la base du tube lorsqu'il remonte (Figure 3.106), générant des pertes de temps parfois considérables. De tels incidents sont fréquents lorsque la profondeur d'encastrement est supérieure à la hauteur de l'outil (par exemple lors du forage au trépan). On peut limiter le risque en poursuivant le forage au-delà du tube à l'aide d'un carottier associé à un trépan :

- **le carottier** permettant un découpage du rocher selon le diamètre intérieur du tube et une extraction de la carotte cylindrique par le carottier ou une destruction par trépanage du rocher découpé au carottier ;
- **le trépan** détruira la roche en laissant des sous-profils et le carottier viendra ensuite réaléser le forage à la bonne dimension, solution généralement appliquée en présence de roches très dures.

Figure 3.106 : Risque de blocage de l'outil d'excavation lors de sa remontée sous le tube de travail (points délicats relatifs à l'encastrement dans un substratum rocheux)



5.4.5 - RISQUES ASSOCIÉS AU TYPE DE SOUDURE DES TUBES

Les tubes utilisés dans les pieux sont généralement obtenus par soudure : soudure longitudinale et soudure en spirale (*Note*).

Note : la soudure en spirale n'est pas conseillée, car le tube ainsi réalisé résiste moins bien aux efforts de vibrofonçage ou aux efforts de torsion quand il est mis en place par louvoisement.

5.4.6 - RISQUES ASSOCIÉS AU TYPE DE SOUDURE DES TUBES

Le recépage des tubes perdus remplis de béton est très compliqué, il est préférable d'enlever le béton encore frais du tube de quelques centimètres sous l'arase sous réserve de protéger la tête du pieu vis-à-vis de toutes inclusions.

CHAPITRE 6

Recommandations en fonction de la nature des terrains

6. RECOMMANDATIONS EN FONCTION DE LA NATURE DES TERRAINS

Des tableaux de synthèse ont été établis afin de fournir des informations très générales sur le choix des outils de forage, de leurs accessoires (dents ou molettes) et des techniques de tenue de parois en fonction de la nature du sol.

⚠ Ces recommandations ne sont fournies qu'à titre indicatif et ne sauraient garantir le bon déroulement de l'excavation.

De plus elles sont données avec les connaissances actuelles et ne laissent pas présager de l'évolution des techniques et des matériels.

Nota bene : Le système de notation est global, il se base principalement sur la possibilité d'un bon compromis entre la qualité du forage, la cadence et le coût mais prend aussi en compte la pertinence économique de la technique (Note), c'est-à-dire que pour certains terrains relativement « faciles » à excaver, les outils les plus coûteux et/ou contraignants seront déconseillés. Ainsi, une note négative suppose que, selon les tableaux, l'outil de forage (Tableaux 3.11, 3.12 et 3.13) ou le choix des dents ou molettes (Tableau 3.14), ou encore la technique de tenue des parois (Tableau 3.15) ne sont généralement pas les plus efficaces.

⚠ Les choix doivent être pris en tenant compte du contexte particulier de chaque chantier et propre à chaque entreprise, ce que ces simples tableaux de synthèse ne pourront pas transcrire.

Note : la notion de coût est relative, car elle dépend de la culture de l'entreprise et du matériel qui devient de plus en plus performant. De plus, une méthode trop chère sera éliminée lors de la mise en concurrence avec d'autres au cours des appels d'offres.

6.1 - ADÉQUATION DES OUTILS DE FORAGE AUX NATURES DE TERRAIN

6.1.1 - LES OUTILS D'EXCAVATION PAR ROTATION

6.1.1.1 - Les tarières pour les pieux de classe 1

Pour la lecture du Tableau 3.11 : « + » Méthode conseillée, « 0 » Méthode possible, « - » Méthode déconseillée (cf. *Nota bene* en début du chapitre 6).

Tableau 3.11 : Tableau de synthèse de l'adéquation de la tarière aux différentes natures de terrain(p^{i*}, pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain issue de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

HN : hors nappe
SN : sous nappe

			Tarière ^{a)}											
			À dents plates				À dents pointues							
			p ^{i*} (MPa)	Simple hélice		Double hélice ^{c)}	À fond tournant ^{d)}	Simple hélice		Double hélice ^{c)}	À fond tournant ^{d)}	Conique ou au rocher		
				Simple attaque ^{b)}	Double attaque			Simple attaque	Double attaque					
Typologie de sol	Argiles et limons ^{e)}	Très mous à mous	HN	< 0,4	+	+	+	0	0	0	0	0	-	
			SN	< 0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Fermes	HN	0,4 à 1,2	+	+	0 ^{f)}	0	0	0	0	0	0	-
			SN	0,4 à 1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Fermes	HN	1,2 à 2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
		SN	1,2 à 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Très raides	HN	2	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
		SN	2	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Sols intermédiaires	Sable limoneux	HN	/	-	-	0	-	-	0	-	-	-
			SN	/	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Sable argileux		HN	/	-	-	0	-	-	0	-	-	-	
		SN	/	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Argile sableuse	HN	/	-	-	0	-	-	0	-	-	-		
	SN	/	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Sables et graves	Très lâches ^{e)}	HN	< 0,2	-	-	0	0	-	-	0	+ ^{h)}	-	
		SN	< 0,2	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
		Lâches ^{e)}	HN	0,2 à 0,5	-	-	0	0	-	-	0	+ ^{h)}	-	
		SN	0,2 à 0,5	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	
		Moyt ^t denses	HN	0,5 à 1	-	-	0	0	-	-	0	+ ^{h)}	-	
	SN	0,5 à 1	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-		
	Denses	HN	1 à 2	-	-	0	0	-	-	0	+ ^{h)}	-		
	SN	1 à 2	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-		
	Très denses	HN	2	-	-	0	0	-	-	0	+ ^{h)}	-		
	SN	2	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-		
	Craies	Molles	HN	< 0,7	+	+	-	-	+	+	-	0	- ⁱ⁾	
		SN	< 0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Altérées	HN	0,7 à 3	+	+	-	-	+	+	-	0	0	
		SN	0,7 à 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Saines	HN	3	-	-	-	-	+	+	-	0	+		
	SN	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Marne et calcaire marneux	Tendres	HN	< 1	+	+	-	-	0	+	-	0	-	
		SN	< 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Raides	HN	1 à 4	+	+	-	-	+	+	-	0	+	
	SN	1 à 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Très raides	HN	> 4	-	-	-	-	-	+	-	0	+		
	SN	> 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	Rocher	Altéré	HN	2,5 à 4	-	-	-	-	-	+	-	0	+	
		SN	2,5 à 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Fragmenté	HN	> 4 ^{j)}	-	-	-	-	-	+	-	-	+		
	SN	> 4 ^{j)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

a) Doit être utilisé à l'abri d'un tube en raison des risques de déviation. Peu d'intérêt de la simple attaque, sauf peut-être pour les matériaux présentant un comportement un peu « savonneux ».

b) En raison de la double hélice, l'angle des pales doit être assez important pour obtenir un pas suffisant permettant l'évacuation des déblais.

c) Pour les sols fins, le pas doit être suffisamment important pour permettre la remontée des déblais.

d) L'angle des pales doit être réduit par rapport à l'horizontal pour faciliter la remontée des déblais lâches et peu cohérents.

e) La double hélice est peu utilisée avec les sols fins en raison des difficultés de décrochage de la tarière.

f) Les tarières ne permettent pas de remonter des déblais sous eau.

g) Les outils à fond tournant sont généralement utilisés à l'abri d'un tube.

h) Les sables et graviers ont un caractère abrasif, il peut être fait usage de dents en tungstène.

i) La tarière conique ou au rocher dispose d'une double hélice, ce qui impose de ce fait un pas faible rendant difficile la remontée des matériaux sur les pales, et encore plus le décrochage de la tarière en surface.

j) Les reconnaissances classiques utilisées pour le dimensionnement (sondages pressiométriques et pénétrométriques) ne permettent généralement pas d'apprécier totalement les possibilités de forage dans les terrains les plus compacts. Lorsqu'il existe un doute sur les capacités de forage, il convient de réaliser des essais complémentaires de type :

- mesures de résistance à la compression simple ;
- essais d'abrasivité Cerchar (norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22) ou LCPC (norme NF P94-430-2) ;
- essais de dureté (norme XP P94-412).

6.1.1.2 - Les godets de forage (buckets) et les carottiers

Pour la lecture du Tableau 3.12 : « + » Méthode conseillée, « 0 » Méthode possible, « - » Méthode déconseillée (cf. *Nota bene* en début du chapitre 6).

Tableau 3.12 : Tableau de synthèse de l'adéquation de la tarière aux différentes natures de terrain
(p_l^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain issue de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

			Godet de forage ou bucket			Carottier ^{c)}		
			p_l^* (MPa)	À fond plat ^{a)}	À fond conique ^{b)}	À fond tournant	À pointes	À molettes
Typologie de sol	Argiles et limons	Très mous à mous	HN < 0,4	+	0	- ^{d)}	-	-
			SN		+			
		Fermes	HN 0,4 à 1,2	-	0	- ^{d)}	-	-
			SN		+			
	Raides	HN 1,2 à 2	-	+	- ^{d)}	-	-	
		SN						
	Très raides	HN 2	-	+	- ^{d)}	+	-	
		SN				-		
	Sols intermédiaires	Sable limoneux	HN /	+	0	-	-	-
			SN					
		Sable argileux	HN /	+	0	-	-	-
	Sables et graves	Très lâches	HN < 0,2	+	-	+	-	-
SN								
Lâches		HN 0,2 à 0,5	+	-	+	-	-	
Craies	Moyt denses	HN 0,5 à 1	+	-	+	-	-	
		SN						
	Denses	HN 1 à 2	+	-	+	-	-	
		SN						
Marne et calcaire marneux	Tendres	HN < 1	-	+	+	-	-	
		SN		+	-			
	Raides	HN 1 à 4	-	+	-	+	0	
SN			+		-	-		
Rocher	Très raides	HN > 4	-	+	-	+	0	
		SN				-	-	
	Altéré	HN 2,5 à 4	-	+	-	+	-	
Fragmenté	HN > 4 ^{f)}	-	-	-	+	+		
	SN							

a) Utilisé pour le curage du fond de pieu.

b) Les fonds coniques disposent d'une ouverture d'entrée des matériaux plus grande que les godets à fond plat. La taille de ces ouvertures provoque la retombée des matériaux pendant la remontée de l'outil à la surface.

c) Le carottier peut rencontrer des difficultés pour remonter les déblais en cas de rochers fracturés. Pour une utilisation sous eau, il doit généralement être accompagné d'une benne ou d'une tarière pour permettre l'évacuation des déblais.

d) Dans les argiles notamment assez dures à dures, les godets à fond tournant qui disposent d'une attaque parfaitement plate provoquent du « savonnage » au contraire des godets à fond conique.

e) Attention la présence trop importante de silex ou de bancs indurés peut augmenter la difficulté de forage.

f) Les reconnaissances classiques utilisées pour le dimensionnement (sondages pressiométriques et pénétrométriques) ne permettent généralement pas d'apprécier totalement les possibilités de forage dans les terrains les plus compacts. Lorsqu'il existe un doute sur les capacités de forage, il convient de réaliser des essais complémentaires de type :

- mesures de résistance à la compression simple ;
- essais d'abrasivité Cerchar (norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22) ou LCPC (norme NF P94-430-2) ;
- essais de dureté (norme XP P94-412).

6.1.2 - LES AUTRES OUTILS D'EXCAVATION

Pour la lecture du Tableau 3.13 : « + » Méthode conseillée, « 0 » Méthode possible, « - » Méthode déconseillée (cf. *Nota bene* en début du chapitre 6).

Tableau 3.13 : Tableau de synthèse de l'adéquation des trépan, des bennes et des marteaux fond de trou aux différentes natures de terrain (p_l^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain issue de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

HN : hors nappe
SN : sous nappe

Typologie de sol			p_l^* (MPa)	Trépan à lames	Benne ^{a) b)}		Haveuse ^{c)}	Marteau fond de trou
					À câbles	Hydraulique		
Argiles et limons	Très mous à mous	HN	< 0,4	-	+	+	- ^{f)}	-
		SN						
	Fermes	HN	0,4 à 1,2	-	+	+	- ^{f)}	-
		SN						
Raides	HN	1,2 à 2	-	+	+	- ^{f)}	-	
	SN							
Très raides	HN	2	+	-	-	- ^{f)}	-	
	SN							
Sols intermédiaires	Sable limoneux	HN	/	-	+	+	-	-
		SN						
	Sable argileux	HN	/	-	+	+	-	-
Argile sableuse	HN	/	-	+	+	-	-	
	SN							
Sables et graves	Très lâches	HN	< 0,2	-	+	+	0 ^{g)} -	-
		SN						
	Lâches	HN	0,2 à 0,5	-	+	+	0 ^{g)} -	-
		SN						
	Moy ^t denses	HN	0,5 à 1	-	+	+	0 ^{g)} -	-
SN								
Denses	HN	1 à 2	-	+	+	0 ^{g)} -	-	
	SN							
Très denses	HN	2	-	-	+	0 ^{g)} -	-	
	SN							
Craies	Molles	HN	< 0,7	-	+	+	-	-
		SN						
	Altérées	HN	0,7 à 3	-	+	+	0	-
SN								
Saines ^{d)}	HN	3	+	0	0	+	-	
Marne et calcaire marneux	Tendres	HN	< 1	-	+	+	-	-
		SN						
	Raides	HN	1 à 4	-	-	+	0	-
SN								
Très raides	HN	> 4	+	-	+	+	0	
Rocher	Altéré	HN	2,5 à 4	0	-	+	+	-
		SN						
Fragmenté	HN	> 4 ^{e)}	+	-	-	+	+	

a) La benne hydraulique a un poids plus important et une force de fermeture plus importante que la benne à câbles.

b) Le poids de la benne à câble ou la puissance de la benne hydraulique sont à ajuster à la nature et à la compacité des terrains.

c) La haveuse est utilisée lorsque l'on recherche une bonne verticalité même à grande profondeur.

d) Attention la présence trop importante de silex ou de bancs indurés peut augmenter la difficulté de forage.

e) Les reconnaissances classiques utilisées pour le dimensionnement (sondages pressiométriques et pénétrométriques) ne permettent généralement pas d'apprécier totalement les possibilités de forage dans les terrains les plus compacts. Lorsqu'il existe un doute sur les capacités de forage, il convient de réaliser des essais complémentaires de type :

- mesures de résistance à la compression simple ;
- essais d'abrasivité Cerchar (norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22) ou LCPC (norme NF P94-430-2) ;
- essais de dureté (norme XP P94-412).

f) La haveuse en présence de ces sols cohérents et collants risque de se colmater.

g) La technique de la haveuse peut être utilisée dans les sables mais peut se révéler coûteuse.

6.2 - ADÉQUATION DES DENTS ET DES MOIETTES AUX NATURES DE TERRAIN

Il s'agit principalement des dents et des molettes utilisées pour les outils d'excavation par rotation (tarières, godets de forage, carottiers, haveuses).

Pour la lecture du Tableau 3.14 : « + » Méthode conseillée, « 0 » Méthode possible, « - » Méthode déconseillée (cf. *Nota bene* en début du chapitre 6).

Tableau 3.14 : Tableau de synthèse de l'adéquation des dents et des molettes aux différentes natures de terrain
(p_i^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain issue de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

			p_i^* (MPa)	Dents		Molettes
				Plates	Pointues	
Argiles et limons	Très mous à mous	Hors nappe	< 0,4	+	- ^{a)}	-
		Sous nappe				
	Fermes	Hors nappe	0,4 à 1,2	+	- ^{a)}	-
		Sous nappe				
	Raides	Hors nappe	1,2 à 2	+	- ^{a)}	-
		Sous nappe				
	Très raides	Hors nappe	2	+	- ^{a)}	-
		Sous nappe				
Sols intermédiaires	Sable limoneux	Hors nappe	/	+	0	-
		Sous nappe				
	Sable argileux	Hors nappe	/	+	0	-
		Sous nappe				
	Argile sableuse	Hors nappe	/	+	0	-
		Sous nappe				
Sables et graves ^{b)}	Très lâches	Hors nappe	< 0,2	+	+	-
		Sous nappe				
	Lâches	Hors nappe	0,2 à 0,5	+	+	-
		Sous nappe				
	Moy ^{c)} denses	Hors nappe	0,5 à 1	+	+	-
		Sous nappe				
	Denses	Hors nappe	1 à 2	0	+	-
		Sous nappe				
	Très denses	Hors nappe	2	-	-	-
		Sous nappe				
Craies	Molles	Hors nappe	< 0,7	+	-	-
		Sous nappe				
	Altérées	Hors nappe	0,7 à 3	+	-	-
		Sous nappe				
	Saines	Hors nappe	3	-	+	-
		Sous nappe				
Marne et calcaire marneux	Tendres	Hors nappe	< 1	+	-	-
		Sous nappe				
	Raides	Hors nappe	1 à 4	-	+	-
		Sous nappe				
	Très raides	Hors nappe	> 4	-	+	0
		Sous nappe				
Rocher	Altéré	Hors nappe	2,5 à 4	-	+	0
		Sous nappe				
	Fragmenté	Hors nappe	> 4	-	+	+

a) Phénomène de savonnage qui rend inefficace les dents pointues dans ce type de sol.
b) En cas de sols plutôt abrasifs, il est possible d'avoir recours à des dents en tungstène.

6.3 - ADÉQUATION DES MÉTHODES DE TENUE DE PAROIS AUX NATURES DE TERRAIN

Pour la lecture du Tableau 3.15 : « + » Méthode conseillée, « 0 » Méthode possible, « Ø » Méthode à étudier, « - » Méthode déconseillée (cf. *Nota bene* en début du chapitre 6).

