

# norme française

P 11-212  
Septembre 1992

DTU 13.2

---

## Fondations profondes pour le bâtiment

### Partie 1 : cahier des clauses techniques

---

E : Deep foundation for building  
D : Tiefen Baugründungen

---

#### Statut

**Norme expérimentale** publiée par l'afnor en septembre 1992.

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être adressées à l'afnor, avant le 1<sup>er</sup> mars 1993.

<b>Attention</b> : Les chapitres 10 et 11 de la présente norme expérimentale constituent un commentaire.
--

Le présent document annule et remplace le Cahier des Charges DTU 13.2, publié en juin 1978.

#### Correspondance

A la date de parution de la présente norme expérimentale, il n'existe pas de norme internationale sur le sujet

#### Analyse

La présente norme vise à donner les prescriptions techniques nécessaires à la réalisation des ouvrages de fondations profondes entrant dans la construction de bâtiments, en mettant en oeuvre l'un des procédés choisis parmi les pieux façonnés à l'avance, forés, à tube battu ou foncé, les micropieux et les puits. Elle traite aussi de la mise en oeuvre des colonnes ballastées et des picots.

#### Descripteurs

**Thésaurus International Technique** : bâtiment, fondation, cahier des charges, pieu de fondation, puits de fondation, colonne, battage de pieu, pieu en béton, béton armé, produit en

métal, définition, armature, forage, façonnage, implantation, caractéristique, construction, mise en oeuvre, contrainte admissible, corrosion, essai, contrôle

## Sommaire

- Liste des auteurs
- Préambule Définitions
- Chapitre 1 Dispositions communes aux divers types de fondations profondes
  - 1.1 Généralités
    - 1.1.1 Domaine d'application
    - 1.1.2 Prescriptions relatives à la fourniture et à la mise en oeuvre des matériaux
    - 1.1.3 Surveillance des efforts transmis aux pieux ou puits
    - 1.1.4 Implantation et piquetage
    - 1.1.5 Tolérances d'implantation au niveau du recépage (excentrement)
    - 1.1.6 Problèmes non traités dans le présent Cahier des charges (site aquatique, pieux faiblement ancrés dans un substratum dur incliné, etc.).
    - 1.1.7 Exécution des travaux annexes
  - 1.2 Essais
    - 1.2.1
  - 1.3 Justification des fûts des pieux
    - 1.3.1 Justification des pieux métalliques ou mixtes
    - 1.3.2 Justification des pieux en béton armé
- Chapitre 2 Pieux façonnés à l'avance
  - 2.1 Battu préfabriqué
    - 2.1.1 Caractéristiques
    - 2.1.2 Dispositions constructives
    - 2.1.3 Mise en oeuvre
    - 2.1.4 Contraintes de calcul
  - 2.2 Métal battu
    - 2.2.1 Caractéristiques
    - 2.2.2 Dispositions constructives
    - 2.2.3 Mise en oeuvre
    - 2.2.4 Contraintes de calcul
    - 2.2.5 Corrosion
  - 2.3 Tubulaire précontraint
    - 2.3.1 Caractéristiques
    - 2.3.2 Dispositions constructives
    - 2.3.3 Mise en oeuvre
    - 2.3.4 Contraintes de calcul
  - 2.4 Battu enrobé

- 2.4.1 Caractéristiques
  - 2.4.2 Dispositions constructives
  - 2.4.3 Mise en oeuvre
  - 2.4.4 Contraintes de calcul
- 2.5 Pieu battu ou vibrofoncé injecté haute pression
  - 2.5.1 Caractéristiques
  - 2.5.2 Dispositions constructives
  - 2.5.3 Mise en oeuvre
  - 2.5.4 Contraintes de calcul
  - 2.5.5 Essais de contrôle et de portance
- Chapitre 3 Pieux à tube battu exécutés en place
  - 3.1 Battu pilonné
    - 3.1.1 Caractéristiques
    - 3.1.2 Dispositions constructives
    - 3.1.3 Mise en oeuvre
    - 3.1.4 Contraintes de calcul
  - 3.2 Battu moulé
    - 3.2.1 Caractéristiques
    - 3.2.2 Dispositions constructives
    - 3.2.3 Mise en oeuvre
    - 3.2.4 Contraintes de calcul
- Chapitre 4 Pieux forés
  - 4.1 Foré simple
    - 4.1.1 Caractéristiques
    - 4.1.2 Dispositions constructives
    - 4.1.3 Mise en oeuvre
    - 4.1.4 Contraintes de calcul
  - 4.2 Foré tubé
    - 4.2.1 Caractéristiques
    - 4.2.2 Dispositions constructives
    - 4.2.3 Mise en oeuvre
    - 4.2.4 Contraintes admissibles
  - 4.3 Foré boue
    - 4.3.1 Caractéristiques
    - 4.3.2 Dispositions constructives
    - 4.3.3 Mise en oeuvre
    - 4.3.4 Contraintes de calcul
  - 4.4 Tarière creuse
    - 4.4.1 Caractéristiques
    - 4.4.2 Dispositions constructives

- 4.4.3 Mise en oeuvre
  - 4.4.4 Contraintes de calcul
- 4.5 Vissé moulé
  - 4.5.1 Caractéristiques
  - 4.5.2 Dispositions constructives
  - 4.5.3 Mise en oeuvre
  - 4.5.4 Contraintes de calcul
- 4.6 Pieu injecté haute pression
  - 4.6.1 Caractéristiques
  - 4.6.2 Dispositions constructives
  - 4.6.3 Mise en oeuvre
  - 4.6.4 Contraintes de calcul
  - 4.6.5 Essais de contrôle de portance
- Chapitre 5 Puits
  - 5.1 Caractéristiques
    - 5.1.1
    - 5.1.2
    - 5.1.3
    - 5.1.4
    - 5.1.5
  - 5.2 Dispositions constructives
    - 5.2.1
    - 5.2.2
    - 5.2.3
  - 5.3 Mise en oeuvre
    - 5.3.1 Blindages
    - 5.3.2 Bétonnage
    - 5.3.3 Base élargie
- Chapitre 6 Pieux foncés
  - 6.1 Béton foncé
    - 6.1.1 Caractéristiques
    - 6.1.2 Dispositions constructives
    - 6.1.3 Mise en oeuvre
    - 6.1.4 Contraintes de calcul
  - 6.2 Métal foncé
    - 6.2.1 Caractéristiques
    - 6.2.2 Dispositions constructives
    - 6.2.3 Mise en oeuvre
    - 6.2.4 Contraintes de l'acier

- Chapitre 7 Micropieux
  - 7.1 Type I
    - 7.1.1 Caractéristiques
    - 7.1.2 Dispositions constructives
    - 7.1.3 Mise en oeuvre
    - 7.1.4 Contraintes de calcul
    - 7.1.5 Essai de contrôle de portance
  - 7.2 Type II
    - 7.2.1 Caractéristiques
    - 7.2.2 Dispositions constructives
    - 7.2.3 Mise en oeuvre
    - 7.2.4 Contraintes de calcul
    - 7.2.5 Essais de contrôle de portance
  - 7.3 Type III
    - 7.3.1 Caractéristiques
    - 7.3.2 Dispositions constructives
    - 7.3.3 Mise en oeuvre
    - 7.3.4 Contraintes de calcul
    - 7.3.5 Essais de contrôle de portance
  - 7.4 Type IV
    - 7.4.1 Caractéristiques
    - 7.4.2 Dispositions constructives
    - 7.4.3 Mise en oeuvre
    - 7.4.4 Contraintes de calcul
    - 7.4.5 Essais de contrôle de portance
- Chapitre 8 Colonnes ballastée
  - 8.1 Caractéristiques
  - 8.2 Dispositions constructives
    - 8.2.1
    - 8.2.2
    - 8.2.3
  - 8.3 Mise en oeuvre
    - 8.3.1
    - 8.3.2
    - 8.3.3
  - 8.4 Essais d'information
    - 8.4.1
    - 8.4.2
    - 8.4.3
  - 8.5 Essais de contrôle
    - 8.5.1

- 8.5.2
  - 8.5.3
- 8.6 Contraintes admissibles
- Chapitre 9 Picots
  - 9.1 Caractéristiques
    - 9.1.1
    - 9.1.2
    - 9.1.3
    - 9.1.4
  - 9.2 Dispositions constructives
    - 9.2.1 Armatures
    - 9.2.2 Béton
  - 9.3 Mise en oeuvre
    - 9.3.1
    - 9.3.2
  - 9.4 Dimensionnement
    - 9.4.1 Picots type 1
    - 9.4.2 Picots type 2
  - 9.5 Essais de contrôle
    - 9.5.1 Picots type 1
    - 9.5.2 Picots type 2
    - 9.5.3
- Chapitre 10 Les essais de pieux (Commentaire)
  - 10.1 Classification des différents essais de pieux
    - 10.1.1 Les essais de reconnaissance
    - 10.1.2 Les essais de contrôle
  - 10.2 Les essais de reconnaissance
    - 10.2.1 Les essais préliminaires
    - 10.2.2 Les essais d'information
  - 10.3 Les essais de contrôle
    - 10.3.1 Essais de contrôle du fût
    - 10.3.2 Les essais de contrôle de portance
- Chapitre 11 Calcul des fondations profondes soumises à charge axiale (Commentaire)
  - 11.1 Principe de calcul
  - 11.2 Eléments d'information nécessaires au calcul
  - 11.3 Méthodes de calcul prévisionnelles de la charge limite d'un pieu isolé sous charges

#### axiales

- 11.3.1 Définitions
  - 11.3.2 Essais de laboratoire
  - 11.3.3 Essais en place
- 11.4 Contraintes de calcul

### **Membres de la commission de normalisation chargée de l'élaboration du présent document**

#### **Président :**

M. HURTADO (CEBTP)

#### **Co-Rédacteurs :**

MM.

- HURTADO (CEBTP)
- PERCHAT (FNB)

#### **Membres :**

MM.

- ADAM,
- BERARD, représentant l'EMCC
- BOUCHERIE, représentant la SOCOTEC
- BOLLE, représentant SPIE BATIGNOLLES
- BRULOIS, représentant SIF BACHY
- BUSTAMANTE, représentant LCPC
- CLAUZON, représentant l'UNM
- COQUAND, représentant SOFFONS
- CUNIN, représentant CEP
- DE LAMOTTE, représentant SIMECSOL
- GOUVENOT, représentant SOLETANCHE
- ISNARD, représentant le Bureau VERITAS
- KOCH, représentant UNIMETAL
- LEGENDRE, représentant EMCC
- MEIDEINGER, représentant FONDACO
- PAREZ, représentant la Société SOL-ESSAIS
- PERCHAT, représentant la FNB
- PLISKIN, représentant ATILH
- SCHMOL, représentant SNBATI
- SORIA, représentant CEP
- STOUVENEL, représentant SOTRAISOL
- TCHENG,
- THONIER, représentant SOFFONS
- UNGER, représentant FONDACO

### **Préambule Définitions**

Pour tenir compte de l'évolution des connaissances et des techniques, il est apparu nécessaire de refondre le DTU « Fondations profondes ». Le texte actuel correspond notamment à l'amélioration des conditions d'exécution des pieux et devrait inciter à de nouveaux perfectionnements.

Pour que la réalisation des fondations soit satisfaisante, il y a intérêt à mener sans formalisme excessif les études, les enquêtes, les reconnaissances préalables, la préparation du projet et la préparation du chantier en agissant dans un cadre cohérent sans précipitation anormale.

Dans un tel cadre et en raison même des risques importants, parfois difficiles à cerner en fondations profondes, il est impératif d'apprécier à sa juste valeur la portée du DTU.

C'est l'objet des commentaires qui rappellent et justifient :

- d'une part, les arguments essentiellement techniques et technologiques qui ont conduit à la rédaction des articles du Cahier des Clauses Techniques,
- d'autre part, les données principales servant à l'établissement des Documents Particuliers d'un Marché de fondations profondes pour le bâtiment et notamment du devis descriptif.

Les commentaires n'ont aucun caractère réglementaire ou normatif. Néanmoins, lorsque certains d'entre eux sont repris dans un devis particulier, ils ont une valeur contractuelle.

Les termes suivants, utilisés dans les textes du présent DTU relatif aux fondations profondes, ont la signification indiquée en regard. Ils doivent être employés dans les pièces du marché.

**Ancrage**

**Longueur de pénétration dans la couche résistante.**

**Arase**

**niveau de la partie supérieure du pieu après sa mise en oeuvre et avant recépage.**

**Armature**

**L'armature d'un pieu comprend :**

- **la cage** , qui est l'ensemble des aciers pris en compte dans l'évaluation de la résistance du pieu suivant les règles en vigueur ;
- **les suspentes** , qui sont des aciers destinés à éviter la chute de la cage en fond de forage ;
- **le panier** , qui est un dispositif destiné à éviter la remontée de la cage pendant la mise en oeuvre du béton et l'extraction du tube, tubage ou virole ;
- **les centreurs** , qui sont des pièces généralement en béton destinées à maintenir la cage latéralement.

**Axe**

**Lieu des centres de gravité des sections droites.**

**Barres d'attente**

**Barres d'acier piquées dans le béton frais en tête des pieux, en fin de mise en oeuvre.**

**Barrette**

**Pieu foré de section allongée ou composite.**

**Charge limite**

**Charge de rupture du sol, appelée parfois à tort, charge de rupture ;**

**Charge nominale**

**Charge limite frappée d'un coefficient de sécurité ;**

**Charge ultime**

**Charge de rupture des matériaux constitutifs des pieux ou puits ;**

**Charge intrinsèque**

**Charge ultime frappée d'un coefficient de sécurité ;**

**Charge de rupture**

**La plus petite des charges limites (modifiée par l'effet de groupe) et ultime ;**

**Charge de fluage**

**Paramètre caractéristique tiré de l'essai de chargement statique.**

**Chemise**

**Gaine**

**Tube en général d'acier mince faisant partie du fût du pieu ;**



**Coefficient de réduction**

Rapport de la charge limite, évaluée par une formule de battage, à la charge à l'ELS.

**Colonne**

Tube d'acier destiné à la mise en place du béton dans un pieu, également nommé « colonne de bétonnage ». On l'appelle également « tube plongeur », si elle plonge effectivement dans le béton en place.

**Descente de charges**

Ensemble des sollicitations qui s'exercent aux points d'appui de la structure.

**Diamètre**

4 A/p - voir Section et Périmètre.

**Elancement**

Rapport de la longueur utile à la largeur.

**Essais de reconnaissance**

Essais préliminaires ou d'information destinés à compléter les résultats des reconnaissances des sols :

- préliminaires : essais de chargement statique de pieux instrumentés ne faisant pas partie de l'ouvrage, exécutés préalablement au début des travaux,
- d'information : essais sur des pieux de l'ouvrage consistant à noter certains paramètres d'exécution.

**Essais de contrôle**

Essais de fût ou de portance :

- de fût : essais destinés à s'assurer des qualités de continuité du fût des pieux de l'ouvrage ainsi que du bon contact sol-pieu.
- de portance : essais de chargement statique de pieux de l'ouvrage.

**Essais soniques par transparence**

**Carottage sonique**

Mesure des temps de transit d'un train d'ondes soniques à travers le béton, entre un émetteur et un récepteur.

**Excentrement**

Distance entre l'axe théorique et l'axe réel du pieu.

**Excentricité**

Distance entre le point d'application de la charge et l'axe du pieu.

**Faux pieu**

Élément fixé provisoirement en tête du pieu pour permettre d'en poursuivre l'enfoncement en-dessous de la plate-forme de travail.

**Faux refus**

Il y a faux refus lorsque les moyens de mise en oeuvre d'un pieu ne permettent pas d'atteindre la cote convenue.

**Fiche**

Longueur utilisée pour les calculs de portance, généralement comptée à partir de la pointe.

**Frottement négatif**

Effort descendant exercé sur le fût du pieu par le sol en cours de tassement.

**Fût**

Corps du pieu, de la tête à la pointe.

**Gaine**

Voir « Chemise ».

#### **Géotechnicien**

**Ingénieur diplômé spécialisé en mécanique des sols et fondations.**

#### **Impédance mécanique**

**Rapport  $F/v$  dans lequel  $F$  est une force verticale sinusoïdale entretenue appliquée en tête de pieu et  $v$  la vitesse sinusoïdale correspondante. Le rapport  $V/f$  est l'admittance.**

#### **Implantation**

**Situation des pieux dans l'espace. Système de repères fixes, solides et bien protégés, qui permet de situer facilement sur le chantier la position exacte des pieux par visée optique et mesure des longueurs.**

#### **Largeur**

**Diamètre  $B$  du cercle inscrit dans la section du fût.**

#### **Longueurs**

**Dimensions prises suivant l'axe ; à définir dans les pièces du marché.**

#### **Longueur utile**

**Distance du recépage à la pointe.**

#### **Niveau réel du recépage**

**Niveau de la partie supérieure du pieu recépé.**

#### **Niveau théorique de recépage**

**Niveau de recépage fixé par les pièces du marché.**

#### **Périmètre**

**Longueur  $p$  du périmètre de la section du fût.**

#### **Pieu**

**Fondation profonde réalisée mécaniquement.**

#### **Piquetage**

**Système de piquets qui permet de situer la position des pieux sans le secours d'aucun appareil topographique.**

#### **Pointe**

**Partie inférieure du pieu (pour un puits ou certains pieux, on parle de base).**

#### **Puits**

**Fondation profonde creusée à la main sous la protection d'un blindage.**

#### **Recéper**

**Enlever la partie supérieure de la tête du pieu.**

#### **Refus**

**Enfoncement permanent moyen d'un pieu sous un coup de mouton mesuré sous une volée de dix coups.**

#### **Refus absolu**

**Impossibilité de faire descendre le pieu par de nouvelles volées de coups de mouton.**

#### **Refus élastique**

**Renforcement élastique temporaire sous l'effet du coup de mouton.**

#### **Section**

**Aire  $A$  de la section droite du fût.**

#### **Section nominale**

**Section prise en compte dans les calculs.**

#### **Sollicitations**

**Elles sont définies par les règles BAEL. On tient compte, en outre, du frottement négatif éventuel et des**

## **excentrements contractuels.**

### **Tête**

**Partie supérieure du pieu.**

### **Tubage**

**Tube d'acier très épais utilisé pour la mise en oeuvre des pieux forés-tubés.**

### **Tube**

**Tube d'acier très épais utilisé pour la mise en oeuvre de pieux à tube battu.**

### **Virole**

**Tube d'acier d'épaisseur moyenne utilisé pour la mise en oeuvre des pieux forés simples ou à la boue destiné à éviter l'éboulement du forage en tête.**

Les termes indiqués dans le glossaire ont été choisis comme étant le plus couramment employés par les membres de la profession. Pour qu'il n'y ait aucune erreur d'interprétation, il est recommandé de les utiliser particulièrement dans les pièces contractuelles. Le mot « pieu » employé sans autre précision peut désigner indifféremment les pieux, les puits ou les barrettes.

## **Chapitre 1 Dispositions communes aux divers types de fondations profondes**

### **1.1 Généralités**

#### **1.1.1 Domaine d'application**

Le présent Cahier des Clauses Techniques ne s'applique qu'aux ouvrages de fondations profondes entrant dans la construction de bâtiments et de leurs annexes et comportant la mise en oeuvre de l'un des procédés suivants :

- *Pieux façonnés à l'avance*
  - Battu préfabriqué
  - Métal battu
  - Tubulaire précontraint
  - Battu enrobé
  - Battu ou vibro-foncé injecté haute pression
- *Pieux à tube battu exécutés en place*
  - Battu pilonné
  - Battu moulé
- *Pieux forés*
  - Foré simple
  - Foré tubé
  - Foré boue
  - Tarière creuse
  - Vissé moulé
  - Injecté haute pression
- *Puits*
- *Pieux foncés*
  - Béton foncé
  - Métal foncé
- *Micropieux*

- Type I
- Type II
- Type III
- Type IV

Dans le cas où un procédé d'exécution autre que ceux décrits dans le présent Cahier des Clauses Techniques est employé, le maître d'oeuvre, éventuellement assisté par un expert, sur proposition de l'entrepreneur, rédige entièrement un Cahier des charges particulier.

La possibilité, qui est offerte au maître d'oeuvre, de rédiger un Cahier des charges particulier permet soit l'emploi de procédés combinant certains de ceux déjà décrits (par exemple, foré tube et foré simple) ; soit l'emploi de procédés nouveaux.

Dans ce cas, il est recommandé au maître d'oeuvre de prendre conseil auprès d'un spécialiste pour établir un Cahier des charges précis et complet.

Les procédés décrits dans le Cahier des Clauses Techniques concernent les types de pieux les plus couramment utilisés.

Les colonnes ballastées et les picots sont rattachés provisoirement au présent DTU dans l'attente d'un DTU relatif aux procédés de consolidation des sols.

Les « colonnes ballastées » et les « picots » peuvent avoir chacun l'une des deux fonctions suivantes :

- éléments de fondation porteurs et calculés comme tels ;
- consolidation et amélioration du sol destiné à recevoir une fondation superficielle.

### 1.1.2 Prescriptions relatives à la fourniture et à la mise en oeuvre des matériaux

Sauf dispositions contraires du présent Cahier des charges ou des documents particuliers du marché, la fourniture et la mise en oeuvre des matériaux entrant dans la constitution des fondations profondes sont soumises aux prescriptions en vigueur, définies :

- par les normes françaises ;
- par les fiches d'agrément de la Commission interministérielle des aciers à haute adhérence ;
- par les Documents Techniques Unifiés (DTU) en vigueur ;
- par les Règles BAEL pour les pieux en béton armé ;
- par les circulaires ministérielles relatives à l'emploi des ciments.

La provenance et la qualité des matériaux constituant les pieux sont à définir dans le devis descriptif (nuance des aciers, qualité et origine des granulats, nature des ciments..., etc.).

On rappelle que la nature des ciments employés doit être adaptée à l'agressivité éventuelle des nappes et des terrains traversés.

Le devis descriptif précise la position du maître d'oeuvre sur l'emploi des adjuvants dans les bétons (retardateurs, plastifiants, entraîneurs d'air..., etc.).

Pour les pieux de gros volume, un retardateur de prise peut être recommandé. Le devis descriptif indique, dans ce cas, que l'entrepreneur soumet une note technique concernant la nature du retardateur, la quantité à employer par m<sup>3</sup> de béton, la durée du malaxage, la température de mise en oeuvre..., etc.

En cas d'utilisation du béton prêt à l'emploi, afin d'éviter l'interruption de bétonnage d'un pieu préjudiciable à sa bonne qualité, le devis descriptif indique, pour les pieux de gros volume, la quantité minimale de béton malaxé en attente sur chantier au début du coulage.

Il convient de couder les barres d'attente à leur extrémité libre pour éviter des accidents de personnes, ces barres sont en général en acier doux.

Les cages d'armatures sont, le plus souvent, en acier mi-dur ; dans ce cas, elles ne doivent pas normalement subir pliage et redressage successifs et des précautions particulières sont à prendre pour éviter des accidents de

personnes.

### 1.1.3 Surveillance des efforts transmis aux pieux ou puits

L'entrepreneur doit veiller à ce que l'exécution des travaux qui lui incombent n'ait pas pour effet de soumettre les pieux ou puits à des efforts supérieurs à ceux pour lesquels ils ont été prévus.

Le maître d'ouvrage et ses délégués doivent veiller à ce que cette prescription soit observée par les autres entreprises.

Les efforts dangereux pour les pieux en place sont particulièrement provoqués par :

- les chocs en tête des pieux en béton provenant des engins de terrassement (bulldozer, pelle mécanique, etc.) ;
- les efforts obliques transmis même provisoirement à la tête de certains pieux (par exemple, par des engins de levage, par des matériels de compactage, par des butons, etc.) ;
- les terrassements dissymétriques proches des pieux ;
- les stockages de matériaux ou de matériels, même de courte durée, au voisinage des pieux.

### 1.1.4 Implantation et piquetage

#### 1.1.4.1

Les repères devant servir à l'implantation des pieux, fournis par le maître d'ouvrage, doivent être solides et bien protégés.

Les repères d'implantation réalisés sous la responsabilité du maître d'oeuvre doivent être solides et bien protégés : ils sont placés dans une zone stable suffisamment loin du futur bâtiment pour ne pas risquer d'être endommagés par le travail normal des machines.

Sur au moins un repère est portée une cote d'altitude rattachée au nivellement général. L'entrepreneur, après réception écrite, reçoit la garde et l'entretien desdits repères.

#### 1.1.4.2

Les repères de piquetage sont placés sous la responsabilité de l'entrepreneur. Chaque repère doit être enfoncé sur toute sa longueur à 1 cm près.

Les repères de piquetage sont, en général, constitués par des fiches métalliques enfoncées dans le sol suffisamment profondément pour ne pas être déplacées par la circulation des engins. S'ils dépassaient du sol, ils pourraient être la cause d'accidents de personnes.

### 1.1.5 Tolérances d'implantation au niveau du recépage (excentrement)

L'hétérogénéité du sol (blocs, couche dure inclinée, etc.), l'état de la plate-forme de travail, la proximité d'un talus sont fréquemment la cause d'excentrement ou d'écarts d'inclinaison.

#### 1.1.5.1

Sauf indications différentes dans les pièces contractuelles du marché, la tolérance sur l'axe des pieux est de 15 cm en écart ponctuel (c'est-à-dire en toutes directions), - 5 % en inclinaison (distance de la pointe à sa position théorique inférieure à 5 centièmes de la longueur utile du pieu).

Les tolérances d'implantation sont fixées dans le devis descriptif : des valeurs trop faibles entraînent l'utilisation de dispositifs de guidage onéreux ; des valeurs trop fortes conduisent à une augmentation du coût de la structure. La tolérance de 15 cm est une valeur extrême à ne dépasser en aucun cas. Les valeurs ci-dessous donnent les valeurs moyennes courantes conseillées en site terrestre, pour les arases normales, quel que soit le diamètre (tolérances en

cm) :

- battu préfabriqué : 6
- métal battu : 4
- tubulaire précontraint : 9
- battu enrobé : 6
- battu pilonné : 6
- battu moulé : 6
- foré simple : 12
- foré tubé : 6
- foré boue : 12
- tarière creuse : 12
- vissé moulé : 9
- micropieu : 4

Les ouvrages surmontant les pieux sont conçus de telle sorte qu'ils ne soient pas à modifier tant que les écarts d'implantation sont inférieurs aux tolérances d'implantation.

Pour les problèmes d'excentrement, il faut faire une différence :

- entre les pieux isolés et ceux liés à une longrine ou un massif,
- entre les pieux munis d'une cage d'armature et les pieux non armés.

Dans certains terrains de surface très hétérogènes, le forage, en tête, peut avoir une forme quelconque. Le tubage ou la virole de tête obligatoire est mis en place en fonction des repères d'axe et il y a intérêt à procéder à un remblaiement autour du tubage ou de la virole.

En fin de bétonnage, c'est l'axe du tubage ou de la virole qui sert au repérage de la mise en place des barres d'attente. Dans ce cas, on mesure la distance de l'épicentre des barres d'attente (qui définit l'axe réel du pieu) à l'axe théorique, et on compare cette distance à la tolérance.

En cas de doute sur la position de l'axe réel du pieu, on procède à des vérifications contradictoires : il y a lieu de dégager le pieu sur une longueur suffisante pour que son axe puisse être déterminé au mieux.

#### 1.1.5.2

Dans le cas particulier des pieux qui sont à la fois :

- verticaux,
- de section circulaire,
- en béton,
- sans armatures,
- soumis à des efforts verticaux seulement,
- en site terrestre,

la distance, dans le plan horizontal de recépage, entre l'axe théorique et l'axe réel du pieu doit être inférieure au huitième du diamètre.

Pour les pieux non armés, la règle du huitième de diamètre ne s'applique qu'à des cotes de recépage situées entre 0 et 1,50 m de profondeur sous la plate-forme de travail.

Au delà de cette profondeur, il est admis une tolérance supplémentaire correspondant à la tolérance d'inclinaison dont on tiendra compte dans les calculs.

L'inclinaison du pieu sur la verticale doit être inférieure à 3 % et inférieure à 2 % si plus de 3 pieux d'un même groupe sont inclinés dans la même direction.

#### 1.1.6 Problèmes non traités dans le présent Cahier des charges (site aquatique, pieux faiblement ancrés dans un substratum dur incliné, etc.).

Les problèmes non traités dans le présent Cahier des Clauses Techniques font l'objet de dispositions particulières arrêtées par le maître d'ouvrage en accord avec l'entrepreneur.

### 1.1.7 Exécution des travaux annexes

Les pieux exécutés à flanc de talus doivent être débutés par un avant trou.

Le recépage relève normalement du lot semelles et longrines. Exceptionnellement, il peut faire partie du marché ouvrages de fondations profondes.

Le recépage doit éliminer tout béton pollué ou de caractéristiques médiocres, en tête de pieu ou barrette et être poursuivi sur une hauteur de dix centimètres dans le béton sain.

Dans le cas des pieux exécutés en place, le recépage est destiné à éliminer la partie supérieure du béton détérioré par l'eau, le terrain ou la boue. Il doit permettre de retrouver un béton sain et d'amener la tête du pieu au niveau fixé par les plans.

Dans le cas des pieux façonnés à l'avance, le recépage a pour objectif, d'une part, d'éliminer la partie de la tête du pieu qui a souffert au battage, d'autre part, d'amener la tête du pieu au niveau fixé par les plans.

Les documents particuliers du marché indiquent l'endroit où les résidus de recépage doivent être évacués.

Lorsque le marché de fondations comporte l'exécution du béton armé des semelles et longrines et des terrassements correspondants, ces travaux sont exécutés conformément aux dispositions du Cahier des charges DTU n°13.1 applicable aux fondations superficielles.

Si les documents particuliers précisent que le marché de travaux de fondation comporte l'exécution du béton armé des semelles et longrines et des terrassements correspondants, ils indiquent alors les dispositifs de liaison à prévoir.

Le béton de propreté ne doit pas recouvrir les têtes de pieux ou puits.

Les barres d'attente (*voir définition*), lorsqu'elles sont prévues, doivent être coudées.

Lorsque les arases sont en contrebas de la plate-forme de travail, les trous correspondants doivent être immédiatement comblés sur toute la hauteur.

Plus le niveau théorique de recépage est profond sous le niveau de la plate-forme de travail, plus la hauteur du recépage à prévoir est importante par suite des grandes difficultés de contrôle du toit du béton sain en fin de coulage et de la pénétration dans le béton frais des blocs de terre qui risquent de s'effondrer. La hauteur limite de recépage, fixée par le Cahier des Charges pour chaque type de pieu, est celle qui intervient à l'article 9 du Cahier des Clauses Spéciales.

Les arases en contrebas de la plate-forme, si elles ne sont pas immédiatement comblées, sont souvent la cause d'accidents de personnes.

## 1.2 Essais

Le nombre et la nature des essais sont fixés par les documents particuliers du marché : toutefois, le nombre des essais d'information ne doit pas être inférieur à 1 sur 20 pieux, ou fraction de 20 pieux, par ouvrage.

Il est rappelé que les essais de pieux sont répartis en deux groupes :

- les essais de reconnaissance, qui ont pour but de compléter les résultats des reconnaissances des sols ;
- les essais de contrôle, qui ont pour but de vérifier la qualité de la fondation exécutée.

Pour le détail des commentaires relatifs aux essais, il y a lieu de se reporter au chapitre 10.

### 1.2.1

Les essais d'information donnent lieu, pour chaque pieu concerné :

#### 1.2.1.1 Dans le cas des pieux battus

A l'établissement d'une courbe de battage complète établie en portant en ordonnées les profondeurs et en abscisses la résistance dynamique calculée par la formule des Hollandais sans coefficient de réduction.

$$R_d = \frac{M^2 h}{e (M + P)}$$

dans laquelle :

- $R_d$  = résistance dynamique
- $M$  = poids du mouton
- $h$  = hauteur de chute du mouton
- $P$  = poids des pièces mobiles intéressées au battage
- $e$  = enfoncement moyen par coup de mouton.

Sur les trois derniers mètres, tous les 1 m de profondeur, on relève le refus élastique  $e^1$  et on porte sur le graphique de battage les quatre points représentatifs obtenus par la formule de Crandall sans coefficient de réduction.

$$R_d = \frac{M^2 h}{\left( e + \frac{e^1}{2} \right) (M + P)}$$

dans laquelle  $e^1$  = refus élastique.

### 1.2.1.2 Dans le cas des pieux foncés

A l'établissement d'une courbe de fonçage complète établie en portant en ordonnées les profondeurs et en abscisses la résistance statique en MPa égale à la force de fonçage divisée par la section de la pointe du pieu ;

### 1.2.1.3 Dans le cas des pieux forés

A l'établissement d'une coupe des terrains rencontrés qui comporte la description des matériaux extraits.

Un échantillon de terrain, même très remanié mais caractéristique de chaque couche traversée, doit être conservé, dans un emballage étanche numéroté, jusqu'à la fin des travaux.

## 1.3 Justification des fûts des pieux

La charge admissible peut être, selon les cas, limitée par les caractéristiques mécaniques du sol ou celles des matériaux constitutifs du fût du pieu.

- La limite imposée par le sol (charge nominale) résulte de l'étude géotechnique. Elle est définie au chapitre 11.
- La limite imposée par les matériaux constitutifs du fût du pieu est définie par les articles 1.3.1 et 1.3.2. L'attention est attirée sur le fait qu'il y a lieu de considérer la section du fût la plus défavorable, en tenant compte notamment du frottement négatif éventuel et de l'excentricité.

### 1.3.1 Justification des pieux métalliques ou mixtes

Se reporter au chapitre correspondant

### 1.3.2 Justification des pieux en béton armé

#### 1.3.2.1 Résistances à prendre en compte

##### 1.3.2.1.1 Résistance de calcul conventionnelle du béton

Le calculs justificatifs des fondations sont conduits à partir d'une résistance conventionnelle du béton notée  $f_c^*$ , définie par :

$$f_c^* = \inf \frac{(f_{cj} ; f_{clim})}{k_1 k_2}$$

avec :

$f_{cj}$  : résistance caractéristique à  $j$  jours d'âge telle qu'elle est définie par les Règles BAEL

$f_{clim}$  : valeur limite dépendant de la technique de fondation et définie dans le tableau ci-après

$k_1$  : coefficient tenant compte du mode de mise en place dans le sol ainsi que des variations possibles des sections, selon le procédé d'exécution adoptée

$k_2$  : coefficient tenant compte des difficultés de bétonnage liées à la géométrie de la fondation.



a Les valeurs de  $f_{clim}$  et  $k_1$  sont données dans le tableau suivant :

Les valeurs de  $f_{clim}$  et  $k_1$  sont données dans le tableau suivant :

	Type de fondation	$f_{clim}$	$k_1(1)$	
Groupe A	Pieux ou parois préfabriqués mis en place dans un forage	$f_{c28}$	1,00	
	Pieux tubulaires précontraints	$f_{cj}$	1,15	
	Pieux préfabriqués battus en béton armé	$f_{cj}$	1,15	
	Puits avec béton vibré	$f_{c28}$	1,00	
	Puits avec béton non vibré	$f_{c28}$	1,20	
Groupe B	Pieux battus moulés	$f_{c28}$	1,3	
	Pieux et barettes forés simples	$f_{c28}$	1,3	
	Pieux forés tubés	bétonnés à sec	$f_{c28}$	1,2
		bétonnés sous l'eau	$f_{c28}$	1,3
	Pieux et barettes bétonnés sous boue, parois moulées	$f_{c28}$	1,3	

(1)

Il est loisible de diminuer d'au plus 0,1 la valeur absolue du coefficient  $k_1$  :

- pour les pieux et barettes forés simples, lorsque la nature des terrains rencontrés garantit une stabilité absolue des parois ;
- pour les pieux forés tubés, lorsque l'extraction du tube est effectuée avec vibrations et présente toutes les garanties vis-à-vis du respect de l'intégrité du pieu.

b Le coefficient  $k_2$  prend normalement les valeurs suivantes :

- Eléments du groupe A :  
 $k_2 = 1$
- Eléments du groupe B :
  - dont le rapport du plus petit diamètre  $d$  à la longueur est inférieur à  $1/20$  :  
 $k_2 = 1,05$
  - dont le plus petit diamètre est inférieur à 0,60 m :  
 $k_2 = (1,3 - d/2)$
  - réunissant les deux conditions précédentes :  
 $k_2 = (1,35 - d/2)$   
 $d$  étant exprimé en mètres.
  - ne réunissant aucune des conditions précédentes :  
 $k_2 = 1$

### 1.3.2.1.2 Résistance caractéristique à la traction

La résistance caractéristique à la traction  $f_{tj}$  s'obtient en appliquant à la résistance conventionnelle  $f^*c$  définie ci-dessus la formule de l'article A.2.1,12 des Règles BAEL.

### 1.3.2.2 Justifications en phase définitive

Les justifications doivent être conduits à partir des dimensions nominales des éléments de fondation considérés.

#### 1.3.2.2.1 Etats limites de service

Les sollicitations de calcul à considérer résultent des combinaisons rares, telles qu'elles sont définies par les Règles BAEL.

Les hypothèses de calcul sont celles définies à l'article A.4.5,2 des Règles BAEL.

Etat limite de compression du béton

Cet état limite est défini par les deux conditions suivantes :

- 1 la contrainte maximale de compression du béton est égale à  $0,6 f^*c$  ;
- 2 la contrainte moyenne de compression du béton sur la seule section comprimée de celui-ci est égale à 0,3

$f^*c.$ 

## a Etat limite de fissuration

L'état limite de fissuration correspond à une contrainte de traction des armatures égale aux valeurs indiquées aux articles A.4.5,33 (fissuration considérée comme préjudiciable) ou A.4.5,35 (fissuration considérée comme très préjudiciable) des Règles BAEL.

**1.3.2.2 Etats limites ultimes de résistance**

## a Justifications vis-à-vis des sollicitations normales

Les sollicitations de calcul à considérer vis-à-vis de ces états limites résultent des combinaisons d'actions définies par les Règles BAEL.

Les justifications sont conduites conformément aux articles A.4.3,1 à A.4.3,4 des Règles BAEL, en remplaçant  $f_{cj}$  par  $f^*c.$

## b Justifications vis-à-vis des sollicitations tangentes

Les justifications sont conduites conformément aux articles A.5.1,1 et A.5.1,2 des Règles BAEL, en substituant à la résistance caractéristique  $f_{cj}$  du béton sa résistance de calcul  $f^*c$  définie par les Règles BAEL.

