

Diagnostic, entretien et réparation des ouvrages en béton armé en 47 fiches pratiques

Mehrez Khemakhem
Omrane Benjeddou

EXPERTISE
TECHNIQUE
EDITIONS
LE MONITEUR

2^e édition

Sommaire

	Avant-propos	11
	À propos des auteurs	13
	Sigles et abréviations.....	15
	Introduction	17
PARTIE 1	Origines et prévention des désordres et des dégradations	31
CHAPITRE 1	Dégradations d'origine chimique.....	33
CHAPITRE 2	Dégradations d'origine mécanique.....	65
CHAPITRE 3	Dégradations d'origine physico-chimique et physique	79
CHAPITRE 4	Dégradations dues aux défauts de conception, de calcul, d'exécution et d'exploitation.....	99
PARTIE 2	Techniques de diagnostic	111
CHAPITRE 5	Méthodologie de diagnostic	113
CHAPITRE 6	Méthodes et essais	123
PARTIE 3	Méthodes et techniques de réparation et de renforcement	181
CHAPITRE 7	Principes et matériaux.....	183
CHAPITRE 8	Travaux préparatoires.....	191
CHAPITRE 9	Techniques de réparation.....	203
CHAPITRE 10	Techniques de renforcement	225
CHAPITRE 11	Renforcement des fondations.....	243
CHAPITRE 12	Exemples d'expertises	255

Glossaire.....	275
Bibliographie	279
Index	285
Table des matières.....	289

Sommaire graphique



Fiche 1.01
Carbonatation du béton



Fiche 1.02
Attaque par les chlorures



Fiche 1.03
Attaque par les sulfates



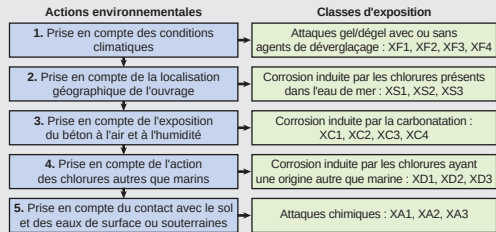
Fiche 1.04
Attaque par les acides



Fiche 1.05
Alkali-réactions



Fiche 1.06
Corrosion de l'acier



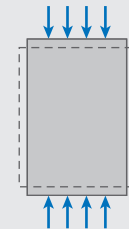
Fiche 1.07
Classes d'exposition



Fiche 2.01
Surcharges d'exploitation



Fiche 2.02
Concentration des efforts



Fiche 2.03
Fluage du béton



Fiche 2.04
Déformations du support



Fiche 2.05
Désordres au niveau des fondations



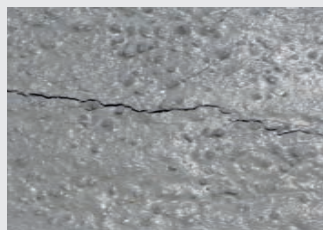
Fiche 2.06
Désordres liés aux travaux de voisinage



Fiche 3.01
Effet des sols gonflants



Fiche 3.02
Action des cycles gel/dégel



Fiche 3.03
Retraits



Fiche 4.01
Erreurs de conception et de calcul



Fiche 4.02
Cas de la poussée
au vide des armatures



Fiche 4.03
Dégradations et désordres dus
aux défauts d'exécution



Fiche 4.04
Désordres dus au manque d'entretien



Fiche 4.05
Désordres dus à
des actions accidentelles



Fiche 6.01
Moyens de contrôle des fissures



Fiche 6.02
Détection des armatures



Fiche 6.03
Mesure du potentiel de corrosion



Fiche 6.04
Détermination de la profondeur
de carbonatation



Fiche 6.05
Mesure de dureté superficielle
au scléromètre



Fiche 6.06
Détermination de la vitesse
de propagation du son (ultrasons)



Fiche 6.07
Prélèvement de carottes de béton



Fiche 8.01
Préparation du support



Fiche 8.02
Nettoyage



Fiche 8.03
Préparation des armatures



Fiche 8.04
Préparation et mise en œuvre
des produits à base de liants



Fiche 9.01
Mortier et béton appliqués à la main



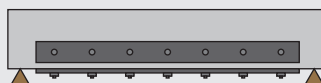
Fiche 9.02
Mortier et béton coulés



Fiche 9.03
Béton projeté



Fiche 9.04
Traitement des fissures et joints



Fiche 10.01
Renforcement par plaques collées



Fiche 10.02
Renforcement par béton
rapporté (chemisage)



