

1
VERSION 2

Réparation et renforcement des fondations





Figure n° 1 : les trois intervenants le maître d'œuvre (le prescripteur), l'entrepreneur et le contrôleur.

Le présent guide s'adresse **aux entrepreneurs** qui ont à réaliser des travaux de réparation et de renforcement des ouvrages de fondation.
Le présent document concerne aussi les deux autres acteurs de l'opération que sont **le prescripteur et le contrôleur** (maître d'œuvre ou son représentant).

SOMMAIRE

Préambule	6
1 PRINCIPES GÉNÉRAUX	7
1.1 Introduction	8
1.2 Histoire de l'ouvrage	9
1.2.1 Conception et réalisation de l'ouvrage à réparer ou renforcer.....	9
1.2.2 Exploitation de l'ouvrage.....	9
1.2.3 Le constat des désordres.....	9
1.3 La réparation ou le renforcement	10
1.3.1 Recherche des causes.....	10
1.3.2 Choix de la méthode et des moyens à mettre en œuvre.....	10
1.3.3 Exécution des travaux de réparation ou de renforcement.....	11
1.3.4 Les différentes techniques utilisées.....	11
2 REPRISE EN SOUS-ŒUVRE	13
2.1 Généralités	14
2.2 Principes et domaines d'application	15
2.3 Réalisation des travaux	16
2.3.1 Travaux préparatoires.....	16
2.3.2 Transfert des charges.....	16
2.3.3 Excavation et blindage.....	18
2.3.4 Préparation du bétonnage, bétonnage.....	18
2.3.5 Décoffrage et comblement des fouilles.....	18
2.3.6 Mise en charge de la nouvelle fondation.....	19
2.3.7 Précautions particulières.....	20
2.4 Essais et contrôles	21
2.5 Dimensionnement des ouvrages	21
2.6 Cas particulier des fondations en site aquatique	22
3 AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DES TERRAINS DE FONDATION PAR INJECTION	23
3.1 Généralités	24
3.1.1 L'amélioration et le renforcement = distinction.....	24
3.1.2 Classification des méthodes de traitement par injection.....	25
3.1.3 Choix de la méthode.....	26
3.1.4 Réalisation des travaux.....	27
3.2 Les injections classiques	28
3.2.1 Définition et principes.....	28
3.2.2 Forages.....	28
3.2.3 Les coulis.....	30

3.2.4	Le plot d'essai	30
3.2.5	Contrôle de mise en œuvre et d'efficacité	30
3.2.6	Domaines d'utilisation de l'injection classique	32
3.3	Injection de claquage	34
3.3.1	Définition et principes	34
3.3.2	La fissuration du sol	34
3.3.3	Les produits d'injection	35
3.3.4	Comportement des sols et conduite de l'injection	35
3.3.5	Avantages, inconvénients et limitations	36
3.3.6	Contrôles	37
3.3.7	Applications	37
3.4	Le compactage statique horizontal (CSH) ou injection solide	39
3.4.1	Principe	39
3.4.2	Les matériels et la mise en œuvre	39
3.4.3	Matériau d'injection	40
3.4.4	Les sols traitables, les limites d'application	40
3.4.5	Essais et contrôles	41
3.4.6	Avantages, inconvénients et limitations	43
3.4.7	Types d'applications	43
3.5	Le jet grouting	45
3.5.1	Le principe	45
3.5.2	Réalisation d'une colonne de jet	46
3.5.3	Paramètres des colonnes de jet	48
3.5.4	Avantages, inconvénients et limitations	49
3.5.5	Essais et contrôles	49
3.5.6	Applications	51
4	PIEUX ET MICROPIEUX	53
4.1	Généralités	54
4.2	Principes et domaines d'application	55
4.3	Réalisation des travaux	56
4.3.1	Travaux préparatoires - choix du procédé	56
4.3.2	Raccordement à la structure et mise en charge	56
4.3.3	Exécution des pieux et micropieux proprement dits	59
4.3.4	Contraintes admissibles	61
4.4	Essais et contrôles	62
5	RÉPARATION ET RENFORCEMENT DES FONDATIONS PAR TIRANTS ET BOULONS D'ANCRAGE	63
5.1	Généralités	64
5.2	Principe et domaine d'application	65

