

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 5

Les armatures des pieux forés



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 5

Les armatures des pieux forés



Collection

« Les références »

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

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

- ADP : Jean-François Brie
- Apave : Nathalie Borie
- Bureau Veritas Construction : Patrick Berthelot
- Cerema : Dominique Batista, Mathieu Feregotto, Frédéric Jeanpierre, Philippe Laheurte, Sophie Legrand, Loïc Leurent, Olivier Malassingne, Cécile Maurel, Pierre Paya, Jérôme Saliba (les pilotes de groupe) - David Bicard, Bruno Boulet, Lionel Fix, Laura Kerner, Benjamin Landry, Nicolas Rouxel
- Chartreuse ingénierie : Jean-Marc Grezlak
- Durmeyer : Vincent Keller
- Directions Interdépartementales des routes (DIR) : Frédéric Marty (DIR Méditerranée et DIR Massif Central), Jean-François Messenger (DIR SO)
- Rinent Laboratoires : Corinne Horb
- SNCF : Florence Belut, Vivien Darras, Jérôme Simonnet
- Socotec : Luis Carpinteiro (Socotec, puis Ginger CEBTP)

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Les pieux forés pour les ouvrages d'art et le bâtiment - Guide de réalisation - Fascicule 5 - Les armatures des pieux forés.* Lyon : Cerema, 2025.
Collection : Les références.
ISBN : 978-2-37180-714-3 (pdf)

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

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

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

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

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

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

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

Photo de couverture : Franki-Fondation.

AVANT-PROPOS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique.

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

Sommaire

Remerciements	2
----------------------	----------

Avant-propos	4
---------------------	----------

CHAPITRE 1

Introduction	9
---------------------	----------

1.1 - Généralités	10
1.2 - Types d'armatures des pieux forés et usages	13
1.3 - Caractéristiques des aciers structuraux pour les pieux forés	14
1.4 - Caractéristiques des matériaux autres que l'acier destinés aux armatures	16

CHAPITRE 2

Cages d'armature	19
-------------------------	-----------

2.1 - Cages en acier	21
2.1.1 - Aciers de structure pour les cages d'armature	21
2.1.2 - Les armatures longitudinales	22
2.1.3 - Les armatures transversales	25
2.1.4 - Certification des armatures	31
2.2 - Cages en matériaux composites	31
2.2.1 - Avantages et inconvénients des cages en polymères renforcés de fibres de verre	32
2.2.2 - Armatures en polymères renforcés de fibres de verre	32
2.3 - Présentation de dessins de ferrailage	33

CHAPITRE 3

Éléments en acier	35
--------------------------	-----------

3.1 - Utilité de ces éléments	36
3.2 - Désignation des éléments d'acier	38
3.3 - Nuances d'acier	38
3.4 - Géométrie des éléments d'acier	38

CHAPITRE 4**Fibres pour béton****41**

4.1 - Utilité des fibres	42
4.2 - Caractéristiques et géométries des fibres	42
4.3 - Mises en œuvre des fibres	42

CHAPITRE 5**Les dispositifs particuliers****45**

5.1 - Cerces de montage ou de gabarit	46
5.2 - Dispositifs de centrage : écarteurs, cales	48
5.3 - Armatures de rigidification des cages	51
5.4 - Forme de la base de la cage	52
5.5 - Cages de freinage et poteaux préfabriqués	53
5.6 - Armatures de levage et ances de positionnement	54
5.7 - Serre-câbles	56
5.8 - Les tubes dans le pieu	57

CHAPITRE 6**Enrobage des armatures****61**

6.1 - Valeurs d'enrobage pour les cages d'armature	62
6.2 - Valeurs d'enrobage pour les profilés	62
6.3 - Valeurs d'enrobage pour les armatures en polymères renforcés en fibres de verre	63

CHAPITRE 7**Assemblage des armatures****65**

7.1 - Fixation des armatures transversales	66
7.2 - Assemblage des tronçons de cage	68
7.3 - Assemblage et fixation des tubes de réservation	71
7.4 - Spécificités des cages d'armature des pieux à la tarière creuse	74
7.5 - Assemblage des éléments porteurs en acier	75
7.6 - Soudage des armatures en acier	75
7.7 - Dispositions constructives parasismiques pour les cages	76
7.8 - Contrôles d'assemblage de la cage	79

CHAPITRE 8

Chargement - Transport - Déchargement - Stockage 81

8.1 - Actions et risques encourus	82
8.2 - Matériel de levage et de manutention	83
8.3 - Préparation et conditionnement des colis - Chargement	85
8.4 - Transport des armatures, cages et tubes	88
8.5 - Déchargement - Stockage	88

CHAPITRE 9

Mise en position verticale et mise en place de la cage ou du profilé dans le forage 91

9.1 - Levage des cages ou des profilés et leur mise en position verticale	92
9.2 - Mise en place de la cage d'armature ou du profilé dans le forage pour les pieux de classe 1	94
9.3 - Mise en place de la cage d'armature ou du profilé dans le forage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)	94
9.4 - Risques associés au levage et à la mise en place des cages d'armature	94

CHAPITRE 10

Les contrôles au niveau du ferrailage des pieux 99

Bibliographie 101

Ouvrages	102
Articles	102
Guides et rapports internationaux	102
Fascicules du CCTG (Cahier des clauses techniques générales)	103
Normes afnor et fascicules de documentation	103

Les parties comportant ce fond de couleur concernent exclusivement les pieux de classe 2, c'est-à-dire réalisés avec la technique de la tarière creuse (cf. chapitre 3 du fascicule 1). Certaines préconisations de la classe 1 ne sont pas directement transposables à la classe 2.

CHAPITRE 1

Introduction

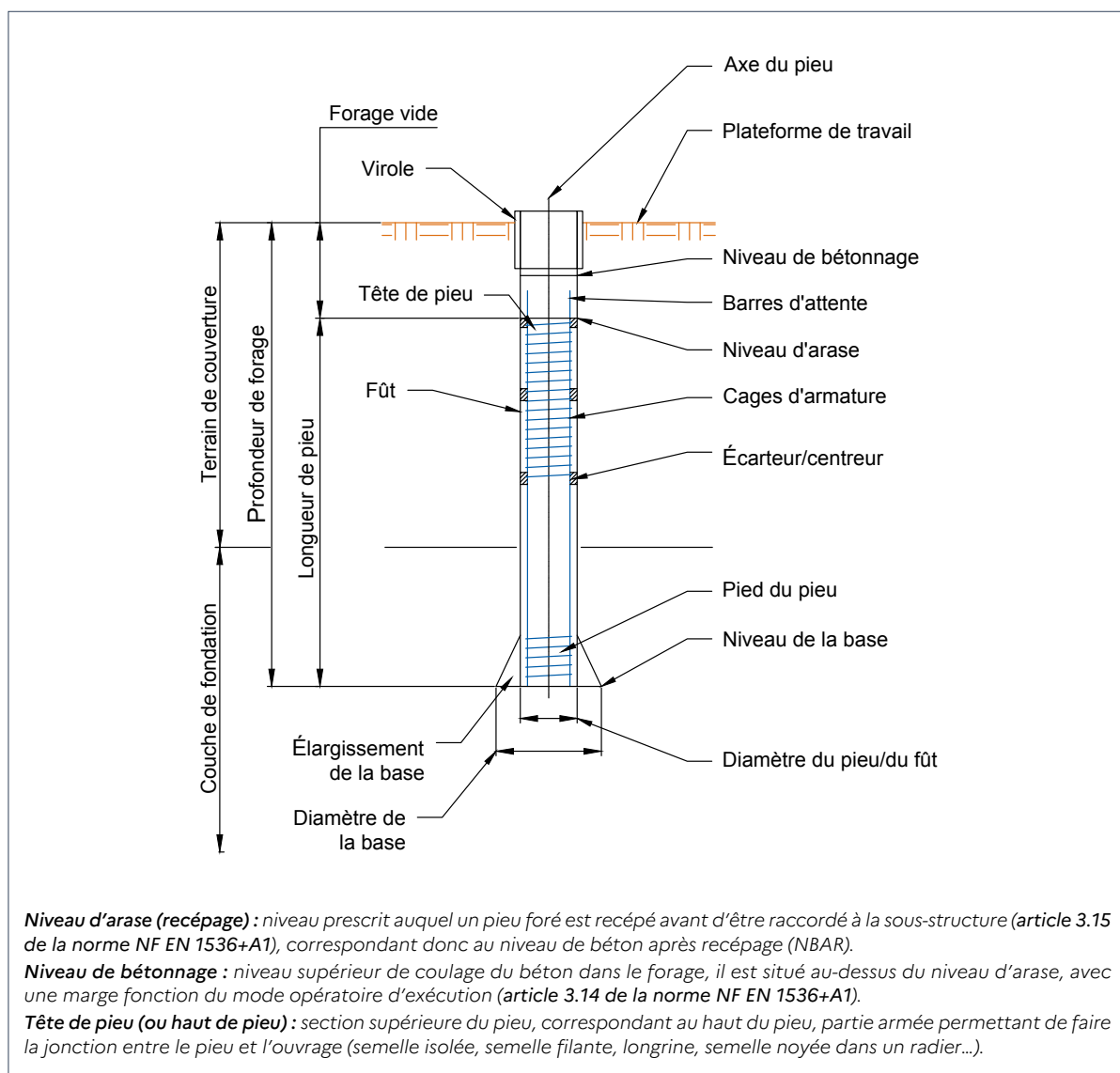
1. INTRODUCTION

1.1 - GÉNÉRALITÉS

Appellation des différents éléments constituant le pieu

La Figure 5.1 présente un exemple de pieu avec la désignation de certaines terminologies.

Figure 5.1 : Pieu foré – Désignations
(extrait de la norme NF EN 1536+A1)



Utilité des armatures

Le terme « armatures » désigne **des éléments servant à reprendre des efforts** (de traction, de flexion, d'effort tranchant et/ou de torsion) au sein des pieux ou barrettes. Les pieux forés destinés **aux fondations des ouvrages d'art** sont armés sur toute leur hauteur et **ceux des bâtiments** sur au moins une hauteur nécessaire et suffisante pour reprendre les efforts précités (*Note 1*). On distingue deux catégories :

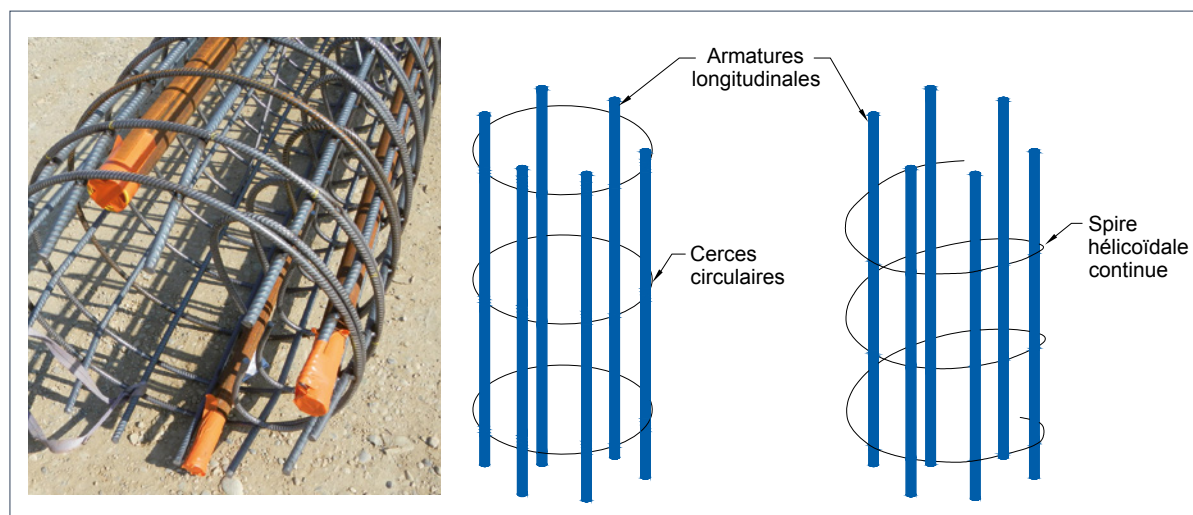
- **les armatures de structure** (Figure 5.2), qui sont justifiées par le calcul pour le bon fonctionnement du pieu (cf. le chapitre 2 « Cages d'armature », le chapitre 3 « Éléments en acier » et le chapitre 4 « Fibres pour béton » – *Note 2*) ;
- **les armatures de montage** destinées à fixer et à maintenir l'armature structurale au bon emplacement (cf. chapitre 5 « Les dispositifs particuliers ») et peuvent être éventuellement ensuite enlevées (*Note 3*).

Note 1 : les pieux de bâtiment peuvent ne pas être armés en cas d'efforts verticaux centrés.

Note 2 : entrent dans la première catégorie les « armatures minimales » qui ne répondent pas à une reprise explicite d'efforts et/ou qui ne font pas l'objet d'un calcul (par exemple, une armature sur la hauteur de terrains compressibles), mais qui participent au bon fonctionnement des pieux pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Note 3 : c'est le cas par exemple d'armatures de contreventement empêchant la déformation des cages lors des manutentions, qui peuvent être enlevées une fois la cage mise verticalement au moment de la descente dans le forage.

Figure 5.2 : Exemples d'armatures



Pieux en béton non armé

Les pieux forés en béton non armé sont **destinés à ne travailler généralement qu'en compression**⁽¹⁾ et ne peuvent pas être utilisés dans les ouvrages d'art ; les parties supérieures de ces pieux (Figure 5.3) sont alors généralement munies de quatre barres d'attente de type acier doux de diamètre 12 mm qui servent pour le repérage du centre du pieu.

Ainsi conçus, ces pieux sont **très sensibles aux chocs** et doivent faire l'objet d'une vigilance particulière lors de phases **de terrassement** à proximité.

Dans le cas de pieux **en arase basse supérieure à 2 m sous le niveau de la plateforme**, les articles 12.2.1 (4) et (5) de la norme NF P94-262 COMPIL1 imposent la mise en place de cage d'armature d'une longueur de 4 m au minimum sous le niveau de béton après recépage (NBAR) dans le pieu, de manière à renforcer la partie supérieure la plus sensible (Figure 5.4).

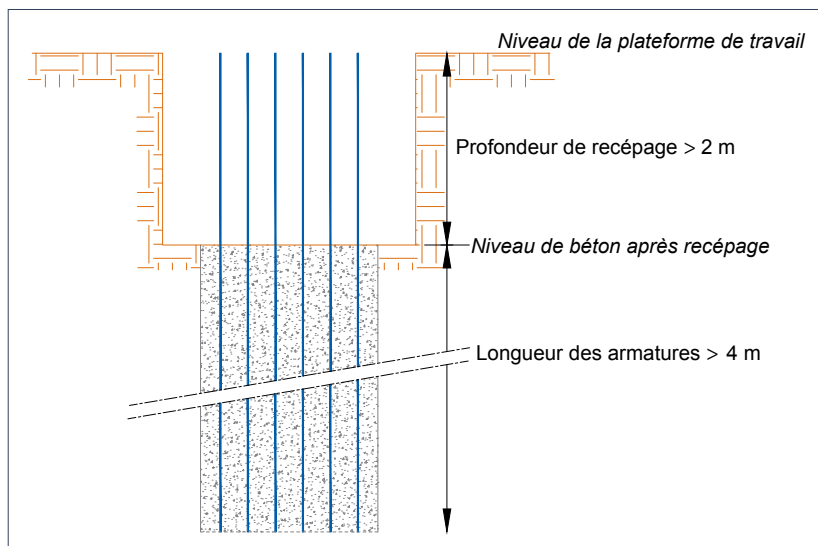
De même, l'article 7.1.7 de la norme NF EN 1536+A1 recommande de renforcer les pieux sur toute longueur traversant **des sols mous ou lâches**.

1. Se référer à l'article 12.2.1 de la norme NF P94-262 COMPIL1 pour connaître tous les cas.

Figure 5.3 : Exemple d'armatures de tête pour les pieux non armés toute hauteur



Figure 5.4 : Mise en place des cages en cas d'arase basse de plus de 2 m



Réalisation de la cage d'armature

À part quelques cas très particuliers (pieux de gros diamètre dans des terrains raides et imperméables par exemple), il est évidemment difficile, voire impossible, de réaliser la cage d'armature dans un pieu en place. Elle doit donc être préfabriquée et façonnée en usine ou sur chantier, puis descendue ensuite dans le forage.

La mise en place des armatures peut se faire :

- avant le bétonnage : cas des pieux de classe 1 ;
- après la mise en œuvre du béton : cas des pieux de classe 2 (tarière creuse) ou exceptionnellement de pieux de classe 1 (Note).

Les éléments constituant la cage d'armature sont présentés dans le chapitre 2, les dispositifs particuliers (cerces de montage, écarteurs, cales...) dans le chapitre 5 et l'assemblage de la cage d'armature est traité dans le chapitre 7.

Note : des cages courtes de pieux de classe 1 peuvent également être mises en place après bétonnage ; cette disposition permet un meilleur réglage en altimétrie, en particulier dans le cas des pieux avec tube récupéré.

1.2 - TYPES D'ARMATURES DES PIEUX FORÉS ET USAGES

Les différents types d'armatures pour les pieux forés sont :

- **les cages en acier** (Figure 5.5 et chapitre 2), dites classiques, les plus utilisées, composées d'aciers longitudinaux (cf. § 2.1.2) et transversaux, cerces ou spires (cf. § 2.1.3) ;
- **les éléments en acier** tels les palplanches, les tubes, les profilés (cf. chapitre 3) ;
- **les matériaux autres que l'acier** formant des cages : armatures en polymères renforcés de fibres de verre (PRF – Figure 5.6), de carbone, ou de basalte (*Note*) respectivement PRFV, PRFC et PRFB (cf. § 2.2) ;
- **les fibres** (cf. chapitre 4) en acier (Figure 5.7) ou synthétiques additionnées au béton (béton fibré).

Le prix à la tonne des aciers pour les cages classiques est du même ordre que celui des fibres, et est supérieur à celui des éléments en acier (profilés). **La comparaison du prix à la tonne avec les matériaux autres que l'acier**, comme les polymères renforcés de fibres de verre, même si généralement plus chers, est plus difficile, car :

- leurs performances mécaniques sont variables, contrairement à l'acier utilisé pour les fondations (Tableau 5.1) ;
- leur masse volumique est beaucoup plus faible que celle de l'acier.

Note : au moment de la rédaction de ce guide, il semblerait que seules les armatures en polymères renforcés en fibre de verre soient utilisées pour les fondations profondes.

Figure 5.5 : Exemple de cages en acier classiques

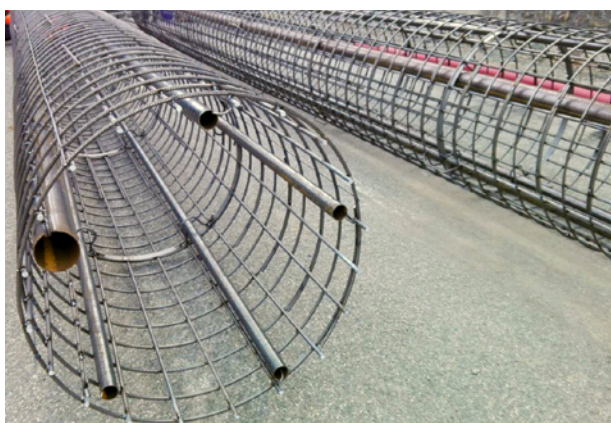


Figure 5.6 : Exemples d'armatures en polymères renforcés de fibres de verre avec un traitement de la surface différent (nervure et sablage)

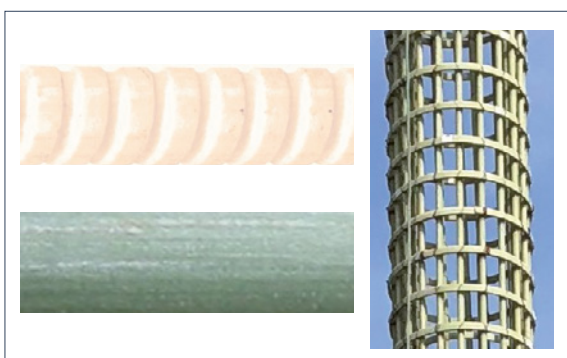


Figure 5.7 : Exemples de béton avec des fibres métalliques



1.3 - CARACTÉRISTIQUES DES ACIERS STRUCTURELS POUR LES PIEUX FORÉS

Les aciers pour les pieux forés

On distingue :

- **les aciers pour béton armé**, qui présentent une section quasi circulaire pleine, concernés entre autres par la norme NF EN 10080⁽²⁾ traitant des « Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – Généralités » et les normes NF A35-080 (parties 1 et 2) sur les « Aciers pour béton armé - Aciers soudables » ;
- **les aciers de construction métallique** présentant des sections de géométrie différente (en H, I, O, Z...), concernés entre autres par les normes NF EN 10025 (parties 1 à 6) pour les « Produits laminés à chaud en aciers de constructions non alliés » et NF EN 10020 sur la « Définition et classification des nuances d'acier ».

Il est possible, mais rare, de rencontrer des aciers de précontrainte et des aciers relevant d'ETE (évaluation technique européenne)⁽³⁾.

Le matériau acier

Usuellement, le terme acier désigne le matériau, ce dernier contient en masse plus de fer que tout autre élément et sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 %. Après coupe et façonnage, on parle d'armatures.

Aciers alliés, non alliés ou inoxydables

Suivant leur composition chimique, ces aciers sont définis et classifiés comme :

- **non alliés** (barres à haute adhérence) (Note 1) ;
- **inoxydables** (Note 2) ;
- **autres aciers alliés** (palplanches, par exemple).

*Note 1 : un acier est dit **non allié** lorsque sa teneur en éléments d'alliage est inférieure aux limites fixées pour les aciers alliés. Ces limites sont données dans le tableau 1 de la norme NF EN 10020.*

*Note 2 : un acier est dit **inoxydable** s'il contient au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. Les aciers inoxydables peuvent être employés pour armer des zones de pieux situées sous l'influence d'un marnage ou des fluctuations de nappe.*

Aciers de qualité et aciers spéciaux

Les aciers sont classifiés également en fonction des principales classes de qualité. On distingue les aciers alliés et non alliés, les aciers de qualité et les aciers spéciaux, selon les principales caractéristiques de propriétés (exigences de pureté, ténacité, grosseur de grain, formabilité...) ou d'applications (aciers à outils, aciers électriques, de construction mécanique...).

Caractéristiques mécaniques de l'acier

Les armatures en acier sont des produits longs, obtenus par laminage à chaud (barres, couronnes, palplanches, profilés, profils creux) ou formés à froid (couronnes, profils creux).

2. Norme en révision en 2023.

3. L'ETE est délivrée par un organisme d'évaluation technique, à la demande d'un fabricant, sur la base d'un document d'évaluation européen élaboré en amont.

Une caractéristique mécanique essentielle de l'acier tendu est **sa limite d'élasticité**. La Figure 5.8 tirée de l'Eurocode 2 (figure 3.7 dans la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1) présente des courbes contrainte-déformation pour :

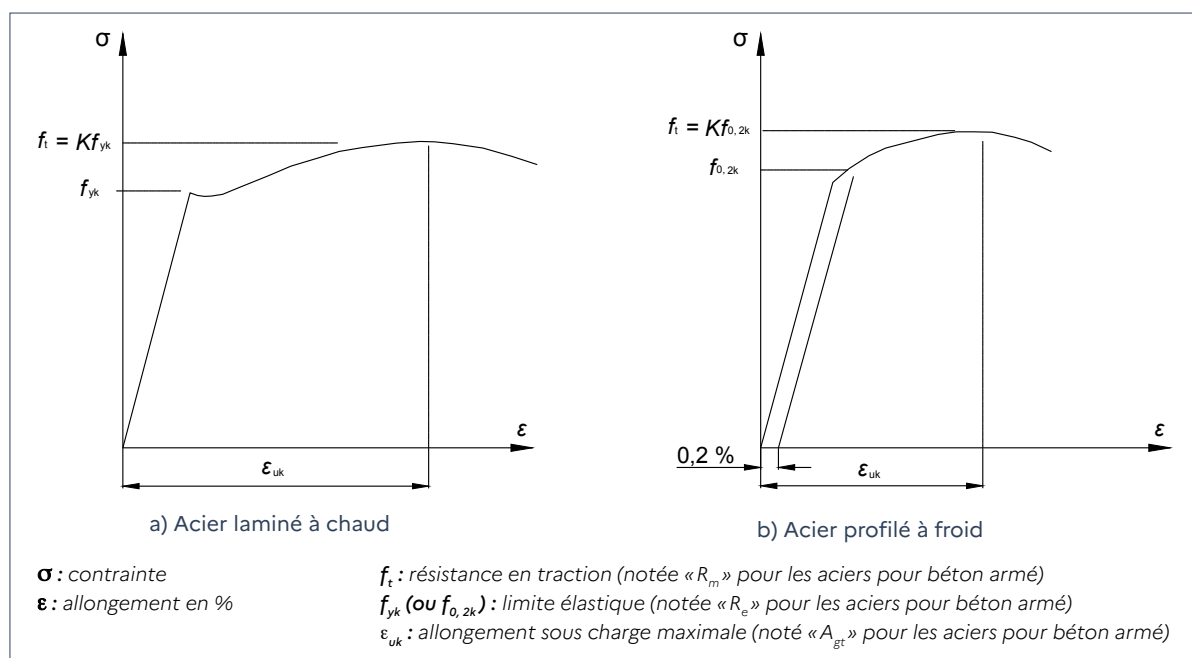
- **des aciers laminés à chaud types** : le diagramme des aciers laminés à chaud (Figure 5.8.a) comporte un palier de ductilité qui met en évidence la limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé f_{yk} (Note) ;
- **des aciers profilés à froid types** : le diagramme correspondant aux aciers profilés à froid (Figure 5.8.b) ne comporte pas de palier de ductilité, la phase d'écrouissage suit directement la phase élastique ; la valeur caractéristique de la limite d'élasticité est fixée égale à la contrainte correspondant à 0,2 % d'allongement résiduel.

Le domaine plastique, qui suit le domaine élastique, correspond aux déformations obtenues pour des contraintes comprises entre la limite élastique et la résistance en traction.

L'allongement sous charge maximale (ou allongement à la rupture) ϵ_{uk} (Note) est compris entre 60 et 150 % pour les aciers laminés à chaud [5.5] et entre 30 et 100 ‰ pour les aciers laminés à froid.

Note : le pourcentage d'extension totale à la force maximale est noté « A_{gt} » pour les aciers pour le béton armé, la résistance en traction « R_m » et la limite élastique « R_e ».

Figure 5.8 : Diagrammes types contrainte-déformation d'aciers de béton armé
(extrait de la figure 3.7 de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1)



Soudabilité

Quelle que soit la forme des armatures en acier (aciers en barres, en couronne, tubes, profilés...), l'acier employé pour les pieux forés est de type soudable.

Nomenclature des produits en acier pour béton armé

La nomenclature désignant les produits en acier a évolué depuis novembre 2005 ; par exemple le terme « Fe » qui désignait les aciers en barre a été remplacé par la lettre majuscule B⁽⁴⁾, toujours suivie de la valeur de la limite élastique du produit (en mégapascal, MPa), et l'on précise la classe de ductilité de l'acier par une lettre majuscule : acier B500B pour des aciers pour béton armé.

La classe de ductilité est explicitée au § 2.1.1.

Le terme « HA » qui désignait la haute adhérence des barres acier a également disparu de la nomenclature en vigueur ; il demeure toutefois encore usité par les acteurs professionnels.

4. B pour l'initiale de « Betonstahl », acier à béton en allemand.

Nomenclature des produits en acier pour construction métallique

Leur **dénomination** comporte la lettre « S » (structure) suivie de la limite élastique exprimée en MPa ; cette désignation est suivie d'un indice qui classe l'acier selon sa qualité (JR, J0, J1, J2...).

La **limite élastique** de ces produits est comprise entre 235 et 460 MPa. Pour un même effort, plus la nuance choisie est élevée, plus le ratio d'acier sera faible et plus le pieu sera déformable.

1.4 - CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX AUTRES QUE L'ACIER DESTINÉS AUX ARMATURES

Autres matériaux que l'acier

Il s'agit de matériaux d'origine minérale (verre – Figure 5.6 dans le § 1.2) ou organique (carbone, aramide). Ces matériaux additionnés en usine à de la résine et à d'autres composants forment des « **polymères renforcés de fibres** » (PRF).

La fibre d'aramide n'est pas utilisée à ce jour pour armer le béton de fondations profondes.

Caractéristiques mécaniques en traction des polymères renforcés de fibres (PRF)

Les polymères renforcés de fibres de verre possèdent un comportement mécanique de type élastique fragile [5.7] (alors qu'il est ductile pour les aciers). Le Tableau 5.1 désigne des ordres de grandeur de caractéristiques mécaniques en traction des différents matériaux.

Tableau 5.1 : Propriétés mécaniques usuelles en traction des armatures en polymères renforcés par des fibres [5.6] (PRF : polymères renforcés de fibres)

Matériau	Résistance limite (MPa)	Module élastique en traction (GPa)	Déformation à la rupture (%)
PRF de verre	517 - 1207	30 - 55	2 - 4,5
PRF de carbone	1200 - 2410	147 - 165	1 - 1,5
PRF d'aramide	1200 - 2068	50 - 74	2 - 2,6
Acier	483 - 690	200	> 10

Autres propriétés mécaniques des armatures en polymères renforcés de fibres de verre

Ces armatures composites sont anisotropes et présentent de faibles capacités en compression et en cisaillement [5.8].

Perte de résistance des armatures en polymères renforcés de fibres de verre au cours du temps

Ces armatures sont sensibles à l'effet du temps (température⁽⁵⁾, contraintes permanentes, alcalinité⁽⁶⁾...) et ont leurs **caractéristiques mécaniques qui diminuent au cours des années**⁽⁷⁾ (cf. « Exemple de caractéristiques d'armatures en polymères renforcés de fibres de verre » dans le § 2.2.2). La **durabilité** des ouvrages en béton armé par polymères renforcés de fibres de verre demeure de nos jours insuffisamment maîtrisée, ce qui conduit les codes de dimensionnement à suggérer l'utilisation de coefficients de sécurité importants en fonction du type de fibre utilisé [5.8].

5. Chute importante des propriétés mécaniques pour les températures supérieures à la température de transition vitreuse de la matrice polymère, ce qui pose problème en cas d'incendie.
6. Risque de dégradation par hydrolyse dans les milieux alcalins comme les bétons, en fonction de leurs constituants.
7. Cette sensibilité au fluage des armatures en polymères renforcés de fibres de verre est prise en compte dans le dimensionnement, en limitant la contrainte dans les armatures à long terme.

Adhérence des polymères renforcés de fibres de verre avec le béton

Leur adhérence avec le béton varie fortement suivant le type d'armatures utilisées en raison de la différence de traitement ou du relief de leur surface [5.7].

Référentiels pour les armatures en polymères renforcés de fibres de verre

Il n'y a pas de norme française pour les armatures en polymères renforcés de fibres de verre, à la parution du présent guide. Toutefois, les documents suivants peuvent donner des informations :

- le guide de construction du Conseil national de la recherche italien CNR-DT 203/2006⁽⁸⁾ (2007). Un chapitre spécifique des Eurocodes en relation avec le code italien existant est en cours d'élaboration par le Centre commun de recherche de la Commission européenne [5.7] ;
- le rapport de l'American Concrete Institute ACI 440.1R-15, 2015 ;
- les recommandations de la Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 1997 ;
- le guide de la Canadian Standards Association (CSA) ;
- le document scientifique et technique sur l'Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé réalisé par un groupe de travail de l'AFGC⁽⁹⁾, 2021.

Spécifications et certifications des armatures en polymères renforcés de fibres de verre

Le *Standard specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement* de l'ASTM International (ASTM D7957/D7957M-22, USA), publié en 2017, fournit des valeurs minimales attendues pour toutes les caractéristiques mécaniques et chimiques.

Des guides de certification d'armatures en polymères renforcés de fibres de verre, précisant les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques attendues pour ces dernières en vue d'une application en tant que renfort structurel, ont été publiés au Canada (CSA-S807 :F19), ainsi qu'aux États-Unis (ACI 440.5-08 et ACI 440.6-08) [5.7].

Bulletin technique

La fib (Fédération internationale du béton) a édité des recommandations pour l'utilisation des polymères renforcés de fibres de verre comme armatures dans les structures en béton armé (« FRP reinforcement in RC structures »⁽¹⁰⁾) dans le bulletin N°40 (*Technical report*) en 2007.

8. Des coefficients pour dimensionner les armatures en polymères renforcés de fibres de verre selon l'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1 COMPIL1) sont fournis dans le CNR-DT 203/2006.