Fiche 10.03
Renforcement par
fibres synthétiques



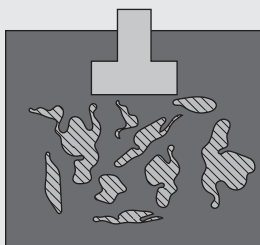
Fiche 10.04
Renforcement par lamelles
en fibres de carbone



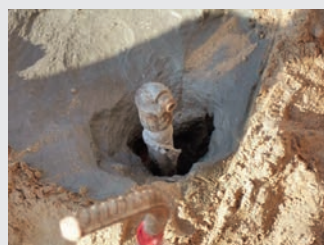
Fiche 10.05
Renforcement par tissu
en fibres de carbone



Fiche 11.01
Augmentation de
la surface de la semelle



Fiche 11.02
Traitement des terrains
de fondation par injection



Fiche 11.03
Reprise en sous-œuvre
par micropieux



Fiche 12.01
Expertise d'un bâtiment ancien



Fiche 12.02
Expertise de bâtiments fissurés



Fiche 12.03
Expertise d'un réservoir fissuré

1 Protection naturelle des armatures en acier du béton armé

L'armature en acier d'un ouvrage est naturellement protégée par une couche d'oxyde, qui résulte de la création à sa surface d'une pellicule protectrice de ferrite, de formule $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{CaO}$. Ce phénomène est appelé « passivité », et la couche qui en résulte « couche de passivation* ». En effet, au cours de la prise et du durcissement du béton, les ciments* se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Ces produits, comme la portlandite, de formule $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sont dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton, de pH compris entre 12 et 13. Les armatures sont protégées tant qu'elles se trouvent dans un milieu présentant un pH allant de 9 à 13,5 (fig. 1.01-1).

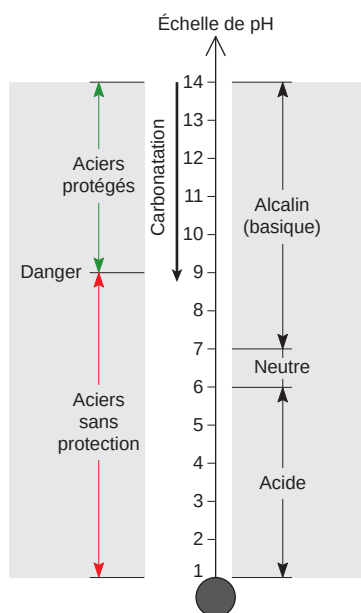


Fig. 1.01-1. Effet de la carbonatation du béton sur les armatures

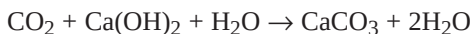
Cette couche protectrice réduit efficacement le risque de corrosion* de l'armature malgré la présence, parfois, d'eau et d'oxygène. Cependant, elle est perdue lorsque le béton se carbonate jusqu'à la profondeur de l'armature, ou lorsque des sels corrosifs (contenant principalement l'ion Cl^-) sont présents en quantité suffisante à la profondeur de l'armature.

Carbonatation du béton

2 Processus de la carbonatation du béton

Le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, dont la portlandite, selon une réaction produisant du carbonate de calcium, de formule chimique CaCO_3 . Cette réaction, appelée carbonatation du béton, est un phénomène de vieillissement naturel, qui n'est généralement pas nocif pour le béton.

L'équation de la réaction chimique est la suivante :



dioxyde de carbone + portlandite + eau $\rightarrow$ carbonate de calcium + eau

Cette transformation s'accompagne d'une diminution du pH, lequel atteint des valeurs inférieures à 9, voire, allant jusqu'à 8,3 si tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est carbonaté. L'alcalinité du ciment est alors neutralisée, et ce dernier n'assure plus la protection* des armatures, ce qui entraîne une dépasseivation de l'acier, c'est-à-dire une destruction de la couche de passivation (fig. 1.01-2).

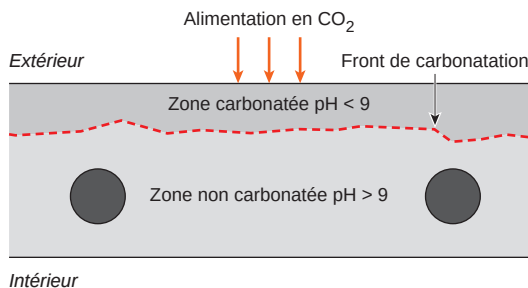


Fig. 1.01-2. Processus de carbonatation du béton

3 Conséquences de la carbonatation du béton

La carbonatation du béton est ainsi une source de dégradation des ouvrages en béton armé, et nuit à leur durabilité. En effet, une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, c'est-à-dire une réaction d'oxydation, lorsque le front de carbonatation les atteint. Quand le processus de dégradation est fort, la rouille*, par augmentation du volume de l'acier, provoque l'éclatement du béton d'enrobage, et laisse apparaître, à partir d'épaufrures, les armatures oxydées (photo 1.01-1). Le processus est schématisé par la figure 1.01-3.