5.3 Tirants d'ancrage - Études et mise en œuvre	66
5.3.1 Conception et études	66
5.3.2 Spécification des fournitures	67
5.3.3 Protection contre la corrosion	67
5.3.4 Essais préalables	67
5.3.5 Mise en œuvre	68
5.3.6 Phasage des travaux et contrôle en cours d'exécution	68
5.3.7 Mise en tension des ancrages et contrôle final	69
5.4 Boulons d'ancrage- Études et mise en œuvre	70
5.4.1 Conception et études	70
5.4.2 Spécification des fournitures	70
5.4.3 Essais préalables et mise en œuvre	71
5.4.4 Contrôles en cours et en fin d'exécution	71
5.4 Clouage	72
6 RABATTEMENTS ET DRAINAGE	73
6.1 Généralités	74
6.2 Principes, domaines d'application et réalisation	75
6.2.1 Le rabattement	75
6.2.2 Le drainage	76
6.2.3 Drainage par barbacanes	77
6.3 Conception et études	77
6.3.1 Reconnaissances et études	77
6.3.2 Matériaux et matériels	78
6.4 Contrôles	78
7 HYGIÈNE ET SÉCURITÉ	79
7.1 Principes généraux	80
7.2 Protection des personnes	80
7.3 Protection de l'environnement contre les pollutions	81
TABLES DES ILLUSTRATIONS	82
ANNEXE : TEXTES DE RÉFÉRENCE	84

Les ouvrages de fondation constituent l'interface entre les superstructures et le sol d'assise ; comme toute construction, ils doivent faire l'objet d'un entretien adapté, soit pour pallier un vieillissement prématuré ou remédier à des défauts d'origine, soit pour prendre en compte les conséquences de modifications intervenues depuis la construction de l'ouvrage dans ses conditions d'exploitation ou dans son environnement.

Ces travaux de réparation ou de renforcement sont de différentes natures. Ils concernent aussi bien les structures que le sol et se traduisent alors par des reprises en sous-œuvre (par la réalisation de puits ou semelles), par l'exécution de pieux et micropieux, ou par la mise en place de tirants et boulons d'ancrage, par des injections, des renforcements de divers types ou des drainages.

Le présent guide a pour objet d'exposer les principaux procédés de réparation ou de renforcement correspondant à ces différentes techniques. Il suppose fondamentalement que les causes de désordres ont été trouvées et expliquées. Le choix des méthodes de réparation ou de renforcement est étroitement lié à la détermination de ces causes de désordres auxquelles il faut remédier. Ces travaux ont notamment pour but d'arrêter une évolution dommageable et de reconstituer l'intégrité des structures en leur assurant la pérennité voulue. La qualité de la réparation, fonction de la durée de vie qui lui est définie, est un élément d'appréciation important dans le choix des solutions.

Bien que les problèmes de sol soient de nature différente de ceux des constructions en béton, il apparaît que ce guide concernant les fondations et les sols de fondation a toute sa place dans la collection des guides STRRES, car il s'avère indispensable d'associer les structures des ouvrages à leur environnement géotechnique

Ce guide regroupe des techniques de fondations très diverses, dont certaines peuvent être applicables pour un même problème à résoudre. De ce fait, la structure de ce guide diffère sensiblement de celle des guides plus spécifiques relatifs aux ouvrages eux-mêmes, portés par ces fondations.

1

Principes généraux

- 1.1 Introduction
- 1.2 Histoire de l'ouvrage
- 1.3 La réparation ou le renforcement

Toute opération de réparation ou de renforcement doit être considérée comme un cas particulier. Elle comporte trois étapes essentielles :

- la reconstitution de la vie de l'ouvrage jusqu'à l'apparition des désordres ;
- l'élaboration d'un diagnostic et le choix des moyens ;
- la réparation proprement dite.

La première étape nécessite beaucoup de minutie pour reconstituer l'histoire de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage jusqu'à l'origine des désordres, analyser les mesures et observations qui auraient été effectuées avant et après l'apparition des désordres et comprendre le fonctionnement réel de l'ouvrage.

Lors de l'élaboration de la méthode et du choix des moyens à adopter pour effectuer les travaux, il convient d'analyser les risques que peuvent faire courir à la construction les moyens de renforcement possibles, le remède pouvant quelquefois accentuer les désordres. Il faut de même définir les appareils de mesure à mettre en place pour suivre le comportement de l'ouvrage pendant les travaux et contrôler le résultat de ces derniers après leur exécution.

1.2.1 CONCEPTION ET RÉALISATION DE L'OUVRAGE À RÉPARER OU RENFORCER

Cette première analyse concerne uniquement la construction de l'ouvrage et les études correspondantes. Elle peut demander beaucoup de temps pour rassembler les documents originaux et les analyser. Des études complémentaires peuvent s'avérer nécessaire. Il convient, en premier lieu, de consulter le « dossier de l'ouvrage » qui doit comprendre : les dessins conformes à l'exécution, les hypothèses et les notes de calcul, les conditions effectives de réalisation et les éventuels incidents de chantier, les résultats des essais, mesures et observations éventuellement réalisés pendant les travaux.