Pour les pieux circulaires, la contrainte tangente  $\tau_u$  est prise conventionnellement égale à :

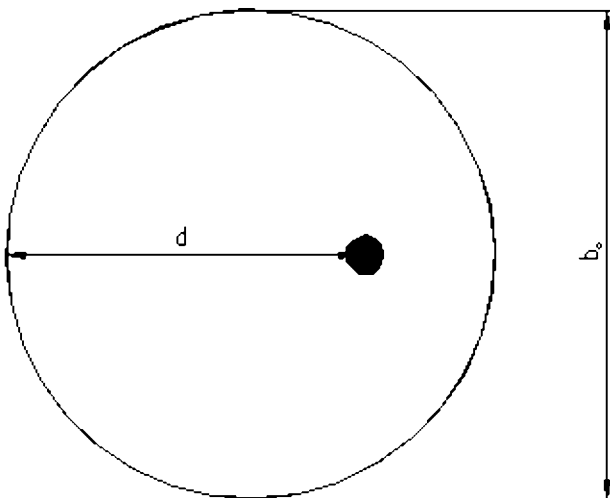
$$\tau_u = 1,4 \frac{V_u}{b_0 d}$$

avec :

$b_0$  : diamètre du pieu

$d$  : distance entre la fibre la plus comprimée et l'armature la plus tendue.

$V_u$  : valeur de l'effort tranchant à l'ELU.

**1.3.2.3 Justification en phases de construction**

On doit justifier de l'état-limite ultime de résistance et de l'état-limite ultime d'équilibre statique durant les phases de construction, sous la combinaison d'actions fondamentale définie dans les Règles BAEL.

Pour les vérifications aux états-limites ultimes de résistance, il est loisible d'utiliser pour l'acier un coefficient partiel de sécurité réduit à 1 au lieu de 1,15.

### 1.3.2.4

Lorsqu'il est procédé à un contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût, les contraintes de calcul peuvent être augmentées de 20 % au plus.

## Chapitre 2 Pieux façonnés à l'avance

### 2.1 Battu préfabriqué

#### 2.1.1 Caractéristiques

##### 2.1.1.1

Les pieux battus ou vibrofoncés préfabriqués sont en béton armé (ou précontraint).

Les pieux préfabriqués sont habituellement en béton armé et ils peuvent être en béton précontraint. Le bois, qui fut beaucoup utilisé, ne l'est plus guère que dans des cas particuliers et surtout hors de France, dans des pays tropicaux ou très riches en forêts (Amérique du Nord). Certaines réglementations (Manuel du Génie/France - SIA 192/Suisse - CP2004/Angleterre) comportent des indications sur ce type de pieux. Le présent chapitre concerne uniquement les pieux en béton armé ou précontraint.

La fabrication peut être complète sur le chantier, sur bancs, à la longueur définitive théorique sous réserve d'enture (pieux classiques en béton armé de section circulaire ou polygonale). Elle peut n'être que partielle, en usine, sous forme d'éléments en béton de haute performance (étuvage, centrifugation,...) dont l'assemblage se fait ensuite lors de la mise en oeuvre par des moyens divers (clavettes, bétonnage d'un noyau central, etc.).

Dans l'expression « battu préfabriqué », le terme « battu » recouvre en fait tous les moyens de mise en oeuvre utilisés pour enfoncer les pieux dans le sol par un effet dynamique : battage proprement dit par chocs (mouton à simple effet, à double effet, diesel,...) ou par vibrations (vibrofonceurs, trépideurs).

##### 2.1.1.2 Longueur

La longueur adoptée doit éviter, dans toute la mesure du possible, d'avoir recours ultérieurement à l'enture des pieux. La longueur des pieux est fonction de la fiche probable pour la charge prévue ; cette fiche est évaluée après reconnaissance du terrain.

La longueur correspondant à la fiche doit être augmentée, d'une part pour tenir compte, s'il y a lieu, de l'imprécision des moyens de détermination qui précèdent et notamment de l'hétérogénéité plus ou moins grande des terrains traversés, d'autre part pour réserver la hauteur nécessaire au recépage et à l'encastrement dans les chevêtres ou massifs de fondation.

La longueur utile du pieu en place est déterminée par l'étude géotechnique complétée par les résultats du battage (refus).

La longueur des éléments est conditionnée par des critères de manutention (tels que le poids, l'accessibilité aux moyens de chantier, la résistance à la flexion lors du levage,...) et de battage (élancement du pieu, hauteur libre sous le casque de battage).

On s'efforce de préfabriquer les pieux d'une longueur telle qu'il ne soit pas nécessaire de procéder à des entures.

##### 2.1.1.3 Section

La section transversale d'un pieu et sa résistance à la compression doivent être en rapport avec la sévérité du battage et avec les sollicitations que le pieu supportera. Cette section doit tenir compte, en outre, des flexions locales auxquelles le pieu pourrait être soumis une fois en place.

La section des pieux préfabriqués est généralement de forme polygonale ou circulaire. La section circulaire est théoriquement la plus satisfaisante par suite de sa symétrie, mais elle est la plus délicate à fabriquer et la section carrée est en fait la plus courante lors des préfabrifications sur chantier. Les pieux sont alors bétonnés de manière à servir de coffrage les uns aux autres.

##### 2.1.1.4 Elancement

Lorsque le choix des caractéristiques des pieux est laissé à l'initiative de l'entrepreneur, celui-ci doit justifier les élancements supérieurs à 50, de manière à éviter tout flambement hors du sol. Dans le cas des pieux évidés, l'épaisseur et le raidissement intérieur doivent être prévus en conséquence.

On bat couramment des pieux d'élancement 40 à 50 ; on trouve des exemples de pieux d'élancement atteignant 70 à 80, soit dans le cas de battage avec enture, soit dans le cas de battage facile.

## 2.1.2 Dispositions constructives

D'une manière générale, les dispositions constructives sont prises pour faire face successivement aux conditions de sollicitations :

- au cours des manutentions,
- au cours du stockage,
- au cours du battage,
- au stade final en service.

### 2.1.2.1 Armatures

Les armatures longitudinales doivent être, autant que possible, d'une seule longueur.

S'il n'en est pas ainsi, les recouvrements ou soudures ne doivent pas intéresser plus du tiers du nombre de barres dans une même section transversale, ni se trouver à une distance des extrémités qui soit inférieure à six fois la largeur du pieu.

Le diamètre des armatures longitudinales doit être au moins égal à 12 mm et leurs extrémités ne doivent pas être terminées par des crochets. Le nombre et la section des barres longitudinales et transversales sont fonction de la section transversale du pieu, des efforts de flexion pendant les manutentions, des difficultés de battage et des sollicitations de service.

Les armatures longitudinales doivent être maintenues par des armatures transversales : cadres ou épingles.

Le diamètre des armatures transversales ne doit pas être inférieur à 5 mm, ni leur espacement courant supérieur à 0,20 m ; à chaque extrémité, cet espacement est réduit au moins de moitié sur une longueur égale à deux fois la largeur du pieu.

Lorsque la sévérité du battage le motive, cet espacement est réduit au tiers, sur la longueur indiquée.

En outre, une zone de transition de même longueur comporte un espacement des armatures transversales égal aux 2/3 de l'espacement courant.

Les ancrages des armatures transversales doivent être assurés.

Pour les armatures longitudinales, comme pour les armatures transversales, on peut utiliser indifféremment de l'acier lisse doux ou de l'acier à haute adhérence et à haute limite élastique.

L'enrobage des armatures doit être celui prévu par les Règles BAEL en vigueur ; il ne descend généralement pas au-dessous de 3 cm pour les travaux à terre et 5 cm pour les travaux en mer. Des cales en béton en nombre suffisant permettent de respecter l'enrobage prévu.

#### armatures longitudinales

Lorsque le pieu est de section polygonale, il est souhaitable de placer une armature dans chaque angle.

Dans les pieux de section carrée d'au moins 0,40 m de côté, il est préférable de placer également un acier complémentaire longitudinal au milieu de chaque côté.

Cette disposition présente cependant l'inconvénient de conduire à un renforcement des armatures de liaison transversale (étriers, épingles, cadres).

Les reprises d'armatures peuvent être faites par recouvrement, soudure ou manchonnage bout à bout.

Lorsqu'on adopte la solution de barres de relativement gros diamètre (supérieur à  $\phi 20$ ), ces barres sont arrêtées à une distance de la tête du pieu comprise entre 40 et 60 cm (environ 1,5 fois le diamètre du pieu) et remplacées par une section égale de fers de petit diamètre ( $\phi 12$  au maximum).

On adopte souvent, pour les barres longitudinales, un diamètre supérieur au 1/20 de celui du pieu. La section d'acier dépend notamment des efforts appliqués au pieu au cours du battage et sous les charges appliquées par la structure ; elle ne descend pas au-dessous de 0,8 % de la section du pieu.

#### armatures transversales

Les armatures transversales sont réalisées sous forme de cadres ou de frettes, suivant la forme de la section transversale du pieu.

Les cadres, étriers et épingles sont généralement utilisés pour les pieux de section carrée.

Les frettes hélicoïdales sont mieux adaptées aux pieux d'autre section (octogonale, circulaire). Dans ce cas, le recouvrement entre 2 éléments successifs de frette doit se faire sur une longueur minimale de 30 diamètres (plus généralement 40) sans crochets.

Les extrémités libres des 2 frettes extrêmes (en tête et en pointe du pieu) sont terminées par un crochet en retour vers le centre du pieu ou éventuellement parallèle à l'axe du pieu.

Dans tous les cas, il est nécessaire que les armatures transversales soient bien façonnées, mises en place et liées aux armatures longitudinales pour maintenir efficacement celles-ci et s'opposer à leur flambement, notamment pendant le battage.

La quantité d'armatures transversales minimale est de 0,5 % du volume du béton aux extrémités du pieu et dans les zones de recouvrement des armatures longitudinales ; elle peut descendre en partie courante jusqu'à 0,15 - 0,2 %.

### 2.1.2.2 Composition du béton

Le béton doit être compact, d'une résistance appropriée aux sollicitations développées pendant le battage et en service. Il doit pouvoir être mis en oeuvre correctement malgré l'encombrement des armatures.

Les bétons pour pieux sont dosés en fonction du diamètre des granulats.

On emploie habituellement un dosage de 350 à 400 kg de ciment par mètre cube de béton tout en gardant le souci, tant dans le choix du ciment et de son dosage que dans les conditions de bétonnage, d'obtenir un béton aussi peu fragile et aussi peu sensible que possible à la fissuration.

Les caractéristiques du ciment entrant dans la composition du béton doivent tenir compte, notamment, de la composition chimique des terrains traversés et de l'agressivité des eaux avec lesquelles les pieux pourront être en contact.

L'emploi de ciments de nature différente dans un même pieu, notamment en cas d'enture faite à titre définitif, n'est admissible que dans la mesure où il n'y a pas d'incompatibilité entre ces ciments et si les précautions nécessaires sont prises.

### 2.1.2.3 Sabots et dispositifs divers

Les sabots sont placés habituellement pour faciliter le battage à travers des couches plus dures ou compactes et protéger la pointe du pieu.

Lorsque la nature du terrain permet un battage facile, on peut se dispenser de prévoir un sabot.

La forme, le poids et la nature du sabot sont fonction du terrain.

Les sabots ont généralement la forme d'un cône, solidarisé au fût par des aciers soudés ou des plats scellés. Ils peuvent être en acier coulé ou en tôles soudées. Il existe également des sabots en forme de trousse coupante. Dans le cas de rencontre possible de rocher, un type de sabot particulier comportant une pointe ou un mandrin en acier dans l'axe de la base du pieu permet une pénétration de celle-ci dans le rocher par poinçonnement, réduisant ainsi le risque de déviation.

Sauf dispositions différentes des documents particuliers du marché, la partie inférieure de chaque pieu est munie d'un sabot dont la nature et les caractéristiques sont fixées par les documents particuliers du marché ou, à défaut, soumises à l'agrément du maître d'oeuvre.

Les sabots sont solidarisés avec le pieu soit par leurs pattes ou barres de scellement dans le béton, soit par soudure sur les armatures du pieu.

L'incorporation au pieu d'un dispositif de lançage ne doit affaiblir de façon sensible ni la résistance, ni la symétrie de la section. Le débouché du dispositif à la pointe, ou à son voisinage, doit être tel que la zone ameublie par l'injection d'eau ne soit pas dissymétrique.

Les dispositifs de suspension des pieux aux engins de manutention ne doivent pas affaiblir la section transversale du pieu.

### 2.1.2.4 Fabrication et stockage

Les pieux sont fabriqués par lots sur des aires appropriées. Chaque pieu porte une marque indiquant le numéro du lot et la date du bétonnage. Tous les pieux d'un lot doivent être identiques.

Si le pieu est muni d'un sabot, des dispositions doivent être prises pour en assurer le centrage correct dans les coffrages pendant le bétonnage.

Le stockage doit être réalisé dans des conditions permettant la reprise des pieux d'âge suffisant et de manière à éviter toute déformation permanente.

Le poids du stockage étant généralement important, on s'assure au préalable de la stabilité du sol sous-jacent, tant vis-à-vis du poinçonnement (sols tourbeux) que du tassement (risque de rupture des pieux mis en flexion sur stock). Le choix des pieux de section carrée permet de les fabriquer jointifs sur l'aire de préfabrication : les pieux pairs étant coulés entre les pieux impairs en guise de coffrage.

Les pieux ne doivent être manutentionnés et mis en oeuvre que s'ils ont atteint la résistance appropriée à ces opérations.

Cette résistance est contrôlée sur éprouvettes dont le béton est prélevé sur celui du lot considéré et conservé dans les mêmes conditions climatiques que ce dernier.

### 2.1.3 Mise en oeuvre

#### 2.1.3.1 Manutention

Les points de suspension ou d'appui pour le décollage de l'aire de fabrication et pour le transport et la mise en fiche, sont déterminés de façon à ne pas engendrer, dans le pieu, des efforts qui pourraient être considérés comme nuisibles au sens des règles d'utilisation du béton armé.

Au cours de la manutention des pieux en béton armé, il convient d'éviter les flexions ou les chocs susceptibles de soumettre les pieux à des sollicitations excessives ou de provoquer des fissures ou détériorations. Il convient d'éliminer les pieux présentant des fissurations visibles qui ne pourraient que s'aggraver au cours du battage.

#### 2.1.3.2 Dispositions relatives au matériel de battage

##### 2.1.3.2.1

L'emploi de jumelles pendantes doit s'accompagner de précautions permettant d'assurer l'implantation correcte du pieu.

Dans tous les cas, il faut assurer et maintenir l'implantation et l'orientation du pieu (vérification dans deux directions sensiblement orthogonales).

Le terme « jumelles pendantes » signifie que les guides de battage sont simplement suspendus à l'engin de levage. Selon les fabricants, ces dispositifs peuvent porter des noms différents tels que « mâts oscillants » ou « suspendus ». Dans les sonnettes, le dispositif de guidage (jumelles) est généralement articulé à sa partie supérieure (cardan, rotule,...) et fixé à sa partie inférieure sur un système triangulé comportant des vérins qui permet de régler l'inclinaison du pieu dans une ou plusieurs directions. Ces dispositifs peuvent être appelés « mâts pendants » ou « pivotants ». Si le mouton n'est pas guidé par des jumelles, le pieu doit être haubané.

##### 2.1.3.2.2

Les moutons de battage doivent avoir un rendement normal.

Sauf disposition contraire à soumettre à l'accord du maître d'oeuvre, le poids du mouton doit être compris entre une limite supérieure égale à la somme du poids des éléments entraînés par sa chute (pieu + casque + faux pieu) et une limite inférieure au moins égale à la moitié de cette somme. Toutefois, pour les moutons diesel, ce dernier rapport peut être ramené à un sixième.

Dans le cas du mouton diesel, on tient compte du fait que l'énergie de battage peut être réglée par l'intermédiaire de l'injection du combustible.

L'énergie peut ainsi varier sensiblement entre le maximum caractéristique du mouton et environ la moitié.

L'énergie nominale indiquée par les constructeurs est l'énergie maximale.

Dans quelques cas, on peut être conduit moyennant certaines précautions au battage à utiliser un mouton dont le poids dépasse la limite supérieure indiquée dans le texte (pieux à bulbe, par exemple).

##### 2.1.3.2.3

L'emploi d'un casque de battage est obligatoire lorsque le choc direct du mouton est susceptible de dégrader la tête du pieu. On s'assure que les casques ne nuisent pas au rendement du battage en comparant, au début des

opérations de battage, les refus obtenus avec ou sans casque sur les premières volées de contrôle.

### 2.1.3.3 Conduite du battage

#### 2.1.3.3.1 Nombre et importance des volées

L'entrepreneur a toute latitude pour choisir le nombre et l'importance des volées courantes de coups de mouton.

Toutefois, la hauteur de chute doit être assez faible pour ne pas provoquer de désordres dans la tête du pieu tout en permettant l'enfoncement.

A défaut de disposition contraire des documents particuliers du marché, les prescriptions ci-dessus sont également applicables aux volées de contrôle.

#### 2.1.3.3.2 Ordre de battage

Les pieux sont battus dans l'ordre figurant au plan de pilotage.

Le battage d'un groupe de pieux doit être conduit de telle sorte qu'il n'entraîne pas de poussée excessive sur les pieux déjà battus ou un arrêt prématuré de l'enfoncement des derniers pieux.

L'ordre de battage des pieux d'un groupe présente une importance particulière : dans les cas les plus courants, ce battage doit se terminer par les pieux extérieurs.

La distance entre les points les plus rapprochés de deux pieux voisins doit être supérieure à 2 diamètres, sans pour autant descendre en dessous de 1 m.

#### 2.1.3.3.3 Carnet de battage

Il est tenu un carnet de battage des pieux. Sur ce carnet figurent pour chaque pieu :

- a le numéro d'identification du pieu ;
- b les indications suivantes relatives aux volées de contrôle :
  - poids du mouton,
  - hauteur de chute,
  - nombre de coups,
  - enfoncement à prendre en compte dans la formule de battage et raccourcissement élastique.

Dans le cas d'utilisation du mouton diesel, le carnet de battage comporte la marque et le type du mouton, ainsi que le réglage d'admission de la pompe à fuel.

Lors des volées de contrôle, le raccourcissement élastique (ou plus exactement la remontée élastique) est généralement mesuré graphiquement. Ce ou ces graphiques sont joints à la fiche de battage avec indication des profondeurs de mesure.

L'établissement de la courbe de battage complète pour un pieu nécessite de relever systématiquement :

- soit l'enfoncement correspondant à un nombre de coups donné,
- soit le nombre de coups correspondant à un enfoncement donné (1 m - 0,50 m - 0,10 m à préciser).

•

- c le niveau de la pointe du pieu :

- à la mise en place,
- après appui du mouton,
- à la fin du battage.

Dans le cas de mise en oeuvre de pieux cylindriques creux à pointe ouverte, on notera également le niveau du terrain à l'intérieur des pieux à la mise en fiche et à la fin du battage.

- d les incidents éventuels en cours de manutention et de battage, notamment fissurations et avaries.

Les entures sont notées dans le carnet de battage.

#### 2.1.3.3.4 Refus au battage

Les pieux sont battus jusqu'à ce que leur pointe atteigne une cote déterminée, en vérifiant que le refus obtenu

correspond aux prévisions. Si cette condition n'est pas remplie, il y a lieu de prendre des dispositions spéciales. La poursuite du battage jusqu'à ce que la pointe des pieux atteigne une cote déterminée s'entend sous réserve d'être compatible avec la résistance du pieu.

Le refus doit être obtenu sur trois volées de dix coups de mouton. Ce refus est mesuré immédiatement après l'enfoncement par battage, sauf disposition contraire des documents particuliers du marché.

L'entrepreneur doit justifier du rendement du mouton et tenir compte de la perte d'énergie due à l'emploi d'un casque ou, s'il y a lieu, d'un faux pieu.

Le refus au battage n'a qu'un caractère relatif et ne peut être utilisé qu'à titre de vérification des prévisions résultant de l'étude de sols préalable. Il permet alors de s'assurer que le pieu a atteint la couche portante ou qu'il a obtenu dans celle-ci l'ancrage nécessaire.

Dans le premier cas, le refus risque d'être obtenu plus ou moins brutalement et il est nécessaire d'adapter l'énergie de battage à l'approche de la couche portante pour éviter une rupture du fût du pieu. Dans le second cas, le refus n'est obtenu que progressivement.

Il y a lieu de souligner que, dans certains terrains, le refus au battage n'est pas significatif : c'est le cas en particulier des terrains à caractère thixotropique (craie, argile sensible) et des milieux sablo-graveleux lâches et saturés pour lesquels les enfoncements au battage peuvent rester importants, même si la capacité portante est atteinte.

Inversement, des couches intercalaires particulièrement compactes, de faible épaisseur, peuvent être à l'origine d'un faux refus.

Dans le cas de l'utilisation d'un équipement de fonçage particulier tel que des vibrofonçeurs, les conditions de refus sont déterminées de manière à donner, dans chaque cas concret, des résultats en relation avec la force portante du pieu.

#### 2.1.3.3.5 Amorce de rupture - arrêt absolu à un niveau anormalement élevé (faux refus)

Sauf décision contraire du maître d'oeuvre, motivée par des essais appropriés, tout pieu qui présente, au cours du battage, une amorce de rupture ou un arrêt absolu à un niveau anormalement élevé, est remplacé après avoir été soit arraché, soit, avec l'autorisation du maître d'oeuvre, abandonné.

A moins d'un défaut de résistance du béton ou d'erreur dans la détermination des armatures, les ruptures proviennent, en général, d'un battage excessif ou de la rencontre d'un obstacle enterré. Un battage à l'abord d'une couche de terrain très compacte peut produire le même effet. On décèle, en général, les ruptures par un changement de direction du pieu ou par une anomalie dans l'allure de la courbe de battage du pieu comparativement à celle des pieux voisins. Les amorces de rupture peuvent être également mises en évidence par différentes méthodes d'auscultation dynamique ou, éventuellement, par des essais de mise en pression hydraulique d'un canal réservé à cette fin dans l'axe du pieu.

Lorsqu'il y a une amorce de rupture ou faux refus, l'entrepreneur avise, sans délai, le maître d'oeuvre lequel en réfère au géotechnicien.

#### 2.1.3.4 Cas particuliers de battage

##### 2.1.3.4.1

Sauf disposition contraire des documents particuliers du marché, l'emploi de faux pieux est admis.

Les faux pieux sont employés lorsque le niveau de la sonnette ou celui des jumelles coulissantes ne permet pas au mouton de descendre jusqu'au niveau correspondant à la fin du battage.

Ils impliquent un coefficient de réduction dans l'application des formules de battage. Ce coefficient doit résulter de mesures comparatives effectuées avec et sans faux pieu tant que la mesure est possible.

##### 2.1.3.4.2 Pieux inclinés ou en traction

Les dispositions complémentaires qu'il convient de prendre pour le battage des pieux inclinés ou travaillant en traction sont fixées, s'il y a lieu, par les documents particuliers du marché.

Pour les pieux inclinés, ces dispositions concernent le matériel de battage et notamment les moyens de guidage du mouton et du pieu ; elles impliquent, en général, l'application d'un coefficient de réduction dans les formules de battage.

Pour les pieux travaillant en traction, la courbe de battage complète de chaque pieu est nécessaire.



#### 2.1.3.4.3 Enture

Pour l'enture sur aire ou en cours de battage des pieux, les dispositions suivantes doivent être prises :

- dégarnissage de la tête des pieux sur une longueur égale au recouvrement minimal des armatures longitudinales ;
- surfaces de contact des bétons traitées comme pour une reprise de béton armé ;
- raccordement des armatures traité en 2.1.2.1, à l'exclusion du premier alinéa, étant entendu en outre que, dans la zone correspondante, l'espacement des armatures transversales est le même que celui prescrit pour les extrémités du pieu ;
- alignement des faces de la partie entrée avec celles du pieu initial ;
- la reprise de battage ne peut avoir lieu que lorsque l'enture a une résistance suffisante ;
- d'autres dispositions, notamment plaques de raccordement, peuvent être utilisées sous réserve de justifications spéciales.

Le recours à l'enture des pieux ne se fait que dans certains cas particuliers, tels que :

- nécessité de réaliser une fiche plus importante que celle initialement prévue ;
- conditions d'exécution ne permettant pas la mise en fiche avec la longueur totale nécessaire (pieux de longueur exceptionnelle) ;
- remplacement de la partie supérieure d'un pieu endommagée.

•

Parmi les autres procédés d'enture, on peut envisager le collage.

Dans le cas où un pieu comporterait plusieurs entures, le maître d'oeuvre peut exiger de vérifier sa portance par un essai statique.

Dans le cas particulier de pieux précontraints, il convient d'éviter les entures : en cas de nécessité, l'enture fait l'objet d'une expérimentation préalable et la méthode envisagée est soumise à l'approbation du maître d'oeuvre (systèmes par manchonnage, barre de connexion, etc.).

#### 2.1.3.4.4 Rebattage

Il y a lieu à rebattage :

- en cas d'enture ;
- sur les pieux appartenant à un groupe de pieux dont la remontée totale est supérieure à 7 mm.

La remontée de 7 mm est acceptable pour des structures courantes. Elle peut être modifiée par les documents particuliers du marché.

En dehors des cas d'enture, d'incidents mécaniques, ou de remontée des pieux, un rebattage peut être envisagé chaque fois qu'à partir des résultats de la reconnaissance des sols, on présume que le refus peut varier en fonction du temps ; dans le cas de sols argileux, il y a lieu d'attendre trois à quatre jours entre battage et rebattage.

En cas de rebattage, les premiers refus sont mesurés dans les mêmes conditions que pour les dernières volées qui ont précédé l'arrêt du battage et il convient de noter, en sus des renseignements portés au carnet de battage, pour quel nombre de coups et quelle hauteur de chute du mouton est obtenue la reprise de l'enfoncement du pieu.

Lorsqu'il y a enture, il convient de noter, en outre :

- la profondeur atteinte au moment de l'enture,
- les modifications résultant de cette dernière sur le poids et sur la longueur du pieu.

Lors de la reprise, le battage est conduit avec précaution à énergie réduite, de façon à éviter une trop forte sollicitation du pieu jusqu'à recouvrer le refus noté avec l'arrêt. Le battage est ensuite poursuivi normalement. Une reprise du battage directement à l'énergie maximale initiale risquerait de provoquer la rupture du pieu, notamment si le faible refus enregistré n'est dû qu'aux résistances latérales (reconsolidation du sol encaissant).

#### 2.1.3.4.5 Lançage

Le recours au lançage ne dispense pas de terminer l'enfoncement du pieu par un battage avec contrôle du refus suivant les modalités prévues à l'article 2,133.4.

D'une manière générale, le lançage réduit le frottement latéral et ne peut être utilisé qu'avec l'accord du maître d'oeuvre, lequel en réfère au géotechnicien.

Dans les terrains sableux, les difficultés rencontrées dans le fonçage par battage peuvent conduire à lui associer le lançage. Celui-ci ne doit pas entraîner de désordre dans le terrain en dehors d'une zone limitée autour du pieu et, notamment, ne pas affecter la stabilité des pieux voisins.

Il est conduit de manière à ne pas entraîner de déviation importante. Il est évité dans le cas de pieux inclinés.

En tout état de cause, le lançage est arrêté à une distance suffisante au-dessus de la cote présumée d'arrêt de la pointe, de manière à permettre la fin de mise en place du pieu par battage seul.

#### 2.1.3.5 Recépage des pieux

Chaque pieu est recépié au niveau défini par le plan de pilotage, c'est-à-dire que sa tête est dégarnie ou préparée, en vue de l'exécution de la suite des ouvrages, selon les prescriptions des documents particuliers du marché.

Sauf indication contraire ou impossibilité, la hauteur minimale sur laquelle la tête d'un pieu en béton armé doit être dégarnie est au moins égale à deux fois et demie la largeur.

### 2.1.4 Contraintes de calcul

#### 2.1.4.1

Se reporter à l'article 1,32.

#### 2.1.4.2

Pour l'application de l'article 1.3.2.4, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

- un pieu sur quatre doit être équipé d'un tube central dans lequel on doit faire des essais soniques (transparence) après mise en oeuvre et
- un pieu sur trois doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

## 2.2 Métal battu

### 2.2.1 Caractéristiques

#### 2.2.1.1

Les pieux métalliques sont constitués d'acier conforme aux normes NF.

#### 2.2.1.2

La section est :

- en forme de H avec une épaisseur de l'âme est égale à celle des ailes, ou en forme d'anneau (tube) : la nuance est conforme à la norme NF A 35-501 ;
- en forme quelconque obtenue par soudage de palplanches par exemple : la nuance est conforme à la norme NF A 35-520.

L'emploi des profils H classiques (norme A 45-201) est déconseillé pour deux raisons :

- dans un H classique, l'âme, d'épaisseur faible, a pour rôle de réunir les ailes afin de constituer un ensemble caractérisé par un module I/v élevé, eu égard à la section d'acier. Au cours du fonçage, l'âme pourrait donc se rompre ;
- la longévité d'un pieu en terrain agressif est fonction de son épaisseur. Il y a donc intérêt à ce que cette épaisseur soit uniforme.

L'épaisseur des tubes est prévue suffisante pour que les éléments ne subissent pas de déformations permanentes lors du fonçage.

## 2.2.2 Dispositions constructives

### 2.2.2.1

Un seul des éléments constitutifs d'un même pieu peut avoir une longueur inférieure à 5 m.

Cette disposition a pour seul objet de limiter le nombre de soudures.

On peut utiliser, pour un même pieu, des éléments de section et surtout d'épaisseurs différentes, à condition que les éléments de poids métrique plus élevé soient placés en tête de pieu.

Par exemple, quand une zone agressive recouvre une zone peu agressive, il est économique de placer des éléments plus épais dans la zone agressive, de façon à ce que la durée de vie du pieu soit sensiblement uniforme sur toute sa longueur.

### 2.2.2.2

Les éléments constitutifs d'un même pieu sont soudés bout à bout, soit en position, soit à plat.

Les éléments soudés en position doivent être maintenus, pendant le soudage, par un carcan ou gabarit.

Dans le cas où les éléments sont soudés à plat, il convient de disposer un nombre suffisant de points d'appui pour obtenir un alignement correct des éléments consécutifs en évitant leur déformation.

Le soudage est effectué par passes symétriques et uniformes, de façon à ne pas créer dans le métal des contraintes qui, se libérant lors de la dépose des carcans, pourraient modifier l'alignement des éléments du pieu.

### 2.2.2.3

Les soudures, et notamment le chanfrein, l'épaisseur des cordons, l'écartement entre les éléments doivent être conformes aux exigences de la classe de qualité 3 de la norme NF P 22-471.

Le plan de découpe est perpendiculaire à l'axe du pieu.

La soudure doit reconstituer au minimum la section du profilé le plus mince.

### 2.2.2.4

Si la pointe du pieu est munie d'un sabot (ou d'une trousse), sa section ne doit pas être supérieure à 1,2 fois la section définie par le périmètre extérieur du profilé.

## 2.2.3 Mise en oeuvre

Les pieux sont mis en oeuvre par battage ou vibration.

### 2.2.3.1

La distance d'axe en axe de deux pieux voisins doit être supérieure à 1,75 fois la longueur de la diagonale du rectangle enveloppant chaque pieu sans pour autant descendre en-dessous de 0,75 m.

### 2.2.3.2

Tolérance d'implantation d'un pieu isolé : la distance entre l'axe théorique et l'axe réel d'un pieu, au niveau de recépage, doit être au plus égale à  $x$ ,  $x$  ne pouvant être inférieur à 4 cm.

#### 1 Profilés H :

$$x = H/8$$

$H$  étant la hauteur totale du profilé

#### 2 Profilés fermés :

$$x = B/8$$

$B$  étant la largeur (voir définition).

## 2.2.4 Contraintes de calcul

### 2.2.4.1

Pour tenir compte des risques de corrosion, la contrainte de l'acier est limitée au tiers de la limite élastique  $\sigma_e$  à l'état limite de service.

Le maître d'oeuvre peut relever les limites de contraintes pour les ouvrages provisoires ou les phases provisoires de construction ou d'utilisation.

Ou bien, dans l'hypothèse où la durée de vie de l'édifice à soutenir peut être estimée, la contrainte de l'acier est limitée à  $0,6 \sigma_e$  à l'ELS et  $0,8 \sigma_e$  à l'ELU.

La connaissance de la durée de vie présumée de l'édifice à soutenir est un élément souvent générateur d'économie, tant au niveau de la conception de l'ouvrage qu'à celui de sa construction.

Cette contrainte est calculée avec une section réduite du pieu déterminée à partir des éléments suivants :

Catégorie	Terrain	Diminution d'épaisseur, en mm/an pour une durée d'exposition de :			
		25 ans	50 ans	75 ans	100 ans
1	Sol en place peu agressif	0,010	0,006	0,005	0,004
2	Terrain ou remblai moyennement agressif	0,040	0,024	0,018	0,016
3	Terrain ou remblai agressif	0,100	0,060	0,045	0,040
4	Terrain très agressif Eau de mer ou saumâtre	Voir 2.2.5.2			

La corrosion d'un acier enfoui dans le sol est fonction avant tout de la concentration en oxygène du milieu.

A titre indicatif, on classe dans :

- catégorie 1 : les terrains en place consolidés (terrains sédimentaires par exemple) ;
- catégorie 2 : les terrains en place dont la consolidation n'est pas terminée et les terrains en place consolidés dans la zone de marnage en eau douce, ... ;
- catégorie 3 : les remblais récents et tous les terrains dans la zone de marnage en eau de mer ;
- catégorie 4 : les terrains qui contiennent des substances chimiques particulièrement agressives pour l'acier.

La prolongation du pieu hors sol reçoit une protection adéquate dont la définition ne relève pas du présent DTU.

### 2.2.4.2

La liaison pieu-semelle peut être métallique ou mixte acier-béton.

Dans ce dernier cas, on doit se conformer aux Règles BAEL.

## 2.2.5 Corrosion

### 2.2.5.1

L'étude chimique des sols et des eaux qui y circulent doit être suffisamment complète pour déterminer les risques de corrosion.

### 2.2.5.2

Si le sol contient des éléments physico-chimiques actifs pouvant par leur action entraîner une corrosion franche de l'acier, l'un des procédés suivants doit être utilisé :

- enlèvement des matériaux agressifs ;
- réduction de la contrainte admissible ;

- protection cathodique ;
- protection efficace de la surface de l'acier, par enrobage de 5 cm d'épaisseur au moins, par un mortier de ciment approprié dosé à plus de 500 kg par mètre cube de mortier, dont le rapport eau sur ciment est inférieur à 0,5 ;
- protection par galvanisation ou peinture au zinc dans les sols peu abrasifs.

## 2.3 Tubulaire précontraint

### 2.3.1 Caractéristiques

Le pieu est constitué d'éléments tubulaires en béton légèrement armé assemblés par précontrainte antérieurement au battage.

Les éléments ont généralement 1,5 à 3,0 m de longueur et 0,70 à 0,90 m de diamètre intérieur. Leur épaisseur est voisine de 0,15 m.

Des passages longitudinaux de 2 à 4 cm de diamètre sont ménagés pour permettre l'enfilage des câbles de précontrainte.

La préfabrication à partir d'éléments tubulaires est classique, mais on trouve maintenant des pieux tubulaires précontraints préfabriqués d'un seul tenant par centrifugation, dont la longueur peut dépasser 20 m avec des diamètres extérieurs de 0,60 m à 1,00 m.

Pour les pieux fabriqués à partir d'éléments, les dimensions indiquées pour ceux-ci sont des dimensions courantes : l'épaisseur varie de 10 à 15 cm environ, les diamètres extérieurs peuvent atteindre 1,40 m.

On s'efforce de préfabriquer les pieux d'une longueur telle qu'il ne soit pas nécessaire de procéder à une enture et que la longueur à recéper soit aussi courte que possible.

Ces pieux sont le plus souvent battus base ouverte pour faciliter l'enfoncement ; ils présentent cependant la même charge nominale que les pieux équivalents à base fermée à condition que le bouchon de terrain formé lors du battage soit de hauteur et de compacité suffisante (cf. 2,333).

### 2.3.2 Dispositions constructives

#### 2.3.2.1

Le béton utilisé doit être à haute performance. Sa résistance à l'écrasement ne doit pas être inférieure à 45 MPa à 28 jours.

Eu égard à la faible épaisseur des éléments tubulaires, les granulats doivent être petits : 5/20 mm.

La méthode de bétonnage doit assurer une compacité et une homogénéité du béton excellentes sur toute la longueur de chaque élément, en particulier au voisinage des extrémités des éléments.

La centrifugation apporte le maximum de sécurité pour la résistance du béton.

L'homogénéité du béton est un facteur essentiel de bonne tenue du pieu lors du battage, ce qui conduit, dans le cas de la préfabrication sur chantier, à soigner particulièrement le bétonnage.

Les défauts de bétonnage au voisinage des faces de joints conduisent à un écrasement des abouts des éléments lors du battage.

#### 2.3.2.2

Les éléments courants comportent une armature destinée à répartir les efforts de précontrainte et à éviter la fissuration due aux manutentions et au battage.

Le frettage est renforcé aux 2 extrémités du pieu pour assurer leur tenue sous les sollicitations imposées lors du battage :

- à la tête du pieu par action directe du mouton ;
- à la base du pieu pour résister aux efforts de poussée interne du bouchon de terrain lors du battage à base ouverte (risque d'éclatement du pieu), notamment si le battage est difficile.

D'autre part, le frettage local autour des fils ou câbles de précontrainte est également renforcé aux deux extrémités du pieu.

**2.3.2.3**

Les surfaces de contact des éléments successifs doivent être planes et normales aux génératrices. Une rectification par meulage peut être nécessaire pour assurer une tolérance de planéité suffisante : flèche maximale de 2 mm mesurée à la règle sur toute la section.

La rectification par meulage peut être évitée en employant des plaques métalliques d'about.

**2.3.2.4**

Les éléments sont assemblés sur bancs assurant un parfait alignement et solidarités par les câbles de précontrainte enfilés dans les passages ménagés à cet effet.

La préfabrication des éléments ou des pieux se fait le plus fréquemment en usine.

Les possibilités de flottaison peuvent être utilisés pour le stockage ou le transport.

La liaison entre éléments est assurée par une colle (epoxy ou similaire) interposée entre les faces de chaque joint. Les câbles de précontrainte sont scellés sur toute leur longueur (fils adhérents) pour permettre le recépage ultérieur des pieux sans perte importante de précontrainte. La précontrainte doit être au moins égale à 5 MPa pour compenser les efforts de traction provoqués par la réflexion des ondes de chocs lors du battage du pieu.

Dans les cas de battage à base ouverte, on peut munir la tranche d'extrémité inférieure d'un sabot ou d'une trousse annulaire.

On peut également placer un sabot fermant toute la section du pieu.

**2.3.2.5**

La longueur maximale probable des pieux doit être indiquée par l'étude géotechnique car les entures sont pratiquement impossibles à réaliser avec ce type de pieux.