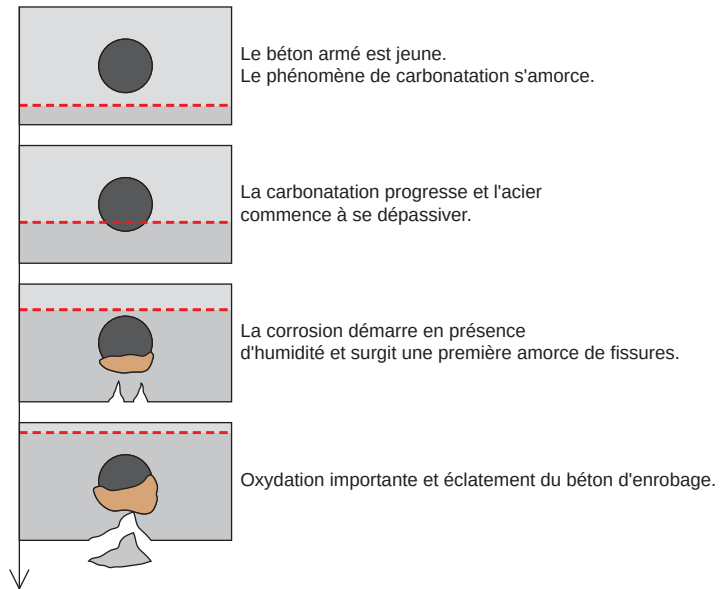
Carbonatation du béton

Fig. 1.01-3. Les phases de dégradation du béton armé par la carbonatation



Photo 1.01-1. Corrosion des armatures et éclatement du béton d'enrobage causés par la carbonatation du béton

Carbonatation du béton**5 Précautions pour retarder la progression de la carbonatation**

On peut agir pour ralentir la progression de la carbonatation en :

- augmentant (optimisant) le dosage en ciment ;
- diminuant le rapport eau/ciment (E/C) ;
- augmentant le temps de cure* du béton à jeune âge ;
- augmentant l'enrobage.

La norme européenne NF EN 206+A2/CN fixe des paramètres de formulations (dosages en liant, rapport eau/liant) et une classe de résistance minimale, pour qu'un béton se comporte de façon durable vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation du béton d'enrobage.

Cette norme définit quatre classes d'exposition ou degrés d'agressivité, notées XC1 à XC4, qui sont fonction de l'humidité et de l'existence de cycles d'humidification et de séchage (cf. fiche 1.07).

Détermination de la vitesse de propagation du son (ultrasons)

1 Principe

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales dans le béton : on mesure le temps mis par une onde à parcourir une distance connue dans le béton. C'est une mesure de vitesse de son. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton a un module d'élasticité important.

Un train d'ondes longitudinales est produit par un transducteur électro-acoustique maintenu au contact de la surface du béton soumis à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans le béton, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur, et des compteurs électroniques mesurent le temps de parcours de l'impulsion.

2 Objectifs

Les objectifs de l'essai peuvent être :

- la détermination de l'uniformité (l'homogénéité) du béton ;
- la détection de la présence et la mesure approximative de fissures, trous et autres défauts ;
- l'évaluation de l'efficacité de réparation de fissures ;
- la mesure des changements intervenus avec le temps dans les propriétés du béton ;
- la corrélation de la vitesse d'impulsion et de la résistance comme une mesure de la qualité du béton ;
- la détermination du module d'élasticité et du coefficient de Poisson dynamiques du béton.

3 Norme de l'essai

L'essai est exécuté selon la norme NF EN 12504-4 « Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son ». Il est aussi défini par la norme ISO 1920-7:2004 « Essais du béton – Partie 7 : essais non destructifs du béton durci ».

4 Équipement spécifique

L'appareillage est constitué essentiellement d'un générateur d'impulsions électriques, de plusieurs transducteurs (un émetteur et un ou plusieurs récepteurs), et d'un dispositif de chronométrage (fig. 6.06-1). Les contacts entre les transducteurs avec la pièce à ausculter sont ponctuels ou surfaciques.

Détermination de la vitesse de propagation du son (ultrasons)

Chaque mesure doit être répétée au moins trois fois en repositionnant au même endroit les transducteurs.