Si le dossier de l'ouvrage ne peut être entièrement reconstitué, des relevés sont effectués « *in situ* » et complétés par les calculs nécessaires. Ces relevés permettent de reconstituer la géométrie des fondations existantes en réalisant des puits de reconnaissance destinés à s'assurer de la largeur et de la profondeur des semelles, du nombre et du diamètre des pieux éventuels. Des procédés plus élaborés permettent de définir la profondeur des pieux et leur qualité. Ces relevés mènent également à redéfinir :

- 1) les terrains de fondation et leurs caractéristiques au moyen de reconnaissances poursuivies jusqu'aux couches susceptibles de porter, dans des conditions satisfaisantes de résistance et de tassement, les charges des superstructures,
- 2) les conditions hydrogéologiques.

1.2.2 EXPLOITATION DE L'OUVRAGE

Il est nécessaire également de connaître les conditions réelles d'exploitation de l'ouvrage, son comportement et les modifications intervenues dans son environnement, c'est-à-dire :

- l'évolution dans le temps des conditions d'exploitation et la comparaison avec les hypothèses retenues lors de l'étude d'exécution,
- les variations du niveau de la nappe phréatique,
- la recherche et l'analyse des mesures ayant pu être faites sur tout ou partie de l'ouvrage,
- l'information complète sur toutes les réparations, même partielles, portant sur les fondations ou le sol de fondation, effectuées au cours de la vie de l'ouvrage (dates, investigations préalables, moyens, méthodes, mesures...),
- la recherche des travaux effectués à proximité depuis la construction de l'ouvrage.

1.2.3 LE CONSTAT DES DÉSORDRES

Il porte sur la nature et l'importance de ces deniers, sur la chronologie de leur apparition et leur évolution dans le temps.

La notion de réparation est plus liée à la présence de désordres, alors que le renforcement implique plus l'idée de modification des conditions d'exploitation de l'ouvrage, lequel peut être un ouvrage sain.

Quels que soient les moyens utilisés, la réparation et le renforcement comprennent les étapes suivantes, dont l'importance relative peut être variable.

1.3.1 RECHERCHE DES CAUSES

Cette recherche est facilitée par une bonne connaissance de l'histoire de l'ouvrage. On peut citer les causes possibles suivantes :

- erreurs dans la conception ou au cours de la construction de l'ouvrage,
- écarts entre les caractéristiques géotechniques réelles et celles prises en compte,
- évolution de ces dernières par altération dans le temps du terrain de fondation (création de fontis, effondrement de carrière sous-jacente...),
- modification des sollicitations extérieures (ex : surcharge des terrains avoisinants),
- changement dans les conditions d'exploitation,
- modification de l'environnement (fouille à proximité de l'ouvrage, modification de niveau de la nappe, modification des niveaux des cours d'eau due au changement climatique, affouillements...),
- altération du béton placé dans un milieu agressif.

1.3.2 CHOIX DE LA MÉTHODE ET DES MOYENS À METTRE EN ŒUVRE

Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins. Outre les considérations d'ordre économique, les points suivants seront pris en considération :

- > **la mise en évidence des risques liés au choix des moyens de réparation ou de confortement tels :**
 - l'incapacité de la structure à reprendre des charges non prévues lors de sa construction,
 - la modification de la capacité portante du terrain et les conséquences sur le comportement de l'ouvrage de l'utilisation du lançage, du battage, de la vibration.....,
 - la précision d'exécution et ses conséquences possibles ;
- > **le phasage des travaux ;**
- > **la définition des appareils de mesure et de contrôle à mettre en place, pour lesquels on devra préciser :**
 - les mesures, avec leur point zéro, à effectuer, leur fréquence ou leur enregistrement en continu et le processus de présentation et d'exploitation de ces mesures,
 - les alarmes à mettre en œuvre, automatiques ou non,
 - la ou les personnes(s) à informer, avec la définition des mesures de sauvegarde à prendre.

1.3.3 EXÉCUTION DES TRAVAUX DE RÉPARATION OU DE RENFORCEMENT

Le responsable du projet doit être associé au déroulement du chantier pour la vérification, notamment, du bien-fondé des hypothèses retenues et de l'adaptation de la méthode aux conditions réelles rencontrées. Il doit, en particulier, veiller aux éventuels dépassements des seuils fixés, si les mesures évoquées en 1.3.2 montrent qu'ils risquent effectivement d'être atteints voire dépassés. Ces adaptations éventuelles auront été définies lors de la mise au point du projet (Méthode Observationnelle).

En fin de chantier, il sera remis au gestionnaire, en vue de leur archivage, les documents suivants qui constituent le « dossier d'ouvrage » : jeu complet de dessins et de notes de calcul conformes à l'exécution, documents relatifs au chantier proprement dit (avancement, incidents, accidents, modifications ; quantités mises en œuvre, moyens utilisés...) et relevé des mesures avec leur analyse.