Tableau 3.15 : Tableau de synthèse des différentes méthodes de tenue des parois

(p)*, pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain issue de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

			p [*] (MPa)	Aucune intervention pour tenir les parois	Méthode de tenue des parois								
					Tubage avec mise en place				Fluide stabilisateur				
					Sous poids propre ^{a)}	Par battage ^{b) c)}	Par louvoisement ^{c)}	Par vibrofonçage	Bentonitique	Polymères PHPA ^{e)}	Eau claire		
Typologie de sol	Argiles et limons	Très mous à mous	Hors nappe	< 0,4	-	+ ^{e)}	+ ^{e)}	+ ^{e)}	+ ^{e)}	Ø	Ø	-	
			Sous nappe										
		Fermes	Hors nappe	0,4 à 1,2	+ ^{f)}	-	0	0	0	0	0	+	0
			Sous nappe										
		Raides	Hors nappe	1,2 à 2	+ ^{f)}	-	0	0	Ø ^{g)}	0	+	+	
			Sous nappe										
	Très raides	Hors nappe	2	+ ^{f)}	-	-	0	-	0	+	+		
		Sous nappe											
	Sols intermédiaires	Sable limoneux	Hors nappe	/	-	-	+	+	+	h)	-		
			Sous nappe										
		Sable argileux	Hors nappe	/	-	-	+	+	+			0	
			Sous nappe										
		Argile sableuse	Hors nappe	/	Ø	-	+	+	Ø				-
			Sous nappe										
	Sables et graves	Très lâches	Hors nappe	< 0,2	-	+	+	+	+	-	- ⁱ⁾		
			Sous nappe										
		Lâches	Hors nappe	0,2 à 0,5	-	-	+	+	+	+	- ⁱ⁾		
			Sous nappe										
Moy ^t denses		Hors nappe	0,5 à 1	-	-	+	+	+	+	Ø ⁱ⁾			
		Sous nappe											
Denses	Hors nappe	1 à 2	-	-	+	+	+	+	+	+			
	Sous nappe												
Craies	Très denses	Hors nappe	2	-	-	+	+	+	+	+	-		
		Sous nappe											
	Molles	Hors nappe	< 0,7	+	-	+	+	+	0	0			
		Sous nappe											
	Altérées	Hors nappe	0,7 à 3	+	-	+	+	+	0	0			
		Sous nappe											
Saines	Hors nappe	3	+	-	+	+	- ^{j)}	0	0				
	Sous nappe												
Marne et calcaire marneux	Tendres	Hors nappe	< 1	+	-	+	+	+	+	+	0		
		Sous nappe											
	Raides	Hors nappe	1 à 4	+	-	+	+	-	+	+			
		Sous nappe											
	Très raides	Hors nappe	> 4	+	-	+	Ø	-	0	0			
		Sous nappe											
Rocher	Altéré	Hors nappe	2,5 à 4	+	-	+	Ø	-	+	+			

a) La méthode la plus traditionnelle consiste à forer en avance du tube, entraînant sa descente au fur et à mesure, avec éventuellement appui sur le tube par la table de rotation.

b) Technique de moins en moins utilisée en France.

c) Il faut adapter l'épaisseur du tube au niveau des sollicitations pour le mettre en œuvre.

d) PHPA sont des polymères synthétiques dérivées des PAM (polyacrylamides) (cf. § 4.2.2 « Les solutions de polymères »).

e) Tube perdu.

f) Pour les pieux réalisés en foré simple, la tenue des parois dépend de la cohésion à court terme qui peut conduire à limiter la profondeur et le diamètre de forage.

g) Le vibrofonçage peut occasionner la mise en résonance du tube et gêner sa descente.

h) Renvoi dans le même tableau à la ligne « Argiles et limons ».

i) Les polymères PHPA sont moins adaptés à des terrains très ouverts. Du fait de leur absence de seuil, le maintien du niveau de fluide stabilisateur dépend de la viscosité du fluide et de la perméabilité du terrain. Il convient donc de vérifier si la viscosité nécessaire à limiter la perte de fluide dans le terrain est compatible avec le PHPA sélectionné.

j) Risque d'endommagement du tube, ce qui contraint à utiliser des tubes épais, non adaptés d'un point de vue coût, pour des tubes perdus.

6.4 - ADÉQUATION DE LA PUISSANCE DES MACHINES DE FORAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

Les choix des caractéristiques de la machine de forage (Tableau 3.2 dans le § 3.1.2.2) doivent correspondre aux spécificités des pieux à réaliser et du contexte géotechnique (Tableau 3.16). Le Tableau 3.16 **ne concerne que des pieux de 600 à 800 mm de diamètre**.

⚠ Note à l'intention des concepteurs, si rien ne remplace les expériences passées, et sous réserve de nombreuses mises en garde exposées ci-après, les concepteurs pourront s'inspirer du Tableau 3.16 pour vérifier la compatibilité du matériel avec leur projet.

⚠ Mise en garde quant à l'utilisation du Tableau 3.16

On gardera à l'esprit qu'**un sol est rarement homogène**, et que certains essais géotechniques, les essais pressiométriques⁽⁵⁰⁾ notamment, ne donnent que **des informations ponctuelles** au niveau des essais réalisés (donc par exemple ils ne mettent pas en exergue la présence de bloc dans le massif). De plus, les valeurs de pression limite et de module Ménard peuvent se trouver sous-évaluées pour se placer du côté de la sécurité pour le dimensionnement des fondations, objet du rapport géotechnique.

Pour ces raisons, il est conseillé de les coupler avec d'autres reconnaissances pouvant donner des informations continues.

Du fait de l'obligation de forage en continu et de l'impossibilité de modifier les outils en cours de forage, les techniques de tarière creuse sont **plus difficilement adaptables en cours de chantier**.

Pour la lecture du Tableau 3.16 : « + » adaptée, « 0 » essai de faisabilité recommandé ou retour d'expérience à démontrer, « - » non adaptée (cf. ⚠ Note à l'intention des concepteurs et ⚠ Mise en garde).

50. Selon la norme NF EN ISO 22476-4 « Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4 : Essai au pressiomètre Ménard ».

Tableau 3.16 : Tableau fournissant un ordre de grandeur pour la phase conception des capacités des machines pour la réalisation de pieux de classe 2 (tarière creuse) dans des conditions optimales et pour des diamètres de 600 à 800 mm

(p_i^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain et E_M , le module pressiométrique Ménard issus de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4)

⚠ Tableau fourni à titre indicatif, le choix de la machine est du ressort de l'entreprise

Nature des terrains (Note 2)	Compacité des terrains (ordre de grandeur)	Capacité (Note 1) des machines de pieux de classe 2 (tarière creuse)				
		1	2	3	4	
Sol homogène de nature cohérente	$0,2 < p_i^* < 1,5$ MPa	+	+	+	+	
	$p_i^* < 3,0$ MPa	0	0	+	+	
	$p_i^* < 5,0$ MPa	-	0	0	+	
	$p_i^* > 5,0$ MPa	-	0	0	0	
Sol homogène de nature pulvérulente	$p_i^* < 3,0$ MPa	+	+	+	+	
	$p_i^* < 5,0$ MPa	0	0	+	+	
	$p_i^* < 8,0$ MPa	-	0	0	0	
Roche (Note 3) pour un ancrage limité	Altérée	$p_i^* < 2,5$ MPa	-	0	+	+
		$p_i^* < 4,0$ MPa	-	-	0	+
	Fragmentée	$4,0 \text{ MPa} < p_i^* < 8,0 \text{ MPa}$ et $E_M < 100 \text{ MPa}$	-	-	0	+
		$4,0 \text{ MPa} < p_i^* < 8,0 \text{ MPa}$ et $E_M > 100 \text{ MPa}$	-	-	-	0

Note 1 : les capacités des machines de tarière creuse sont indiquées pour la tarière simple rotation et double rotation, respectivement dans les Tableaux 3.2 et 3.3 (cf. § 3.1.2.2).

Note 2 : certains de ces terrains peuvent requérir une certaine vigilance lors du forage (cf. § 2.2.4.3) ou du bétonnage (cf. chapitre 6 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Note 3 : on distingue au niveau des roches :

- **la craie**, qu'il est d'ailleurs difficile de classer dans l'un des types de sol du Tableau 3.16, particulièrement lorsqu'elle comporte des bancs de silex ;
- **les terrains schisteux**, dont la nature du matériau constitutif et le pendage de la schistosité sont les caractéristiques qui, indépendamment de la compacité propre au terrain, influent très fortement sur les difficultés lors du forage ;
- **le substratum rocheux** : on rappelle que ces terrains ne font généralement pas partie du champ d'application des machines de type tarières creuses ; les évolutions des machines et le savoir-faire des entreprises peuvent éventuellement s'avérer compatibles avec le franchissement de niveaux indurés (roches calcaires, grès peu abrasifs...) ou la pénétration limitée dans certaines roches. Les reconnaissances classiques utilisées pour le dimensionnement dans les sols (sondages pressiométriques et pénétrométriques) ne permettent généralement pas d'apprécier les possibilités de forage dans les terrains rocheux et les sols indurés. Pour cette catégorie, on peut lever certains doutes par des essais complémentaires de type :
 - mesures de résistances à la compression simple,
 - essais d'abrasivité Cerchar (norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22) ou LCPC (norme NF P94-430-2),
 - essais de dureté (norme XP P94-412),
 - essais au dilatomètre plat (norme NF EN ISO 22476-11).



CHAPITRE 7

Contrôles lors de l'exécution des pieux

7. CONTRÔLES LORS DE L'EXÉCUTION DES PIEUX

Dans le cadre de l'organisation d'un chantier de pieux, **le maître d'ouvrage doit s'adjoindre le concours d'un bureau d'études géotechniques** afin de contrôler la bonne exécution des travaux et de lever les points d'arrêt prévus par le plan de contrôle qualité (*Note* et cf. fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »). Cette prestation entre dans le cadre d'une mission de supervision géotechnique d'exécution (mission géotechnique G4) au sens de la norme NF P94-500 (cf. Figure 2.2 dans le § 2.2 du fascicule 2). Elle est réalisée en collaboration avec le maître d'œuvre.

Le contrôle sur site est traité dans le § 7.1 et le § 7.2 présente **les techniques de mesure et étalonnage des paramètres de forage**.

Note : il y a souvent d'autres points d'arrêt dans le plan d'assurance qualité (PAQ) (cf. § 3.4 du fascicule 2) tels que le diamètre, la conformité du fluide stabilisateur après dessablage, la conformité de la cage d'armature.

7.1 - CONTRÔLE SUR SITE

7.1.1 - CONTRÔLE AU DÉMARRAGE DU CHANTIER

Au démarrage du chantier, un certain nombre de points sont à obtenir ou à vérifier lors du contrôle sur site :

- **l'altimétrie de la plateforme de travail** ;
- **le pieu de convenance** et éventuellement **le pieu de faisabilité** (cf. § 4.2 du fascicule 2 « Aspect généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

7.1.2 - CONTRÔLE EN DÉBUT DE FORAGE DE CHACUN DES PIEUX

En début de forage, un certain nombre de points sont à obtenir ou à vérifier lors du contrôle sur site :

- **l'implantation du pieu** en fonction des tolérances du marché (*Note 1* et la Figure 3.107) ;
- **les outils d'attaque** qui doivent être dans un état permettant la désagrégation du terrain ;
- **pour les pieux de classe 1** :
 - le diamètre et la longueur de la virole et/ou du tube,
 - la verticalité du forage (cf. § 7.2.3) ou du tube (Figure 3.112 « Mesure de la verticalité du tube » et cf. § 7.2.3.3), ou de la virole au démarrage du forage pour les pieux de classe 1 (ou de l'inclinaison, le cas échéant) ;
- **pour les pieux de classe 2** :
 - la longueur de la tarière installée, majorée le cas échéant de la longueur utile du cannotto (cf. § 3.2.3.1 « Le dispositif de forage pour la réalisation des pieux de classe 2 ») qui doit être supérieure à la profondeur à atteindre, et minorée de la hauteur minimale de la table de rotation (*Note 2*),
 - le diamètre de la tarière qui doit être conforme aux plans d'exécution et rester uniforme sur toute la hauteur (cf. § 3.2.3.2 « Géométrie des composants de la tarière »),
 - la tarière qui doit être rectiligne,
 - l'initialisation du dispositif de mesure de profondeur (cf. § 7.2.1.2) au démarrage du pieu, en déposant la base de la tarière sur le sol. Dans le cas d'une base conique, l'initialisation démarre lorsque toute la partie conique de la tarière a pénétré la plateforme,
 - l'obturateur qui doit être correctement mis en place.

Note 1 : pour l'implantation des pieux, l'axe du pieu à réaliser ou au minimum les files principales de l'ouvrage doivent être repérés par un géomètre avant la réalisation du pieu, puis on reporte le point d'implantation en positionnant, par exemple, trois piquets à égale distance tout autour (Figure 3.107), afin de conserver le repérage de la position du pieu lors des vérifications ultérieures, le piquet implantant l'axe du pieu disparaissant lors du forage proprement dit.

Note 2 : la présence d'un décrotteur ou de certains types de guides empêchent la table de descendre bas et donc la tarière de pénétrer complètement dans le sol, ce qui diminue d'autant la longueur utile.

Figure 3.107 : Principe d'implantation du pieu et vérification en cours de forage du pieu



7.1.3 - CONTRÔLE EN COURS DE FORAGE

Lors du forage, les points suivants sont à contrôler :

- **les tolérances géométriques** relatives (article 8.1.1.1 de la norme NF EN 1536+A1) :
 - à l'implantation (*Note 1*),
 - à la verticalité du forage ou à l'inclinaison, si les pieux doivent être inclinés (*Notes 2 et 3*),
- **l'adéquation de la géologie** prévisionnelle et de celle rencontrée en cours de forage par l'examen des déblais ;
- **les paramètres de forage** en direct sur les écrans ou manomètres situés dans la cabine de l'opérateur (poussée sur l'outil, couple, profondeur, vitesse d'avancement...);
- **les caractéristiques du fluide stabilisateur** le cas échéant (cf. § 4.3.3) ;
- **les arrivées d'eau et leur niveau d'arrivée dans le forage**, le cas échéant.

Durant le forage **des pieux de classe 2 (tarière creuse)**, les vérifications portent sur :

- **l'extraction limitée de volume de sol** lors du forage des pieux (cf. § 2.2.4 « Spécificités du forage des pieux de classe 2 ») ;
- **la progression régulière du forage** ;
- **l'absence d'action mécanique sur le dispositif de mesure de la profondeur** durant toute la réalisation du pieu, afin de ne pas nuire au bon enregistrement.

Les paramètres de forage suivants sont enregistrés et doivent être visualisables instantanément par le foreur (cf. § 2.2.3) :

- **la vitesse d'avancement** (*Note 4*) ;
- **le couple de rotation** ;
- **la vitesse de rotation** (*Note 4*) ;
- **la profondeur atteinte** (mesure cf. § 7.2.1.2).

Note 1 : sauf indications contraires dans les spécifications d'exécution, la tolérance géométrique relative à l'implantation des pieux forés verticaux ou inclinés au niveau de la plateforme de travail (Figure 3.108) :

- $e \leq e_{\max} = 0,10$ m pour les pieux forés avec D ou $W \leq 1,0$ m ;
- $e \leq e_{\max} = 0,10 \times D$ pour les pieux forés avec $1,0$ m < D ou $W \leq 1,5$ m ;
- $e \leq e_{\max} = 0,15$ m pour les pieux forés avec D ou $W > 1,5$ m.

Note 2 : sauf dispositions particulières du marché, la verticalité du forage est contrôlée à partir de celle du mât (cf. § 7.2.3).

Note 3 : sauf indications contraires dans les spécifications d'exécution, la tolérance géométrique relative à la déviation d'inclinaison (Figure 3.108) :

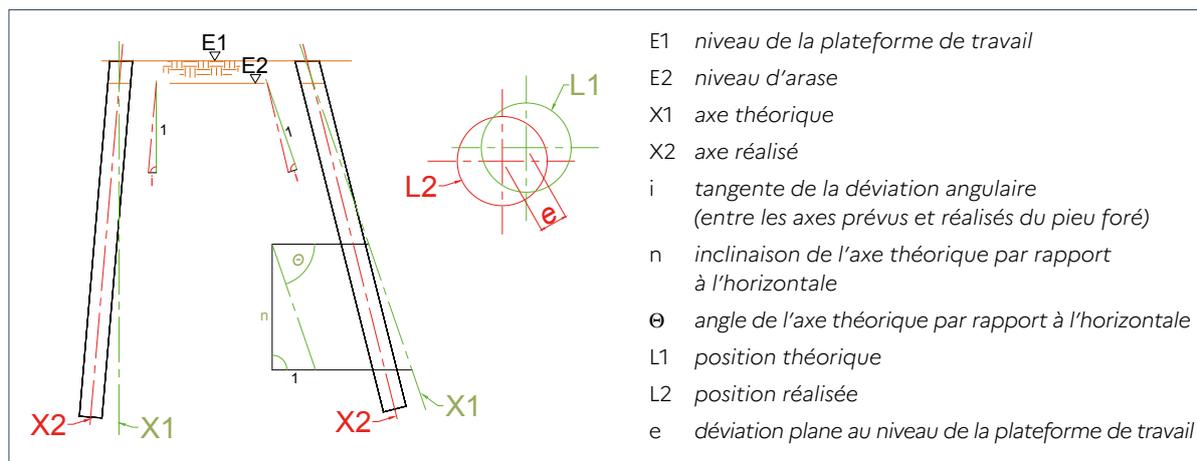
- pour les pieux verticaux ($n \geq 15$ et $\Theta \geq 86^\circ$), $i \leq i_{\max} = 0,02$,
- pour les pieux inclinés ($4 \leq n < 15$ et $76^\circ \leq \Theta < 76^\circ$), $i \leq i_{\max} = 0,04$.