Les entures sont très difficiles à réaliser sur ce type de pieux ; elles nécessitent une reprise de précontrainte. La liaison par bouchon interne de béton est à proscrire par suite du risque d'éclatement du pieu sous l'effet des efforts de compression lors du battage. Les dispositifs envisagés, le cas échéant, font l'objet d'essais préalables en grandeur et d'une approbation du maître d'oeuvre.

**2.3.3 Mise en oeuvre**

La mise en oeuvre est normalement faite par battage avec base ouverte. Le lançage et le havage (benne, émulseur) peuvent être utilisés pour la traversée des terrains supérieurs. Ils sont interdits sur la hauteur de la fiche.

**manutention**

Au cours de la manutention des pieux tubulaires en béton précontraint, il convient d'éviter les flexions ou les chocs susceptibles de soumettre les pieux à des sollicitations excessives ou de provoquer des fissures ou détériorations. Il convient d'éliminer les pieux présentant des fissurations visibles qui ne pourraient que s'aggraver au cours du battage.

**conduite du battage****1 nombre et importance des volées**

L'entrepreneur a toute latitude pour choisir le nombre et l'importance des volées courantes de coups de mouton. Toutefois, il convient de choisir une hauteur de chute assez faible pour ne pas provoquer de désordres dans la tête du pieu tout en permettant l'enfoncement.

A défaut de disposition contraire des documents particuliers du marché, les prescriptions ci-dessus sont également applicables aux volées de contrôle.

**2 ordre de battage**

Les pieux sont battus dans l'ordre figurant au plan de pilotage.

Le battage d'un groupe de pieux est conduit de telle sorte qu'il n'entraîne pas de poussée excessive sur les pieux déjà battus ou un arrêt de l'enfoncement des derniers pieux.

L'ordre de battage des pieux d'un groupe présente une importance particulière ; dans les cas les plus courants, le battage se termine par les pieux extérieurs.

La distance entre les points les plus rapprochés de deux pieux voisins est choisie supérieure à 2 diamètres, sans pour autant descendre en dessous de 1 m.

### **carnet de battage**

Il est tenu un carnet de battage des pieux. Sur ce carnet, figurent pour chaque pieu :

- a le numéro d'identification du pieu ;
- b les indications suivantes relatives aux volées de contrôle :

- poids du mouton,
- hauteur de chute,
- nombre de coups,
- enfoncement à prendre en compte dans la formule de battage et raccourcissement élastique.

Dans le cas d'utilisation du mouton Diesel, le carnet de battage comporte la marque et le type du mouton ainsi que le réglage d'admission de la pompe à fuel.

Lors des volées de contrôle, le raccourcissement élastique (ou plus exactement la remontée élastique) est généralement mesuré graphiquement : ce (ou ces) graphique(s) doit(vent) être joint(s) à la fiche de battage avec l'indication de la profondeur de mesure.

L'établissement d'une courbe de battage complète nécessite de relever systématiquement :

- soit l'enfoncement correspondant à un nombre de coups donné ;
- soit le nombre de coups correspondant à un enfoncement donné (1 m, 0,50 m, 0,10 m,...) ;

- c le niveau de la pointe du pieu :

- à la mise en place ;
- après appui du mouton ;
- à la fin du battage.

Dans le cas de mise en oeuvre de pieux cylindriques creux à base ouverte, on note également le niveau du terrain à l'intérieur des pieux à la mise en fiche et à la fin du battage ;

- d les incidents éventuels en cours de manutention et de battage, notamment fissurations et avaries. Les entures éventuelles doivent également être notées dans le carnet de battage.

### **• 4. refus au battage**

Les pieux sont battus jusqu'à ce que leur pointe atteigne une cote déterminée, en vérifiant que le refus obtenu correspond aux prévisions. Si cette condition n'est pas remplie, il y a lieu de prendre des dispositions spéciales. La poursuite du battage jusqu'à ce que la pointe des pieux atteigne une cote déterminée s'entend sous réserve d'être compatible avec la résistance du pieu.

Le refus est vérifié sur trois volées de dix coups de mouton. Ce refus est mesuré immédiatement après l'enfoncement par battage, sauf disposition contraire des documents particuliers du marché.

L'entrepreneur justifie du rendement du mouton et tient compte de la perte d'énergie due à l'emploi d'un casque ou, s'il y a lieu, d'un faux pieu.

Le refus au battage n'a qu'un caractère relatif et ne peut être utilisé qu'à titre de vérification des prévisions résultant de l'étude de sols préalable. Il permet de s'assurer que le pieu a atteint la couche portante ou qu'il a obtenu dans celle-ci l'ancrage nécessaire.

Dans le premier cas, le refus risque d'être obtenu plus ou moins brutalement, et il est nécessaire d'adapter l'énergie de battage à l'approche de la couche portante pour éviter une rupture du fût du pieu.

Dans le second cas, le refus n'est obtenu que progressivement.

Il y a lieu de souligner que, dans certains cas, le refus immédiat au battage n'est pas significatif : c'est le cas en particulier des terrains à caractère thixotropique (craie, argile sensible) et des milieux sablo-graveleux lâches et saturés. Le refus au rebattage est alors plus significatif.

Inversement, il se peut que l'on obtienne un refus compatible avec la force portante recherchée sur une couche ou une lentille dont l'épaisseur est cependant trop faible pour recevoir la charge prévue (faux refus).

Dans le cas d'utilisation d'un équipement de fonçage particulier tel que des vibrofonçeurs, les conditions de refus

sont déterminées de manière à donner, dans chaque cas concret, des résultats équivalents à ceux obtenus par l'emploi d'un mouton d'un type plus courant.

• **5. amorce de rupture - arrêt absolu à un niveau anormalement élevé (faux refus)**

Sauf décision contraire du maître d'oeuvre, motivée par des essais appropriés, tout pieu qui présente, au cours du battage, une amorce de rupture ou un arrêt absolu à un niveau anormalement élevé, est remplacé après avoir été soit arraché, soit, avec l'autorisation du maître d'oeuvre, abandonné.

A moins d'un défaut de résistance du béton ou d'erreur dans la détermination ou le positionnement des câbles, fils et armatures, les ruptures proviennent, en général, d'un battage excessif ou de la rencontre d'un obstacle enterré. Un battage à l'abord d'une couche de terrain très compacte peut produire le même effet. On décèle, en général, les ruptures par un changement de direction du pieu ou par une anomalie dans l'allure de la courbe de battage du pieu comparativement à celle des pieux voisins.

Les ruptures peuvent également souvent être mises en évidence par différentes méthodes d'auscultation dynamique ou, éventuellement, par un examen de la face intérieure du cylindre creux constituant le pieu.

Lorsqu'il y a amorce de rupture ou faux refus, l'entrepreneur avise sans délai le maître d'oeuvre, lequel en réfère au géotechnicien.

### 2.3.3.1

Le battage effectué sans guide nécessite une parfaite mise en fiche et le haubanage des pieux en tête. Si le sol est en pente (pieux situés dans un talus) il est nécessaire de réaliser un avant-trou.

Dans le cas d'utilisation de mouton Diesel, on tient compte du fait que l'énergie de battage peut être réglée par l'intermédiaire de l'injection du combustible.

L'énergie peut ainsi varier sensiblement entre le maximum, caractéristique du mouton, et environ la moitié. L'énergie nominale indiquée par les constructeurs est l'énergie maximale.

Dans tous les cas, il convient d'assurer et de maintenir l'implantation et l'orientation du pieu (vérification dans 2 directions sensiblement orthogonales).

Le terme jumelles pendantes signifie que les guides de battage sont simplement suspendus à l'engin de levage. Selon les fabricants, ces dispositifs peuvent porter des noms différents tels que mâts oscillants ou suspendus.

Dans les sonnettes, le dispositif de guidage (jumelles) est généralement articulé à sa partie supérieure (cardan, rotule...) et fixé à sa partie inférieure sur un système triangulé comportant les vérins qui permet de régler l'inclinaison du pieu dans une ou plusieurs directions. Ces dispositifs peuvent être appelés mâts pendants ou pivotants.

Toutes les fois que cela est possible, on bat avec une sonnette pour assurer un guidage efficace pendant le début du battage. Dans certains cas, on est obligé de battre à la grue avec le mouton directement posé en tête ; le haubanage se révèle alors nécessaire.

Dans les cas de battage à flanc de talus, l'exécution d'un avant-trou est nécessaire pour éviter une déviation du pieu en début de battage. Elle est a fortiori nécessaire si le talus est revêtu d'enrochements, ce qui est assez fréquent dans les travaux à la mer.

### 2.3.3.2

Les têtes de pieux doivent être protégées pendant le battage par l'interposition de « martyrs », pièces de bois contreplaque de 4 à 5 cm d'épaisseur.

L'utilisation d'autres matériaux est possible mais l'expérience montre que le contreplaque donne des résultats parmi les meilleurs.

### 2.3.3.3

Après achèvement du battage, on doit contrôler l'absence de vase et mesurer le niveau atteint par le terrain remonté à l'intérieur du tube (bouchon) : l'espace vide doit être rempli de sable.

Dans le cas où on veut tenir compte du terme de pointe sur toute la section du pieu, il faut remplir le tube de gravier sur toute sa hauteur après avoir éliminé les terrains de caractéristiques médiocres à l'intérieur du tube, sans détériorer le bouchon de base.

Après achèvement du battage, il est recommandé de remplir le tube de sable et gravier et, éventuellement, partiellement de béton. Ce remplissage a pour but d'éviter la décompression du bouchon de terrain qui s'est formé à la



base lors du battage : d'où la nécessité d'enlever au préalable les terrains lâches de surface (vase par exemple). Toutefois, excepté le cas d'ancrage dans un sol raide et cohérent, le terrain à l'intérieur du pieu ne doit pas être enlevé jusqu'à la base, de manière à éviter tout risque de renard ou de décompression.

#### 2.3.3.4

La liaison aux superstructures nécessite la mise en place d'un bouchon de béton armé en tête du pieu. Sa hauteur est d'au moins trois fois le diamètre intérieur des éléments tubulaires.

### 2.3.4 Contraintes de calcul

#### 2.3.4.1

Se reporter à l'article 1.32.

#### 2.3.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit être défini avec précision, sous sa responsabilité, par le maître d'oeuvre.

## 2.4 Battu enrobé

### 2.4.1 Caractéristiques

#### 2.4.1.1

L'âme du pieu est métallique (acier E 24-1 ou similaire) et constituée :

- par des tubes d'acier de 150 à 500 mm de diamètre extérieur ;
- par des profilés H ;

L'épaisseur des profilés est prévue suffisante pour que les éléments ne subissent pas de déformations permanentes lors du battage (épaisseur minimale de l'ordre de 10 mm).

Contrairement au métal battu (art. 2.2), les profilés classiques peuvent être utilisés.

- par des caissons formés de profilés ou de palplanches à 2, 3 ou 4 éléments.

#### 2.4.1.2

La pointe du pieu comporte un sabot débordant qui assure un enrobage du métal du fût du pieu de 4 cm au moins. La section du pieu est la section du sabot.

S'il n'y a pas de couches dures à traverser, le sabot peut être constitué par une plaque d'acier suffisamment épaisse.

#### 2.4.1.3

Au fur et à mesure du battage, un mortier est envoyé par un ou plusieurs tubes débouchant au voisinage du sabot, afin de constituer l'enrobage en remplissant le vide annulaire laissé par le débord de celui-ci.

Le vide annulaire qui se forme au fur et à mesure de l'enfoncement du pieu est comblé dès sa création par le mortier d'enrobage. Pour éviter le mélange des éléments du sol avec le mortier, le débit de ce dernier est réglé de façon à ce qu'il n'y ait pratiquement pas de déplacements vers le haut ou vers le bas du mortier déjà mis en place.

### 2.4.2 Dispositions constructives

En général, le pieu est constitué d'un seul et même élément.

Si par exception, il était recouru au soudage d'éléments entre eux pour constituer un pieu, les articles 2.2.2.1, 2.2.2.2,

2.2.2.3 du Cahier des Clauses Techniques et leurs commentaires sont applicables.

#### 2.4.2.1

Le mortier comporte un sable tel que :

- $d_{85} < 4 \text{ mm}$
- $d_{100} < 8 \text{ mm}$

#### 2.4.2.2

Le dosage en ciment du mortier est au moins égal à  $500 \text{ kg/m}^3$  et le rapport E/C est inférieur à 0,5.

Le ciment doit être adapté à l'agressivité du sol et des eaux circulant dans le sol.

Un retardateur de prise est utilisé.

### 2.4.3 Mise en oeuvre

#### 2.4.3.1

Le pieu est enfoncé par battage.

Le débit du mortier au niveau du sabot est réglé de façon à éviter un défaut d'enrobage. La continuité de l'enrobage est contrôlée par le débit du mortier envoyé par mètre de descente du pieu (ou débit métrique) et l'examen, au niveau du sol, de la variation de niveau de la surface visible du mortier.

Afin d'éviter un défaut d'enrobage, en cas de descente très rapide du pieu, le débit instantané du mortier au niveau du sabot est ajusté en augmentant le nombre de tubes et le débit métrique du mortier.

On pourra corrélativement être conduit à réduire la vitesse d'enfoncement du pieu.

#### 2.4.3.2

Les pieux peuvent être inclinés jusqu'à  $60^\circ$  sur la verticale.

#### 2.4.3.3

La tolérance d'implantation, distance entre l'axe réel et l'axe théorique du pieu au niveau du recépage est au plus égale au huitième du diamètre du tube métallique ou de la hauteur de la section du profilé.

#### 2.4.3.4

La distance minimale entre axes de pieux voisins est de 3 diamètres.

Cette règle des diamètres implique qu'il n'y ait pas de réaction d'un pieu sur l'autre. Il y aura lieu de s'en assurer, surtout dans le cas de pieux de petits diamètres.

### 2.4.4 Contraintes de calcul

#### 2.4.4.1

Les actions créant des compressions sont supportées par l'acier et le mortier situé à l'intérieur de l'âme métallique si celle-ci est constituée par un tube ou un caisson. Les contraintes dans l'acier sont au plus égales à 160 MPa à l'ELS et 240 MPa à l'ELU.

Le coefficient d'équivalence est pris égal à 30 sauf justification par des essais.

#### 2.4.4.2

Les actions créant les flexions et des tractions sont supportées par l'acier seul. Les contraintes dans l'acier sont au plus égales à 100 MPa à l'ELS et 150 MPa à l'ELU.

#### 2.4.4.3

La liaison pieu-semelle peut être métallique ou mixte acier-béton.

Lorsque des plaques d'extrémité sont utilisées en tête, les dimensions de ces plaques doivent être telles que la contrainte normale sur le béton soit inférieure à 5 MPa.

## **2.5 Pieu battu ou vibrofoncé injecté haute pression**

### **2.5.1 Caractéristiques**

Le pieu battu ou vibrofoncé haute pression est un pieu métallique battu ou vibrofoncé lorsque les conditions de terrains autorisent ce type de mise en oeuvre, de largeur supérieure ou égale à 250 mm.

L'armature du pieu (tube ou profilé) est équipée d'un système d'injection constitué par un ou plusieurs tubes à manchettes (TAM).

### **2.5.2 Dispositions constructives**

#### **2.5.2.1**

L'entrepreneur doit justifier du bon fonctionnement du système d'injection par des essais sur le premier pieu de l'ouvrage.

#### **2.5.2.2**

Les assemblages, généralement faits par soudage, doivent pouvoir reprendre les efforts de traction. Pour les petits diamètres, les assemblages peuvent être faits par manchons filetés.

#### **2.5.2.3**

Les soudures feront l'objet des contrôles normalisés pour les rabouages et entures.

#### **2.5.2.4**

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique de l'eau, du sol et de la nature des aciers.

#### **2.5.2.5**

Le dosage minimal du coulis de scellement est de 1200 kg de ciment par m<sup>3</sup> de coulis.

#### **2.5.2.6**

Dans le cas d'un scellement au mortier, la résistance à la compression simple de ce mortier doit être au moins égale à celle d'un coulis de ciment de rapport pondéral C/E = 2. L'entrepreneur justifie que le mortier est compatible avec le système de mise en place utilisé.

## **2.5.3 Mise en oeuvre**

#### **2.5.3.1**

Le coulis ou mortier de scellement est mis en place à partir du système d'injection équipant le pieu (tubes à manchettes, clapets ou rampes).

#### **2.5.3.2**

La pression d'injection moyenne  $p_i$  doit être au moins égale à la pression limite  $p_l$  du sol mesurée au pressiomètre normal en tenant compte des pertes de charges dues à la nature des coulis - des mortiers - des dispositions d'injection.

## **2.5.4 Contraintes de calcul**

#### **2.5.4.1**

La section d'acier est seule prise en compte dans les calculs de transmission des charges. La contrainte de calcul de l'acier sous les sollicitations ELS est égale à la moitié de la limite élastique et sous les sollicitations ELU aux 3/4 de la

limite élastique.

#### **2.5.4.2**

Lorsqu'il y a risque de corrosion, une section réduite d'acier est prise en compte dans les calculs.

#### **2.5.4.3**

Le frottement latéral du sol à prendre en compte est calculé passe par passe, en appliquant la méthode de calcul préconisée par le chapitre 11 (commentaires) et pour un mode de scellement correspondant à une injection haute pression.

### **2.5.5 Essais de contrôle et de portance**

Dans tous les cas, on procède au moins à 2 essais de contrôle de portance, quel que soit le nombre de pieux et que ceux-ci travaillent à la compression ou à la traction.

Le nombre d'essais peut être limité à un seul si le pieu est équipé d'un dispositif de mesure permettant de dissocier le frottement latéral de la résistance de pointe.

## **Chapitre 3 Pieux à tube battu exécutés en place**

### **3.1 Battu pilonné**

(béton ferme, mis en place par petites quantités)

#### **3.1.1 Caractéristiques**

##### **3.1.1.1**

Un tube, muni à sa base d'un bouchon de béton ferme, est enfoncé par battage sur le bouchon. Le diamètre nominal du pieu est le diamètre extérieur du tube au niveau du bouchon. La longueur du tube est inscrite en tête du tube (chiffres au cordon de soudure de 15 cm de hauteur au moins).

Pour un terrain donné, au premier pieu, on détermine la hauteur optimale du bouchon pour qu'il ne glisse pas au moment du battage et qu'il puisse être chassé par le mouton lors de l'amorce du bétonnage.

##### **3.1.1.2**

Le tube primaire est d'une seule pièce par construction, d'épaisseur renforcée à sa base. Deux rallonges au plus peuvent être utilisées.

Dans les terrains aquifères, il y a risque d'entrée d'eau au raccord entre tube et rallonge ou entre deux rallonges. L'utilisation de rallonges implique que l'étanchéité des raccords soit suffisante.

##### **3.1.1.3**

Le béton ferme est introduit dans le tube par petites quantités, successivement pilonnées à l'aide du mouton de battage au fur et à mesure de l'extraction du tube.

### **3.1.2 Dispositions constructives**

#### **3.1.2.1 Armatures**

##### **3.1.2.1.1 Pieux ne subissant que des compressions**

Les pieux peuvent ne pas être armés si les efforts provenant de la construction ou du sol traversé ne produisent que des compressions centrées sur l'axe théorique du pieu.

Lorsque les pieux ne comportent pas de cages d'armature, on peut disposer des barres d'attente piquées dans le béton frais. Si la nature du sol ne permet pas de réaliser une tête de pieu cylindrique, de façon à pouvoir situer son

axe, les barres d'attente sont indispensables : elles sont mises en place en repérant l'axe du tube avant sa sortie du béton et comprennent 4 barres de 2 m de longueur d'un diamètre minimal de 12 mm, disposées aux sommets d'un carré dont le centre est l'axe du pieu et le côté est égal à 0,5 fois le diamètre du pieu.

Les barres doivent pouvoir dépasser la cote de recépage de 0,75 m environ.

Lorsqu'il y a de faibles efforts horizontaux - de l'ordre de 2 à 5 % de la charge verticale - on n'est plus dans le cas de compression centrée sur l'axe théorique du pieu qui devrait alors être armé sur toute sa longueur.

Dans ce cas, le concepteur de l'ouvrage peut trouver le moyen de ne pas reporter ces efforts horizontaux sur les pieux, par exemple en prenant en compte partiellement la butée sur les ouvrages enterrés en permanence ( $K_p = 1$ ).

### 3.1.2.1.2

Les pieux susceptibles d'être soumis à des efforts de flexion, les pieux inclinés et les pieux travaillant en traction doivent être armés sur toute leur longueur.

Ce paragraphe s'applique en particulier dans les zones sismiques.

### 3.1.2.1.3 Cages d'armature

Les cages d'armature des pieux sont constituées par des barres longitudinales en acier disposées suivant les génératrices d'un cylindre autour desquelles sont enroulées et fixées rigidement des cerces ou hélices. La longueur des cages d'armatures doit permettre une liaison correcte avec la structure conformément aux données du projet. Le nombre minimal de barres est cinq et leur diamètre ne descend pas au-dessous de 12 mm. La section totale de ces barres est au moins égale à 0,5 % de la section nominale du pieu.

L'écartement des cerces ou le pas des spires n'est pas supérieur à 20 cm.

Le diamètre extérieur de la cage d'armature doit être au plus égal au diamètre extérieur du tube diminué de 8 cm.

La distance minimale de nu à nu des barres est de 10 cm.

La cage d'armature est munie d'un panier pour éviter sa remontée pendant la mise en oeuvre.

Les cages d'armature sont circulaires. Il n'est pas prévu de centreurs pour les cages de ces pieux. L'épaisseur du tube, dont le béton prend la place, donne un enrobage minimal. Les barres sont uniformément réparties pour des pieux verticaux.

### 3.1.2.1.4 Assemblage des cages d'armature

Lorsque la cage d'armature d'un pieu est constituée de plusieurs tronçons, l'assemblage de ces tronçons doit être effectué, avant ou pendant leur descente dans le tube en tenant compte de leur recouvrement nécessaire. Le soudage et le pointage au chalumeau sont interdits. Le soudage et le pointage à l'arc électrique sont admis dans les conditions fixées par la fiche d'identification des aciers utilisés.

### 3.1.2.1.5 Epaisseur d'enrobage des armatures par le béton

L'épaisseur du béton qui enrobe les armatures doit être au moins égale à 4 cm.

Cet enrobage est assuré par la surépaisseur des tubes à leur partie inférieure.

### 3.1.2.1.6

La conception des cages d'armature doit leur permettre de résister aux efforts subis pendant la mise en oeuvre, notamment pendant le pilonnage du béton.

Si les barres sont uniformément réparties pour des pieux verticaux, ce n'est plus le cas pour des pieux inclinés, car le mouton se déplaçant à l'intérieur de l'armature, il est nécessaire de disposer deux barres longitudinales inférieures plus fortes et plus rapprochées que les autres pour constituer glissière du mouton afin qu'il n'accroche pas les spires.

### 3.1.2.2 Béton ferme

#### **3.1.2.2.1**

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

#### **3.1.2.2.2**

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

#### **3.1.2.2.3**

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique, avec mise en place de béton plastique et sans pilonnage sur la hauteur de la chemise.

#### **3.1.2.2.4**

Le diamètre maximal des granulats est 25 mm.

#### **3.1.2.2.5**

L'ouvrabilité du béton est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement doit être inférieur à 5 cm.

Si l'affaissement, mesuré au cône, est supérieur à 5 cm, le pilon pénètre dans le béton sans réaliser un serrage suffisant.

### **3.1.3 Mise en oeuvre**

#### **3.1.3.1 Poids du mouton**

Le poids de la masse tombante doit toujours être suffisant pour descendre les pieux à la profondeur définie au projet.

Indépendamment du poids du mouton, l'enfoncement du pieu peut être facilité par une augmentation de la hauteur de chute.

#### **3.1.3.2 Etanchéité du tube**

Le tube, sa rallonge éventuelle et le bouchon doivent former un ensemble étanche. Le pieu est recommencé s'il se trouve de l'eau au fond du tube.

L'absence d'eau est vérifiée par remontée et examen du mouton.

#### **3.1.3.3 Dommages aux pieux voisins en cours de battage**

La distance entre axes de deux pieux voisins est au moins égale à 1,5 fois la somme des diamètres de ces deux pieux.

Dans le cas de dommages aux pieux voisins, par exemple observation d'une remontée du béton dans les pieux voisins, l'entrepreneur doit étudier l'ordre de battage et il peut être recouru à des dispositions particulières (armatures, préforages, etc.).

La remontée du béton d'un pieu voisin déjà exécuté traduit le risque d'un phénomène de striction ou de coupure. Il y a donc lieu d'assurer une surveillance permanente des pieux voisins de façon à permettre une intervention immédiate.

#### **3.1.3.4**

Avant le début du bétonnage, l'entrepreneur vérifie l'implantation du tube et l'absence d'eau et de terre à l'intérieur de celui-ci. Un dispositif spécial doit permettre d'effectuer ce contrôle à tout moment.

L'absence d'eau et de terre à l'intérieur du tube se vérifie par remontée du pilon et examen de ce dernier.

Le volume du béton entrant dans la confection de chaque pieu doit être mesuré et inscrit dans l'attachement (Cahier des Clauses Spéciales, art. 6.1).

### 3.1.3.5

Le bétonnage est réalisé à sec, par déversements successifs, avec pilonnage. La garde minimale du béton doit être maintenue à l'intérieur du tube à une hauteur telle qu'elle interdise toute introduction, à la base de celui-ci, d'eau ou de terre, sans être toutefois inférieure à la moitié du diamètre du tube. Une marque peinte sur le câble du pilon doit permettre de vérifier cette condition.

### 3.1.3.6

La courbe de bétonnage est établie normalement pour un pieu sur 50. Si la consommation de béton est anormale (surconsommation de plus de 30 % ou sous-consommation), on prend des dispositions spéciales. On établit une courbe de bétonnage en déversant le béton par quantités mesurées (au maximum  $0,5 \text{ m}^3$ ) et en mesurant chaque fois le niveau du toit du béton.

### 3.1.3.7

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase, est :

- $0,3 (z + 1)$  m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur  $z$  (mètres), sous la plate-forme de travail, inférieure à 5 mètres ;
- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage. La hauteur limite fixée à l'art. 3,137 est celle qui intervient à l'art. 9 du CCS.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans des terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations dues au battage), la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut être telle qu'elle provoque une striction du béton avant son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

### 3.1.3.8

Une base élargie peut être réalisée dans certains terrains en créant artificiellement par pilonnage un hors profil important à la base du pieu. La section de la base élargie est estimée à partir du volume de béton mis en place. Le diamètre de la base élargie prise en compte dans les calculs de portance est au plus égal à 1,6 fois le diamètre du pieu.

## 3.1.4 Contraintes de calcul

### 3.1.4.1

Se reporter à l'article 1,32

### 3.1.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté,

et

- 1 pieu sur 10 doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

Si l'élancement des pieux dépasse 20, l'impédance mécanique n'est pas fiable et le carottage mécanique risque de sortir du pieu avant d'atteindre sa pointe (cf. commentaires 10,313.2 et 10,314.1).

## 3.2 Battu moulé

(béton d'ouvrabilité moyenne, mis en place sur toute la hauteur)

### 3.2.1 Caractéristiques

#### 3.2.1.1

Un tube muni à sa base d'une pointe métallique, ou en béton armé, ou d'une plaque métallique raidie, ou d'un bouchon de béton, est enfoncé par battage sur un casque placé en tête du tube ou par battage sur le bouchon de béton. Le diamètre nominal du pieu est le diamètre du tube au voisinage de la pointe et non le diamètre de la pointe perdue ou de la plaque.

La longueur du tube est inscrite en tête de celui-ci (chiffres au cordon de soudure de 15 cm de hauteur au moins).

La pointe (perdue ou récupérable) ou la plaque perdue a un diamètre supérieur à celui de la base du tube pour une bonne tenue sous le tube au battage. Au fur et à mesure du battage, le terrain se resserre contre le tube au-dessus de la pointe, c'est pourquoi la section à prendre en compte pour le pieu ne peut dépasser celle de la base du tube.

#### 3.2.1.2

Le tube primaire est d'une seule pièce par construction. Deux rallonges au plus peuvent être utilisées.

#### 3.2.1.3

Le tube est rempli totalement de béton d'ouvrabilité moyenne avant son extraction.

Si le battage s'effectue en tête du tube et si la pointe est perdue, on peut remplir de béton tube et rallonges avant le battage afin d'éviter les entrées d'eau pendant le battage.

### 3.2.2 Dispositions constructives

#### 3.2.2.1 Armatures

##### 3.2.2.1.1 Pieux ne subissant que des compressions

Les pieux peuvent ne pas être armés si les efforts provenant de la construction ou du sol traversé ne produisent que des compressions centrées sur l'axe théorique du pieu.

Lorsque les pieux ne comportent pas de cages d'armature, on peut disposer des barres d'attente piquées dans le béton frais. Si la nature du sol ne permet pas de réaliser une tête de pieu cylindrique, de façon à pouvoir situer son axe, les barres d'attente sont indispensables : elles sont mises en place en repérant l'axe du tube avant sa sortie du béton et comprennent 4 barres de 2 m de longueur d'un diamètre minimal de 12 mm, disposées aux sommets d'un carré dont le centre est l'axe du pieu et le côté est égal à 0,5 fois le diamètre du pieu.

Les barres doivent pouvoir dépasser la cote de recépage de 0,75 m environ.

Lorsqu'il y a de faibles efforts horizontaux, de l'ordre de 2 à 5 % de la charge verticale, on n'est plus dans le cas de compression centrée sur l'axe théorique du pieu qui devrait alors être armé sur toute sa longueur.

Dans ce cas, le concepteur de l'ouvrage peut trouver le moyen de ne pas reporter ces efforts horizontaux sur les pieux, par exemple en prenant en compte partiellement la butée sur les ouvrages enterrés en permanence ( $K_p = 1$ ).

##### 3.2.2.1.2

Les pieux susceptibles d'être soumis à des efforts de flexion, les pieux inclinés, et les pieux travaillant en traction doivent être armés sur toute leur longueur.

##### 3.2.2.1.3 Cages d'armature

Les cages d'armature des pieux sont constituées par des barres longitudinales en acier disposées suivant les génératrices d'un cylindre autour desquelles sont enroulées et fixées rigidement des cerces ou hélices. La longueur des cages d'armature doit permettre une liaison correcte avec la structure conformément aux données du projet.



Le nombre minimal de barres est cinq et leur diamètre ne descend pas au-dessous de 12 mm. La section totale de ces barres est au moins égale à 0,5 % de la section nominale du pieu.

L'écartement des cerces ou le pas des spires n'est pas supérieur à 20 cm.

Le diamètre extérieur de la cage d'armatures doit être au plus égal au diamètre extérieur du tube diminué de 8 cm.

La distance minimale de nu à nu des barres est 10 cm.

La cage d'armature est munie d'un panier pour éviter sa remontée pendant la mise en oeuvre.

Les cages d'armature sont circulaires et les barres uniformément réparties. Il n'est pas prévu de centreurs pour les cages de ces pieux. L'épaisseur du tube, dont le béton prend la place, donne un enrobage minimal. On peut écarter légèrement vers l'extérieur les barres de la partie supérieure de la cage de façon à centrer parfaitement la partie haute de cette cage d'armature. On obtient par la suite une meilleure définition du centre du pieu.

#### 3.2.2.1.4 Assemblage des cages d'armature

Lorsque la cage d'armature d'un pieu est constituée de plusieurs tronçons, l'assemblage de ces tronçons doit être effectué, avant ou pendant leur descente dans le tube, en tenant compte de leur recouvrement nécessaire. Le soudage et le pointage au chalumeau sont interdits. Le soudage et le pointage à l'arc électrique sont admis dans les conditions fixées par la fiche d'identification des aciers utilisés.

- a Les longueurs maximales de fourniture d'armatures dépassent rarement 15 mètres. Les cages d'armature de pieux de grande longueur sont donc décomposées en tronçons élémentaires qui sont assemblés sur le chantier lors de la descente du ferrailage dans le forage.
- b Dans les cas courants, l'assemblage de deux tronçons de cage d'armature est destiné à permettre la manutention et le bétonnage. Il peut être assuré par points de soudure électrique, serre-câbles, ligatures, etc. La continuité des efforts dans le pieu en service n'est pas assurée par cette liaison provisoire de manutention mais par recouvrement classique des barres sur une longueur au moins égale à la « longueur de scellement droit », la zone de recouvrement étant entourée de cerces ou frettes dimensionnées pour équilibrer les efforts tendant à faire éclater le béton.
- c Il existe des cas exceptionnels, notamment de pieux travaillant à l'arrachement, où la liaison entre tronçons de cage d'armature doit résister à une traction sensiblement égale à celle que permet la section d'acier. Le concepteur prévoit alors une jonction barre à barre entre les tronçons de cage, par soudure électrique, manchonnage, etc. et l'entrepreneur justifie que les dispositifs qu'il réalise résistent effectivement aux efforts de traction fixés dans la note de calcul.

#### 3.2.2.1.5 Epaisseur d'enrobage des armatures par le béton

L'épaisseur du béton qui enrobe les armatures doit être au moins égale à 4 cm.

### 3.2.2.2 Bétons

#### 3.2.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

#### 3.2.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

#### 3.2.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique.

L'agressivité éventuelle du terrain ou de l'eau de la nappe (présence de matières organiques, d'eau chargée en sels, de substances chimiques, de gaz...) peut donner lieu à des modifications de temps de prise et à des pertes de résistance.

#### **3.2.2.2.4**

Le diamètre maximal des granulats est 25 mm.

#### **3.2.2.2.5**

L'ouvrabilité du béton est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement doit être compris entre 10 et 16 cm.

L'ouvrabilité du béton des pieux battus moulés correspond, en général, à un affaissement du cône de 16 cm. Particulièrement pour les pieux armés, l'objectif principal est la bonne mise en place du béton plutôt que l'obtention d'une résistance nominale élevée.

### **3.2.3 Mise en oeuvre**

#### **3.2.3.1**

Le poids de la masse tombante doit toujours être suffisant pour descendre les pieux à la profondeur définie au projet.

#### **3.2.3.2 Etanchéité du tube**

L'ensemble formé par le tube, ses rallonges éventuelles, et l'obturation, doit être étanche. Le pieu doit être recommencé, s'il se trouve de l'eau au fond du tube.

#### **3.2.3.3 Dommages aux pieux voisins en cours de battage**

La distance entre axes de deux pieux voisins est au moins égale à 1,5 fois la somme des diamètres de ces deux pieux.

Dans le cas de dommages aux pieux voisins, l'entrepreneur doit étudier l'ordre de battage et il peut être recouru à des dispositions particulières (armatures, préforages, etc.).

La remontée du béton d'un pieu voisin déjà exécuté traduit un phénomène de striction ou de coupure. Il y a donc lieu d'assurer une surveillance permanente des pieux voisins de façon à permettre une intervention immédiate.

#### **3.2.3.4**

Avant le début du bétonnage, l'entrepreneur vérifie l'implantation du tube et l'absence d'eau et de terre à l'intérieur de celui-ci.

Un dispositif spécial doit permettre d'effectuer ce contrôle à tout moment.

Le volume du béton entrant dans la confection de chaque pieu doit être mesuré et inscrit dans l'attachement (Cahier des Clauses Spéciales, art. 6.1).

#### **3.2.3.5 Le bétonnage est réalisé à sec sur toute la hauteur.**

Le béton d'ouvrabilité moyenne est placé dans le tube de façon qu'à l'extraction de celui-ci il remplisse le pieu jusqu'à la cote d'arase. Si le tube n'est pas assez long pour contenir un volume de béton correspondant aux hors profils, on ajoute le supplément de béton après un relevage du tube de la hauteur suffisante.

Le bas du tube est toujours à 1 m au moins sous le niveau du béton, sauf évidemment au niveau de la cote de recépage.

#### **3.2.3.6**

La courbe de bétonnage est établie normalement pour un pieu sur 50. Si la consommation de béton est anormale (surconsommation de plus de 30 % ou sous-consommation), on prend des dispositions spéciales. On établit une courbe de bétonnage en mesurant le toit du béton chaque fois que le tube est remonté de 2 m.

La première courbe de bétonnage détaillée (5 points au moins) est établie sur l'un des 10 premiers pieux de chaque série de 50.

La courbe de bétonnage est tracée par le responsable du chantier à son premier passage et trois jours au plus après l'exécution du pieu. Cette courbe est tenue à la disposition, sur le chantier, du maître d'oeuvre et des contrôleurs.

**3.2.3.7**

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase est :

- 0,3 ( $z + 1$ ) m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur  $z$  (mètres), sous la plate-forme de travail, inférieure à 5 m ;
- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage.

La hauteur limite fixée à l'article 3.2.3.7 du Cahier des Clauses Techniques est celle qui intervient à l'article 9 du Cahier des Clauses Spéciales.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans des terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations dues au battage), la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut provoquer une striction du béton avant son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

**3.2.4 Contraintes de calcul****3.2.4.1**

Se reporter à l'article 1,32

**3.2.4.2**

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

L'exécution et l'interprétation de ces mesures sont confiées à un spécialiste agréé par le maître d'oeuvre.

**3.2.4.2.1**

Si les pieux ne sont pas armés :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté,

et

- 1 pieu sur 10 doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

Si l'élancement des pieux dépasse 20, l'impédance mécanique n'est pas très fiable et le carottage mécanique risque de sortir du pieu latéralement avant d'atteindre sa pointe. Dans ce cas, on peut être conduit à armer les pieux pour pouvoir y installer des tubes pour mesures soniques ou encore utiliser un récepteur dans un forage latéral (microsismique transparence MST).

**3.2.4.2.2**

Si les pieux sont armés, 1 pieu sur 20 est muni sur toute sa longueur de deux tubes dans lesquels on doit faire des essais soniques par transparence après mise en oeuvre.

Il y a lieu de vérifier que le diamètre des tubes prévus pour les essais soniques est adapté au matériel du spécialiste chargé de ces essais. En général, un diamètre intérieur de 50 mm est nécessaire.

**Chapitre 4 Pieux forés****4.1 Foré simple**

## 4.1.1 Caractéristiques

### 4.1.1.1

Ce procédé qui n'utilise pas de soutènement de parois ne s'applique que dans les sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques.

Le forage ne s'accompagne d'aucune protection des parois, à l'exception de la virole de tête. Le procédé peut concerner des pieux et barrettes de toutes dimensions. Son application est cependant assez limitée car les terrains justifiant de fondations sur pieux sont généralement baignés par une nappe phréatique. De la sorte, la profondeur de ce type de pieux dépasse rarement 20 mètres.

Lorsque des pieux mixtes sont exécutés avec tubage partiel bloquant des sols hors d'eau sujets à éboulement, on admet que la partie inférieure non tubée est un « foré simple » soumise aux prescriptions du chapitre 4,1.

### 4.1.1.2

Un forage est exécuté dans le sol par des moyens mécaniques (tarière, benne, etc.). La bonne tenue des parois du forage est essentielle : un essai est obligatoire sur chaque chantier. La section est circulaire (pieux) ou de forme quelconque (barrettes).