1.3.4 LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES UTILISÉES

Ces techniques, détaillées dans les chapitres suivants, si elles répondent à un objectif de réparation ou de renforcement pour l'ouvrage porté, consistent le plus souvent en un renforcement des fondations ou du sol de fondation, plus qu'en une réparation de ces derniers. La réparation, en effet, est effectuée sur une fondation existante, présentant des défauts réhibitoires constatés pendant ou juste après son exécution, et qu'il convient de réparer.

> **Les techniques sont très différentes et il a été choisi de les classer comme suit:**

- **la reprise en sous-œuvre** porte spécifiquement sur des fondations de type « superficiel » associées à des fondations existantes, soit elles-mêmes superficielles, soit profondes (fondations mixtes) ;
- **l'amélioration et le renforcement des terrains par injection**. Ces méthodes consistent à introduire de force, de manière diffuse ou contrôlée, des additifs faisant prise et améliorant globalement les caractéristiques mécaniques du terrain. Il s'agit des injections traditionnelles, du compactage statique horizontal et du jet grouting, méthodes faisant appel à des matériels et des produits très différents ;
- **les pieux et micropieux**, ces derniers étant particulièrement bien adaptés aux renforcements ;
- **les tirants, boulons d'ancrage et clous**, bien adaptés aux soutènements et dont les mécanismes d'interaction avec le sol sont les mêmes que pour les micropieux ;
- enfin, les risques de désordres, voire de désordres avérés mais sans inconvénients, s'ils sont occasionnés par l'eau, peuvent être stoppés par la seule réalisation de travaux agissant sur cette dernière : **rabattement ou drainage**, sous les formes adaptées au problème à résoudre.

De nombreux projets font simultanément appel à plusieurs des techniques citées.

Les documents normatifs, recommandations et directives applicables à ces techniques sont indiquées en annexe.

2

Reprise en sous-œuvre

- 2.1 Généralités
- 2.2 Principes et domaines d'application
- 2.3 Réalisation des travaux
- 2.4 Essais et contrôles
- 2.5 Dimensionnement des ouvrages
- 2.6 Cas particulier des fondations en site aquatique

La réparation et/ou le renforcement d'ouvrages de fondation par la reprise en sous-œuvre concernent, soit les ouvrages anciens, soit des ouvrages plus récents dont l'infrastructure se révèle déficiente ou inadaptée ou dont la destination change, apportant des charges nouvelles à l'ouvrage.

Les fondations existantes sont complétées en tant que de besoin par des structures de même nature à des niveaux qui peuvent être différents de ceux de la fondation initiale. Il est également possible d'envisager, pour un ouvrage sur pieux amenés à supporter des charges supérieures à celles pour lesquelles les pieux ont été dimensionnés, d'associer à la tête de ces derniers une semelle nouvelle. Il convient alors d'utiliser le concept de fondation mixte, dans la mesure où le terrain d'assise de la semelle est de qualité telle qu'il peut reprendre les nouvelles charges avec des déformations tolérables. Cette semelle peut d'ailleurs déjà exister, n'assurant qu'un rôle de transmission des efforts aux pieux, mais ne prenant pas en compte son rôle porteur.

Le renforcement par pieux ou micropieux, reportant les charges à des niveaux nettement inférieurs, fait l'objet de la quatrième partie et peut être considéré comme une technique de reprise en sous-œuvre.

Le principe de base consiste, soit à reporter le niveau de fondation à un niveau inférieur, où le terrain est de meilleure qualité, soit à augmenter la surface de la fondation au niveau, où elle a été initialement réalisée.

Il est essentiel que la méthode adoptée assure en permanence la stabilité de l'ouvrage ; pour cela le traitement est souvent réalisé en plusieurs phases, par parties, horizontalement et verticalement.

2.3.1 TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Ils comprennent la recherche de la position exacte des fondations de l'ouvrage, la définition des efforts appliqués, la position et l'état des mitoyens (pour lesquels un constat préalable est fortement conseillé), l'état de l'ouvrage. Ces travaux incombent en principe au gestionnaire de l'ouvrage.

Le projet d'exécution, dont l'entreprise assure la responsabilité, reçoit l'approbation du Maître d'œuvre qui veillera particulièrement à une implantation des différentes tranches conforme au projet.

2.3.2 TRANSFERT DES CHARGES

Il peut être nécessaire d'assurer un transfert des charges de part et d'autre de la zone de travail. Ce transfert peut être réalisé de plusieurs façons : longrines ou chaînage horizontal, pontage, étreinte latérale par précontrainte, report sur des camarteaux...

Dans le cas particulier de reprise de poteaux porteurs, ce transfert est une opération particulièrement complexe.