9. AFGC : Association française de génie civil.

10. FRP : Fibre Reinforced Polymer, RC : Reinforced Concrete.



CHAPITRE 2

Cages d'armature

2. CAGES D'ARMATURE

Les cages d'armature peuvent être de forme (Figure 5.9) :

- circulaire (Note 1) ;
- carrée ;
- rectangulaire (barrettes) ;
- polygonale (Note 2) ;
- diverse - barrettes en T, en L, en croix... (Figure 5.10).

Note 1 : pour les pieux circulaires de fondations d'ouvrage de génie civil, il convient d'éviter les cages d'armature non symétriques.

Note 2 : les cages de forme polygonale ne sont pas autorisées en cas de sollicitations sismiques.

Figure 5.9 : Exemples de formes de cage

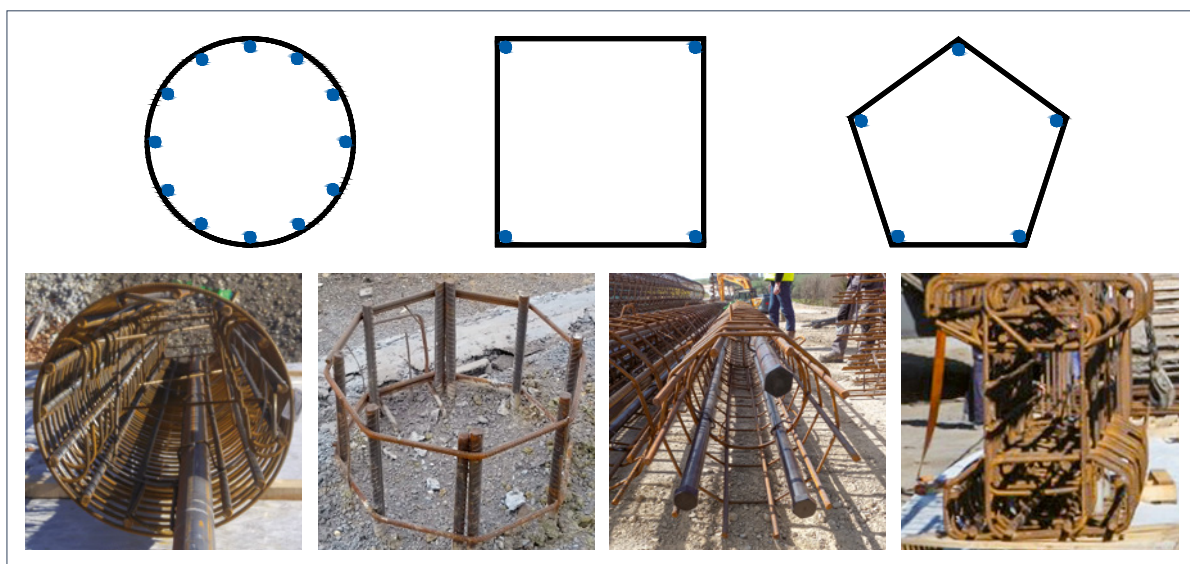


Figure 5.10 : Exemple de cages de barrettes



2.1 - CAGES EN ACIER

2.1.1 - ACIERS DE STRUCTURE POUR LES CAGES D'ARMATURE

Surface des aciers

Les aciers pour les cages d'armature ne doivent être ni galvanisés ni susceptibles de générer des effets électrostatiques entraînant une corrosion électrochimique de l'armature (cf. l'article 6.5.5 de la norme NF EN 1536+A1).

Ce sont **des aciers à haute adhérence**, dont la surface peut :

- **présenter des aspérités** (reliefs en creux appelés « empreintes » ou bien en saillie appelés « verrous ») grâce auxquelles l'adhérence du béton est améliorée ;
- **être lisse**, mais ces aciers comportent alors des restrictions d'utilisation et ne doivent pas constituer l'ossature de la cage. En effet, l'adhérence des ronds lisses pourrait être diminuée du fait de l'emploi d'un fluide stabilisateur lors du forage (suspension de bentonite, d'argile ou solution de polymères), ceci par le dépôt d'un film entre le béton et l'acier. En revanche, l'article 7.5.2.1 de la norme NF EN 1536+A1 exige que l'armature principale soit en acier haute adhérence si un fluide stabilisateur⁽¹¹⁾ constitué d'une suspension minérale et/ou d'une solution de polymères est utilisé.

Caractéristiques des aciers selon le corpus normatif

Les caractéristiques des aciers se traduisent normativement par **des prescriptions relatives** :

- à la soudabilité et à la composition chimique ;
- aux caractéristiques mécaniques en traction : limites d'élasticité et allongement sous charge maximale ;
- aux diamètres, sections, masses linéiques et tolérances ;
- à l'adhérence et à la géométrie de surfaces ;
- à l'aptitude au pliage (non-fragilité) ;
- à la résistance à la fatigue ;
- à l'aptitude au redressage après pliage ;
- au marquage.

Ductilité de l'acier (classes A, B, C) pour les aciers pour béton armé

Selon l'article 3.2.4 (1)P de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1, la **ductilité est définie** comme le rapport de la résistance en traction à la limite d'élasticité $(f_t/f_y)_k$, et par l'allongement sous charge maximale ϵ_{uk} (Figure 5.8 dans § 1.3 – Note 1). Les normes européennes et françaises distinguent **trois classes d'acier**⁽¹²⁾ (A, B et C) qui correspondent à des caractéristiques de ductilité différentes :

- **classe A** peu ductile : $2,5 \% \leq A_{gt}$ (Note 2) ;
- **classe B** moyennement ductile : $5 \% \leq A_{gt}$ (Note 2) ;
- **classe C** ductile (Note 3) : $7,5 \% \leq A_{gt}$ (Note 2).

Le tableau C1 de l'annexe C de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1 fournit les valeurs minimales de $(f_t/f_y)_k$ et les valeurs caractéristiques de l'allongement sous charge maximale ϵ_{uk} en fonction des classes de ductilité. Plus la ductilité est importante et plus l'allongement de l'acier sous charge maximale est grand.

Note 1 : le pourcentage d'extension totale à la force maximale est noté « A_{gt} » pour les aciers pour le béton armé.

Note 2 : ces valeurs d'allongement sous charge maximale des aciers pour béton armé sont issues du tableau 3 de la norme NF A35-080-1.

Note 3 : l'Eurocode 8-2 (article 5.2.1 de la norme NF EN 1998-2 COMPIL2) applicable aux ponts stipule que, dans les zones de rotules plastiques potentielles, les armatures longitudinales doivent être constituées d'un acier de classe C.

11. Les fluides stabilisateurs sont traités dans le chapitre 4 du fascicule 3.

12. Classe technique d'acier pour béton armé : classe technique d'acier, définie par ses exigences relatives à la limite d'élasticité, à la résistance à la traction et à la ductilité (article 3.1 de la norme NF A35-080-1).

Classes techniques d'acier utilisées pour les armatures en barre

La « **classe technique d'acier** » pour béton armé est définie par ses exigences relatives à la limite d'élasticité, à la résistance à la traction et à la ductilité (article 3.1 de la norme NF A35-080-1).

L'Eurocode 2 (NF EN 1992-1-1 COMPIL1) précise que la limite élastique des aciers est comprise entre 400 et 600 MPa (ce qui élimine de fait l'emploi des aciers doux). La valeur courante de cette limite pour l'acier utilisé en France est 500 MPa, et la classe technique d'acier la plus employée est la B500, de classe de ductilité A ou B ou C. **Les classes d'aciers** employées pour les armatures en barre sont :

- **B500A** jusqu'à 20 mm de diamètre ;
- **B500B** (Note), **B500C**, **B450B** et **B450C** jusqu'à 56 mm de diamètre.

La **masse volumique** des aciers de béton armé est de l'ordre 7 850 kg/m³ et leur **module d'élasticité** de 200 GPa (article 3.2.7 (3) et (4) de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1).

Note : de nombreux armaturiers utilisent du B500B pour les petits diamètres (inférieur à 14 mm).

Classes techniques d'acier utilisées pour les armatures en barre

Le Tableau 5.2 présente les principaux types d'armatures à béton utilisées en France.

**Tableau 5.2 : Diamètres, sections et masses pour certaines classes techniques d'acier
façonnées en barres et couronnes**

(extrait du tableau 2 de la norme NF A 35-080-1)

Diamètre nominal (mm)	Classe Technique d'acier					Section (mm ²)	Masse linéique (kg/m)
	B500A	B500B	B500C	B450B (*)	B450C (*)		
8	✓	✓	✓	✓	✓	50,3	0,39
10	✓	✓	✓	✓	✓	78,5	0,62
12	✓	✓	✓	✓	✓	113	0,89
14	✓	✓	✓	✓	✓	154	1,21
16	✓	✓	✓	✓	✓	201	1,58
20	✓	✓	✓	✓	✓	314	2,47
25		✓	✓	✓	✓	491	3,85
32		✓	✓	✓	✓	804	6,31
40		✓	✓	✓	✓	1 257	9,86

(*) Classes d'acier généralement peu utilisées en France.

2.1.2 - LES ARMATURES LONGITUDINALES

2.1.2.1 - Utilité des armatures longitudinales

Les armatures longitudinales constituent **les armatures principales**. Elles ont pour rôle de résister dans chaque section du pieu aux moments fléchissants calculés ou parasites ainsi qu'aux efforts de traction et dans certains cas, elles participent à la résistance aux efforts de compression de la section de béton armé. Ce sont toujours des armatures à haute adhérence qui sont choisies. Ces armatures sont aussi désignées sous le terme de « **filants** » ou **barres filantes**.

2.1.2.2 - Géométrie des armatures longitudinales

Diamètres des armatures longitudinales

Le diamètre des armatures longitudinales :

- ne doit pas être inférieur à 12 mm selon les articles 7.5.2.3 et 7.5.2.4 de la norme NF EN 1536+A1;
- peut aller jusqu'à 56 mm (Note) ; usuellement en France, le diamètre maximal utilisé est de 40 mm.

Note : l'emploi des plus gros diamètres permet de réduire le nombre de barres (sans descendre sous le nombre minimal requis au § 2.1.2.3), et d'améliorer la rigidification de la cage, ainsi que de faciliter la mise en place du béton. Il permet aussi de respecter les écartements réglementaires, notamment pour des dimensionnements aux séismes qui conduisent à ferrailer fortement les cages. Mais leur recouvrement est moins économique, car plus le diamètre est important, plus la longueur de recouvrement et la quantité d'acier augmentent. Néanmoins, le béton armé est un matériau composite qui fonctionne d'autant mieux que le diamètre des armatures est faible.

Le diamètre des barres et couronnes en acier soudable de classe technique B500A est limité à 20 mm.

Au-dessus de 32 mm de diamètre, le coût d'achat est plus élevé, car les diamètres sont moins courants.

Longueurs des armatures longitudinales

Les longueurs des armatures sont variables et sont fonction des contraintes à reprendre. Cependant, les longueurs entières des barres sont généralement limitées à 16,5 m à cause de la problématique du transport.

Pour des armatures de longueur supérieure à 16,5 m, des autorisations spécifiques sont à prévoir (cf. § 8.4) ou un sectionnement des cages est à réaliser (cf. § 7.2).

2.1.2.3 - Dispositions constructives des armatures longitudinales

Espacement des armatures longitudinales

Les armatures longitudinales sont **généralement réparties selon un espacement uniforme sur le périmètre** (Note 1) suivant les génératrices d'un cylindre (Figure 5.2 dans le § 1.1) ou sur les grandes faces de la barrette, suivant un quadrillage. Un espacement inégal entre les barres longitudinales nécessite des dispositions particulières pour maintenir la cage d'armature dans sa position correcte lors de la mise en place dans le forage et lors du bétonnage.

Les paquets de barres sont plutôt rencontrés en barrettes. On évite d'avoir trois barres (Note 2), mais si la section d'acier nécessaire l'exige, on privilégie l'augmentation des diamètres, afin de passer à deux barres (Figure 5.11.b).

Les écartements (ou distances horizontales), nu à nu, entre les barres longitudinales ou les paquets de barres d'un lit sont indiqués dans le Tableau 5.3.

Note 1 : pour des pieux de soutènement, les filants peuvent ne pas être disposés symétriquement.

Note 2 : à défaut, la disposition en présence de trois barres peut être réalisée selon différentes configurations (Figure 5.11). La position des barres selon la Figure 5.11.a peut engendrer des problèmes de bétonnage. S'il est envisagé des paquets de trois barres en triangle (Figure 5.11.b), il sera problématique de les ancrer en tête, car les crosses seront très difficiles, voire impossibles à réaliser. Cette disposition de trois barres en triangle pourra être présente dans le fût, mais pas en attente. D'autre part, la mise en place avec les cerces de montage n'est pas aisée. Il en résulte que les paquets de trois barres en triangle sont très rarement utilisés en pieu, contrairement aux barrettes. La position des barres concentriques (Figure 5.11.c) est peu usitée en France.

Tableau 5.3 : Distance nu à nu pour les armatures longitudinales

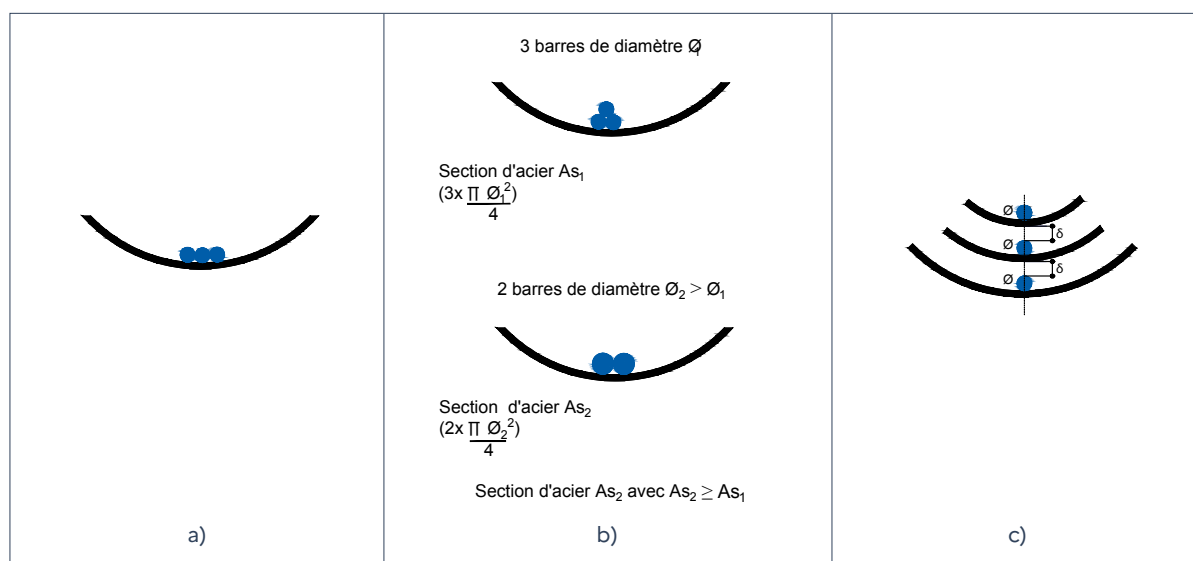
(armature de diamètre égal ou supérieur à 12 mm selon les articles 7.5.2.3 et 7.5.2.4 de la norme NF EN 1536+A1)

		Nombre de barres	Distance nu à nu (mm)	
			Minimale	Maximale
Barres isolées et paquets de barres	Zone courante	≥ 6	100 selon l'article 7.5.2.6 de la NF EN1536+A1	200 pour les ponts selon l'annexe Q de la norme NF P 94 262 COMPIL1 (article Q.3.4.2.2 (2) - Note)
	Zone de recouvrement	≥ 12	80 si $D_{\text{max granulat}} < 20 \text{ mm}$ selon l'article 7.5.2.7 de la NF EN1536+A1	$5 \times (\varnothing_{\text{armatures}}/2 + \text{enrobage})$ selon l'article 6.4.3.1(2) de la norme NF P 94 262 COMPIL1 400 selon l'article 7.5.2.5 de la norme NF EN1536+A1

Note : cette limitation de l'écartement conduit à rajouter des barres longitudinales, augmentant ainsi la rigidité de la cage, ce qui est bénéfique pour les opérations de manutention.

Figure 5.11 : Configuration tolérée pour trois barres

($\delta \geq \max(2 \varnothing, 1,5 \times D_{\text{max granulat}})$) selon l'article 7.5.2.9 de la norme NF EN 1536+A1)



Lits d'armatures longitudinales concentriques

Les lits d'armatures longitudinales concentriques ne sont pas recommandés. Toutefois, si de tels lits sont utilisés, on veillera à :

- disposer les barres selon un même rayon, l'une derrière l'autre ;
- s'assurer que la distance minimale nu à nu entre armatures d'un même lit soit égale à la plus grande des deux valeurs suivantes (Figures 5.11 et 5.12) :
 - 2 fois le diamètre d'une barre,
 - 1,5 fois la taille des plus gros granulats du béton.

Cette configuration peut se rencontrer quand on insère par exemple une cage de forme carrée en tête d'une cage circulaire, afin d'assurer une jonction pieu-radier ou semelle, lorsque la quantité de filants nécessaire est trop importante pour être disposée exclusivement sur la cage circulaire (Figure 5.12).

Nombre de barres ou filants

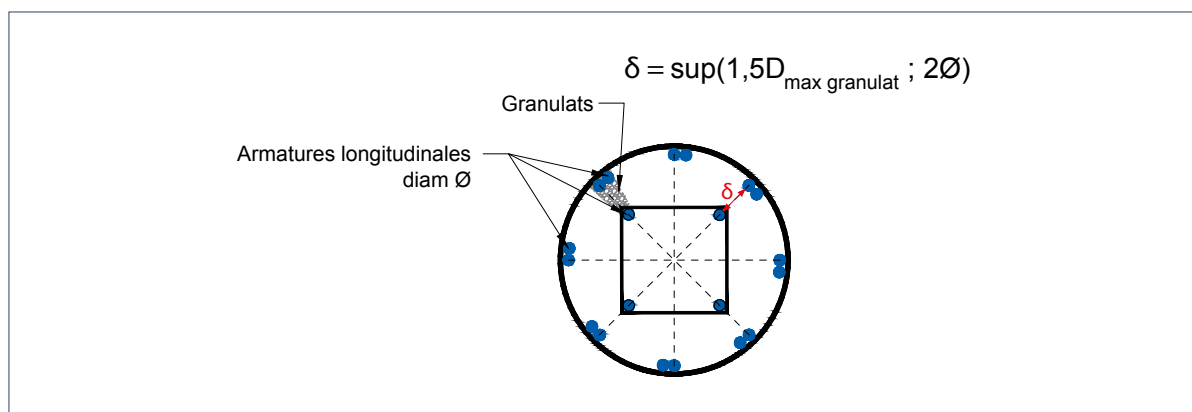
Leur nombre ne doit pas être inférieur :

- à quatre barres, pour les cages circulaires comme pour les cages carrées selon l'article 7.5.2.3 de la norme NF EN 1536+A1 (Note) ;
- à trois barres par mètre linéaire sur chaque face de cage pour les barrettes selon l'article 7.5.2.4 de la norme NF EN 1536+A1).

La synthèse sur le nombre de barres est présentée dans le Tableau 5.3.

Note : pour les cages circulaires, il est recommandé de prévoir au minimum six filants⁽¹³⁾ selon l'article Q.3.4.2.2 de l'annexe Q de la norme NF P 94 262 COMPIL1, relative à la conception des ponts.

Figure 5.12 : Distance minimale entre lits d'armatures concentriques



Sections minimales d'armatures longitudinales

Le Tableau 5.4 indique les sections minimales d'armatures longitudinales en fonction de la section du pieu foré selon la norme NF EN 1536+A1.

Tableau 5.4 : Armature longitudinale minimale
(tableau 3 de la norme NF EN 1536+A1)

Section nominale d'un pieu foré A_c	Section des armatures longitudinales A_s
$A_c \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,5 \% A_c$
$0,5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,0025 \text{ m}^2$
$1,0 \text{ m}^2 < A_c$	$A_s \geq 0,25 \% A_c$

2.1.3 - LES ARMATURES TRANSVERSALES

2.1.3.1 - Utilité des armatures transversales

Deux types d'armatures transversales

On considère deux types d'armatures transversales :

- les armatures structurelles ;
- les armatures de montage.

13. Les armatures longitudinales sont également appelées barres filantes ou filants.

Utilité des armatures transversales

Les armatures transversales structurelles ont **différents rôles** :

- **vis-à-vis du béton armé**, les armatures transversales structurelles jouent trois rôles :
 - maintenir les armatures longitudinales en s'opposant au flambement de celles-ci (*Note*),
 - résister à l'effort tranchant ; elles améliorent la résistance du béton par rapport à celle du même béton non armé, indépendamment de l'effet des armatures longitudinales,
 - s'opposer à l'ouverture des fissures longitudinales qui pourraient apparaître dans le béton. Les armatures transversales constituent une couture dont la mobilisation éventuelle augmente la sécurité ;
- **au point de vue de l'exécution**, les armatures transversales structurelles en association avec les armatures de montage (les cerces de gabarit - cf. § 5.1) ont :
 - un rôle de rigidification de la cage lors des manutentions,
 - un rôle de maintien des armatures longitudinales pendant la descente de la cage dans le forage, puis pendant le bétonnage.

Note : il convient que les barres longitudinales ou les paquets de barres longitudinales placés dans les angles d'une cage d'armature soient retenus par l'armature transversale (article 7.5.3.3 de la norme NF EN 1536+A1).

2.1.3.2 - Géométrie des armatures transversales

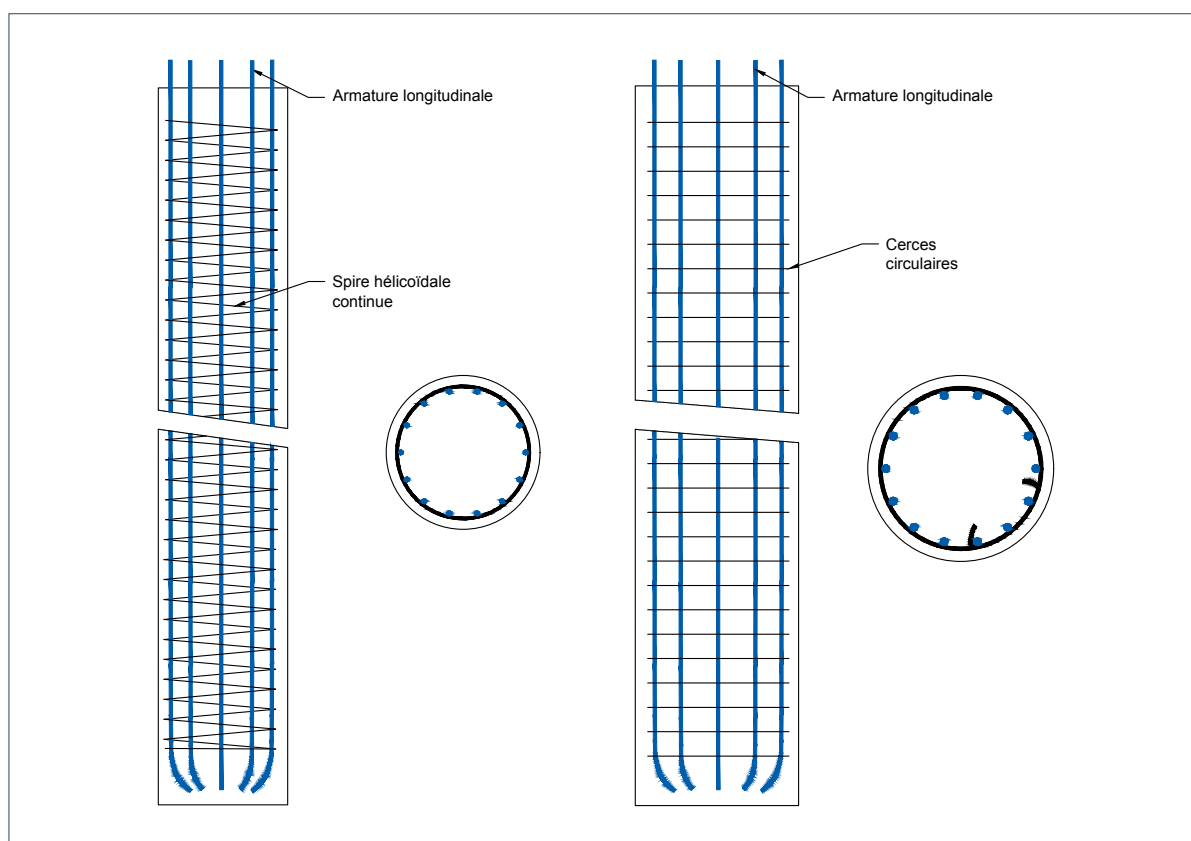
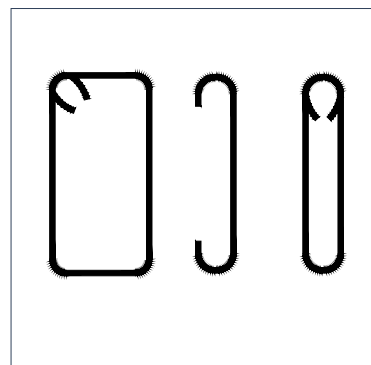
Les différents types d'armatures transversales : cerces, spires, cadres, étriers et épingles

- **Pour les pieux circulaires**, les armatures transversales (Figure 5.13), enroulées et fixées rigidement autour des armatures longitudinales sont constituées par :
 - des spires⁽¹⁴⁾ hélicoïdales continues (Figure 5.13), conduisant à une longueur cumulée d'acier inférieure à celle obtenue avec l'emploi de cerces. Elles sont économiquement plus avantageuses. Leur pose est mécanisée, la forme permet un montage rapide, et le recouvrement est inexistant. Les spires sont utilisées en zones non sismiques, et en partie courante de pieux (cf. définition des zones sur la Figure 5.75 pour les ponts dans le § 7.7) en zonage sismique (défini dans l'article D. 563-8-1 du Code de l'environnement) ;
 - des cerces (Figure 5.14). En zones critiques du pieu (*Note 1*), il est recommandé de remplacer les spires par des cerces (*Note 2*).
- **Pour les sections de pieux autres que circulaires**, les armatures transversales sont constituées de **cadres, d'étriers et d'épingles** (Figure 5.15). Les nappes des deux grandes faces des barrettes sont reliées entre elles par ces armatures.

Note 1 : les zones critiques (ou sections critiques) sont les régions d'un élément sismique primaire où apparaissent les combinaisons les plus défavorables des effets (M, N, V, T) des actions (article 5.1.2 de la norme EN 1998-1 COMPIL1). Elles font référence à la conception en ductilité d'une structure. Elles correspondent à des emplacements le long du pieu où peuvent se développer potentiellement des rotules plastiques permettant des déformations importantes, dans le but de dissiper l'énergie induite par une action sismique. La prise en compte de rotules plastiques n'est cependant pas recommandée, les pieux devant rester dans le domaine élastique. En cas d'utilisation d'armatures composites, la conception en ductilité n'est pas possible.

Note 2 : dans les zones critiques, il est recommandé de remplacer les spires par des cerces pour obtenir une densité d'acier plus importante. L'augmentation de la densité des armatures transversales conduit à une ductilité des sections du pieu plus importante : elles confinent davantage le béton et lui donnent une plus grande capacité de déformation. Elles se substituent au béton endommagé pour maintenir les armatures longitudinales et prévenir leur flambement. Cette recommandation est valable pour les pieux des ponts. La pratique française du dimensionnement des pieux des bâtiments en zone sismique ne retient pas la formation de rotules plastiques ; les armatures transversales peuvent être alors composées de spires (cf. l'article 10.4.3 du Cahier technique n°38 [5.2]).

14. Les spires sont aussi appelées hélices.

Figure 5.13 : Armatures transversales hélicoïdales et circulaires (schémas de principe)**Figure 5.14 : Exemples de cerces****Figure 5.15 : Cadre, étrier et épingle**

Ancrage et recouvrement des cerces et des spires

Les prescriptions concernant **l'ancrage et le recouvrement** des cerces et des spires sont dictées par le comportement du béton armé durci, mais aussi par la poussée du béton frais lors du bétonnage. Les ancrages et recouvrement des armatures transversales doivent être conformes aux **articles 8.5, 8.6 et 8.7 de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1**. Les **angles de pliage** préconisés des armatures transversales sont compris entre 90° inclus et 180° exclus. Les ancrages des armatures transversales peuvent également être soudés, le soudage doit être conforme à la **norme NF EN ISO 17660-1**.

En ce qui concerne :

- **les cerces** : leur ancrage autour des barres longitudinales se fait préférentiellement avec des crochets à 135° ou 150° ou 180° , avec une longueur droite après courbure (Figure 5.16) de cinq diamètres et supérieure à 50 mm (dix diamètres pour les dispositions constructives parasismiques). Leur ancrage doit être décalé par rapport à celui de la cerce suivante et précédente (cf. Figure 5.18) ;

- **les spires** : la continuité mécanique de leurs différents tronçons doit être réalisée par le moyen de recouvrements munis de crochets ou par soudure. Afin d'éviter des déformations importantes de la cage, il est conseillé de retourner les barres autour des armatures longitudinales (pieux de gros diamètres) et d'éviter les recouvrements non munis de crochets, à moins que ceux-ci ne soient soudés (pieux de faible diamètre). L'ancrage d'extrémité des spires se fait par deux ou trois tours.

Enfin, on veillera à ce que les longueurs droites après courbure (min {5 diamètres ; 50 mm}) ne soient pas un obstacle pour la descente du tube de bétonnage (*Note*).

Note : ceci implique que les crochets soient contre-indiqués pour des cages de petit diamètre.

Figure 5.16 : Dispositions constructives théoriques prévues par le règlement en béton armé



Diamètres des armatures transversales

Les diamètres des armatures transversales recommandés sont choisis en fonction :

- **du type d'armatures transversales** ; ils sont indiqués dans le Tableau 5.5 selon la norme NF EN 1536+A1 ;
- **du diamètre des armatures longitudinales** ; ils sont donnés dans le Tableau 5.6 selon la norme NF EN 94-262 COMPIL1.

Tableau 5.5 : Diamètres recommandés pour les armatures transversales
(tableau 4 de la NF EN 1536+A1)

Type d'armatures transversales	Diamètres d'armatures transversales
Cerces ou spires (Figures 5.2 et 5.13) Cadres ou étriers ou épingles	≥ 6 mm et ≥ 0,25 fois le diamètre maximal des barres longitudinales
Fils ou treillis soudés transversaux	≥ 5 mm

Note : si de l'acier en bandes est utilisé pour les armatures transversales, l'épaisseur minimale est généralement de 3 mm.

Tableau 5.6 : Diamètres recommandés pour les armatures transversales
(tableau Q.3.4.2.3 de la norme NF P94-262 COMPIL1 relative à la conception des ponts)

Ø armatures longitudinales (mm)	12 à 14	16	20	25	32
Ø armatures transversales (mm)	6 à 8	8 à 10	10 à 14	10 à 16	

Nota bene : Les diamètres pour les armatures transversales peuvent être de 6 ; 8 ; 10 ; 12 ; 14 ou 16 mm, donc la plage « 10 à 16 » comprend les diamètres 10, 12, 14 et 16 mm.

2.1.3.3 - Constitution du ferrailage transversal

On se reportera au chapitre 7 pour plus de précisions sur l'assemblage de la cage.

Espacement des armatures transversales

- **Dans le cas courant** (Figure 5.17) :
 - la distance minimale nu à nu des armatures transversales ne doit pas être inférieure à la distance définie pour les armatures longitudinales (article 7.5.3.2 de la norme NF EN 1536+A1 – Note) ;
 - l'écartement maximal des barres transversales dans le cas des pieux pour les ponts doit rester inférieur à quinze fois le plus petit diamètre des barres longitudinales, avec un maximum de 350 mm (article Q.3.4.2.3 (1) de la norme NF P94-262 COMPIL1).
- **Pour un dimensionnement sismique**, les crochets des cerces successives ou leur recouvrement droit sont placés en position alternée (Figure 5.18). L'assemblage mixte spires et cerces en sismique se fait en disposant les cerces en haut de cage, et les spires en bas de la cage (Figure 5.19).
- **Pour les barrettes**, et dans le cas des fondations de ponts, les armatures transversales sont disposées de façon à éviter tout mouvement des barres longitudinales vers la paroi la plus proche (article Q.3.4.2.3 (3) de la norme NF P94-262 COMPIL1).
- **Pour les barrettes ou des pieux de gros diamètre**, afin de limiter les déformations lors des opérations de transport et de manutention, sont ajoutées des barres obliques, disposées et fixées de façon à obtenir un contreventement effectif de la cage (article Q.3.4.2.4 de la norme NF P94-262 COMPIL1) (Figure 5.20).

Note : il convient que l'écartement entre les barres longitudinales soit maximal sans toutefois dépasser 400 mm (article 7.5.2.5 de la norme NF EN 1536+A1). La distance horizontale nu à nu entre les barres longitudinales ou les paquets de barres d'un lit ne doit pas être inférieure à 100 mm (article 7.5.2.6 de la norme NF EN 1536+A1).