En cas d'éboulement, il y a lieu d'utiliser une autre méthode d'exécution, généralement le forage sous boue bentonitique, car les moyens mis en oeuvre dans les deux procédés sont souvent identiques à l'unité de fabrication de boue près.

### 4.1.1.3

L'essai de tenue des parois de forage consiste à exécuter, avant le début du chantier, trois forages en dehors des pieux, de mêmes diamètre et longueur que les pieux les plus importants, à les laisser ouverts chacun pendant un temps T sous surveillance, et à constater qu'aucun éboulement ne s'est produit. Ce temps T est proposé par l'entrepreneur et n'est pas inférieur à 4 heures. Ces forages sont ensuite remblayés, de façon à ne pas nuire aux fondations proches. Des essais complémentaires peuvent être demandés par le maître d'oeuvre en cours de chantier.

Ces trois forages de contrôle de bonne adaptation du procédé sont implantés de manière à pouvoir être considérés comme représentatifs de l'ensemble du site. Leurs résultats peuvent conduire à n'autoriser l'emploi du procédé que dans une zone déterminée, dans la mesure où les reconnaissances permettent une délimitation satisfaisante.

Un temps T le plus grand possible donne une marge pour les incidents de chantier ou les attentes de béton.

Cependant, certains sols gonflants peuvent nécessiter une limitation particulière de ce temps T.

Le remblayage de ces forages peut souvent être effectué avec les matériaux excavés ou avec une grave ciment.

### 4.1.1.4

Le bétonnage doit être terminé dans un temps inférieur ou égal à  $T/2$  à compter de la fin du forage.

Normalement, le pieu est exécuté et achevé en moins d'un poste de travail. Ceci suppose donc des conditions faciles de réalisation, notamment de forage.

### 4.1.1.5

La section nominale du pieu est celle de l'outil de forage.

Il convient de vérifier que la section de l'outil en cours de travaux reste au moins égale à la section nominale.

On ne tient pas compte des hors profils dans les calculs de portance.

## 4.1.2 Dispositions constructives

### 4.1.2.1 Armatures

#### 4.1.2.1.1

Les pieux peuvent ne pas être armés si les efforts provenant de la construction ou du sol traversé ne produisent que des compressions centrées sur l'axe théorique du pieu.

Lorsque les pieux ne comportent pas de cages d'armature, on peut disposer des barres d'attente piquées dans le béton frais. Si la nature du sol ne permet pas de réaliser une tête de pieu cylindrique, de façon à pouvoir situer son axe, les barres d'attente sont indispensables : elles sont mises en place en repérant l'axe de la virole avant sa sortie du béton et comprennent 4 barres de 2 m de longueur d'un diamètre minimal de 12 mm, disposées aux sommets d'un carré dont le centre est l'axe du pieu et le côté est égal à 0,5 fois le diamètre du pieu.

Pieux ne subissant que des compressions : les barres d'attente sont maintenues en place au moyen d'un gabarit fixé au sol jusqu'à ce que le béton ait acquis une résistance suffisante.

Ces barres ne peuvent être positionnées avec précision que si le béton est arasé à moins de 1 m au-dessous de la plate-forme de travail.

Les barres doivent pouvoir dépasser la cote de recépage de 0,75 m environ.

#### 4.1.2.1.2

Les pieux susceptibles d'être soumis à des efforts de flexion, les pieux inclinés et les pieux travaillant en traction doivent être armés sur toute leur longueur.

La cage d'armature est prévue sur toute la longueur des pieux pour maintenir son positionnement correct lors du bétonnage.

#### 4.1.2.1.3 Cages d'armature

Les cages d'armature du pieu sont constituées par des barres longitudinales en acier disposées suivant les génératrices d'un cylindre autour desquelles sont enroulées et fixées rigidement des cerces ou hélices. La longueur des cages d'armature doit permettre une liaison correcte avec la structure conformément aux données du projet.

Le nombre minimal de barres est cinq et leur diamètre ne descend pas au-dessous de 12 mm. La section totale de ces barres est au moins égale à 0,5 % de la section nominale du pieu si cette section est inférieure à 0,5 m<sup>2</sup>.

Si la section nominale du pieu est comprise entre 0,5 et 1 m<sup>2</sup>, la section minimale totale des barres verticales est 25 cm<sup>2</sup>.

Si la section du pieu est supérieure à 1 m<sup>2</sup>, la section minimale totale des barres verticales est de 0,25 % de la section nominale du pieu.

L'écartement des cerces ou le pas des spires n'est pas supérieur à 35 cm.

La distance minimale de nu à nu des barres verticales est 10 cm.

La cage d'armature est munie d'un panier pour éviter sa remontée pendant la mise en oeuvre.

Pour des barrettes ces dispositions de principe s'appliquent à la section près, les cerces ou hélices étant remplacées par des cadres. En outre, la rigidité de la cage lors des manutentions doit être assurée par adjonction de barres obliques.

- a Compte tenu de leur rôle respectif, les armatures longitudinales sont généralement des aciers haute adhérence, alors que les armatures transversales sont des ronds lisses en acier doux, sauf problème particulier de dimensionnement à l'effort tranchant. Le diamètre des armatures transversales est fonction de celui des armatures longitudinales et est normalement choisi entre 8 et 16 mm. Pour les armatures longitudinales, les diamètres les plus couramment utilisés sont compris entre 16 et 32 mm.
- b Dans une armature à section droite circulaire, on répartit les barres longitudinales régulièrement le long de la circonférence, même si les moments fléchissants ont une direction privilégiée : on évite ainsi une mauvaise position des barres longitudinales au cas où se produirait un vrillage de la cage au moment de sa confection, de sa mise en place ou pendant le bétonnage.  
Dans le cas des pieux sollicités en flexion, la cage peut ne pas avoir la même composition du haut jusqu'en bas : le nombre de barres, ou leurs diamètres, peuvent varier le long du pieu en fonction des sollicitations prévues. Il est fréquent, notamment, que les tronçons inférieurs d'une cage soient seulement conçus pour s'opposer à sa remontée au cours du bétonnage : pour des sections circulaires, ces tronçons comportent au minimum trois barres, d'une section totale au moins égale à 5 cm<sup>2</sup>, avec une cerce par mètre sans spires.
- c Au droit de la jonction entre deux tronçons de cage d'armature, où le nombre de barres longitudinales est double, la distance minimale de nu à nu des couples de barres est de 10 cm dans le cas général. Si cette

- distance n'est pas respectée, on étudie spécialement la granulométrie et l'ouvrabilité du béton, ainsi que la durée du bétonnage, afin que les aciers soient correctement enrobés malgré la faible distance entre couples de barres.
- d Les tubes d'auscultation sonique, les tubes d'injection, etc. sont généralement fixés le long des armatures longitudinales de façon à ne pas nuire au bétonnage.
  - e Le panier dont est munie la base de la cage d'armature est conçu pour ne pas gêner le fonctionnement de la colonne de bétonnage.
  - f En plus de la réalisation d'un panier à la base de la cage d'armature, les moyens de lutte contre la remontée de la cage sont :
    - une diminution du diamètre extérieur de la cage, mais cela entraîne une augmentation de la section des barres verticales pour les pieux fléchis ;
    - une amélioration de l'ouvrabilité du béton en agissant sur la granulométrie, le dosage en ciment, la température du ciment et des granulats, l'emploi de plastifiant retardateur, etc.

#### 4.1.2.1.4 Assemblage des cages d'armature

Lorsque la cage d'armature d'un pieu est constituée de plusieurs tronçons, l'assemblage de ces tronçons doit être effectué, avant ou pendant leur descente dans le forage, en tenant compte de leur recouvrement nécessaire. Le soudage et le pointage au chalumeau sont interdits. Le soudage et le pointage à l'arc électrique sont admis dans les conditions fixées par la fiche d'identification des aciers utilisés.

- a Les longueurs maximales de fournitures d'armatures dépassent rarement 15 m. Les cages d'armature de pieux de grande longueur doivent donc être décomposées en tronçons élémentaires qui sont assemblés sur le chantier lors de la descente du ferrailage dans le forage.
- b Dans les cas courants, l'assemblage de deux tronçons de cage d'armature est destiné à permettre la manutention et le bétonnage. Il peut être assuré par points de soudure électrique, serre-câbles, ligatures, etc. La continuité des efforts dans le pieu en service n'est pas assurée par cette liaison provisoire de manutention, mais par recouvrement classique des barres sur une longueur au moins égale à la « longueur de scellement droit », la zone de recouvrement étant entourée de cerces ou frettes dimensionnées pour équilibrer les efforts tendant à faire éclater le béton.
- c Il existe des cas exceptionnels, notamment de pieux travaillant à l'arrachement, où la liaison entre tronçons de cage d'armature doit résister à une traction sensiblement égale à celle que permet la section d'acier. Le concepteur prévoit alors une jonction barre à barre entre les tronçons de cage, par soudure électrique, manchonnage, etc. et l'entrepreneur justifie que les dispositifs qu'il réalise résistent effectivement aux efforts de traction fixés dans la note de calcul.

#### 4.1.2.1.5

L'épaisseur du béton qui enrobe les armatures doit être au moins égale à 7 cm. Des centreurs sont disposés sur l'armature dans ce but. Les centreurs doivent présenter une résistance à la corrosion au moins égale à celle du béton du pieu.

Les centreurs (galets ou patins) assurant l'enrobage sont susceptibles de venir en contact avec le terrain et ne peuvent donc être métalliques par suite du risque de corrosion. Ces centreurs ont généralement plus de 8 cm de largeur.

Ils sont habituellement en béton et comportent des dispositifs de fixation sur la cage d'armature.

Pour les pieux, on place généralement des centreurs approximativement tous les 3 m à raison d'au moins 3 centreurs par niveau. Pour les barrettes, on adopte une densité d'environ 1 centreur pour 4 m<sup>2</sup> de surface latérale.

#### 4.1.2.1.6

Le diamètre hors tout de la cage d'armatures doit être supérieur à 1,25 fois le diamètre extérieur de la colonne de

bétonnage.

Cette disposition est destinée à combattre le risque de remontée de la cage d'armature avec la colonne de bétonnage.

#### 4.1.2.2 Bétons

##### 4.1.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

La composition du béton doit être étudiée en tenant compte des conditions particulières de sa mise en oeuvre.

##### 4.1.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

En pratique courante, on utilise le plus souvent des dosages d'environ 400 kg de ciment par mètre cube de béton.

##### 4.1.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique.

##### 4.1.2.2.4

Le diamètre maximal des granulats est la plus petite des dimensions suivantes :

- le quart de la maille de la cage d'armature ;
- la moitié de l'enrobage des armatures ;
- le quart du diamètre intérieur de la colonne.

Ces conditions sont destinées à assurer un bon enrobage des armatures, compte tenu des caractéristiques du béton, et de ses modalités de mise en oeuvre.

##### 4.1.2.2.5

L'ouvrabilité du béton est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement doit être compris entre 10 et 16 cm.

Les commandes de béton aux centrales sont faites en spécifiant l'ouvrabilité (fourchette d'affaissement au cône) à l'arrivée du béton au chantier.

Le rajout d'eau dans les camions malaxeurs sur chantier même suivi d'un malaxage de longue durée est dangereux et doit demeurer l'exception.

Lorsque les conditions l'exigent, il est conseillé d'utiliser un retardateur.

#### 4.1.3 Mise en oeuvre

##### 4.1.3.1

L'utilisation de ce procédé est strictement interdite si la longueur des pieux exige la traversée ou l'approche d'une couche pouvant être le siège de circulation d'eau.

La proximité de zones de circulation d'eau peut créer des conditions propices à des éboulements ou des décompressions à la base du pieu susceptibles de réduire la portance.

Le forage d'un pieu dont l'axe est situé à moins de trois fois son diamètre du nu d'un pieu voisin ne peut commencer avant la prise du béton de ce dernier.

Le délai de « prise du béton » est généralement supérieur à 4 heures. Il peut être encore plus important si le béton contient des adjuvants qui retardent sa prise.

#### 4.1.3.2

L'utilisation d'une virole en tête est obligatoire pour éviter l'éboulement du forage en tête. L'extraction de la virole après bétonnage doit pouvoir se faire sans variation brusque du niveau de béton.

La virole de tête concerne des pieux de section circulaire. Dans le cas de barrettes, les murettes guides ou dispositifs équivalents de guidage en tête sont nécessaires pour une bonne exécution de la barrette et assurent ipso facto cette condition. Ces murettes guides peuvent être conservées ou, au contraire, démolies ultérieurement selon les cas.

#### 4.1.3.3

La mise en oeuvre du béton se fait au moyen d'une colonne de bétonnage pour éviter le rabotage des parois. La base de la colonne doit être située à moins de 1 m au-dessus du niveau supérieur du béton en place.

Cette colonne permet de contrôler la hauteur de chute libre du béton mais il n'est pas nécessaire de recourir à la technique du tube plongeur qui pourrait ne pas être adaptée à l'ouvrabilité choisie pour le béton.

#### 4.1.3.4

Une courbe de bétonnage est établie pour chaque pieu ou barrette, toupie par toupie. Si ces courbes de bétonnage comportent moins de 5 points, on établit, pour 1 pieu sur 50, une courbe de bétonnage ayant au moins 5 points régulièrement répartis sur la longueur du pieu. Si les consommations de béton sont anormales (sous profils ou plus de 30 % de hors profils), on prend des dispositions spéciales.

La première courbe de bétonnage détaillée (5 points au moins) est établie sur l'un des 10 premiers pieux de chaque série de 50.

Le bétonnage au camion toupie de pieux de faible section nécessite de prévoir des dispositions particulières permettant une détermination acceptable des volumes partiels mis en place lors de la montée du béton, de façon à obtenir ce minimum de 5 points.

La courbe de bétonnage est tracée par le responsable du chantier à son premier passage et trois jours au plus après l'exécution du pieu. Cette courbe est tenue à la disposition, sur le chantier, du maître d'oeuvre et des contrôleurs.

#### 4.1.3.5

Base élargie : dans les sols suffisamment cohérents (résistance à la compression simple  $R_c > 0,2$  MPa), les pieux verticaux peuvent être munis d'une base élargie par alésage du forage. La section de la base élargie ne doit pas toutefois être supérieure à 3 fois la section du pieu. La base élargie a une forme tronconique dont la hauteur est au moins égale au diamètre du fût du pieu.

Base élargie : le plus souvent, il est plus sûr et plus avantageux de prolonger le pieu à diamètre constant plutôt que de réaliser un élargissement.

En effet, en cas d'élargissement :

- il faut que le terrain soit suffisamment cohérent pour éviter l'éboulement des parois du trou ;
- et il est difficile de contrôler un tel éboulement s'il se produit ;
- il est pratiquement impossible d'armer le béton de l'élargissement ;
- le frottement latéral diminue au-dessus de l'élargissement.

#### 4.1.3.6

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase, est :

- $0.3 (z + 1)$  m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur  $z$  (m), sous la plate-forme de



travail, inférieure à 5 m ;

- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage. La hauteur limite fixée à l'article 4.1.3.6 est celle qui intervient à l'article 9 du Cahier des Clauses Spéciales.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans les terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations dues au battage), la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut être telle qu'elle provoque une striction du béton avant son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

#### 4.1.4 Contraintes de calcul

##### 4.1.4.1

Se reporter à l'article 1,32

##### 4.1.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

##### 4.1.4.2.1

Si les pieux ne sont pas armés :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesures d'impédance mécanique de 1 pieu sur 3, ou bien
- carottage mécanique de 1 pieu sur 50, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesures d'impédance mécanique de 1 pieu sur 6.

##### 4.1.4.2.2

Si les pieux sont armés, quelques-uns doivent être munis de tubes permettant les mesures soniques par transparence. Le nombre de tubes par pieu est :

- 2 tubes pour les pieux  $\varphi \leq 60$  cm,
- 3 tubes pour les pieux  $\varphi \leq 120$  cm et  $> 60$  cm
- 4 tubes pour les pieux  $\varphi > 120$  cm.

Le nombre minimal de pieux qui doivent faire l'objet d'essais est :

- 1 pieu sur 8 par transparence

ou

- 1 pieu sur 10 par transparence et 1 pieu sur 8 par impédance.

##### 4.1.4.2.3 Barrettes armées

Quelques-unes doivent être munies sur toute leur longueur de tubes permettant les mesures soniques par transparence. Le nombre de tubes par barrette est tel que, sur chaque face de la barrette, la distance entre tubes est inférieure à 1,50 m.

- 1 barrette sur 6 doit faire l'objet de mesures par transparence

ou bien :

- 1 barrette sur 8 doit faire l'objet de mesures par transparence et 1 barrette sur 6 doit faire l'objet de mesures

d'impédance mécanique.

## 4.2 Foré tubé

### 4.2.1 Caractéristiques

#### 4.2.1.1

Un forage est exécuté dans le sol par des moyens mécaniques (tarière, benne, etc,...), sous protection d'un tubage dont la base est toujours située au-dessous du fond du forage. Le tubage peut être enfoncé jusqu'à la profondeur finale par vibration ou foncé avec louvoisement au fur et à mesure de l'avancement du forage. Le diamètre du pieu est le diamètre extérieur du sabot du tubage.

Pour minimiser les poches latérales et la remontée du fond, ainsi que pour réduire la décompression des terrains entourant le pieu, le tubage doit précéder le forage.

Toutefois, on doit tenir compte des cas suivants :

a Il y a des limites provenant de la dureté du terrain. C'est pourquoi on admet que :

- La base du tubage soit maintenue légèrement au-dessus du fond du forage durant la traversée de bancs durs, lorsque le forage ne peut pas rencontrer de couches pulvérulentes ou autres susceptibles de pénétrer dans le forage ;
- La base du tubage n'atteigne pas le fond du forage lors de l'ancrage final du pieu dans un horizon dur, pourvu que la pénétration du tubage dans l'horizon dur soit suffisante pour éviter tout désordre dans les couches pulvérulentes sus-jacentes. Dans la partie non tubée, le diamètre nominal du pieu est alors égal au diamètre de l'outil.

b Il est mauvais que le tubage pénètre trop bas en fin de forage, car cela risque d'être une cause supplémentaire de remaniement du sol sous la pointe du pieu.

En fin de perforation, on évite donc autant que possible que la base du tubage descende en dessous du fond du forage.

- 1 Des précautions complémentaires sont prises lors du forage sous la nappe en cas de risque de soulèvement du fond, par exemple dans les sables fins et/ou dans les vases : il convient notamment de maintenir le niveau de l'eau dans le forage nettement au-dessus du niveau piézométrique des nappes, ce qui est possible en établissant une alimentation en eau permanente de débit suffisant.

#### 4.2.1.2

Le forage est rempli partiellement ou totalement d'un béton de grande ouvrabilité, puis le tubage est extrait sans que le pied du tubage puisse se trouver à moins de 1 m sous le niveau du béton, sauf au niveau de la cote d'arase.

La garde minimale de 1 m entre le niveau de la surface du béton et le pied du tubage est augmentée lorsqu'on craint que le niveau du béton baisse brutalement au cours de l'extraction du tubage. Une telle baisse brutale peut se produire notamment du fait de l'existence de cavités autour du tubage (cavités naturelles ou cavités créées au cours de la perforation - cf. § 4,234).

### 4.2.2 Dispositions constructives

#### 4.2.2.1 Armatures

##### 4.2.2.1.1 Pieux ne subissant que des compressions

Les pieux peuvent ne pas être armés si les efforts provenant de la construction ou du sol traversé ne produisent que des compressions centrées sur l'axe théorique du pieu.

Lorsque les pieux ne comportent pas de cages d'armature, on peut disposer des barres d'attente piquées dans le béton frais. Si la nature du sol ne permet pas de réaliser une tête de pieu cylindrique, de façon à pouvoir situer son axe, les barres d'attente sont indispensables : elles sont mises en place en repérant l'axe du tubage avant sa sortie du béton et comprennent 4 barres de 2 m de longueur d'un diamètre minimal de 12 mm, disposées aux sommets d'un carré dont le centre est l'axe du pieu et le côté est égal à 0,5 fois le diamètre du pieu.

Les barres doivent pouvoir dépasser la cote de recépage de 0,75 m environ.

Les barres d'attente sont maintenues en place au moyen d'un gabarit fixé au sol jusqu'à ce que le béton ait acquis une résistance suffisante.

Elles ne peuvent être positionnées avec précision que si le béton est arasé à moins de 1 mètre au-dessous de la plate-forme de travail.

#### 4.2.2.1.2

Les pieux susceptibles d'être soumis à des efforts de flexion, les pieux inclinés, et les pieux travaillant en traction doivent être armés sur toute leur longueur.

La cage d'armatures est prévue sur toute la longueur des pieux pour maintenir son positionnement correct pendant le bétonnage et l'extraction du tubage.

#### 4.2.2.1.3 Cages d'armature

Les cages d'armature des pieux sont constituées par des barres longitudinales en acier disposées suivant les génératrices d'un cylindre autour desquelles sont enroulées et fixées rigidement des cerces ou hélices. La longueur des cages d'armature doit permettre une liaison correcte avec la structure conformément aux données du projet.

Le nombre minimal de barres est cinq et leur diamètre ne descend pas au-dessous de 12 mm. La section totale de ces barres est au moins égale à 0,5 % de la section nominale du pieu si cette section est inférieure à 0,5 m<sup>2</sup>.

Si la section nominale du pieu est comprise entre 0,5 et 1 m<sup>2</sup>, la section minimale totale des barres verticales est 25 cm<sup>2</sup>. Si la section du pieu est supérieure à 1 m<sup>2</sup>, la section minimale totale des barres verticales est de 0,25 % de la section nominale du pieu.

L'écartement des cerces ou le pas des spires n'est pas supérieur à 35 cm.

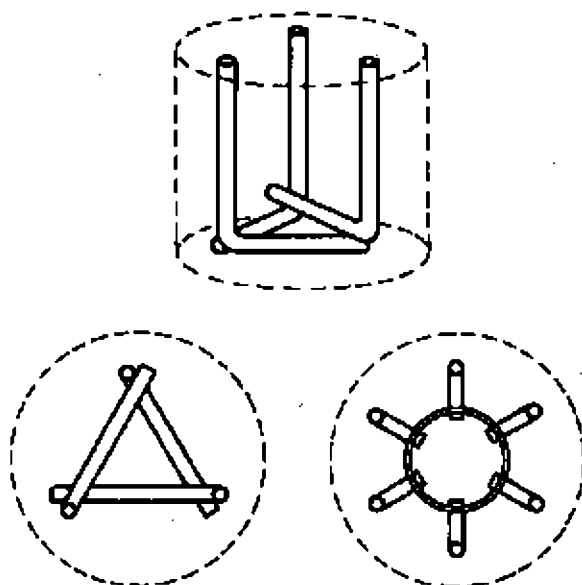
Le diamètre extérieur de la cage est au plus égal au diamètre intérieur du tubage diminué de 6 cm. En cas de bétonnage à la colonne, il est supérieur à 1,25 fois le diamètre extérieur de cette colonne.

La distance minimale de nu à nu des barres verticales est 10 cm.

La cage d'armature est munie d'un panier pour éviter sa remontée pendant la mise en oeuvre.

- a Dans une cage d'armature à section droite circulaire, on répartit les barres longitudinales régulièrement le long de la circonférence, même si les moments fléchissants ont une direction privilégiée : on évite ainsi une mauvaise position des barres longitudinales au cas où se produirait un vrillage de la cage au moment de sa confection, de sa mise en place ou pendant le bétonnage.  
Dans le cas des pieux sollicités en flexion, la cage peut ne pas avoir la même composition du haut jusqu'en bas : le nombre de barres, ou leurs diamètres, peuvent varier le long du pieu en fonction de sollicitations prévues. Il est fréquent, notamment, que les tronçons inférieurs d'une cage soient seulement conçus pour s'opposer à sa remontée au cours du bétonnage et de l'extraction du tubage : ces tronçons comportent au minimum trois barres, d'une section totale au moins égale à 5 cm<sup>2</sup>, avec une cerce par mètre sans spire.
- b Si l'écart entre le diamètre extérieur de la cage d'armature et le diamètre intérieur du tubage est trop faible, les granulats du béton coïncident la cage dans le tubage et la cage est arrachée partiellement ou totalement au moment de l'extraction du tubage. L'écart couramment adopté est de 10 à 12 cm, la valeur de 6 cm étant une limite inférieure extrême qui nécessite l'utilisation d'un béton spécialement étudié.
- c Au droit de la jonction entre deux tronçons de cage d'armature, où le nombre de barres longitudinales est double, la distance minimale de nu à nu des couples de barres est de 10 cm dans le cas général. Si cette distance n'est pas respectée, on étudie spécialement la granulométrie et l'ouvrabilité du béton, ainsi que la durée du bétonnage, afin que les aciers soient correctement enrobés malgré la faible distance entre couples de barres.
- d Les tubes d'auscultation sonique, les tubes d'injection, etc. sont généralement fixés le long des armatures longitudinales de façon à ne pas nuire au bétonnage.
- e Le panier dont est munie la base de la cage d'armature est conçu pour ne pas gêner le fonctionnement de la colonne de bétonnage :
  - les barres n'occupent pas le centre, afin de laisser la place libre au tube plongeur et à l'écoulement du béton ;

- certaines barres longitudinales seulement sont repliées en panier, de façon que la distance entre nu des barres du panier respecte la valeur minimale prévue entre barres verticales (10 cm, au moins comme expliqué ci-dessus) .



f En plus de la réalisation d'un panier à la base de la cage d'armature, les moyens de lutte contre la remontée de la cage sont :

- une diminution du diamètre extérieur de la cage, mais cela entraîne une augmentation de la section des barres verticales pour les pieux fléchis ;
- des raccourcissements plus fréquents de la colonne de bétonnage ;
- une amélioration de l'ouvrabilité du béton : granulométrie ; dosage en ciment ; température du ciment et des granulats ; emploi de plastifiant, retardateur, etc.

#### 4.2.2.1.4 Assemblage des cages d'armature

Lorsque la cage d'armature d'un pieu est constituée de plusieurs tronçons, l'assemblage de ces tronçons doit être effectué, avant ou pendant leur descente dans le tubage en tenant compte de leur recouvrement nécessaire. Le soudage et le pointage au chalumeau sont interdits.

Le soudage et le pointage à l'arc électrique sont admis dans les conditions fixées par la fiche d'identification des aciers utilisés.

- Les longueurs de fourniture d'armatures dépassent rarement 15 mètres. Les cages d'armature de pieux de grande longueur sont donc décomposées en tronçons élémentaires qui sont assemblés sur le chantier lors de la descente du ferrailage dans le forage.
- Dans les cas courants, l'assemblage de deux tronçons de cage d'armature est destiné à permettre la manutention et le bétonnage. Il peut être assuré par points de soudure électrique, serre-câble, ligatures, etc. La continuité des efforts dans le pieu en service n'est pas assurée par cette liaison provisoire de manutention, mais par recouvrement classique des barres sur une longueur au moins égale à la « longueur de scellement droit », la zone de recouvrement étant entourée de cerces ou frettes dimensionnées pour équilibrer les efforts tendant à faire éclater le béton.
- Il existe des cas exceptionnels, notamment de pieux travaillant à l'arrachement, où la liaison entre tronçons de cage d'armature doit résister à une traction sensiblement égale à celle que permet la section d'acier. Le concepteur prévoit alors une jonction barre à barre entre les tronçons de cage, par soudure électrique, manchonnage, etc. et l'entrepreneur justifie que les dispositifs qu'il réalise résistent effectivement aux efforts de traction fixés dans la note de calcul.

#### 4.2.2.1.5 Epaisseur d'enrobage des armatures par le béton

L'épaisseur du béton qui enrobe les armatures doit être au moins égale à 4 cm.

Des centreurs sont disposés sur l'armature. Les centreurs métalliques sont autorisés.

Les centreurs qui se trouvent à l'intérieur du tubage sont en principe maintenus isolés du terrain par le béton au fur et à mesure de l'extraction du tubage : ils risquent peu de se corroder et peuvent donc être métalliques.

Par contre, les centreurs installés à des niveaux où le forage n'aurait pas reçu de tubage provisoire ne peuvent être métalliques.

#### 4.2.2.2 Bétons

##### 4.2.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

##### 4.2.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

##### 4.2.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique.

On tient compte des modifications de temps de prise et des pertes de résistance du béton dues à l'agressivité éventuelle du terrain ou de l'eau de la nappe (présence de matières organiques, d'eau chargée en sels, de substances chimiques, de gaz, etc.).

##### 4.2.2.2.4

Le diamètre maximal des granulats est 25 mm.

##### 4.2.2.2.5

L'ouvrabilité du béton au moment du bétonnage est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement mesuré est au moins de 14 cm et le plus souvent de 18 cm.

Le rapport E/C doit être inférieur à 0,6.

Une ouvrabilité suffisante étant difficile à obtenir lorsque le dosage en ciment est inférieur à 400 kg/m<sup>3</sup>, l'entrepreneur justifie la composition du béton par des essais dans ce cas.

Les commandes de béton aux centrales sont faites en spécifiant la fourchette d'affaissement du béton à son arrivée sur le chantier.

Le rajout d'eau dans les camions malaxeurs sur chantier, même suivi d'un malaxage de longue durée, est dangereux et doit demeurer l'exception.

Lorsqu'on prévoit un bétonnage difficile, il est conseillé d'utiliser un retardateur.

#### 4.2.3 Mise en oeuvre

##### 4.2.3.1

La base du tubage est toujours située au-dessous du fond du forage. Pendant le forage, la garde de sol et d'eau à l'intérieur du tubage, compte tenu de l'aspiration de l'outil, doit permettre d'obtenir une surpression à la base du tubage.

Le respect de ces conditions pendant la perforation est important principalement en présence de sols sableux et

limoneux, et lorsque le forage traverse des nappes, afin de réduire la pénétration du terrain dans le tubage et d'éviter ainsi au maximum la décompression du sol autour du pieu.  
Il existe cependant des cas exceptionnels, indiqués au commentaire du paragraphe 4,2111 où on admet certains écarts par rapport aux règles générales.

Le forage d'un pieu dont l'axe est situé à moins de trois fois son diamètre du nu d'un pieu voisin ne peut commencer avant la prise du béton de ce dernier.

#### 4.2.3.2

Le forage est curé moins de 2 h avant le début du bétonnage, sauf précautions spéciales contre la décantation.

Sur chaque chantier, on définit le temps principal qui doit s'écouler entre la fin du curage du forage et le début du bétonnage, temps correspondant sensiblement à la durée de descente de la cage d'armature. Si ce temps est supérieur à 2 heures, on prend des précautions spéciales contre la décantation (une précaution classique consiste à remplacer l'eau des 3 mètres inférieurs du forage par une boue thixotropique neuve).

Cette règle interdit notamment de curer le soir en vue d'un bétonnage le lendemain matin sans nouveau curage.

#### 4.2.3.3

Le niveau de l'eau dans le forage pendant le bétonnage doit être en permanence supérieur au niveau statique le plus élevé des nappes traversées.

Dans le cas particulier où le fonçage du tubage isole les horizons aquifères suspendus, on peut éviter de remplir le tubage d'eau mais on ne peut commencer à extraire ce tubage (sauf quelques décimètres pour le décollage) que lorsque la charge de béton équilibre la pression des nappes.

#### 4.2.3.4

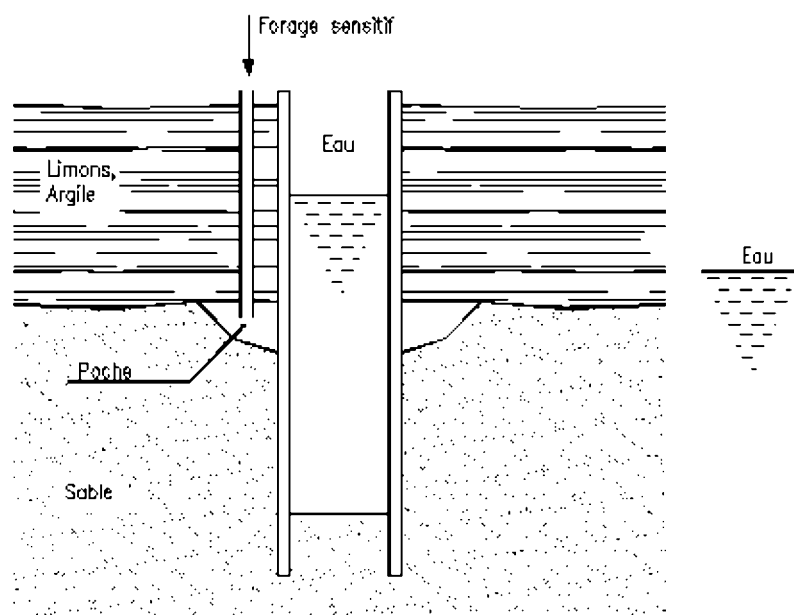
Si le forage traverse une couche pulvérulente immergée, on vérifie qu'il n'y a pas eu création de poches autour du tubage. Pour cela, contre les 3 premiers pieux du chantier, on effectue un forage sensitif de petit diamètre débouchant dans la couche dangereuse.

Les forages sensitifs ne sont indispensables que lorsque la couche pulvérulente totalement immergée est surmontée par une couche cohérente.

Les forages sensitifs ont un double rôle :

- en premier lieu, détecter les poches par observation des chutes d'outil ;
- en deuxième lieu, permettre à l'eau de s'échapper sans délayer le béton.

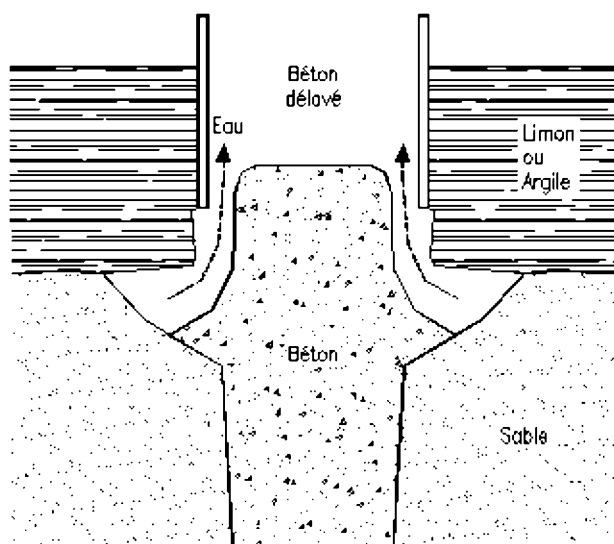
En conséquence, les forages sensitifs sont exécutés après le forage du pieu et avant le bétonnage, à proximité immédiate du tubage en place (quelques décimètres) .



En l'absence de forages sensitifs, le phénomène suivant se produit : lors de l'extraction du tubage rempli de béton, ce dernier prend très rapidement sa place dans la poche et met l'eau en pression, car la perméabilité des sables, surtout des sables fins, n'est pas assez grande pour une évacuation très rapide de l'eau.

On voit alors l'eau s'écouler, pendant un certain temps, soit à la périphérie du béton, soit même, si les pieux sont armés, le long des barres longitudinales en formant de petits geysers.

Une partie du béton est délavée .



Lorsque le phénomène de la poche a été détecté dans les premiers pieux, des dispositions spéciales sont prises pour la perforation et le bétonnage des pieux suivants.

La méthode la plus sûre pour éviter la création de poches consiste à vibrofoncer un tube d'une seule longueur jusqu'à atteindre une couche non pulvérulente et de procéder ensuite au vidage de ce tube ; cette méthode n'est pas toujours possible.

#### 4.2.3.5

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase, est :

- 0,3 ( $z + 1$ ) m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur  $z$  (m), sous la plate-forme de travail, inférieure à 5 m ;
- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage. La hauteur limite fixée à l'article 4,235 est celle qui intervient à l'article 9 du CCS.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans des terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations), la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut être telle qu'elle provoque une striction du béton avec son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

#### 4.2.3.6 Bétonnage

##### 4.2.3.6.1

Si l'absence d'eau en fond de forage a été constatée, le forage peut être bétonné avec une colonne partielle.

Pour les pieux tubés jusqu'au fond, non armés et de diamètre inférieur à 1,20 m, on peut se passer de toute colonne, même partielle, après avoir vérifié que le fond du forage est sec, immédiatement avant bétonnage.

En effet, avec les bétons très plastiques utilisés, la ségrégation n'est pas à craindre.

##### 4.2.3.6.2

S'il y a de l'eau dans le forage, on doit utiliser une colonne de bétonnage.

La colonne de bétonnage est un tubage métallique constitué de plusieurs éléments et surmonté d'un entonnoir ou goulotte. Les joints entre éléments sont étanches. Le diamètre intérieur de la colonne est au moins égal à 15 cm.

La colonne de bétonnage a la longueur totale du pieu. Avant bétonnage, on touche le fond puis on relève de 15 cm au plus. Après l'amorçage (premier versement du béton dans la goulotte), qui doit être fait en évitant le délavage du béton par interposition d'un bouchon, le pied de la colonne de bétonnage ne doit jamais se trouver à moins de 2 m sous le niveau atteint par le béton frais dans le pieu.

Lors de l'amorçage de la colonne, il convient d'éviter :

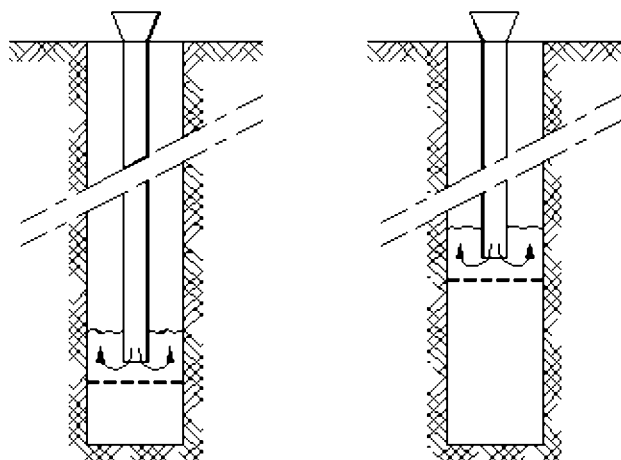
- le déversement direct du béton ;
- l'utilisation d'une boule de papier ;
- l'enlèvement de l'obturateur (pelle le plus souvent) avant qu'un dôme suffisant se soit formé dans l'entonnoir.

Au cours du bétonnage, si le béton descend dans le tube plongeur au-dessous de l'entonnoir, il y a lieu de prévoir un réapprovisionnement assez lent pour éviter la formation d'une poche d'air.

Le raccourcissement du tube plongeur n'est fait qu'après avoir mesuré le niveau de la surface du béton, et s'être assuré d'une garde minimale de 2 m.

On n'utilise que des colonnes de bétonnage parfaitement nettoyées.