Dans toute la mesure du possible, les charges mobiles sont déplacées hors de la zone de reprise.

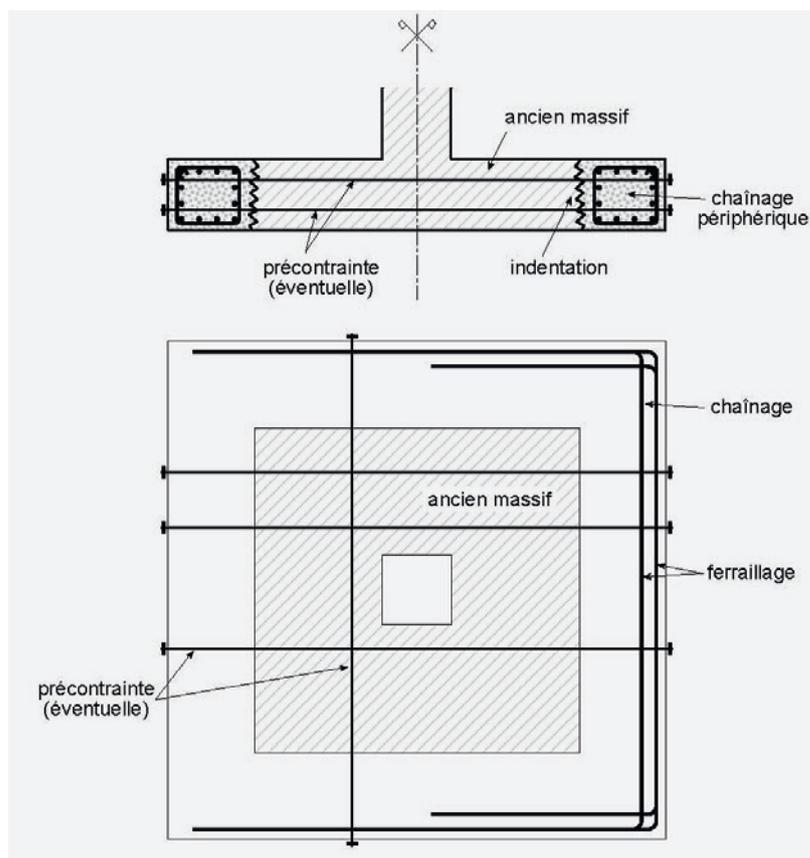


Figure n° 2 : augmentation de la surface de la semelle sans surépaisseur.
Objectif : augmenter la surface pour réduire la contrainte sur le sol
et renforcer le ferraillage de la semelle.

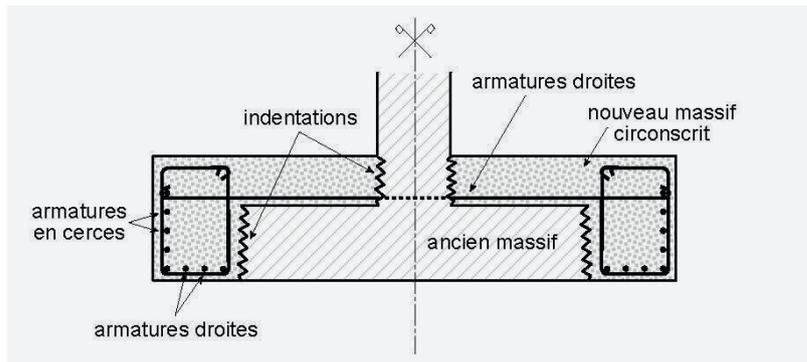


Figure n° 3 : augmentation de la surface de la semelle avec surépaisseur.
Objectif : augmenter la surface pour réduire la contrainte sur le sol, augmenter la rigidité et renforcer le ferrailage de la semelle.

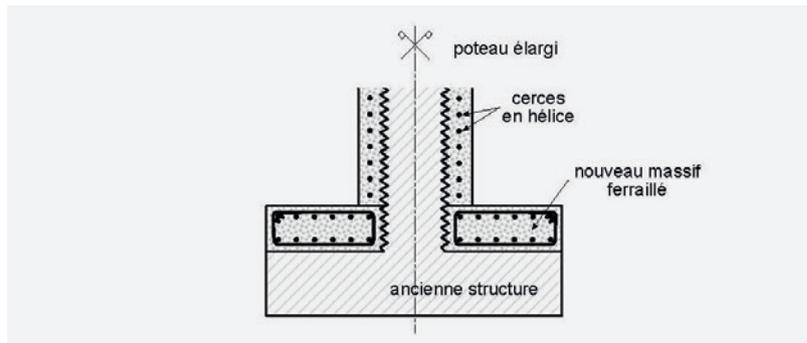


Figure n° 4 : pas d'augmentation de la surface de la semelle.
Objectif : augmentation de la rigidité de la semelle et de la section du poteau (la surface au sol est suffisante vis-à-vis de la contrainte).