Note 4 : le foreur adapte sa vitesse d'avancement en fonction de sa vitesse de rotation et réciproquement, de manière :

- à ne pas nuire à la stabilité des parois de forage ;
- à ne pas bloquer la tarière dans le terrain ;
- à ce que le volume des déblais (qui remonte le long des pales) reste limité.

Si ces deux premières contraintes ne peuvent pas être respectées, les limites de la technique sont alors atteintes.

Figure 3.108 : Définition des déviations géométriques d'exécution
(d'après un schéma de la norme NF EN 1536+A1)



7.1.4 - CONTRÔLE EN FIN DE FORAGE

Les contrôles pour lever le point d'arrêt de fin de forage

La fin d'un forage constitue généralement un point d'arrêt. Afin de lever ce dernier, les points suivants sont à contrôler :

- **vérification de l'adéquation de la géologie** prévisionnelle et de celle rencontrée en fond de forage par l'examen des déblais (Figure 3.109) ;
- **vérification de l'ancrage dans la couche porteuse**, telle que prévue dans la note de calculs, selon les informations disponibles :
 - par suivi de visu des conditions de forage (trépanage, carottage, augmentation du couple, diminution de la vitesse d'avancement...),
 - le cas échéant, à partir des enregistrements des paramètres de forage (*Note* pour les pieux de classe 2 et cf. « Vérification de l'ancrage des pieux de classe 2 » ci-après) préalablement étalonné sur le pieu de convenance (cf. les exemples de la Figure 3.110) ;
- **mesure de la profondeur du forage** :
 - à l'aide d'un décimètre plombé (cf. § 7.2.1.2),
 - des enregistrements pour les pieux de classe 2 (cf. § 2.2.3) ;
- **vérification des niveaux d'eaux** dans le forage et dans la nappe phréatique. Il est rappelé que dans le cas de forages dans des formations perméables (hors forage au fluide stabilisateur), le niveau de l'eau à l'intérieur du forage doit être maintenu à un niveau supérieur à celui de la nappe phréatique, afin de limiter les dégradations des parois du forage.

Note : la mesure de l'ancrage à partir des enregistrements de forage peut être contestable en particulier lorsque l'on a des horizons d'ancrage avec :

- des forts pendages pouvant entraîner un ancrage partiel ;
- des blocs pouvant conduire à des faux refus.

Figure 3.109 : Déblais du fond de forage

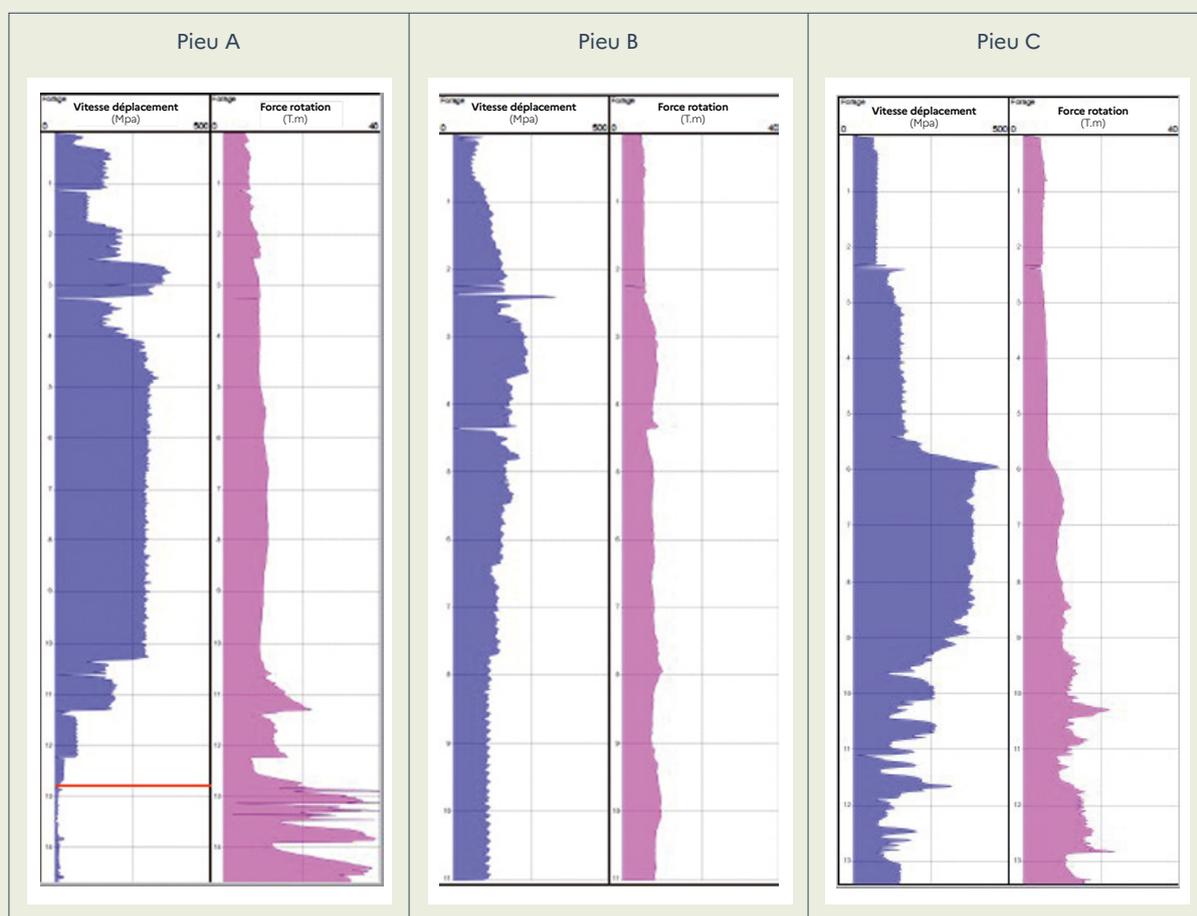


Vérification de l'ancrage des pieux de classe 2

Il existe trois cas de figure :

- **l'ancrage est bien identifié** (voir Pieu A sur la Figure 3.110) :
 - la profondeur du pieu n'est pas modifiée,
 - la profondeur du pieu est adaptée, ce cas de figure peu courant peut intervenir suite à des difficultés d'ancrage ;
- **pour la majorité des pieux, l'ancrage ne peut être identifié** (voir Pieux B et C sur la Figure 3.110) à partir des enregistrements de paramètres ; ce cas est courant, il faut alors se fier aux sondages existants et à la note de calcul ;
- **l'ancrage n'est pas identifié pour un pieu alors même qu'il est visible pour les autres pieux du projet, de plus le forage est éloigné d'un sondage existant**, dans ce cas, il faut prolonger le pieu pour atteindre un ancrage adapté, validé par le maître d'œuvre, géotechnicien G4.

Figure 3.110 : Illustration d'enregistrement de paramètres : ancrage incontestable / non clairement identifiable pour trois projets différents de réalisation de pieux de classe 2



On constate :

- **pour le pieu A :**
 - entre 10,2 m et 12,8 m, une modification des paramètres de forages, toutefois les paramètres enregistrés sont trop variables et progressifs **pour pouvoir justifier d'un ancrage de type « bien justifié »**,
 - à partir de 12,8 m (ligne rouge), une vitesse d'avancement faible et stable malgré une forte augmentation de la force de rotation (atteignant 20 T.m) => une transition de couche vers 12,8 m pourrait être utilisée comme un élément de justification d'un ancrage de type « bien justifié » ;
- **pour le pieu B :** décroissance de la vitesse d'avancement avec la profondeur sans augmentation significative du couple => pas d'ancrage identifiable ;
- **pour le pieu C :** à partir de 9,5 m, abaissement de la vitesse de pénétration insuffisamment marqué et trop variable, associé à une faible augmentation de la force de rotation => la transition de couche, si elle existe, n'est pas assez explicite pour pouvoir justifier de raccourcir le pieu en situant l'ancrage plus haut pour les pieux voisins.

Adaptation des longueurs des pieux selon la profondeur d'ancrage à partir des paramètres d'enregistrement pour les pieux de classe 2

Toutefois, une analyse multicritère des paramètres d'enregistrements de forage peut permettre de distinguer des transitions de couches et alors être un élément de justification d'une adaptation des longueurs des pieux, par exploitation de l'étalonnage sur le pieu de faisabilité.

Le type de justification doit recevoir préalablement l'accord de toute la chaîne de validation et est réservé au cas où les résultats des comparaisons sont incontestables (contraste fort de la compacité entre les couches).

Une analyse croisée des paramètres peut être réalisé. Certains font appel à ce qu'ils appellent à une énergie spécifique [3.8].

La longueur de pieu adaptée doit être réétudiée (Note 1) au regard des nouvelles hauteurs de couche de terrain mais aussi des nouvelles propriétés du pieu, rigidité verticale (Note 2) et le cas échéant horizontale du pieu modifié.

Note 1 : ce travail de réanalyse n'est généralement pas possible à réaliser durant le temps d'exécution du pieu. Si ce mode de justification est anticipé (par une expérience antérieure, par exemple), la note de calcul de la mission géotechnique G3 doit présenter des résultats « en fourchette » (ou similaire) pour que les adaptations soient connues et validées préalablement.

Note 2 : les rigidités ne sont pas évaluées pour tous les projets. En outre, les variations de rigidités induites par une modification de longueur sont souvent assez limitées, et en deçà de la précision des calculs géotechniques.

7.2 - TECHNIQUES DE MESURE ET ÉTALONNAGE DES PARAMÈTRES DE FORAGE

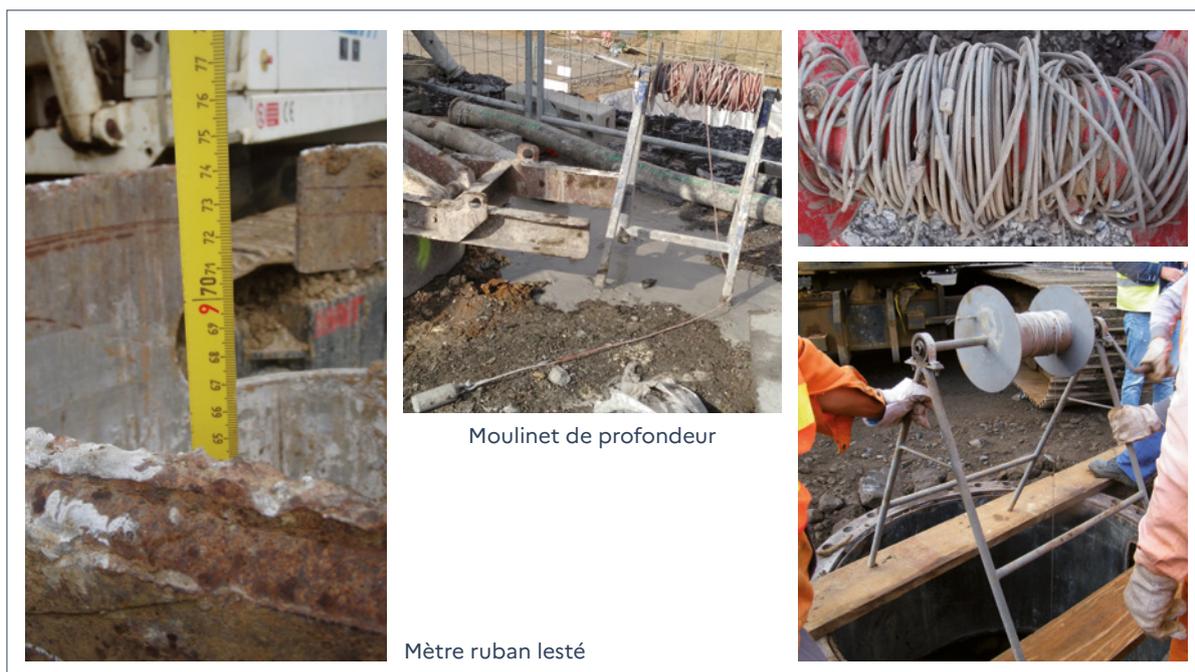
Après installation des matériels sur le chantier, on vérifie le parfait état de marche ainsi que l'étalonnage des matériels permettant la mesure et/ou l'enregistrement des paramètres de forage.

7.2.1 - MESURE DE LA PROFONDEUR

7.2.1.1 - Mesure de la profondeur des pieux de classe 1

Pour la mesure de la profondeur du forage des pieux de classe 1, on utilise couramment le décamètre à plomb (Figure 3.111).

Figure 3.111 : Mesure de la profondeur de forage



7.2.1.2 - Mesure de la profondeur des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Technique de mesure de la profondeur des pieux de classe 2 (tarière creuse)

La mesure de la profondeur est généralement obtenue à l'aide d'un profondimètre. Le modèle le plus fréquent consiste à fixer un câble métallique au sommet de la table de rotation, se déroulant pendant le forage. Le comptage du nombre de tours de l'enrouleur permet d'obtenir la profondeur atteinte.

Étalonnage du profondimètre des pieux de classe 2 (tarière creuse)

Au démarrage du chantier ou à chaque changement de câble, le profondimètre doit être vérifié.

Les étapes à effectuer pour vérifier son étalonnage sont les suivantes :

- une fois la tarière posée au sol en position de forage, la valeur de la profondeur est prise comme nulle dans l'enregistreur ;
- une marque est matérialisée précisément sur la tarière à une hauteur déterminée (généralement de l'ordre de quelques mètres) ;
- une tarière est vissée dans le sol jusqu'à ce que cette marque atteigne la surface de la plateforme. La profondeur de forage est alors vérifiée sur l'enregistreur, le cas échéant modifiée manuellement.

⚠ Un câble endommagé par une action mécanique doit être changé.

7.2.2 - MESURE DE LA HAUTEUR D'EXTRACTION EN VUE DE L'ÉJECTION DE L'OBTURATEUR RÉTRACTABLE DES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

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

Selon les technologies d'enregistrement employées, les méthodes d'étalonnage peuvent varier. L'étalonnage en vue de vérifier l'éjection de l'obturateur intervient après étalonnage du profondimètre et à chaque fois que l'on change l'outil de forage ou que l'on modifie l'obturateur.

Nota bene : Cette mesure n'est utile que lorsque la hauteur d'extraction fait partie du référentiel (Fascicule 68 du CCTG ou cahier des charges).

7.2.3 - MESURE DE LA VERTICALITÉ DU FORAGE

7.2.3.1 - Mesure de la verticalité pour les pieux de classe 1

Forage par rotation

La verticalité est contrôlée par un niveau positionné au niveau du kelly et/ou par un inclinomètre solidaire au mât.

Forage par percussion

La verticalité est contrôlée en observant la position des câbles par rapport au centre de la virole de tête ou à l'axe de la murette-guide.

7.2.3.2 - Mesure de la verticalité du forage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

La plupart des mesures de verticalité sont obtenues à partir d'inclinomètres mesurant la verticalité du mât de forage dans les deux directions.

Après le montage des éléments de tarière ou après la modification du matériel permettant le guidage de la tarière au niveau de la base du mât, la verticalité est vérifiée à l'aide d'un niveau à bulle posé sur le mât dans deux directions perpendiculaires. L'inclinaison relative du mât est alors vérifiée, le cas échéant corrigée.

⚠ Ce contrôle de verticalité ne donne que des informations sur la verticalité du mât et non de l'axe du forage dans le sol (*Note* et cf. § 3.2.3.5 « Le guidage des tarières creuses »).

Cette vérification valide le cas échéant le fonctionnement de l'inclinomètre de la machine ; elle est alors renouvelée chaque fois que l'on relève le mât.

Si l'inclinomètre est défaillant ou absent, cette vérification est effectuée à chaque mise en fiche.

Note : la plupart des machines sont conçues pour que l'axe des tarières soit parallèle au mât (ce qui évite de dimensionner les outils en fonction d'efforts parasites de flexion). Si ce n'est pas le cas, il faut corriger la valeur mesurée sur le mât pour obtenir l'inclinaison de l'outil (qui sera proche de celle du pieu). Les tarières, ayant leur propre souplesse, on peut avoir une forte déviation de la tarière dans le sol alors que le mât est vertical.

7.2.3.3 - Mesure de la verticalité des tubes

Au démarrage, la verticalité du tube est vérifiée à l'aide d'un niveau à bulle posé sur le tube (Figure 3.112).

Ensuite, la verticalité des pieux forés à l'abri d'un tube de travail peut être vérifiée avec une précision satisfaisante :

- à l'aide d'un fil à plomb descendu à différents niveaux au contact d'une même génératrice ;
- par le suivi de la mesure du centre du kelly ou du câble porteur des outils de forage par rapport au bord du tube lorsque l'outil est descendu à différentes profondeurs.

Figure 3.112 : Mesure de la verticalité du tube



7.2.4 - MESURE DU COUPLE DE ROTATION

Technique de mesure du couple de rotation

Le couple de rotation est obtenu à partir d'une mesure de la pression dans les flexibles hydrauliques actionnant la table de rotation.

Étalonnage de la mesure de la pression dans les flexibles

L'étalonnage de la mesure de la pression dans les flexibles est effectué en atelier lors des révisions de la machine. Un rapport d'étalonnage est établi à l'issue de la révision.