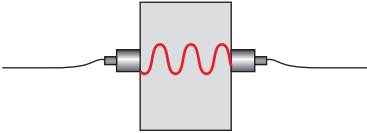


Fig. 6.06-2. Positionnement des transducteurs sur les faces opposées (méthode directe)

Méthode de transmission indirecte

Les deux transducteurs (émetteur et le récepteur) sont appliqués sur la même surface plane de l'élément à mesurer (fig. 6.06-3). L'émetteur reste fixe et le récepteur change de position à chaque mesure. On prend au moins cinq mesures en cinq points alignés en s'assurant d'avoir une distance entre chaque point comprise entre 10 et 30 cm. Si le plus gros granulats du béton est inférieur à 20 mm, la distance minimale entre deux points est de 10 cm. Si le plus gros granulats du béton dépasse 20 mm, la distance minimale entre deux points est de 15 cm. On veillera, à l'aide d'un détecteur d'armatures, à ne pas prendre de mesure au-dessus ou à proximité des armatures, surtout celles parallèles à la direction de propagation de l'impulsion, afin que la mesure concerne le béton et non l'acier. Noter le temps du parcours. Chaque mesure doit être répétée trois fois, en repositionnant au même endroit les transducteurs.

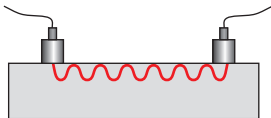


Fig. 6.06-3. Positionnement des transducteurs sur la même face (méthode indirecte)

Méthode semi-directe

L'émetteur et le récepteur sont positionnés sur deux faces non coplanaires de l'élément à mesurer (fig. 6.06-4). Si une seule mesure est réalisée, l'essai se déroule en suivant la méthode par transmission directe. Si plusieurs mesures sont réalisées en déplaçant le transducteur-récepteur, l'essai est réalisé en suivant la méthode par transmission indirecte.

Détermination de la vitesse de propagation du son (ultrasons)

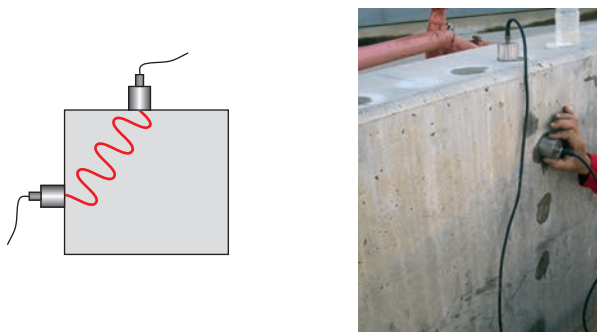


Fig. 6.06-4. Positionnement des transducteurs sur deux faces non coplanaires (méthode semi-directe)

6 Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats est fonction de la méthode de mesure.

Méthode de transmission directe

Le temps de propagation des ondes soniques est exprimé en microseconde (μs). La vitesse conventionnelle de propagation en mètre par seconde (m/s) est calculée à l'aide de la relation :

$$v = \frac{l}{t}$$

où :

l : la distance entre les deux transducteurs (mm) ;

t : le temps de propagation (μs).

Des études de la Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux (Rilem)⁽⁶⁾ ont montré que des corrélations sont possibles entre la résistance à la compression R_c et la vitesse v . Plus la vitesse est importante, meilleure est la qualité du béton. Le tableau 6.06-1 donne une idée de la qualité du béton en fonction de la vitesse.

Tab. 6.06-1. Relation entre la vitesse de propagation et la qualité du béton

Qualité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4 000
Bonne	De 3 200 à 4 000
Moyenne	De 2 500 à 3 200
Mauvaise	De 1 700 à 2 500
Très mauvaise	Inférieure à 1 700

(6) Volume 16, année 1983.

Détermination de la vitesse de propagation du son (ultrasons)

Cette méthode peut être utilisée, par exemple, pour localiser des hétérogénéités à l'intérieur d'un élément en béton (fig. 6.06-8).