Figure 5.17 : Écartements nu à nu des armatures transversales

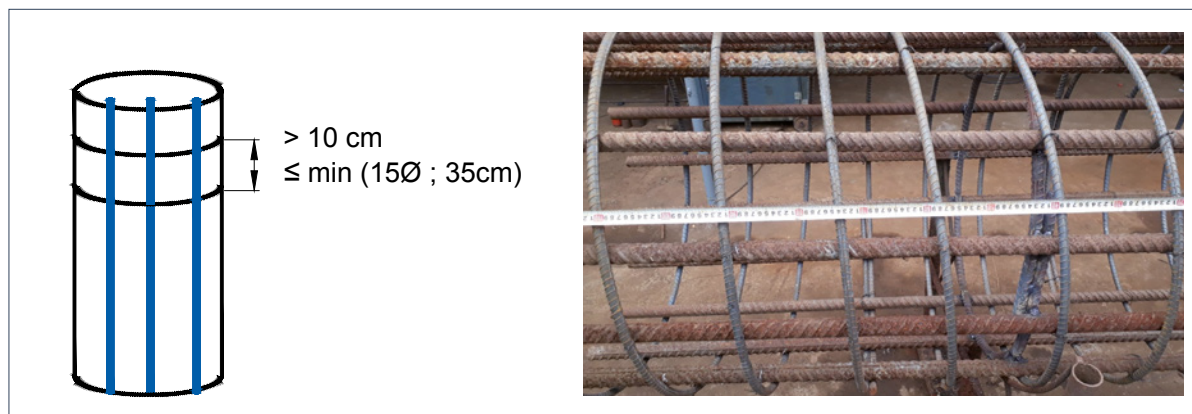


Figure 5.18 : Alternance des recouvrements des cerces

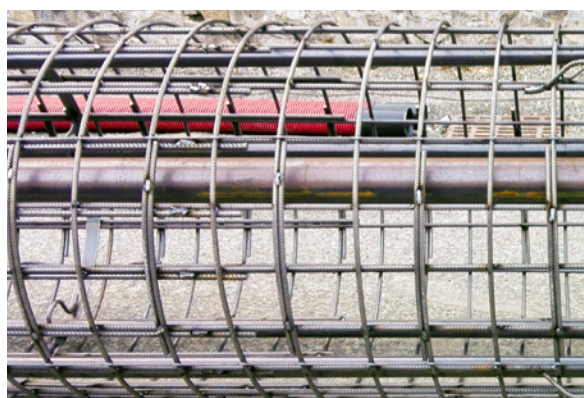
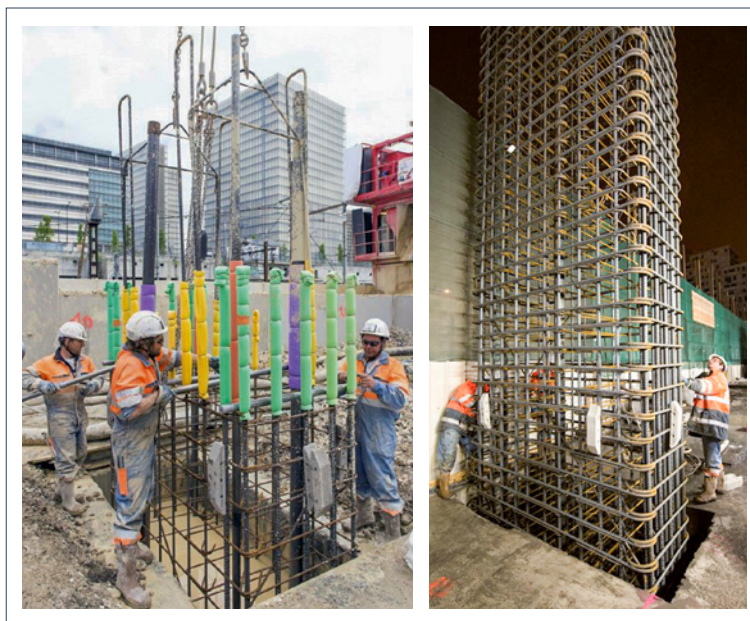


Figure 5.19 : Exemple d'assemblage mixte spires et cerces en sismique



Figure 5.20 : Exemples de cage de barrette



Diamètre des cerces et des spires

Le diamètre des cerces ou des spires, et plus précisément le diamètre extérieur de la cage, doit être égal au diamètre du pieu auquel on retranche 2 fois la valeur minimale de l'enrobage (enrobage minimal par rapport à l'exécution). On se reportera au chapitre 6 concernant l'enrobage pour choisir ces valeurs dépendant de la configuration du pieu (tube de travail provisoire, chemisage, cage nue).

Armatures transversales et moyens de soutien ou anneaux raidisseurs

Les anneaux raidisseurs ou les autres moyens de soutien utilisés pour le montage des cages d'armature ne peuvent être considérés comme faisant partie des armatures transversales que :

- s'ils sont raccordés correctement aux barres longitudinales et positionnés à l'extérieur des armatures longitudinales ;
- si la classe technique d'acier est en adéquation avec les armatures transversales structurales.

Des compléments d'information sont donnés au § 5.1.

2.1.4 - CERTIFICATION DES ARMATURES

Les certifications gérées par l'**AFCAB**, l'**Association française de certification des armatures du béton**, couvrent l'ensemble du cycle des armatures pour béton, depuis la production des aciers jusqu'à leur mise en œuvre. On distingue **quatre certifications** qui intéressent la réalisation des pieux forés :

- **certification NF - aciers pour béton armé** (gérée par l'AFCAB qui certifie la fabrication selon la norme de référence de l'acier employé) ;
- **certification NF - armatures** (gérée par l'AFCAB qui certifie les caractéristiques de fabrication selon la norme NF A35-027) (Figure 5.21) ;
- **certification AFCAB - dispositifs de raboutage ou d'ancrage des armatures du béton** ;
- **certification AFCAB - pose des armatures du béton**.

Les certifications AFCAB peuvent être imposées par **les cahiers des charges des marchés**. Quand elles ne le sont pas, elles constituent souvent un critère important dans le jugement des offres.

Figure 5.21 : Exemple d'étiquette de certification de produit



2.2 - CAGES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

De nouveaux concepts d'armature sont apparus en France, avec notamment **des cages d'armature en polymères renforcés de fibres de verre** (*Note* – Figure 5.30 dans le § 5.1 et Figure 5.61 dans le § 7.1), pour pallier les limites de l'acier. À ce jour, peu de fournisseurs peuvent approvisionner les projets de ce type de cage. Il existe actuellement peu de références en France, cependant le procédé est très bien connu dans certains autres pays (où sont implantées les usines de fabrication).

Contrairement aux aciers, **il n'y a pas de normes relatives au dimensionnement en France**. Cependant, il est possible de baser le dimensionnement des armatures en polymères renforcés de fibres de verre suivant les principes de dimensionnement de l'**Eurocode 2 (NF EN 1992)**, selon les indications fournies par exemple par la fib (Bulletin N°40) ou encore le **CNR-DT 203/2006**.

Note : nous n'abordons dans ce guide que les armatures en polymères renforcés en fibres de verre.

2.2.1 - AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES CAGES EN POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE VERRE

Ces cages présentent des avantages et inconvénients par rapport aux cages classiques, qui sont présentés dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.7 : Avantages et inconvénients des cages en matériaux alternatifs à l'acier

Avantages	Inconvénients
• Poids plus léger, donc manutention plus simple ; • Pas de problématique liée à la corrosion et à l'agressivité du sol ; • Matériau non conducteur non magnétique (par exemple : réseau d'infrastructure électrique, bâtiment de recherche, pas de perte de courant ni de perturbation des instruments de mesure) ; • Facilement usinables/sciables (par exemple : structure temporaire, zone de passage du tunnelier...).	• Encore peu répandu en France (en absence de standardisation et de normalisation – pas de marquage CE mais une procédure EAD⁽¹⁵⁾ en cours auprès des TABs européens) ; • Armatures non soudables donc rigidité diminuée (ligature par fil polymère ou fil de fer - cf. Figure 5.61 dans le § 7.1) ; • Influence des contraintes permanentes sur la résistance à long terme des barres (diminution des résistances dans le temps - cf. § 1.4) ; • Module d'élasticité plus faible que l'acier (déformation plus importante) ; • Sensibles au fluage ; • Comportement élastique fragile ; • Coût plus élevé que l'acier ; • Manque de retours d'expériences sur la durabilité ; • Fragilité à prendre en compte lors de la manutention ; • Risque de détérioration du filetage si traînées sur le sol ; • Risque de détérioration au recépage ; • Pas de pliage⁽¹⁶⁾, la géométrie des éléments doit être réalisée lors de la conception en usine.

2.2.2 - ARMATURES EN POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE VERRE

Surface des armatures en polymères renforcés de fibres de verre

Les armatures en polymères renforcés de fibres de verre (Figure 5.6 dans le § 1.2) ont **des sections pleines et présentent des traitements de surface** pour améliorer l'adhérence avec le béton (à l'instar de l'acier) et/ou des surfaces en relief (sablage, nervures dans le sens longitudinal ou transversal, enroulement d'une fibre ou encore tressage).

Caractéristiques des armatures en polymères renforcés de fibres de verre

Le **module d'élasticité** est compris entre 40 GPa et 60 GPa⁽¹⁷⁾. Les limites élastiques de ces matériaux sont spécifiques à leur mode de fabrication (cf. exemple ci-après).

15. EAD : l'*European Assessment Document* est un document fournissant des méthodes et des critères pour évaluer les performances d'un produit selon ses caractéristiques essentielles,
TABs : *Technical Assessment Bodies*, un organisme européen (dont font partie le CSTB et le Cerema) responsable de l'évaluation technique de produits de construction.

16. Les opérations de pliage sont impossibles en raison de l'absence de ductilité de l'armature en polymères renforcés de fibres de verre, contrairement à l'acier.

17. Selon l'**ASTM D7957/D7957M-22**, le module élastique doit être supérieur ou égal à 45 GPa.

Exemple de caractéristiques mécaniques d'armatures en polymères renforcés de fibres de verre

⚠ Ces principes de dimensionnement pour les armatures en fibres de verre relèvent encore de la recherche et ne sont pas repris dans un texte de référence (norme, publication d'un bureau de contrôle...) à la date de publication de ce guide.

Pour les produits ComBAR® fabriqués et vendus par l'entreprise Schöck France SARL, selon les concepts de durabilité énoncés dans le bulletin N°40 de la Fédération internationale du béton (fib)⁽¹⁸⁾, la valeur caractéristique de la limite d'élasticité⁽¹⁹⁾ $f_{y,k}$ peut être considérée à long terme (100 ans) égale à 580 MPa et à 650 MPa à court terme (5 ans).

L'entreprise utilise un facteur partiel de sécurité de 1,3 (combinaison ELU) et obtient une valeur de calcul de la limite élastique pour ces armatures ComBAR® en matériau composite de 500 MPa (pour 5 ans) à 446 MPa (pour une durée de 100 ans). Cette valeur lui permet de limiter les contraintes dans les barres en polymères renforcés de fibres, en prenant compte de l'impact de la durée de vie sur les caractéristiques de l'armature, et de dimensionner par la suite selon l'Eurocode 2 (NF EN 1992).

Géométrie des armatures longitudinales en polymères renforcés de fibres de verre

Les diamètres, à ce jour, sont au minimum de 8 mm et sont limités à 40 mm en gardant les mêmes classes que les barres d'acier. La longueur des barres est aussi contrainte par les moyens de transport. Les armatures longitudinales en polymères renforcés de fibres de verre sont fournies pour des longueurs de 2 à 24 m.

Géométrie des armatures transversales en polymères renforcés de fibres de verre

Les armatures transversales en polymères renforcés de fibres de verre peuvent être de section circulaire ou plate (en bande) (Figure 5.30 dans le § 5.1).

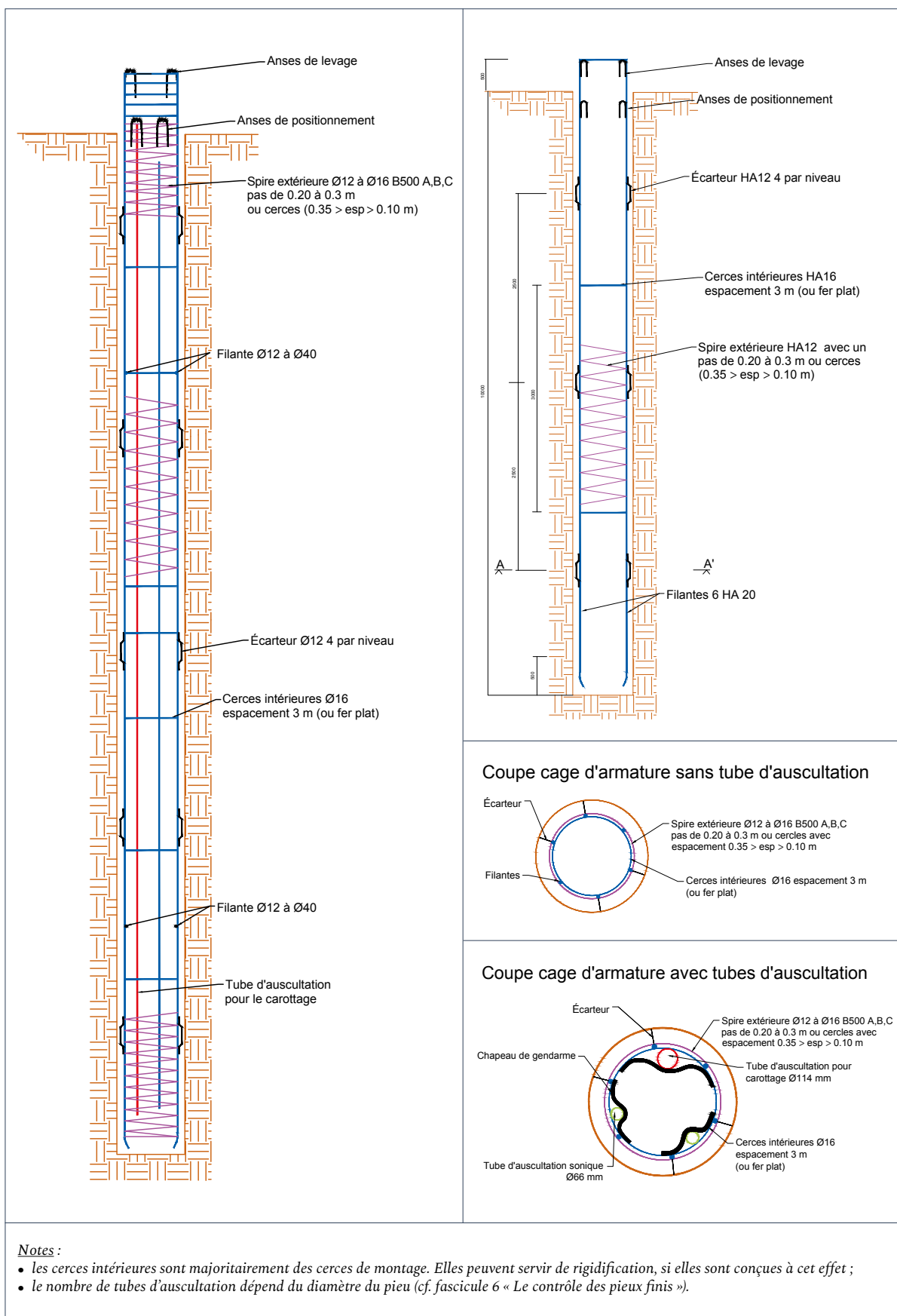
2.3 - PRÉSENTATION DE DESSINS DE FERRAILLAGE

La Figure 5.22 présente un exemple de dessins de ferrailage de pieu de fondation. Sur cette figure, il est fait référence à des cerces de rigidification, or généralement la rigidification de la cage est apportée majoritairement par les spires. Certaines entreprises peuvent préférer les cerces aux spires, mais, dans ce cas, les cerces doivent être en fer plat, d'une certaine hauteur et soudées par un cordon de soudure. Ces dernières font aussi office de cerces de montage.

18. Ce document n'a pas valeur de norme et ne peut être appliqué pour des ouvrages définitifs.

19. Se reporter à la Figure 5.8 dans § 1.3 pour la définition de $f_{y,k}$.

Figure 5.22 : Dessins de ferrailages



CHAPITRE 3

Éléments en acier

3. ÉLÉMENTS EN ACIER

3.1 - UTILITÉ DE CES ÉLÉMENTS

Les tubes, palplanches formant des palpieux et profilés en acier peuvent aussi servir d'armatures pour les pieux forés. Ces éléments remplacent les cages d'armature dans certaines applications de soutènement ou de fondation :

- **pieu foré équipé d'un profilé H (Note 1) servant d'élément porteur** de parois discontinues du type paroi berlinoise (Figure 5.23) ;
- **pieu foré équipé d'un profilé H ou I (Note 1)** ou tube d'acier, mis en place avant ou après le bétonnage dans le béton frais en tant qu'armature complémentaire ;
- **pieu avec un tube acier utilisé comme armature principale** (Figure 5.24), avec comblement de l'espace annulaire entre le sol et l'armature ;
- **palplanches assemblées pour former un palpieu** (Figure 5.24) : bien que les palplanches soient plutôt mises en œuvre par battage, vibrofonçage ou lançage, elles peuvent également être introduites dans un forage, une fois assemblées et pour former une structure tubulaire ;
- **poteau préfondé métallique ou en béton armé (Note 2 – Figure 5.25)**, si besoin lié à une cage de frettage (cf. § 5.5 et Figure 5.25.b), descendu dans un forage. Ce dispositif peut servir aussi bien de support à une ossature supérieure qu'à l'exécution de planchers inférieurs (procédé « Top and Down » – Note 3).
- ...

La conception des tubes et profilés en acier doit être conforme aux normes NF EN 1992, NF EN 1993 et NF EN 1994 selon le cas.

Note 1 : si le profilé n'est pas installé sur toute la hauteur du pieu, il peut être nécessaire de l'associer à sa base à une cage d'armature qui frette le béton.

Note 2 : un poteau préfondé est un poteau mis en place dans un forage de pieu (ou de barrette) et scellé dans sa partie inférieure dans un pieu (ou une barrette). Le pieu correspond à la partie dans le terrain qui ne sera pas terrassée lors des futurs phasages des travaux, alors que le poteau correspond à celle sur la hauteur terrassée plus un scellement. Le poteau permet de reprendre des charges créées avant terrassement pour fonder au-delà de ce terrassement, d'où le terme « préfondé ».

Note 3 : le procédé de construction « Top and Down » permet de diminuer les délais de construction ou la durée d'encombrement au sol en restituant plus rapidement le niveau de terrain naturel, car on peut construire la superstructure, en même temps qu'on réalise le terrassement des niveaux inférieurs.

Figure 5.23 : Principe d'une paroi berlinoise - vue en plan

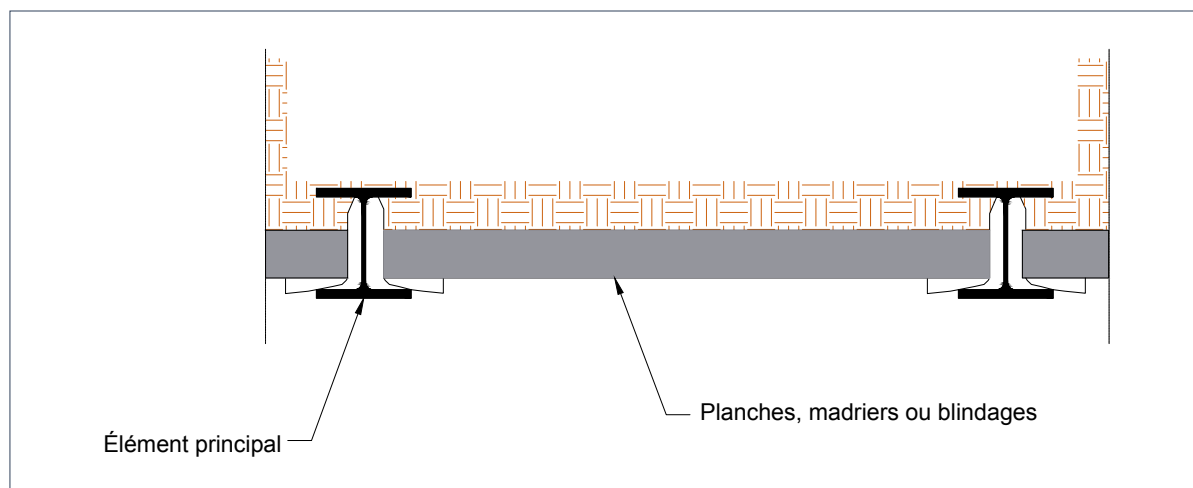


Figure 5.24 : Exemples de section de pieu en acier (tube et palplanches)

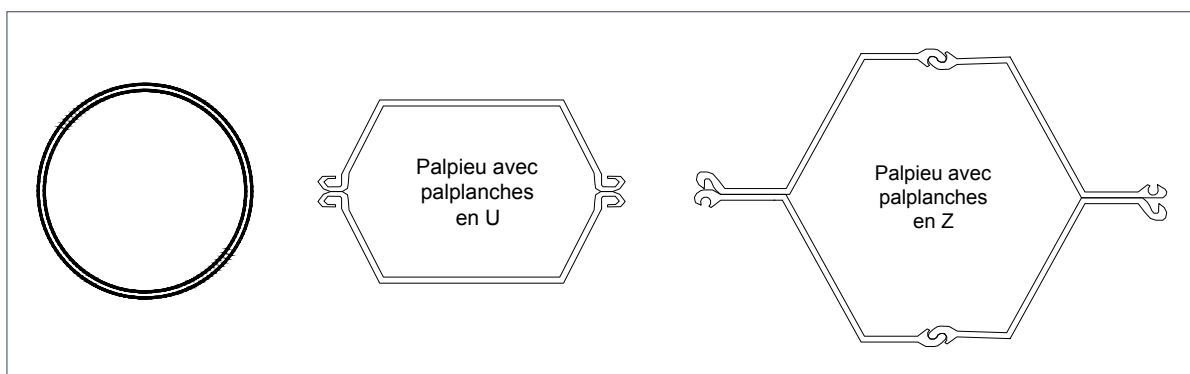


Figure 5.25 : Exemples de poteaux préfondés



a) Avec armatures du poteau



b) Avec cage de frettage dans le cas d'un poteau en béton armé



c) Terrassement autour de poteaux préfondés en béton armé

3.2 - DÉSIGNATION DES ÉLÉMENTS D'ACIER

Ces aciers sont définis comme **des aciers de construction métallique**.

Leur dénomination comporte la lettre « S » (structure) suivie de la limite élastique exprimée en MPa ; cette désignation est suivie d'un indice qui classe l'acier selon sa qualité (JR, J0, J1, J2...).

La limite élastique de ces produits est comprise entre 235 et 460 MPa. Pour un même effort, plus la nuance choisie est élevée, plus le ratio d'acier sera faible et plus le pieu sera déformable.

3.3 - NUANCES D'ACIER

La nuance d'acier est définie par ses prescriptions relatives à la limite apparente d'élasticité caractéristique et à la ductilité selon l'article 3.50 de la norme NF EN 10080.

Les nuances d'acier doivent être conformes selon le cas aux normes suivantes :

- la **norme NF EN 10025-2** a pour objet des produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés. Elle traite des produits plats et longs tels les profilés de section non circulaire ($H^{(20)}$, $I^{(21)}$, U...) (Figure 5.26). Les qualités se distinguent par la valeur spécifiée d'énergie de rupture en flexion par choc ;
- la **norme NF EN 10210** (Note) traite des profils creux de construction finis à chaud de forme circulaire, carrée, rectangulaire ou elliptique, jusqu'à 120 mm d'épaisseur ;
- la **norme NF EN 10219** (Note) a pour sujet des profils creux de construction soudés formés à froid de forme circulaire, carrée ou rectangulaire, jusqu'à 40 mm d'épaisseur.

Note : les parties 1 traitent des conditions techniques de livraison et les parties 2 des tolérances, dimensions et caractéristiques de section.

3.4 - GÉOMÉTRIE DES ÉLÉMENTS D'ACIER

Un pieu foré circulaire a une section généralement comprise entre 300 mm et 3 m de diamètre (Note).

La géométrie du profilé est déterminée par la charge et le flambement. On adaptera la géométrie du pieu ou de la barrette pour respecter les conditions de pose et la tolérance de verticalité du poteau (toujours faible) en fonction de la longueur du poteau et de la tolérance de verticalité du forage qui est toujours plus forte. Le choix du type de profilé et du diamètre du pieu (ou de la largeur de la barrette) se fait selon les contraintes du projet (emprise, efforts, tolérances autorisées...).

Note : des diamètres supérieurs sont possibles.

Profilés pleins et géométries usuelles

Pour les profilés pleins (Figure 5.26), on emploie :

- **des profilés HEA⁽²²⁾ ou HEB⁽²³⁾ ou HEM et HD** (Note 1), poutrelles à larges ailes parallèles ;
- **des profilés UPN doublés**, utilisant deux profilés en « U » dont les faces intérieures des ailes sont inclinées ;
- **des poutrelles-pieux HP, poutrelles « H »** (Figure 5.27) spéciales dont l'âme et les ailes ont la même épaisseur ;
- **des poutrelles à ailes : IPE et IPN** (Note 2) ;
- ...

20. Section droite en forme de « H », dont la largeur des ailes est supérieure à 0,66 fois la hauteur nominale du profilé ou limitée à 300 mm.

21. Section droite en forme de « I », dont la largeur des ailes est inférieure ou égale à 0,66 fois la hauteur nominale du profilé et inférieure à 300 mm.

22. Le nombre accompagnant ce symbole correspond à la hauteur de la section en mm.

23. Le nombre accompagnant ce symbole correspond à la hauteur de la section en mm et aussi à sa largeur.

La **gamme de profilés** est assez importante, ils peuvent se décliner dans de nombreuses dimensions. Le Tableau 5.8 présente quelques géométries de profilés produits par l'entreprise Arcelor-Mittal.

Note 1 : les ailes sont très épaisses.

Note 2 : les IPN ont des ailes inclinées sur une pente de 14 % et une âme plus épaisse, par contre les IPE ont leurs deux ailes parallèles et non inclinées.

Profilés creux et géométries usuelles

Pour les profils creux de construction, les gammes de dimensions normalisées sont :

- le **profil circulaire** : diamètre extérieur jusqu'à 2 500 mm ;
- le **profil carré** : dimensions extérieures jusqu'à 800 par 800 mm ;
- le **profil rectangulaire** : jusqu'à 750 par 500 mm ;
- le **profil elliptique** : jusqu'à 500 par 250 mm.

Figure 5.26 : Profilés en I, H, U, carré et circulaire

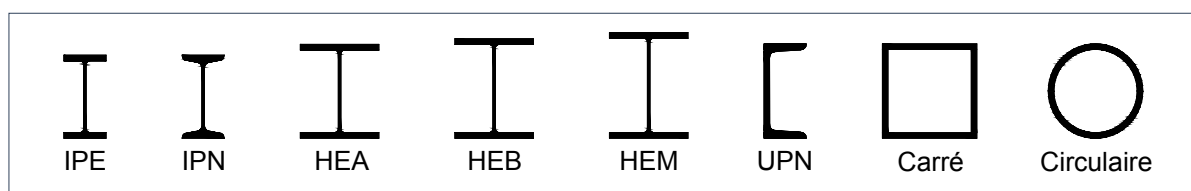


Figure 5.27 : Exemple de profil H

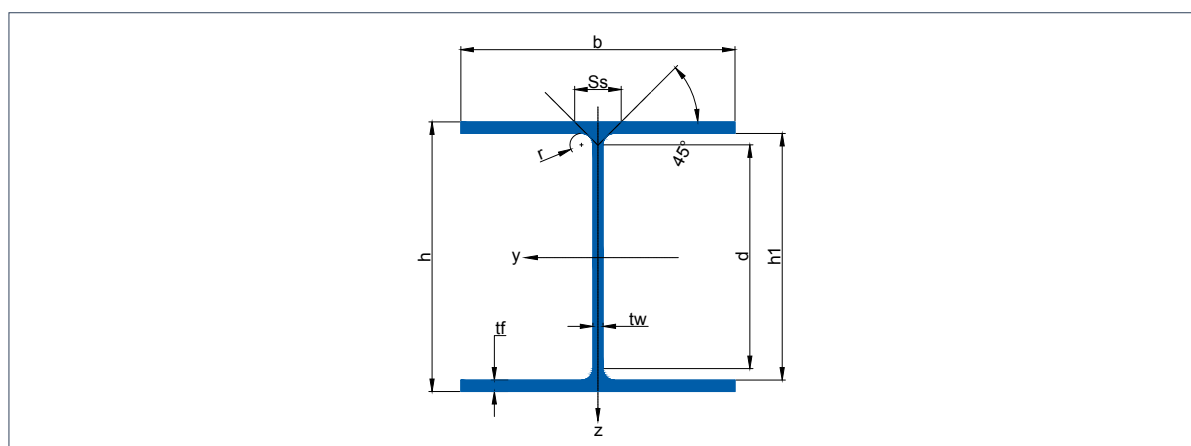


Tableau 5.8 : Extrait du catalogue Arcelor Mittal pour les principaux profilés utilisés (I, H, U)

Désignation	Symbole	Dimensions h x b (mm x mm)		
		min.	max.	
Poutrelles à ailes parallèles	IPE	80 x 46	770 x 268	
Poutrelles à ailes inclinées	IPN	80 x 42	600 x 215	
Poutrelles à larges ailes	HEA	96 x 100	990 x 300	1056 x 314
	HEB	100 x 100	1000 x 300	
	HEM	120 x 106	1008 x 302	
Poutrelles colonnes	HD	244 x 260	600 x 476	
Poutrelles pieux	HP	210 x 224,5	372 x 402	
Fers U à ailes inclinées	UPN	80 x 45	400 x 115	





CHAPITRE 4

Fibres pour béton

4. FIBRES POUR BÉTON

4.1 - UTILITÉ DES FIBRES

Utilité des fibres

Les fibres (exemple de fibres métalliques sur la Figure 5.7 dans le § 1.2) :

- remplacent de façon totale ou partielle les armatures traditionnelles ;
- diminuent les risques de fissuration par une augmentation de la résistance à la traction et les retraits de dessiccation lors de la prise.

Leur effet sur le béton varie selon leur nature. Ainsi les fibres métalliques donnent au béton une meilleure résistance à la flexion et à la traction que des fibres minérales ou organiques. La prise en compte structurelle des fibres synthétiques n'est pas aujourd'hui prévue par la norme NF EN 1536+A1 pour les bétons de pieux forés.

Domaines d'utilisation des fibres

Les bétons fibrés constituent une alternative au béton armé pour certains cas de conception :

- faibles efforts de traction ;
- faibles excentrement.

Ces bétons fibrés ont remplacé les cages d'armature traditionnelles pour des pieux de grande longueur réalisés à la tarière creuse dans les années 1990, quand il n'y avait pas la possibilité de descendre les cages d'armature dans le forage.

Leur emploi n'est pas recommandé à ce jour en zone de risque sismique modéré et plus, ceci par manque de retour d'expérience sur ce procédé en fondations profondes.

Seule l'utilisation de fibres en acier est prévue par la norme d'exécution des pieux forés NF EN 1536+A1.

4.2 - CARACTÉRISTIQUES ET GÉOMÉTRIES DES FIBRES

Les fibres peuvent être de nature :

- métallique (acier, fonte, inox) ;
- organique (aramide, carbone, polyamide...) ;
- minérale (verre, basalte...).

Les fibres en acier peuvent présenter une géométrie plate, ondulée ou bien en forme de crochet.

Leur longueur s'échelonne de 5 à 60 mm.

4.3 - MISES EN ŒUVRE DES FIBRES

Moyens de mise en œuvre

Les fibres doivent être réparties de façon homogène dans le béton. Leur nature conditionne leur mise en œuvre :

- pour les fibres synthétiques en centrale via un malaxeur ; leur mise en œuvre est plus facile que celles des fibres en acier ;
- pour les fibres métalliques par l'intermédiaire d'un diffuseur (tapis ou soufflerie – Note) (Figure 5.28).

Note : il faut noter que la soufflerie permet une meilleure répartition des fibres que le tapis, car elles sont diffusées dans le camion agitateur, contrairement au tapis où elles tombent par gravité.

Agencement des fibres dans le béton

L'agencement des fibres dans le béton (Figure 5.7 dans le § 1.2) est une question délicate.

Le résultat du mélange dans une toupie (prélèvement) ne reflète pas toujours la disposition des fibres dans le pieu.

En particulier, la répartition et l'orientation homogènes des fibres sont difficiles à obtenir et à contrôler.

Figure 5.28 : Machine soufflante



Coût de la mise en œuvre

La mise en œuvre des fibres dans le béton fait appel à des adjuvants plastifiants et superplastifiants, et à du matériel spécifique. Le coût de production d'un béton fibré est plus élevé qu'un béton traditionnel.