7.2.5 - MESURE DE LA ROTATION DE LA TARIÈRE CREUSE (PIEUX DE CLASSE 2)

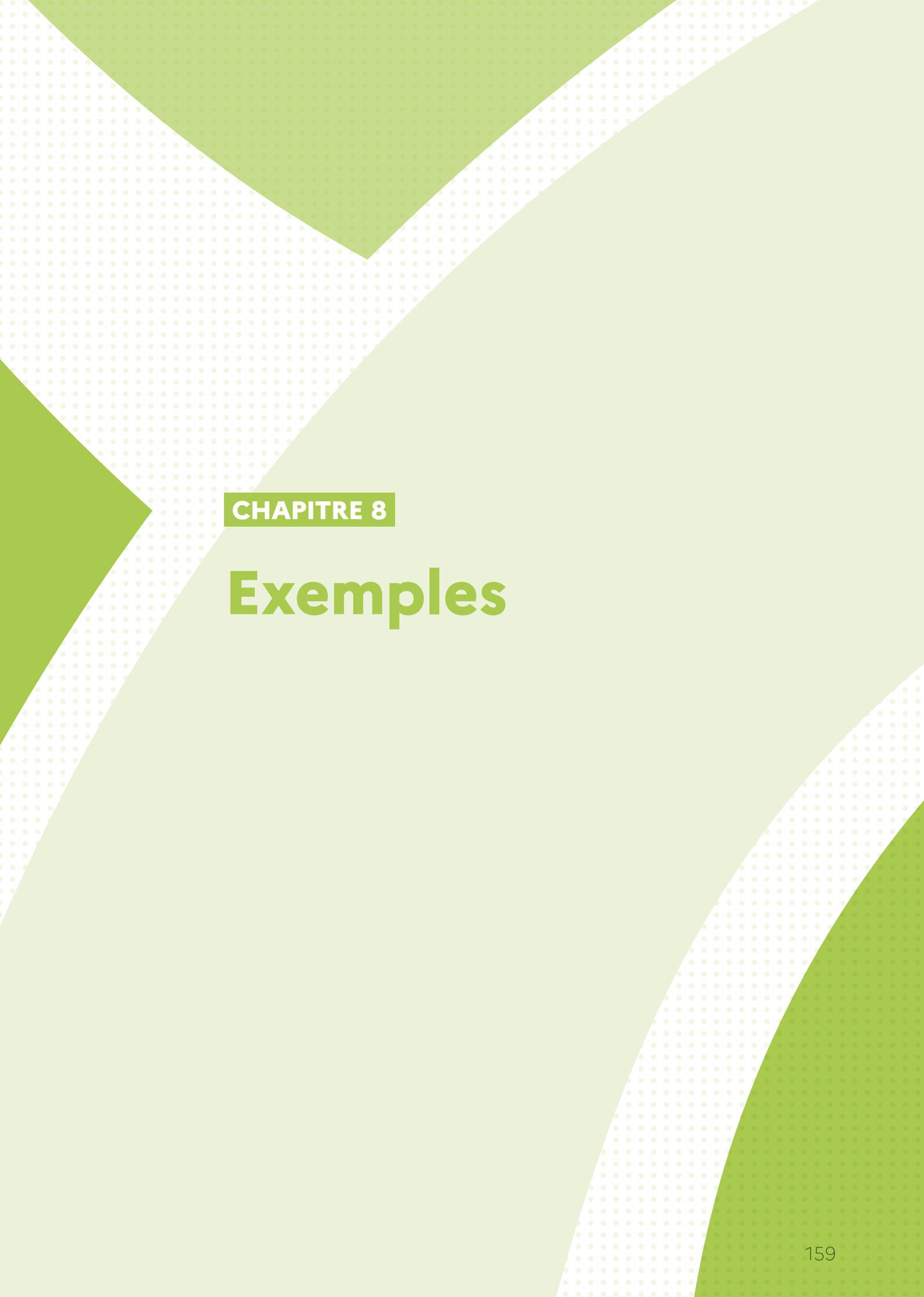
Technique de mesure de la rotation de la tarière creuse

Elle est généralement obtenue au moyen d'un capteur détectant la rotation d'un aimant fixé sur la table de rotation.

Étalonnage de la mesure de la rotation de la tarière creuse

Ce paramètre varie peu dans le temps, son étalonnage est effectué en atelier lors des révisions de la machine.

Après chaque révision de machine un rapport d'étalonnage est établi.



CHAPITRE 8

Exemples

8. EXEMPLES

L'objectif de ces exemples est de montrer qu'il existe **plusieurs solutions à un même contexte**. On constate que le choix de la conception dépend de nombreux critères. Ces exemples peuvent faire réfléchir le concepteur sur le choix des techniques et leurs répercussions.

⚠ Avertissement : il ne s'agit ici que d'exemples indicatifs avec des informations parfois partielles ou simplifiées, d'autres solutions pourraient être proposées. De plus, il est impossible de transcrire deux éléments clés dans la réussite de la réalisation d'un pieu que sont **le contexte et le savoir-faire des entreprises**, qui peut varier en fonction des techniques mises en œuvre et des terrains rencontrés.

8.1 - CHOIX DE TECHNIQUES D'EXCAVATION

Ce chapitre a pour objectif de montrer que dans un même contexte, plusieurs techniques sont possibles et qu'avec les pieux de classe 1, l'outil peut être changé en fonction des besoins (Figure 3.113). Idéalement, afin de limiter le temps nécessaire pour faire venir sur chantier de nouveaux outils, il est préférable que ces derniers soient déjà disponibles sur place.

Figure 3.113 : Changement d'outil lors du forage pour des pieux de classe 1



8.1.1 - EXEMPLE 1 : PIEU FORÉ TUBÉ ET PIEU FORÉ BOUE

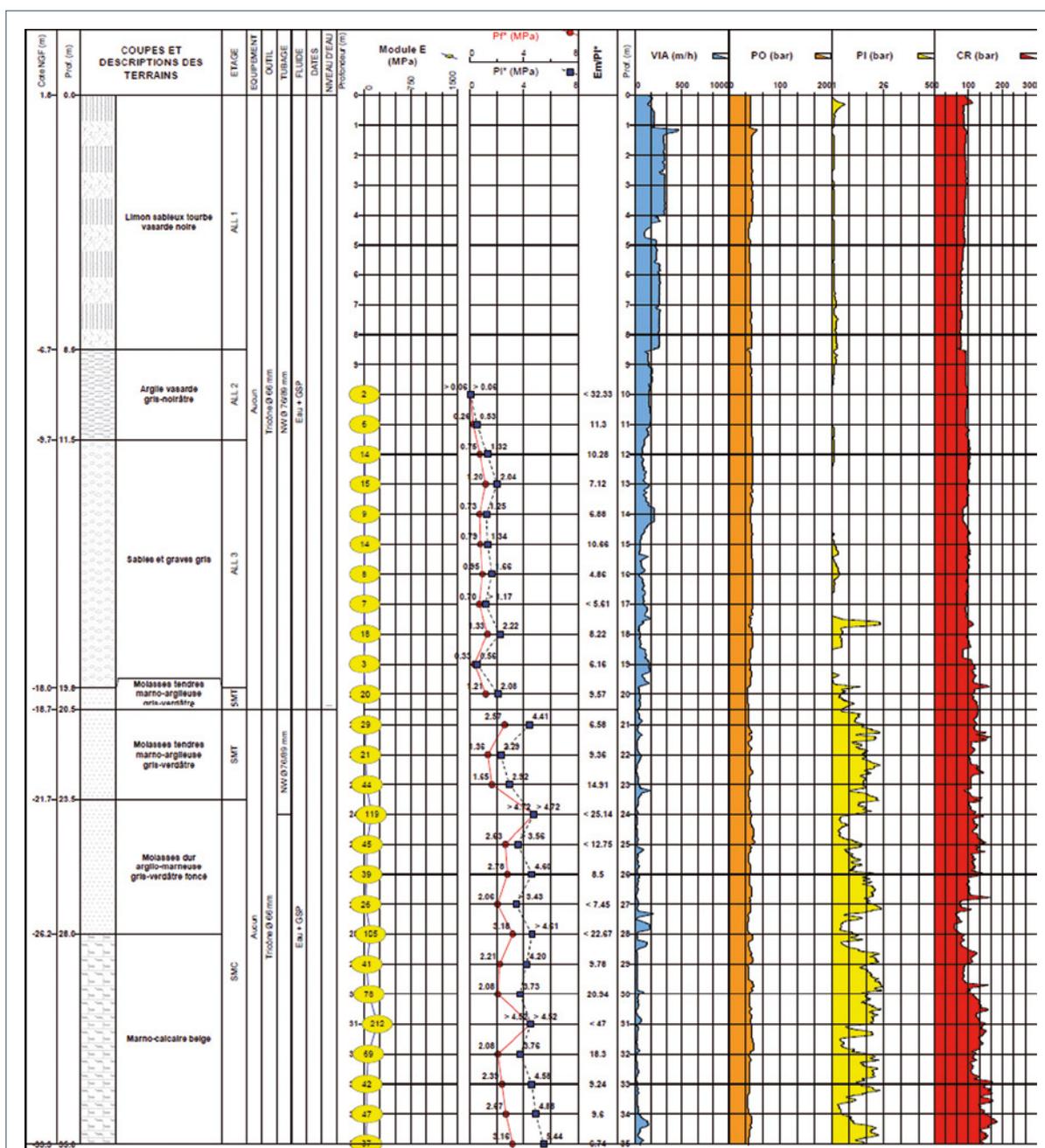
Le pieu à réaliser a une longueur de 25,5 m afin d'obtenir un ancrage dans les molasses dures. Plusieurs approches sont possibles pour la réalisation du forage d'un pieu en diamètre 1 200 mm dans le terrain décrit dans le Tableau 3.17 à partir de la coupe lithologique et des paramètres mécaniques mesurés au pressiomètre (Figure 3.114).

Un comparatif des différentes approches est présenté dans le Tableau 3.18.

Le niveau de la nappe

La nappe phréatique est rencontrée à 2,50 m de profondeur.

Figure 3.114 : Résultats d'un sondage destructif avec paramètres de forage et essais pressiométriques pour l'exemple 1



Nota bene : La pratique visant à ne pas réaliser des essais pressiométriques (ou pénétrométriques) dans les terrains qui seront négligés dans le dimensionnement des pieux, est fortement déconseillée, car les propriétés de ces derniers sont utiles pour la détermination du choix de la technique de forage, de l'envergure (poids) des machines et éventuellement des précautions à prendre pour le bétonnage (résistance des couches de sol à la poussée du béton frais).

Description des terrains et commentaires associés

Le Tableau 3.17 a été construit à partir des essais pressiométriques (p_i^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain et E_M module pressiométrique Ménard issus de ces essais pressiométriques Ménard réalisés selon la norme NF EN ISO 22476-4).

Tableau 3.17 : Tableau de synthèse des terrains rencontrés pour l'exemple 1

Terrain - matériaux	Profondeur - épaisseur	Propriétés et paramètres mécaniques	Commentaires
Limons sableux tourbeux et vasards, puis argiles vasardes (couche 1)	De 0 à 9 m	⚠ des essais pressiométriques auraient dû être réalisés (cf. <i>Nota bene</i> précédent) $P_{I \text{ supposé}} < 0,2 \text{ MPa}$ (<i>Note</i>)	Matériaux très compressibles et présentant une résistance très faible (surtout sur les 9 premiers mètres) Présence de tourbe franche entre 5 et 8 m => Soutènement des parois nécessaire => Prise en compte du risque d'instabilité du sol sous le poids de la machine (<i>Note</i>) => Frottements négatifs en cas de surcharges du terrain
	(couche 2) De 9 m à 11,5 m de profondeur 2,5 m d'épaisseur	Deux essais pressiométriques réalisés à 10 et 11 m, valeurs mécaniques mesurées très faibles $0,06 < p_i^* < 0,53 \text{ MPa}$ $2 < E_M < 6 \text{ MPa}$	
Sables et graves gris (couche 3)	De 11,5 m à 20 m de profondeur 8,5 m d'épaisseur	$0,56 < p_i^* < 2,22 \text{ MPa}$ $3 < E_M < 15 \text{ MPa}$	Matériau granulaire, frottant, sans cohésion et assez compact => Soutènement des parois nécessaire
Molasse tendre marno-argileuse gris-verdâtre (couche 4)	De 20 m à 23,5 m 3,5 m d'épaisseur	$2,08 < p_i^* < 4,41 \text{ MPa}$ $20 < E_M < 44 \text{ MPa}$	Rocher altéré tendre => Ne provoquant pas une usure importante de l'outil
Molasse dure argilo-marneuse gris-verdâtre foncée (couche 5)	De 23,5 m à 28 m 4,5 m d'épaisseur	$3,43 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 4,72 MPa $26 < E_M < 119 \text{ MPa}$	La molasse est un matériau pouvant avoir une composante gréseuse importante => Des éléments quartzeux très abrasifs Le caractère argilo-marneux permet à priori d'exclure ce risque. Rq : l'absence de perte d'injection laisse présager d'une absence de fracturation.
<p><i>Note :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Même si ces terrains de faible résistance sont négligés pour l'estimation de la capacité portante et du tassement, ils sont importants pour le choix de la technique. Une pression limite (p_i^*) de 0,53 MPa n'est pas si faible et permet de supporter la plupart des machines de pieux, mais en absence de mesure sur les 9 premiers mètres, il est difficile de statuer. • Cette absence de données est aussi préjudiciable pour le bétonnage, car nous ne sommes pas sûrs que ces sols avec la mention de tourbe vasarde, pourront résister à la poussée du béton frais. 			

Approche 1 : pieu foré tubé – tube perdu⁽⁵¹⁾ (FTP – classe 1, catégorie 3) jusqu'à 11,5 m puis pieu foré boue (FB – classe 1, catégorie 2)

Étant donné la compacité attendue du terrain sur les premiers mètres, les parois doivent être stabilisées par un tubage ou un fluide stabilisateur. Dans le cas présent, une solution avec seulement du fluide stabilisateur aurait conduit à un risque de forte surconsommation de fluide et de béton non contrôlée, sans garantir la stabilité des parois. Une solution avec tubage perdu permet de s'affranchir de ces risques et en garantissant une intégrité du béton. Une solution avec tube récupéré pourrait être étudiée sous réserve de contrôles spécifiques lors du bétonnage (cf. § 5.7 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »).

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise en place des tubes perdus jusqu'à la base des couches 1 et 2 (Notes 1 et 2) pour le soutien des parois du forage, nécessaire dans les sols tourbeux et les terrains granulaires rencontrés ;
- le forage à l'intérieur du tube ;
- la poursuite du forage sous fluide stabilisateur (niveau minimum du fluide à respecter – cf. chapitre 4 « Techniques de tenue des parois par fluides stabilisateurs » et Note 3) ;
- le curage du fond de forage (cf. § 5.2 du fascicule 4).

Risque de perte de fluide stabilisateur en raison de fracturation du rocher (pas dans ce contexte) ou d'une mauvaise adéquation du fluide avec les propriétés chimiques du sol.

Note 1 : mise en place d'un tube par rotation (cf. chapitre 5 « Techniques de tenue des parois par tubage »). Cette technique est la plus appropriée étant donné :

- la très faible portance du sol support, qui rend hasardeuse la mise en place et l'utilisation d'une louvoyeuse (cf. § 3.1.1 « Composantes des machines de forage »), qui nécessite généralement l'emploi de machine de très fort gabarit ;
- la très forte compressibilité des sols tourbeux, qui conduirait à vérifier la possibilité de tassements sous l'effet d'un vibrofonçage, voire du battage.

Note 2 : le porteur sera monté sur chenilles (cf. § 3.1.1) pour permettre les déplacements sur la zone tourbeuse sans nécessiter de terrassements lourds des sols en tête pour purger les couches tourbeuses qui y sont présentes et les remplacer par des matériaux non compressibles.

Note 3 : le soutien des parois est ici assuré par le maintien dans le forage d'un fluide stabilisateur (ici de la bentonite) à un niveau supérieur au niveau de la nappe phréatique. Il est de plus essentiel de maintenir en tête une virole (cf. § 5.2.1), dans le cas présent le tube perdu, pour prévenir tout risque d'éboulement en tête de forage et d'instabilité de la plateforme autour de ce forage.

Approche 2 : pieu foré tubé – tube perdu (FTP – classe 1, catégorie 3) jusqu'à 20,5 m puis pieu foré simple (FS – classe 1, catégorie 1)

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise en place des tubes perdus (jusqu'à 20,5 m) ancrés de 1 m dans la molasse tendre par rotation ou tubage à l'avancement du forage (Notes 1 et 2 de l'Approche 1 de l'exemple 1 et Note 1) ;
- le forage à l'intérieur du tube ;
- la poursuite du forage dans la molasse tendre et dure, avec l'eau comme fluide stabilisateur (à l'intérieur du tube un niveau d'eau minimal à prévoir – cf. chapitre 4 « Techniques de tenue des parois par fluides stabilisateurs »). Si la tenue des parois est incertaine dans le rocher (fracturation), prévoir un pieu foré tubé – tube récupéré (cf. l'Approche 2bis de l'exemple 1 ci-après) ;
- le curage du fond de forage.

Risque de difficultés de fichage des pieux sur 20,5 m : possibilité de rencontrer des difficultés de fichage des tubes dans les horizons graveleux.

=> Solution préconisée : forage des horizons à l'avancement du tube.

51. On rappelle que l'appellation des pieux de catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 indique « virole perdue » pour « tube perdu ».

Risques sur les avoisinants : en présence d'ouvrages sensibles, la mise en œuvre d'un tube par vibrofonçage ou battage (*Note 2*) des horizons indurés peut être compromise ou réalisable avec contrôle des seuils vibratoires (cf. § 2.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et déroulement du chantier »).

Risques de dégradation des tubes sur les horizons indurés.

=> **Solution préconisée** : prévoir des tubes plus épais.

Note 1 : on ne fait pas pénétrer le tubage dans le sol d'ancrage pour éviter d'avoir à mettre en œuvre une énergie importante pour un pieu de ce diamètre, obligeant aussi à utiliser un tube plus épais pour résister à cette énergie importante.

Note 2 : le battage n'est pas nécessaire si la foreuse possède une puissance suffisante en rotation et en appui.