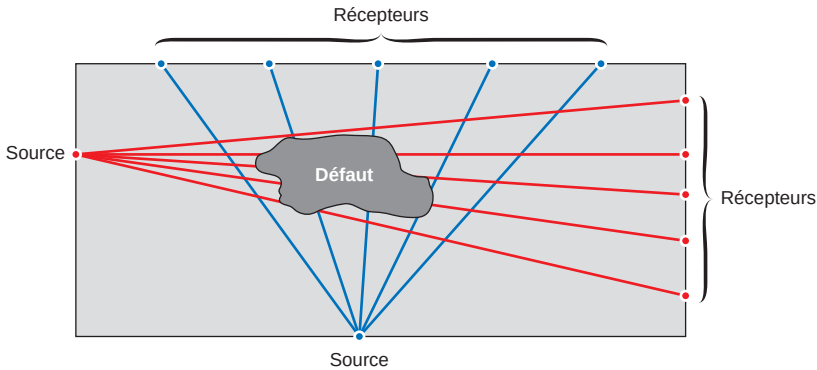


Fig. 6.06-8. Exemple d'exploitation de la méthode semi-directe

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes :

- a) identification de la structure du béton/de la pièce ;
- b) emplacement de la surface d'essai ;
- c) identification de l'appareil ;
- d) description de la préparation de la surface ;
- e) informations détaillées sur la composition et l'état du béton ;
- f) résultats de l'essai.

7 Facteurs influant sur les résultats des mesures

Teneur en humidité

La teneur en humidité produit deux effets sur la vitesse de propagation du son, l'un chimique, l'autre physique⁽⁸⁾. Ces effets sont importants pour l'établissement de corrélations destinées à fournir une estimation de la résistance du béton (fig. 6.06-9). Entre une éprouvette normalisée cubique ou cylindrique soumise à une cure correcte et un élément structurel réalisé avec le même béton, il peut y avoir une différence importante de vitesse de propagation du son. La plupart des différences sont dues à l'influence des conditions de séchage sur l'hydratation du ciment, tandis que certaines sont dues à la présence d'eau libre dans les vides. Il est important de bien tenir compte de ces effets pour estimer la résistance.

(8) Willetts C. H., *Investigation of the Schmidt Concrete Test Hammer*, 1958.

La reprise en sous-œuvre par micropieux consiste en un report du niveau de fondation à un niveau inférieur, où le terrain est de meilleure qualité. Le transfert de charge est assuré par des micropieux. Les micropieux, mode de fondations qui s'apparente à des fondations profondes, sont des pieux de diamètre inférieur ou égal à 250 mm (300 mm pour la norme NF EN 14199 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – micropieux »). Ils sont de quatre types, qui varient selon le procédé d'exécution. Les quatre types décrits ci-après sont adaptés de la norme NF EN 14199 en suivant les définitions données dans le DTU 13.2 « Fondations profondes pour le bâtiment, Partie 1 : cahier des clauses techniques ».

1 Type I

Le micropieu type I est un pieu foré tubé. Le forage est équipé ou non d'armatures, et rempli d'un mortier de ciment au tube plongeur. Le tubage est ensuite obturé en tête, et l'intérieur du tubage au-dessus du mortier mis sous pression. Le tubage est récupéré en maintenant la pression sur le mortier (fig. 11.03-1).

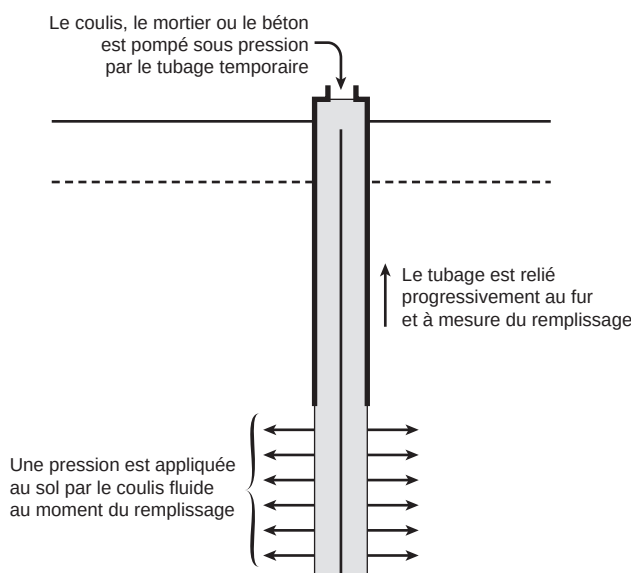


Fig. 11.03-1. Injection du forage avec un tubage temporaire en appliquant une pression
(source : norme NF EN 14199)

2 Type II

Le micropieu de type II est un pieu foré. Le forage est équipé d'une armature et rempli d'un coulis ou de mortier de scellement par gravité ou sous une très faible pression au moyen d'un tube plongeur. Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage*.

Reprise en sous-œuvre par micropieux

L'armature est constituée :

- soit par un tube à paroi épaisse ;
- soit par des barres d'acier raccordées bout à bout ;
- soit par un faisceau de barres en acier placées à l'intérieur d'un tube en acier.