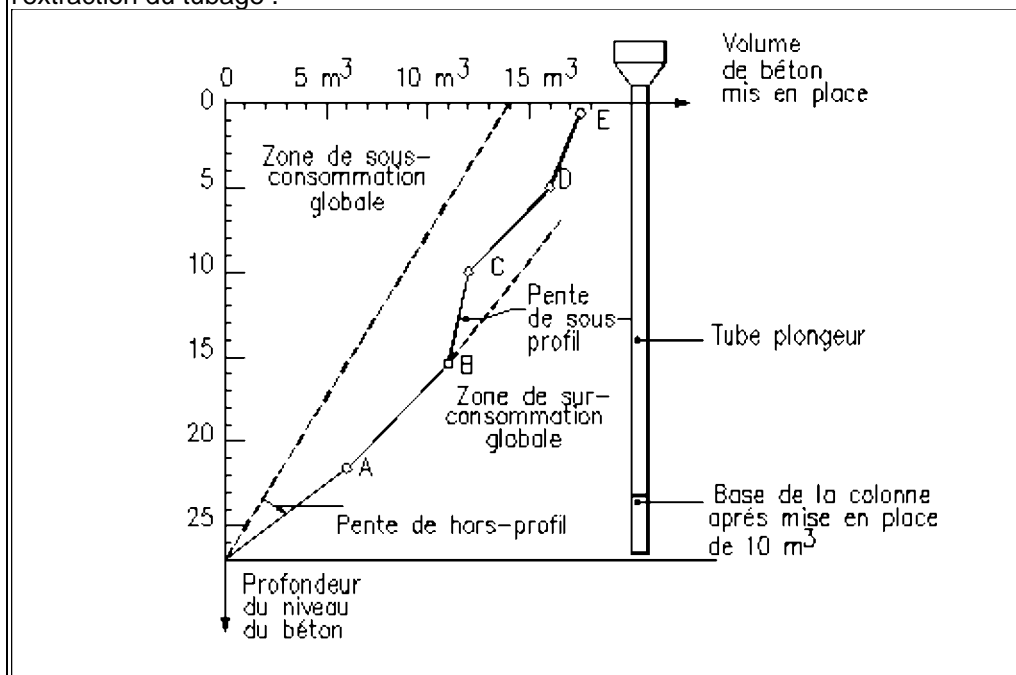


#### 4.2.3.7

Une courbe de bétonnage est établie pour chaque pieu ou barrette, toupie par toupie. Si ces courbes de bétonnage comportent moins de 5 points, on établit, pour 1 pieu sur 50, une courbe de bétonnage ayant au moins 5 points régulièrement répartis sur la longueur du pieu. Si les consommations de béton sont anormales (sous profils ou plus de 30 % de hors profils), on prend des dispositions spéciales.

La première courbe de bétonnage détaillée (5 points au moins) est établie sur l'un des dix premiers pieux de chaque série de 50.

La « courbe de bétonnage » comporte les indications de la baisse de la surface du béton au fur et à mesure de l'extraction du tubage.



Pour permettre de tracer la courbe de bétonnage, le chef foreur mesure régulièrement, au cours de chaque palier d'extraction du tubage :

- la hauteur de la tête du tubage au-dessus du sol ;

- le niveau du béton par rapport à la tête du tubage.

Il note, d'autre part, les quantités de béton mises en place et les démontages partiels du tubage.  
La courbe de bétonnage est tracée par le responsable du chantier à son premier passage et trois jours au plus après l'exécution du pieu. Cette courbe est tenue, sur le chantier, à la disposition du maître d'oeuvre et des contrôleurs.

#### 4.2.3.8

Base élargie : dans les sols suffisamment cohérents (résistance à la compression simple  $R_c > 0,2$  MPa), les pieux verticaux peuvent être munis d'une base élargie par alésage du forage. La section de la base élargie ne doit pas toutefois être supérieure à 3 fois la section du pieu.

La base élargie a une forme tronconique dont la hauteur est au moins égale au diamètre du fût du pieu. Dans ce cas, le tubage est arrêté à la partie haute de l'élargissement.

### 4.2.4 Contraintes admissibles

#### 4.2.4.1

Se reporter à l'article 1,32

#### 4.2.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

##### 4.2.4.2.1

Si les pieux ne sont pas armés :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesures d'impédance mécanique de 1 pieu sur 3,

ou bien

- carottage mécanique de 1 pieu sur 50, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesures d'impédance mécanique de 1 pieu sur 6.

Si l'élancement des pieux dépasse 20, l'impédance mécanique n'est pas très fiable, et le carottage mécanique risque de sortir du pieu latéralement avant d'atteindre sa pointe. Dans ce cas, on peut être conduit à armer les pieux pour pouvoir y installer des tubes pour mesures soniques par transparence. On peut aussi procéder à des mesures soniques avec récepteur dans un forage latéral (essai par microsismique transparence MST).

##### 4.2.4.2.2

Si les pieux sont armés, quelques-uns doivent être munis de tubes permettant les mesures soniques par transparence.

Le nombre de tubes par pieu est :

- 2 tubes pour les pieux  $\varphi \leq 60$  cm ;
- 3 tubes pour les pieux  $\varphi \leq 120$  cm et  $> 60$  cm
- 4 tubes pour les pieux  $\varphi > 120$  cm.

Le nombre minimal de pieux qui doivent faire l'objet d'essais est :

- 1 pieu sur 8 par transparence

ou

- 1 pieu sur 10 par transparence et

1 pieu sur 8 par impédance.

## 4.3 Foré boue

### 4.3.1 Caractéristiques

#### 4.3.1.1

Un forage est exécuté dans le sol par des moyens mécaniques (tarière, benne, etc,...) sous protection d'une boue de forage.

La section du forage est circulaire (pieux) ou de forme quelconque, (barrettes). Le diamètre du pieu (largeur dans le cas d'une barrette) est celui de l'outil de forage.

Il s'agit souvent de fondations de section importante, donc de capacité portante élevée. Des profondeurs d'une cinquantaine de mètres ont été atteintes dans certains cas.

Il convient de vérifier que la section de l'outil, en cours de travaux, reste au moins égale à la section nominale.

#### 4.3.1.2

Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité, sous la boue, en utilisant une colonne de bétonnage.

Le bétonnage est exécuté avec une colonne selon la technique du tube plongeur.

### 4.3.2 Dispositions constructives

#### 4.3.2.1 Armatures

##### 4.3.2.1.1 Pieux ne subissant que des compressions

Les pieux peuvent ne pas être armés si les efforts provenant de la construction ou du sol traversé ne produisent que des compressions centrées sur l'axe théorique du pieu.

Lorsque les pieux ne comportent pas de cages d'armature, on peut disposer des barres d'attente piquées dans le béton frais. Si la nature du sol ne permet pas de réaliser une tête de pieu cylindrique, de façon à pouvoir situer son axe, les barres d'attente sont indispensables. Elles sont mises en place en repérant l'axe de la virole à sa sortie du béton et comprennent 4 barres de 2 m de longueur d'un diamètre minimal de 12 mm, disposées aux sommets d'un carré dont le centre est l'axe du pieu et le côté est égal à 0,5 fois le diamètre du pieu.

Les barres doivent pouvoir dépasser la cote de recépage de 0,75 m environ.

##### 4.3.2.1.2

Les pieux susceptibles d'être soumis à des efforts de flexion, les pieux inclinés et les pieux travaillant en traction doivent être armés sur toute leur longueur.

La cage d'armature est prévue sur toute la longueur des pieux pour maintenir son positionnement correct lors du bétonnage.

Compte tenu des longueurs importantes que peut atteindre ce type de pieu, les spécifications particulières peuvent déroger aux conditions de section minimale d'acier du paragraphe 4,321.3 en partie profonde lorsque les contraintes de calcul le permettent. Dans ce cas, l'entrepreneur justifie les dispositions qu'il propose comme étant suffisantes pour assurer le positionnement correct de la cage et empêcher sa remontée au bétonnage.

##### 4.3.2.1.3 Cages d'armature

Les cages d'armature des pieux sont constituées par des barres longitudinales en acier disposées suivant les génératrices d'un cylindre autour desquelles sont enroulées et fixées rigidement des cerces ou hélices. La longueur des cages d'armature doit permettre une liaison correcte avec la structure conformément aux données du projet.

Le nombre minimal de barres est cinq et leur diamètre ne descend pas au-dessous de 12 mm. La section totale de ces barres est au moins égale à :

- 0,5 % de la section nominale  $A$  si  $A < 0,5 \text{ m}^2$  -  $25 \text{ cm}^2$  si  $0,5 \text{ m}^2 \leq A \leq 1 \text{ m}^2$
- 0,25 % de la section nominale  $A$  si  $A > 1 \text{ m}^2$

L'écartement des cerces ou le pas des spires n'est pas supérieur à 35 cm.

Le diamètre extérieur de la cage d'armature doit être supérieur à 1,25 fois le diamètre extérieur de la colonne de bétonnage.

La distance minimale de nu à nu des barres est 10 cm. La cage d'armature est munie d'un panier pour éviter sa remontée pendant la mise en oeuvre.

Pour des barrettes ces dispositions de principe s'appliquent à la section près, les cerces ou hélices étant remplacées par des cadres. En outre, la rigidité de la cage lors des manutentions doit être assurée par adjonction de barres obliques.

- Compte tenu de leur rôle respectif, les armatures longitudinales sont généralement des aciers haute adhérence alors que les armatures transversales sont des ronds lisses en acier doux, sauf problème particulier de dimensionnement à l'effort tranchant. Le diamètre des armatures transversales est fonction de celui des armatures longitudinales que l'on choisit normalement entre 8 et 16 mm. Le diamètre des armatures longitudinales est le plus couramment compris entre 16 et 32 mm.
- Dans une armature à section droite circulaire, on répartit les barres longitudinales régulièrement le long de la circonférence, même si les moments fléchissants ont une direction privilégiée : on évite ainsi une mauvaise position des barres longitudinales au cas où se produirait un vrillage de la cage au moment de sa confection, de sa mise en place ou pendant le bétonnage.  
Dans le cas des pieux sollicités en flexion, la cage peut ne pas avoir la même composition du haut jusqu'en bas : le nombre de barres, ou leurs diamètres, peuvent varier le long du pieu en fonction des sollicitations prévues. Il est fréquent, notamment, que les tronçons inférieurs d'une cage soient seulement conçus pour s'opposer à sa remontée au cours du bétonnage ; pour des sections circulaires, ces tronçons comportent au minimum trois barres, d'une section totale au moins égale à  $5 \text{ cm}^2$ , avec une cerce par mètre sans spire.
- Au droit de la jonction entre deux tronçons de cage d'armature, où le nombre de barres longitudinales est double, la distance minimale de nu à nu des couples de barres est de 10 centimètres dans le cas général. Si cette distance n'est pas respectée, on étudie spécialement la granulométrie et l'ouvrabilité du béton, ainsi que la durée du bétonnage, afin que les aciers soient correctement enrobés malgré la faible distance entre couples de barres.
- Les tubes d'auscultation sonique, les tubes d'injection, etc. sont généralement fixés le long des armatures longitudinales, de façon à ne pas nuire au bétonnage.
- Le panier dont est munie la base de la cage d'armature est conçu pour ne pas gêner le fonctionnement de la colonne de bétonnage :
  - les barres n'occupent pas le centre, afin de laisser la place libre au tube plongeur et à l'écoulement du béton ;
  - certaines barres longitudinales seulement sont repliées en panier, de façon que la distance entre nu des barres du panier respecte la valeur minimale prévue entre barres verticales.
- En plus de la réalisation d'un panier à la base de la cage d'armature, on peut s'opposer à la remontée de la cage par :
  - une diminution du diamètre extérieur de la cage, mais cela entraîne une augmentation de la section des barres verticales pour les pieux fléchis ;
  - des raccourcissements plus fréquents de la colonne de bétonnage ;
  - une amélioration de l'ouvrabilité du béton : granulométrie, dosage en ciment, température du ciment et des granulats, emploi de plastifiant, retardateur, etc.

#### 4.3.2.1.4 Assemblage des cages d'armature

Lorsque la cage d'armature d'un pieu ou barrette est constituée de plusieurs tronçons, l'assemblage de ces tronçons doit être effectué, avant ou pendant leur descente dans le forage, en tenant compte de leur recouvrement nécessaire.

Le soudage et le pointage au chalumeau sont interdits. Le soudage et le pointage à l'arc électrique sont admis dans les conditions fixées par la fiche d'identification des aciers utilisés.

- a Les longueurs maximales de fourniture d'armature dépassent rarement 15 m. Les cages d'armature des pieux de grande longueur sont donc décomposés en tronçons élémentaires qui sont assemblés sur le chantier lors de la descente du ferrailage dans le forage.
- b Dans les cas courants, l'assemblage de deux tronçons de cage d'armature est destiné à permettre la manutention et le bétonnage. Il peut être assuré par points de soudure électrique, serre-câble, ligatures, etc. La continuité des efforts dans le pieu en service n'est pas assurée par cette liaison provisoire de manutention, mais par recouvrement classique des barres sur une longueur au moins égale à la « longueur de scellement droit », majorée de 50 % pour tenir compte des conditions de bétonnage sous la boue, la zone de recouvrement étant entourée de cerces ou frettes dimensionnées pour équilibrer les efforts tendant à faire éclater le béton.
- c Il existe des cas exceptionnels, notamment de pieux travaillant à l'arrachement, où la liaison entre tronçons de cage d'armature doit résister à une traction sensiblement égale à celle que permet la section d'acier. Le concepteur prévoit alors une jonction barre à barre entre les tronçons de cage, par soudures électriques, manchonnage, etc. et l'entrepreneur justifie que les dispositifs qu'il réalise résistent effectivement aux efforts de traction fixés dans la note de calcul.

#### 4.3.2.1.5

L'enrobage des armatures par le béton doit être de 7 cm au moins. Les centreurs, en nombre suffisant, doivent présenter une résistance à la corrosion au moins égale à celle du béton du pieu.

Les centreurs galets ou patins assurant l'enrobage sont susceptibles de venir en contact avec le terrain et ne peuvent donc être métalliques par suite du risque de corrosion. Ces centreurs ont généralement plus de 8 cm de largeur. Ils sont habituellement en béton et comportent des dispositifs de fixation sur la cage d'armature.

Pour les pieux, on place généralement des centreurs approximativement tous les 3 m à raison d'au moins 3 centreurs par niveau. Pour les barrettes, on adopte une densité d'environ 1 centreur pour 4 m<sup>2</sup> de surface latérale.

### 4.3.2.2 Bétons

#### 4.3.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

La composition du béton est étudiée en tenant compte des conditions particulières de sa mise en oeuvre.

#### 4.3.2.2.2

Le dosage minimal du béton est 350 kg de ciment par m<sup>3</sup>.

#### 4.3.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique mais on minimise alors le frottement latéral du sol sur la partie chemisée.

#### 4.3.2.2.4

Le diamètre maximal des granulats est la plus petite des dimensions suivantes :

- le quart de la maille de la cage d'armature ;
- la moitié de l'enrobage des armatures ;
- le quart du diamètre intérieur de la colonne.

#### 4.3.2.2.5

L'ouvrabilité du béton au moment du bétonnage est mesurée avec un appareil adéquat. L'affaissement mesuré est au moins de 14 cm et le plus souvent 18 cm.

Le rapport E/C doit être inférieur à 0,6.

Une ouvrabilité suffisante étant difficile à obtenir lorsque le dosage en ciment est inférieur à 400 kg/m<sup>3</sup>, l'entrepreneur justifie la composition du béton par des essais dans ce cas.

Les commandes de béton aux centrales sont faites en spécifiant l'ouvrabilité (la fourchette d'affaissement au cône à l'arrivée du béton au chantier).

Du fait des conditions de bétonnage sous la boue, l'ouvrabilité joue un rôle très important.

Le rajout d'eau dans les camions malaxeurs sur chantier même suivi d'un malaxage de longue durée est dangereux et doit demeurer l'exception.

Lorsque les conditions l'exigent, il est conseillé d'utiliser un retardateur.

#### 4.3.2.3

La partie supérieure du fût du pieu peut être constituée par un ou plusieurs éléments préfabriqués. L'entrepreneur justifie alors :

- le scellement de l'élément dans le sol portant par un coulis un mortier ou plusieurs éléments préfabriqués ;
- le remplissage latéral du forage inoccupé par l'élément.

Ces éléments préfabriqués sont généralement constitués par des éléments en béton ou des profilés métalliques. Ces éléments peuvent être soumis aux prescriptions du chapitre 2 « Pieux façonnés à l'avance » dans la mesure où ces prescriptions restent applicables.

### 4.3.3 Mise en oeuvre

#### 4.3.3.1

Le niveau de la boue dans le forage et, par conséquent, le niveau de la plate-forme de travail à partir de laquelle sont exécutés les pieux, est toujours situé au moins 1,00 m au-dessus du niveau statique (effectif ou rabattu) le plus élevé des nappes traversées ou approchées par le forage au cours de son exécution.

Les niveaux de nappe jouent un rôle important dans le soutènement sous boue. Des fluctuations rapides de ce niveau peuvent donner lieu à des difficultés de tenue des parois, c'est pourquoi le dossier de reconnaissance donne tous les renseignements concernant les nappes et leurs variations éventuelles pendant les travaux.

#### 4.3.3.2 Boue de forage

##### 4.3.3.2.1

La boue de forage se compose d'eau, de bentonite, et éventuellement d'argile, de ciment et d'additifs. Dans des cas spéciaux, la bentonite peut être remplacée par des biopolymères. La boue doit être adaptée au maintien de la stabilité des parois du forage pendant son exécution et jusqu'à la fin du bétonnage et permettre un bétonnage correct.

- a La boue doit être adaptée aux caractéristiques physico-chimiques des terrains et des nappes.  
Généralement, une boue de forage s'obtient par dispersion de 20 à 50 kg de bentonite, selon sa qualité, par mètre cube d'eau.  
Elle peut comporter certains adjuvants qui ont pour but de l'alourdir, d'améliorer son pouvoir colmatant, d'accroître sa viscosité ou, au contraire, de la réduire par fluidification, de s'opposer à sa contamination par le ciment ou le gypse, d'abaisser son pH ou de l'augmenter, de diminuer son filtrat, etc.  
Dans les formations salines, on utilise parfois des argiles spéciales type attapulgite, sépiolite qui, contrairement aux bentonites, ne flocculent pas dans l'eau salée.
- b La boue de forage est préparée sur le chantier dans une station qui comprend :
  - une unité de fabrication assurant la dispersion de la bentonite en poudre dans l'eau ;
  - un ou plusieurs bassins ou silos de stockage permettant au chantier de disposer d'une réserve suffisante pour parer à un incident de forage ;
  - une unité de régénération assurant la séparation des gros sédiments par tamisage et du sable par

centrifugation. Sur de petits chantiers où l'on travaille en « boue partiellement perdue », cette unité de régénération peut ne comporter que des moyens sommaires de tamisage.

- c Avec les tarières et les bennes preneuses, on opère généralement en boue statique, c'est-à-dire que la boue est déversée dans le forage en proportion de l'avancement de l'outil, de façon à maintenir un niveau correct. La boue est ensuite récupérée par pompage en cours de bétonnage au fur et à mesure de la remontée du béton.

#### 4.3.3.2.2

Les paramètres caractéristiques d'une boue sont :

- la densité ;

La densité se mesure généralement avec une balance de densité (balance BAROID par exemple).

- la viscosité au cône de Marsh (base 1 litre) ;

La viscosité s'exprime par le nombre de secondes nécessaires à l'écoulement de la boue contenue dans un entonnoir normalisé à ajutage de 4,75 mm pour effectuer le remplissage d'un récipient d'une capacité de 1 litre.

- la teneur en sable ;

On appelle « sable » ce qui ne passe pas au tamis de 80  $\mu\text{m}$ . La teneur en sable se mesure à l'élutriomètre.

- le filtrat ;
- l'épaisseur du cake.

Les mesures du filtrat et cake s'effectuent généralement à l'aide du filtre presse BAROID en retenant les résultats obtenus à 30 minutes sous 0,7 MPa.

#### 4.3.3.2.3

Une boue neuve avant toute utilisation doit avoir les caractéristiques suivantes :

- densité comprise entre 1,01 et 1,05 (sauf cas particulier d'une boue alourdie ou d'une boue d'argile) ;
- viscosité Marsh supérieure à 35 secondes ;
- teneur en sable nulle ;
- filtrat inférieur à 30  $\text{cm}^3$  ;
- cake inférieur à 3 mm.

Il s'agit de caractéristiques moyennes qui peuvent donner lieu à certaines dérogations en fonction de situations particulières.

#### 4.3.3.2.4

La boue récupérée en cours d'excavation peut être réutilisée après traitements appropriés. Ces traitements doivent donner à la boue les caractéristiques suivantes :

- densité inférieure à 1,20 (sauf boue alourdie) ;
- viscosité Marsh comprise entre 35 et 90 secondes ;
- teneur en sable. Il est difficile de fixer une valeur rigoureuse car elle est conditionnée par la nature des terrains excavés, notamment leur teneur en éléments fins. En général, on s'efforce de maintenir une valeur de l'ordre de 5 %. Des valeurs supérieures peuvent être tolérées sur justification vis-à-vis de la décantation ;
- filtrat inférieur à 40  $\text{cm}^3$  ;
- cake inférieur à 5 mm.

La boue est polluée en cours d'excavation par les éléments fins du terrain (sables, limons et argiles) qui agissent par contamination physique en augmentant la teneur en eau libre et la viscosité de la boue. La régénération correspondante par séparation mécanique (tamisage et centrifugation) peut être complétée par addition de

certaines adjuvants tels :

- les colloïdes organiques (alginates, CMC, amidon, etc.), pour augmenter la viscosité ;
- les tanins, polyphosphates et lignosulfonates, pour réduire la viscosité.

•

Dans certains cas, on peut en outre observer une contamination chimique susceptible de nécessiter des traitements particuliers, par exemple la contamination par le chlorure de sodium, le gypse ou l'anhydrite nécessitant l'addition de phosphates, de tanins ou de CMC.

Une contamination systématique inhérente au procédé est la contamination par le ciment que l'on traite souvent préventivement par addition de bicarbonate de soude.

#### 4.3.3.2.5

L'entrepreneur doit disposer sur le chantier d'un laboratoire où les paramètres de la boue peuvent être mesurés à tout instant, ainsi qu'un matériel de prélèvement de la boue dans l'excavation.

Ce laboratoire ne comporte que du matériel simple qui peut être mis en oeuvre par le personnel d'exécution. Les résultats des essais sont consignés sur un carnet de laboratoire qui sera tenu sur le chantier à la disposition du maître d'oeuvre et des contrôleurs.

#### 4.3.3.2.6

Les caractéristiques de la boue en fond de forage sont mesurées après curage de chaque pieu et notées sur les rapports d'essai d'information.

Ces caractéristiques doivent être celles au moins indiquées au 4,332.4.

Cette vérification est particulièrement importante lorsque le forage est exécuté sous boue statique, car la boue se charge progressivement en sédiments au cours de l'excavation. Une boue trop chargée de sédiments peut ne pas être correctement déplacée lors du bétonnage, d'où le risque de ne pas assurer à la base un contact satisfaisant pieu-terrain.

#### 4.3.3.3

Le forage d'un pieu dont l'axe est situé à moins de 3 diamètres du nu d'un pieu voisin ne peut être exécuté qu'après la prise du béton de ce dernier.

#### 4.3.3.4

L'utilisation d'une virole en tête est obligatoire pour prévenir l'éboulement du forage en tête. L'extraction de la virole après bétonnage doit pouvoir se faire sans variation brusque du niveau du béton.

Dans le cas de barrettes, on doit délimiter et protéger la partie supérieure de l'excavation par des murettes-guides ou dispositif équivalent (coffrages métalliques récupérés par exemple) sur une profondeur au moins égale à 80 cm.

La hauteur des dispositifs de protection de tête (viroles, murettes guides, etc.) est adaptée à la nature des terrains. En général, une hauteur de 80 cm est suffisante.

L'extraction brutale de la virole, surtout si le béton a commencé à faire sa prise, peut donner lieu à une striction du pieu.

#### 4.3.3.5 Bétonnage

##### 4.3.3.5.1

Le forage est curé moins de 3 heures avant le début du bétonnage, et les caractéristiques de la boue sont contrôlées. Si l'équipement du forage conduit à une durée supérieure, un prélèvement de boue en fond du forage doit être effectué à l'issue de l'équipement. Si les caractéristiques de la boue sont correctes, le bétonnage peut être entrepris. Sinon, on doit procéder à un recyclage complémentaire jusqu'à obtention de caractéristiques correctes.

Le curage du fond qui consiste à éliminer les déblais situés au fond du forage est indispensable pour obtenir un bon



contact du pieu avec le terrain.

Pour les pieux et barrettes exécutés sous boue statique, ce curage s'accompagne généralement d'un recyclage avec une boue neuve ou traitée sous circulation forcée par pompage.

Le délai de 3 heures interdit de curer le soir pour un bétonnage le lendemain matin.

#### 4.3.3.5.2 Colonne de bétonnage

La mise en oeuvre du béton se fait au moyen d'une colonne de bétonnage. Cette colonne est un tube métallique constitué de plusieurs éléments et surmonté d'un entonnoir ou goulotte. Les joints entre éléments sont étanches. Le diamètre intérieur de la colonne est au moins égal à 4 fois le diamètre des agrégats du béton qu'elle sert à mettre en oeuvre et n'est jamais inférieur à 15 cm. Son diamètre extérieur doit être inférieur à la moitié du diamètre nominal du pieu.

La colonne de bétonnage a la longueur totale du pieu. Avant bétonnage, on touche le fond puis on relève de 15 cm au plus. L'amorçage (1<sup>er</sup> versement de béton) doit être fait en évitant la contamination du béton par la boue contenue dans la colonne à l'aide d'un bouchon provisoire poussé par le béton. Après l'amorçage, le pied de la colonne de bétonnage ne doit jamais se trouver à moins de 3 m sous le niveau atteint par le béton frais dans le pieu.

Lors de l'amorçage de la colonne de bétonnage, sont proscrits :

- le déversement direct du béton ;
- l'utilisation d'une boule de papier ;
- l'enlèvement de l'obturateur (pelle le plus souvent) avant qu'un dôme suffisant se soit formé dans l'entonnoir.

Au cours du bétonnage, si le béton descend dans le tube plongeur au-dessous de l'entonnoir, il y a lieu de prévoir un réapprovisionnement assez lent pour éviter la formation d'une poche d'air.

Le raccourcissement du tube plongeur n'est fait qu'après avoir mesuré le niveau de la surface du béton en s'assurant que la garde de 3 m subsiste.

On n'utilise que des colonnes de bétonnage correctement nettoyées.

#### 4.3.3.5.3

Une courbe de bétonnage est établie pour chaque pieu ou barrette, toupie par toupie. Si ces courbes de bétonnage comportent moins de 5 points, on établit pour 1 pieu sur 50 une courbe de bétonnage ayant au moins 5 points régulièrement répartis sur la longueur du pieu. Si les consommations de béton sont anormales (sous profils ou plus de 30 % de hors profils), on prend des dispositions spéciales.

#### 4.3.3.6 Base élargie

Dans les sols suffisamment cohérents (résistance à la compression simple  $R_c > 0,2$  MPa).

Les pieux verticaux peuvent être munis d'une base élargie par alésage du forage. La section de la base élargie ne doit pas être toutefois supérieure à 3 fois la section du pieu.

La base élargie a une forme tronconique dont la hauteur est au moins égale au diamètre du fût du pieu.

Le plus souvent, il est plus sûr et plus avantageux de prolonger le pieu à diamètre constant plutôt que de réaliser un élargissement.

En effet, en cas d'élargissement :

- il faut que le terrain soit suffisamment cohérent pour éviter l'éboulement des parois du trou ;
- il est difficile de contrôler un tel éboulement s'il se produit ;
- il est pratiquement impossible d'armer le béton de l'élargissement ;
- le frottement latéral diminue au-dessus de l'élargissement.

#### 4.3.3.7

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase, est :

- 0,3 (z + 1) m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur **z** (mètres), sous la plate-forme de travail, inférieure à 5 m ;

- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage. La hauteur limite fixée à l'article 4,337 est celle qui intervient à l'article 9 du Cahier des Clauses Spéciales.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans des terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations), la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut être telle qu'elle provoque une striction du béton avant son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

### 4.3.4 Contraintes de calcul

#### 4.3.4.1

Se reporter à l'article 1,32

#### 4.3.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

L'exécution et l'interprétation de ces essais sont confiées à un spécialiste agréé par le maître d'oeuvre.
--

##### 4.3.4.2.1

Si les pieux ne sont pas armés :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesures d'impédance mécanique de 1 pieu sur 3.

ou bien

- carottage mécanique de 1 pieu sur 50, avec mesures de la résistance du béton carotté, et mesure d'impédance mécanique de 1 pieu sur 6.

##### 4.3.4.2.2

Si les pieux sont armés, quelques-uns doivent être munis de tubes permettant les mesures soniques par transparence. Le nombre de tubes par pieu est :

- pour les pieux  $\varphi \leq 60$  cm : 2 tubes
- pour les pieux  $\varphi \leq 120$  cm et  $> 60$  cm : 3 tubes
- pour les pieux  $\varphi > 120$  cm. : 4 tubes

Le nombre minimal de pieux qui doivent faire l'objet d'essais est :

- d'un pieu sur 8 par transparence,  
ou
- d'un pieu sur 10 par transparence et un pieu sur 8 par impédance.

##### 4.3.4.2.3

Barrettes armées : quelques-unes doivent être munies sur toute leur longueur de tubes permettant les mesures soniques par transparence. Le nombre de tubes par barrette est tel que, sur chaque face de la barrette, la distance entre tubes est inférieure à 1,50 m :

- une barrette sur 6 doit faire l'objet de mesures par transparence

ou bien

- une barrette sur 8 doit faire l'objet de mesures par transparence et une barrette sur 6 doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

## 4.4 Tarière creuse

### 4.4.1 Caractéristiques

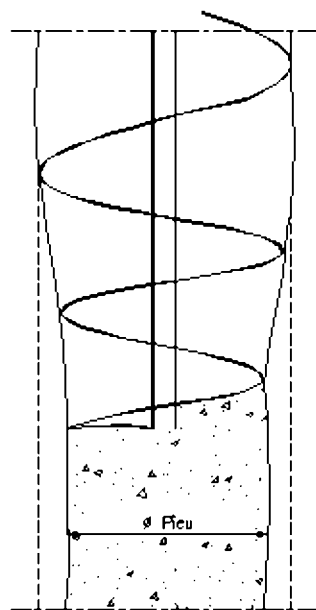
L'emploi des pieux de ce type exige une reconnaissance préalable du sol suffisamment dense afin de bien cerner les variations de niveau de la couche d'ancrage. En effet, il est difficile de contrôler en cours d'exécution la nature des couches traversées. Ces pieux ne peuvent être utilisés en cas de rencontre d'obstacles enterrés (passages durs, béton, grosses maçonneries,...) ou de nécessité de s'ancrer dans le substratum résistant.

#### 4.4.1.1

Une tarière à axe creux, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter, est vissée dans le sol sans extraction notable de terrain. Le diamètre nominal du pieu est le diamètre des pales de la tarière à proximité de la pointe.

La tarière proprement dite est prolongée à sa base par un outil dont le diamètre en terrain cohérent est légèrement supérieur à celui de la tarière. Le diamètre nominal est celui des pales de la tarière et non celui de l'outil de forage. Le sol reste entre les pales de la tarière. Il y est légèrement comprimé.

Si les pales proches de la pointe ont un diamètre réduit du fait de l'usure, on peut craindre une décompression du sol encaissant et donc une réduction du frottement latéral par rapport au frottement estimé .



#### 4.4.1.2

La tarière est extraite du sol sans dévisser pendant que, simultanément, du béton est injecté par l'axe creux de la tarière prenant la place du sol extrait.

#### 4.4.1.3

On distingue deux catégories de matériel :

- a la tarière creuse continue SANS enregistrement spécifique des paramètres de forage et de bétonnage, mais avec visualisation de la pression du béton mesurée au droit du col de cygne ;
- b la tarière creuse continue AVEC enregistrement spécifique des paramètres de forage et de bétonnage (profondeur, pression du béton, quantité de béton), équipée ou non d'un dispositif de bétonnage rétractable.

## 4.4.2 Dispositions constructives

### 4.4.2.1 Aciers

Si les pieux sont armés dans la partie supérieure ou sur toute la hauteur, par l'insertion de cages d'armatures rigides ou de profilés, descendus dans le béton frais, l'entrepreneur apporte la preuve (références et essais de faisabilité) qu'il est en mesure d'atteindre la profondeur voulue, et cela sans déformation des cages et armatures.

### 4.4.2.2 Bétons

#### 4.4.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

#### 4.4.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

#### 4.4.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

#### 4.4.2.2.4

Le béton doit pouvoir être pompé sans difficulté. En conséquence, le béton doit être riche en sable et la granulométrie des granulats limitée.

Le dosage et la composition du béton ont une grande influence sur sa maniabilité. En général, la proportion de sable se situe entre 40 et 50 %, et la dimension maximale des granulats est voisine de 15 mm.

#### 4.4.2.2.5

L'ouvrabilité du béton est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement mesuré doit être compris entre 15 et 22 cm. Une telle gamme d'ouvrabilité peut être obtenue par l'addition d'adjuvants fluidifiants sur chantier ou en centrale, lorsqu'elle est suffisamment proche du chantier.

La condition essentielle est la possibilité de pompage. L'affaissement au cône est le plus souvent proche de 16 cm.

#### 4.4.2.2.6

Lors de l'utilisation de fibres d'acier, l'entrepreneur doit apporter la preuve que les propriétés de celles-ci (résistance, adhérence) et la technique d'incorporation au béton garantissent un matériau homogène, ayant des caractéristiques conformes à celles prises en compte dans les justifications.

## 4.4.3 Mise en oeuvre

### 4.4.3.1

La tarière creuse comporte le minimum d'éléments et au maximum 3.

Une rallonge sans pales d'une longueur maximale de 3 m peut être utilisée en tête.

Les éléments de tarière sont réunis par des raccords étanches. Le risque de déviation est réduit lorsqu'il y a moins de raccords. Il est recommandé d'utiliser un guidage inférieur pour lutter contre les déviations.

#### 4.4.3.2

La partie basse de la tarière est munie d'un système d'obturation ou de lumières de bétonnage.

Si la partie basse de la tarière est munie d'un système d'obturation (bouchon, système de verrouillage) pour éviter l'entrée de sol pendant le vissage, il est interdit de remonter de plus de 10 cm, pour expulser le bouchon ou déverrouiller, sans bétonner.

Si le bouchon ne peut être expulsé, il faut extraire la tarière par dévissage. Le pieu doit être refait.

#### 4.4.3.3

Après l'expulsion du bouchon, ou le déverrouillage des lumières de bétonnage pour les tarières équipées de tels dispositifs, l'alimentation en béton à l'intérieur du pieu doit être ininterrompue pendant l'extraction de la tarière. Pour éviter une striction dans le pieu en cours de réalisation, on arrête impérativement l'extraction de la tarière en cas d'interruption de l'alimentation de béton.

Pour éviter une striction dans le pieu en cours de réalisation, on arrête l'extraction de la tarière si l'alimentation en béton s'interrompt, ou si la pression mesurée au col de cygne descend en-dessous de 20 kPa, sauf au voisinage de la tête du pieu. Dans les sols très mous (vases, tourbes, argiles molles), cette pression peut descendre jusqu'à 10 kPa. On arrête l'opération de bétonnage (pompe et treuil) si la pression mesurée au col de cygne dépasse 150 kPa, de manière à prévenir la formation de *bouchons* dans les conduits ou de désordres dans les pieux voisins. Cette pression maximale peut être réduite dans les sols très mous.

Ces diverses opérations sont avantageusement faites automatiquement.

L'équipe devrait posséder au moins un manomètre de secours en état de fonctionnement.

#### 4.4.3.4

On ne doit pas bétonner deux pieux voisins dont l'entr'axes est inférieur à 1,5 fois la somme des diamètres de ces deux pieux. Toute remontée de béton frais dans un pieu voisin est immédiatement signalée par écrit au Maître d'oeuvre, et les dispositions sont modifiées en conséquence.

Généralement, un pieu dans lequel une remontée de béton frais est constatée, à la suite du bétonnage d'un pieu voisin, est refait.

Le risque de striction existe dans des terrains vaseux si les pieux sont trop voisins et réalisés dans des délais trop proches.

#### 4.4.3.5

La quantité de béton utilisée pour chaque pieu est portée sur les rapports d'essais d'information.

#### 4.4.3.6

La pression dans le béton doit être maintenue tant que la base de la tarière n'atteint pas le niveau théorique de recépage.

A proximité du niveau de la plate-forme de travail, la pression du béton décroît.

#### 4.4.3.7

Sauf dispositions particulières, le bétonnage des pieux est exécuté jusqu'au niveau de la plate-forme de travail.

### 4.4.4 Contraintes de calcul

#### 4.4.4.1

Suivant la catégorie de matériel utilisé, la contrainte maximale en compression uniforme à l'état Limite de service (ELS) est de :

- 5 MPa pour les tarières sans dispositif d'enregistrement,
- 5,5 MPa pour les tarières avec dispositif d'enregistrement.

Des valeurs supérieures à 5,5 MPa peuvent être adoptées pour les tarières qui font l'objet d'un cahier des charges particulier conformément au commentaire de l'article 1,11 du présent DTU.

#### 4.4.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté,

et

- 1 pieu sur 10 doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

L'exécution et l'interprétation de ces essais sont confiées à un spécialiste agréé par le maître d'oeuvre. Si l'élancement des pieux dépasse 20, l'impédance mécanique n'est pas très fiable et le carottage risque de sortir du pieu latéralement avant d'atteindre la pointe.

#### 4.4.4.3

La résistance de pointe et le frottement latéral du sol sont calculés en appliquant le mode de calcul des commentaires du chapitre 11 du présent DTU.

- Les pieux SANS dispositif d'enregistrement (cf. § 4,413 a) sont classés FORE BETON.
- Les pieux AVEC dispositif d'enregistrement (cf. § 4,413 b) sont classés INJECTES FAIBLE PRESSION.

### 4.5 Vissé moulé

#### 4.5.1 Caractéristiques

L'emploi des pieux de ce type exige une reconnaissance préalable du sol suffisamment dense afin de bien cerner les variations de niveau de la couche d'ancrage. En effet, il est difficile de contrôler en cours d'exécution la nature des couches traversées. Ces pieux ne peuvent être utilisés en cas de rencontre d'obstacles enterrés (bancs rocheux, béton, grosses maçonneries).

##### 4.5.1.1

Ce procédé ne s'applique aux sols sableux sans cohésion situés sous la nappe, et qui risqueraient de provoquer des éboulements importants, que si on tient compte d'une réduction de frottement latéral.