Approche 2bis : pieu foré tubé – tube récupéré (FTR, classe 1, catégorie 4) jusqu'à 20,5 m et enfin pieu foré simple (FS, classe 1, catégorie 1)

Comparativement à la solution 2, cette technique permet une optimisation de la portance des pieux et une économie significative sur le poids de tube perdu.

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- **la mise en place des tubes** récupérés (jusqu'à 20,5 m) ancrés de 1 m dans la molasse tendre par rotation ou tubage à l'avancement du forage (*Notes 1 et 2* de l'Approche 1 de l'exemple 1) ;
- **le forage à l'intérieur du tube** ;
- **la poursuite du forage dans la molasse tendre et dure, avec l'eau comme fluide stabilisateur** (à l'intérieur du tube un niveau d'eau minimum – cf. chapitre 4 « Techniques de tenue des parois par fluides stabilisateurs ») ;
- **le curage du fond de forage.**

La chemise (cf. § 2.4.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés » et *Note*) est mise en place **après équipement du pieu**, jusqu'à 12 m, permettant la récupération du tube de travail (cf. « Risque lors du retrait » ci-après).

Risque lors du retrait du tube provisoire après chemisage et bétonnage. L'opération de remplacement du tube par la gaine est source de difficultés et peut nuire à la qualité du pieu, en raison du risque :

- **d'une prise prématurée du béton** ;
- **d'une perte de béton** dans l'espace annulaire laissé par le tube de travail ;
- **d'une remontée du chemisage** par adhérence avec le tube récupéré.

Note : une solution plus sécuritaire viserait à couper le tube de travail lors de son extraction à la cote de 12 m en lieu et place de la mise en œuvre de la chemise. Cela entraîne des surcoûts d'acier et de rabotage de tube qui peuvent compenser les risques présentés ci-avant.

Approche 3 : pieu tarière creuse (classe 2, catégorie 6) – à étudier au cas par cas

Cette technique présente un certain nombre d'avantages mais aussi des risques importants dont la non-maîtrise de la surconsommation de béton.

Risque de frottements négatifs certains : potentiellement très importants à cause l'épaisseur de la couche compressible et de l'éventuel élargissement du pieu dans cette couche très molle sous la pression du béton.

Risque d'impossibilité de forage : en cas de présence de molasse quartzeuse (*Note*).

=> **Solution préconisée** : pieu de faisabilité pour vérifier l'adéquation des moyens mis en œuvre et l'expertise de l'entreprise.

Risque de surexcavation dans les horizons sableux en raison de la présence de zones inférieures plus résistantes (cf. § 2.2.4.3 « Difficultés de la technique de la tarière creuse pour la réalisation des pieux de classe 2 »).

Note : l'enquête bibliographie et les expériences voisines peuvent permettre d'appréhender la présence de molasse quartzique et ainsi le risque de refus.

Comparaison entre les quatre approches (Tableau 3.18)

Tableau 3.18 : Tableau de comparaison des quatre approches pour l'exemple 1
(+ Avantages / - Inconvénients)

Critères	Approche 1 : Pieu FTP jusqu'à 11,5 m puis Pieu FB	Approche 2 : Pieu FTP jusqu'à 20,5 m puis Pieu FS
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'un tube perdu limité⁽⁵²⁾ en hauteur + Moins onéreuse qu'un tube perdu toute hauteur en dépit des installations de production et de traitement de la bentonite + Machine plus puissante pour la mise en œuvre du tube mais moins que pour un tube toute hauteur + Perte de fluide stabilisateur attendue faible + Perte de béton attendue faible + Moins de charge à reprendre pour le pieu en cas de frottements négatifs⁽⁵³⁾ (du fait d'un diamètre uniforme du pieu) + Gain de portance lorsque le pieu n'est pas mis toute hauteur + Portance moyenne des pieux : absence de tube dans les terrains sableux frottants + Possibilité d'engins de dimensions convenables au regard de la faible compacité des terrains de tête - Coût d'installation important : à privilégier en cas de nombre de pieux important 	<ul style="list-style-type: none"> + Perte de béton attendue faible + Coût d'installation intermédiaire : à privilégier en cas de nombre de pieux limité + Possibilité d'engins de dimensions convenables au regard de la faible compacité des terrains de tête + Gain de portance en cas de frottements négatifs - Coût des tubes de travail d'épaisseur⁽⁵⁴⁾ importante et munis d'outils spéciaux perdus pour le franchissement des horizons indurés - Portance plus faible des pieux, en raison du tube dans les terrains sableux frottants
Délais	+ Rapidité d'exécution : faible	+ Rapidité d'exécution : intermédiaire
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> + Adaptation des outils de travail au terrain facilitée + Possibilité d'utilisation d'outils spéciaux en cas de présence de bancs quartzeux - Grande technicité pour des profondeurs importantes 	<ul style="list-style-type: none"> + Adaptation des outils de travail au terrain facilité + Possibilité d'utilisation d'outils spéciaux en cas de présence de bancs quartzeux - Moyen de fichage des tubes important - Risque de difficultés de fichage des tubes dans les horizons graveleux
Environnement	+ Limitation des nuisances sonores (mécanismes en rotation pour la mise en place du tube et pour la réalisation du forage)	
Conseils BPU⁽⁵⁵⁾	Prévoir un prix d'utilisation d'outils spéciaux payés au ml : la présence de bancs indurés quartzeux généralement constatée dans cette couche géologique n'est pas précisément identifiée sur le sondage.	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir un prix d'utilisation d'outils spéciaux payés au ml (cf. « Approche 1 ») • Prévoir un prix des tubes au forfait en cas de dégradation du tube sur les horizons indurés

52. Le coût d'un tube perdu représente une part importante du coût total d'un pieu, pouvant rendre cette technique peu compétitive.

53. Avec le tube, moins de frottements négatifs, donc moins de charge à reprendre par le pieu.

54. Car les tubes de travail serviront de tubes perdus.

55. BPU : bordereau des prix unitaires.

Critères	Approche 2bis : Pieu FTR jusqu'à 20,5 m et enfin FS	Approche 3 : Pieu FTC
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	<ul style="list-style-type: none"> + Perte de béton attendue faible ou moyenne + Moins de charge à reprendre pour le pieu en cas de frottements négatifs⁽⁵⁶⁾ + Gain de portance lorsque le pieu n'est pas mis toute hauteur + Portance moyenne des pieux : absence de tube dans les terrains sableux frottants + Possibilité d'engins de dimensions convenables par rapport à la faible compacité des terrains de tête + Coût d'installation moins important : à privilégier en cas de nombre de pieux limité + Comparativement à l'Approche 2, cette technique permet une optimisation de la portance des pieux et une économie significative sur le poids de tube puisque, ici, il est récupéré 	<ul style="list-style-type: none"> + Portance des pieux : importante + Coût d'installation : faible à intermédiaire - Surconsommation de béton : difficilement quantifiable - Dimensions de la machine : importante nécessitant une plateforme de pieux adaptée - Charge supplémentaire sur le pieu en raison du frottement négatif
Délais	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : intermédiaire 	<ul style="list-style-type: none"> + Rapidité d'exécution : importante (attention en cas de planning tendu⁽⁵⁷⁾)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> + Adaptation des outils de travail au terrain facilitée + Possibilité d'utilisation d'outils spéciaux en cas de présence de bancs quartzeux - Grande technicité pour des profondeurs importantes - Moyen de fichage des tubes important - Risque de difficultés de fichage des tubes dans les horizons graveleux 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre de cage d'armature toute hauteur nécessitant une grande technicité réservée à quelques entreprises spécialisées - Risque d'impossibilité de forage en cas de présence de molasse quartzreuse - Risque de frottements négatifs le cas échéant fort - Risque de surexcavation dans les horizons sableux
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> + Limitation des nuisances sonores (mécanismes en rotation pour la mise en place du tube et pour la réalisation du forage) - Risques pour les avoisinants à l'extraction du tube de travail 	

56. Avec le tube, moins de frottements négatifs donc moins de charge à reprendre par le pieu.

57. Vigilance en cas de planning tendu, où les cadences élevées de cette technique peuvent être remises en question par une technique mal maîtrisée ou des moyens non adaptés.

Conseils BPU⁽⁵⁸⁾	<p>Cette solution peut être étudiée en variante si elle est proposée au stade ACT⁽⁵⁹⁾, selon les compétences de l'entreprise⁽⁶⁰⁾.</p> <p>Prévoir un pieu de faisabilité (conseillé hors d'ouvrage) pour vérifier la capacité de l'entreprise à installer le chemisage définitif.</p>	<p>La mise en place de cages d'armature sur 25 m le cas échéant demande à ce jour trop de technicité pour être proposée en solution de base. Cette solution peut être étudiée en variante si elle est proposée au stade ACT.</p> <p>Surconsommation de béton doit être étudiée : forfaitaire ou payé au m³.</p> <p>Prévoir un pieu de faisabilité (conseillé hors d'ouvrage) pour vérifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la capacité à forer les horizons molassiques • le cas échéant la mise en œuvre de cages d'armature <p>Vigilance en cas de planning tendu, où les cadences élevées de cette technique peuvent être remises en question par une technique mal maîtrisée ou des moyens non adaptés.</p>
Critères	Approche 2bis : Pieu FTP jusqu'à 12 m, puis Pieu FTR jusqu'à 20,5 m et enfin FS	Approche 3 : Pieu FTC

8.1.2 - EXEMPLE 2 : PIEU FORÉ TUBE RÉCUPÉRÉ, TARIÈRE CREUSE ET FORÉ BOUE DANS UN CONTEXTE MARITIME

Plusieurs approches possibles (solutions technico-économiques les plus avantageuses) sont proposées pour la réalisation du forage d'un pieu de 12 m de longueur et d'un autre pieu de 33 m dans le terrain décrit dans le Tableau 3.19 à partir de la coupe lithologique et des paramètres mécaniques mesurés au pressiomètre (Figure 3.115).

⚠ Ces deux exemples développés pour le pieu de 12 m dans le § 8.1.2.1 et pour celui de 33 m dans le § 8.1.2.2 sont indépendants et n'offrent pas la même capacité portante de pieux.

Les Tableaux 3.20 et 3.21 présentent un comparatif des différentes approches respectivement pour le pieu de 12 m et pour celui de 33 m.

Niveau de nappe

- **Niveau de nappe variable** soumis à la marée, battement journalier plus ou moins 4 m ;
- **suspicion de nappe en charge** dans la couche 3 sous la couche 2 en particulier à marée montante (information bibliographique).

Description des terrains et commentaires associés des terrains à forer

Le Tableau 3.19 a été construit à partir des essais pressiométriques (p_1^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain et E_M module pressiométrique Ménard issus de ces essais pressiométriques Ménard réalisés selon la norme NF EN ISO 22476-4).

58. BPU : bordereau des prix unitaires.

59. ACT : assistance pour la passation des contrats de travaux, assistance apportée au maître de l'ouvrage pour préparer la consultation des entreprises (et s'il y a lieu leur audition), pour analyser les offres des entreprises (et les propositions variantes s'il y a lieu) et pour préparer les mises au point permettant la passation du ou des contrats de travaux par le maître d'ouvrage (décret N°93-1268 du 29 novembre 1993).

60. Cette technique demande une maîtrise particulière de la part des entreprises qui, en cas de non maîtrise, peut nuire à la qualité du pieu ou à sa portance.

Figure 3.115 : Résultats d'un sondage destructif avec paramètres de forage et essais pressiométriques pour l'exemple 2

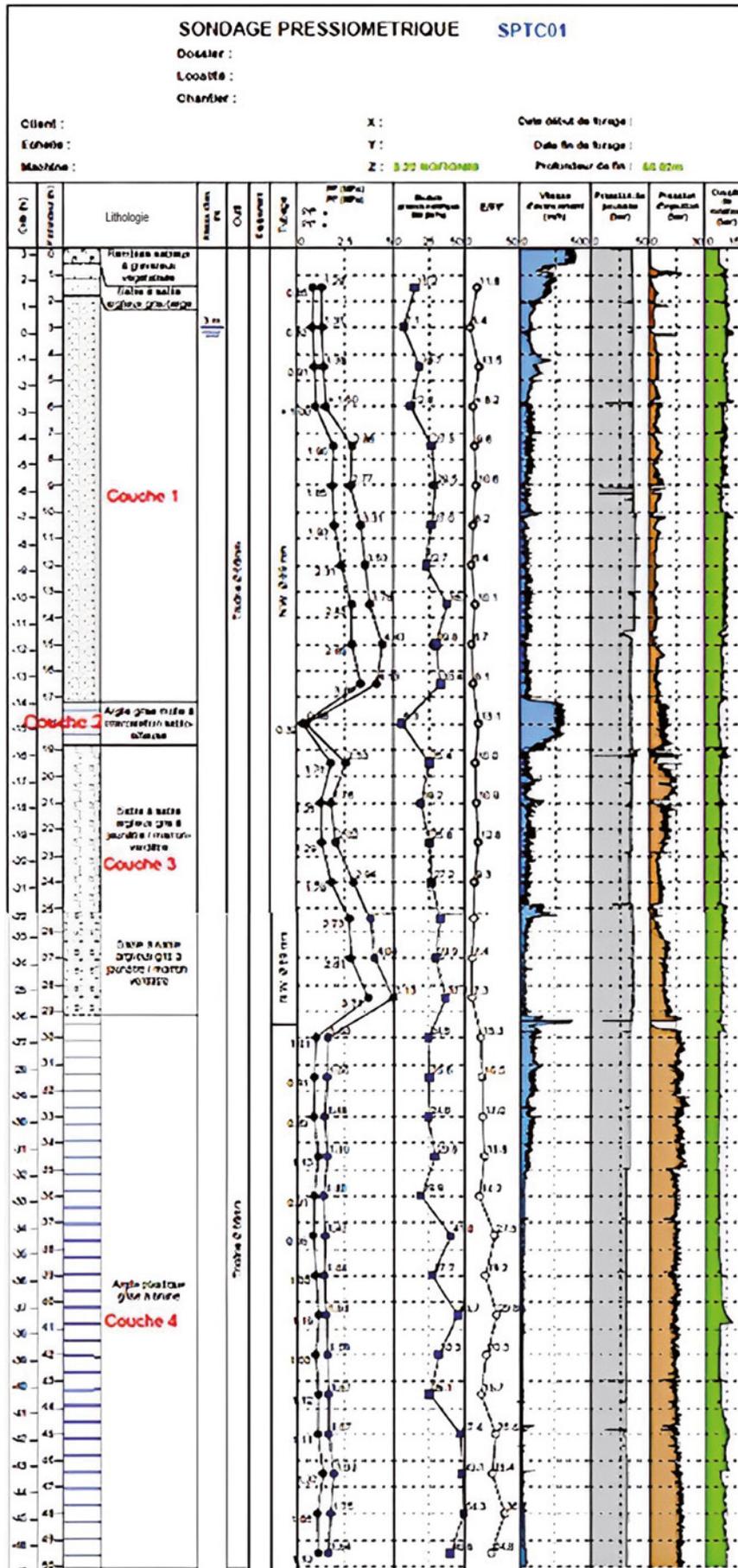


Tableau 3.19 : Tableau de synthèse des terrains rencontrés pour l'exemple 2

Terrain - matériaux	Profondeur - épaisseur	Propriétés et paramètres mécaniques	Commentaires
Sable fin quaternaire (couche 1)	De 1,90 à 17,1 m <i>15,2 m d'épaisseur</i>	$1,30 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 4,1 MPa $12 < E_M < 40$ MPa	Matériaux sans cohésion de compacité moyenne à importante => Soutènement des parois nécessaire => Risque de phénomènes de renard
Argile quaternaire (couche 2)	De 17,1 m à 18,9 m de profondeur <i>1,8 m d'épaisseur</i>	p_i^* environ 0,5 MPa E_M de l'ordre de 6 MPa	Matériau de faible compacité
Sable argileux du quaternaire (couche 3)	De 18,9 m à 29,1 m <i>10,2 m d'épaisseur</i>	$1,50 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 5,1 MPa $15 < E_M < 50$ MPa	Matériau de compacité moyenne à importante
Argile (couche 4)	De 29,1 m à 50 m <i>20,9 m d'épaisseur</i>	$1,50 < p_i^* < 1,7$ MPa $25 < E_M < 60$ MPa	Matériau de compacité moyenne

Note : la pression de poussée sur l'outil de forage semble trop importante par rapport à ce qu'autorise la norme.

8.1.2.1 - Pieux de 12 m de longueur

Approche 1 : pieu foré tubé – tube récupéré⁽⁶¹⁾ (classe 1, catégorie 4)

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise en place des tubes par vibrofonçage ou par rotation, l'énergie mise en œuvre devra être limitée pour ne pas liquéfier le terrain au-delà du voisinage du pieu ;
- puis le forage à l'intérieur du tube sous charge d'eau (niveau d'eau variable + 1,0 m/niveau de la nappe) : forage machine au kelly (*Note*) ;
- le curage du fond du forage ;
- l'équipement du pieu.

On procède ensuite au bétonnage, puis à la récupération du tube.

Risque de phénomènes de renard : la présence de sable fin sans cohésion peut amener à des phénomènes de renard en fond de pieux exacerbés par le battement de la nappe ; ces phénomènes ne sont généralement pas immédiats mais peuvent intervenir durant la phase d'équipement du pieu.

=> Solutions préconisées : maintenir une surcharge d'eau ou utiliser un fluide stabilisateur adapté.

Note : il est possible d'utiliser une machine de pieux forés avec tubage à l'avancement.

Approche 2 : pieu tarière creuse (classe 2, catégorie 6)

Conseil : si les pieux sont armés sur 12 m prévoir un béton avec retardateur et agent anti-ressuage.

Risque de surexcavation : la présence de terrain sableux sans cohésion sous nappe peut générer des phénomènes de surexcavation => Contrôler qu'il n'y ait pas ou peu de déblais lors du vissage.