3 Type III

Le micropieu type III est un pieu foré. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection. L'injection est faite en tête à une pression supérieure ou égale à 1 MPa. Elle est globale et unitaire (IGU). Dans les sols mous, ce type de pieu doit être calculé au flambement*. Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

4 Type IV

Le micropieu type IV est un pieu foré. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine (fig. 11.03-2). Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection. On procède à l'injection à l'obturateur simple ou double d'un coulis ou mortier de scellement à une pression d'injection supérieure ou égale à 1 MPa. L'injection est répétitive et sélective (IRS). Dans les sols mous, ce type de pieu doit être calculé au flambement. Lorsque la nature du sol le permet, le forage peut être remplacé par le lançage, le battage ou le fonçage.

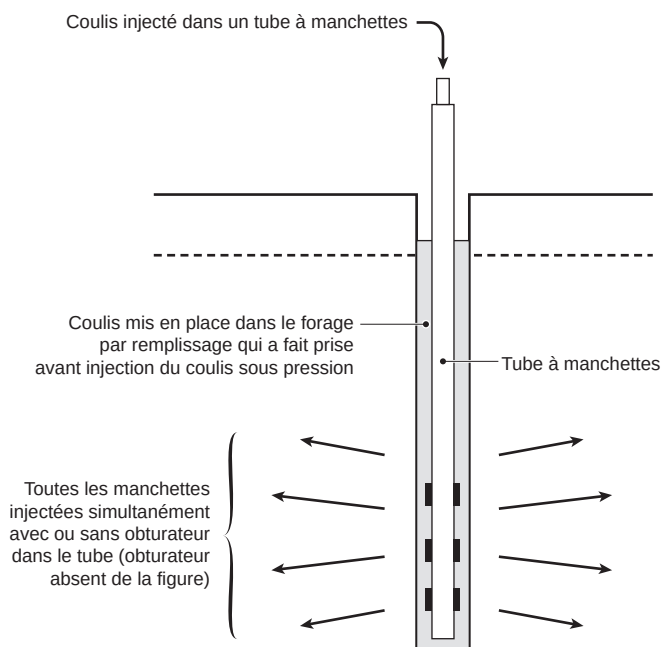


Fig. 11.03-2. Injection en une seule passe par un tube à manchettes

(source : norme NF EN 14199)

Reprise en sous-œuvre par micropieux**5 Structures des micropieux**

Un micropieu peut être installé de manière isolée, en groupe ou en réseau (fig. 11.03-3).

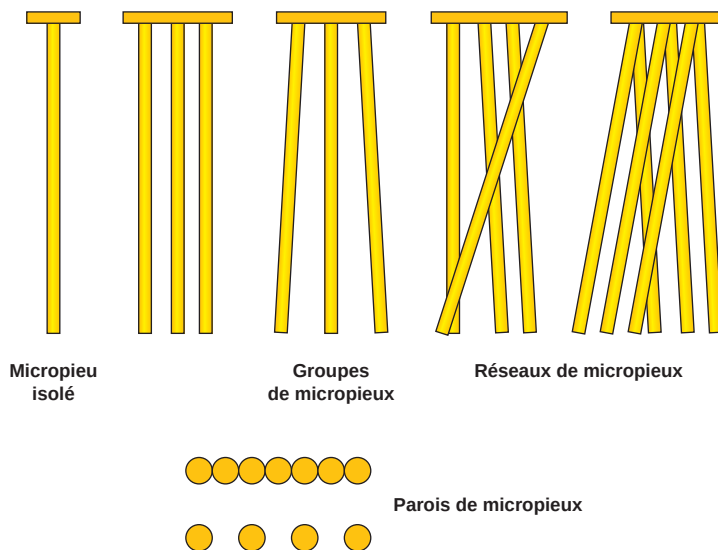


Fig. 11.03-3. Exemples de structures de micropieux
(source : norme NF EN 14199)

Par ailleurs, il peut être placé verticalement ou en position inclinée. Il peut venir aussi en complément d'un élargissement de semelle. La figure 11.03-4 illustre quelques cas.