CHAPITRE 5

Les dispositifs particuliers

5. LES DISPOSITIFS PARTICULIERS

5.1 - CERCES DE MONTAGE OU DE GABARIT

Utilité des cerces de montage ou de gabarit

Il est nécessaire d'utiliser des armatures particulières appelées cerces de montage ou aussi cerces de gabarit (Figures 5.29 et 5.30),

- lors du transport et de la manutention des cages, ces cerces peuvent contribuer à la rigidification (*Note 1*), si elles possèdent un diamètre suffisamment important (*Note 2*) ;
- lors de la préfabrication de la cage :
 - en la facilitant ; les armatures longitudinales viennent s'appuyer sur l'extérieur de ces cerces formant des gabarits de montage,
 - en permettant le respect du diamètre terminé de la cage,
 - en favorisant la répartition convenable des armatures longitudinales ;
- en recevant les dispositifs de fixation des tubes d'auscultation et de carottage.

Note 1 : il faut faire attention que des diamètres importants ne gênent pas le bétonnage.

Note 2 : dans le cas général, la rigidification des cages des pieux est apportée par les spires (cf. § 2.1.3) qui s'enroulent sur les filants et qui sont liées à ces derniers. Dans le cas des barrettes, cette rigidité peut être apportée par des raidisseurs. Ces éléments peuvent aussi être intégrés dans les pieux (Figure 5.31).

Figure 5.29 : Cerce de montage en acier



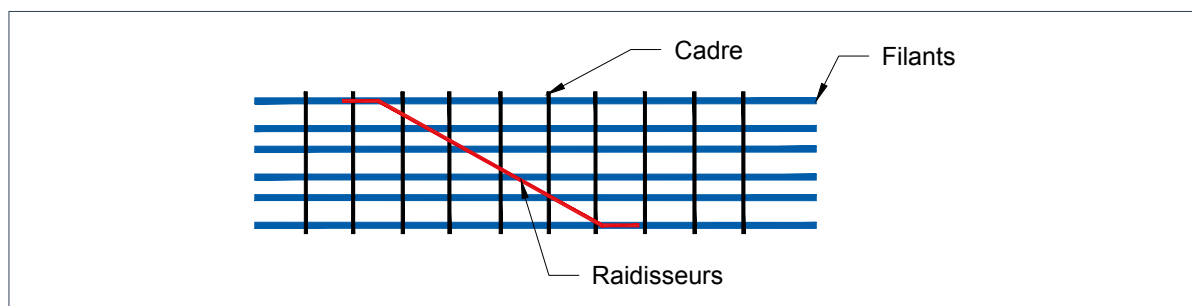
Cerces en bande (ou en fer plat) recevant les dispositifs de fixation des tubes d'auscultation

Figure 5.30 : Exemple de cage d'armature en polymères renforcés de fibres de verre



Cerces extérieures et cerces intérieures de montage

Figure 5.31 : Raidisseurs pour les barrettes



Utilisation de cerces de protection

Une cerce en tête des cages (Figure 5.32) peut être installée pour éviter tout risque de blessure sur l'armature une fois le pieu achevé, mais dans ce cas, le recépage par éclateur (cf. § 5.4 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») devient impossible.

Utilisation d'acier en bande pour les cerces de montage

L'emploi des aciers en bande (ou en fer plat) s'est développé ces dernières années pour les cerces de montage. Pour les pieux de diamètre inférieur ou égal à 500 mm, leur avantage est **un gain de place** permettant un passage plus aisé des colonnes de bétonnage.

Ces cerces de montage en fer plat peuvent apporter un gain de rigidité à condition que l'assemblage entre le fer plat et les filants soit réalisé par un cordon de soudure (à la place d'un seul point de soudure pour les cerces à section ronde).

Caractéristiques géométriques des cerces

Les cerces de montage doivent permettre de manutentionner la cage et donc avoir des dimensions suffisantes, tout en permettant le passage de la colonne de bétonnage (ou du tube plongeur), ainsi que la circulation du béton :

- **pour les cerces en fils en acier lisse**, le diamètre des fils est 5,5 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12 ; 14 ; 16 ; 25 ; 32 et 40 mm (NF A35-015) ;
- **pour les cerces en fer plat** utilisés pour les armatures transversales, l'épaisseur doit être généralement ≥ 3 mm.

Mise en œuvre des cerces

Les armatures principales sont soudées sur les cerces (Figure 5.32 – Note). Cette cage doit être suffisamment rigide pour pouvoir être tournée pour la mise en œuvre des spires en usine.

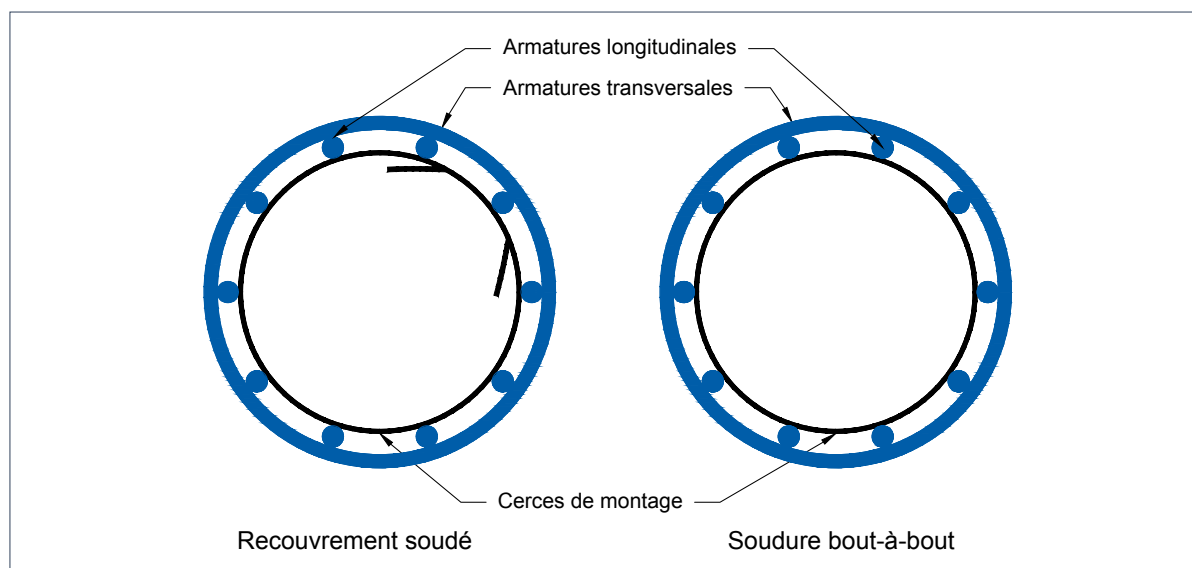
Le recouvrement soudé est préférable au soudage bout à bout (Figure 5.33.a).

L'espacement des cerces de montage dépendra du diamètre du pieu, des aciers longitudinaux, de la quantité d'armatures transversales (qui participent également à la rigidité), ainsi que de la longueur de la cage.

Pour les cages destinées aux pieux réalisés à la tarière creuse, il est possible d'accoler deux cerces en tête de pieux, afin de renforcer cette partie qui est sollicitée mécaniquement lors de la descente de la cage dans le béton frais (Figure 5.33.b).

Note : la cage d'armature peut être réalisée sans cerce, du moment qu'elle est suffisamment rigide pour ne pas se déformer lors de son transport et de sa manutention.

Figure 5.32 : Assemblage des cerces de montage



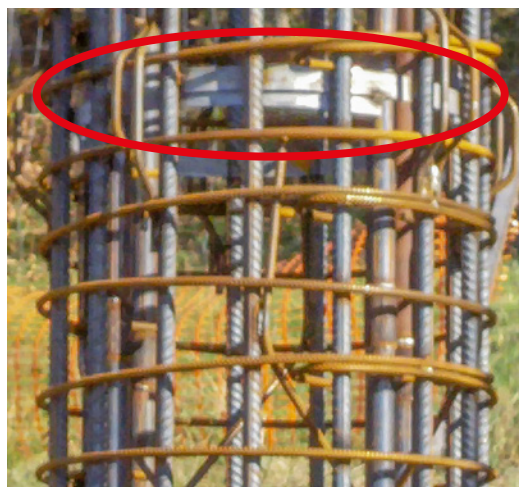
Diamètre des cerces

Cf. 2.1.3.3 du présent chapitre.

Figure 5.33 : Mise en œuvre de cerces



a) Exemple de soudure des spires et des cerces de montage en fer plat aux armatures principales



b) Exemple de cerces de renfort (en bande) en tête de cage

5.2 - DISPOSITIFS DE CENTRAGE : ÉCARTEURS, CALES

Utilité des écarteurs et cales

Ces dispositifs de centrage permettent :

- d'éviter le frottement de la cage le long de la paroi de forage au cours de sa mise en place ;
- de centrer correctement la cage dans le forage et d'assurer aux armatures un enrobage convenable.

Constituants des écarteurs et des cales

Ces dispositifs de centrage peuvent être (*Note 1*) :

- des écarteurs en métal (Figures 5.34 et 5.35), armatures particulières soudées aux barres longitudinales (*Note 2*) ;
- des cales :
 - en béton :
 - de forme cylindrique, à fixer perpendiculairement à deux barres longitudinales (*Note 3*) par l'intermédiaire d'une petite barre soudée (Figure 5.36),
 - de forme trapézoïdale (Figure 5.37) et percées, afin de permettre leur fixation à la cage par ligatures. Le terme **de patin ou pavé de guidage** est également employé pour ce type de cale.
 - ⚠ Dans le cas de la technique de la tarière creuse, les écarteurs en béton sont à proscrire, car ils peuvent nuire à la bonne descente de la cage et présentent une dangerosité avérée (chute d'éléments béton).
 - en plastique : les cales en plastique sont à proscrire en raison de leur fragilité et de la difficulté à les maintenir en place lors de la descente de la cage dans le forage.

Note 1 :

- pour les pieux forés à la tarière creuse, seuls les écarteurs métalliques doivent être utilisés, en raison de la sollicitation verticale importante nécessaire pour descendre la cage dans le béton ;
- pour les barrettes, il est nécessaire d'utiliser des écarteurs en béton si une partie de la barrette est découverte par terrassement. Ces produits en béton sont utilisés pour leur solidité et l'aspect esthétique ;
- dans le cas des pieux inclinés, il faut multiplier les niveaux de calage sur la face « inférieure » qui a tendance à s'appuyer sur la paroi de forage.

Note 2 : certains dispositifs en métal peuvent comporter un enrobage plastique (hors pattes de fixation), afin de se protéger des effets de la corrosion (à privilégier dans un environnement agressif). Leur coût est plus élevé, mais il peut y avoir une plus-value vis-à-vis de la qualité de l'ouvrage.

Note 3 : afin de respecter le sens de roulement des cales contre la paroi de forage.

Figure 5.34 : Exemples d'écarteurs en acier soudés à la cage d'armature

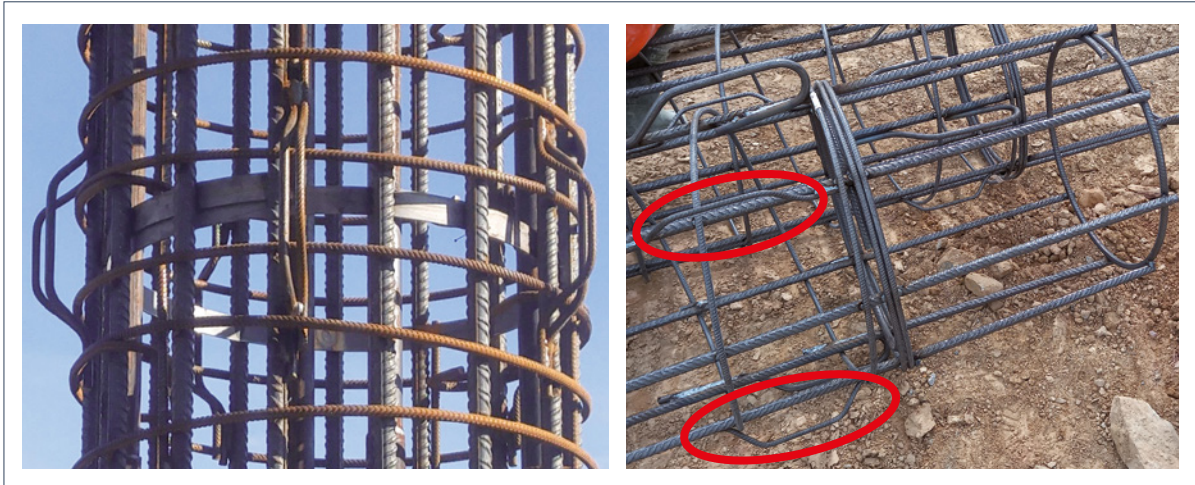
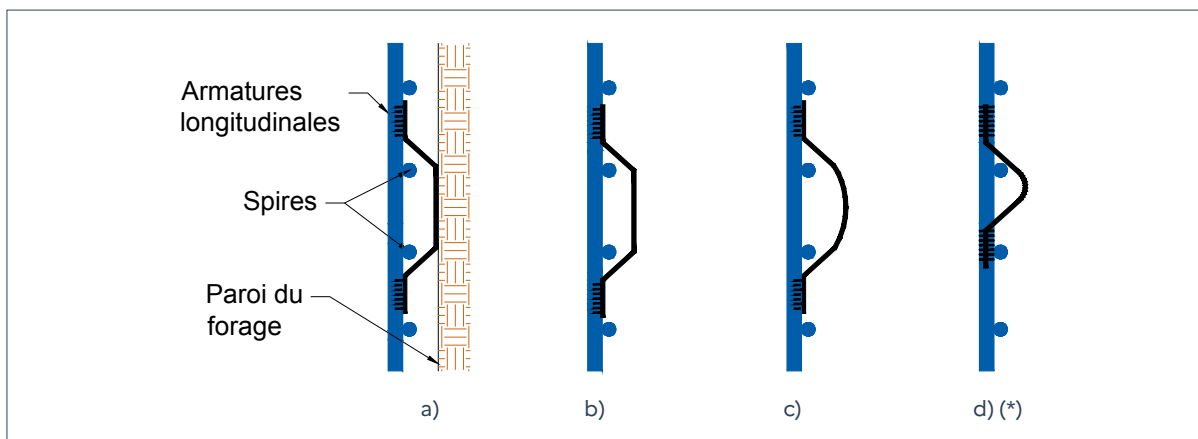


Figure 5.35 : Schéma de disposition d'écarteurs en acier.



(*) La forme de l'écarteur d) peut provoquer le poinçonnement de la paroi de forage.

Précautions et mise en place des écarteurs et des cales pour pieux forés

Ces écarteurs ne doivent pas (article 7.7.6 de la norme NF EN 1536+A1) :

- entraîner l'écaillage du béton ;
- faciliter la corrosion des armatures.

Pour des forages non tubés, leur taille doit être adaptée aux conditions de sol, afin d'éviter un éboulement localisé des parois du forage pendant l'installation des armatures.

Les écarteurs doivent être placés symétriquement autour de la cage avec (article 8.3.5.1 de la norme NF EN 1536+A1) :

- au moins trois unités par niveau (Note) ;
- des espacements longitudinaux n'excédant pas 3 m ; et
- une tolérance suffisante par rapport à la face interne du tubage, pour éviter de coincer, ou de la paroi du forage, pour éviter d'endommager les parois du forage.

Il convient d'augmenter le nombre d'écarteurs dans le cas (article 8.3.5.2 de la norme NF EN 1536+A1) :

- de pieux de diamètre supérieur à 1 200 mm ;
- pour les pieux inclinés.

On observe sur la Figure 5.37 la répartition des cales en béton régulièrement espacées le long de la cage.

Note : pour les barrettes, la pratique courante est de positionner au moins deux écarteurs par niveau sur chaque face de la cage (Figure 5.38).

Figure 5.36 : Exemple d'écarteur en béton

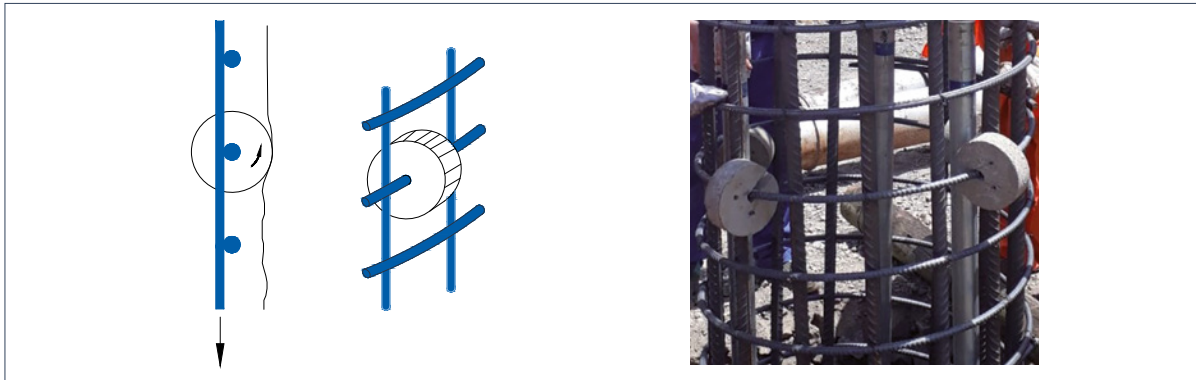


Figure 5.37 : Cages d'armature en polymères renforcés de fibres de verre équipées de cales en béton
(exemple de répartition des patins en béton sur cages cylindriques)

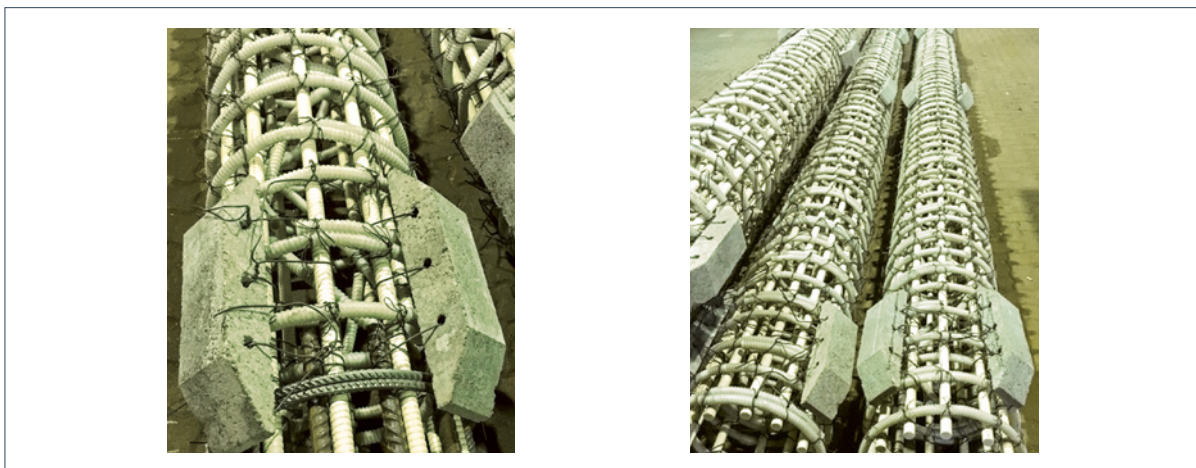
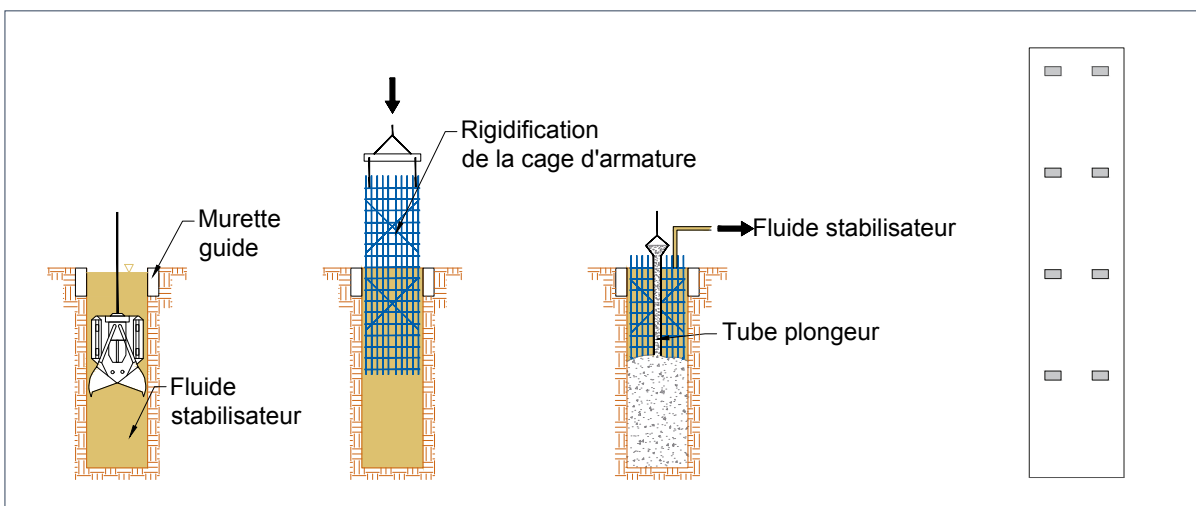


Figure 5.38 : Principe de guidage pour les armatures de barrettes
(murette et exemple de positionnement des cales)



5.3 - ARMATURES DE RIGIDIFICATION DES CAGES

Utilité des armatures de rigidification

La cage est flexible et peut se déformer par flexion et torsion. Le système d'armatures transversales et cerces de montage (cf. § 5.1) n'est pas toujours suffisant ; il est alors nécessaire de rigidifier la cage par des armatures spéciales abandonnées ou récupérées. Outre les efforts de manutention, pour les pieux forés tubés avec tube récupéré, il existe **deux cas de charge importants pour le raidissement** :

- **le flambement sous son poids propre** : au moment du retrait du tube, la cage d'armature repose sur le fond de l'excavation et de ce fait, les charges verticales provenant de la cage supérieure peuvent conduire à un flambement des barres. Ainsi la distance entre les points de fixation des barres principales est importante pour maîtriser ce flambement ;
- **l'extraction du tube métallique provisoire par louvoisement induit une torsion sur la cage** et peut la tordre ; des raidisseurs diagonaux doivent être appliqués pour ce cas de charge.

Les différents types de raidisseurs

Les différents types de raidisseurs sont :

- **pour les cages d'armature en acier de pieux circulaires**, il peut être utilisé :
 - des raidisseurs en Z (Figures 5.39 et 5.40). Lorsque ces raidisseurs ne sont utiles que pour la manutention et selon leurs dispositions, il faut parfois les démonter au fur et à mesure de la descente de la cage, pour laisser passer la colonne de bétonnage, ce qui engendre des problèmes de sécurité pour le personnel de chantier (difficultés à introduire les mains à l'intérieur des cages pour y travailler l'acier et risques de blessures de ce fait),
 - des cerces de montage en fer plat (cf. § 5.1) à la condition d'une soudure adéquate avec les filants,
 - des cadres à l'intérieur et aux extrémités des cages comme indiqué sur la Figure 5.41. Ces raidisseurs sont enlevés une fois la cage verticale suspendue à un palonnier ;
- **pour les cages d'armature en acier de barrettes**, les raidisseurs en Z sont utilisés ;
- **pour les cages d'armature en polymères renforcés de fibres de verre**, l'armature ne pouvant être soudée, le raidissement des cages doit être pris en considération et faire l'objet d'une réflexion spécifique. Les armatures en polymères renforcés de fibres de verre peuvent être fabriquées avec coude en usine (*Note*) pour former des cadres, des étriers, des formes en « Z », des spirales...

Note : les armatures en polymères renforcés de fibres de verre sont fabriquées en usine selon la géométrie désirée avant polymérisation de la résine. Une fois la matrice polymérisée, l'armature ne peut plus être pliée, puisqu'elle a un comportement élastique fragile, empêchant toute modification de forme sur chantier.

Figure 5.39 : Raidisseurs en « z » dans une cage de pieu avec une disposition permettant le passage du tube plongeur

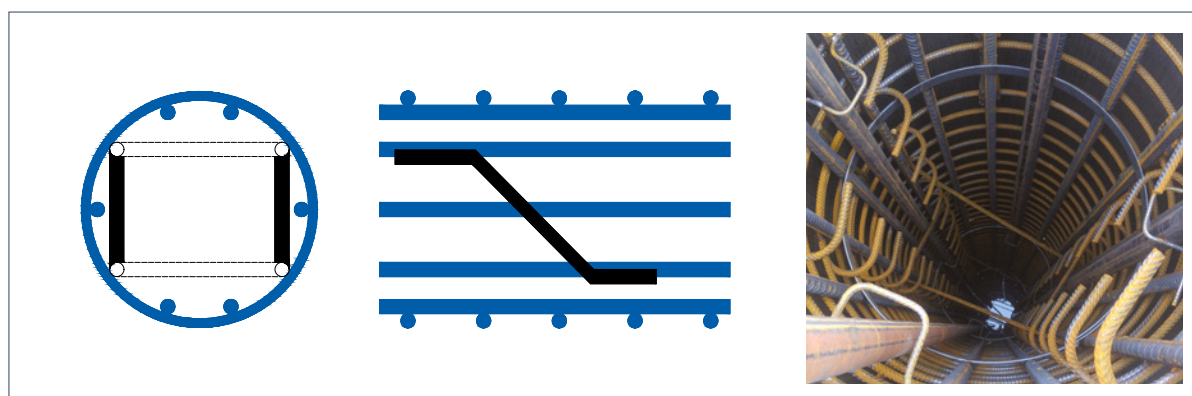
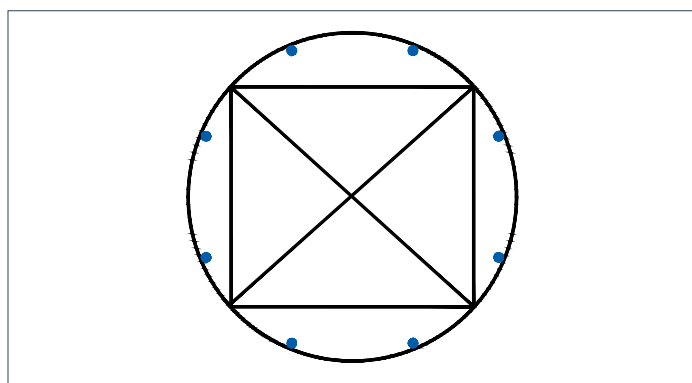


Figure 5.40 : Raidisseurs en « z » dans une cage de pieu



Figure 5.41 : Cadre de rigidification en extrémité de cage



5.4 - FORME DE LA BASE DE LA CAGE

Il était d'usage **de mettre en place un panier** pour s'opposer à la remontée de la cage par effet de lest. Sous l'influence du poids et de la viscosité du béton frais, cette pratique **est devenue aujourd'hui obsolète**, grâce à la qualité des bétons qui a progressé. **On conserve toutefois une inclinaison des armatures** en fin de cage pour faciliter sa descente, sur les 200 mm inférieurs et avec un rayon de courbure de l'ordre de 50 mm (Figure 5.42), afin de diminuer l'effet de pollution possible de la base du pieu par des matériaux arrachés aux parois du forage. Ce rétrécissement de la cage d'armature ne doit **pas gêner le passage du tube de bétonnage** pour les pieux de classe 1.

Figure 5.42 : Inclinaison des armatures en fin de cage



5.5 - CAGES DE FRETAGE ET POTEUX PRÉFONDÉS

Utilité des cages de fretage

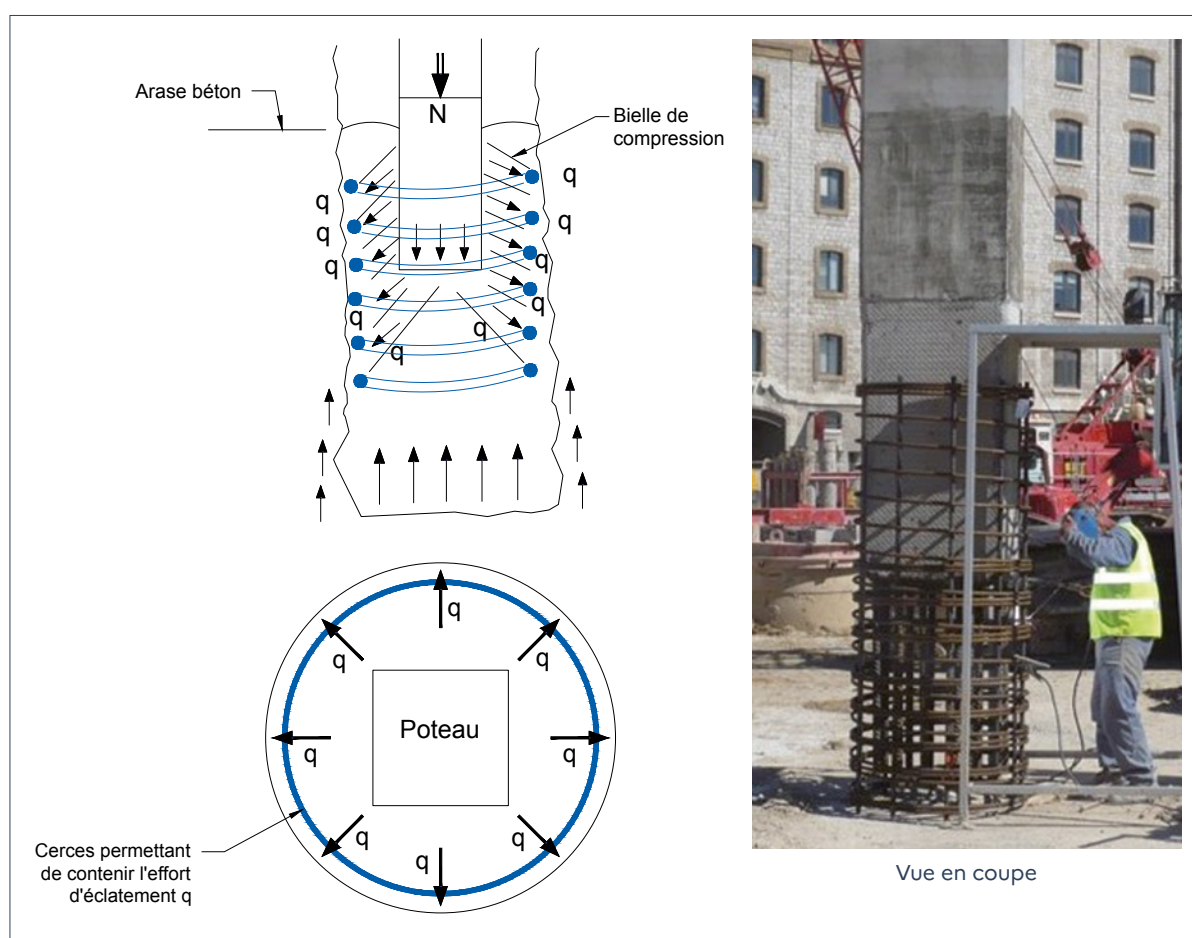
Les cages de fretage ont pour utilité de faire supporter à des sections de béton armé par des profilés, des contraintes plus élevées en compression, flexion et traction. En effet, dans le cas des poteaux profonds (cf. définition dans la *Note 2* du § 3.1), la cage de fretage sert à éviter l'éclatement du béton du pieu lors de la transmission de la descente de charge par la faible section du poteau (Figure 5.43).

Géométrie et mise en place des cages de fretage

Les **frettes** sont des cerces fermées ou des spires reliées à des armatures en barres longitudinales dans le cas de pieu foré de section circulaire ou polygonale. C'est le cas typique du poteau profond.

La **cage de fretage est reliée au profilé** par des barres soudées pouvant traverser les ailes d'un profilé H, par exemple. Les filants de la cage de fretage peuvent participer au confinement du béton. On s'autorise à limiter le diamètre de la cage, dans la mesure où cela se justifie par le calcul.

Figure 5.43 : Utilité de la cage de fretage



Importance de la verticalité

L'objectif est **de respecter le niveau de verticalité exigé du pieu** (ou poteau profond). La précision du travail est essentielle, car le poteau mis en place est à sa place définitive, et la précision doit rejoindre celle du bâtiment, ce qui en fait une de ses grandes difficultés.

La mise en place dans le forage d'un profilé équipé d'une cage de fretage peut entraîner **des problèmes de centrage** au-delà de 5 à 6 m de profondeur.

5.6 - ARMATURES DE LEVAGE ET ANSES DE POSITIONNEMENT

Utilité des armatures de levage et positionnement des renforts

Les cages en acier pouvant être très lourdes, il est **important de dimensionner correctement ces dispositifs de manutention et de concevoir convenablement la méthodologie du levage** pour ne pas engendrer d'efforts parasites qui ne soient dans le sens des aciers, afin de ne pas apporter des efforts sur les aciers transversaux, qui ne sont pas dimensionnés pour cela.