Risque pour la mise en place des armatures : potentiellement difficile en raison du risque :

- de ressuage du béton suite à son tassement occasionné par son cisaillement lors de la mise en œuvre de l'armature ;
- d'essorage facilité des bétons dans ces terrains très perméables régulièrement hors nappe du fait de l'effet de marée.

61. On rappelle que l'appellation des pieux de catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 indique « virole récupérée » pour « tube récupéré ».

=> **Solutions préconisées en cas de surexcavation :**

- dans le cas d'utilisation d'une tarière creuse simple :
 - prévoir un atelier de forage de plus forte puissance muni d'un pull down⁽⁶²⁾,
 - adapter la vitesse de rotation à la descente de l'outil,
 - prévoir un pieu de faisabilité ;
- sinon utilisation d'une tarière creuse double rotation et le tube devra précéder la tarière.

Comparaison entre les deux approches (Tableau 3.20)

Tableau 3.20 : Tableau de comparaison des deux approches pour l'exemple 2 avec des pieux de 12 m
(+ Avantages / - Inconvénients)

Critères	Approche 1 : Pieu FTR	Approche 2 : Pieu FTC
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	- Coût d'installation : intermédiaire	
Délais	- Rapidité d'exécution : intermédiaire	+ Rapidité d'exécution : forte
Techniques	+ Moyen de fichage des tubes limité + Possibilité d' engins de dimensions convenables par rapport à la faible compacité des terrains de tête + Mise en place des armatures facilitée + Perte de béton attendue faible + Portance moyenne des pieux - Risque de délavage du béton , en raison de l'effet de marée	+ Perte de béton attendue faible + Portance des pieux améliorée - Risque de délavage du béton , en raison de l'effet de marée - Mise en œuvre des armatures potentiellement compliquée en raison du ressuage et du délavage du béton
Environnement	- Risque de phénomènes de renard	- Risque de surexcavation possible
Conseils BPU⁽⁶³⁾		Prévoir un pieu de faisabilité à marée basse hors ouvrage pour vérifier la faisabilité de la technique : <ul style="list-style-type: none"> • mise en œuvre des armatures ; • forage du pieu sans surexcavation

8.1.2.2 - Pieux de 33 m

En préambule, il conviendrait de s'interroger si un pieu ancré dans les sables de longueur comprise entre 25 et 27 m en augmentant légèrement le diamètre au besoin n'offrirait pas la même capacité portante que le pieu de 33 m.

Approche 1 : pieu foré boue (classe 1, catégorie 2)

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise œuvre d'une virole de travail sur la hauteur du marnage (8 m) ;
- le forage sous fluide stabilisateur (*Note 1*) ;
- le curage du fond de forage ;
- l'équipement du pieu et bétonnage.

62. Le pull down exprime l'effort vertical (plus généralement axial) transmissible à l'outil afin de permettre à celui-ci de déstructurer le matériau et de pénétrer dans le terrain.

63. BPU : bordereau des prix unitaires.

Risque de nappe captive : vigilance sur le niveau du fluide stabilisateur, du fait de la présence d'une nappe potentiellement captive lors de la traversée de la couche de sol n°2 (*Note 2*).

Note 1 : les propriétés du fluide stabilisateur seront adaptées à la présence de sel marin (cf. § 4.3.6 « Traitement et recyclage des fluides stabilisateurs »).

Note 2 : si on maintient le fluide stabilisateur au niveau de la plateforme qui est elle-même au-dessus du niveau des marées hautes, on doit être au-dessus du niveau de la nappe en charge.

Approche 2 : pieu tarière creuse (classe 2, catégorie 6)

Conseils :

- **machine de forage** : les machines de catégories 1 et 2 (cf. Tableau 3.2 dans le § 3.1.2.2) sont en dehors de leur capacité nominale ; même l'adéquation de celles de catégorie 3 est incertaine ;
- **béton** : prévoir une formulation de béton particulière limitant le ressuage du béton (*Note 1*), et permettant la mise en œuvre de la cage d'armature le cas échéant.

Risque de surexcavation : la présence de terrain sableux sans cohésion sous nappe peut générer des phénomènes de surexcavation => Prévoir qu'il n'y a pas ou peu de déblais lors du vissage.

=> Solutions préconisées en cas de surexcavation :

- dans le cas d'utilisation d'une tarière creuse simple :
 - prévoir un atelier de forage de plus forte puissance muni d'un pull down⁽⁶⁴⁾,
 - adapter la vitesse de rotation à la descente de l'outil,
 - prévoir un pieu de faisabilité ;
- sinon utilisation d'une tarière creuse double rotation.

Risque pour la mise en place des armatures : si les pieux sont armés toute hauteur, la présence de sable propre combinée à une longueur de cage d'armature très importante rend cette solution risquée compte tenu de certaines difficultés à obtenir un béton adapté (*Note 2*). Cette mise en place est rendue d'autant plus difficile en raison du risque de ressuage et de délavage du béton (cf. ci-avant le cas des pieux de 12 m réalisés à la tarière creuse).

=> **Solution préconisée** : prévoir des essais de convenance sur le béton (cf. § 2.2.3 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »), ainsi qu'un pieu de faisabilité (cf. § 4.2 du fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier »).

Note 1 : le béton de tarière creuse est soumis à davantage de pression qu'un pieu foré simple, puisqu'il est mis en œuvre à la pompe et coulé depuis le col-de-cygne positionné très au-dessus du niveau de la plateforme. Par ailleurs, le béton doit être maintenu sous pression une fois expulsé dans le sol. Cela favorise le phénomène de filtration et la perte d'eau, pouvant conduire à des veines sans ciment (entraînement des fines et donc des particules de ciment par le départ d'eau).

Note 2 : le sable absorbe l'eau de ressuage du béton surtout quand le sable est hors nappe. Et quand le béton a trop perdu d'eau, il n'est plus assez fluide pour permettre la mise en place d'une cage d'armature toute hauteur. Il faut donc utiliser un béton qui ressué faiblement à vitesse lente.

Approche 3 : pieu foré tubé – tube récupéré⁽⁶⁵⁾ (classe 1, catégorie 4) Non conseillée

Hormis des contextes particuliers, des solutions de pieux tubés foncés à plus de 20 à 25 m ne sont généralement pas conseillées, en raison de l'importance des moyens et des énergies nécessaires au fonçage et à la récupération des tubes provisoires. Généralement les Approches 1 ou 2 de l'exemple 2 sont préférables.

64. Le pull down exprime l'effort vertical (plus généralement axial) transmissible à l'outil afin de permettre à celui-ci de déstructurer le matériau et de pénétrer dans le terrain.

65. On rappelle que l'appellation des pieux de catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 indique « virole récupérée » pour « tube récupéré ».

Comparaison entre les trois approches (Tableau 3.21)

Tableau 3.21 : Tableau de comparaison des trois approches pour l'exemple 2 avec des pieux de 33 m
(+ Avantages / - Inconvénients)

Critères	Approche 1 : Pieu FB	Approche 2 : Pieu FTC	Approche 3 : Pieu FTR
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation : important + Perte de béton attendue faible + Portance moyenne des pieux 	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation : intermédiaire en raison du gabarit relativement important de la machine 	
Délais	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : faible 	<ul style="list-style-type: none"> + Rapidité d'exécution : intermédiaire 	
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> + Possibilité d'engins de dimensions convenables par rapport à la faible compacité des terrains de tête + Mise en place des armatures facilitée + Peu de risque sous réserve du respect des règles d'exécution 	<ul style="list-style-type: none"> + Perte de béton attendue faible + Portance des pieux améliorée - Risque de surexcavation possible - Gabarit de l'engin relativement important - Mise en œuvre des armatures compliquée en raison des risques de ressuage et de délavage du béton (<i>Note</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Moyen de fonçage très important - Énergie nécessaire à la réalisation des pieux trop importante pouvant avoir des répercussions sur des pieux voisins (entre-axe < 3 diamètres)
Environnement		<ul style="list-style-type: none"> - Risque de surexcavation possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de phénomènes de renard
Conseils BPU ⁽⁶⁶⁾		<p>En cas de variante proposée : un essai préalable doit être effectué pour démontrer la faisabilité.</p> <p>Prévoir un pieu de faisabilité hors ouvrage pour vérifier la faisabilité de la technique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • mise en œuvre des armatures (<i>Note</i>) ; • forage du pieu sans surexcavation <p><i>Note</i> : armer les pieux toute hauteur car il nécessite l'utilisation d'un béton adapté gardant sa fluidité jusqu'à la mise en œuvre des armatures qui requiert un savoir-faire important de la part des entreprises. De ce fait, l'Approche 2 n'est généralement pas à envisager en solution de base dans les marchés publics</p>	

66. BPU : bordereau des prix unitaires.

8.1.3 - EXEMPLE 3 : PIEU FORÉ TUBE RÉCUPÉRÉ, TARIÈRE CREUSE, FORÉ BOUE ET FORÉ SIMPLE

Plusieurs approches possibles (solutions technico-économiques les plus avantageuses) sont proposées pour la réalisation du forage **d'un pieu de 14 m** de longueur **et d'un autre pieu de 20 m** de longueur dans le terrain décrit dans le Tableau 3.22 à partir de la coupe lithologique et des paramètres mécaniques mesurés au pressiomètre (Figure 3.116), ainsi que des résultats d'un carottage (Figure 3.117).

Les Tableaux 3.23 et 3.24 présentent un comparatif des différentes approches respectivement pour le pieu de 14 m et pour celui de 20 m.

Niveau de nappe

- **Nappe perchée erratique** dans la couche 4 (entre 9,8 et 16 m) à la faveur d'horizons marneux plus imperméables ;
- niveau de nappe soumis à **des fluctuations importantes** (information bibliographique).

Contexte

- **Absence d'avoisinants sensibles** ;
- **pas de contraintes environnementales particulières** ;
- ouvrage d'art passage supérieur qui contraint à avoir **des pieux armés sur toute hauteur**.

Description des terrains et commentaires associés

Le Tableau 3.23 a été construit à partir des essais pressiométriques (p_r^* , pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain et E_M module pressiométrique Ménard issus des essais pressiométriques Ménard réalisés selon la norme **NF EN ISO 22476-4**) (Figure 3.116), du sondage carotté (Figure 3.117) et en s'appuyant sur les conclusions tirées des cinq profils d'essais pressiométriques réalisés sur le projet mettant en évidence :

- **un banc calcaire franc variable (épaisseur variable de 1 à 2 m)** situé vers 12 à 13 m de profondeur sur l'ensemble des sondages ;
- **la présence de bancs de grès dans les sables de B.** à des altitudes variables avec des épaisseurs comprises entre 0 et 300 mm. Le nombre de banc est également variable selon les sondages.

Figure 3.116 : Résultats d'un sondage destructif avec paramètres de forage et essais pressiométriques pour l'exemple 3

(Nota bene : Afin de mener correctement cette étude, il aurait fallu des essais pressiométriques jusqu'à 25 m)

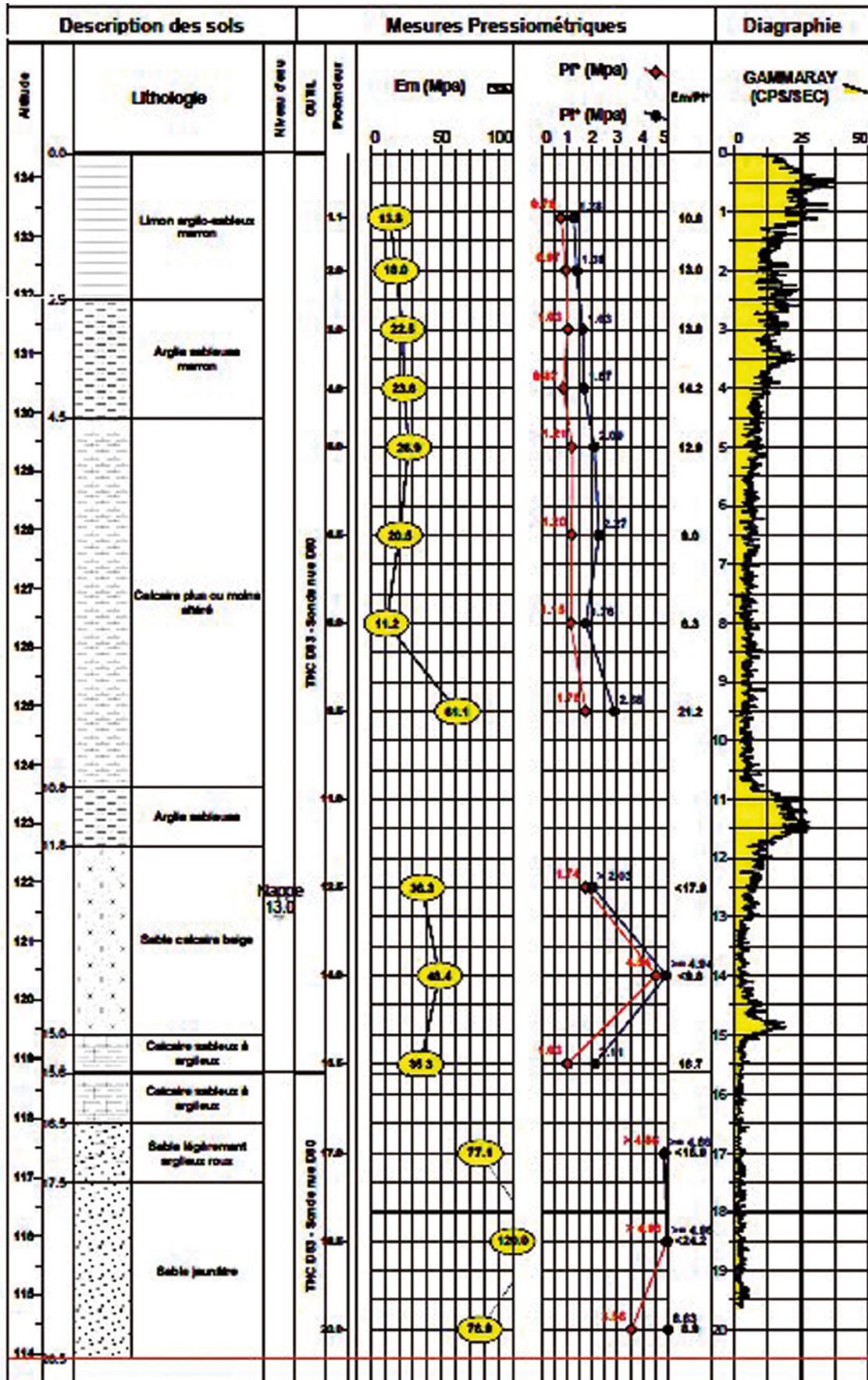


Tableau 3.22 : Tableau de synthèse des terrains rencontrés pour l'exemple 3

Terrain - matériaux	Profondeur - épaisseur	Propriétés et paramètres mécaniques	Commentaires
Limon argilo-sableux (couche 1)	De 0 à 1,5 m	$1,00 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 1,3 MPa $10 < E_M < 20$ MPa	
Marno-calcaire altérée (couche 2)	De 1,5 m à 3,3 m <i>1,8 m d'épaisseur</i>	p_i^* environ 1,6 MPa E_M de l'ordre de 20 MPa	Compacité moyenne
Marno-calcaire avec quelques passages de sables fins (couche 3)	De 3,3 m à 9,8 m <i>6,5 m d'épaisseur</i>	$1,50 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 3,0 MPa $11 < E_M < 20$ MPa	Compacité variable La différence de compacité importante de cette formation est confirmée sur le sondage carotté par la présence de nombreuses couches de sol de nature variable.
Sable avec banc calcaire compact (Note) (couche 4)	De 9,8 m à 16 m <i>6,2 m d'épaisseur</i>	$2,0 < p_i^* < \text{à supérieur}$ à 5,0 MPa $30 < E_M < 50$ MPa Présence d'un banc calcaire franc de forte compacité d'1,0 m d'épaisseur : $R_c^{a)} = 45$ MPa Abrasiveité Cerchar ^{b)} = 0,6 à 1,1	Forte disparité de la compacité confirmée par des natures de sols variables sur le sondage carotté
Sable compact avec présence de bancs gréseux indurés (Note) (couche 5)	Au-delà de 16 m	$p_i^* < \text{à supérieur}$ à 5,0 MPa $70 < E_M < \text{à supérieur}$ à 120 MPa Présence de deux bancs gréseux de 300 à 400 mm de forte compacité : $R_c^{a)} = 40$ MPa Abrasiveité Cerchar ^{b)} = 3,5 (un seul essai)	

a) R_c : résistance à la compression simple. Les mesures de résistance à la compression doivent être considérées avec prudence, il n'est pas rare de rencontrer une disparité de 1 à 2 pour ce type d'essai, où le pendage des couches testées par rapport à l'axe de la carotte peut avoir une influence déterminante sur les résultats mesurés.

b) Essai d'abrasivité Cerchar : norme NF P94-430-1 et ASTM D7625-22.

Note : Bancs rocheux

Trois bancs rocheux ont été identifiés de nature et d'épaisseur variables. Ces bancs rocheux conditionneront les techniques de forage et les machines associées :

- d'une manière générale, **le banc calcaire**, malgré une résistance à la compression importante, peut être franchi avec des machines de puissance importante et des outils adaptés ;
- **les bancs gréseux**, les résultats d'abrasivité Cerchar, montrent une classe d'abrasivité moyennement abrasif à abrasif. Cette abrasivité importante compliquera fortement la pénétration par des outils rotatifs traditionnels et spéciaux malgré la faible épaisseur de ces bancs.

Dans ces conditions, si le projet nécessite que les pieux soient ancrés dans les sables de B. et si les conditions de site le permettent, il paraît préférable d'avoir recours à une solution de trépanage pour passer ces bancs de faibles épaisseurs afin de limiter l'usure des outils. La traversée de ces bancs avec des outils spéciaux n'est pas non plus impossible.