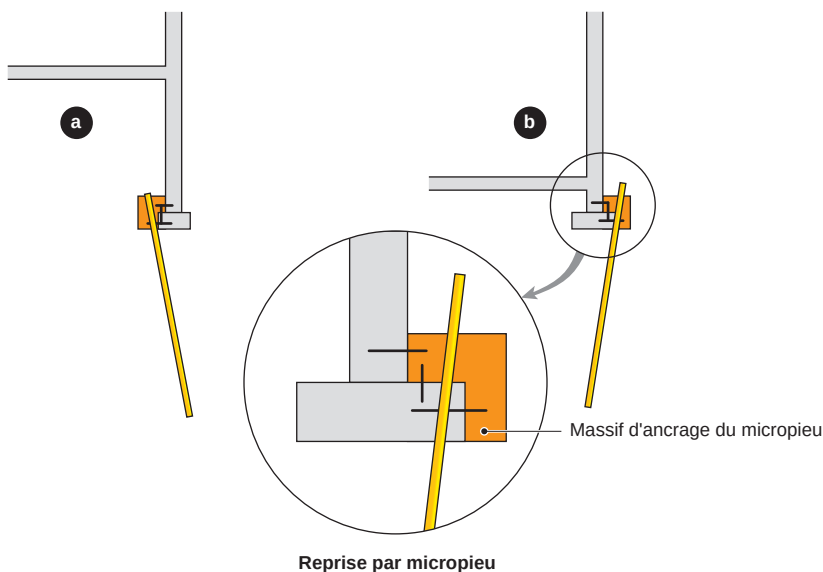


Fig. 11.03-4. Exemple d'utilisation de micropieux

Reprise en sous-œuvre par micropieux

Les figures 11.03-5 et 11.03-6 illustrent quelques exemples de renforcement des semelles existantes par micropieux.

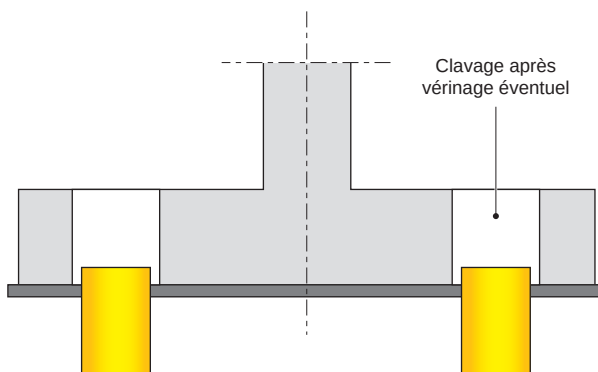


Fig. 11.03-5. Réalisation de pieux ou micropieux à travers une semelle de fondation existante
(source : norme NF P 95-106)

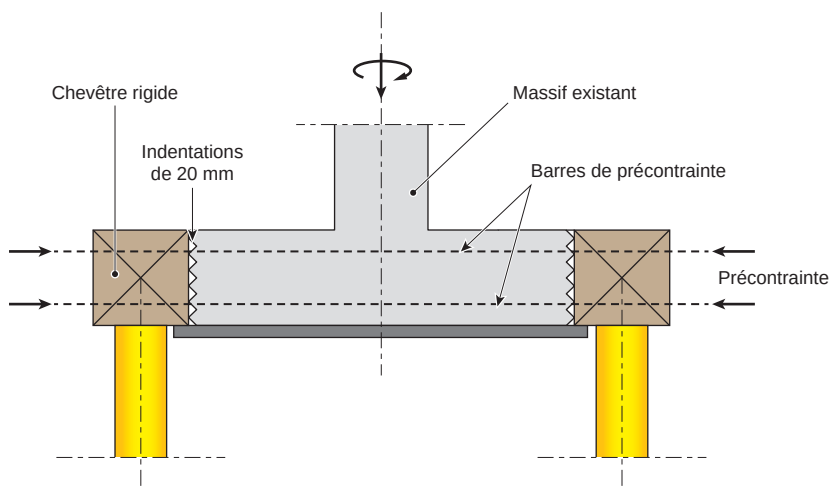


Fig. 11.03-6. Réalisation de pieux ou micropieux avec exécution d'un chevêtre rigide solidarisé à la semelle existante
(source : norme NF P 95-106)

6 Composition et mise en place du mortier

Le mortier et le béton pour micropieux doivent avoir :

- une grande résistance à la ségrégation ;
- une grande plasticité et une bonne cohésivité⁽¹⁾ ;

(1) Cf. paragraphe 6.5.2 de la NF EN 14199 (septembre 2015 – indice de classement : P94-213) : Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Micropieux – Exécution des travaux géotechniques spéciaux.

Reprise en sous-œuvre par micropieux

- une bonne fluidité⁽²⁾ ;
- une aptitude à l'auto-compaction ;
- une ouvrabilité* suffisante pendant la durée de leur mise en place et le retrait des tubages temporaires ;
- une résistance minimale à la compression simple au moins de classe C25/30 à 28 jours (ou à la date du premier chargement du micropieu si celui-ci est réalisé avant cette date).