Dans certains sols comme l'argile, le trou réalisé par l'outil reste ouvert et la colonne cannelée de commande de l'outil tourne librement ; dans d'autres sols, comme les sables, l'espace annulaire compris entre la colonne cannelée et le forage se remplit du matériau éboulé, entraînant la décompression du terrain et pouvant freiner la rotation de la colonne cannelée.

##### 4.5.1.2

Par rotation et fonçage, on fait pénétrer dans le sol un outil en forme de double vis surmonté d'une colonne cannelée. Cet outil est percé dans l'axe de la colonne cannelée et muni d'un bouchon.

Le bouchon est une pointe perdue en fonte dans le cas général, mais on utilise une pointe en acier s'il y a risque de rencontre de corps durs.

#### 4.5.1.3

Le diamètre nominal du pieu est le plus grand diamètre de l'outil exception faite de la pale hélicoïdale dont il est muni.

#### 4.5.1.4

Au sommet de la colonne est disposé un récipient rempli de béton. L'extraction de l'outil est obtenue en tournant dans le sens inverse à celui de la pénétration. Le béton prend en continu, sous l'effet de la gravité, la place laissée par l'outil.

Pendant l'opération d'extraction, on contrôle en permanence le niveau du béton dans le réservoir qui doit être maintenu suffisamment plein pour éviter le désamorçage de la colonne.

On contrôle et on note également le volume de béton mis en oeuvre pour chaque pieu.

On établit une courbe de bétonnage au minimum sur l'un des 10 premiers pieux de chaque série de 50 pieux.

### 4.5.2 Dispositions constructives

#### 4.5.2.1 Aciers

Ces pieux peuvent comporter des barres d'attente et une barre centrale sur toute la hauteur du pieu.

#### 4.5.2.2 Bétons

##### 4.5.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

##### 4.5.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

##### 4.5.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

##### 4.5.2.2.4

Le diamètre maximal des granulats est 25 mm.

##### 4.5.2.2.5

L'ouvrabilité du béton est mesurée avec un appareil adéquat. Si le cône est utilisé, l'affaissement mesuré doit être supérieur à 14 cm et le plus souvent de 18 cm.

### 4.5.3 Mise en oeuvre

#### 4.5.3.1

Le bouchon de l'outil doit être étanche. Il ne doit pas y avoir d'eau au fond de la colonne au début du bétonnage.

Une vérification visuelle de l'intérieur de la colonne est recommandée avant le début du bétonnage pour contrôler non seulement qu'il n'y a pas d'eau, mais aussi qu'il n'y a pas eu perte de la pointe et entrée de terre.

S'il y a eu entrée d'eau ou de terre, l'outil est extrait par dévissage et le pieu est recommencé après remblaiement. Le pieu est alors descendu plus bas que précédemment.

#### 4.5.3.2

La distance entre axes de deux pieux voisins est au moins égale à 1,5 fois la somme des diamètres de ces deux pieux.

Il est dangereux d'exécuter le même jour deux pieux dont la distance entr'axes est inférieure à 2,5 fois la somme de leurs diamètres.

#### 4.5.3.3

La hauteur limite de recépage, entre le niveau théorique de recépage et l'arase, est :

- 0,3 ( $z + 1$ ) m lorsque le niveau théorique de recépage se situe à une profondeur  $z$  (m), sous la plate-forme de travail, inférieure à 5 m,
- 1,80 m lorsque le niveau théorique de recépage est à plus de 5 m sous la plate-forme de travail.

La hauteur minimale de recépage est fixée par l'entrepreneur de façon que le béton sain soit atteint au niveau théorique de recépage. La hauteur limite fixée à l'article 4,533 est celle qui intervient à l'article 9 du Cahier des Clauses Spéciales.

Lorsque le niveau d'arase est bas dans des terrains mous (facilement liquéfiables par les vibrations dues au battage) la pression du sol sur la partie haute du béton frais peut être telle qu'elle provoque une striction du béton avant son durcissement. Il est alors recommandé de bétonner à une cote supérieure. La hauteur limite de recépage est augmentée d'autant.

### 4.5.4 Contraintes de calcul

#### 4.5.4.1

Se reporter à l'article 1,32

#### 4.5.4.2

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants :

- carottage mécanique de 1 pieu sur 100, avec mesures de la résistance du béton carotté,

et

- 1 pieu sur 10 doit faire l'objet de mesures d'impédance mécanique.

### 4.6 Pieu injecté haute pression

#### 4.6.1 Caractéristiques

Le pieu foré injecté haute pression est un pieu de diamètre supérieur ou égal à 250 mm.

Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection constitué par un ou plusieurs tubes à machettes (TAM).

Lorsque l'armature est un tube métallique, ce tube peut faire office de tube à machettes.

Dans certains cas, pour les pieux utilisés pour les ouvrages à la mer (offshore) notamment, le tube métallique peut être équipé d'une succession de clapets spéciaux indépendants ou de rampes spéciales, qui permettent l'injection.

L'armature peut être également constituée par des profilés (H ou caissons de palplanches).

Le scellement au terrain est effectué par injection sélective haute pression d'un coulis ou d'un mortier à partir d'un obturateur simple ou double.

Dans les sols mous, et pour les petits diamètres ou les grands élancements, ce type de pieu doit être vérifié au flambement.

#### 4.6.2 Dispositions constructives

##### 4.6.2.1

L'entrepreneur doit justifier du bon fonctionnement du système d'injection par des essais sur le premier pieu de l'ouvrage.



#### **4.6.2.2**

Les assemblages, généralement faits par soudage, doivent pouvoir reprendre les efforts de traction. Pour les petits diamètres, les assemblages peuvent être faits par manchons filetés.

#### **4.6.2.3**

Les soudures feront l'objet des contrôles normalisés pour les rabouages et entures.

#### **4.6.2.4**

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique de l'eau, du sol et de la nature des aciers.

#### **4.6.2.5**

Le dosage minimal du coulis de scellement est de 1200 kg de ciment par m<sup>3</sup> de coulis.

#### **4.6.2.6**

Dans le cas d'un scellement au mortier, la résistance à la compression simple de ce mortier doit être au moins égale à celle d'un coulis de ciment de rapport pondéral C/E = 2. L'entrepreneur justifie que le mortier est compatible avec le système de mise en place utilisé.

### **4.6.3 Mise en oeuvre**

#### **4.6.3.1**

Lors de la mise en place par forage, des précautions spéciales doivent être prises dans la conduite et l'équipement du forage pour éviter tout éboulement et entraînement du terrain.

#### **4.6.3.2**

Le coulis ou mortier de scellement est mis en place à partir du système d'injection équipant le pieu (tubes à manchettes, clapets ou rampes).

#### **4.6.3.3**

La pression d'injection moyenne  $p_i$  doit être au moins égale à la pression limite  $p_l$  du sol mesurée au pressiomètre normal en tenant compte des pertes de charges dues à la nature des coulis - des mortiers - des dispositions d'injection.

### **4.6.4 Contraintes de calcul**

#### **4.6.4.1**

La section d'acier est seule prise en compte dans les calculs de transmission des charges. La contrainte de calcul de l'acier sous les sollicitations ELS est égale à la moitié de la limite élastique et sous les sollicitations ELU aux 3/4 de la limite élastique.

#### **4.6.4.2**

Lorsqu'il y a risque de corrosion, une section réduite d'acier est prise en compte dans les calculs.

#### **4.6.4.3**

Le frottement latéral du sol à prendre en compte est calculé passe par passe, en appliquant la méthode de calcul préconisée par le chapitre 11 des commentaires et pour un mode de scellement correspondant à une injection haute pression.

### **4.6.5 Essais de contrôle de portance**

Dans tous les cas, on procède au moins à 2 essais de contrôle de portance, quel que soit le nombre de pieux et que ceux-ci travaillent à la compression ou à la traction.

Le nombre d'essais peut être limité à un seul si le pieu est équipé d'un dispositif de mesure permettant de dissocier le frottement latéral de la résistance de pointe.

## Chapitre 5 Puits

### 5.1 Caractéristiques

#### 5.1.1

Les puits sont des fondations creusées à la main. Les moyens de forage employés exigent la présence d'hommes au fond du forage.

#### 5.1.2

Les puits de section circulaire ont un diamètre supérieur ou égal à 1,20 m. Les puits de section quelconque (rectangulaire, oblongue, en fer à cheval, etc.) ont une largeur minimale de 0,80 m et une section minimale de 1,1 m<sup>2</sup>.  
Le diamètre de 1,20 m est le plus couramment utilisé.

C'est essentiellement la sécurité du personnel qui impose une section minimale et la présence de blindage. De toute façon, ce dernier est réalisé de manière à permettre un accès normal au personnel et sa protection.

Il est rappelé, en outre, que des dispositions particulières (ventilation, lampe de sécurité, échelle de secours,...) sont prises s'il y a des risques de dégagements gazeux nocifs ou risques de venues d'eau importantes et soudaines.

#### 5.1.3

Les parois du forage sont soutenues par un blindage.

#### 5.1.4

Le forage est bétonné à sec et le blindage éventuellement récupéré.

#### 5.1.5

L'exécution de puits sous la nappe phréatique dans des sols peu cohérents est interdite, sauf si la nappe est rabattue à l'extérieur du puits.

### 5.2 Dispositions constructives

#### 5.2.1

Les puits peuvent être exceptionnellement armés.

#### 5.2.2

Le dosage minimal du béton est 250 kg de ciment par mètre cube. La composition et le dosage du béton sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

#### 5.2.3

Le choix du liant tient compte de l'analyse chimique de l'eau prélevée dans le sol. Le béton peut être protégé par une chemise métallique.

### 5.3 Mise en oeuvre

#### 5.3.1 Blindages

##### 5.3.1.1

Les blindages des puits circulaires de 1,20 m de diamètre sont constitués de travées de planches (chons, voliges) de même épaisseur (27 mm au moins) et de 2 m de longueur. Ces planches, le plus souvent jointives, sont maintenues par des cerces métalliques (au minimum un fer plat de 40 x 10 mm). Le blocage des cerces peut être assuré par un

jeu de bagues et clavettes en acier.

Les cerces peuvent être bloquées à la masse.

On dispose une cerce tous les mètres environ.

Pour éviter toute décompression du terrain, on veille à ce que les planches portent sur toute leur surface contre le terrain et soient bien appuyées contre lui. La qualité d'un puits est ainsi essentiellement liée au dressage de la paroi, et à la bonne mise en place des cerces.

### 5.3.1.2

La pose des planches par travées successives (à la parisienne) convient aux sols de cohésion moyenne ne nécessitant pas un boisage immédiat.

### 5.3.1.3

La pose des planches par recouvrement, avec enfoncement à la masse en cours de forage (en coulantage) convient aux sols peu cohérents. Ce type de blindage n'est généralement pas récupéré.

Dans ce cas, les planches se recouvrent à leurs extrémités après mise en place et sont jointives.

### 5.3.1.4

Les puits rectangulaires sont blindés en planches (dites « metro ») de 34 mm d'épaisseur et cadres. Les planches sont serrées contre le sol par des coins en bois enfoncés entre les planches et les cadres. Les cadres sont en rondins (ou boulins) de 20 cm de diamètre au moins maintenus par des clameaux ou en profilés métalliques étré sillonnés.

### 5.3.1.5

La traversée de carrières ou de vides nécessite un comblement dans le voisinage immédiat du forage et la construction d'une ceinture en maçonnerie de moellons dont le but est de soutenir le ciel de carrière et de servir de coffrage au bétonnage.

### 5.3.1.6 Venues d'eau

Les venues d'eau impliquent que soient prises des dispositions particulières.

#### 5.3.1.6.1

La traversée de sols très cohérents (argile, marne, craie, roche) qui peuvent être le siège de venues d'eau par des fissures est autorisée si des moyens de pompage suffisants sont disposés en fond de puits.

#### 5.3.1.6.2

La traversée de sols moyennement cohérents et peu perméables est dangereuse. Elle n'est autorisée que si l'entraînement des parties fines du sol peut être efficacement empêché par des bourrages (paille, ciment prompt par exemple).

Si on ne peut empêcher l'entraînement des particules fines du sol par des bourrages, on réalise par exemple :

- un rabattement de la nappe aquifère à l'extérieur du puits ;
- un traitement par injection ou congélation du terrain entourant le puits.

### 5.3.1.7 Autres types de blindage

D'autres types de blindage peuvent être utilisés : anneaux de béton coulés en place, béton projeté armé, palplanches avec liernes métalliques. Les dispositions correspondantes doivent être définies par le maître d'œuvre sur proposition de l'entrepreneur.

- Anneaux de béton coulés en place : cette méthode consiste à blinder le puits par anneaux successifs en béton, coulés entre le terrain et un coffrage de la hauteur d'une passe. Chaque passe de terrassement est réalisée

- après prise de l'anneau immédiatement supérieur, le coffrage est alors descendu et l'anneau suivant coulé.
- Béton projeté armé : cette méthode consiste à réaliser le blindage en béton projeté armé d'un treillis soudé renforcé éventuellement par les liernes en béton armé ou en profilés métalliques.

Ces deux méthodes sont utilisables dans les sols relativement cohérents qui permettent l'ouverture de la fouille sur 1 m à 1,5 m de hauteur sans risque d'éboulement.  
Dans les terrains meubles, elles demeurent souvent applicables à condition de projeter une première couche de béton avec accélérateur de prise immédiatement après chaque passe de terrassement.

## 5.3.2 Bétonnage

### 5.3.2.1

Le fond du puits est curé et des échantillons de sol sont conservés et tenus à la disposition du maître d'oeuvre.

Un sondage de vérification (le plus souvent à *la barre à mine* ) est exécuté à partir du fond, chaque fois que l'on craint l'existence de vides ou d'anomalies.

### 5.3.2.2

Le béton est mis en place par un système de tubes ou gouttières de façon à ne pas provoquer d'éboulements des parois du puits.

La mise en place du béton peut se faire à l'aide de bennes à fond ouvrant à condition de n'utiliser que des bennes spéciales à ouverture automatique telles que l'ouverture ne se fasse que lorsque la benne est plongée dans la coulée précédente.

### 5.3.2.3

Le blindage ne peut être retiré, avant la mise en place du béton, que dans les zones stables.

Dans les zones suffisamment stables, il est préférable de retirer le blindage au fur et à mesure du bétonnage pour éviter les vides entre sol et béton.

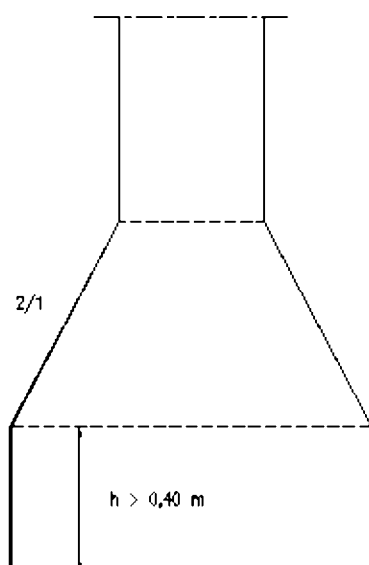
Cependant, on laisse le blindage dès que la tenue du terrain est douteuse. En particulier, les zones blindées en « coulage » ne sont pas déblindées : on récupère seulement les cerces au fur et à mesure de la mise en place du béton, quand le bas des planches est déjà dans celui-ci.

## 5.3.3 Base élargie

Un puits peut être muni d'une base élargie qui ne peut être réalisée que dans des sols de cohésion suffisante, car son blindage est impossible.

Le diamètre de la base élargie est limité au double du diamètre du puits.

La base élargie, ou « patte d'éléphant », est formée d'une partie conique de pente minimale 2 (verticale) pour 1 (horizontale) et d'une partie cylindrique de hauteur minimale 0,40 m.



## Chapitre 6 Pieux foncés

### 6.1 Béton foncé

#### 6.1.1 Caractéristiques

##### 6.1.1.1

Les pieux foncés en béton sont constitués d'éléments cylindriques en béton armé préfabriqués ou coffrés à l'avancement de 0,50 m à 2,50 m de longueur et de 30 cm à 60 cm de diamètre.

Dans certains cas particuliers, le diamètre des pieux peut descendre au-dessous de 30 cm.

##### 6.1.1.2

Les éléments en béton armé sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction.

#### 6.1.2 Dispositions constructives

##### 6.1.2.1

Le point d'appui doit pouvoir fournir une réaction au moins égale à la force maximale développée par le vérin utilisé. Si le point d'appui est solidaire d'un bâtiment, le maître d'oeuvre doit faire établir une note technique justifiant les efforts communiqués au bâtiment intéressé. Le maître d'oeuvre doit vérifier que le bâtiment peut subir sans dommages ces efforts.

##### 6.1.2.2

Si les éléments sont en béton armé préfabriqué, ils sont munis d'un orifice central de manière que le pieu puisse être examiné sur toute sa longueur après sa mise en oeuvre, et les surfaces de contact entre éléments sont normales aux génératrices du cylindre et d'une planéité parfaite vérifiée à l'équerre.

Dans le cas de pieux de diamètre inférieur à 30 cm, on peut utiliser l'orifice central pour loger une succession de tronçons de barres d'acier, tronçons disposés à cheval sur la séparation de deux éléments.

### **6.1.2.3**

Si les éléments sont en béton armé coffré à l'avancement, il y a lieu de s'assurer de la verticalité du coffrage et de la continuité des armatures.

### **6.1.2.4**

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

### **6.1.2.5**

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

## **6.1.3 Mise en oeuvre**

### **6.1.3.1**

Un soin particulier doit être apporté à la mise en place du 1<sup>er</sup> élément (positionnement et verticalité).

### **6.1.3.2**

Le système de calage du vérin doit éviter de communiquer au pieu des efforts horizontaux. Un centrage correct est nécessaire.

### **6.1.3.3**

Si les éléments sont préfabriqués, un dispositif (cerces, collage, résine par exemple) doit prévenir tout mouvement relatif de deux éléments consécutifs à leur jonction.

Après la mise en oeuvre, il est procédé à l'examen des éléments à partir de l'orifice central.

Lorsque le fonçage de l'ensemble des pieux est terminé, il est en général installé sur chaque pieu une tête spéciale permettant, par vérinage, d'opérer pour chaque pieu une mise en charge. Le clavage peut ainsi être fait sous la charge de service.
---

## **6.1.4 Contraintes de calcul**

Se reporter à l'article 1,32. La charge de calcul du fût du pieu est la force maximale du vérin.

La charge de calcul du pieu sous les sollicitations à l'ELS est égale à la force maximale appliquée en fin de fonçage divisée par un coefficient de 1,5.

Cette force maximale appliquée pendant 1 heure ne doit pas produire un tassement différé supérieur à 1 mm.

## **6.2 Métal foncé**

### **6.2.1 Caractéristiques**

#### **6.2.1.1**

Les éléments sont soudés bout à bout au fur et à mesure de leur vérinage. Leur longueur est comprise entre 0,50 m et 2,50 m.

#### **6.2.1.2**

Les éléments métalliques sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction.

### **6.2.2 Dispositions constructives**

#### **6.2.2.1**

Le point d'appui doit pouvoir fournir une réaction au moins égale à la force maximale développée par le vérin utilisé. Si le point d'appui est solidaire d'un bâtiment, le maître d'oeuvre doit faire établir une note technique justifiant les efforts communiqués au bâtiment intéressé. Le maître d'oeuvre doit vérifier que le bâtiment peut subir sans dommages ces efforts.

#### 6.2.2.2

Les soudures, et notamment le chanfrein, l'épaisseur des cordons, l'écartement entre les éléments doivent être conformes aux exigences de la classe de qualité 3 de la norme NF P 22-471.

La soudure doit reconstituer au minimum la section du plus mince des éléments assemblés.

On peut utiliser, pour un même pieu, des éléments de section et surtout d'épaisseurs différentes.

Par exemple, quand une zone agressive recouvre une zone peu agressive, il est économique de placer des éléments plus épais dans la zone agressive, de façon à ce que la durée de vie du pieu soit sensiblement uniforme sur toute sa longueur.

#### 6.2.2.3

Les éléments doivent être maintenus alignés, pendant le soudage, par un carcan ou gabarit.

#### 6.2.2.4

Si la pointe est munie d'un sabot ou d'une trousse, sa section ne doit pas être supérieure à 1,2 fois la section définie par le périmètre extérieur du profilé.

### 6.2.3 Mise en oeuvre

#### 6.2.3.1

Un soin particulier doit être apporté à la mise en place du 1<sup>er</sup> élément (positionnement et verticalité).

#### 6.2.3.2

Le système de calage du vérin doit éviter de communiquer au pieu des efforts horizontaux. Un centrage correct est nécessaire.

### 6.2.4 Contraintes de l'acier

#### 6.2.4.1

Pour tenir compte des risques de corrosion, la contrainte admissible de l'acier est limitée au tiers de la limite élastique  $\sigma_e$  à l'état limite de service.

Dans l'hypothèse où la durée de vie de l'édifice à soutenir peut être estimée, la contrainte de l'acier est limitée à 0,6  $\sigma_e$  à l'ELS et à 0,8  $\sigma_e$  à l'ELU. Cette contrainte est calculée avec une section réduite du pieu déterminée à partir des éléments suivants.

La connaissance de la durée de vie présumée de l'édifice à soutenir est un élément souvent générateur d'économie, tant au niveau de la conception de l'ouvrage qu'à celui de sa construction.

La corrosion d'un acier enfoui dans le sol est fonction avant tout, de la concentration en oxygène du milieu.

A titre indicatif, on classe dans :

- Catégorie 1 : les terrains en place consolidés (terrains sédimentaires par exemple) ;
- Catégorie 2 : les terrains en place dont la consolidation n'est pas terminée et les terrains en place consolidés dans la zone de marnage en eau douce...
- Catégorie 3 : les remblais récents et tous les terrains dans la zone de marnage en eau de mer ;
- Catégorie 4 : les terrains qui contiennent des substances chimiques particulièrement agressives pour l'acier.

La prolongation du pieu hors sol reçoit une protection adéquate dont la définition ne relève pas du présent DTU.

#### 6.2.4.2

La liaison pieu-semelle peut être métallique ou mixte acier-béton. Dans ce dernier cas, on doit se conformer aux Règles BAEL.

#### 6.2.4.3

Pendant le fonçage, la contrainte de l'acier sous la force maximale du vérin peut atteindre  $2 \sigma_e/3$ .

#### 6.2.4.4 Corrosion

##### 6.2.4.4.1

L'étude chimique des sols et des eaux qui y circulent doit être suffisamment complète pour déterminer les risques de corrosion.

##### 6.2.4.4.2

Si le sol contient des éléments physico-chimiques actifs pouvant par leur action entraîner une corrosion franche de l'acier, l'un des procédés suivants doit être utilisé :

- enlèvement des matériaux agressifs ;
- réduction de la contrainte admissible ;
- protection cathodique ;
- protection efficace de la surface de l'acier, par enrobage de 5 cm d'épaisseur au moins, par un mortier de ciment approprié dosé à plus de 500 kg par mètre cube de mortier dont le rapport eau sur ciment est inférieur à 0,5 ;
- protection par galvanisation ou peinture au zinc dans les sols peu abrasifs.

## Chapitre 7 Micropieux

### 7.1 Type I

#### 7.1.1 Caractéristiques

Un micropieu de ce type ne permet que la transmission d'efforts de quelques dizaines de tonnes suivant son axe. Sa résistance à la flexion est faible.

Le micropieu type I est un pieu foré tubé de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé ou non d'armatures et rempli d'un mortier de ciment au tube plongeur. Le tubage est ensuite obturé en tête et l'intérieur du tubage au-dessus du mortier mis sous pression. Le tubage est récupéré en maintenant la pression sur le mortier. Ce procédé ne peut être employé dans les terrains comportant des cavités ou des fissures importantes sans remplissage préalable. Dans les sols mous, ce type de pieu doit être vérifié au flambement.

#### 7.1.2 Dispositions constructives

##### 7.1.2.1

Des armatures peuvent être disposées dans les micropieux.

##### 7.1.2.2

Le tubage de forage peut être incomplètement récupéré. La partie restante fait partie du micropieu type I.

Lorsque le tubage est incomplètement récupéré dans les conditions préalablement arrêtées par le concepteur du projet, on peut en tenir compte dans les calculs de résistance du micropieu.

##### 7.1.2.3

La composition et le dosage du mortier sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.



#### **7.1.2.4**

Le dosage minimal est de 500 kg de ciment par m<sup>3</sup> de mortier.

#### **7.1.2.5**

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

### **7.1.3 Mise en oeuvre**

#### **7.1.3.1**

Le forage une fois terminé est entièrement rempli de mortier au tube plongeur.

#### **7.1.3.2**

La pression est maintenue en tête du tubage pendant sa remontée.

Le maintien de la pression est nécessaire pour obtenir une qualité de mortier en place supérieure à celle du béton d'un pieu foré classique, et peut permettre une contrainte atteignant 8 MPa (§ 7,141 ci-après).

#### **7.1.3.3**

Pendant la remontée du tubage, le niveau du mortier baisse du fait du remplissage des hors profils mais il ne doit jamais se trouver au-dessous du bas du tubage.

#### **7.1.3.4**

Dans certains sols, par exemple les couches épaisses d'alluvions très perméables sous la nappe, la mise en pression du mortier ne peut être appliquée qu'une seule fois.

En effet, plusieurs mises en pression successives du mortier correspondrait à des périodes intermédiaires à moindre pression pendant lesquelles l'eau de la nappe peut pénétrer dans le micropieu en délavant le mortier.

### **7.1.4 Contraintes de calcul**

#### **7.1.4.1 Sollicitations à l'ELS**

La contrainte uniforme de compression du mortier est au plus égale à 8 MPa calculée sur la section extérieure du tubage.

#### **7.1.4.2**

La contrainte de calcul du mortier est égale aux 8/10 de la valeur de la contrainte calculée par les Règles BAEL à partir de la résistance nominale du mortier.

#### **7.1.4.3**

La contrainte de calcul de l'acier est définie par les Règles BAEL.

### **7.1.5 Essai de contrôle de portance**

Dans tous les cas, on procède à un essai de contrôle de portance, au moins tous les 200 pieux s'ils travaillent en compression et tous les 50 pieux en traction.

## **7.2 Type II**

### **7.2.1 Caractéristiques**

Le micropieu type II est un pieu foré, de diamètre inférieur à 250 mm.

Le forage est équipé d'une armature et rempli d'un coulis ou de mortier de scellement par gravité ou sous une très faible pression au moyen d'un tube plongeur.

Dans les sols mous, ce type de pieux doit être calculé au flambement.

Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

Un micropieu de ce type peut permettre la transmission d'efforts importants.

L'armature est constituée :

- soit par un tube à paroi épaisse ;
- soit par des barres d'acier raccordées bout à bout ;
- soit par un faisceau de barres en acier placées à l'intérieur d'un tube en acier de limite élastique comparable.

La limite élastique des aciers employés peut être très importante (jusqu'à 500 MPa pour les tubes, de 1 100 MPa pour les barres).

Il est recommandé de vérifier le flambement (méthode de Mandel par exemple), ainsi que le raccourcissement élastique des micropieux.

## 7.2.2 Dispositions constructives

### 7.2.2.1

L'entrepreneur justifie par des essais préalables le système d'assemblage des armatures.

Les systèmes d'assemblage sont en général de deux sortes, soit soudures pour les aciers soudables, soit manchons spéciaux.

Lorsque les micropieux doivent rester en permanence comprimés, la justification porte sur la comparaison de la résistance au flambement d'une barre en deux éléments raccordés avec celle d'une barre de même longueur en un seul élément.

### 7.2.2.2

Si les micropieux sont soumis à des efforts de traction, l'assemblage des barres doit être fait par manchons filetés.

Si les micropieux sont soumis à des efforts de compression, l'aboutage des barres peut se faire par contact sur sections planes coupées d'équerre avec manchon de guidage fileté ou soudé.

### 7.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique de l'eau, du sol et de la nature des aciers.

On tient compte des modifications de temps de prise et des pertes de résistance du mortier dues à l'agressivité éventuelle du terrain ou de l'eau de la nappe (présence de matières organiques, d'eau chargée en sels, de substances chimiques, de gaz, etc.).

En outre, en cas d'utilisation de barres à très haute limite élastique, on vérifie que les liants utilisés ne peuvent pas entraîner une corrosion fissurante de l'acier des barres.

### 7.2.2.4

Le dosage minimal du coulis de scellement est de 1 200 kg de ciment par m<sup>3</sup> de coulis.

### 7.2.2.5

Dans le cas d'un scellement au mortier, la résistance à la compression simple de ce mortier doit être au moins égale à celle d'un coulis de ciment de rapport pondéral C/E = 2. L'entrepreneur justifie que le mortier est compatible avec le système de mise en place utilisé.

## 7.2.3 Mise en oeuvre

#### 7.2.3.1

En cas de rencontre de nappes phréatiques, des précautions spéciales doivent être prises dans la conduite et l'équipement du forage pour éviter tout éboulement et entraînement du terrain.

Ce type de micropieu est interdit en cas de rencontre de nappes artésiennes.

En cas de rencontre de nappes phréatiques non artésiennes, les précautions sont classiques : boue de densité suffisante remplissant tout le forage, tubage provisoire, etc.

#### 7.2.3.2

Le coulis ou mortier de scellement est mis en place au tube plongeur ou par le train de tige immédiatement après la fin du forage.

#### 7.2.3.3

Si l'ouvrabilité du coulis ou mortier le permet, les armatures peuvent être mises en place après le remplissage du forage.

Les armatures doivent être munies de centreurs en nombre suffisant.

### 7.2.4 Contraintes de calcul

#### 7.2.4.1

La section d'acier est seule prise en compte dans les calculs de transmissions des charges. La contrainte de calcul de l'acier sous les sollicitations ELS est égale à la moitié de la limite élastique et sous les sollicitations ELU aux 3/4 de la limite élastique.

Lorsqu'il y a risque de corrosion, une section réduite d'acier est prise en compte dans les calculs, sauf dispositions particulières pour éviter la corrosion.

En fait, il est rare que l'enrobage assure à lui seul la conservation des armatures.

Le plus souvent, on utilise des aciers préprotégés (brai-époxy, etc.) ou des aciers de section surabondante.

On peut évaluer la réduction de section de chaque acier d'après le tableau de l'article 2,241 du présent Cahier des Clauses Techniques.

#### 7.2.4.2

Le frottement latéral du sol est celui d'un pieu foré simple par application de la méthode de calcul des commentaires du chapitre 11.

### 7.2.5 Essais de contrôle de portance

Dans tous les cas, on procède à un essai de contrôle de portance, au moins tous les 200 pieux s'ils travaillent en compression et tous les 50 pieux en traction.

Pour les chantiers de moins de 25 micropieux, à défaut d'essais, la charge limite est frappée d'un coefficient minorateur de 1,5.

## 7.3 Type III

### 7.3.1 Caractéristiques

Le micropieu type III est un pieu foré de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection.

L'injection est faite en tête à une pression supérieure ou égale à 1 MPa. Elle est globale et unitaire (IGU). Dans les sols mous, ce type de pieu doit être calculé au flambement.

Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

### 7.3.2 Dispositions constructives

#### **7.3.2.1**

L'entrepreneur justifie par des essais préalables le système d'assemblage des armatures.

#### **7.3.2.2**

Si les micropieux sont soumis à des tractions, l'assemblage doit être fait par manchons filetés. Si les micropieux ne sont soumis qu'à des compressions, l'aboutage peut se faire par contact sur sections planes coupées d'équerre avec manchon de guidage fileté ou soudé.

#### **7.3.2.3**

Le choix des liants utilisés dans les différents coulis ou mortiers tient compte des résultats d'analyse chimique de l'eau, du sol et de la nature des aciers.

#### **7.3.2.4**

Le dosage minimal du coulis de scellement est de 1 200 kg de ciment par m<sup>3</sup> de coulis.

#### **7.3.2.5**

Dans le cas d'un scellement au mortier, la résistance à la compression simple de ce mortier doit être au moins égale à celle d'un coulis de ciment de rapport pondéral C/E = 2. L'entrepreneur justifie que le mortier est compatible avec le système d'injection utilisé.

### **7.3.3 Mise en oeuvre**

#### **7.3.3.1**

En cas de rencontre de nappes phréatiques, des précautions spéciales doivent être prises dans la conduite et l'équipement du forage pour éviter tout écoulement et entraînement du terrain.

En cas de rencontre de nappes phréatiques non artésiennes, les précautions sont classiques : boue de densité suffisante remplissant tout le forage, tubage provisoire, etc.

En cas de rencontre de nappes artésiennes, les procédés de protection sont très délicats à mettre en oeuvre (boue alourdie, surélévation de la plate-forme, etc.) et il est rare que l'on puisse totalement éviter des entraînements de terrain. Une recompression du terrain, par exemple par injection de coulis, est donc faite parallèlement à la réalisation du micropieu, l'équipement du tube à manchettes permettant de traiter toutes les zones décomprimées.

#### **7.3.3.2**

Le coulis de gaine est mis en place par un procédé convenable au tube plongeur, tube d'injection, etc., immédiatement après la fin du forage.

#### **7.3.3.3**

Les armatures doivent être munies de centreurs en nombre suffisant.

### **7.3.4 Contraintes de calcul**

#### **7.3.4.1**

La section d'acier est seule prise en compte dans le calcul des transmissions des charges. La contrainte de calcul de l'acier sous les sollicitations ELS est égale à la moitié de la limite élastique et, sous les sollicitations ELU, aux 3/4 de la limite élastique.

Lorsqu'il y a risque de corrosion (s'il n'y a pas en permanence de contraintes de compression), une section réduite d'acier est prise en compte dans les calculs, sauf dispositions particulières pour éviter la corrosion.

#### **7.3.4.2**

Le frottement latéral du sol est calculé couche par couche en appliquant la méthode de calcul des commentaires du chapitre 11 et en supposant que le fût du micropieu a le diamètre de l'outil de forage, multiplié par 1,2.

Le frottement latéral unitaire au droit de chaque couche a la valeur correspondant à l'injection faible pression si la

pression d'injection est inférieure à la pression limite mesurée la plus forte de la couche considérée, et à la valeur correspondant à l'injection haute pression si la pression d'injection est supérieure à la pression limite mesurée la plus forte de la couche considérée.

La pression limite est mesurée au pressiomètre normal. Dans le cas où elle n'a pu être atteinte en cours d'essai, on la remplace par le douzième du module pressiométrique.

### **7.3.5 Essais de contrôle de portance**

Dans tous les cas, on procède à un essai de contrôle de portance, au moins tous les 200 pieux s'ils travaillent en compression et tous les 50 pieux en traction.

Pour les chantiers de moins de 25 micropieux, à défaut d'essais, la charge limite est frappée d'un coefficient minorateur de 1,5.

## **7.4 Type IV**

### **7.4.1 Caractéristiques**

Le micropieu type IV est un pieu foré de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection. On procède à l'injection à l'obturateur simple ou double d'un coulis ou mortier de scellement à une pression d'injection supérieure ou égale à 1 MPa. L'injection est répétitive et sélective (IRS). Dans les sols mous, ce type de pieu doit être calculé au flambement. Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

### **7.4.2 Dispositions constructives**

#### **7.4.2.1**

L'entrepreneur justifie par des essais préalables le système d'assemblage des armatures.

#### **7.4.2.2**

Si les micropieux sont soumis à des tractions, l'assemblage doit être fait par manchons filetés. Si les micropieux ne sont soumis qu'à des compressions, l'aboutage peut se faire par contact sur sections planes coupées d'équerre avec manchon de guidage fileté ou soudé.

#### **7.4.2.3**

Le choix des liants utilisés dans les différents coulis ou mortiers tient compte des résultats d'analyse chimique de l'eau, du sol et de la nature des aciers.

#### **7.4.2.4**

Le dosage minimal du coulis de scellement est de 1 200 kg de ciment par m<sup>3</sup> de coulis.

#### **7.4.2.5**

Dans le cas d'un scellement au mortier, la résistance à la compression simple de ce mortier doit être au moins égale à celle d'un coulis de ciment de rapport pondéral C/E = 2. L'entrepreneur justifie que le mortier est compatible avec le système d'injection utilisé.

### **7.4.3 Mise en oeuvre**

#### **7.4.3.1**

En cas de rencontre de nappes phréatiques, des précautions spéciales doivent être prises dans la conduite et l'équipement du forage pour éviter tout éboulement et entraînement du terrain.

#### **7.4.3.2**

Le coulis de gaine est mis en place par un procédé convenable au tube plongeur, tube d'injection, etc., immédiatement après la fin du forage.

### 7.4.3.3

Les armatures doivent être munies de centreurs en nombre suffisant.

### 7.4.3.4

La longueur maximale de passe d'injection sera de 1 m.

## 7.4.4 Contraintes de calcul

### 7.4.4.1

La section d'acier est seule prise en compte dans le calcul des transmissions des charges. La contrainte de calcul de l'acier sous les sollicitations ELS est égale à la moitié de la limite élastique et, sous les sollicitations ELU, aux 3/4 de la limite élastique.

Lorsqu'il y a risque de corrosion (s'il n'y a pas en permanence des contraintes de compression), une section réduite d'acier est prise en compte dans les calculs, sauf dispositions particulières pour éviter la corrosion.

### 7.4.4.2

Le frottement latéral du sol est calculé, passe par passe, en appliquant la méthode de calcul des commentaires du chapitre 11 et en supposant que le fût du micropieu a le diamètre de l'outil de forage, multiplié par 1,5.

Le frottement latéral unitaire de chaque passe a la valeur correspondant à l'injection faible pression si la pression d'injection est inférieure à la pression limite mesurée la plus forte de la passe considérée, et à la valeur correspondant à l'injection haute pression si la pression d'injection est supérieure à la pression limite mesurée la plus forte de la passe considérée.

La pression limite est mesurée au pressiomètre normal. Dans le cas où elle n'a pu être atteinte en cours d'essai, on la remplace par le douzième du module pressiométrique.

Dans le cas d'injection à l'obturateur simple, pour le calcul du frottement latéral, on tient compte du fait que la pression d'injection d'une passe déterminée ne peut pas dépasser la pression maximale d'injection des passes précédentes.

## 7.4.5 Essais de contrôle de portance

Dans tous les cas, on procède à un essai de contrôle de portance, au moins tous les 200 pieux s'ils travaillent en compression et tous les 50 pieux en traction.

Pour les chantiers de moins de 25 micropieux, à défaut d'essais, la charge limite est frappée d'un coefficient minorateur de 1,5.

# Chapitre 8 Colonnes ballastée

## 8.1 Caractéristiques

Les colonnes ballastées sont constituées par des fûts de matériau d'apport mis en place et compacté dans le sol à l'aide d'un vibreur radial placé à la pointe d'un tube qui lui sert de support.

Les colonnes ballastées permettent d'obtenir une amélioration en place des caractéristiques globales du sol d'assise. En fonction du matériel couramment utilisé, ces colonnes ont généralement un diamètre de 0,60 à 1,20 m.