8.1.3.1 - Pieux de 14 m de longueur

Approche 1 : pieu foré tubé – tube récupéré⁽⁶⁷⁾ (FTR – classe 1, catégorie 4) jusqu'à 14 m

Les étapes avant le bétonnage du pieu sont :

- la mise en place des tubes (Note 1) par rotation (Note 2) au fur et à mesure du forage ; la mise en œuvre par vibration semble compliquée ;
- le forage à l'intérieur du tube (cf. « Risque de déstabilisation des franges sableuses » ci-après) ;
- le curage du fond du forage ;

Le tube est récupéré par rotation après équipement du pieu et bétonnage.

Risque de déstabilisation des franges sableuses par la nappe phréatique si la mise en place du tube est effectuée à l'arrière du forage.

=> **Solution préconisée** : aux environs de la nappe, il est préférable que le forage s'effectue sous faible charge d'eau.

Risque de difficultés de forage dans les bancs de calcaire.

=> **Solution préconisée** : utilisation d'outils spéciaux.

Note 1 : les conditions hydrogéotechniques n'imposent pas que les tubes soient laissés en place.

Note 2 : mise en place d'un tube par rotation (cf. chapitre 5 « Techniques de tenue des parois par tubage ») nécessite un atelier de forage de pieux adapté (atelier double table ou avec une course de kelly importante ou avec des tubes à plusieurs tronçons comme ceux présentés sur la Figure 3.100 « Montage et démontage des tubes récupérés constitués de plusieurs tronçons » dans le § 5.2.2). Une solution de mise en fiche des tubes par battage (plutôt rare pour les pieux forés) pourrait être envisagée, mais nécessiterait une étude particulière des caractéristiques du marteau et de l'épaisseur du tube récupéré.

Approche 2 : pieu tarière creuse (FTC – classe 2, catégorie 6) jusqu'à 14 m

Dans cet exemple, les pieux à la tarière creuse ont été réalisés avec un dispositif de bétonnage rétractable de 800 mm, conformément au Fascicule 68 du CCTG.

Risque de difficultés de forage dans les bancs de calcaire :

=> **Solution préconisée** : prévoir un pieu de faisabilité. Certaines entreprises ont démontré qu'avec des moyens adaptés (outils et machines de puissance importante) ces bancs de calcaire peuvent être traversés.

Risque d'emprise trop restreinte : l'ouvrage de type passage supérieur nécessite la réalisation de remblais d'accès qui sont généralement réalisés préalablement aux pieux. La nécessité de machines de tarière creuse de forte puissance se conjugue généralement mal avec ces emprises de forage réduites.

Risque de difficultés pour la mise en œuvre des cages d'armature avec présence de terrain sableux hors nappe :

=> **Solution préconisée** : la mise en place d'armatures sur 14 m requiert une technicité particulière et l'emploi de béton adapté.

Approche 3 : pieu foré boue (FB – classe 1, catégorie 2) jusqu'à 14 m

Si on respecte les règles de l'art, il ne devrait pas y avoir de risque.

Comparaison entre les trois approches

Les avantages et inconvénients des **Approches 1 et 2** de l'exemple 3 sont présentés dans le Tableau 3.23.

L'**Approche 3** (pieu foré boue) peut être utilisée mais n'est généralement pas proposée lorsqu'une solution de pieux forés tube récupéré (FTR) est envisageable en raison de son coût généralement plus important. Néanmoins en cas de nombre important de pieux, le coût d'installation peut être amorti et rendre la solution de l'Approche 3 compétitive.

67. On rappelle que l'appellation des pieux de catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 indique « virole récupérée » pour « tube récupéré ».

Tableau 3.23 : Tableau de comparaison des trois approches pour l'exemple 3 avec des pieux de 14 m
(+ Avantages / - Inconvénients)

Critères	Approche 1 : Pieu FTR	Approche 2 : Pieu FTC	Approche 3 : Pieu FB
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation : intermédiaire + Possibilité d'engins de dimensions convenables par rapport problématique d'emprise + Mise en place des armatures facilitée + Perte de béton attendue faible + Portance des pieux intermédiaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation intermédiaire pour cette technique : du fait du gabarit relativement important de la machine + Perte de béton attendue faible + Portance des pieux améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation important (peut être amorti en cas de nombre de pieux important) + Perte de béton attendue faible + Portance moyenne des pieux
Délais	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : intermédiaire 	<ul style="list-style-type: none"> + Rapidité d'exécution : forte sous réserve de franchir le banc calcaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : faible
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> + Moyen de fichage des tubes modéré + Possibilité d'adapter les outils pour le franchissement du banc calcaire - Risque de déstabilisation des franges sableuses par la nappe phréatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Gabarit de l'engin relativement important - Mise en œuvre des armatures compliquée nécessitant une maîtrise particulière - Risque de refus sur le banc calcaire en cas moyens inadaptés avec impossibilité de modifier les outils - Risques au niveau de la sécurité et de la qualité du pieu en raison du manque d'emprise 	<ul style="list-style-type: none"> + Possibilité d'engins de dimensions convenables par rapport à la faible compacité des terrains de tête + Mise en place des armatures facilitée + Peu de risque sous réserve du respect des règles d'exécution
Environnement			
Conseils BPU ⁽⁶⁸⁾	<p>Suite à l'analyse du contexte, l'épaisseur de banc calcaire inférieure à 2 m est démontrée.</p> <p>Païement du forage, deux solutions au choix :</p> <ul style="list-style-type: none"> • au ml comprenant le forage du banc calcaire avec outils spéciaux dans une limite de 2 m d'épaisseur ; • un prix spécifique affiché au ml pour le passage du banc calcaire. 	<p>Technique comportant un certain nombre de risques important, même si le prix de pieux est certainement intéressant. => Cette solution peut être envisagée en solution variante au niveau de la phase ACT⁽⁶⁹⁾ si les garanties apportées par l'entreprise sont suffisantes.</p> <p>Un pieu de faisabilité extérieur à l'ouvrage est vivement conseillé pour vérifier la méthodologie :</p> <ul style="list-style-type: none"> • de mise en œuvre des armatures ; • du forage du banc calcaire. 	

68. BPU : bordereau des prix unitaires.

69. ACT : assistance pour la passation des contrats de travaux, assistance apportée au maître de l'ouvrage pour préparer la consultation des entreprises (et s'il y a lieu leur audition), pour analyser les offres des entreprises (et les propositions variantes s'il y a lieu) et pour préparer les mises au point permettant la passation du ou des contrats de travaux par le maître d'ouvrage (décret N°93-1268 du 29 novembre 1993).

8.1.3.2 - Pieux de 20 m de longueur

Approche 1 : pieu foré boue (FB – classe 1, catégorie 2) jusqu'à 20 m

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise œuvre d'une virole de travail sur 3-4 m ;
- le forage (Note) sous fluide stabilisateur ;
- le curage du fond du forage.

Note :

- **le banc de calcaire** peut être traversé soit au moyen d'un carottier soit avec utilisation d'un trépan ;
- **le ou les bancs de grès** seront traversés à l'aide d'un trépan, des outils de type carottier sont également envisageables, selon le type de carottier retenu une usure des outils est attendue.

Approche 2 : pieu foré tubé – tube récupéré⁽⁷⁰⁾ (FTR – classe 1, catégorie 4) jusqu'à 20 m

Les étapes avant bétonnage du pieu sont :

- la mise en place des tubes toute hauteur (Note 1) par rotation (Note 2) au fur et à mesure du forage est compliqué (Note 3) compte tenu de la présence de sable fin avec les bancs de grès au-delà de 16 m et des circulations d'eau ;
- le forage (Note 4) à l'intérieur du tube ;
- le curage du fond du forage ;

Le tube est récupéré par rotation après équipement du pieu et bétonnage.

Risque de difficultés de forage dans les bancs de calcaire.

=> **Solution préconisée** : utilisation d'outils spéciaux pour le terrain à l'intérieur du tube et réalésage des terrains sous le tube par ce dernier pour passer les bancs rocheux.

Note 1 : une longueur de mise en place de tube d'une vingtaine de mètres constitue bien souvent une limite de faisabilité de la technique des pieux forés tubés récupérés avec des moyens courants.

Note 2 : la mise en œuvre du tube par vibration ou battage semble compliquée.

Note 3 : le tube doit être mis en place en avance du forage, ce qui compliquera sa descente avec des moyens traditionnels.

Note 4 : les outils spéciaux peuvent être les mêmes que pour l'Approche 1 de l'exemple 3 pour les sols à l'intérieur du tube.

Approche 3 : pieu tarière creuse (FTC – classe 2, catégorie 6) jusqu'à 20 m

Pieux à la tarière creuse avec un dispositif de bétonnage rétractable de 800 mm.

Les risques relevés pour les pieux de 14 m sont exacerbés pour des pieux de 20 m de longueur :

- risque de difficultés de forage dans les bancs de calcaire ;
- risque d'emprise trop restreinte ;
- risque de difficultés pour la mise en œuvre des cages d'armature ;
- risque de surexcavation dans les sables de B. si la traversée de banc gréseux n'est pas efficace.

70. On rappelle que l'appellation des pieux de catégorie 4 selon la norme NF P94-262 COMPIL1 indique « virole récupérée » pour « tube récupéré ».

Comparaison entre les trois approches (Tableau 3.24)

Tableau 3.24 : Tableau de comparaison des trois approches pour l'exemple 3 avec des pieux de 20 m
(+ Avantages / - Inconvénients)

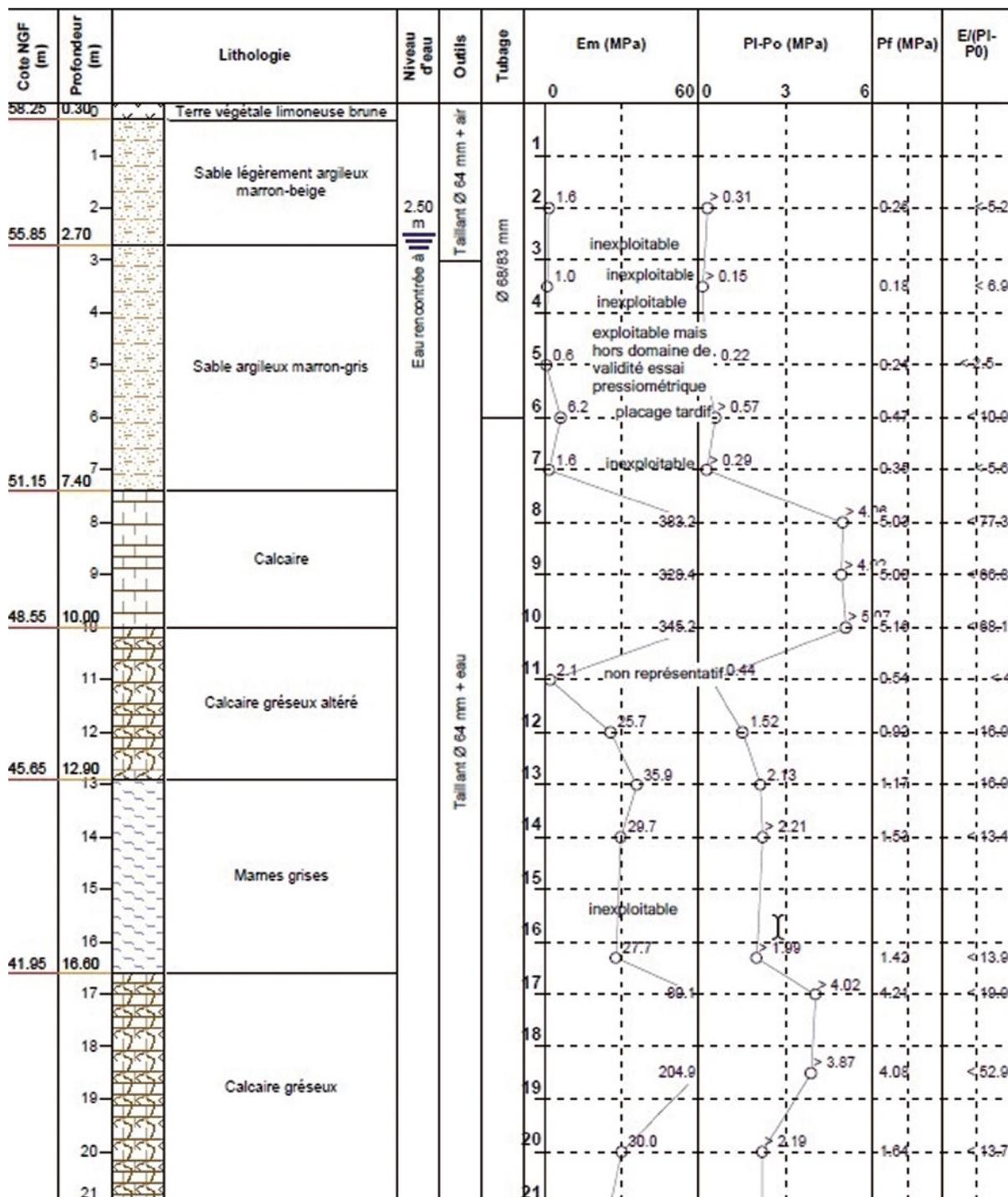
Critères	Approche 1 : Pieu FB – Conseillé	Approche 2 : Pieu FTR	Approche 3 : Pieu FTC
Coûts (matériel, matériaux, portance, installation)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation : important + Perte de béton faible + Perte de fluide stabilisateur faible si appropriée + Portance des pieux intermédiaires + Emprise importante pour l'installation de la station de fluide stabilisateur 	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation : intermédiaire + Perte de béton faible - Portance des pieux faible 	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation : faible + Portance des pieux améliorée
Délais	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : faible 	<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité d'exécution : incertaine liée au bloc de grès d'épaisseur variable
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> + Technique traditionnelle et maîtrisée par un grand nombre d'entreprises + Possibilité d'engins de dimensions convenables + Mise en place des armatures facilitée 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre des tubes de 20 m constituant bien souvent une limite de faisabilité de la technique des pieux forés tubés récupérés avec des moyens courants - Réalésage des bancs rocheux par le tube 	<ul style="list-style-type: none"> - Gabarit de l'engin relativement important - Mise en œuvre des armatures compliquée nécessitant une maîtrise particulière - Risque de refus sur le banc calcaire en cas de moyens inadaptés avec impossibilité de modifier les outils - Risques au niveau de la sécurité et de la qualité du pieu en raison du manque d'emprise
Environnement			
Conseils BPU ⁽⁷¹⁾	<p>Paiement du forage des bancs de grès : prix pour mémoire au ml en raison de leur présence plus ou moins erratique</p>	<p>La faisabilité de cette technique demande une maîtrise et des moyens particuliers. Cette solution peut être proposée en solution de base avec prudence. En variante proposée au stade ACT, les moyens proposés par l'entreprise devront être justifiés.</p>	<p>Les risques paraissent trop importants par rapport au gain financier au regard des Approches 1 et 2.</p> <p>Approche déconseillée, en l'absence d'enjeux autres que financier, en solution de base ou en variante sans une réelle analyse de la faisabilité.</p>

71. BPU : bordereau des prix unitaires.

8.2 - AVANTAGE DE LA POLYVALENCE DES MACHINES DE FORAGE

Résultats d'un sondage destructif avec paramètres de forage et essais pressiométriques (Figure 3.118) ($P_1 - P_0$, pression limite pressiométrique Ménard nette du terrain, P_f pression de fluage et E_M module pressiométrique Ménard issus de l'essai pressiométrique Ménard réalisé selon la norme NF EN ISO 22476-4).

Figure 3.118 : Résultats d'un sondage destructif avec paramètres de forage et essais pressiométriques pour l'exemple sur l'adaptabilité des machines



Un pieu de diamètre 1 000 mm et de longueur 20 m doit être réalisé au niveau du sondage dont la coupe lithologique et les résultats des essais pressiométriques sont présentés ci-avant (Figure 3.118). Grâce à la mobilisation d'une machine polyvalente, permettant l'utilisation de plusieurs outils, il est donc possible de forer chaque formation avec l'outil le plus adapté, tant pour la qualité du forage que pour la vitesse d'avancement :

- **les sables légèrement argileux marron-beige situés au-dessus de la nappe** (de 0 à 2,50 m de profondeur) sont excavés à la tarière (cf. § 3.2.2.1). Vitesse de l'ordre de : 20 m/h ;
- **les sables argileux marron-gris, situés sous la nappe**, sont excavés au godet de forage (bucket) (cf. § 3.2.2.2) jusqu'au toit des calcaires (de 2,50 à 7,40 m de profondeur). Vitesse de l'ordre de : 10 m/h ;
- **les calcaires durs** rencontrés de 7,40 à 10 m de profondeur nécessitent de forer au carottier (cf. § 3.2.2.3). Vitesse d'avancement de l'ordre de : 3 m/h ;
- **les calcaires gréseux altérés** sous-jacents présentent des propriétés mécaniques bien plus faibles, qui permettent de passer sur une tarière rocher (cf. § 3.2.2.1), voire un godet de forage (bucket) (cf. § 3.2.2.2) si l'évacuation des déblais de forage s'avère problématique. Vitesse de l'ordre de : 10 m/h ;
- le même outil est conservé pour traverser **les marnes grises** et réaliser l'ancrage à 20 m de profondeur dans **les calcaires gréseux**.

Il est donc envisagé **d'utiliser quatre outils différents**. En l'absence d'une machine suffisamment polyvalente, il faudrait soit mobiliser deux machines ou plus pour pouvoir couvrir la gamme d'outils envisagée, soit sacrifier une ou plusieurs de ces techniques. Cela se ferait au détriment de la cadence et/ou de la qualité du forage.