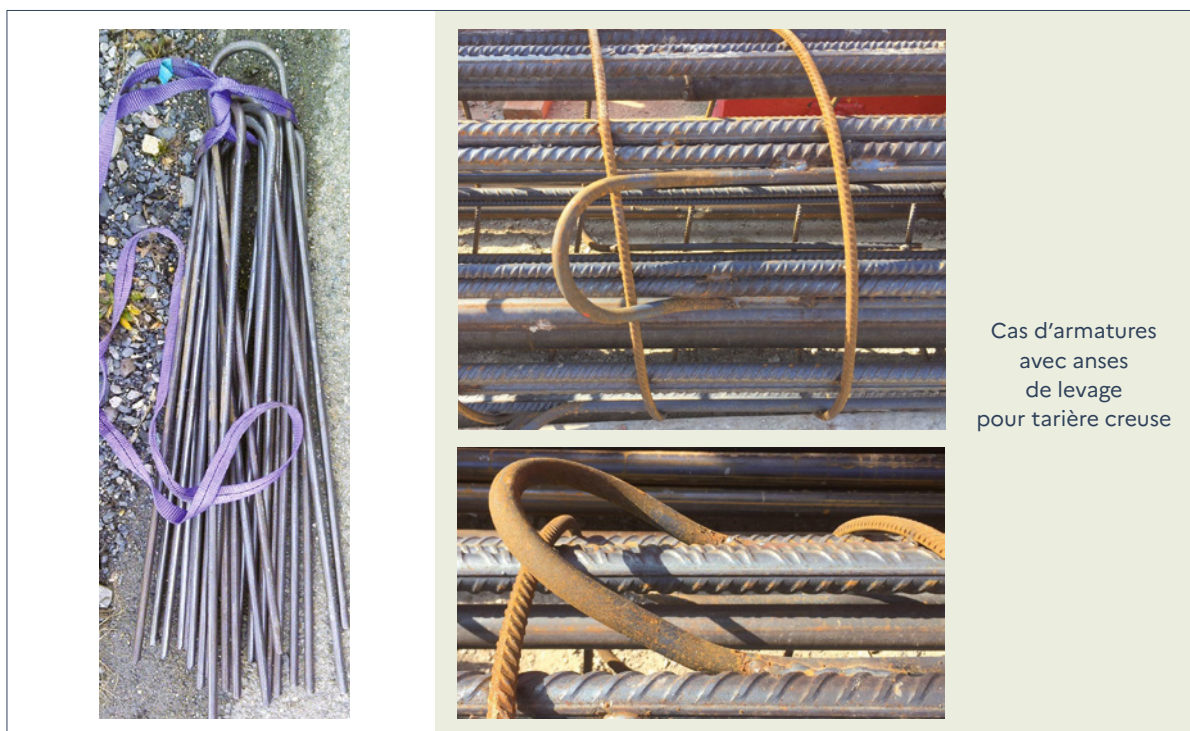
Les armatures de levage sont des armatures particulières **servant à la manutention de la cage** ; il est nécessaire **de renforcer la cage au droit de la zone de levage**, en disposant par exemple des cerces de montages plus nombreuses.

Caractéristiques des armatures de levage

On privilégie **les aciers lisses** (Figure 5.44), afin d'éviter l'adhérence entre le relief de l'armature de levage et le crochet de manutention.

Les armatures de levage sont généralement **soudées aux aciers longitudinaux**. Pour **les cages de pieux constituées en armatures en polymères renforcés de fibres de verre (PRF)**, des ronds à béton peuvent être liaisonnés sur des filants en PRF par l'intermédiaire de serre-câbles ; des sangles de levage sont alors attachées aux parties doublées pour déplacer la cage, afin de ne pas déformer l'armature en PRF au droit de l'attache.

Figure 5.44 : Anses de levage en acier lisse



Les anses de positionnement

Les anses de positionnement peuvent être constituées **en acier à haute adhérence** (Figure 5.45) **ou en acier doux**. Les armatures de positionnement sont **généralement soudées aux aciers longitudinaux**.

Les Figures 5.46 et 5.47 montrent **des exemples de positionnement** de deux ou quatre anses de levage pour un pieu foré (*Note*) disposées symétriquement. La Figure 5.48 permet d'observer un mauvais maintien de la cage dans un forage tubé : tout le poids de la cage porte sur une cerce, en l'absence d'anses de positionnement. Le schéma de la Figure 5.63 dans le § 7.2.2 donne une bonne solution de maintien avec une barre à travers des anses.

Note :

- **pour les pieux forés à la tarière creuse**, les Figures 5.44 et 5.47 montrent les dispositifs avec deux anses de levage ;
- **pour les barrettes**, il est obligatoire de prévoir une double anse de positionnement.

Figure 5.45 : Exemple d'anse de positionnement en acier crénelé



Figure 5.46 : Exemple de disposition pour une cage de pieu de classe 1

(en partie haute, deux anses de positionnement et en partie basse, deux anses de levage/positionnement)

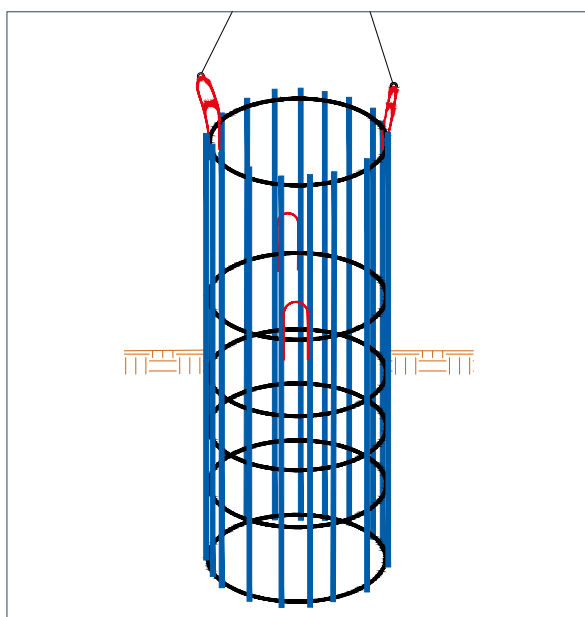


Figure 5.47 : Exemple de dispositif pour une cage de pieu de classe 2

(tarière creuse)

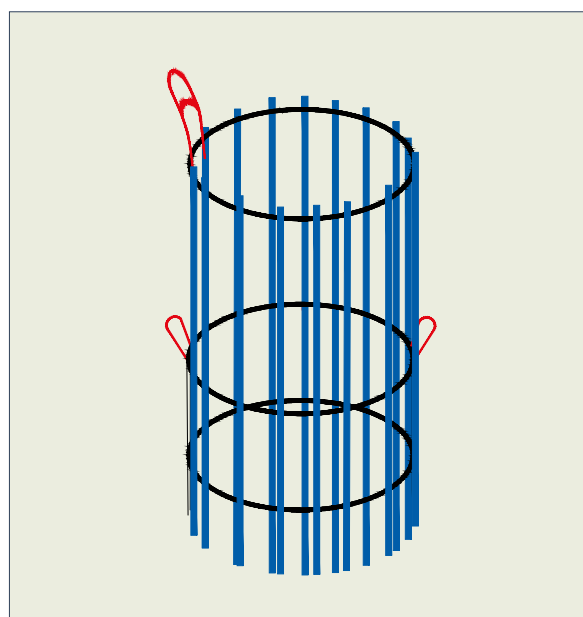
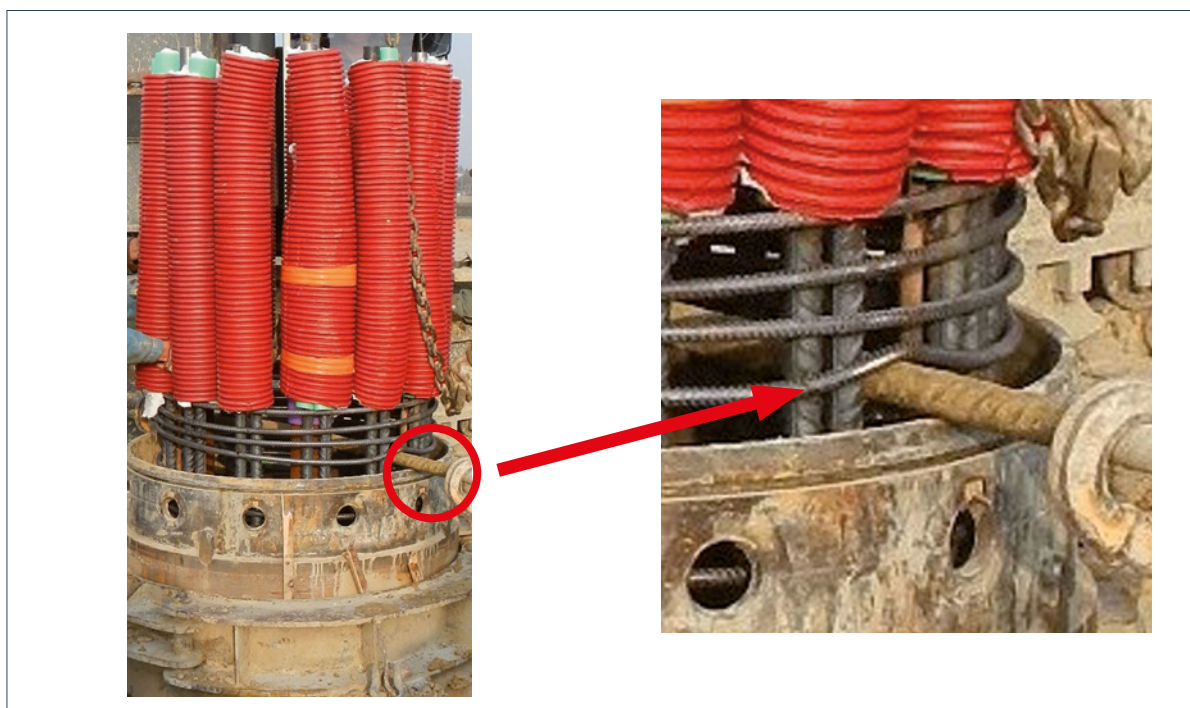


Figure 5.48 : Exemple de mauvais maintien de la cage d'armature – absence d'anses de maintien de la cage



5.7 - SERRE-CÂBLES

Utilité des serre-câbles

Le rôle des serre-câbles (Figures 5.49 et 5.50) est **d'assembler les armatures longitudinales des différents tronçons des cages**, à l'instar du soudage. Leur emploi est recommandé pour éviter d'avoir à souder dans des conditions difficiles (positions de soudage dangereuses, environnement humide, nécessité d'un personnel qualifié...).

L'usage des serre-câbles pour assembler des barres juxtaposées n'est destiné qu'à des opérations de montage. Si leur utilisation visée est la transmission d'efforts, il appartient à l'entreprise de pouvoir le justifier par des procédures de certification ou d'agrément spécifiques.

Mise en place des serre-câbles

Un serre-câble par recouvrement de barres est utilisé usuellement ; chaque filant en sera équipé, s'il est décidé de ne pas recourir au soudage pour le recouvrement (Figure 5.51).

Dans le cas de cages mixtes (acier/ PRFV par exemple), il peut être nécessaire d'augmenter le nombre de serre-câbles par recouvrement, afin d'assurer que les barres restent bien positionnées (Figure 5.49). En ce qui concerne la longueur de recouvrement entre les armatures en polymères renforcés de fibres de verre et celles en acier, en l'absence de prescriptions normatives, nous recommandons de se conformer à l'Eurocode 2 (NF EN 1992).

Des serre-câbles en U peuvent aussi être nécessaires pour le levage et la manutention des armatures mixtes en chantier.

Il convient de positionner les armatures PRF contre l'embase du serre-câble.

Figure 5.49 :
Serre-câbles liaisonnant
des armatures longitudinales en acier
et en polymères renforcés de fibres de verre

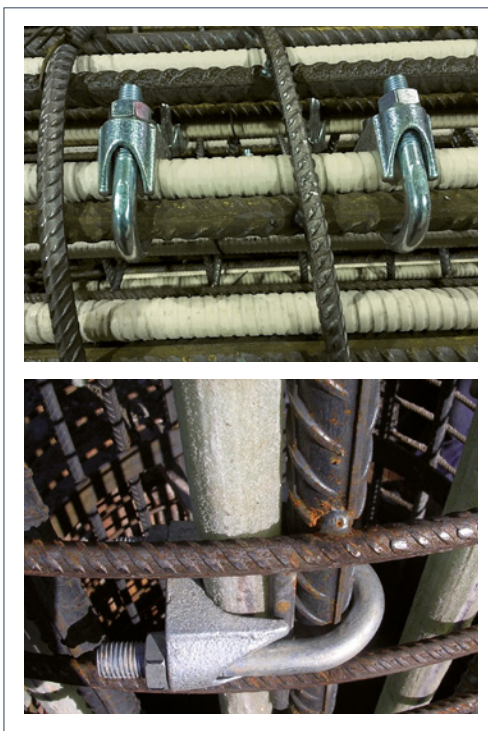


Figure 5.50 :
Serre-câbles
en U

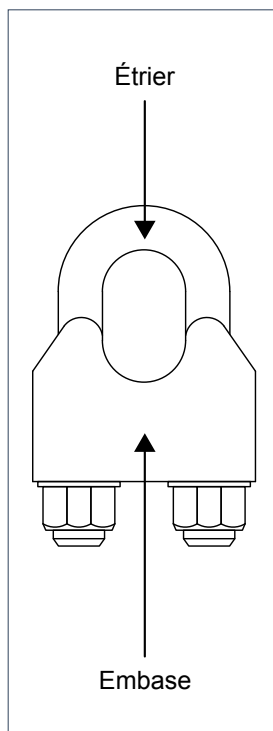
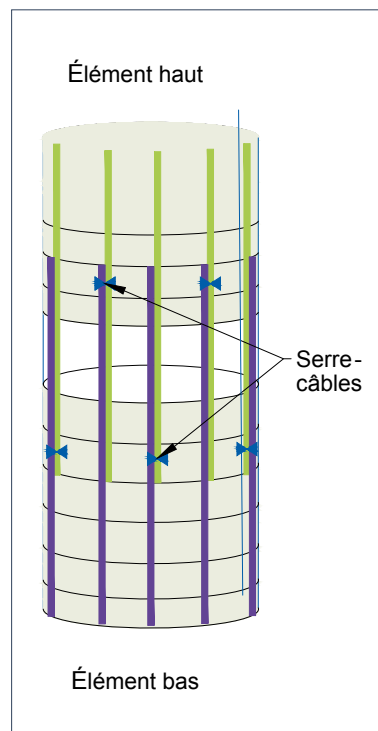


Figure 5.51 :
Principe de recouvrement
alterné par serre-câbles



5.8 - LES TUBES DANS LE PIEU

Les différents tubes dans le pieu

Au niveau des tubes dans les pieux, on distingue :

- **les tubes de réservation** (cf. ci-après et dans le § 2.1.1.2.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ») ;
- **les tubes géothermiques** (Figures 5.52 et 5.53).

Les tubes de réservation

Parmi les tubes de réservation, on distingue ceux prévus pour :

- **le contrôle des pieux finis** par :
 - auscultation sonique du pieu (cf. § 2.1.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis » et Figure 5.54),
 - carottage du pied du pieu et sous la base du pieu (cf. § 2.2 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis » et Figure 5.54), afin de vérifier le fond du pieu (*Notes 1 et 2*) ;
- **l'instrumentation des pieux** :
 - la pose ultérieure d'un tube rainuré nécessaire aux mesures inclinométriques (Figure 5.55), pour le suivi des déformations angulaires des pieux (*Notes 3 et 4*),
 - la pose d'un extensomètre amovible, afin de mesurer les déformations uniaxiales dans le cas d'un essai de chargement (Figures 5.56 et 5.57) ;
- **l'injection sous la base du pieu** afin d'améliorer la capacité portante ;
- **l'injection des sols sous un rideau de pieux sécants** pour réaliser une jupe d'étanchéité.

Les tubes de réservation **réduisent la section de passage pour le tube plongeur** : tous ne sont pas compatibles avec des pieux de petit diamètre et le cumul de plusieurs réservations n'est pas toujours possible.

Le Tableau 5.9 présente **les caractéristiques courantes des tubes de réservation** en fonction de leur utilisation et le § 7.3 traite de leur fixation à la cage d'armature.

***Note 1** : si l'extrémité du tube de carottage est positionnée trop proche du fond du forage, le carottage du fond de pieu sera réalisé sur une épaisseur trop réduite.*

***Note 2** : si le tube de carottage sert également de tube d'auscultation sonique, la zone sous le tube de carottage ne sera pas entièrement auscultée.*

***Note 3** : les mesures inclinométriques nécessitent la pose d'un tube rainuré (en PVC, en ABS⁽²⁴⁾, en aluminium...) qui suit fidèlement les déformations du béton. Ce tube pour la mise en œuvre d'un inclinomètre est scellé au coulis dans le tube de réservation.*

***Note 4** : le tube de réservation peut être prolongé par un forage qui débouche sous le pieu (en général 5 m), afin d'installer le tube rainuré sur la hauteur du pieu plus 5 m, ce qui permettra de détecter les déplacements de la base du pieu par rapport au sol sous-jacent supposé immobile.*

24. ABS (acrylonitrile butadiène styrène) est un polymère thermoplastique.

Figure 5.52 :
Tubes géothermiques dans des cages

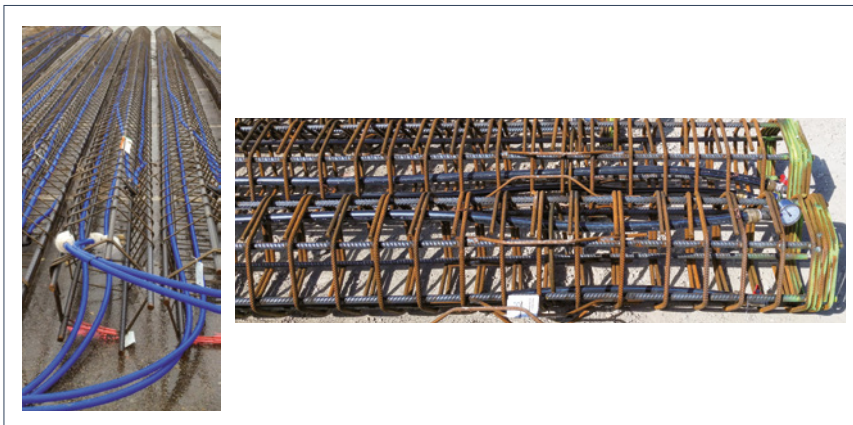


Figure 5.53 :
Pieu géothermique recépé



Figure 5.54 : Tubes de réservation
(les tubes de petits diamètres pour l'auscultation sonore et le tube de diamètre plus important pour le carottage)



Figure 5.55 :
Exemples de tubes inclinométriques



Figure 5.56 :
Extensomètre amovible



Figure 5.57 :
Réservation dans une tête pour passage des extensomètres



Tableau 5.9 : Différents usages des tubes de réservation et leurs caractéristiques courantes

Destination	Matériau	Type d'assemblage	Bouchonnage	Fluide de remplissage après bétonnage	Diamètre int/ext (mm)
Auscultation sonique ^{a)}	Acier non galvanisé	Tulipe / Manchon	Plastique	Eau	Vissé : 50/60 ^{a)} (épaisseur 5 mm) Tulipé ^{d)} : 53/55 ^{a)} (épaisseur 1,5 mm)
Géothermie	Plastique adapté	Circuit continu	Plastique		De 12,7 à 25,4 mm (Ø ext)
Carottage ^{b)}	Acier	Tulipe / Manchon	Plastique ou métal		Vissé : 102/114 (épaisseur 6 mm) Tulipé ^{d)} : 110/114
Inclinométrie	Alu et Plastique adapté scellé dans un tube en acier ^{e)}	Manchon	Plastique		Variable de l'ordre de 45 à 90 mm (Ø ext)
Extensométrie ^{c)}	Acier ^{f)}	Manchon	Plastique	/	52/54 ± 1 35/37 ± 1 (épaisseur 2 mm)

a) La norme d'application de l'essai (NF P94-160-1) requiert un diamètre minimal de 40 mm.
b) Tube pouvant servir aussi pour une injection complémentaire sous la base du pieu.
c) Nécessité d'un tube ébavuré intérieurement. En partie haute, le tube débouche dans une tête spécialement aménagée pour permettre le passage des câbles de jauges et des tubulures.
d) Les systèmes tulipés sont déconseillés en raison de leur étanchéité parfois défectueuse.
e) Attention, ces tubes rainurés doivent être scellés dans un tube de réservation, car ils sont trop fragiles, souvent après le recépage et la réalisation de la tête du pieu.
f) Afin de mesurer les déformations uniaxiales solidaires à celle du béton.

Références et numérotation

Les tubes de réservation doivent être reportés sur **les plans d'armatures**.

Les tubes pour l'auscultation sonique sont numérotés selon la règle générale énoncée dans le § 2.1.1.2 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ».

Caractéristiques des tubes

Ces tubes de réservation doivent :

- être rigides et étanches, lisses et propres ;
- ne pas être constitués d'acier galvanisé ou autre métal susceptible de générer des effets électrostatiques entraînant une corrosion électrochimique de l'armature et des dépôts intempestifs de suspension minérale en cas de pieux forés boue ;
- être dégraissés extérieurement pour assurer une meilleure adhérence au béton ;
- être soigneusement nettoyés intérieurement de tout dépôt, trace de laitance... qui pourraient fausser les résultats des essais ;

- **être ébavurés**, pour assurer la mise en œuvre de l'extensomètre amovible sans endommager les bloqueurs dans le cas des tubes pour extensométrie (Figure 5.56) ou pour ne pas endommager les câbles des sondes d'auscultation sonique qui seraient au contact des bords du tube, dans le cas des essais soniques (Figure 5.58).

Figure 5.58 : Exemples de systèmes permettant aux câbles des sondes (auscultations soniques) de ne pas toucher les bords du tube



Solution risquée
avec mise en place de chiffon et ruban adhésif



Solution préconisée
avec poulies

Répartition des tubes de réservation

Les tubes sont placés de façon :

- à ne pas nuire au bon enrobage des armatures (cf. fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés ») ;
- à ne pas entraver la manœuvre du tube plongeur ;
- à optimiser les trajets (cf. fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »).

CHAPITRE 6

Enrobage des armatures

6. ENROBAGE DES ARMATURES

L'enrobage représente la distance entre l'extérieur de la cage d'armature (ou du profilé) et la surface de béton la plus proche (surface excavée la plus proche formée par l'outil d'excavation, ou bien la face interne d'un tubage permanent ou d'une gaine).

6.1 - VALEURS D'ENROBAGE POUR LES CAGES D'ARMATURE

Valeurs de l'enrobage conseillées pour les cages d'armature

Les valeurs de l'enrobage minimal citées dans les normes NF EN 1536+A1 (40 mm à 75 mm selon les articles 7.7.2 et 7.7.4) et NF P94-262 COMPIL1 (40 à 70 mm selon l'article Q.3.4.2.5 pour les ponts) s'avèrent souvent trop faibles pour faciliter la mise en œuvre des armatures. Il est recommandé en exécution de considérer un enrobage compris entre 75 et 120 mm (Note 1).

Il est **conseillé d'augmenter l'enrobage** (Note 2) :

- avec la profondeur du pieu, afin de faciliter la mise en place de la cage ;
- en fonction des dimensions des cales, l'enrobage peut être augmenté, afin que les centreurs jouent pleinement leur rôle. Un jeu de 20 mm entre la paroi du forage et le nu de l'écarteur facilite la mise en place de la cage dans le forage.

Il est possible de **réduire l'enrobage** dans un tube permanent (article 7.7.4 de la norme NF EN 1536+A1) : le tube constituant un parement régulier et lisse, créant ainsi une protection vis-à-vis de l'agressivité du milieu extérieur, l'épaisseur minimale d'enrobage peut ainsi être diminuée.

⚠ Il convient de ne pas confondre l'enrobage et l'épaisseur des centreurs lorsqu'il s'agit de pieu foré tube récupéré : les épaisseurs de tubes de travail (récupérés) garantissent ainsi à eux seuls un enrobage généralement de 20 à 40 mm, ce qui diminue d'autant l'épaisseur des centreurs (Note 3).

Note 1 : un enrobage jusqu'à 120 mm peut être conseillé pour les pieux à la tarière creuse afin de faciliter la descente de la cage dans le béton frais.

Note 2 : un enrobage trop important a par contre l'inconvénient d'entraîner un surcroît d'armatures pour des raisons de modification de la valeur d'inertie des sections en béton armé (5 à 10 % pour certains diamètres).

Note 3 : la rhéologie du béton doit permettre le remplissage de l'espace laissé libre par le retrait du tube. La descente du survolume du béton permet de vérifier son remplissage (cf. Figure 4.55 dans le § 5.7 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »). Le risque reste le fluage du sol qui augmenterait la descente du niveau du béton. Si, par contre le volume correspondant à la baisse du niveau de béton est inférieur au volume laissé par le retrait partiel du tube, il y a un risque que ce volume annulaire soit rempli par le sol.

6.2 - VALEURS D'ENROBAGE POUR LES PROFILÉS

Si le profilé est utilisé **comme élément de la structure définitive** (par exemple, comme poteau profondé), d'autres considérations comme la tenue au feu sont à prendre en compte : ce cas n'est pas traité ici et doit faire l'objet d'études spécifiques.

Si le profilé est **calculé sans tenir compte de l'interaction avec le béton** (cas généralement des berlinoises), on doit appliquer les dispositions de l'Eurocode 3 partie 5 (NF EN 1993-5), particulièrement celles relatives à la corrosion.

Sinon, l'enrobage des profilés est à calculer selon l'Eurocode 4 (Note), il est lié notamment à la classe d'exposition du béton : « Un enrobage minimal de béton armé doit être réalisé afin d'assurer la transmission efficace des efforts d'adhérence, la protection de l'acier contre la corrosion et d'éviter l'éclatement du béton ». Dans le cas de profilé, une distance « paroi du forage-extrémité d'aile » de 60 mm est recommandée pour faciliter la mise œuvre. Pour un tube servant d'armature, il faut compter 50 mm d'enrobage minimum.

Pour l'enrobage des cages de fretage des poteaux profondés, on se rapportera aux valeurs conseillées pour les cages, citées dans le § 6.1.

Note : la norme NF EN 1994-1-1 traite des calculs de structures mixtes acier-béton.

6.3 - VALEURS D'ENROBAGE POUR LES ARMATURES EN POLYMÈRES RENFORCÉS EN FIBRES DE VERRE

Les armatures composites (PRFV) n'étant pas sensibles à la corrosion, leur enrobage a pour objet de [5.8] :

- diffuser les efforts de l'armature au béton ;
- justifier, dans certains cas, le comportement de la structure à température élevée.

La différence de rôle de l'enrobage par rapport au cas des armatures en acier conduit donc à des valeurs différentes de celles adoptées pour les aciers.

⚠ Lors de l'écriture de ce guide, il n'y a pas encore de normes sur le sujet et le retour d'expérience demande à être étoffé.



CHAPITRE 7

Assemblage des armatures

7. ASSEMBLAGE DES ARMATURES

Ce chapitre portant sur l'assemblage des armatures traite des points suivants :

- la fixation des armatures transversales pour la constitution d'une cage d'armature (§ 7.1) ;
- l'assemblage entre eux des tronçons de cages livrés au gabarit routier et assemblés ensuite sur chantier (§ 7.2) ;
- l'assemblage et la fixation des tubes de réservation (§ 7.3) ;
- les spécificités des cages d'armature pour les pieux de classe 2 (§ 7.4) ;
- l'assemblage des éléments porteurs en aciers tels les profilés (§ 7.5) ;
- le soudage des armatures en acier (§ 7.6) ;
- les dispositions constructives parasismiques pour les cages (§ 7.7) ;
- le contrôle de l'assemblage de la cage (§ 7.8).

7.1 - FIXATION DES ARMATURES TRANSVERSALES

Techniques d'assemblage

L'assemblage entre armatures transversales et longitudinales peut se faire par :

- **soudure** (Figure 5.59),
 - pour les armatures en acier, cette technique est généralement privilégiée en usine (*Note* - Figure 5.60),
 - pour les cages constituées en matériaux autres que l'acier, le soudage des armatures n'est pas concevable ;
- **ligature** :
 - pour les armatures en acier, cette technique est devenue marginale en usine (*Note*) et n'a généralement lieu qu'en chantier,
 - pour les cages constituées en matériaux autres que l'acier, la liaison entre armatures longitudinales et transversales se fait par l'intermédiaire de fils en fer nus ou revêtus ou en polymère ou bandes de polymères (contexte agressif). Cet assemblage peut se faire en fil acier en usine ou bien par des colliers de serrage crantés en plastique (Figure 5.61).

Note : en usine, il revient moins cher de souder que de ligaturer, de plus le soudage se fait dans de bonnes conditions (à l'abri de la pluie et du vent) et dans une position optimale, car les cages peuvent être tournées au fur et à mesure.

Figure 5.59 : Exemple de soudure entre les armatures transversales et longitudinales

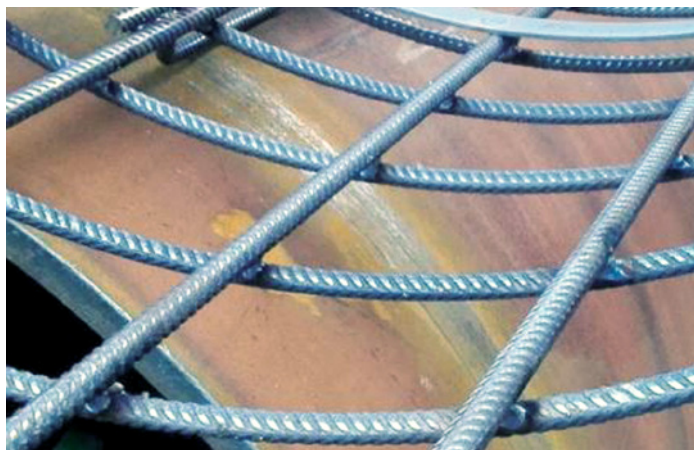
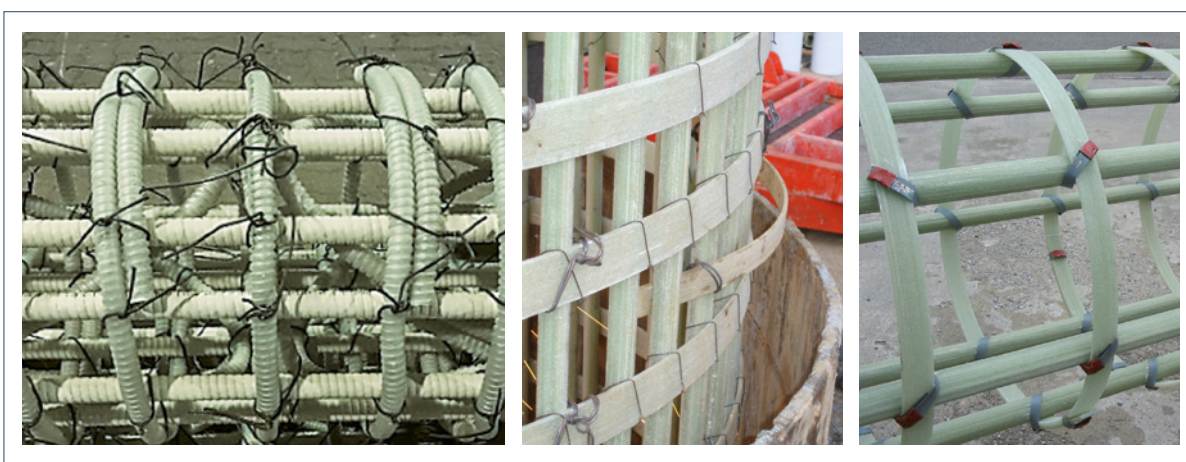


Figure 5.60 : Machine d'assemblage des aciers en usine



Figure 5.61 : Liaison par ligatures des armatures longitudinales et des cerces pour les cages constituées en matériaux alternatifs à l'acier (polymères renforcés de fibres de verre)



Mise en œuvre des cerces et des spires

Les cerces et les spires sont mises en place afin d'éviter toute dégradation de la cage lors des opérations de recépage et de terrassement. Lorsque l'assemblage a lieu en usine (*Note 1*), le fabricant de cages doit fournir une cage qui respecte le plan et qui peut être manutentionnée, aussi bien à l'horizontale (chargement et déchargement du camion, stockage), que pendant la mise à la verticale (opération très sensible et plus ou moins dangereuse suivant les diamètres des cages et surtout leur longueur - cf. chapitre 9). Dans ce cas, les spires proviennent d'acier en couronnes et sont alors enroulées et soudées (*Note 2*) sur les barres filantes à l'aide de machines spéciales (Figure 5.60).

Note 1 : l'assemblage en usine représente l'essentiel des cas.