Les colonnes ballastées reportent les charges à travers une couche de sol de qualité médiocre, sur une couche sous-jacente plus résistante. Elles ne fonctionnent que grâce à la réaction d'étreinte latérale qui peut être fournie par la couche de qualité médiocre traversée et le mécanisme de transfert peut être assimilé à celui d'un échantillon pulvérulent placé dans l'appareil triaxial.

Les colonnes ballastées fonctionnent également comme des drains, par accélération du processus naturel de consolidation.

## 8.2 Dispositions constructives

### 8.2.1

Le matériau d'apport a une granulométrie telle que :

- $d_5 > 0.1 \text{ mm}$

- $d_{30} > 40 \text{ mm}$
- $160 \text{ mm} > d_{100}$

Le choix du fuseau granulométrique résulte de la fonction essentielle que l'on veut conférer à la colonne ballastée.

Le rôle porteur est accru par un fort pourcentage en cailloux.

Le matériau d'apport peut être un roulé ou un concassé en fonction des disponibilités locales.

### 8.2.2

La roche constituant les éléments du matériau d'apport a des caractéristiques mécaniques élevées et n'est pas délitable ni sujette à l'attrition. Ces propriétés sont déterminées par des essais adéquats. Si le critère adopté est la résistance à la compression simple :

$R_c > 25 \text{ MPa}$

### 8.2.3

Lorsque les terrains traversés n'apportent pas une étreinte latérale suffisante, notamment en tête, l'entrepreneur doit justifier les dispositions particulières qu'il propose.

Ces dispositions doivent tenir compte de l'agressivité du sol et des eaux circulant dans le sol.

Un groupe de colonnes ballastées est toujours coiffé par une couche de répartition, colonne et terrain encaissant devant nécessairement travailler ensemble.

Généralement, il s'agit d'une couche épaisse de matériaux graveleux et c'est souvent la plate-forme de travail elle-même qui joue ce rôle de couche de répartition.

## 8.3 Mise en oeuvre

### 8.3.1

Le forage est exécuté sous l'action de la vibration avec l'aide du poids de l'outil et du fluide de lançage (eau ou air).

Par forage à l'eau, on procède par extraction de terrain. Au contraire, par forage à l'air on procède par refoulement du terrain.

Il en résulte que le diamètre du trou est plus important dans le cas de forage exécuté avec lançage d'eau.

### 8.3.2

Le matériau d'apport doit descendre jusqu'à la pointe du vibreur, soit par le forage lui-même, soit par l'espace annulaire maintenu entre le vibreur et le sol environnant, soit par tube latéral associé au vibreur.

La pointe du vibreur ne doit pas être remontée au-dessus du matériau d'apport en place. La fréquence utilisée est généralement comprise entre 15 et 60 Hz.

### 8.3.3

Un attachement est établi pour chaque colonne ballastée conformément à l'article 6.1 du Cahier des Clauses Spéciales. Il comprendra en outre l'indication de la quantité globale de matériaux incorporés et de l'énergie absorbée en fonction de la profondeur.

Les volumes incorporés sont mesurés sur le matériau foisonné. Le volume global ainsi mesuré est au moins égal à 1,5 fois le volume théorique de la colonne ballastée, ce qui représente, compte tenu du serrage, un supplément moyen de diamètre de l'ordre de 10 %.

## 8.4 Essais d'information

#### 8.4.1

Les essais d'information comportent en fonction de la profondeur :

- la coupe approximative des terrains rencontrés ;
- les volumes de matériau d'apport mis en place pour chaque mètre de hauteur de colonne.

#### 8.4.2

Le nombre d'essais d'information ne doit pas être inférieur à 1 sur 50 colonnes avec un minimum de 3 par ouvrage.

Les premiers de ces essais sont implantés, de préférence, à proximité de sondages de reconnaissance.

#### 8.4.3

Le volume de matériau d'apport doit être au moins égal à 1,5 fois le volume théorique de la colonne ballastée correspondant au diamètre à prendre en compte dans les calculs.

Le volume incorporé varie en fonction des caractéristiques du sol encaissant. La section réelle peut donc ne pas être constante sur toute la hauteur de la colonne ballastée qui a été réalisée.

Cette majoration de volume s'applique à chaque mètre linéaire de colonne. Si cette condition n'est pas respectée sur une tranche donnée, l'entrepreneur soumet à l'accord du géotechnicien les dispositions adéquates.

### 8.5 Essais de contrôle

#### 8.5.1

Les essais de contrôle ont pour objet de vérifier les caractéristiques mécaniques des colonnes ballastées. Les résistances minimales, en tout point de l'axe de la colonne à partir de 1 m de profondeur sont :

- pénétromètre dynamique  $R_d = 15 \text{ MPa}$
- ou pénétromètre statique  $R_p = 10 \text{ MPa}$
- ou pressiomètre  $p_l = 1,5 \text{ MPa}$
- ou SPT  $N = 30 \text{ MPa}$

Ces essais peuvent présenter des difficultés importantes de réalisation :

- blocage sur gros éléments du matériau constitutif de la colonne ;
- déviation du forage d'essai susceptible de sortir de l'emprise de la colonne.

•

Dans ces cas-là, l'entrepreneur propose à l'approbation du maître d'oeuvre, assisté du géotechnicien, un nouveau programme de contrôle.

#### 8.5.2

Le nombre de ces essais de contrôle est fixé par les documents particuliers du marché et doit être au minimum le même que celui des essais d'information.

Il est recommandé de réaliser les essais de contrôle à proximité des essais d'information.

#### 8.5.3

Le nombre des essais de chargement (contrôle de portance à 1,5 fois la charge de service) est fixé par les documents particuliers du marché et ne sera pas inférieur à 1 par chantier.

Pour les chantiers de moins de 800 m de colonnes ballastées, le maître d'oeuvre et le géotechnicien peuvent décider,



après justification de l'entrepreneur, de ne pas procéder à un essai de chargement (contrôle de portance).

L'essai de chargement nécessite la mise en place d'une semelle en tête de la colonne à la cote normale d'utilisation. En général, on limite la surface de la semelle à 2,5 fois la section théorique de la colonne ballastée. Si la couche superficielle de sol a de bonnes caractéristiques mécaniques, l'essai peut ne pas être significatif : dans ce cas, le géotechnicien peut modifier le programme d'essais.

## 8.6 Contraintes admissibles

La contrainte de calcul à l'ELS sur une section théorique de colonne ballastée doit être inférieure à 2 fois l'étreinte latérale du sol encaissant sans toutefois être supérieure à 0,8 MPa.

Par analogie avec l'essai triaxial, la contrainte verticale de rupture de la colonne est dans laquelle :

$$q_r = \sigma_h \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \sigma_h \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

- $\sigma_h$  est l'étreinte latérale
- $\varphi$  est l'angle de frottement interne dans la colonne.

La contrainte admissible est calculée à partir de  $q_r$  avec un coefficient de sécurité supérieur à 2.

La valeur de l'étreinte latérale résulte du rapport géotechnique. Elle est déterminée à partir d'essais de laboratoire ou à partir d'essais in situ tels que le pressiomètre, le pénétromètre statique ou le scissomètre. Dans le cas du pressiomètre, on peut assimiler l'étreinte latérale  $h$  à la valeur de la pression limite.

On s'assure qu'avec les contraintes calculées, le tassement de la colonne ballastée reste compatible avec les tolérances imposées par la structure.

## Chapitre 9 Picots

### 9.1 Caractéristiques

#### 9.1.1

Les picots peuvent avoir 2 fonctions différentes :

- type 1 : ils sont utilisés comme des petits pieux.
- type 2 : ils sont destinés à améliorer les caractéristiques d'un certain volume de sol sous des fondations superficielles ou similaires.

À l'origine, les picots ont été introduits et développés en vue d'améliorer les caractéristiques du sol d'assise d'une fondation superficielle. Ces picots correspondent au type 2.

Par la suite, on a aussi utilisé ces procédés pour transmettre de faibles charges à une couche résistante située sous une couche de qualité médiocre et de faible épaisseur. Ces picots, fonctionnant comme des petits pieux (petits en diamètre et en longueur), correspondent au type 1.

#### 9.1.2

Les picots sont réalisés en place par battage ou vibration

Ils ont un fût d'aspect tronconique, d'un diamètre moyen de 15 à 40 cm et une longueur de l'ordre de 2 à 6 mètres.

La section de leur base n'est pas inférieure à la moitié de leur section moyenne.

La mise en place peut être également faite par vérinage.

Dans tous les cas, l'extraction est très rapide.

Le diamètre moyen et la section moyenne correspondent au diamètre et à la section mesurés à mi-hauteur de la longueur utile des picots.

### 9.1.3

Les picots sont constitués par un matériau d'apport, béton ou granulats, mis en place directement dans le sol qui se trouve resserré ou refoulé par l'expansion du fût.

Les picots de type 2 peuvent être constitués de granulats ; par contre, les picots de type 1 doivent avoir un fût capable de transmettre la charge prévue au sol d'assise.

### 9.1.4

On ne doit pas réaliser de picots type 1 dans les sols sableux sans cohésion situés sous la nappe et qui risqueraient de provoquer des éboulements importants.

Il s'agit des éboulements qui peuvent être provoqués lors des extractions de mandrins. Dans les sables propres, on peut employer les picots type 2 qui densifient le milieu.

## 9.2 Dispositions constructives

Les dispositions constructives qui suivent s'appliquent aux picots de type 1. Celles concernant le type 2 sont fixées par les documents particuliers du marché.

Les documents particuliers du marché relatifs aux picots de type 2 édictent des prescriptions techniques tenant compte des sols traversés, du procédé de réalisation utilisé et des objectifs d'amélioration du sol envisagés par le géotechnicien.

### 9.2.1 Armatures

Les picots en béton ne peuvent pas recevoir de cage d'armature. Ils peuvent comporter des barres d'attente piquées dans le béton frais.

### 9.2.2 Béton

#### 9.2.2.1

La composition et le dosage des bétons sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir.

#### 9.2.2.2

Le dosage minimal est de 350 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton.

#### 9.2.2.3

Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

#### 9.2.2.4

L'ouvrabilité du béton est fixée par les documents particuliers du marché. Elle est mesurée avec un appareil adéquat.

## 9.3 Mise en oeuvre

### 9.3.1

Les picots sont réalisés à l'aide d'un tube métallique, d'aspect tronconique et fermé à la base, appelé mandrin, dont la section de la base n'est pas inférieure à la moitié de sa section moyenne.

Le mandrin est enfoncé dans le sol par battage ou vibration, puis extrait. Le matériau d'apport est mis en place dans l'empreinte ainsi créée, immédiatement après l'enlèvement du mandrin.

Le compactage du matériau avec expansion dans le sol est obtenu par un nouvel enfoncement du mandrin suivi d'un complément d'apport de matériau. Ce cycle d'opérations est répété, si nécessaire, une ou plusieurs fois sur une

même picot.

La profondeur du 2<sup>e</sup> enfoncement du mandrin et éventuellement le suivant est approximativement celle du 1<sup>er</sup> enfoncement.

### 9.3.2

La distance entre axes de picots du type 1 est au moins égale à 3 fois la largeur du mandrin au niveau de la cote de recépage.

Dans le cas de dommage aux pieux voisins, par exemple observation d'une remontée du béton dans les pieux voisins, l'entrepreneur doit étudier l'ordre de battage et il peut être recouru à des dispositions particulières.

## 9.4 Dimensionnement

### 9.4.1 Picots type 1

La contrainte de compression du béton est limitée à 3 MPa sous les sollicitations à l'ELS. Cette contrainte est calculée sur la section moyenne extérieure du mandrin.

Dans le cas où le picot type 1 vient reposer sans ancrage sur une couche très résistante surmontée d'une couche molle, les documents particuliers du marché définissent également la contrainte maximale du béton, au niveau de la section de pointe du mandrin.

### 9.4.2 Picots type 2

Le dimensionnement et l'implantation des picots sont fonction du volume et de la nature du sol à compacter ainsi que de l'amélioration souhaitée de ses caractéristiques mécaniques.

Le dimensionnement et l'implantation des picots sont définis par le géotechnicien, en accord avec l'entrepreneur.

## 9.5 Essais de contrôle

### 9.5.1 Picots type 1

Le nombre des essais de contrôle de portance est fixé par les documents particuliers du marché et n'est pas inférieur à 1 essai pour 200 pieux.

### 9.5.2 Picots type 2

Pour contrôler les résultats obtenus par la mise en oeuvre des picots, il est nécessaire de procéder à une campagne de reconnaissance de sol après exécution des travaux dans des conditions fixées par les documents particuliers du marché.

Le mode d'investigation choisi pour les essais de réception des travaux doit permettre d'évaluer les nouvelles caractéristiques du sol entre picots et cela sur toute leur hauteur (ces essais peuvent comporter un ou plusieurs essais de chargement sur les terrains traités).

Le nombre des essais de réception correspond au minimum à 1 essai pour 100 m<sup>2</sup> de surface traitée, sans toutefois être inférieur à 3 essais par ouvrage indépendant.

L'amélioration d'un sol s'évalue statistiquement par comparaison des résultats d'essais en place effectués avant et après exécution des picots, aux mêmes emplacements et selon un maillage adéquat.

Dans certains terrains peu perméables, il convient d'attendre la dissipation des surpressions interstitielles pour effectuer les essais de réception.

### 9.5.3

Pour l'application de l'article 1,324, le contrôle renforcé de continuité et de qualité du fût doit comporter au moins les essais suivants, pour les picots type 1 seulement : chargement statique à 1,5 fois la charge de service à raison d'un

essai par 20 pieux.

## Chapitre 10 Les essais de pieux (Commentaire)

**Attention** : Les chapitres 10 et 11 de la présente norme expérimentale constituent un commentaire.

### 10.1 Classification des différents essais de pieux

Le Cahier des Clauses Techniques impose, et les documents particuliers du marché peuvent imposer, l'exécution d'un certain nombre d'essais de pieux.

Ces essais se classent en 2 catégories :

#### 10.1.1 Les essais de reconnaissance

Ils comprennent :

- les essais préliminaires :  
les essais préliminaires, qui sont réalisés au moment de la conception du système de fondation de l'ouvrage, sont destinés à vérifier et à préciser les conclusions de l'étude géotechnique relative au dimensionnement et au comportement des pieux (charge nominale et déplacements) ;
- les essais d'information :  
ils sont effectués au cours de la réalisation des pieux pour recueillir des informations complétant celles fournies par la reconnaissance de sol.

#### 10.1.2 Les essais de contrôle

Ils sont effectués sur des pieux finis de l'ouvrage pour vérifier la qualité de leur exécution ou leur portance.

On distingue :

- les essais de contrôle du fût ;
- les essais de contrôle de portance.

### 10.2 Les essais de reconnaissance

#### 10.2.1 Les essais préliminaires

Les essais préliminaires sont des *essais de chargement statiques préalables*.

Les essais préliminaires sont à envisager dans les cas où :

- il subsiste une incertitude sur les caractéristiques mécaniques des sols ;
- l'application des différentes méthodes de calcul de portance conduit à des valeurs par trop divergentes ;
- les conditions d'exécution du pieu peuvent notablement influencer sur sa capacité portante, sans que cette influence puisse être véritablement chiffrée au niveau du calcul ;
- l'ouvrage est important et comporte un grand nombre de pieux.

Dans aucun cas, les essais préliminaires de pieux ne peuvent dispenser de l'étude géotechnique des sols (essais en place et essais de laboratoire).

Ils sont effectués, en général, sur des pieux indépendants de l'ouvrage. Les pieux d'essai doivent être représentatifs (dimensions, type de pieu et condition d'exécution) des pieux de l'ouvrage.

Il est conseillé d'entreprendre les essais préliminaires 2 à 3 mois avant l'exécution des pieux de l'ouvrage, afin que les résultats obtenus puissent être utilement exploités pour la mise au point du projet. Les essais préliminaires peuvent faire l'objet d'un marché particulier et il est souhaitable que l'interprétation et l'utilisation des résultats précèdent la signature du marché d'exécution des pieux de l'ouvrage.

Les essais préliminaires consistent à éprouver un pieu en lui appliquant des efforts de même nature que ceux transmis par le futur ouvrage. Ces essais peuvent être en conséquence :

- un essai d'enfoncement, dans le cas de pieux travaillant à la compression (NF P 94-150) ;
- un essai d'arrachement, dans le cas d'une fondation soumise à la traction ;

- un essai de chargement horizontal, lorsque les pieux sont appelés à mettre le terrain en butée latérale (NF P 94-151).

Les essais préliminaires doivent être conduits selon un programme défini par le maître d'oeuvre.

Ce programme définit :

- l'ensemble des paramètres à relever lors de la mise en place ou de la confection du pieu d'essai ;
- l'importance du délai de repos entre la mise en place du pieu et la réalisation de l'essai ;
- le choix et la disposition de l'appareillage de mesure, ainsi que les conditions minimales requises quant à sa précision ;
- le programme de chargement de l'essai ;
- la méthode d'interprétation des résultats.

#### **10.2.1.1 A) instrumentation**

Les pieux devant faire l'objet d'essais de chargements statiques doivent, dans la mesure du possible, être équipés à divers niveaux de dispositifs de mesures extensométriques permettant d'évaluer la répartition des efforts sur toute la hauteur du fût. Ces dispositifs, qui ne représentent qu'une faible part du coût total de l'essai (cordes vibrantes, extensomètres amovibles, jauges collées, etc.), constituent actuellement la seule façon d'obtenir des informations sur la valeur des différents paramètres entrant dans le calcul de la portance du pieu.

#### **10.2.1.2 B) paliers de chargement**

La durée des 5 premiers paliers de chargements du 2<sup>e</sup> cycle de charge peut être réduite à 30 minutes.

#### **10.2.1.3 C) présentation des résultats**

On établit les graphiques ci-après :

##### **10.2.1.2.1 Charge en tête / déplacement vertical en tête**

L'échelle des déplacements, portée en ordonnée, doit être de 1 cm sur le graphique pour 2 mm de déplacement. L'échelle des charges en tête, portée en abscisse, doit être telle que l'abscisse de la charge nominale soit d'une dizaine de centimètres sur le graphique.

##### **10.2.1.2.2 Déplacement vertical en tête / logarithme du temps**

L'échelle des déplacements, portée en ordonnées, doit être de 1 cm sur le graphique pour 1 mm de déplacement. L'échelle des temps doit être telle que l'espace entre 1 minute et 60 minutes occupe 15 à 20 cm.

##### **10.2.1.2.3 Construction de la charge de fluage**

On porte en abscisse les charges avec la même échelle que sur le 1<sup>er</sup> graphique. On porte en ordonnées les pentes des droites de stabilisation de telle sorte que le millimètre de tassement corrigé entre 30 et 60 minutes soit représenté par 2 cm sur le graphique.

Pour la construction de ce graphique, on ne tient compte que du 1<sup>er</sup> cycle et de la partie du 2<sup>e</sup> cycle concernant les charges supérieures à celles atteintes par le 1<sup>er</sup> cycle.

#### **10.2.1.4 D) interprétation des résultats**

Il apparaît que, dans certains cas, la construction de la charge de fluage peut présenter des difficultés d'interprétation. A titre indicatif, il est rappelé que la charge de fluage correspond à un tassement entre 30 minutes et 60 minutes de l'ordre de 0,3 à 1 mm.

L'ordre de grandeur de la charge nominale du pieu essayé est obtenu en appliquant un coefficient minorateur de 1,4 à la charge de fluage.

On vérifie que la charge nominale ainsi obtenue reste inférieure à la moitié de la charge limite dans la mesure où elle a pu être atteinte en cours de l'essai.

Par convention, la charge limite sera celle qui produit un tassement résiduel de 50 mm.

La charge nominale ainsi déterminée est applicable au seul pieu d'essai.

### **10.2.2 Les essais d'information**

Ils sont destinés à recueillir des données relatives au battage, forage, fonçage des pieux. Les pieux soumis à ces essais font partie de l'ouvrage et leur mode d'exécution n'est pas distinct de celui des autres pieux. Ces essais sont de préférence pratiqués sur l'un des 5 premiers pieux de chaque série prévue au marché (série de 20 pieux au plus suivant art. 1.2 du Cahier des Clauses Techniques).

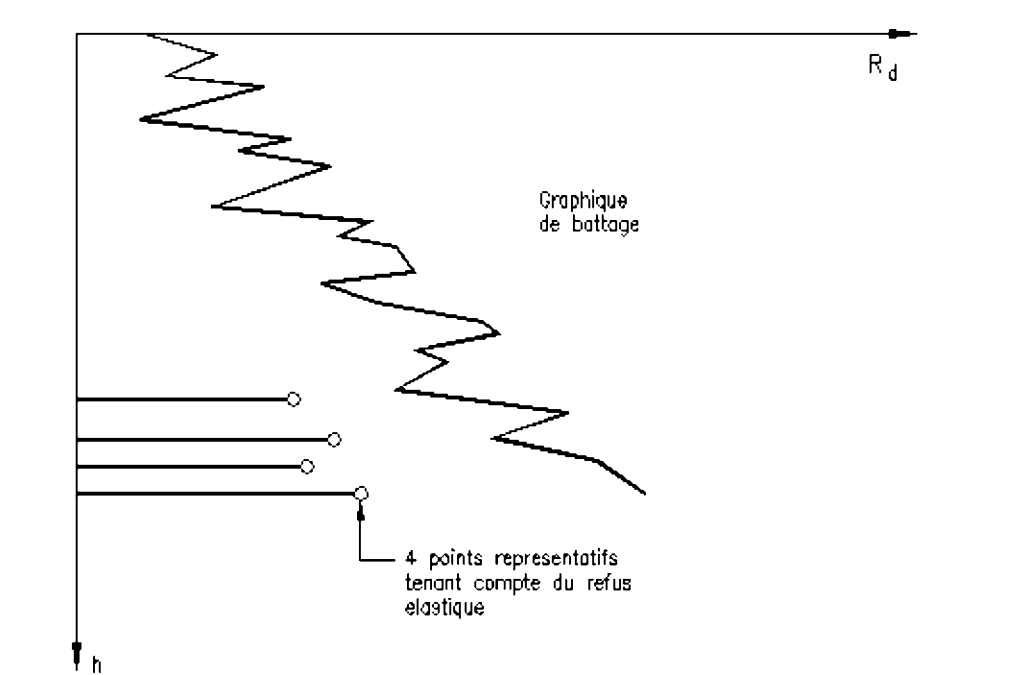
Il est recommandé de réaliser certains de ces essais sur des pieux à proximité de points de reconnaissance de sol de manière à pouvoir effectuer des corrélations.

### 10.2.2.1 Le battage (art. 1.2.1.1)

Lors de la mise en fiche du pieu, on établit sur le chantier une feuille d'essai de battage qui comporte :

- le numéro d'identification et le type de pieu ;
- la date et l'heure du début et de la fin du battage ;
- le type de mouton utilisé (à simple effet, double effet, Diesel, etc.) ;
- le poids de la masse frappante et de la masse frappée (pieu, faux pieu, casque, etc.), ainsi que l'énergie de battage dans le cas d'un mouton Diesel ;
- le nombre de coups nécessaires pour enfoncer le pieu d'une longueur donnée, en général 50 cm. Ce relevé est effectué sur toute la longueur de pénétration dans le sol en précisant la ou les hauteurs de chute du mouton ;
- les refus élastiques en fin de battage ;
- les refus sous les trois dernières volées de 10 coups de mouton.

Pour obtenir les refus élastiques, on peut placer une feuille de papier sur le fût du pieu et déplacer horizontalement un crayon sur ce papier pendant l'application du coup de mouton ;



- les incidents qui peuvent survenir en cours de battage (obstacles s'opposant à la pénétration du fût, déplacements des têtes de pieux voisins, interruptions de battage, etc.).

C'est à partir de cette feuille d'essai qu'est établi le graphique de battage prescrit en 1.2.1.1 du Cahier des Clauses Techniques.

### 10.2.2.2 Le fonçage

Lors du fonçage du pieu, on établit une feuille d'essai qui comporte :

- le numéro d'identification et le type de pieu ;
- la date et l'heure de début et de fin de fonçage ;
- les dimensions des éléments foncés (diamètres intérieurs et extérieurs, longueur) et la nature du matériau constitutif ;
- les caractéristiques du vérin (force maximale, section utile) et des manomètres (pression maximale) ;
- la durée d'enfoncement de chaque élément ;
- les indications du manomètre tous les 20 cm d'enfoncement ;

- les déplacements de la tête du pieu en fin de fonçage sous l'application d'une charge égale à 1,5 fois la charge de service, jusqu'à ce que le déplacement obtenu pendant la dernière heure soit inférieur à 1 mm. Les mesures sont généralement effectuées tous les quarts d'heure ;
- les incidents éventuels en cours de fonçage (déviation, rupture d'éléments, mauvais fonctionnement du vérin, obstacles rencontrés).

C'est à partir de cette feuille d'essai qu'est établie la courbe de fonçage prescrite en 1.2.1.2 du Cahier des Clauses Techniques.

### 10.2.2.3 Le forage

Lors de la réalisation du forage, on établit une feuille d'essai mentionnant :

- le numéro d'identification et le type de pieu ;
- la date et l'heure de début et de fin de forage ;
- les caractéristiques des différents outils de forage utilisés (trépan, soupape, hammergrab, tarière, etc.) et des tubages éventuels ;
- la description des échantillons caractéristiques de chaque couche de sol traversée ;
- les incidents éventuels de forage (éboulements, cavités, pertes accidentelles de fluide de forage, venues d'eau, etc.).

C'est à partir de cette feuille d'essai qu'est établie la coupe des terrains prescrite au 1.2.1.3 du Cahier des Clauses Techniques.

## 10.3 Les essais de contrôle

Les essais de contrôle peuvent être des essais de contrôle de fût et des essais de contrôle de portance.

Ces essais peuvent être prévus par les documents particuliers du marché (ils le sont obligatoirement dans le cas du contrôle renforcé indiqué à l'art. 1.324 du Cahier des Clauses Techniques). Ils sont effectués sur des pieux qui font partie du système de fondation de l'ouvrage. Le nombre de pieux essayés est fixé par le maître de l'ouvrage.

Si les résultats d'un des pieux essayés mettent en évidence une anomalie, il y a lieu d'en déterminer la cause et de procéder éventuellement à de nouveaux essais.

### 10.3.1 Essais de contrôle du fût

Ces essais de contrôle ont pour objet de vérifier la continuité du fût du pieu et la résistance mécanique du béton ainsi que de s'assurer de la bonne qualité du contact sol-pieu. Ils peuvent comporter suivant les cas :

- des essais soniques par transparence ;
- des essais par microsismique transparence ;
- des essais d'impédance mécanique ;
- des carottages mécaniques.

#### 10.3.1.1 Essais soniques par transparence

##### 10.3.1.1.1 Principe de la méthode

Les essais soniques par transparence, appelés aussi carottages soniques, consistent à mesurer le temps de propagation et la variation d'amplitude d'ondes acoustiques se déplaçant à travers le béton du pieu entre une sonde émettrice et une sonde réceptrice. Les sondes sont mises en place dans des tubes de réservation parallèles. Les mesures sont effectuées de façon continue par remontée des sondes sur toute la hauteur du pieu. Si une anomalie est repérée, on répète les mesures.

Cette méthode d'auscultation impose de choisir, avant leur exécution, les pieux qui feront l'objet d'un contrôle afin de les équiper des tubes de réservation, qui sont fixés sur les cages d'armature.

La présence d'anomalies (inclusion de sol ou de boue, interruption de bétonnage, poches de béton pollué) est mise en évidence par l'apparition simultanée d'une augmentation du temps de propagation des ondes, d'une diminution d'amplitude en conséquence, et d'une modification des signaux reçus.

##### 10.3.1.1.2 Répartition des tubes verticaux d'auscultation

Les anomalies ne peuvent être détectées que dans la mesure où elles sont situées sur le trajet des ondes acoustiques. Il importe donc de prévoir un nombre suffisant de tubes verticaux d'auscultation à la périphérie du pieu pour reconnaître, à chaque niveau, la majeure partie de la section du fût. La répartition des tubes dépend de la forme et des dimensions de l'élément de fondation. Les dispositions suivantes sont retenues :

- pieux  $\varphi \leq 60$  cm : 2 tubes diamétralement opposés ;
- pieux  $60 \text{ cm} < \varphi \leq 120$  cm : 3 tubes disposés à  $120^\circ$  ;
- pieux  $\varphi > 120$  cm : 4 tubes disposés à  $90^\circ$  ;
- barrettes : les tubes sont disposés sur tout le périmètre de la barrette et la distance entre tubes n'est pas supérieure à 1,50 m de façon à pouvoir ausculter la totalité de la barrette.

### 10.3.1.1.3 Recommandations pour la mise en oeuvre

- Le recépage du pieu n'est jamais exécuté avant les mesures, de manière à éviter la déformation des tubes, ce qui interdirait la descente des sondes.
- Pour que les résultats des essais soient significatifs, il est nécessaire que le béton ait un âge minimal de 7 jours.
- Les tubes d'auscultation sont parallèles et fixés convenablement sur la cage d'armature.
- La base des tubes est fermée par un bouchon pour éviter la pénétration de boue ou de béton.
- La partie supérieure des tubes dépasse nettement la tête du pieu et est munie d'un bouchon de protection.
- Avant la réalisation des mesures, les tubes sont remplis d'eau propre.

### 10.3.1.2 Les essais par microsismique transparence (MST)

#### 10.3.1.2.1 Principe de la méthode

On réalise à proximité immédiate du pieu à ausculter un forage parallèle à celui-ci et d'une profondeur supérieure de quelques mètres à celle du pieu. Ce forage est équipé sur toute la hauteur d'un tube en matière plastique rigide de diamètre voisin de 60 mm.

On descend dans le tube un accéléromètre et on mesure, à diverses profondeurs, le temps mis par un ébranlement, choc provoqué en tête du pieu ou de la structure solidaire du pieu, pour atteindre l'accéléromètre.

On trace la courbe temps / profondeur de l'accéléromètre. L'interprétation de cette courbe permet de situer la pointe du pieu à quelques décimètres près. On obtient également la vitesse moyenne du son dans le béton du pieu.

#### 10.3.1.2.2 Mise en oeuvre

Cette méthode est mise en oeuvre après l'exécution des pieux, et même après l'exécution complète de l'ouvrage. Les pieux essayés peuvent être choisis après leur exécution et au hasard.

Pendant les mesures, il y a lieu de veiller à ce que le tube soit plein d'eau jusqu'au niveau de l'accéléromètre et que le contact tube-sol soit assuré.

#### 10.3.1.2.3 Remarque

Les documents du marché peuvent prévoir quelques essais de ce type en laissant au maître de l'ouvrage le soin de choisir, après la fin des travaux de fondations, les pieux qui seront essayés. Dans le cadre de la surveillance des travaux, ces mesures permettent de vérifier les documents prévus par le Cahier des Clauses Spéciales art. 6.1 d.

### 10.3.1.3 Les essais d'impédance mécanique

#### 10.3.1.3.1 Principe de la méthode

Une force verticale sinusoïdale entretenue  $F$  est appliquée en tête du pieu au moyen d'un excitateur de vibration. On mesure à l'aide d'un capteur la vitesse sinusoïdale correspondante  $V$  de la tête du pieu pour une fréquence d'excitation  $f$ . Le rapport  $F/V$  est appelé impédance mécanique et son inverse  $V/F$  l'admittance mécanique.

L'analyse de la courbe qui représente l'admittance mécanique en fonction de la fréquence d'excitation permet d'obtenir des renseignements sur les différents paramètres suivants :

- longueur et section du pieu ;
- présence de défauts ;
- raideur de la couche d'ancrage du pieu ;
- qualité moyenne du béton.



### 10.3.1.3.2 Recommandations

- La tête du pieu est recouverte d'une chape de mortier de manière à obtenir une surface d'appui lisse et horizontale.
- La méthode de l'impédance mécanique est à déconseiller si l'élanement du pieu est supérieur à 20 ou si le pieu est fiché sur une trop grande hauteur dans des sols entraînant un amortissement important de l'énergie de propagation.
- L'existence d'une excroissance du fût à une certaine profondeur peut rendre impossible la détection d'anomalies graves, par exemple étranglements, situées en dessous de ce niveau.
- L'interprétation de ces mesures implique la connaissance aussi complète que possible des conditions d'exécution du pieu ainsi que de la nature du sol.

### 10.3.1.4 Les carottages mécaniques

#### 10.3.1.4.1 Objet

Les carottages mécaniques continus permettent de vérifier de façon précise la résistance et l'homogénéité du béton du pieu, le niveau et la nature des anomalies, la qualité du contact sol-pieu. Etant donné qu'il s'agit d'un moyen de contrôle onéreux, les carottages mécaniques ne sont effectués le plus souvent qu'après l'exécution d'essais soniques par transparence ou des essais d'impédance mécanique.

Les carottes de béton prélevées font généralement l'objet d'essais en laboratoire.

Dès que l'élanement du pieu est important, il est très difficile de maintenir le carottage dans le pieu et par conséquent de le carotter sur toute sa hauteur.

#### 10.3.1.4.2 Carottage de la pointe du pieu

Si l'on veut vérifier à coup sûr la qualité du contact sol-pieu, il est possible de prévoir, au moment de l'exécution des fondations, la mise en place d'un tube guide métallique, de diamètre supérieur à 100 mm, fixé sur la cage d'armature et arrêté à 1 m environ au-dessus de la base du pieu. Il faut que ce tube soit fermé à sa base par un bouchon facile à détruire avec l'outil de carottage (par exemple : plâtre). Le carottage mécanique est effectué à l'intérieur du tube guide jusqu'à une profondeur de 1,50 m environ sous la pointe du pieu.

Le tube guide peut également être utilisé comme tube d'auscultation dans le cas d'essais soniques par transparence. Il permet, en outre, d'injecter sous la pointe du pieu lorsqu'un défaut de contact sol-pieu a été détecté.

#### 10.3.1.4.3 Examen par caméra de télévision

Dans certains cas particuliers, le carottage mécanique peut être complété par un examen des parois du forage au moyen d'une caméra miniature de télévision, à prises de vues axiales ou latérales.

Pour avoir des images exploitables, il est nécessaire de nettoyer avec soin le forage, de le remplir d'eau claire et de le laisser reposer plusieurs heures.

L'examen par caméra de télévision est particulièrement recommandé lorsque l'on veut faire une observation précise de la qualité du contact sol-pieu.

#### 10.3.1.4.4 Recommandations

- Le béton doit avoir un âge minimal de 8 jours pour pouvoir être carotté.
- Le diamètre du carottier n'est pas inférieur en général à 75 mm. On n'emploie que des carottiers doubles.
- Le carottage mécanique est réalisé dans l'axe de l'élément de fondation, de façon à réduire le risque de sortir du fût avant d'avoir atteint la base. Le réglage de la direction du sondage est fait avec une grande précision.

### 10.3.2 Les essais de contrôle de portance

Les essais de contrôle de portance sont des essais de chargement statique qui intéressent les pieux finis de l'ouvrage. Lorsque ces essais sont prévus dans les documents particuliers du marché, il est souhaitable de ne désigner les pieux d'essai qu'après leur exécution en les choisissant si possible parmi les pieux les plus chargés ou parmi les pieux qui sont situés dans les zones présentant les moins bonnes caractéristiques géotechniques. Le choix de ces pieux

appartient au maître d'oeuvre.

Les essais de contrôle de portance ont pour objet de vérifier que la charge nominale des pieux est conforme à celle fixée à partir de l'étude géotechnique. Ils ne permettent pas en général, contrairement aux essais préliminaires, de revoir le dimensionnement des pieux de l'ouvrage.

La réalisation d'essais de contrôle de portance peut également être décidée en cours de travaux sur des pieux qui ont fait l'objet de difficultés d'exécution ou qui présentent des anomalies mises en évidence par l'une des méthodes de contrôle du fût (art. 10.3.1)).

De même que les essais préliminaires, les essais de contrôle de portance consistent à éprouver les pieux en leur appliquant des efforts de même nature que ceux qui seront transmis par l'ouvrage : chargement vertical, arrachement, sollicitations horizontales. Ces pieux peuvent être équipés d'extensomètres placés à l'intérieur de forages exécutés dans le fût du pieu.

La charge d'épreuve est généralement la charge à l'ELS majorée de 40 %.

Ces essais sont conduits selon un programme défini par le maître d'oeuvre.

## Chapitre 11 Calcul des fondations profondes soumises à charge axiale (Commentaire)

**Attention** : Les chapitres 10 et 11 de la présente norme expérimentale constituent un commentaire.

### 11.1 Principe de calcul

Lorsque la nature et la qualité des sols sont telles qu'elles ne permettent pas de fondations directes pour une structure déterminée, il est fait appel aux fondations profondes, qui transmettent la majorité des efforts extérieurs au niveau des horizons résistants. Le présent chapitre ne donne pas des règles de calcul d'application obligatoire mais propose seulement des méthodes de calcul qui pourront être rendues contractuelles si le maître de l'ouvrage, sur avis du maître d'oeuvre, en décide ainsi. Il sera notamment précisé dans ce cas si le tableau IV doit être ou non préféré au tableau IV bis. <sup>1</sup>

Tableau IV Valeurs des coefficients  $k_c$  et  $\alpha$  (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

Nature du sol	$q_c$ (kPa)	Facteur de portance $k_c$ $q_p = k_c q_c$		Coefficient $\alpha$ $q_s = q_c / \alpha$				Valeur maximale *** de $q_s$ en kPa					
		Pieu foré	Pieu battu	Pieu foré		Pieu battu		Pieu foré		Pieu battu		Pieu injecté	
				Fût béton	tubé	Fût béton	Fût métal	Fût béton	tubé	Fût béton	Fût métal	Faible pression	Haute pression
Argile molle * et vase	0 à 2 000	0,4	0,5	30	30	30	30	15	15	15	15	35	
Argile moyennement consistante	2 000 à 5 000	0,35	0,45	40	80	40	80	(80)35	(80)35	(80)35	35	80	≥ 120
Argile raide à très raide	> 5 000	0,45	0,55	60	120	60	120	(80)35	(80)35	(80)35	35	80	≥ 200
Limon ou sable lâche	0 - 2 500	0,4	0,5	(60)120	150	(60)80	(120)160	35	35	35	35	80	
Sable moyennement compact	2 500 à 10 000	0,4	0,5	(100)180	(200)250	100	(200)250	(120)80	(80)35	(120)80	80	120	≥ 200
Sable compact à très compact	> 10 000	0,3	0,4	150	300 (200)	150	300 (200)	(150)120	(120)80	(150)120	120	150	≥ 200
Craie molle	≤ 5 000	0,2	0,3	100	120	100	120	35	35	35	35	80	
Craie altérée fragmentée	> 5 000	0,2	0,4	60	80	60	80	(150)120	(120)80	(150)120	120	150	≥ 200

\* Il faut être extrêmement prudent pour la prise en compte du frottement latéral des argiles molles et des vases. En effet, le moindre tassement du sol, même sous son poids propre, peut entraîner une inversion du frottement qui se transforme en frottement négatif.