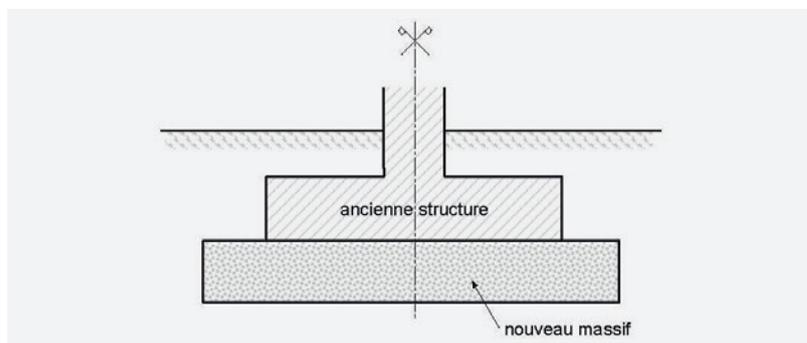


Figure n° 5 : renforcement de fondation à un niveau inférieur au niveau d'origine.
Objectif : trouver la portance nécessaire par reprise en sous-œuvre.

2.3.3 EXCAVATION ET BLINDAGE

L'excavation est faite de façon prudente, sans moyens mécaniques susceptibles de causer des chocs, des vibrations, des ébranlements. Il faut rester en permanence vigilant quant aux éventuelles venues d'eau (présence d'une nappe pouvant fluctuer rapidement, eaux météoriques...), aux éventuels entraînements de terrain ou changements de nature du sol. Au fur et à mesure de l'excavation, les parois sont normalement blindées. Il s'agit d'un étalement à caractère provisoire dont la fonction principale est de limiter au strict minimum la décompression des terres autour de l'excavation en cours et d'assurer la sécurité du personnel amené à être présent dans celle-ci.

Il est possible d'utiliser du bois, du métal ou des anneaux en béton en cas de rencontre d'horizons instables.

2.3.4 PRÉPARATION DU BÉTONNAGE, BÉTONNAGE

> **La préparation du bétonnage peut comporter la succession d'opérations suivantes :**

- la mise en place des cages d'armatures, avec, dans le cas d'une tranche intermédiaire, le dépliage éventuel des aciers en attente et la liaison avec les nouvelles armatures,
- la mise en place des coffrages et le transfert des étais sur les coffrages dans le cas où ceux-ci traversent le volume à bétonner. Généralement, le coffrage est limité à une face, la face avant, alors que la face arrière est directement coulée au contact du terrain,
- lors du coffrage des tranches primaires, des dispositifs particuliers assurent la retenue du béton sur les faces latérales tout en laissant dépasser les armatures (grillage fin, métal déployé),
- pour les tranches de deuxième phase, le coffrage des faces latérales est constitué par le béton des tranches primaires.

Préalablement au bétonnage, il faut s'assurer de la propreté du fond de fouille. Le bétonnage est ensuite réalisé de façon classique en remontant depuis la base et en une seule opération chaque fois que cela est possible. Quelquefois il est nécessaire de bétonner par tranches horizontales superposées. Que ce soit verticalement ou horizontalement, la meilleure continuité possible entre les tranches (nettoyage par exemple) doit être assurée.

2.3.5 DÉCOFFRAGE ET COMPLEMENT DES FOUILLES

> **Le décoffrage est une opération classique à laquelle succède le comblement qui peut comporter les opérations suivantes :**

- la récupération complémentaire des blindages et de étais, pour la part qui peut être récupérée à ce stade,
- des injections éventuelles de blocage dans le cas de coffrages et/ou d'étais abandonnés dans le terrain,
- le remplissage des vides résiduels.

2.3.6 MISE EN CHARGE DE LA NOUVELLE FONDATION

> Il s'agit de l'opération inverse de celle effectuée en 2.3.2. Elle est souvent délicate et peut revêtir plusieurs formes :

- le simple matage au mortier,
- la mise en charge par vérin plat injecté,
- la mise en place de mortier expansif destiné à assurer un contact efficace,
- le rattrapage éventuel de tassements,
- le transfert complexe dans le cas de poteaux porteurs.

Il ne faut pas perdre de vue que la nouvelle fondation ne peut reprendre les charges prévues qu'au prix d'un tassement directement dépendant de la déformabilité naturelle du sol. Il faut donc tenter d'éliminer toute déformation supplémentaire liée à une qualité déficiente du contact sol-fondation nouvelle.