La composition et le dosage du mortier sont déterminés en fonction de la charge intrinsèque à obtenir. Le dosage minimal est de 500 kg de ciment par m³ de mortier, et le dosage minimal du coulis de scellement est de 1 200 kg de ciment par m³ de coulis⁽³⁾. Le choix du liant tient compte des résultats d'analyse chimique des eaux prélevées dans le sol.

Le forage une fois terminé est entièrement rempli de mortier au tube plongeur. Pendant la remontée du tubage, le niveau du mortier baisse du fait du remplissage des hors-profil, mais il ne doit jamais se trouver au-dessous du bas du tubage.

Les photos 11.03-1 à 11.03-3 illustrent un exemple de chantier de mise en place de micropieux pour renforcer un sol.



Photo 11.03-1. Équipements d'un atelier : malaxeur et pompe à injection



Photo 11.03-2. Opération de forage et tube d'injection

(2) *Idem* (1).

(3) NF DTU 13.2 (septembre 1992 – indice de classement : P11-212) : Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Partie 1 : cahier des clauses techniques.

Reprise en sous-œuvre par micropieux



Photo 11.03-3. Manomètre de contrôle de pression et micropieu achevé

Diagnostic, entretien et réparation des ouvrages en béton armé en 47 fiches pratiques

Le béton armé est un matériau hétérogène, puisque constitué de béton et d'armatures en acier. Inerte, il évolue dans le temps, subissant des changements constants : dilatations, fissures, ruptures, etc.

Cet ouvrage permet de diagnostiquer les dégradations, désordres et pathologies éventuelles, et de mettre en œuvre un entretien ou une réparation adapté.

Ainsi, au moyen de fiches pratiques richement illustrées, cet ouvrage :

- explique la notion de durabilité d'un ouvrage, puis liste les désordres courants des constructions (boulage, écaillage, ségrégation, fissures, etc.) ;
- détaille les mécanismes de dégradations chimiques (carbonatation, attaques par les chlorures, les sulfates ou les acides, corrosion de l'acier, etc.) et leurs conséquences ;
- présente les classes d'exposition d'attaques chimiques (XA, XC, XD, etc.) ;
- décrit les dégradations mécaniques et physiques, constituées en majorité des surcharges, sols gonflants et du phénomène de gel/dégel ;
- expose les dégradations dues au défaut de conception, d'exécution ou d'exploitation ;
- développe la méthodologie et les principales étapes d'un diagnostic, puis analyse les méthodes non destructives utilisées pour le contrôle des fissures, par exemple, ou partiellement destructives, comme le carottage ;
- fournit les techniques de réparation (liants et résines en surface, béton coulé ou projeté, traitement des fissures) et de renforcement des poteaux, poutres, dalles et fondations par des plaques, du béton rapporté ou des fibres synthétiques.

En début d'ouvrage, un **sommaire graphique** renvoyant aux fiches pratiques permet d'identifier visuellement les désordres et dégradations, et ainsi de déterminer les essais, réparations et renforcements à effectuer selon les situations.

Cet ouvrage s'adresse aux techniciens et ingénieurs spécialisés, aux enseignants, formateurs,

et étudiants. Il accompagnera dans l'accomplissement de leurs missions les chargés d'étude, de la surveillance, de l'entretien et de la réparation des ouvrages en béton ainsi que les ingénieurs et techniciens de laboratoires ou des entreprises de construction.

Cette 2^e édition met à jour certaines normes et références techniques et intègre de nouveaux développements concernant la technique radar, qui permet d'identifier les hétérogénéités à l'intérieur des structures, mais aussi la mesure de la résistivité du béton, utile dans de nombreux domaines. Enfin, un nouveau chapitre aborde trois exemples d'expertise (bâtiment public ancien, bâtiment fissuré et réservoir fissuré), avec pour chaque projet le résumé du diagnostic mené et les conclusions des experts.

Sommaire

► Partie 1. Origines et prévention des désordres et des dégradations

1. Dégradations d'origine chimique
2. Dégradations d'origine mécanique
3. Dégradations d'origine physico-chimique et physique
4. Dégradations dues aux défauts de conception, de calcul, d'exécution et d'exploitation

► Partie 2. Techniques de diagnostic

5. Méthodologie de diagnostic
6. Méthodes et essais

► Partie 3. Méthodes et techniques de réparation et de renforcement

7. Principes et matériaux
8. Travaux préparatoires
9. Techniques de réparation
10. Techniques de renforcement
11. Renforcement des fondations
12. Exemples d'expertises

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14740-7



9 782281 147407