\*\* Les valeurs entre parenthèses correspondent, pour les pieux forés, à une exécution soignée du pieu et une technologie de mise en oeuvre susceptible de remanier au minimum le sol au contact du fût. Pour les pieux battus, par contre, elles correspondent à un resserrement du sol sur le pieu après battage.

\*\*\* Pour les pieux forés  $\varnothing \geq 1,50$  m, les puits coulés à pleine fouille, les barrettes, il y a lieu de faire un abattement de 15 % sur ces valeurs en l'absence des résultats expérimentaux.

Tableau IV bis Méthode pénétrométrique. Valeurs des coefficients  $k_c$  et  $\alpha$  et de  $q_{si}$  d'après la commission de concentration des bureaux de contrôle

Nature du fût		Fût en béton			Fût métallique		
Mode de mise en place		battu ou injecté faible pression	foré	foré en ** grand diamètre	profilé *** H battu	battu	foré
Valeur maximale de $q_{si}$ (kPa)		120	100 120 dans la craie	80 100 dans la craie	120	50	25
Nature du sol	facteur de portance $K_c q_p = k_c q_c$	coefficient $\alpha$ $q_{si} = q_c / \alpha$					
argile et craie	0,50	40	60	70	45	80	160
Limon et sols intermédiaires	0,45	50	70	80	55	100	200
sable lâche $q_c < 5$ MPa	0,40	80	120	140	90	160	330
sable moyen $5 \leq q_c < 20$ MPa	0,40	120	180	200	140	250	500
sable dense $q_c \geq 20$ MPa	0,40	160	240	270	180	330	660
graves	0,35	160	240	270	180	330	660

\* Cette colonne concerne les pieux forés de diamètre  $> 1,50$  m, les barrettes et les puits coulés à pleine fouille en l'absence de justificatifs expérimentaux sur le site.

\*\* Pour ce type de pieu, le coefficient  $\alpha$  est mal connu et doit être utilisé dans l'argile et le limon.

1

La méthode détaillée a été publiée par G. Philipponnat « Méthode pratique de calcul d'un pieu isolé à l'aide du pénétromètre statique » - Revue Française de Géotechnique n° 10, février 1980.

### Mode de fonctionnement d'une fondation profonde

Les sollicitations s'exerçant sur une fondation profonde sont de deux types :

- sollicitations statiques ou dynamiques dues à l'ouvrage et au poids propre de la fondation, décomposées en une charge verticale  $Q_v$ , une charge horizontale  $Q_h$ , et éventuellement un moment  $M$  en tête ;

sollicitations dues au sol en contact avec la fondation. Par exemple : un remblai, un stockage ou toute autre surcharge reposant sur une couche de sol compressible au voisinage d'un pieu, provoque, dans la zone compressible et les sols sus-jacents :

- a un frottement négatif
- b une poussée horizontale.

A ces sollicitations, peuvent s'ajouter des actions de type particulier, en cas de séisme par exemple.

Ces sollicitations sont simultanément équilibrées :

en ce qui concerne les efforts transmis suivant l'axe de la fondation par :

- a le frottement latéral  $Q_s$  dans les couches résistantes, ou plus généralement dans les couches où le déplacement du pieu est supérieur à celui du sol environnant ;
- b la résistance de pointe  $Q_p$  s'exerçant sous la base de la fondation ;

- en ce qui concerne les efforts autres qu'axiaux, par la réaction du sol, dans les zones où le déplacement du pieu dans le sens des efforts est supérieur à celui du sol environnant.

## 11.2 Eléments d'information nécessaires au calcul

Des considérations précédentes, il résulte que le comportement d'une fondation profonde ne peut s'analyser sans une bonne connaissance :

- de la nature et des caractéristiques du sol : (coupes de sondages, résultats des essais mécaniques en laboratoire ou en place et données hydrogéologiques) ;
- de la nature, des caractéristiques et des méthodes d'exécution de la fondation proprement dite ;
- des sollicitations de service ou exceptionnelles ;
- de la nature et du comportement de la structure à fonder.

## 11.3 Méthodes de calcul prévisionnelles de la charge limite d'un pieu isolé sous charges axiales

### 11.3.1 Définitions

Plusieurs méthodes sont actuellement utilisées qui font appel soit à des essais réalisés en laboratoire sur échantillons, soit à des essais en place : pénétromètre statique ou pressiomètre.

Avant de décrire les méthodes de calcul préconisées, il convient de préciser un certain nombre de définitions (fig. 1).

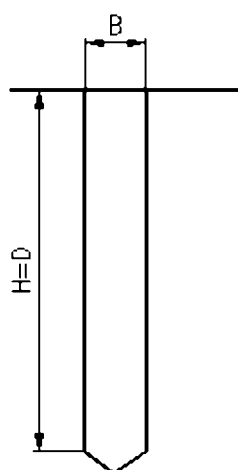


Figure 1a  
Monocouche  
sol homogène

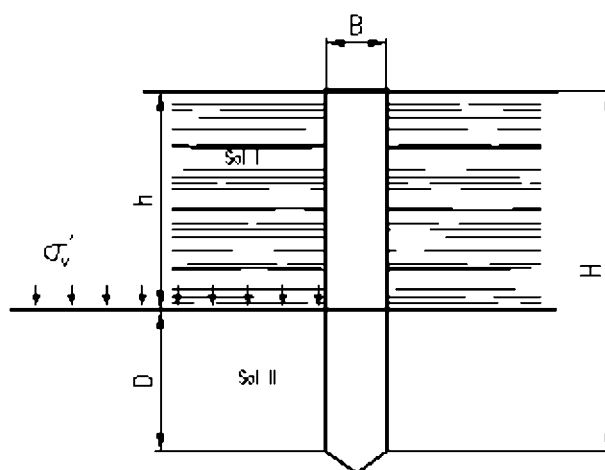


Figure 1b  
Multicouche

Ces définitions s'appliquent aussi bien aux méthodes de calcul faisant appel aux essais de laboratoire qu'aux essais de pénétration statique.

Les méthodes pressiométriques possèdent leurs propres règles et leurs propres définitions.

#### 11.3.1.1 Couche d'ancrage

On appelle *couche d'ancrage* la couche dans laquelle est arrêtée la base de la fondation. Dans ce qui suit, on admettra que la couche d'ancrage règne sur une profondeur d'au moins  $4B$  sous la base de la fondation ( $B$  = diamètre du pieu ou largeur de la fondation).

#### 11.3.1.2 Monocouche

Une fondation est fichée dans un *monocouche* lorsque le sol peut être considéré comme homogène depuis sa surface jusqu'à au moins  $4B$  sous la base de la fondation.

#### 11.3.1.3 Multicouche

Une fondation est fichée dans un *multicouche* lorsqu'elle traverse au moins deux couches de caractéristiques mécaniques ou pondérales différentes.

Un *multicouche « vrai »* est un multicouche pour lequel la contrainte effective  $\sigma$  due au poids des terres sus-jacentes au toit de la couche d'ancrage répond à la condition :  $\sigma'_v > 0,1 \text{ MPa}$ .

#### 11.3.1.4 Longueur et ancrage

La *longueur*  $H$  de la fondation est la distance entre la surface du sol et la base de la fondation.

Si une fondation profonde est ancrée dans un multicouche, l'*ancrage*  $D$  est la distance entre le toit de la couche d'ancrage et la base de la fondation (fig. 1 b).

Si une fondation profonde est ancrée dans un monocouche, la *longueur*  $H$  est égale à l'ancrage  $D$  (fig. 1 a).

### 11.3.1.5 Fondation profonde

Une fondation est considérée comme profonde lorsque son élancement  $H/B$  est supérieur ou égal à 6 et sa *longueur*  $H$  au moins égale à 3 mètres.

$$H/B > 6 \quad H > 3 \text{ m}$$

### 11.3.1.6 Ancrage critique $D_c$

L'ancrage critique  $D_c$  est la valeur de l'ancrage  $D$  à partir de laquelle la contrainte à la rupture sous la pointe de la fondation profonde  $q_{pr}$  n'augmente plus et atteint une valeur constante appelée : contrainte limite de pointe  $q_{pl}$ , qui est fonction de la nature et de la compacité du sol.

L'ancrage critique est fonction de  $B$  et de  $q_{pl}$ .

Dans la plupart des cas courants, on peut adopter les valeurs ci-après de  $D_c$  :

- dans un monocouche :  $D_c = 6B$  avec un minimum de 3 mètres.  
Autrement dit, si la fondation est profonde l'ancrage critique est atteint par définition ;
- dans un multicouche vrai, l'ancrage critique sera pris égal à 3  $B$ .

La justification des règles simplifiées ci-dessus tient au fait que l'ancrage critique ne dépasse fortement les valeurs déduites de ces règles que pour les sols très résistants ( $q_{pl}$  élevé) et dans ce dernier cas, la charge limite (rupture du sol) devient surabondante par rapport à la charge ultime (rupture du matériau constitutif du pieu).

Dans le cas d'un multicouche où  $\sigma'_v < 0,1$  MPa, l'ancrage critique sera calculé par interpolation entre les valeurs de  $D_c$  correspondant au multicouche vrai et au monocouche.

## 11.3.2 Essais de laboratoire

### 11.3.2.1 Caractéristiques mécaniques du sol

Les méthodes de calcul à partir des essais de laboratoire reposent sur la détermination des caractéristiques de cisaillement :

- Caractéristiques effectives :  $c'$  et  $\varphi'$  pour les sols pulvérulents
- Caractéristiques apparentes :
  - $c_{uu}$  (associé à  $\varphi_{uu} = 0$ ) pour les argiles saturées
  - $c_u$  et  $\varphi_u$  pour les sols intermédiaires.

Ces caractéristiques sont cependant parfois difficilement mesurables et les facteurs de portance nécessaires à la détermination de la résistance de pointe varient dans de très fortes proportions avec l'angle de frottement interne.

### 11.3.2.2 Résistance de pointe

Lorsque l'ancrage  $D$  d'un pieu est égal à  $D_c$ , la contrainte limite de pointe  $q_{pl}$  est calculée de la manière suivante :

#### 11.3.2.2.1 Cas des sols pulvérulents et sols cohérents

$$q_{pl} = a N_{qmax} + \lambda c N_{cmax}$$

$a$  = terme constant ayant les dimensions d'une pression :

$$a = 0,05 \text{ MPa}$$

#### 11.3.2.2.2 Cas des sols purement cohérents ( $\varphi_{uu} = 0$ )

$$q_{pl} = 7 \lambda c_{uu}$$

$\lambda$  = coefficient de forme

$\lambda = 1,3$  pour les pieux à section circulaire ou carrée

$\lambda = 1 + 0,3 (B/L)$  pour les barrettes et parois de forme allongée ( $L$  = plus grande dimension de la section horizontale de la fondation)

$c$  et  $c_{uu}$  = cohésion du sol de la couche d'ancrage

$N_{q\max}$  et  $N_{c\max}$  = facteurs de force portante sans dimension pour fondation profonde, fonctions de l'angle de frottement interne.

Le tableau 1 ci-après reproduit les valeurs proposées par Caquot et Kérisel :

$\varphi'$ en degré	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N_{q\max}$	1	1,8	3,4	6,5	13	26	57	134	355	1096
$N_{c\max}$	7	9,6	13,8	20,6	32	54	97	190	421	1095

Lorsque  $D < D_c$ , la résistance de pointe est déterminée par la formule :

$$q_{pr} = a \frac{D}{D_c} N_{q\max} + \lambda c \left[ N_{c\min} + \frac{D}{D_c} (N_{c\max} - N_{c\min}) \right]$$

avec  $N_{c\min}$  = facteur de cohésion minimal.

$\varphi'$ en degré	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$N_{c\min}$	5,14	6,5	8,5	11	15	21	30	46	75	135

#### Remarques

- En pratique on ne tient pas compte du poids de la fondation profonde qui est en grande partie compensé par le poids des terres enlevées.
- La valeur réelle du coefficient  $\lambda$  en fonction de la forme de la fondation profonde étant assez mal connue, il est possible d'adopter des valeurs comprises entre 1 et 1,3 sur la base de résultats expérimentaux.
- La méthode de calcul proposé ne tient pas compte du mode d'exécution des pieux, ce qui peut entraîner des différences entre le résultat du calcul et la résistance de pointe réelle.

Dans le cas de pieux forés, subsiste toujours un risque de remaniement du sol le long du fût et sous la pointe. Ce phénomène peut mettre en défaut les formules précédentes du calcul de la portance.

#### 11.3.2.3 Frottement latéral

Le frottement latéral total mobilisable à la rupture est donné par la formule :

$$Q_s = p \sum_{i=1}^n h_i q_{si}$$

avec  $p$  = périmètre du pieu

$h_i$  = épaisseur de la couche  $i$  ( $h_i = D$  pour la couche d'ancrage)

$q_{si}$  = frottement latéral unitaire de la couche  $i$

$n$  = nombre de couches traversées ou atteintes par le pieu.

Toute la question revient donc à estimer le frottement latéral unitaire dans chacune de ces couches.

##### 11.3.2.3.1 Sols purement cohérents

Le frottement latéral unitaire à la rupture  $q_s$  est, pour les sols purement cohérents, évalué à partir de la cohésion non drainée  $c_{uu}$  par la formule :

$$q_s = \beta c_{uu} \quad (5)$$

avec  $\beta$  = coefficient généralement  $\leq 1$ . ;  $\beta$  dépend de la cohésion, du type de pieu et du délai de repos.

Les valeurs données par la formule (4) doivent être bornées supérieurement par les limites fixées par les tableaux IV et IV bis.

Le tableau III ci-après donne quelques valeurs maximales de  $\beta$  pour certains types de pieux.

Tableau III Valeurs maximales du coefficient  $\beta$  pour quelques pieux types

Type de pieu	Nature du fût	$\beta$
Puits et pieux forés de gros diamètre	Fût en béton	0,6
Pieux forés	Fût en béton	0,7
	Fût métal	0,5
Pieux battus	Fût en béton	0,7
	Fût métal	0,5
Pieux injectés	Faible pression	1
	Forte pression	1,5

Les différents types de pieux mentionnés dans le tableau III ci-dessus sont à relier à la classification DTU n° 13.2 « Fondations profondes » de la façon suivante :

- *Pieux forés à fût béton et puits*
  - Pieux forés simples et barrettes
  - Pieux forés à la boue et barrettes
  - Pieux forés à la tarière creuse
  - Pieux forés tubés (à tubage récupéré)
  - Pieux vissés moulés
  - Puits
  - Micropieux type II.
- *Pieux forés à fût métal*
  - Pieux forés chemisés (à tubage perdu).
- *Pieux battus à fût en béton*
  - Pieux battus préfabriqués
  - Pieux tubulaires précontraints
  - Pieux en béton foncés
  - Pieux battus pilonnés
  - Pieux battus moulés.
- *Pieux battus à fût métallique*
  - Pieux métalliques battus (H, tubulaire, palpieux)
  - Pieux métalliques foncés
- *Pieux injectés sous faible pression, inférieure à la pression limite*
  - Pieux battus enrobés
  - Micropieux type I
  - Micropieux type III.
- *Pieux injectés sous haute pression supérieure à la pression limite*
  - Pieux injectés sous haute pression de diamètre > 250 mm.
  - Micropieux du type III (selon condition d'exécution) et IV.

#### 11.3.2.3.2 Sols pulvérulents

En l'absence de résultats expérimentaux sur le site même, il y a lieu de retenir pour les calculs préliminaires les valeurs maximales de  $q_s$  données dans les tableaux IV et IV bis ci-après.

#### 11.3.2.3.3 Sols intermédiaires (sols cohérents $c \neq 0$ et $\phi \neq 0$ ).

Le sol doit être assimilé soit à un sol pulvérulent (tableaux IV et IV bis), soit à un sol purement cohérent (tableau III), selon son caractère prédominant. En effet, il est déconseillé d'additionner le frottement dû à la cohésion à celui dû à l'angle de frottement interne, les résultats risquant d'être trop optimistes.

### 11.3.3 Essais en place

#### 11.3.3.1 Pénétromètre statique (NF P 94-113)

Exécuter un sondage au *pénétromètre statique* consiste à faire pénétrer dans le sol, par vérinage à vitesse constante, une pointe conique portée par un train de tiges et à mesurer, de manière continue ou à intervalles déterminés, la résistance à la pénétration du cône.

La résistance à la pénétration du cône  $q_c$  est obtenue en divisant la force sur le cône  $Q_c$  (ou effort de pointe) par la surface  $A_c$  de la plus grande section droite de la pointe :

$$q_c = Q_c / A_c$$

Dans le cas des pieux isolés, la résistance en pointe et celle du frottement latéral se calculent à partir de la contrainte limite de pointe  $q_c$  du pénétromètre.

La résistance de pointe  $Q_p$  d'un pieu est donnée par la relation :

$$Q_p = A \cdot q_p$$

avec :

$A$  = aire de la section droite de la pointe du pieu

$q_p$  = contrainte limite donnée par la relation  $q_p = k_p q_c$

Les valeurs du facteur  $k_c$  sont données à titre d'exemple dans les tableaux IV et IV bis ci-avant, pour un encastrement supérieur à l'ancrage critique. Elles dépendent de la nature du sol et du type de pieu.

Le frottement latéral total mobilisable à la rupture est donné par la formule :

avec :

$p \cdot h_{si}$  = surface latérale du pieu dans la couche de sol considérée

$p$  = périmètre du pieu

$q_{si}$  = frottement latéral unitaire dans une couche donnée, est déduit empiriquement de la résistance unitaire de pointe  $q_c$  mesurée à la même profondeur par la relation :

$$q_{si} = q_{ci} / \alpha$$

Le facteur  $\alpha$  dépend de la nature du sol et du type de pieu ; des valeurs en sont données aux tableaux IV et IV bis.

Lorsque le pénétromètre donne des valeurs du frottement latéral global, celles-ci seront utilement comparées aux valeurs déduites des tableaux IV et IV bis.

Il serait très dangereux de prendre les valeurs de frottement unitaire mesurées au manchon. Les tableaux IV et IV bis ont été établis pour des pénétromètres à cône simple (hauteur inférieure ou égale au diamètre du cône).

#### 11.3.3.2 Le pressiomètre Ménard (NF P 94-110)

L'essai au pressiomètre Ménard est un essai de chargement de sol en place. Il consiste à dilater une sonde cylindrique, mise en place dans le terrain dans un forage.

L'essai permet d'obtenir une courbe contrainte déformation d'où l'on déduit les paramètres pressiométriques suivants :

- la pression limite  $P_l$
- le module pressiométrique  $E_M$

*Le calcul du terme de pointe* d'un pieu se fait par application d'une formule semi-empirique liant directement la pression limite mesurée  $P_l$  à la pression de rupture sous la pointe  $q_p$

$$q_p - q_o = k (P_{le} - p_o)$$

où  $p_o$  et  $q_o$  sont des pressions horizontales et verticales totales des terres au niveau considéré, termes qui peuvent le plus souvent être négligés.  $P_{le}$ , pression limite équivalente, est une pression limite pondérée, qui tient compte de la distribution des pressions limites mesurées de part et d'autre de la pointe du pieu.

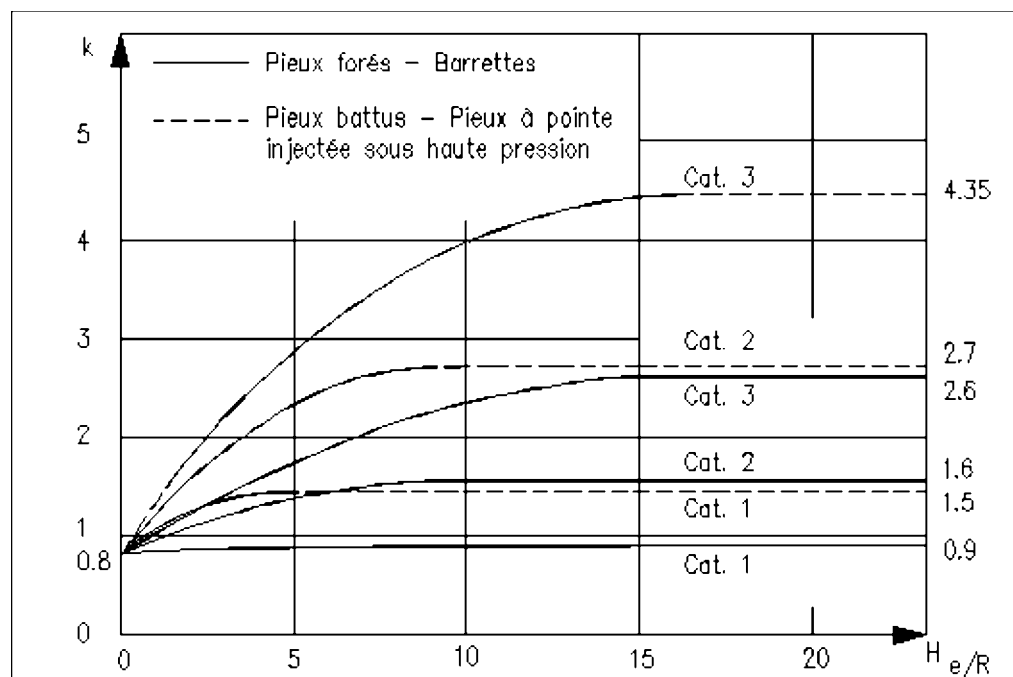
$$P_{le} = \sqrt[3]{P_{11} P_{12} P_{13}}$$

Les trois valeurs sous le radical représentent respectivement les pressions limites mesurées un mètre au-dessus de la pointe du pieu, au niveau de cette pointe et un mètre au-dessous.

Le facteur  $k$  est appelé facteur de portance. Il dépend de la nature et de la compacité du terrain, du type de pieu, de sa mise en oeuvre, ainsi que de son encastrement. C'est un coefficient empirique, pour lequel les valeurs proposées à la figure 3 tiennent compte des résultats expérimentaux de chargement de fondations profondes réelles.

Figure 3 (d'après M. Bustamante et L. GIANESELLI)





Les sols sont classés en trois catégories, définies dans le tableau V, incluant la nature et la pression limite  $P_l$  du sol. Pour les sols de caractéristiques intermédiaires, il est recommandé d'interpoler.

Tableau V (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

Pression limite $P_l$ (MPa)	Nature des sols	Catégorie
< 0,7	Argile molle	1
< 0,8	Limon et craie molle	
< 0,7	Sable argileux et limoneux ou vasard lâche	
1,0 à 1,8	Sable et grave moyennement compacts	2
1,2 à 3,0	Argile et limon compacts	
1,5 à 4,0	Marne et marno-calcaire	
1,0 à 2,5	Craie altérée	
2,5 à 4,0	Roche altérée	
> 3,0	Craie fragmentée	
> 4,5	Marne très compacte	3
> 2,5	Sable et gravier compacts à très compacts	
> 4,5	Roche fragmentée	

En raison du nombre trop faible de résultats expérimentaux, les valeurs K correspondant à la catégorie 3 sont à utiliser avec prudence.

La catégorie déterminée, la valeur de  $k$  est lue sur les abaques de la figure 3, où  $H_e/R$  représente l'encastrement relatif de la fondation ( $H_e$  pour un sol homogène est la longueur de la fondation,  $R$  en étant la demi-dimension transversale). Il apparaît, pour chacune des courbes indiquées, un encastrement dit « critique » au-delà duquel la valeur de  $k$  reste constante.

Le frottement latéral unitaire  $q_s$  est également obtenu directement à partir de la pression limite  $P_l$ . Les valeurs proposées aux figures 4, 5 et au tableau VI tiennent compte des résultats des essais expérimentaux récemment réalisés.

Figure 4 (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

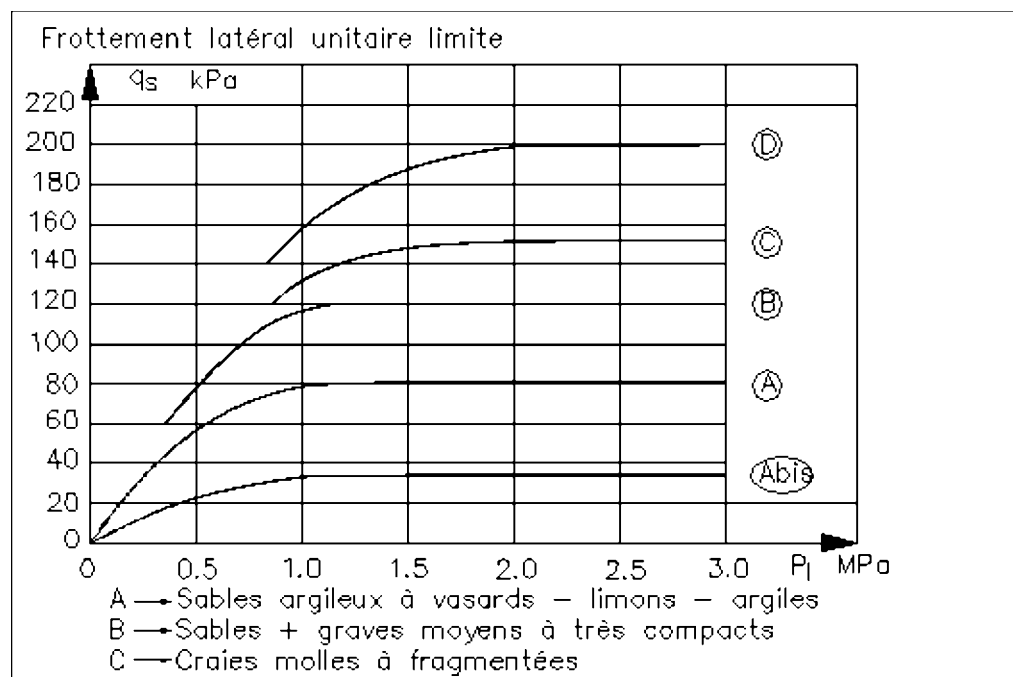


Figure 5 (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

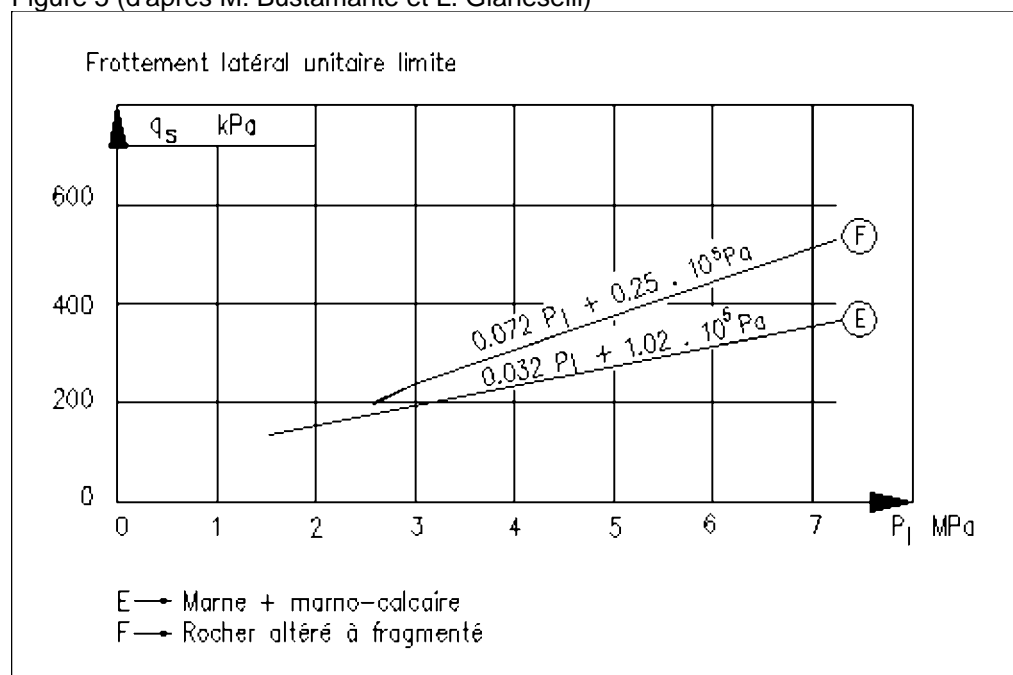


Tableau VI Courbe de frottement latéral à considérer (d'après M. Bustamante et L. Gianceselli)

Nature du sol	Pression limite $P_l$ (MPa)	Mise en oeuvre et nature du pieu					Injectés	
		Foré Béton	Foré-Tubé Béton	Battu Métal	Béton	Métal	Faible pression	Haute pression
Argile molle, limon et sable lâche, craie molle	0 à 0,7	Abis	Abis	Abis	Abis	Abis	A	-
Argile moyennement consistante et limon	1,2 à 2,0	(A)* Abis	(A)* Abis	Abis	(A)* Abis	Abis	A	D**
Argile raide à très raide	> 2,0	(A)* Abis	(A)* Abis	Abis	(A)* Abis	A Abis	A	D
Sable et grave moyennement compacts	1 à 2	(B)* A	(A)* Abis	Abis	(B)* A	A	B	≥ D
Sable et grave compacts à très compacts	> 2,5	(C)* B	(B)* A	A	(C)* B	B	C	≥ D
Craie altérée à fragmentée	> 1	(C)* B	(B)* A	A	(C)* B	B	C	≥ D
Marne et marno-calcaire	1,5 à 4	(E)* C	(C)* B	B	E***	E***	E	F
Marne très compacte	> 4,5	E	-	-	-	-	F	> F
Roche altérée	2,5 à 4	F	F	-	F***	F***	≥ F	> F
Roche fragmentée	> 4,5	F	-	-	-	-	≥ F	> F

\* Les valeurs entre parenthèses () correspondent, pour les pieux forés, à une exécution soignée du pieu et une technologie de mise en oeuvre susceptible de remanier au minimum le sol au contact du fût. Pour les pieux battus, par contre, à un resserrement du sol sur le pieu après battage.

\*\* Préconisé pour des sols dont  $P_l \geq 1,5$  MPa.

\*\*\* Seulement pour les cas où le battage est possible.

### 11.3.3.3 Pénétromètre dynamique (NF P 94-114) et SPT (battage de carottier NF P 94-116)

Un géotechnicien expérimenté peut procéder à un dimensionnement de fondations profondes à l'aide des résultats obtenus à partir de ces deux méthodes. Cependant, leur caractère semi-empirique fait recommander de les utiliser en corrélation avec les résultats obtenus par les autres méthodes décrites dans le présent document.

En ce qui concerne le pénétromètre dynamique, le nombre de matériels existants et la diversité des formules de battage font qu'actuellement cette méthode n'est envisagée *que comme moyen complémentaire*, intéressant et peu coûteux, d'investigation, notamment pour différencier les horizons d'un site.

Le SPT est un essai d'origine américaine, plus empirique que le précédent, mais qui bénéficie d'une très longue expérience en particulier en pays anglo-saxons. L'équipement est normalisé. L'interprétation, faite à partir d'abaques et de relations empiriques, relève d'une grande diversité de méthodes et de formules de corrélation ; elle nécessite, par conséquent, une grande expérience pour les exploiter. Ces corrélations concernent aussi bien les caractéristiques de cisaillement que les charges limites des fondations, les conditions de tassement ou même de liquéfaction sous séisme.

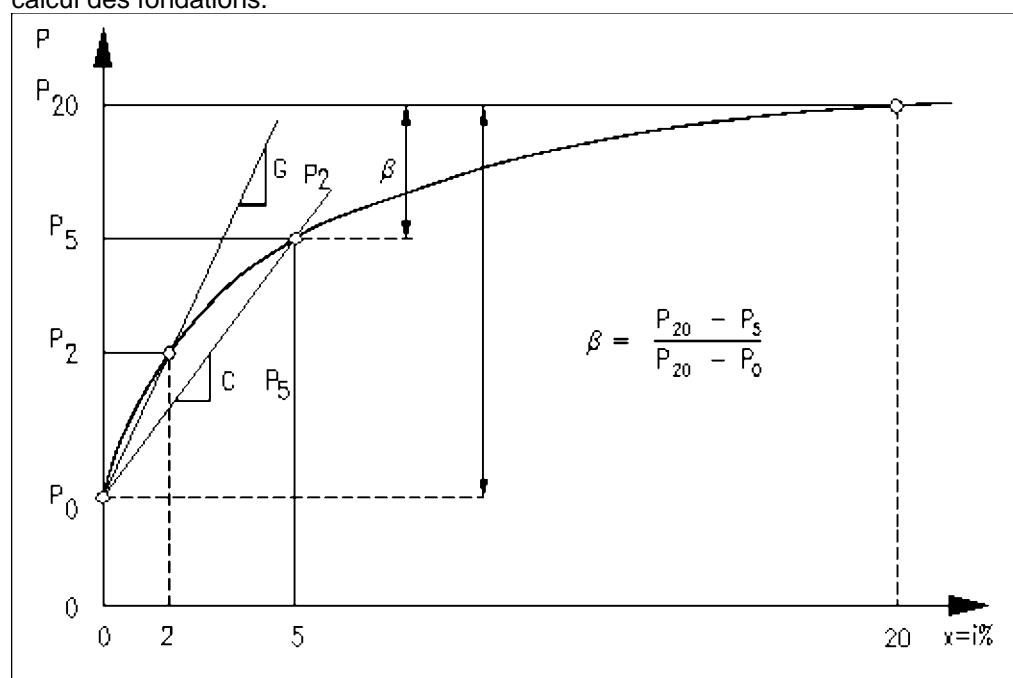
Le SPT est essentiellement adapté aux sols sableux.

Ces deux méthodes peuvent en tout cas donner au minimum un certain nombre d'informations telles que :

- repérage des différents horizons d'un site ;
- extrapolation de l'identification des horizons faite par sondages mécaniques ;
- extrapolation des résultats obtenus à l'aide d'autres essais géotechniques ;
- estimation du niveau d'arrêt des pieux battus ou des palplanches.

#### 11.3.3.4 Le pressiomètre autoforeur

Récemment développé dans les laboratoires des Ponts et Chaussées, le pressiomètre autoforeur permet la réalisation d'essais d'expansion cylindrique, dans un sol fin, qui n'a pas été perturbé par la réalisation d'un forage préalable. Outil de recherche sur le comportement des sols et des ouvrages, les LPC ont établi pour cet appareillage de mesure un essai de référence et des règles d'exploitation semi-empiriques pour le calcul des fondations dans les sols fins. De la courbe d'expansion (fig. 6), on déduit des caractéristiques de pression et de déformation utilisables pour le calcul des fondations.



On détermine particulièrement, pour chaque essai, le coefficient d'identification des sols

$$\beta = (P_{20} - P_5) / (P_{20} - P_0)$$

où  $P_i$  est la pression à  $i\%$  de déformation ( $x = \Delta V/V_0 = i\%$ )

Le paramètre  $\beta$  reflète le caractère plus ou moins tendu de la courbe pressiométrique et est en relation avec le type de sol. Le tableau VII donne les plages de valeurs caractéristiques de  $\beta$  pour différents sols.

Tableau VII (d'après F. Baguelin et J.F. Jézéquel)

Cat. de sol	Nature du sol	Plage de $\beta$ en %	$\beta$ moyen en %
1	Argiles sensibles	$< 25$	
2	Argiles	$25 < \beta < 40$	32,5
3	Silts et sables compressibles	$35 < \beta < 50$	42,5
4	Sables dilatants	$45 < \beta < 60$	52,5
5	Sables très dilatants	$\beta > 60$	

##### 11.3.3.4.1 Règles de calcul des fondations

De manière analogue aux règles pressiométriques précédentes, il a été mis au point des règles semi-empiriques permettant le calcul de la charge limite en pointe  $q_l$  avec :

$$q_l - q_0 = \psi (P_{20} - P_0)$$

$\psi$  coefficient de portance, est fonction de  $\beta$  et de l'encastrement relatif.

Pour le frottement latéral, les règles adoptées pour le pressiomètre standard représentées figures 4 et 5 et tableau VI peuvent être retenues. Une relation simple entre  $P_1$  et  $P_{20}$  pouvant convenir à cet usage, s'écrit :

$$P_1 = P_{20} ( (5/3) \beta + 0,5 )$$

## 11.4 Contraintes de calcul

Pour la vérification de la force portante d'une fondation profonde les valeurs limites de la résistance de pointe et du frottement latéral doivent être multipliées par les coefficients réducteurs donnés par le tableau ci-après.

	Etats limites	
	de service	ultimes
Résistance de pointe	0,33	0,5
Frottement latéral	0,5	0,75

### Liste des documents référencés

- #1 - Règles BAEL 91 (DTU P18-702) (mars 1992) : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites (Règle DTU de calcul retirée) + Amendement A1 (février 2000)
- #2 - DTU 13.11 (DTU P11-211/CCT) (mars 1988) : Fondations superficielles - Cahier des clauses techniques + Modificatif 1 (juin 1997) (Indice de classement : P11-211)
- #3 - DTU 13.2 (NF P11-212-2) (novembre 1994) : Travaux de fondations profondes pour le bâtiment - Partie 2 : Cahier des clauses spéciales (Indice de classement : P11-212-2)

### Liste des figures

- Figure de l'article : 1.3.2.2.2 Etats limites ultimes de résistance
- Figure de l'article : 4.2.2.1.3 Cages d'armature
- Figure de l'article : 4.2.3.4
- Figure de l'article : 4.2.3.4
- Figure de l'article : 4.2.3.6.2
- Figure de l'article : 4.2.3.7
- Figure de l'article : 4.4.1.1
- Figure de l'article : 5.3.3 Base élargie
- Figure de l'article : 10.2.2.1 Le battage (art. 1.2.1.1)
- Figure de l'article : 11.3.1 Définitions
- Figure 3 (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Figure 4 (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Figure 5 (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Figure de l'article : 11.3.3.4 Le pressiomètre autoforeur

### Liste des tableaux

- Tableau de l'article : 1.3.2.1.1 Résistance de calcul conventionnelle du béton
- Tableau de l'article : 2.2.4.1
- Tableau IV Valeurs des coefficients  $k_c$  et  $\alpha$  (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Tableau IV bis Méthode pénétrométrique. Valeurs des coefficients  $k_c$  et  $\alpha$  et de  $q_{si}$  d'après la commission de concentration des bureaux de contrôle
- Tableau de l'article : 11.3.2.2.2 Cas des sols purement cohérents ( $[\phi]_{uu} = 0$ )
- Tableau de l'article : 11.3.2.2.2 Cas des sols purement cohérents ( $[\phi]_{uu} = 0$ )
- Tableau III Valeurs maximales du coefficient  $\beta$  pour quelques pieux types
- Tableau V (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Tableau VI Courbe de frottement latéral à considérer (d'après M. Bustamante et L. Ganeselli)
- Tableau VII (d'après F. Baguelin et J.F. Jézéquel)
- Tableau de l'article : 11.4 Contraintes de calcul