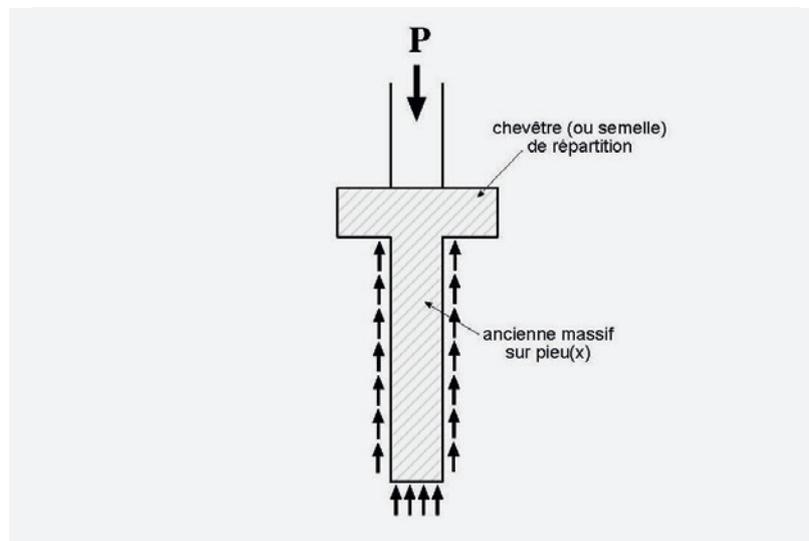


Figure n° 6 : efforts repris par le(s) pieu(x) en pointe et en frottement.

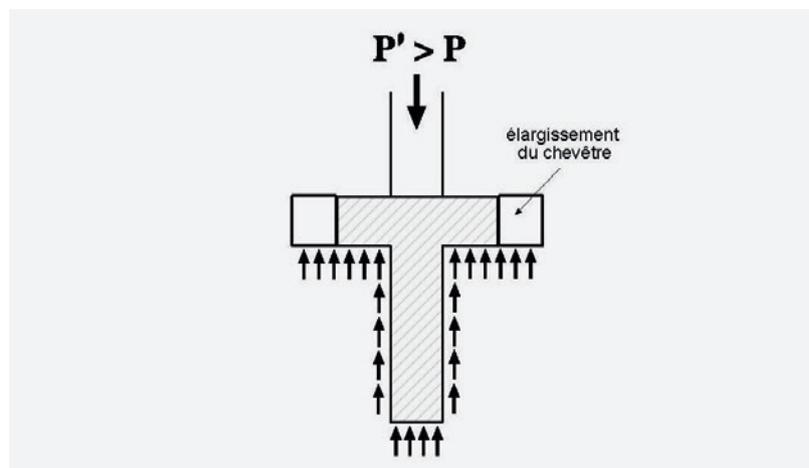


Figure n° 7 : principe de la fondation mixte.
Objectif : après augmentation de la charge et élargissement du chevêtre, reprise de l'effort par le(s) pieu(x) et la semelle.

2.3.7 PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES

Les travaux de reprise en sous-œuvre exigent une étude détaillée de toutes les phases. Les plans d'exécution doivent comporter le maximum d'indications, y compris celles relatives aux éléments à caractère provisoire tels que les étais.

Dans le cas où il est prévu de terrasser pour dégager des sous-sols, il est possible que des éléments de reprise en sous-œuvre jouent également un rôle de soutènement latéral en plus de leur fonction porteuse. Si leur résistance est insuffisante, la stabilité pourra être assurée en phase provisoire au moyen de butons ou de tirants d'ancrage, étant précisé que la structure est conçue pour assurer la stabilité en phase définitive.

Pendant les travaux, la surveillance des déplacements des ouvrages en cours de reprise et des mitoyens devra être assurée en permanence. Il faudra mesurer aussi bien les déplacements verticaux que horizontaux par les moyens proportionnés à l'importance et à la sensibilité de l'ouvrage ou des mitoyens. Il pourra s'agir de relevés ponctuels ou continus. Dans le cas d'un ouvrage en service permanent pendant l'exécution des travaux, il sera possible de recourir à des systèmes d'alarme, réglés pour un seuil de déplacement calculé en fonction de la sensibilité de l'ouvrage ou des mitoyens.

Les matériaux employés font l'objet d'essais de même nature que ceux effectués pour la construction d'ouvrages neufs (essais sur béton et maçonneries).

Pour ce qui est des travaux de reprise en sous-œuvre, il importe de contrôler les performances des nouvelles structures construites. Lorsque la mise en charge est effectuée par vérin, le contrôle est immédiat et automatique, du moins pour les tassements immédiats. Dans les autres cas, la mise en charge se fait par transfert progressif des efforts et nécessite des tassements dont il faudra s'assurer qu'ils correspondent à ceux prévus. Ce contrôle peut être poursuivi après travaux, dans la mesure où des tassements différés dans le temps sont prévus, dont il y a lieu de vérifier l'évolution et l'amplitude finale.