Note 2 : les spires soudées maintiennent la section de la cage circulaire pendant le coulage, elles rigidifient la cage d'armature, mais ne sont pas des armatures de rigidification (cf. § 5.3).

7.2 - ASSEMBLAGE DES TRONÇONS DE CAGE

7.2.1 - POSITION ET PRÉCAUTIONS POUR L'ASSEMBLAGE DES CAGES

Position pour l'assemblage des cages

Les armatures **des pieux de grande longueur** doivent être décomposées, à cause du transport et des gabarits routiers (cf. chapitre 8), en tronçons qui sont assemblés sur le chantier. L'assemblage peut avoir lieu à **l'horizontale ou bien en position verticale** (Figure 5.62). Si l'assemblage est réalisé dans le forage (Figure 5.63 - *Note*), le tronçon le plus long est généralement descendu en premier. **La répartition des moments conditionne la position des zones d'assemblage** pour minimiser en particulier les efforts de flexion dans les zones de recouvrement.

Note : il est parfois fait usage d'un « forage-tampon » ou « pieu-garage » sur lequel s'effectue le montage des cages, afin de réduire le temps passé à l'équipement sur le pieu lui-même.

Figure 5.62 : Assemblage en position verticale de la cage d'armature via des manchons



Précautions pour l'assemblage de tronçons de cages

Cet assemblage doit être tel que :

- les tronçons de cages d'armature puissent être levés sans déformation permanente ;
- les barres restent en position initiale.

7.2.2 - ASSEMBLAGE PAR RABOUTAGE DES TRONÇONS DE CAGES

Définition de rabouter

Rabouter signifie assembler bout à bout deux barres d'armature. Cet assemblage peut se faire par la soudure ou par manchonnage.

Objectif du raboutage

La liaison des aciers par raboutage permet la transmission des efforts directement d'un acier à son correspondant. Cette liaison est aussi utilisée pour la manutention et le maintien pendant le bétonnage.

Techniques de raboutage

La liaison des barres longitudinales par raboutage peut être réalisée :

- par soudure bout à bout (Notes 1 et 2) ;
- via des coupleurs mécaniques (manchons - Figure 5.62).

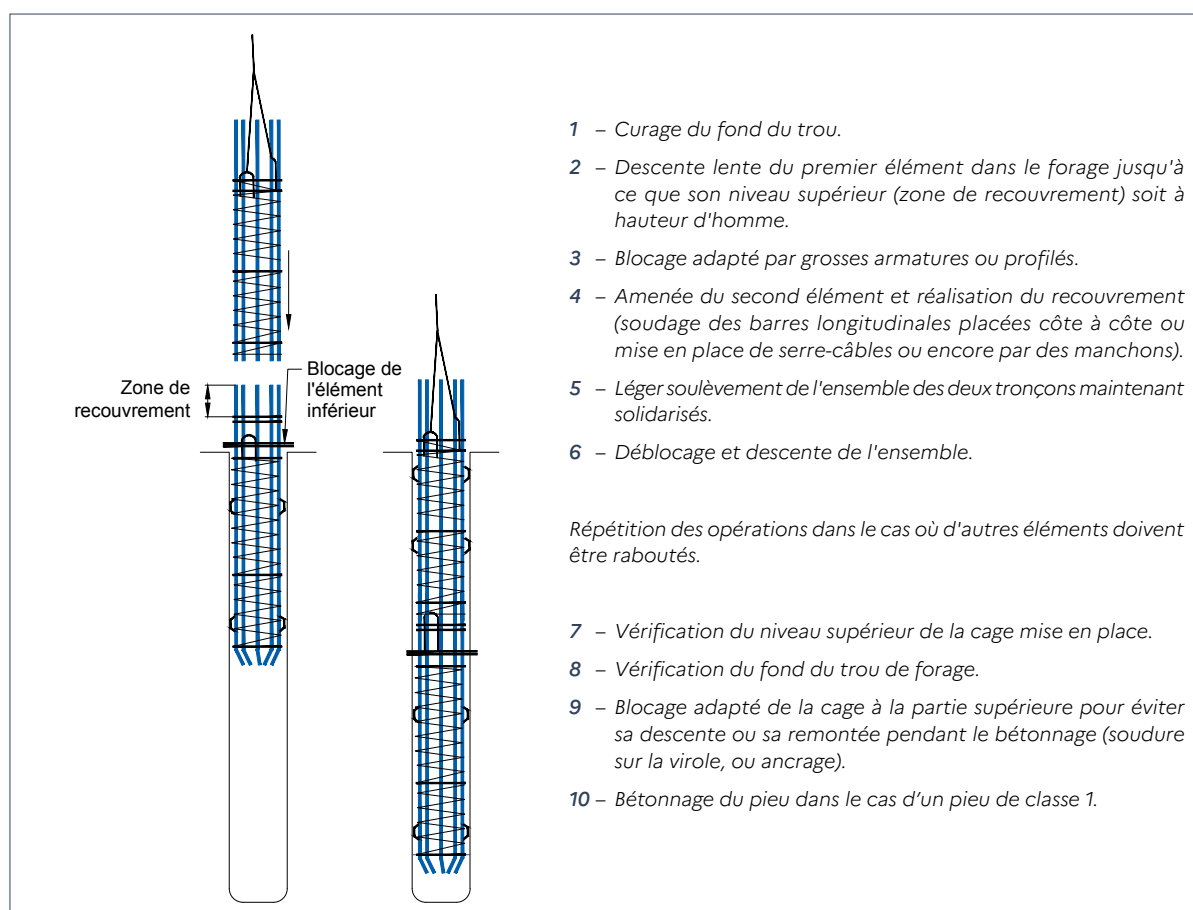
Note 1 : la soudure bout à bout est très rarement mise en œuvre sur chantier, car il faut que les filants des cages d'armature soient bien alignés et le restent pendant toute l'opération de soudage. Il faut aussi que l'opération soit réalisée par un soudeur habilité à souder dans des conditions difficiles. Ces contraintes étant trop importantes, l'usage du manchon est plus simple et donc largement préféré.

Note 2 : on réalise quelquefois un assemblage par soudure de recouvrement transmettant des efforts (et non bout à bout). La longueur de recouvrement est inférieure à la longueur de recouvrement classique, car l'effort est transmis par la soudure. Cela suppose que l'entreprise soit qualifiée pour la soudure transmettant des efforts. L'AFCAB (cf. § 2.1.4) qualifie ces soudures.

Zones à privilégier pour le raboutage

On privilégie de positionner **les zones de raboutage des armatures** en dehors des zones pour lesquelles le béton est fortement sollicité.

Figure 5.63 : Phases de mise en place de deux tronçons de cage d'armature



Raboutage pour les pieux de classe 2

Pour les pieux de classe 2 (tarière creuse), lorsque les conditions de transport le permettent, **on privilégie un raboutage des filants en usine. Sur chantier**, de manière à ce que la descente de l'armature soit effectuée le plus rapidement possible après le bétonnage du pieu et dans un délai le plus court possible, compatible avec le maintien de la rhéologie du béton frais, **les raboutages des longues cages sont généralement exécutés :**

- à l'horizontale, préalablement à la réalisation des pieux ;
- à la verticale, dans un forage provisoire stabilisé. En dernier recours, le raboutage peut s'effectuer directement dans le pieu, mais nécessite une bonne maîtrise de la rhéologie du béton.

7.2.3 - ASSEMBLAGE PAR RECOUVREMENT

Objectif du recouvrement

Le recouvrement sert en phase de service pour que les efforts passent d'une barre dans le béton et du béton à l'autre barre.

L'usage de soudure ou de serre-câble n'est nécessaire que pour la phase de manutention et le maintien pendant le bétonnage.

Principe de recouvrement

Lorsqu'elles ne sont pas assemblées par raboutage (cf. § 7.2.2), les parties de cage le sont entre elles par recouvrement. Les extrémités des parties viennent se superposer dans la **zone de recouvrement**, où leurs barres longitudinales se chevauchent. **Elles sont alors assemblées entre elles (Note) par l'intermédiaire**, au choix :

- de cordons de soudure ;
- de serre-câbles (cf. § 5.7).

Les tubes de réservation peuvent être eux aussi assemblés dans la zone de recouvrement (cf. § 7.3 sur l'« Assemblage et fixation des tubes de réservation »).

Note : parmi les barres faisant l'objet de recouvrement par superposition, seules les barres nécessaires à la reprise des efforts de manutention feront obligatoirement l'objet d'un assemblage complémentaire par cordons de soudure ou par serre-câbles.

Valeurs du recouvrement

Les valeurs de recouvrement sont à déterminer par le calcul conformément aux prescriptions de l'Eurocode 2 dans sa section 8 (article 8.7.3 de la norme NF EN 1992-1-1 COMPIL1).

Zones de recouvrement

Les barres de recouvrement (Figure 5.64) se situent soit :

- en haut sur l'élément bas du tronçon de la cage ;
- en bas sur l'élément haut du tronçon de la cage placé au-dessus.

Afin de faciliter l'assemblage des deux tronçons de cage, les armatures transversales nécessaires dans la zone de recouvrement peuvent être installées ultérieurement (Figure 5.65).

Usage des serre-câbles dans les zones de recouvrement

Si des **serre-câbles** (cf. § 5.7) sont employés, ils sont positionnés en conséquence ; généralement un serre-câble par recouvrement de barres est utilisé. La Figure 5.49 (dans le § 5.7) détaille la liaison par serre-câbles de barres longitudinales pour des cages en polymères renforcés de fibres de verre. Le procédé est identique dans le cas des barres en acier.

Figure 5.64 : Principe de la zone de recouvrement permettant l'assemblage de tronçons de cage

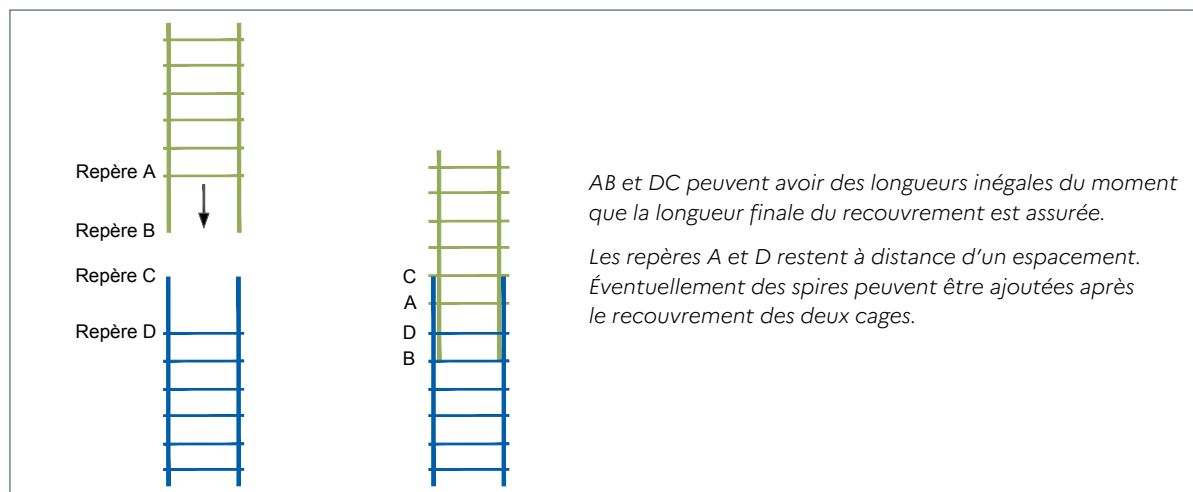


Figure 5.65 : Zone de recouvrement permettant l'assemblage de tronçons de cage (absence d'armatures transversales)



Intérêt de l'assemblage alterné

Cet assemblage alterné de barres filantes peut être mis en œuvre par principe de précaution pour assurer une bonne transmission des efforts, lorsque le recouvrement est prévu dans les zones de sollicitations importantes.

Problématique de l'assemblage alterné de barres filantes

L'assemblage alterné des barres filantes pose un problème de dangerosité pour les personnes affectées à cette tâche. Ce travail de recouvrement est souvent effectué à quelques mètres au-dessus du sol, la posture de travail est pénible.

7.3 - ASSEMBLAGE ET FIXATION DES TUBES DE RÉSERVATION

Raboutage des tubes et risques encourus

Lorsque les cages sont de longueur conséquente, il est nécessaire d'assembler les tubes de réservation fixés sur les éléments de cage lors de leur phase d'assemblage. Ce raboutage peut provoquer des problématiques d'étanchéité citées dans le § 2.1.1.2.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis ».

Le raboutage des tubes de réservation peut être rendu difficile en raison de l'encombrement occasionné par les armatures (Figure 5.66).

Les tubes de réservation peuvent être (Note 1) :

- manchonnés et soudés (Figure 5.67) (Note 2) ;
- manchonnés vissés (Notes 3 et 4).

Note 1 : les systèmes tulipés (Figure 5.68) sont déconseillés en raison d'un risque d'étanchéité défaillante. Le raccord par tulipage est limité aux cas particuliers pour lesquels la mise en œuvre de manchons vissés est particulièrement difficile (assemblage de cage lors de l'équipement).

Note 2 : afin d'assurer l'étanchéité au niveau du raccord, un cordon de soudure sur toute la périphérie est conseillé, en prenant soin d'éviter les coulures à l'intérieur du tube qui conduiraient à une intervention pour les supprimer, sous peine de ne pouvoir utiliser la réservation. Ce cordon de soudure est difficile à réaliser, car il faut pouvoir tourner les tubes au milieu des aciers. Néanmoins, il ne faut faire qu'un tour, contrairement au cas du vissage des tubes. Ce n'est pas le cas de la configuration présentée sur la Figure 5.67, où les soudures sont ponctuelles, pouvant conduire dans ce cas à des fuites de laitance du béton dans le tube ou à l'inverse des fuites d'eau dans le béton si on remplit le tube.

Note 3 : le vissage des tubes entre eux est difficile à réaliser, mais la qualité du raccord obtenu est supérieure à un assemblage tulipé pour l'étanchéité et la rigidité des tubes (cf. fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis »). Toutefois, la majorité des chantiers d'assemblage se font par manchons soudés, par facilité.

Note 4 : le vissage oblige à avoir des tubes qui peuvent tourner librement dans leur liaisonnement à la cage, tout en ayant un dispositif pour les empêcher de tomber lorsque la cage est verticale.

Figure 5.66 :
Difficulté de raccorder les tubes
en raison de l'encombrement



Figure 5.67 :
Raccord par manchon
partiellement soudé



Figure 5.68 :
Raccord tulipé
(déconseillé)



Choix du type de raboutage en fonction de l'utilisation des tubes de réservation

Le Tableau 5.9 dans le § 5.8 reprend en fonction de l'utilisation des tubes, le type d'assemblage. Cependant, il est rappelé que :

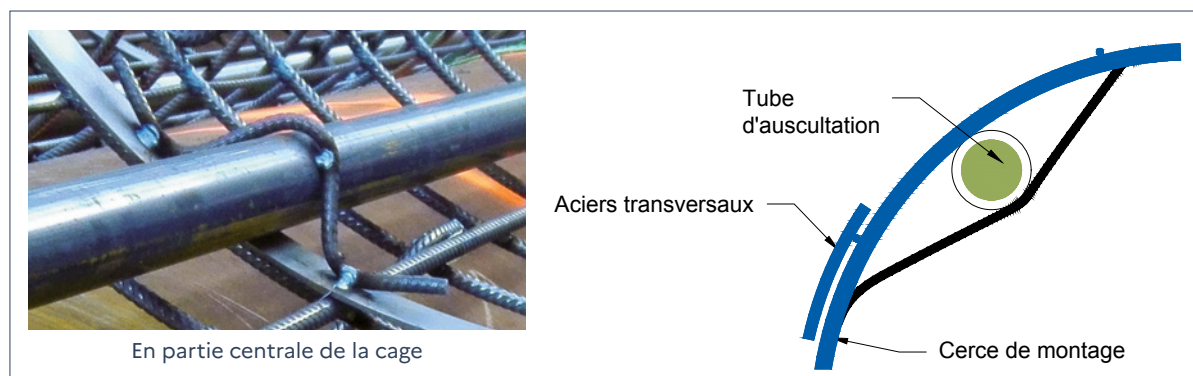
- pour le contrôle de l'intégrité des pieux par la méthode par transparence selon la clause 3.4.4 du Fascicule 68 du CCTG, les tubes doivent être manchonnés vissés, afin d'assurer l'étanchéité (lors du bétonnage et lors des mesures, car le tube doit rester rempli d'eau) et la rigidité ;
- dans le cas d'essais avec extensomètres amovibles, les tubes doivent être manchonnés et soudés, dégraissés intérieurement pour assurer un meilleur accrochage des bloqueurs, avec ébavurage intérieur des tubes pour éviter de faire éclater les bloqueurs.

Système de guidage des tubes

Le guidage des tubes fixés en périphérie de la cage est assuré par des écarteurs en forme de chapeau de gendarme (Figure 5.69) ; ces chapeaux de gendarme doivent être positionnés à la fois :

- proches en partie centrale des éléments de cage pour assurer le maintien des tubes ;
- assez éloignés des extrémités des tubes, afin d'obtenir un jeu permettant l'ajustage des tubes entre eux en cas d'assemblage d'éléments de cage.

Figure 5.69 : Écarteur en forme de chapeau de gendarme soudé sur une cerce de gabarit



Risques et précautions relatifs aux tubes de réservation

Il existe un risque :

- **de remontée des tubes lors du bétonnage** s'ils ne sont pas bien liaisonnés à la cage ;
- **d'obstruction du tube** suite à l'introduction de laitance à l'intérieur lors du bétonnage (*Note*) :
 - si le tube n'est pas correctement fermé à ses extrémités (cf. le « bouchonnage » dans le Tableau 5.9 dans le § 5.8),
 - si l'étanchéité des assemblages n'est pas suffisamment soignée, afin d'empêcher l'arrivée de laitance de béton dans les tubes et/ou le passage de l'eau du tube dans le béton.

Note : l'entrée de la laitance dans le tube peut provoquer un défaut dans le béton à ce niveau et donc une anomalie lors de la réalisation des essais soniques.

Calage des tubes de réservation

Si la cage d'armature comprend plusieurs éléments de tubes à assembler, qui ont été laissés libres en rotation pour permettre l'assemblage, le calage des tubes (Figure 5.70) est nécessaire pour les opérations de manutention.

Figure 5.70 : Calage provisoire des tubes de réservation



Position des tubes de réservation

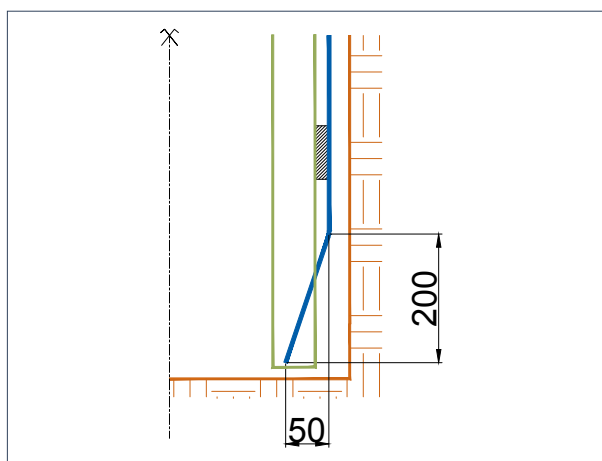
La position :

- **des tubes de réservation** destinés à des contrôles est donnée dans le § 2.1.1.2.1 du fascicule 6 « Le contrôle des pieux finis » ;
- **des autres types de réservation** doit être précisée par le maître d'œuvre ou donnée par une notice d'utilisation du fournisseur.

Dans tous les cas, la position des tubes de réservation est portée **sur les plans d'armatures**.

Lorsque la cage est rétrécie à la base, les tubes rigides (ce qui est le cas, en particulier, pour les tubes d'auscultation) fixés à la cage dépassent légèrement (Figure 5.71) sans poser de problème majeur.

Figure 5.71 : Aciers longitudinaux recourbés (en bleu) et tubes de réservation (en vert)



Fixation des tubes de réservation à la cage d'armature

Les systèmes de fixation des tubes à la cage d'armature doivent être :

- **solides** pour résister à la poussée du béton pendant le bétonnage (*Note*) ;
- **suffisamment proches** les uns des autres (environ 3 m) ;

ceci, pour limiter les déformations des tubes, tant au cours de la manutention de la cage d'armature que pendant le bétonnage.

La fixation des réservations peut se faire **par soudage direct** à la cage d'armature. ⚠ Lors de cette opération, il convient de s'assurer que le soudage n'endommage pas les tubes. Le contrôle des soudures s'attachera donc à vérifier leur solidité, mais également à détecter d'éventuelles pertes de matières pouvant mener au perçage des tubes.

En complément au soudage, il **convient d'utiliser un élément en acier soudé à la cage qui plaque la réservation** sur la cage d'armature (Figure 5.69).

Lors de la fixation des réservations utilisées **pour les auscultations soniques** sur la cage d'armature, il convient de s'assurer du parallélisme entre tubes. En effet, une variation d'écartement notable peut influencer sur la détermination du temps de référence, nécessaire au calcul du critère de temps de propagation.

Note : le remplissage des tubes à l'eau claire avant mise en place de la cage d'armature permet généralement de limiter les efforts sur les fixations⁽²⁵⁾.

7.4 - SPÉCIFICITÉS DES CAGES D'ARMATURE DES PIEUX À LA TARIÈRE CREUSE

Rappel des bonnes pratiques pour la réalisation des cages d'armature des pieux de classe 2 (tarière creuse)

La cage d'armature doit être **conforme à la note d'exécution** (diamètre, longueur).

Les bonnes pratiques sont rappelées ci-dessous en ce qui concerne :

- **l'assemblage des cages** : l'assemblage des cages par soudure (conforme aux normes NF EN ISO 17660-1 ou NF EN ISO 17660-2) et les serre-câbles sont à privilégier pour assurer le transport et la manutention sans décrochage ;
- **le recouvrement des armatures** (cf. § 7.2.3) : les recouvrements alternés ne sont pas recommandés et ne sont utilisés que dans des cas bien spécifiques imposés par le dimensionnement.

Des spécificités des cages d'armature pour pieux de classe 2 sont énoncées dans le § 7.2.2.

Dispositions pour augmenter la rigidité de la cage des pieux de classe 2

La technique de la tarière creuse impose **une rigidité suffisante à la cage**, pour faciliter sa descente et améliorer sa résistance aux sollicitations de la mise en place de la cage dans le béton frais. À ce titre, **les dispositions qui peuvent être mises en œuvre sont** :

- **une augmentation du diamètre des filants pour les cages longues** (*Note 1*), cette disposition pouvant conduire à surferrailler le pieu ;
- **un resserrement des cerces de montage et/ou l'utilisation de fer plat en acier de montage** (cf. § 5.1) ;
- **la mise en place d'un raidisseur à l'intérieur de la cage** (cf. § 5.3). Cette dernière disposition peut contrarier la pénétration de la cage dans le béton ;
- **une augmentation de l'enrobage** (cf. chapitre 6) (*Note 2*).

Note 1 : la longueur courante des filants d'acier disponibles dans le commerce est comprise entre 12 et 16 m. Au-delà un raboutage des aciers est nécessaire (cf. « Raboutage pour les pieux de classe 2 » dans le § 7.2.2).

Note 2 : la norme NF EN 1536+A1, qui spécifie les dispositions de ferrailage des cages d'armature (écartement des aciers et diamètre minimaux), fixe un enrobage minimal de 75 mm pour les pieux à la tarière creuse (article 7.7.3), qui peut être augmenté pour faciliter la descente des armatures dans le pieu, sous réserve d'intégrer cette donnée dans le dimensionnement.

25. Cette disposition ne dispense pas du lavage des tubes à l'eau claire avant auscultation.

Les cages d'armature des pieux à la tarière creuse en cas d'arase basse

Il est **recommandé** dans le cas des arases basses de prolonger la longueur des armatures longitudinales (Note 1) jusqu'au niveau de la plateforme, afin de s'assurer du bon nivellement de la cage et de faciliter sa mise en œuvre (quelques aciers transversaux peuvent également être nécessaires pour rigidifier les attentes). Il est **déconseillé d'insérer les cages d'armature sous l'arase de béton frais** par différents moyens. Cette solution visant à économiser de l'acier et à faciliter le recépage du pieu peut conduire à **des incidents sur la mise en œuvre des armatures et notamment à l'impossibilité de maintenir l'altimétrie de la cage** (Note 2).

Note 1 : la partie de cage prolongée peut être provisoire (et ne pas respecter le taux de ferrailage courant) et/ou prolonger à l'identique la cage calculée (pour anticiper un défaut de nivellement).

Note 2 : si malgré tout cette solution est retenue, pour limiter l'apparition d'un certain nombre de défauts récurrents, il est conseillé :

- d'augmenter la hauteur des aciers permettant le liaisonnement avec le gros œuvre ;
- d'ajouter des aciers transversaux supplémentaires sur la hauteur théoriquement recépée.

7.5 - ASSEMBLAGE DES ÉLÉMENTS PORTEURS EN ACIER

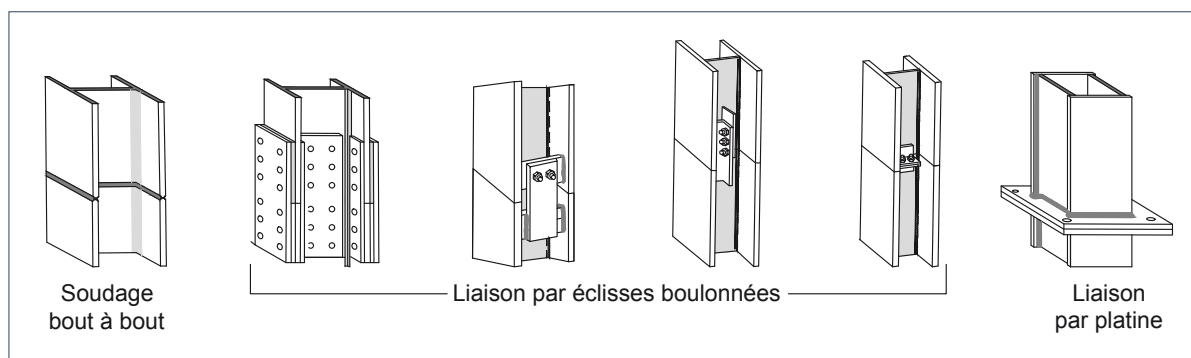
Il existe **trois types d'assemblage pour les profilés** (Figure 5.72) :

- **assemblage par soudure**, avec apport de métal, en usine ou sur chantier (Note) ;
- **assemblage mécanique**, par boulonnage ou éclisse ;
- **assemblage par platine**.

La partie 1-8 de l'Eurocode 3 traite des assemblages.

Note : la soudure des profilés sur chantier pose de gros problèmes quand il faut assurer la transmission des efforts (berlinoises ou préfondés de grande hauteur).

Figure 5.72 : Exemples d'assemblages de profilés



7.6 - SOUDAGE DES ARMATURES EN ACIER

Différentes techniques de soudage

Il existe plusieurs techniques de soudage :

- **soudage avec apport de métal** ; c'est la technique la plus répandue et la plus sûre. Les procédés les plus répandus sont le soudage à l'arc⁽²⁶⁾, dont le soudage semi-automatique MIG (Metal Inert Gaz) ou MAG (Metal Activ Gaz) ;
- **soudage par résistance** : sans apport de métal et par pression (ce procédé concerne plutôt les aciers préfabriqués standard type treillis soudés).

Sur chantier, on privilégiera la technique de soudage à l'arc au fil fourré. Les travaux de soudage peuvent être réalisés à l'horizontale ou à la verticale.

26. Utilisation d'un arc électrique afin d'élever la température des métaux jusqu'au point de fusion des métaux à souder.

Choix de la technique de soudage et habilitation

La disponibilité ou non de soudeurs sur le chantier conditionne la technique d'assemblage. Il revient au maître d'œuvre de demander les habilitations à souder du personnel de chantier, notamment la qualification, si nécessaire (*Notes 1 et 2*).

Note 1 : une soudure de montage peut tout de même endommager l'acier (c'est-à-dire modifier ses caractéristiques mécaniques) si elle est mal exécutée.

Note 2 : les entreprises de pose certifiées par l'AFCAB doivent qualifier leurs soudeurs (essais en laboratoire requis) pour les soudures transmettant des efforts mais également pour les soudures de montage. En atelier, les armaturiers certifiés par l'AFCAB (cf. § 2.1.4) doivent contrôler leurs soudeurs (essais de pliage hebdomadaires).

Risques sur chantier lors du soudage

Ces travaux de soudage peuvent engendrer des postures de travail inconfortables, voire dangereuses suivant la configuration du chantier, notamment en hauteur (Figure 5.73).

Figure 5.73 : Soudage pour assemblage de tronçons de cage - Posture de travail interdite



Risques pour le pieu

Il convient d'être attentif à la qualité du travail, afin d'éviter la rupture des soudures d'assemblage des armatures et des tubes de réservation.

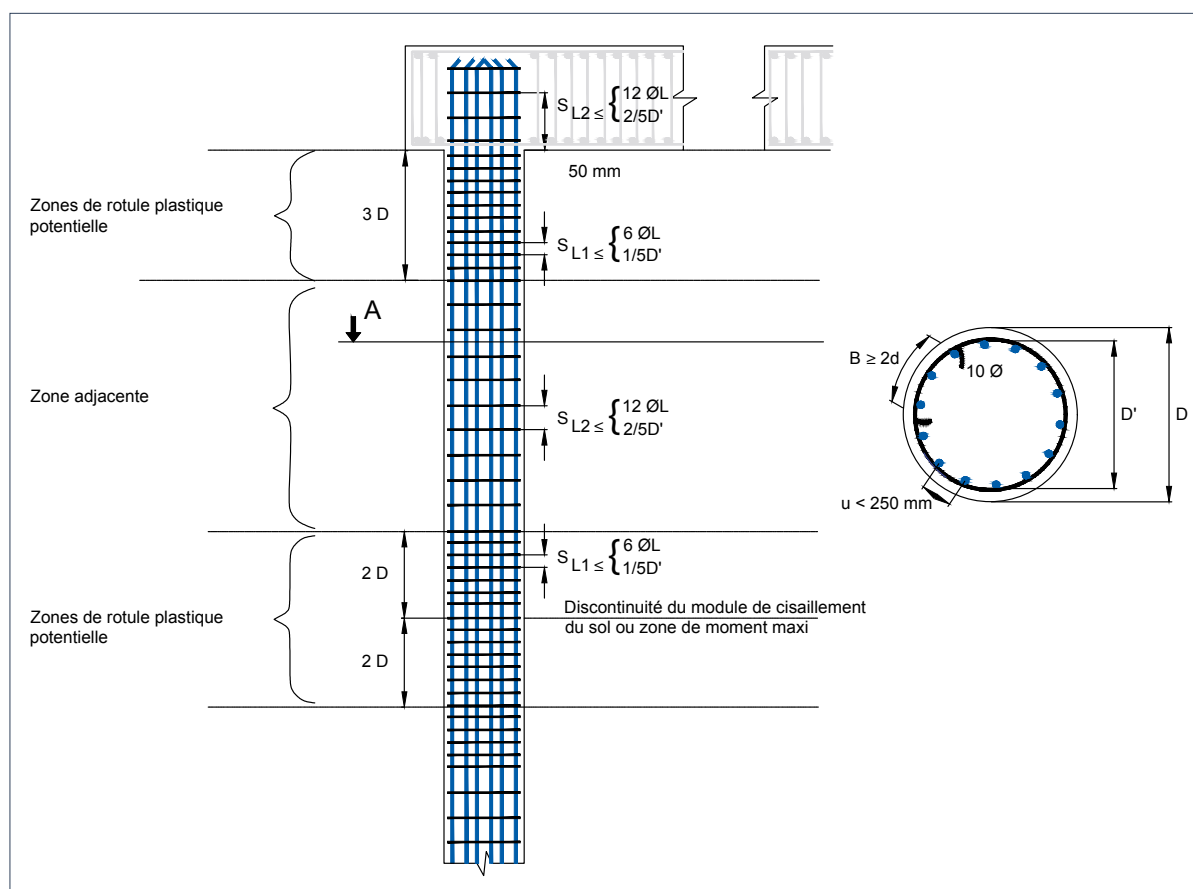
7.7 - DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PARASISMQUES POUR LES CAGES

Les dispositions constructives parasismiques pour les cages conduisent à un ferrailage plus important (par exemple Figure 5.74 pour les ponts). Pour plus d'informations, on peut se référer aux documents suivants :

- **pour les bâtiments** : « Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal », Cahier technique n°38 de l'AFPS [5.2] ;
- **pour les ponts** : « Ponts en zone sismique – Conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8 », guide Cerema [5.1].

Pour les dispositions parasismiques, on adoptera les mêmes préconisations d'assemblage pour les cages en PRF que pour les cages en acier.