Annexe

ANNEXE

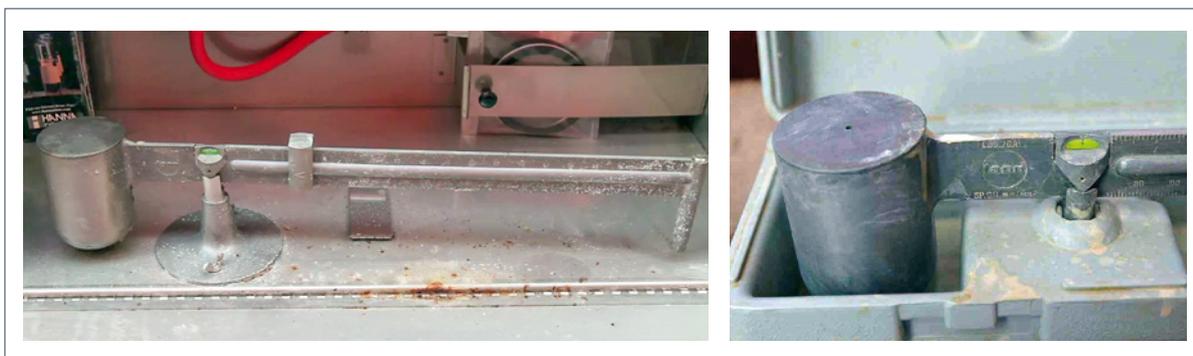
ANNEXE 3.1 - LES ESSAIS DE CONTRÔLE DES FLUIDES STABILISATEURS

ANNEXE 3.1.1 - LA BALANCE À BOUE OU BAROÏD POUR MESURE DE LA DENSITÉ DU FLUIDE STABILISATEUR

Description de la balance à boue ou « balance Baroïd »

L'instrument utilisé pour la mesure de la densité des fluides stabilisateurs est la **balance à boue**. Cet appareil, présenté sur la Figure 3.119, est constitué d'une coupelle fixée à un fléau gradué doté d'un curseur coulissant et d'un contrepoids. L'ensemble repose sur un point d'appui (pour en savoir plus se référer [3.3]).

Figure 3.119 : Exemple de balance à boue



Procédure d'essai avec la balance à boue

- 1 – Vérifier que l'appareil est parfaitement propre et sec, plus particulièrement la coupelle de boue.
- 2 – Remplir la coupelle avec la boue, en évitant d'emprisonner des bulles d'air (si nécessaire, taper la coupelle plusieurs fois pour libérer les bulles).
- 3 – Fermer la coupelle avec le couvercle. Vérifier qu'aucune bulle d'air n'est emprisonnée et que la boue en excès dans la coupelle est évacuée via la purge du couvercle (si rien ne ressort de la purge, recommencer la procédure).
- 4 – Nettoyer et sécher l'extérieur de la coupelle. Vérifier que la purge est remplie de boue.
- 5 – Placer la coupelle sur la balance et ajuster le curseur jusqu'à ce que le fléau soit à l'équilibre comme l'indique le niveau à bulle.
- 6 – Lire la densité de la boue sur le fléau gradué au niveau du curseur.

Cet appareil est précis et **la lecture de la densité est rapide**. La seule difficulté réside dans **la représentativité de l'échantillon** dont le volume est très faible en comparaison du volume total considéré, il est donc fortement recommandé de réaliser plusieurs mesures de la densité sur différents échantillons.

Calibrage de la balance à boue avant tout essai

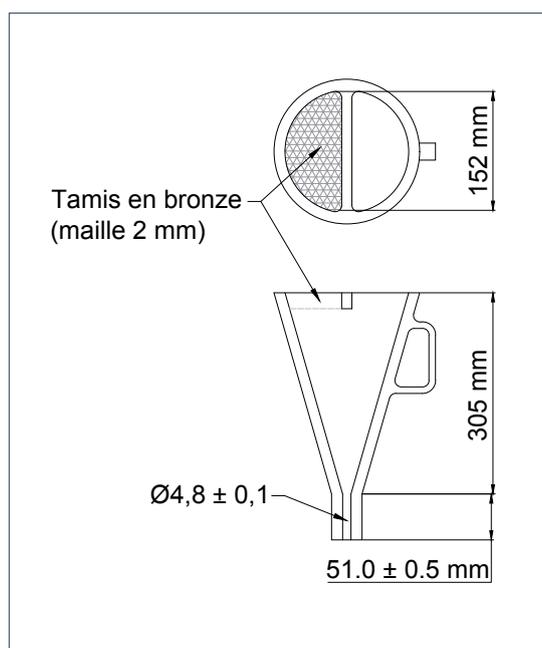
La balance doit être correctement calibrée avec de l'eau (densité de 1,00) dans la coupelle avant de réaliser toute autre mesure.

ANNEXE 3.1.2 - LE CÔNE DE MARSH POUR LA VISCOSITÉ DU FLUIDE STABILISATEUR

Description de le cône de Marsh

Le cône de Marsh est utilisé afin d'évaluer la viscosité qui correspond au temps nécessaire au remplissage d'un récipient d'un volume de 946 ml (1/4 de gallon US). La viscosité Marsh correspond au nombre de secondes écoulées. Les dimensions du cône sont spécifiées sur la Figure 3.120.

Figure 3.120 : Cône d'écoulement de Marsh
(d'après un schéma de la norme NF EN 14117)



Procédure d'essai avec le cône de Marsh

- 1 – Nettoyer et sécher le cône.
- 2 – Maintenir en position verticale le cône et boucher avec le doigt l'évacuation du cône.
- 3 – Verser un échantillon de boue à travers le tamis afin de remplir le cône jusqu'à un repère situé au-dessous du tamis (correspondant à un volume de 1,5 l).
- 4 – Lorsque le cône est plein, enlever le doigt de l'évacuation et laisser la boue s'écouler dans un récipient gradué. Enregistrer le temps nécessaire à l'écoulement d'1/4 de gallon US⁽⁷²⁾. Le volume écoulé doit être relevé.

Calibrage du cône de Marsh

Le calibrage de l'appareil peut être validé en évaluant le temps d'écoulement de l'eau. Pour une eau à 21°C, les temps admissibles sont les suivants :

- 25,5 à 26,5 secondes pour un volume de 946 ml ;
- 27,5 à 28,5 secondes pour un volume de 1 000 ml.

Aucun ajustement du cône de Marsh n'est possible. Ainsi, si la mesure pour l'eau n'est pas dans les intervalles indiqués, il faut conclure que l'appareil est endommagé ou qu'il n'a pas été correctement nettoyé.

72. Une évaluation de la viscosité Marsh pour un volume de 1 000 ml étant aussi possible.

ANNEXE 3.1.3 - LE PH MÈTRE OU LE PAPIER PH POUR LE PH⁽⁷³⁾

Plusieurs techniques de mesure du pH

Plusieurs techniques sont envisageables afin de mesurer le pH :

- **le pH mètre** : le pH mètre classique est plus adapté à une utilisation en laboratoire, mais le pH mètre de poche, un peu plus grand qu'un stylo, présente une solution adéquate pour une mesure rapide et précise sur le terrain (nécessité d'un étalonnage régulier) :
 - appareillage : un boîtier électronique ainsi qu'une sonde de pH, une électrode de verre,
 - précision de la mesure : de l'ordre de 0,05,
 - calibrage : avant utilisation, il est néanmoins nécessaire de calibrer l'appareil à l'aide d'une solution tampon. Dans l'idéal, l'étalonnage doit se faire à l'aide de deux solutions tampons dont l'écart de pH couvre l'intervalle dans lequel doit se situer le pH de la boue ;
- **le papier pH** :
 - appareillage : il s'agit d'un indicateur coloré qui change de couleur en fonction de la valeur du pH. Il suffit ainsi de mettre en contact le papier avec la boue par une extrémité et d'identifier à l'autre extrémité la couleur du papier. Celle-ci est alors comparée à une table de référence graduée en unité pH. Le papier pH doit être conservé dans un récipient clos pour le protéger de l'humidité ambiante. Cette technique simple et rapide est bien adaptée aux essais *in situ*,
 - précision de la mesure : jusqu'à 0,1.

ANNEXE 3.1.4 - L'ÉLUTRIOMÈTRE POUR LA TENEUR EN SABLE

Description de l'élutriomètre

Lors du forage, la densité du fluide stabilisateur augmente avec la présence de particules en suspension, mais ne permet pas d'identifier le type de particules : sables, argiles ou limons. L'élutriomètre (Figure 3.121) permet de mesurer **le volume de sable présent pour un volume de fluide stabilisateur** donné (pour en savoir plus se référer [3.3]).

Figure 3.121 : Exemple d'élutriomètre ou kit éprouvette de sable
(tamis, entonnoir et ampoule de verre graduée)



73. Le pH permet d'évaluer si les fluides stabilisateurs sont neutres (pH = 7), acides (pH < 7) ou basiques (pH > 7).

Procédure d'essai avec l'éluutriomètre

- 1 – Remplir l'ampoule de verre avec la boue jusqu'à la graduation « niveau de boue ».
- 2 – Ajouter de l'eau jusqu'à la graduation « niveau d'eau ». Boucher l'ampoule avec le doigt et agiter vigoureusement.
- 3 – Verser ce mélange sur le tamis. Rincer l'ampoule de verre pour enlever tout résidu et verser le mélange sur le tamis. Rincer le tamis jusqu'à ce qu'il soit dépourvu de toute trace de boue tout en conservant le sable sur le tamis.
- 4 – Retourner le tamis sur l'entonnoir, lui-même relié à l'ampoule de verre pour permettre au sable de tomber dans l'entonnoir et ensuite dans l'ampoule. Laver. À la fin de la décantation, lire le pourcentage de sable au niveau des graduations.

Le résultat obtenu correspond directement à la teneur en sable (pourcentage du volume de sable par volume de boue).

Précautions en cas de présence d'argile ou de limon avec des solutions de polymères

Lorsque l'essai est réalisé pour **des solutions de polymères**, et si le sol foré contient **des argiles et limons dispersifs**, il est primordial que **la solution soit nettoyée** via le tamis avec un mélange d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) et d'eau (cf. § 4.3.8.3) afin d'éviter que ces particules fines, en suspension pendant le forage, s'enchevêtrent dans les chaînes polymères. **Ce lavage doit être réalisé plusieurs fois**, jusqu'à ce que les chaînes polymères se détachent des particules de sol. Dans le cas contraire, l'ensemble argile-limon-polymères peut être considéré comme du sable.

ANNEXE 3.1.5 - LE FILTRE-PRESSE POUR LE FILTRAT (EAU LIBRE) ET L'ÉPAISSEUR DE CAKE

Description du filtre-presse

L'appareil de référence utilisé pour l'évaluation de l'eau libre et de l'épaisseur du cake est le filtre-presse de l'American Petroleum Institute (API 13B) (Figure 3.122 et pour en savoir plus se référer [3.3]).

Figure 3.122 : Exemple d'un filtre-presse (réservoir à boue avec à sa base le dispositif de filtration et le cylindre gradué pour mesurer le filtrat)



Procédure d'essai avec le filtre-presse

- 1 – Assembler les éléments dans l'ordre suivant : couvercle inférieur, joint en caoutchouc, tamis, papier filtre, joint en caoutchouc et cellule. Imbriquer la cellule et le couvercle inférieur.
- 2 – Placer l'échantillon de boue dans la cellule jusqu'à un niveau situé à 6 mm du haut de la cellule. Placer cet ensemble dans le filtre-presse.
- 3 – Vérifier la présence du joint de caoutchouc au niveau du couvercle supérieur. Placer le couvercle supérieur sur la cellule et sécuriser l'ensemble à l'aide de la vis en T.
- 4 – Placer le cylindre gradué sec sous le tube.
- 5 – Fermer la purge de sécurité. Appliquer une pression de 100 psi (environ 6,89 bars⁽⁷⁴⁾ soit 0,689 MPa) à la cellule. La pression doit être appliquée en 30 secondes ou moins. Le chronométrage de l'essai démarre à partir de l'application de la pression.
- 6 – Après 30 minutes⁽⁷⁵⁾, relever le volume de filtrat (eau libre) en cm³. Ouvrir la purge de sécurité pour libérer la pression dans la cellule.

L'épaisseur du cake (Figure 3.123) est mesurée à l'aide d'un réglet (au millimètre près) après le démontage de la cellule et l'élimination du gel superficiel par lavage sous jet d'eau.

Figure 3.123 : Exemple de cake après essai au filtre-presse



ANNEXE 3.1.6 - AUTRES ESSAIS POUR LE CONTRÔLE DES FLUIDES STABILISATEURS

La dureté des fluides stabilisateurs ou des eaux

La dureté des fluides stabilisateurs et des eaux souterraines peut être mesurée par titrage.

La teneur en eau dans la suspension de bentonite

La densité des fluides stabilisateurs est un indicateur peu adapté pour l'évaluation du contenu de la bentonite fraîche, car elle est proche de celle de l'eau et nécessite donc des mesures plus précises. La mesure de la teneur en eau permet d'obtenir une meilleure information bien que l'essai soit plus long⁽⁷⁶⁾. La procédure est décrite par le guide britannique BS 1377-2 (1990).

74. Une pression comprise entre 6,55 et 7,24 bars (95 et 105 psi) est acceptable.

75. L'essai peut aussi être réalisé en 7,5 minutes. Dans ce cas, le filtrat relevé correspond à la moitié de celui mesuré après 30 minutes.

76. De l'ordre de 24 heures si un four conventionnel est employé.

La compatibilité de l'eau pour la préparation des fluides stabilisateurs

L'eau potable est adaptée à la préparation des fluides stabilisateurs. Au contraire, l'utilisation d'eaux présentes sur site ou à proximité venant de cours d'eau et de lacs peut se révéler inappropriée. Si une analyse chimique est conduite (cf. § 4.3.2.1), il est conseillé de déterminer la présence des ions suivants :

- **cations** : sodium, calcium, magnésium, potassium ;
- **anions** : chlorure, sulfate et bicarbonate.

Le **pH** ainsi que la **conductivité électrique** doivent aussi être mesurés.

⚠ Il est difficile de prévoir si une eau peut convenir à partir de ses composants chimiques uniquement. En cas de doute, des essais plus complets doivent être envisagés avec l'étude de la rhéologie, de la perte de fluide stabilisateur...

La résistance au cisaillement des suspensions de bentonite

La résistance au cisaillement pour les suspensions de bentonite est influencée par :

- le **pourcentage de minéraux** présents ;
- le **mélange rigoureux du fluide stabilisateur** ;
- le **temps** qui s'est écoulé **entre la fabrication du fluide stabilisateur et son utilisation**.

La résistance au cisaillement à un temps donné peut être mesurée à l'aide d'un **viscosimètre Fann**.



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [3.1] EFFC/DFI (European Federation of Foundation Contractors/Deep Foundations Institute), *Guide to Support fluids for Deep Foundations*, 2019.
- [3.2] FHWA-NHI (Federal Highway Administration - National Highway Institute)-10-016, *Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods*, 2010.
- [3.3] FPS (Federation of Piling Specialists), *Bentonite Support Fluids in Civil Engineering*, Second edition, 2006.
- [3.4] ICE (Institution of Civil Engineers), *SPERW – Specification for Piling and Embedded Retaining Walls*, Third edition, 2016.
- [3.5] LCPC/SETRA, *Les pieux forés – Recueil de règles de l'art*, guide, Ministère des transports, Direction générale des transports intérieurs, 1978.
- [3.6] Garcia C. & Parigot P., *Boues de forage*, Publications de l'institut français du pétrole, Société des éditions Technip, 1968.
- [3.7] Blin-Lacroix J.-L. & Roy J.-P., *Le dictionnaire professionnel du BTP*, Eyrolles, 2013.
- [3.8] Reiffsteck P., Lossy D. & Benoît J., *Forage, sondages et essais in situ géotechniques*, Presses des Ponts, 2012.

FASCICULE DU CCTG (CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES)

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

NORMES AFNOR

- NF EN 1536+A1 Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés, 2015
- NF EN 1538+A1 Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Parois moulées, 2015
- NF EN 14117 Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination du temps d'écoulement de produits d'injection à base de ciment, 2005
- NF EN ISO 10414-1 Industries du pétrole et du gaz naturel - Essais in situ des fluides de forage, 2010
Partie 1 : fluides aqueux
- NF EN ISO 22476-4 Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place, 2021
Partie 4 : essai au pressiomètre Ménard
- NF EN ISO 22476-11 Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place, 2017
Partie 11 : essai au dilatomètre plat

- NF P94-051** Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau, 1993
- NF P94-262** Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, 2012
- NF P94-262 COMPIL1** Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes – texte compilé de la norme française NF P94-262:2012 intégrant dans le corps du texte l'amendement A1 de Juillet 2018, 2018
- NF P94-430-1** Roches - Détermination du pouvoir abrasif d'une roche, 2000
Partie 1 : essai de rayure avec une pointe
- NF P94-430-2** Roches - Détermination du pouvoir abrasif d'une roche, 2000
Partie 2 : essai avec un outil en rotation
- NF P94-500** Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications, 2013
- XP P94-412** Roches - Détermination de l'indice de résistance à la pénétration par un foret, 2001

NORMES ÉTRANGÈRES

- API 13B** Recommended practice for field testing water-based drilling fluids, 3rd edition, API, Washington, DC, USA, 2003
- ASTM D7625-22** Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Abrasiveness Index Method, 2010
- BS 1377-2** Methods of test for Soils for civil engineering purposes, 1990
Part 2: classification tests, British Standard



Traduction

Bored piles for civil engineering works and buildings

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 edificios

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

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

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

© 2025 - Cerema

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

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

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

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

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

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

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

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : PAO Concept

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achévé d'imprimer : juillet 2025

Dépôt légal : juillet 2025

ISBN : 978-2-37180-710-5 (pdf) - 978-2-37180-711-2 (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 3

Exécution du forage des pieux forés de classes 1 et 2

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