Figure 5.74 : Principe de ferrailage des fondations profondes des ponts sous sollicitations sismiques (extrait de [5.1])



Textes de référence pour le dimensionnement parasismique

L'Eurocode 8-1 (article 5.4.2(7) de la norme NF EN 1998-5) stipule que les fondations profondes doivent être dimensionnées dans la mesure du possible de façon à rester dans le domaine élastique sous l'action sismique de calcul.

Les parties 1, 2 et 5 de l'Eurocode 8, ainsi que le fascicule de documentation FD P06-031 décrivent des dispositions constructives parasismiques pour les bâtiments et/ou les ouvrages d'art.

Les zones critiques selon l'Eurocode 8

Les zones critiques, selon la définition donnée dans l'article 5.1.2 de la norme NF EN 1998-1, sont des emplacements le long du pieu où des rotules plastiques peuvent se produire (cf. « Les différents types d'armatures transversales : cerces, spires, cadres, étriers et épingles » *Note 1* dans le § 2.1.3.2). Les pieux doivent en principe être dimensionnés pour demeurer dans le domaine élastique, mais lorsqu'il n'est pas possible par le calcul d'éviter la présence de zones critiques ou une zone de plastification dans la fondation, certaines dispositions constructives doivent être envisagées.

Selon les articles 6.4.2 de la norme NF EN 1998-2 COMPIL2 et 5.8.4 de la norme NF EN 1998-1, les zones suivantes des fondations doivent faire l'objet de ferrailage complémentaire :

- **au niveau des têtes de pieux**, sur une longueur de trois diamètres de pieu (ou trois largeurs de barrettes) pour les fondations des ponts, et deux diamètres de pieu (ou deux largeurs de barrettes) pour les fondations de bâtiments (cette longueur 2D ou 2B peut être majorée de 50 % si l'on tient compte de la formation effective d'une rotule plastique en tête de fondation) ;
- **à la profondeur à laquelle les moments fléchissants maximaux sont atteints** dans la fondation, sur une longueur de deux diamètres de pieu (ou deux largeurs de barrette) de part et d'autre de cette profondeur pour les fondations des ponts ;

- aux interfaces de couches du sol présentant des contrastes de rigidité au cisaillement supérieur à six, sur une longueur de deux diamètres de pieu (ou deux largeurs de barrette) de part et d'autre de ces interfaces pour les fondations des ponts et des bâtiments.

Les zones adjacentes à celles venant d'être définies peuvent également faire l'objet de dispositions constructives spécifiques.

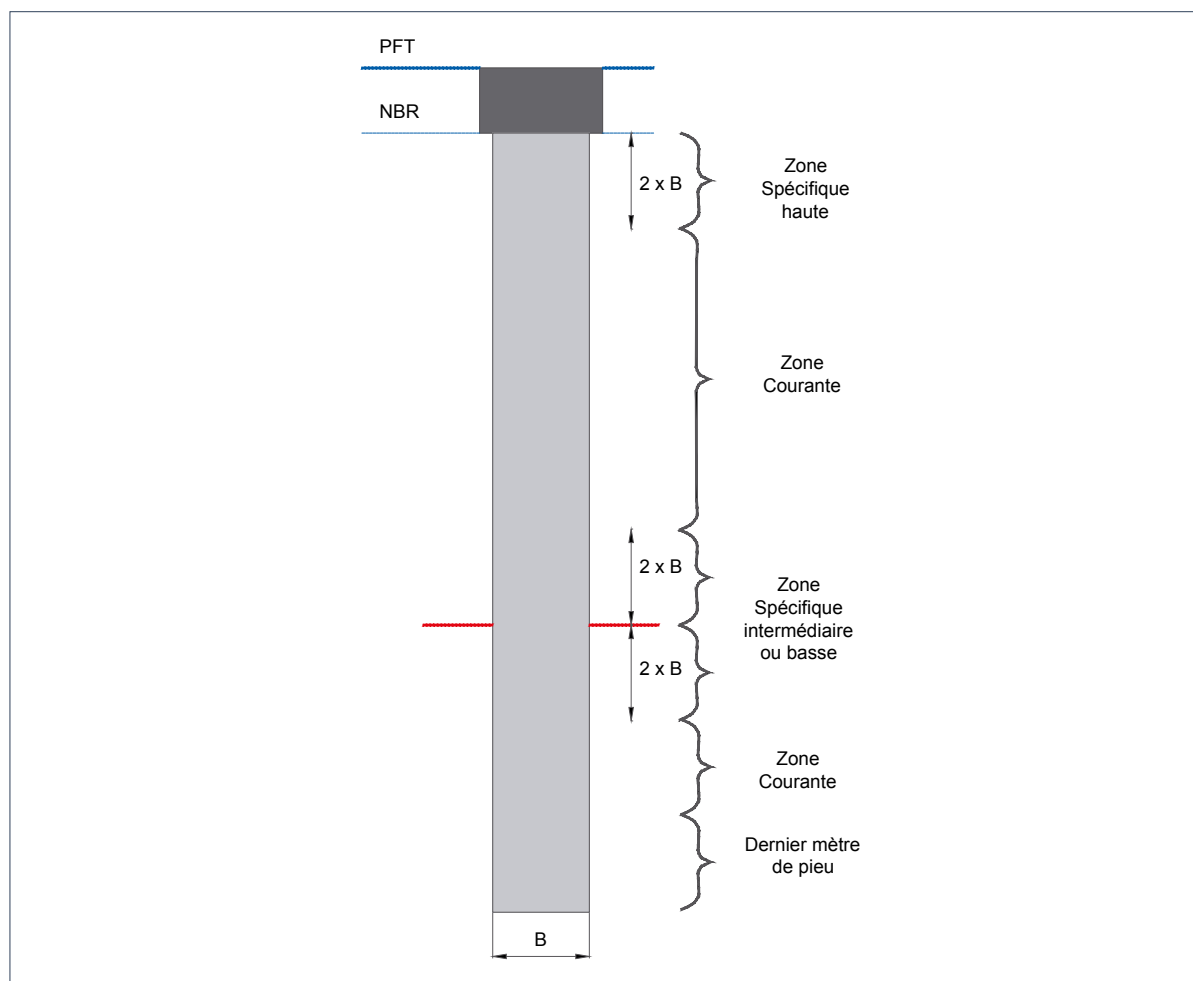
Il faut noter que le Cahier technique n°38 de l'AFPS [5.2] définit **des zones spécifiques à la place des zones critiques**, car il se fixe l'exigence d'absence de rotule plastique dans les pieux pour les bâtiments à risque normal (cf. paragraphe suivant).

Les zones spécifiques selon le cahier technique N°38 de l'AFPS

Les zones spécifiques (Figure 5.75) selon l'article 10.2 du Cahier technique n°38 de l'AFPS [5.2] comprennent :

- les zones spécifiques hautes, sur une hauteur égale à deux diamètres à compter de la face inférieure de la semelle sur pieu ;
- les zones spécifiques intermédiaires ou basses sur une hauteur correspondant à deux diamètres de part et d'autre d'une interface entre deux couches de sol présentant des rigidités au cisaillement sensiblement différentes ;
- les zones courantes concernent toutes les autres zones ; les zones de moments maximum ne sont pas considérées comme une zone spécifique haute.

Figure 5.75 : Schéma des zones structurales pour les pieux de bâtiment (Source : © AFPS - CT 38 [5.2])
(NBR : niveau de béton recépé, PFT : niveau de plateforme de travail)



7.8 - CONTRÔLES D'ASSEMBLAGE DE LA CAGE

Le contrôle d'assemblage des cages d'armature relève **des contrôles interne et externe**.

Il comprend :

- **un examen visuel**, afin de s'assurer :
 - de la provenance des matériaux (étiquette – Figure 5.21 dans le § 2.1.4),
 - de la conformité au plan de ferrailage ; il traduit la présence des éléments constitutifs de la cage (barres, armatures de rigidité, écarteurs, bouchons étanches aux extrémités inférieures et supérieures des tubes d'auscultation...) ;
- **des opérations de mesurage**, afin de s'assurer :
 - du recouvrement prévu,
 - de l'espacement des aciers,
 - de la longueur et du diamètre des éléments.

Les résultats de ces contrôles sont mentionnés dans le rapport de compte-rendu d'exécution du pieu.



CHAPITRE 8

Chargement Transport Déchargement Stockage

8. CHARGEMENT - TRANSPORT DÉCHARGEMENT - STOCKAGE

8.1 - ACTIONS ET RISQUES ENCOURUS

La prise en compte de la sécurité est un point essentiel pour ces étapes de manutention, de transport et de stockage.

Principaux risques pour le personnel lors de la manipulation des armatures, des cages d'armature et de leur assemblage

Lors de la manipulation des armatures nues, partiellement ou totalement assemblées, les principaux risques sont :

- une rupture de l'élingage (chute, basculement, renversement) de tout ou partie de la charge (*Note*) ;
- une rupture des assemblages (soudures, ligatures, manchons de raboutage, serre-câbles) ;
- des risques de chute pour le personnel depuis la remorque du poids-lourd lors des opérations de chargement/déchargement ;
- des risques liés au glissement de tout ou partie de la charge (*Note*) ;
- des risques de heurt d'un opérateur par le camion de livraison ou par l'engin de manutention ou par la charge.

Note : entraînant un risque d'écrasement, de pincement, d'éraflures, de coupure, ou de perforation.

Principaux risques pour les cages d'armature lors de leur manutention

Les principaux risques pour les cages d'armature lors de leur manutention sont :

- leur déformation définitive (*Note*) ;
- la rupture des soudures ou des ligatures.

Note : cette déformation définitive peut :

- rendre difficile la descente de la cage dans le forage, qui pourrait raboter les parois (risque d'éboulement en fond de forage conduisant à une pointe de pieu potentiellement défectueuse) ;
- conduire à un défaut d'enrobage des armatures (risques de corrosion et par conséquent une résistance moindre du pieu) ;
- entraîner une mauvaise reprise des efforts pour lesquels la cage d'armature a été dimensionnée.

Actions à la charge du fournisseur ou de l'utilisateur

Le fournisseur :

- fournit le certificat de qualité des matériaux en question ;
- réalise le colisage des armatures pour permettre leur déchargement sans risque ;
- charge le camion de transport ;
- transporte les armatures.

Le déchargement du camion est réalisé soit par le fournisseur, soit par l'utilisateur.

L'utilisateur doit manutentionner pour :

- stocker les armatures ou les cages ou tronçons de cage sur des aires dédiées (cf. Figure 5.87 dans le § 8.5) ;
- finaliser l'assemblage des cages ou des tronçons de cages et ajouter par exemple des écarteurs ou encore des anses de levage (cf. respectivement § 5.2 et 5.6).

8.2 - MATÉRIEL DE LEVAGE ET DE MANUTENTION

Nous présentons ci-après des éléments sur **du matériel couramment utilisé et son usage** pour manutentionner les armatures et cages pour les pieux. On trouvera dans les documents professionnels [5.3] et [5.4] davantage de spécifications et de recommandations.

Tout accessoire de levage doit posséder un marquage durable (pour en savoir plus se référer à [5.4]).

Engins de manutention en fonction de la longueur des cages d'armature

Les appareils de levage et de manutention affectés au chantier sont utilisés dans **les limites prévues par leur constructeur** et **par le certificat d'aptitude** à la conduite en sécurité (CACES).

Les engins de manutention doivent être choisis en fonction du poids des éléments de cage et de leur encombrement. Une grue est généralement nécessaire pour des cages de plus de 10 m.

⚠ En aucun cas, les cages ou les éléments longs ne doivent être déplacés en étant posés sur les fourches d'un chariot élévateur.

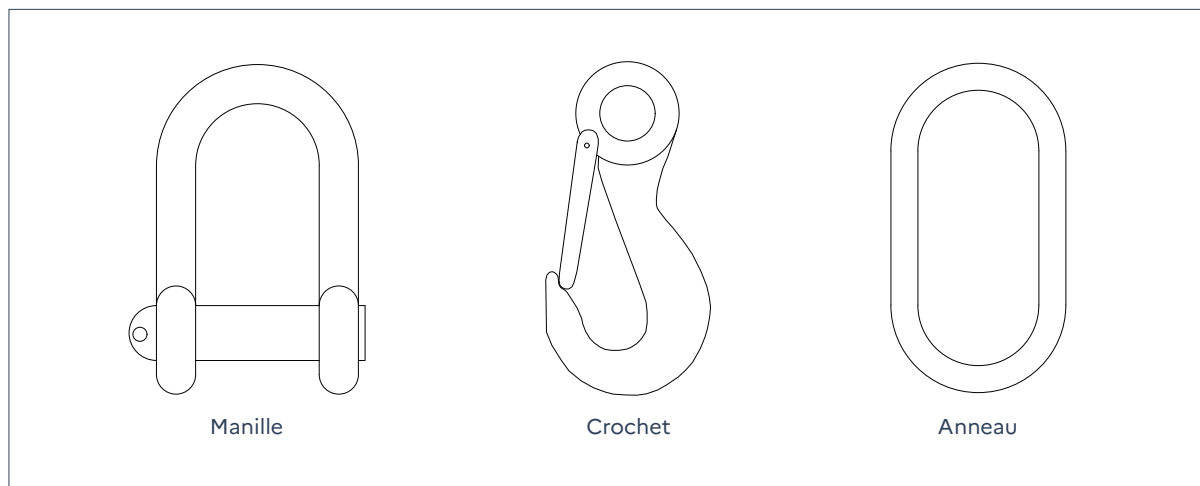
Les élingues

Les élingues sont **des accessoires de levage** souples en cordage ou en sangle (Notes 1 et 2), en câble métallique ou en chaîne, **généralement terminés par des accessoires d'extrémité métalliques** tels que manilles, crochets, anneaux... (Figure 5.76). Les matériaux de constitution, le nombre de brins (simple ou multibrins comportant deux, trois ou quatre brins – Figure 5.77) ainsi que le mode d'accrochage (Figure 5.77) conditionnent la charge maximale pouvant être supportée par l'élingue (pour en savoir plus se reporter à [5.4]).

Note 1 : la couleur des élingues textiles fournit la charge maximale pouvant être supportée en fonction du mode d'accrochage (Figures 5.82 et 5.83 dans le § 8.3). En fabrication standard, la charge maximale est comprise entre 1 et 10 t, mais peut atteindre des valeurs supérieures en fabrication spécifique.

Note 2 : il existe aussi des élingues textiles à usage unique fournies montées par le fabricant sur les éléments de cages.

Figure 5.76 : Accessoires d'extrémité d'élingue : manille, crochet et anneau



Le panier de manutention

Afin de faciliter la manutention, il est possible de charger les armatures en usine dans un panier de manutention (Figure 5.78) spécifique équipé de quatre boucles de levage auxquelles sont fixées quatre élingues retombantes installées à demeure [5.3].

Le palonnier

Le palonnier (Figure 5.79) permet de reprendre les efforts verticalement et de diminuer les efforts imposés aux accessoires de levage. Il est formé d'une poutre (ou de plusieurs poutres) équipée(s) à sa partie supérieure d'un dispositif d'accrochage (œil ou anneau) au crochet de l'appareil de levage, et à sa partie inférieure de crochets pour recevoir les élingues supportant la charge ; il s'intercale entre l'appareil de levage et la charge [5.4].

Les crochets de manutention

Pour la manutention, les crochets de manutention comme présentés sur la Figure 5.80 sont fréquemment utilisés.

Le passage du crochet dans l'anneau doit être réalisé avec le bec du crochet orienté vers l'extérieur (Figure 5.81) [5.4].

Figure 5.77 : Exemples d'élingues en chaînes multibrins



Figure 5.78 : Levage d'un panier de manutention

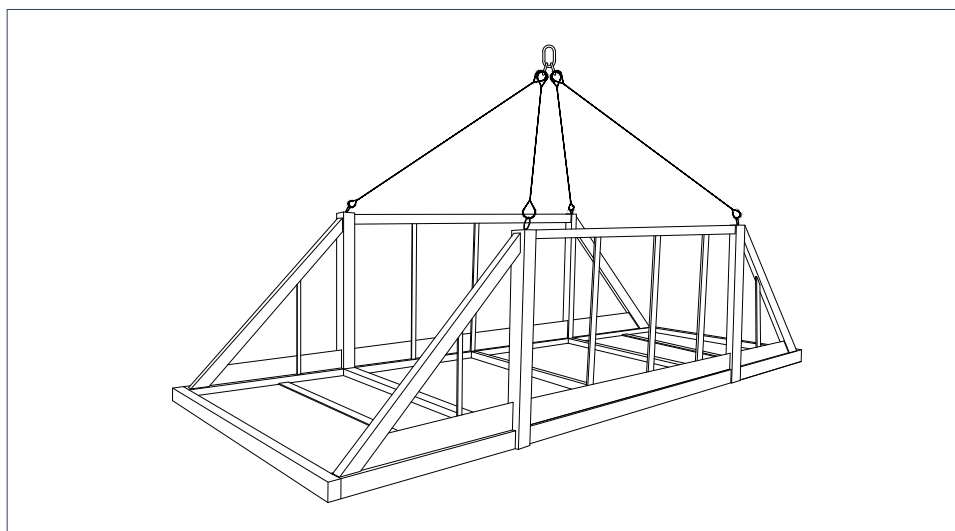


Figure 5.79 : Exemples de palonnier



Figure 5.80 : Crochets de manutention



Figure 5.81 : Position du crochet de manutention



8.3 - PRÉPARATION ET CONDITIONNEMENT DES COLIS – CHARGEMENT

Moyens de maintien des armatures

À chaque manutention, **les armatures reliées en colis (Note 1) et les paquets de cages (Note 2) doivent être maintenus horizontalement** :

- soit **par cerclages** synthétiques (Figure 5.82) ou métalliques, et posés sur des cales (chevron bois 8 x 8 ou équivalent) pour permettre le passage des accessoires de levage sous le colis ;
- soit **par des élingues** (cf. § 8.2) laissées en place, du type autoserrantes en acier ou textile.

⚠ **L'usure des sangles** causée par le frottement contre l'acier est à vérifier après chaque chargement.

⚠ **L'utilisation de tortillards** (fil d'acier doux de faible section) mis en place manuellement pour maintenir les armatures entre elles est à proscrire.

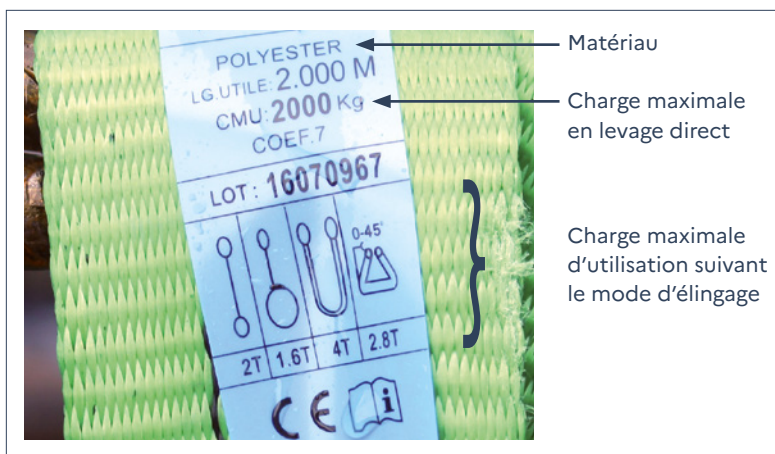
Note 1 : le colis doit être accompagné de l'indication de son poids pour permettre le bon choix des appareils de levage et des sangles. (Figure 5.83). ⚠ La charge maximale d'utilisation est différente selon la plage d'angle entre le brin de l'élingue et la verticale (Figure 5.83). Pour en savoir plus consulter le mémento de l'élingueur [5.4].

Note 2 : pour les cages, les armatures de positionnement doivent être adaptées et dimensionnées au poids des aciers formant l'ossature.

Figure 5.82 : Sangle de manutention en polyester à usage unique



Figure 5.83 : Sangle plate de capacité 2 t en levage direct



Manutention des barres filantes et position des points d'élingage

La manutention des barres filantes (Note 1) lors du chargement/déchargement (Figure 5.84) est souvent réalisée au moyen d'élingues à usage unique⁽²⁷⁾, fournies et mises en place par le fournisseur :

- des élingues plates en sangles textiles (Note 2) ;
- des élingues câbles munies de boucles aux extrémités (Note 3).

⚠ Le levage des colis d'armatures ne doit jamais être fait par le biais des aciers de cerclage soudés, car les cerces ne sont pas dimensionnées pour cela.

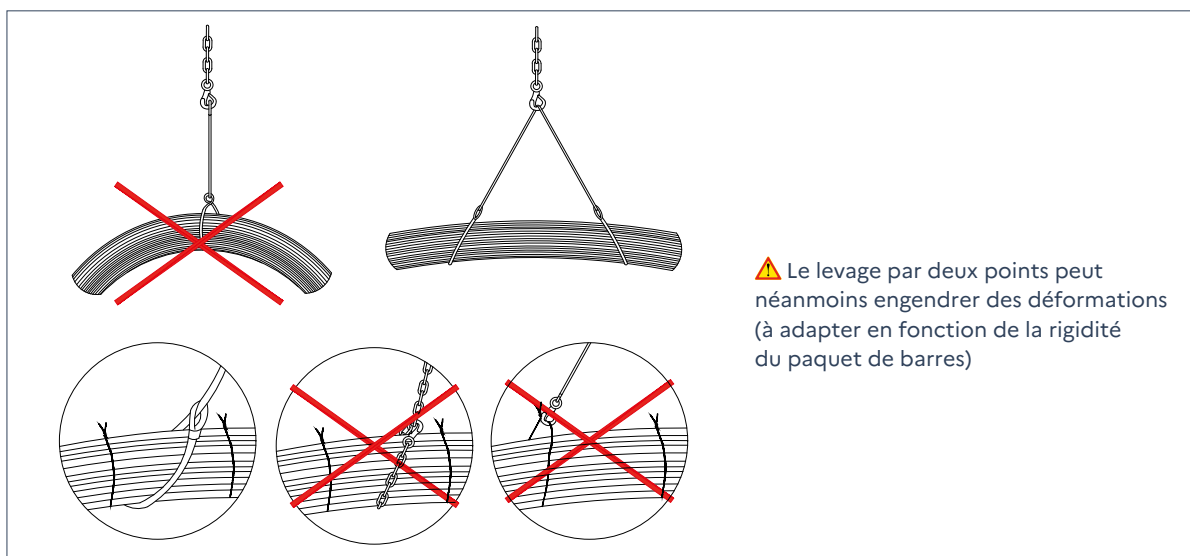
La position des points d'élingage est située approximativement au quart de la longueur des barres ; on recherche une position d'équilibre du paquet d'armatures en tenant compte de la souplesse importante des armatures de grande longueur.

Note 1 : pour des raisons de sécurité vis-à-vis du personnel, les extrémités des barres filantes peuvent être équipées de capuchons.

Note 2 : les élingues en textile connaissent une forte détérioration en raison du frottement sur l'acier à haute adhérence ; elles ne doivent pas être réutilisées. L'emploi d'élingues câbles non réutilisables est beaucoup plus sécurisant.

Note 3 : les élingues-chaînes en acier sont déconseillées, car il y a un risque important de glissement⁽²⁸⁾ du chargement.

Figure 5.84 : Levage des barres filantes
(d'après un schéma de l'OPBTP [5.3])



27. Ces élingues relèvent de la même réglementation que les élingues d'usage courant. Elles sont livrées avec un marquage (étiquette cousue sur la sangle) et une notice d'instructions. Elles ont l'avantage de réduire à deux le nombre d'opérations (un d'élingage et un de retrait) contre quatre pour celles réutilisables, limitant ainsi les risques pour les opérateurs [5.6].

28. Faible surface de contact avec les armatures et faible coefficient de frottement acier-acier.

Manutention des cages d'armature et position des points d'élingage

La reprise des cages d'armature assemblées se fait :

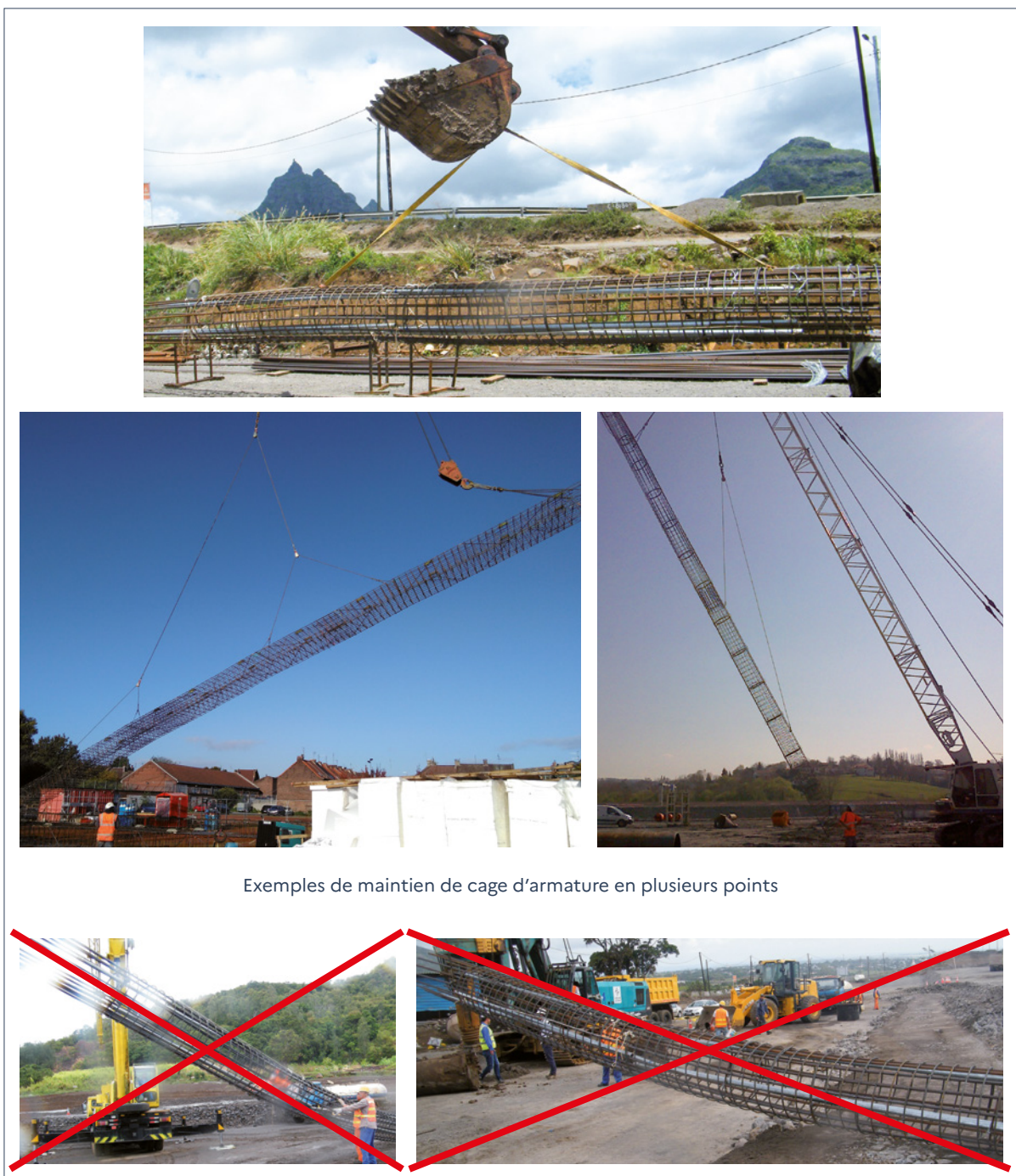
- soit en utilisant **les anses de positionnement en acier** correctement dimensionnées au préalable (cf. § 5.6) ;
- soit par **élingage direct** sur les armatures principales. Pour ces aciers coupés-façonnés assemblés, on privilégie les élingues câbles.

Afin de ne pas déformer la cage lors de sa manutention, l'idéal est le **maintien en plusieurs points** :

- par l'utilisation du **palonnier** (cf. Figure 5.79 dans le § 8.2) ;
- au niveau des **renforcements par les cerces de montage** (Figure 5.85) (cf. § 5.1).

⚠ Le levage par le milieu ou en deux points risque d'engendrer une déformation de la cage d'armature.

Figure 5.85 : Exemples d'opérations de levage de cages correctes et incorrectes



8.4 - TRANSPORT DES ARMATURES, CAGES ET TUBES

Transport exceptionnel

Le Code de la route permet le transport d'éléments (Figure 5.86) **jusqu'à 16,5 m sans autorisation**. **Au-delà, une autorisation de transport exceptionnel** (autorisation individuelle ou de portée locale) doit être demandée par le transporteur auprès des préfectures concernées par le trajet (*Note*).

Le choix de construire les cages sur site ou de recevoir les produits assemblés en usine est décidé après examen des conditions de travail (localisation du chantier, conditions d'accès, aire de travail, délais impartis, personnel disponible...).

Note : un transport exceptionnel ne peut circuler sur les voies ouvertes à la circulation publique que sous couvert d'une autorisation préalable dite de « transport exceptionnel ». Il faut donc une autorisation qui implique que le bénéficiaire d'une autorisation individuelle de transport exceptionnel s'assure de la praticabilité de l'itinéraire qu'il veut emprunter, parmi les itinéraires permis dans son autorisation et qu'il vérifie l'absence de chantier ou d'arrêt d'interdiction de circulation notamment qui empêcherait le passage du transport exceptionnel sur cet itinéraire.

Figure 5.86 : Transport et déchargement de cages d'armature



8.5 - DÉCHARGEMENT - STOCKAGE

Déchargement des armatures ou des cages

Le déchargement doit être réalisé **avec les mêmes précautions que le chargement**. Cette opération est hélas trop souvent mal conduite. Elle peut intervenir tout au long du chantier et nécessite d'être bien **identifiée dans le planning des travaux**, afin que les engins de manutention soient présents et que de la coactivité éventuelle ne perturbe pas cette opération ni le stockage des armatures ou des cages (travaux de terrassement préalables, par exemple).

Le déchargement des cages du camion est facilité et plus sécurisé en cas d'utilisation **de panier de manutention** (cf. § 8.2) permettant le déchargement en une seule fois et aux compagnons d'éviter d'évoluer sur les armatures. Mais il nécessite un engin de manutention adéquat dont la charge sur le camion diminuera d'autant la charge utile de celui-ci.

La zone de stockage et position des armatures ou des cages

La zone de stockage des armatures doit être définie précisément sur **le plan d'installation du chantier**. Elle doit **être propre** (risque de souillage des armatures, cf. § 9.4).

Les armatures stockées à plat sont préférentiellement posées sur **des calages en bois** (Figure 5.87) facilitant la mise en place des élingues lors des manutentions de reprise, et limitant leurs déformations préjudiciables et en les isolant du sol support.

Le stockage sur géotextile permet également d'isoler les barres du sol support pour ne pas les souiller.

Figure 5.87 : Stockage des cages d'armature





CHAPITRE 9

Mise en position verticale et mise en place de la cage ou du profilé dans le forage

9. MISE EN POSITION VERTICALE ET MISE EN PLACE DE LA CAGE OU DU PROFILÉ DANS LE FORAGE

9.1 - LEVAGE DES CAGES OU DES PROFILÉS ET LEUR MISE EN POSITION VERTICALE

Matériel de levage et de manutention et précautions

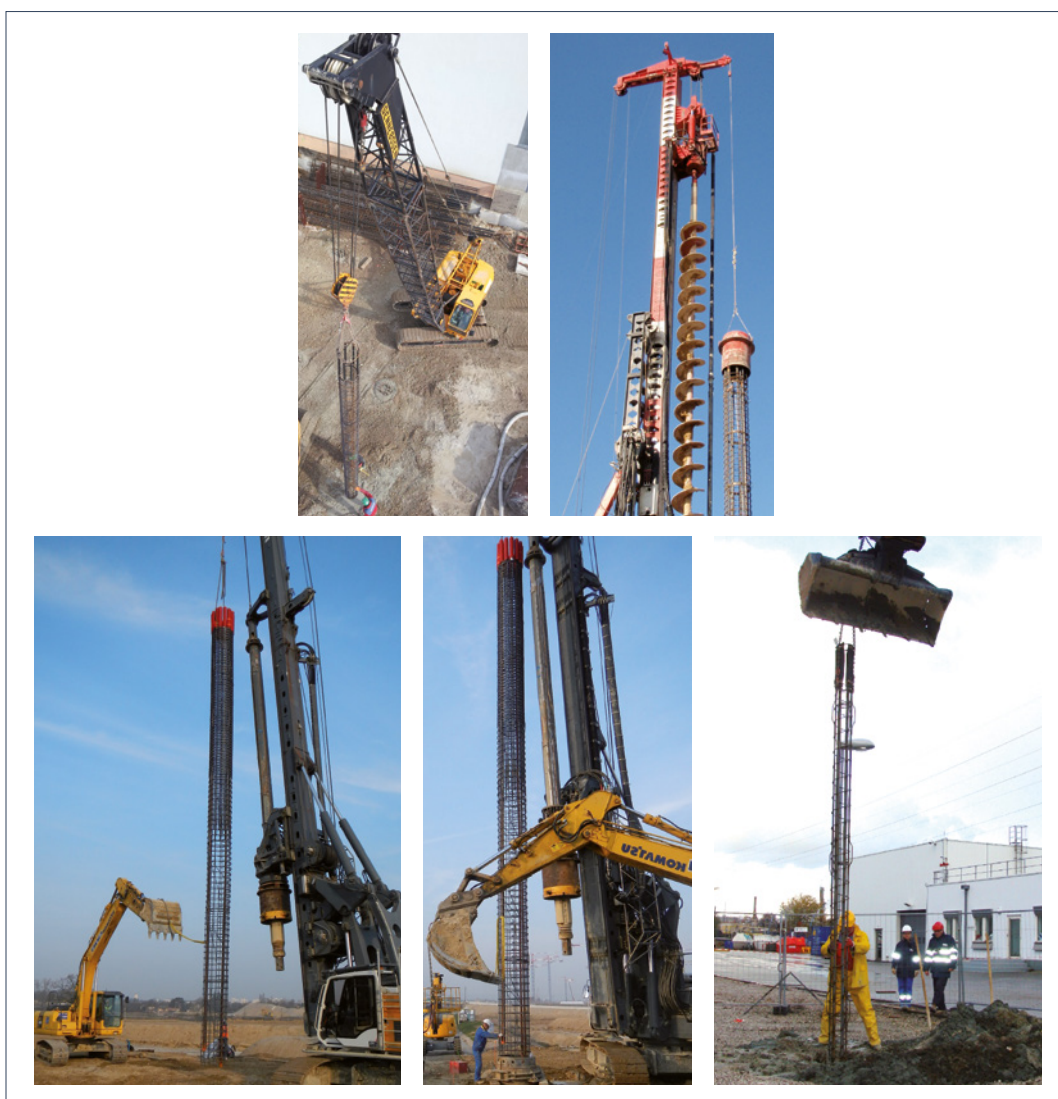
Le transport et la mise en œuvre des cages d'armature (Figure 5.88) peuvent se faire à l'aide :

- de grues ;
- de pelles mécaniques (*Note*) ;
- du treuil de la machine.

Dans tous les cas, la méthode retenue doit permettre de garantir **la manipulation sécurisée des cages, sans provoquer leur détérioration** (déformation, dessoudage des spires et cerces, frottement au sol...).

Note : les mises en place d'armatures de longueur supérieure à 10 m à l'aide d'une pelle mécanique sont à éviter, puisque les conditions explicitées ci-avant ne peuvent pas être satisfaites.

Figure 5.88 : Mise en position verticale et mise en place de la cage d'armature avec pelle, grue et treuil



Points d'attache

La cage d'armature doit être **manipulée en deux points au minimum**, et selon sa dimension, avec un ou deux appareils de levage.

Pour la mise en position verticale de la cage (Figure 5.89.a), on utilise les anses de manutention (cf. § 5.6). **Le mode opératoire de la mise en place de la cage d'armature** doit permettre son alignement avec l'axe du pieu foré et le maintien d'un enrobage correct sur toute sa longueur (Figure 5.89.b). On utilise des chaînes et des crochets de manutention (Figures 5.76 et 5.80 dans le § 8.2) pour ces opérations. La Figure 5.90 présente de mauvaises positions du crochet de manutention qui enserre une armature longitudinale, car il se trouve bloqué contre la cage ; la cage est alors susceptible de subir des chocs lors des opérations de levage, de mise en position verticale ou de mise en place. La cage aurait dû être équipée d'anses de levage.

Figure 5.89 : Mise en position verticale de l'armature

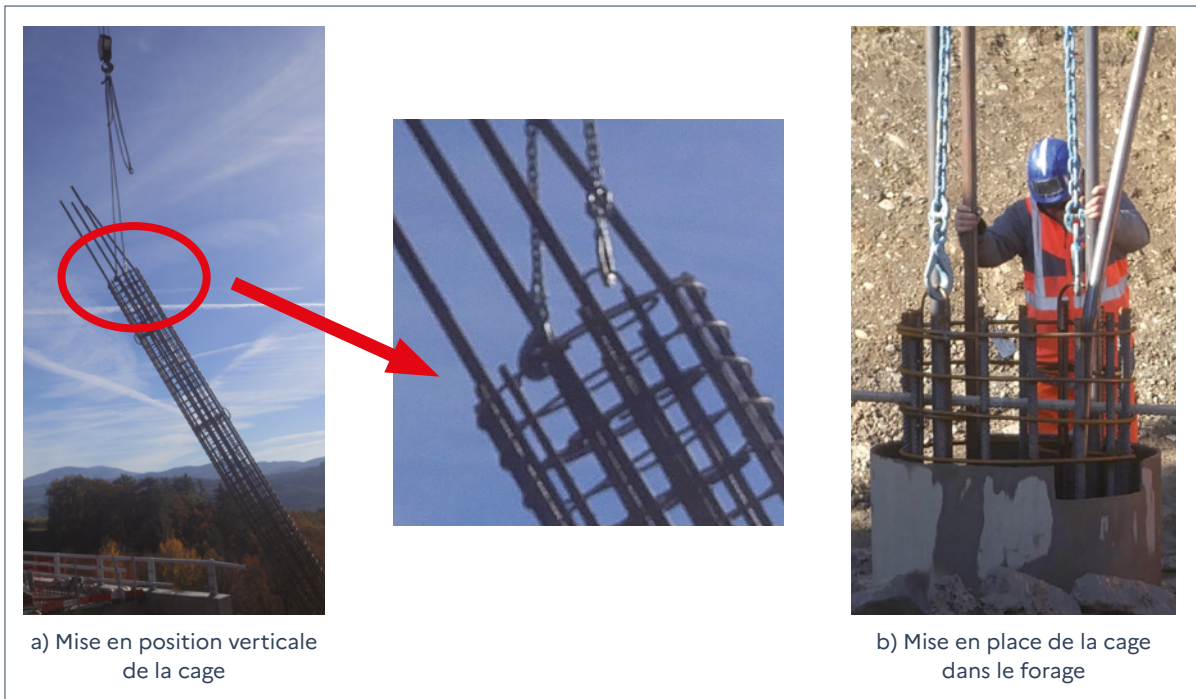
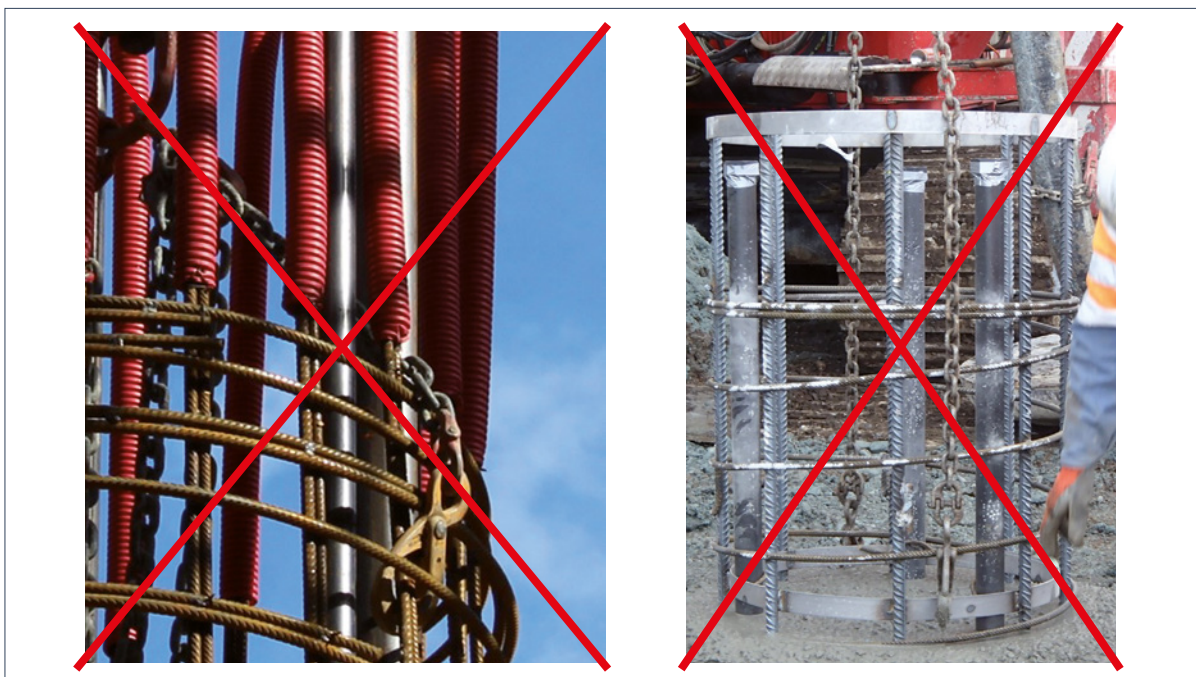


Figure 5.90 : Mauvaise position des crochets sur la cage



9.2 - MISE EN PLACE DE LA CAGE D'ARMATURE OU DU PROFILÉ DANS LE FORAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 1

Les Figures 5.88 à 5.91 évoquent les mises en place des cages et des profilés.

La cage doit être **mise en place dans le forage le plus rapidement possible** après le nettoyage de celui-ci. **Lors du bétonnage**, il convient de maintenir l'armature (cage ou profilé) en position afin d'obtenir le niveau spécifié, notamment au-dessus du niveau final de recépage (*Note*) pour les cages.

La cage est maintenue **suspendue à une vingtaine de centimètres du fond du forage**, elle ne repose pas au fond, afin de ne pas souiller l'extrémité des armatures inférieures, et de ne pas engendrer une déformation de la cage avant le bétonnage.

La Figure 5.88 montre la mise en place d'une cage à l'aide du bras d'une pelle mécanique, encore équipé de son godet.

Note : dans le cas d'arase basse, il est souvent nécessaire de prolonger l'armature par des armatures d'attente qui permettent de maintenir à partir de la plateforme de travail le niveau de la cage en profondeur.

Figure 5.91 : Exemples de mise en place de profilés



9.3 - MISE EN PLACE DE LA CAGE D'ARMATURE OU DU PROFILÉ DANS LE FORAGE POUR LES PIEUX DE CLASSE 2 (TARIÈRE CREUSE)

La cage d'armature (ou profilé) est **insérée de manière verticale dans le pieu jusqu'à la profondeur voulue** (Figures 5.91.b et 5.92) :

- sous son propre poids ;
- sous légère pression, humaine ou mécanique (*Note*) ;
- au trépideur (ou vibreur ou vibrofonneur) à faible vibration, solution plus performante que l'action mécanique (Figure 5.93).

Note : les à-coups répétés au godet de la pelle ne sont pas autorisés, car ils peuvent nuire à l'intégrité de la cage sans possibilité de contrôle en profondeur.

Figure 5.92 : Photos de positionnement de la cage au droit du forage rempli de béton pour les pieux de classe 2



Figure 5.93 : Photos de trépideur et introduction de la cage d'armature dans le béton frais à l'aide d'un trépideur



9.4 - RISQUES ASSOCIÉS AU LEVAGE ET À LA MISE EN PLACE DES CAGES D'ARMATURE

Souillure des armatures

En cas de souillure des armatures lors de la manutention ou du stockage, il convient de les laver au jet avant leur mise en place.

Risques lors du levage de la cage

Il s'agit d'une opération très délicate, la cage d'armature est **soumise à des déformations** :

- **de flexion** avant de quitter le sol, lorsqu'elle n'est levée que d'un côté et que l'autre repose encore sur le sol (Figure 5.85 dans le § 8.3) ;
- **de flexion** lorsque la cage, suspendue à l'engin de levage (cf. § 8.2), oscille au-dessus du sol ;
- **de torsion** éventuelle avec une rotation de la cage autour de son axe principal si elle est mal manutentionnée ;

déformations auxquelles seule la rigidité de la cage peut s'opposer. Afin de les limiter, il serait donc souhaitable d'utiliser un gabarit rigide auquel la cage serait fixée en de multiples points.

Suspicion ou constatation d'un éboulement pour les pieux de classe 1

Lors de la mise en place de l'armature, il y a **un risque d'éboulement** qui est difficile à suspecter, sauf dans le cas extrême conduisant à bloquer la descente complète de l'armature.

Il est possible d'utiliser, **comme moyen de contrôle** :

- dans le cas d'un pieu foré à sec, **le procédé du miroir** ;
- sous fluide stabilisateur, **le fil de plomb**.

Lorsque la présence d'un éboulement important est découverte (éboulement de surface, blocs empêchant la descente de la cage à sa cote définitive...), l'entreprise et/ou le maître d'œuvre ne doivent pas hésiter à faire ressortir la cage, puis à faire procéder au curage du fond de forage.

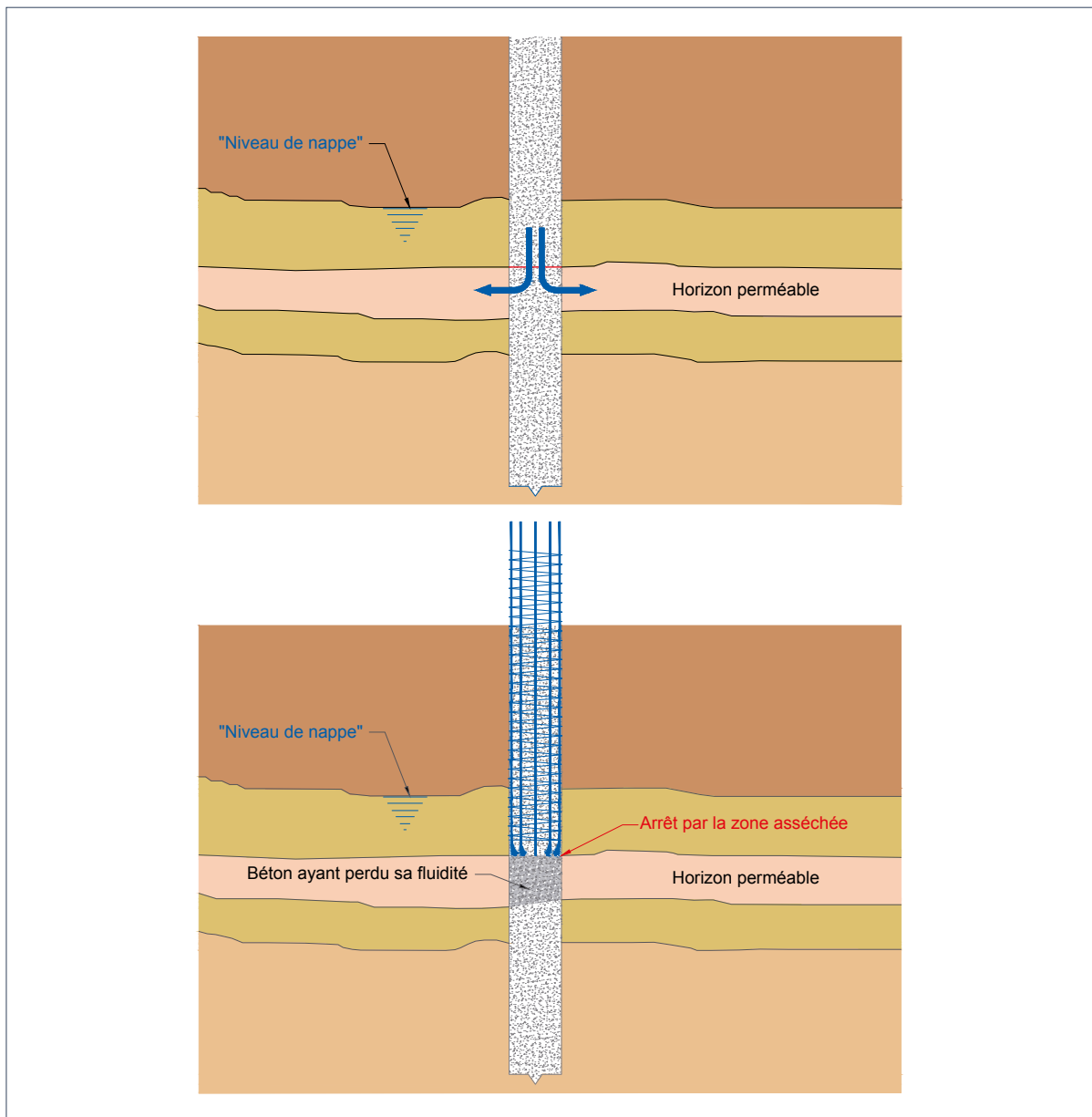
Les causes possibles d'un refus à la mise en place de la cage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

Les causes possibles d'un refus prématuré à la mise en place de la cage sont :

- **un blocage de la cage dans le terrain**, suite à :
 - une mise en œuvre non verticale,
 - un défaut de verticalité du pieu,
 - des moyens inadaptés de mise en œuvre ;
- **la présence d'inclusions de sol dans le pieu** ;
- **une prise « prématurée » du béton** suite à :
 - un problème d'approvisionnement du béton,
 - un mauvais choix de formulation du béton par rapport aux propriétés du sol et aux conditions d'exécution (essorage du béton - Figure 5.94),
 - une mise en œuvre trop tardive de la cage ;
- **une évolution rapide de la rhéologie du béton** en présence :
 - de terrains hors d'eau essorant (sable, certaines marnes...) favorisant les échanges d'eau du béton vers le sol (Figure 5.94),
 - de circulations d'eau importantes dans les terrains (effet de la marée, rabattement de nappe à proximité des pieux, écoulement gravitaire marqué de la nappe...) ;
- **un défaut de conception de la cage** vis-à-vis de sa mise en œuvre (centreur, rigidité...).

En cas de doute sur la possibilité de mise en œuvre de la cage d'armature (absence de référence, difficultés exposées ci-avant...), il est conseillé de réaliser un pieu de faisabilité (cf. § 4.2 dans le Fascicule 2 « Aspects généraux des marchés de travaux de pieux et du déroulement du chantier ») en vraie grandeur hors ouvrage.

Figure 5.94 : Exemple de cas d'essorage du béton



Actions en cas de refus de mise en place de la cage pour les pieux de classe 2 (tarière creuse)

En cas de refus de descente de la cage, les solutions sont :

- d'enlever la cage dans les plus brefs délais (Note 1) ;
- de justifier le pieu avec la longueur de cage effectivement installée.

Sinon (Note 2) et en cas d'impossibilité de reforage dans le pieu, celui-ci doit être déplacé ou doublé et la structure adaptée en concertation avec le bureau d'études techniques de structure.

Note 1 : si la cage peut être enlevée, le pieu est reforé dans le même diamètre et la longueur est légèrement approfondie (environ 200 mm). Dans ce cas, il est considéré que le pieu a bien sa portance théorique.

Note 2 : en cas de tentative infructueuse de mise en œuvre de la cage d'armature, il est souvent impossible de ressortir la cage de manière intègre.

Calage de la cage après sa mise en place dans le forage des pieux de classe 2 (tarière creuse)

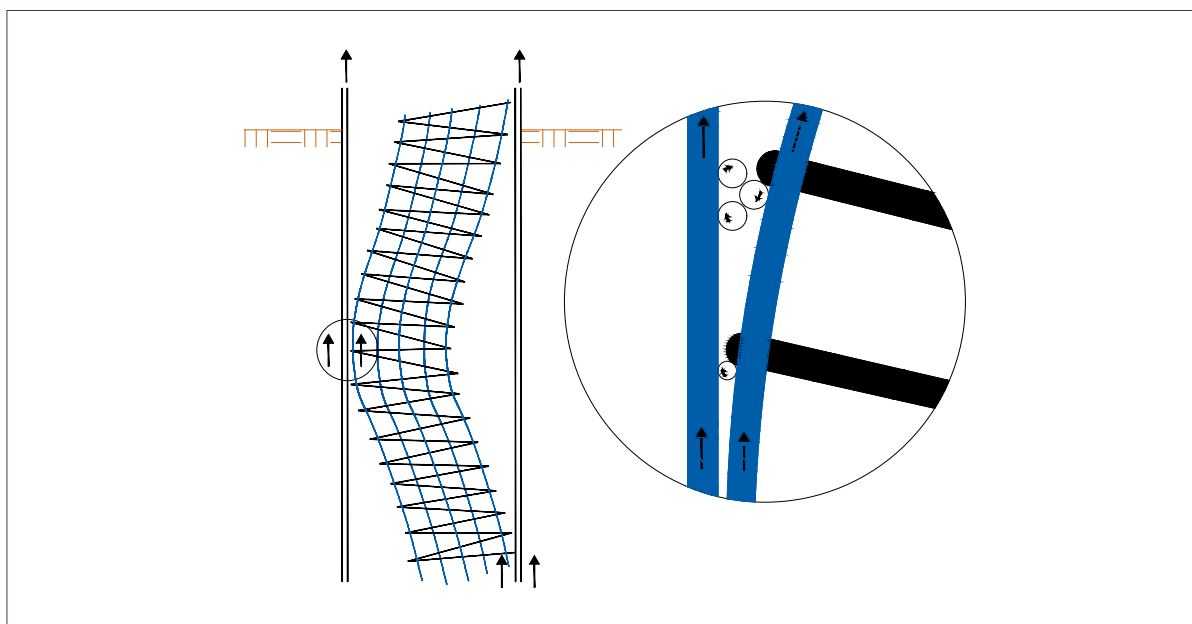
Une fois mise en place à la cote, si nécessaire, la cage d'armature peut être bloquée pour éviter sa descente dans le béton frais sous son propre poids.

Risques de remontée de la cage d'armature

La cage d'armature est susceptible de remonter :

- **lors du bétonnage** : les armatures sont soumises à la poussée ascendante du béton frais favorisée par le phénomène d'accrochage dû à la rigidification du premier béton, pouvant conduire à la remontée de la cage d'armature, parfois importante (jusqu'à 2 m) et quel que soit son poids. La poussée est d'autant plus importante que le tube plongeur est maintenu plus profondément.
Le ressuage du béton d'un pieu tubé peut entraîner la remontée des cages d'armature lors de l'extraction du tube. L'utilisation de béton avec un adjuvant rétenteur d'eau permet de minimiser, voire de s'affranchir du phénomène ;
- **lors de l'extraction du tube de travail** (cf. § 5.7 du fascicule 4 « Le bétonnage des pieux forés »), il est nécessaire de maintenir la cage en suspension, à l'aide du câble de manutention de la grue, lorsque le jeu entre la cage d'armature et le tube de travail est faible. Cet entraînement par frottement ou par arc-boutement des gros éléments du béton entre les armatures et la paroi du tube que l'on remonte, peut être accentué par un mauvais centrage et une trop grande souplesse de la cage (Figure 5.95). Il est également plus fréquent lorsque le pieu est chemisé.

Figure 5.95 : Phénomène d'entraînement de la cage à la remontée du tube de travail



Risques de descente de la cage d'armature

La cage d'armature est susceptible de descendre sous son propre poids dans le pieu fraîchement réalisé lorsque le blocage en tête est insuffisant. Ceci concerne notamment :

- les pieux armés sur une hauteur partielle ;
- les pieux en arase basse, car on peut ne pas s'en apercevoir.

En cas de descente involontaire de la cage d'armature des pieux forés

Si nécessaire vis-à-vis du dimensionnement, pour pallier le manque d'acier en partie haute du pieu occasionné par la descente de la cage, les solutions suivantes (isolément ou concomitamment) sont envisagées :

- **augmenter la hauteur de recépage** ;
- **sceller des armatures supplémentaires** ;
- **passer du recouvrement à d'autres modes de liaison** (soudures, coupleurs) à condition que le décalage altimétrique des armatures (spires, cadres de tête et renforts longitudinaux) soit justifié par le calcul.

CHAPITRE 10

Les contrôles au niveau du ferrailage des pieux

10. LES CONTRÔLES AU NIVEAU DU FERRAILLAGE DES PIEUX

Durant la réalisation des pieux, outre les contrôles relatifs à tous les pieux forés, **les contrôles et points de vigilance au niveau du ferrailage du pieu portent sur la vérification :**

- **de la conservation de l'intégrité des armatures** lors du stockage, de la manutention et de la mise en œuvre (non-déformation de la cage) ;
- **du bon enfoncement des armatures** (*Note*) ;
- **du maintien du niveau supérieur du béton** avant sa prise ;
- **de la position de la cage d'armature dans le forage** à différentes étapes (par exemple, avant et après bétonnage pour les pieux de classe 1) ; il ne doit y avoir ni remontée ni excentrement de la cage d'armature ;
- **du maintien de l'altimétrie de la cage ou du profilé** durant la prise du béton.

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

***Note :** dans le cas des pieux de classe 2, l'enfoncement de la cage dans le béton frais doit être réalisé sans sollicitations exagérées.*

The background features a light gray gradient. Overlaid on this are several geometric shapes: a dark blue triangle in the top left, a white triangle with thin blue horizontal lines in the top left and bottom right, and a dark blue curved shape in the bottom right.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [5.1] Cerema, *Ponts en zone sismique, conception et dimensionnement selon l'Eurocode 8*, Collection Références, 2015.
- [5.2] AFPS, *Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal*, Cahier technique n° 38, 2017.
- [5.3] OPPBTP, *Déchargement, manutention et stockage des armatures sur les chantiers de bâtiment*, fiche prévention E5 F 03 13, 2013.
- [5.4] Artarit F.-X., *Accessoires de levage - Mémento de l'élingueur*, INRS, ED 6178, ISBN 978-2-7389-2824-5, 2023.
- [5.5] Granju J.-L., *Béton armé : Théories et application selon l'Eurocode 2*, Eyrolles, 2012.

ARTICLES

- [5.6] Chataigner S., *Les armatures non métalliques (armatures composites)*, diaporama présenté lors des « Matinales 2014 » de l'AFCAB, 7 octobre 2014.
- [5.7] Rolland A., Benzarti K., Quiertant M., Argoul P. & Chataigner S., *Caractérisation d'armatures en matériaux composites pour le renforcement de structures, et comportement mécanique de l'interface armature-béton*, Bulletin Ouvrages d'art n° 71, décembre 2015, pp.70-93.
- [5.8] Périer V., Chataigner S. & Pruvost A., *Comparaison de différentes armatures utilisées pour le renforcement du béton*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 280-281, novembre 2013, pp. 51-62.

GUIDES ET RAPPORTS INTERNATIONAUX

- ACI 440.1R-15**, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*, ACI, 2015 (US)
- ACI 440.5-08**, *Specification for constitution with fiber-reinforced polymer reinforcing bars*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2008
- ACI 440.6-08**, *Specification for carbon and glass fiber-reinforced polymer reinforcing bar materials for concrete reinforcement*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2008
- ASTM D7957/D7957M-22**, *Standard specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement*, 2022 (USA)
- fib**, *FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for RC structures*, Technical report, Bulletin N°40, ISBN 978-2-88394-080-2, septembre 2007 (doi.org/10.35789/fib.BULL.0040)
- CNR-DT 203/ 2006**, *Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars*, National Research Council, Rome, 2007 (Italie)
- CSA-S807:F19**, *Specifications for fibre-reinforced polymers*, Canadian Standards Association (CSA), Mississauga, ON, Canada, 2019

JSCE (Japan Society of Civil Engineers), *Recommendation for Design and construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Concrete Engineering Series No. 23, Tokyo, 1997 (Japan)

FASCICULE DU CCTG (CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES GÉNÉRALES)

Fascicule 68 du Cahier des clauses techniques générales (CCTG) – Travaux de génie civil, *Exécution des travaux géotechniques des ouvrages de génie civil*, décembre 2017 (paru en mai 2018)

NORMES AFNOR ET FASCICULES DE DOCUMENTATION

FD P06-031	Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes Application des normes NF EN 1998-1 et NF EN 1998-1/NA, 2015
NF A35-015	Aciers pour béton armé – Aciers soudables lisses – Barres et couronnes, 2019
NF A35-027	Produits en acier pour béton armé – Armatures, 2015
NF A35-080-1	Aciers pour béton armé – Aciers soudables, 2020 Partie 1 : barres et couronnes
NF A35-080-2	Aciers pour béton armé – Aciers soudables, 2022 Partie 2 : treillis soudés
NF EN 1536+A1	Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés, 2015
NF EN 1992	Eurocode 2 – Calcul des structures en béton, 2005
NF EN 1992-1-1 COMPIL1	Eurocode 2 – Calcul des structures en béton, 2015 Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments Texte compilé de la norme NF EN 1992-1-1 d'octobre 2005 et son amendement 1 de février 2015
NF EN 1993	Eurocode 3 – Calcul des structures en acier, 2005
NF EN 1993-5	Eurocode 3 – Calcul des structures en acier, 2007 Partie 5 : pieux et palplanches
NF EN 1994	Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton, 2005
NF EN 1994-1-1	Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton, 2005 Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
NF EN 1998-1 COMPIL1	Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, 2016 Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments Texte compilé de la norme française NF EN 1998-1 :2005 intégrant dans le corps du texte l'amendement A1 de mai 2013
NF EN 1998-1 COMPIL2	Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, 2012 Partie 2 : ponts, 2012
NF EN 1998-5	Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, 2005 Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques
NF EN 10020	Définition et classification des nuances d'acier, 2000

NF EN 10025-2	Produits laminés à chaud en aciers de construction, 2019 Partie 2 : conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés
NF EN 10080	Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé Généralités, 2005
NF EN 10210	Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins, 2006
NF EN 10219-1	Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins, 2006 Partie 1 : conditions techniques de livraison
NF EN 10219-2	Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins, 2019 Partie 2 : tolérances, dimensions et caractéristiques de section
NF EN ISO 17660-1	Soudage – Soudage des aciers d'armatures, 2008 Partie 1 : assemblages transmettant des efforts
NF EN ISO 17660-1	Soudage – Soudage des aciers d'armatures, 2008 Partie 2 : assemblages non transmettant
NF P94-160-1	Sols : reconnaissance et essais — Auscultation d'un élément de fondation, 2000 Partie 1 : méthode par transparence
NF P94-262 COMPIL1	Justification des ouvrages géotechniques, 2018 Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes Compilation de la norme française NF P 94-262 : 2012 intégrant l'amendement A1 : 2018

Traduction

Bored piles for civil engineering works and building

Application guide

Since the first issue of this guide dedicated to bored piles in 1978, many changes have occurred affecting both technical aspects and applicable standards. This new issue incorporates these developments to which it is necessary to add the changes relating to public and private procurement.

This new guide deals with the execution in situ with excavation of the ground, class 1 and 2 piles (continuous flight auger piles), or barrette, constituting the deep foundations of both civil engineering works and buildings.

Very widely illustrated with more than 370 figures and several tables, it is intended for professionals. It consists of 7 booklets dealing respectively with generalities on the different types of piles, general aspects of works contracts, the execution of boring, concreting, reinforcements, inspection of finished piles and finally, their defects and their repair.

Pilotes perforados para obras de ingeniería y edificio

Guía de aplicación

Desde la primera edición de esta guía sobre pilotes perforados, publicada en 1978, se han producido muchísimos cambios, tanto en la técnica como en las normas aplicables. Esta nueva edición recoge dichos cambios, así como los relativos a los contratos públicos y privados.

Esta nueva guía trata de la ejecución in situ con excavación del terreno, de pilotes de clase 1 y 2 (barrena hueca continua), o de elementos portantes, que constituyen las cimentaciones profundas tanto de obras de ingeniería civil como de edificios.

Ilustrada con más de 370 figuras y numerosas tablas, va dirigida a un público profesional. Consta de siete entregas que tratan, respectivamente, de información general sobre los distintos tipos de pilotes, los aspectos generales de los contratos de obras, la perforación, el hormigonado, las armaduras, la inspección de los pilotes acabados y, por último, los defectos y reparaciones.

© 2025 - Cerema

LE CEREMA, L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Le Cerema, Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, est un établissement public qui apporte son concours à l'État et aux collectivités territoriales pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques au service de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires. Il porte des missions de recherche & innovation et appuie le transfert d'innovations dans les territoires et auprès des acteurs privés.

Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral. Présent partout en métropole et dans les Outre-mer par ses 27 implantations, il développe une expertise de référence au contact de ses partenaires européens et contribue à diffuser le savoir-faire français à l'international.

Le Cerema capitalise les connaissances et savoir-faire dans ses domaines d'activité. Éditeur, il mène sa mission de centre de ressources en ingénierie par la mise à disposition de près de 3 000 références à retrouver sur www.cerema.fr rubrique nos publications.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Dupliprint est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Direction de la Stratégie et de la Communication / Pôle éditions

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : PAO Concept

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achevé d'imprimer : juillet 2025

Dépôt légal : juillet 2025

ISBN : 978-2-37180-714-3 (pdf) - 978-2-37180-715-0 (papier) - ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

2 rue Antoine Charial - CS 33 927 - 69426 Lyon Cedex 03 - France

www.cerema.fr

LES PIEUX FORÉS

POUR LES OUVRAGES D'ART ET LE BÂTIMENT

GUIDE DE RÉALISATION

Fascicule 5 Les armatures des pieux forés

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

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

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



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