Dimensionnement des ouvrages

2.5

Les règles de calcul utilisées pour les ouvrages neufs s'appliquent sans restriction. Cependant, l'intervention ayant trait à un ouvrage plus ou moins sensible ou fragile, avec souvent des ouvrages mitoyens qui peuvent présenter ces mêmes particularités, les coefficients de sécurité pourront être plus importants que pour un ouvrage nouveau. Cette remarque s'entend également et particulièrement pour les phases provisoires.

Il y a lieu, dans cette deuxième partie, de mentionner à part une catégorie d'ouvrages particuliers pour lesquels la précarité des fondations, en menaçant l'intégrité, le confortement, fait appel à des techniques spécifiques et souvent lourdes. Il s'agit des appuis et fondations d'ouvrages anciens, le plus souvent d'ouvrages d'art (ponts) ou de quais massifs, en site aquatique. Ils sont fondés sur pieux, fondations superficielles ou semi-profondes, sur caissons. Les désordres qu'ils subissent ont très souvent une origine hydraulique avec affouillements, entraînant le déchaussement, la mise à nu ou le sous-cavage des fondations qui peuvent mener à la ruine de l'ouvrage.

Les renforcements que l'on est amené à mettre en œuvre sont, soit massifs, comme la constitution d'une enceinte extérieure (rideau de palplanches par exemple) suivie d'un bétonnage, ou le comblement par sacs de géotextiles, soit ponctuels, tels les micropieux, le jet-grouting... Le confortement peut donc faire appel à plusieurs procédés possibles abordés dans ce document. Pour ce qui relève de la reprise en sous-œuvre de type massif, il n'a pas été jugé utile de développer les moyens mis en œuvre. Les acteurs de la réparation ou du confortement pourront se référer au document sur le sujet, très complet, datant de 1980, cité en référence. C'est un guide de 160 pages relatif à la surveillance et au confortement qui traite surtout des réparations massives, les techniques de micropieux et de jet n'en étant à cette époque qu'au début de leur développement.

3

Amélioration et renforcement des terrains de fondation par injection

3.1 Généralités

3.2 Les injections classiques

3.3 Injection de claquage

3.4 Le compactage statique horizontal (CSH) ou injection solide

3.5 Le jet grouting

Les projets de réparation et de renforcement des structures peuvent faire appel au traitement des terrains sur lesquels ou au sein desquels les fondations de ces structures reposent. Ces terrains sont, soit des sols (ou roches) en place, soit des sols rapportés ; dans ce dernier cas, il s'agit par exemple de remblais supportant des habitations, voies ferrées ou routières et qui présentent des déformations différées dans le temps préjudiciables à la fonction de l'ouvrage porté ; il est également possible de citer l'exemple de gabions de palplanches maritimes, présentant des risques d'ouverture ou dégrafage par corrosion de ces dernières.

> **Le traitement auquel le terrain est soumis a deux objectifs, indépendants ou non, mécanique et hydraulique :**

- **mécaniquement**, il s'agit d'améliorer globalement les propriétés de déformabilité et de résistance, que ce soit en terrains meubles ou en terrain rocheux, avec, pour ces derniers, une action sur les cavités, les fissures et les points de discontinuité ;
- **hydrauliquement**, les buts recherchés sont :
 - une réduction, voire une suppression des débits d'infiltration au travers des massifs,
 - une réduction des vitesses de percolation et donc des risques d'érosion des parties fines ou solubles du sol,
 - une protection à l'égard d'agents polluants ou agressifs éventuellement infiltrés.

3.1.1 L'AMÉLIORATION ET LE RENFORCEMENT = DISTINCTION

Les techniques de traitement de sol utilisées pour la réparation ou le confortement d'ouvrages sont celles, parmi toutes les techniques existantes, les moins agressives vis-à-vis du sol et surtout vis-à-vis de l'ouvrage à réparer. Elles diffèrent donc profondément des méthodes utilisables sur sol vierge avant toute construction. Celles concernées dans ce guide reposent sur l'incorporation de liant, appelée habituellement injection, et ce par différents procédés qui conduisent à distinguer l'amélioration ou le renforcement.

Il convient d'appeler « amélioration », le résultat de l'opération d'une injection, sinon totalement homogène, du moins généralisée au niveau du massif. Le liant injecté se propage par les vides communicants du massif et les remplit ; en terrain meuble, il s'agit essentiellement des pores et, dans le rocher, ce sont soit les vides, soit les fissures et joints de discontinuité qui sont remplis. C'est l'injection traditionnelle sans déplacement des terrains. Mais il est également possible de « forcer » le terrain et de provoquer une fissuration en même temps qu'un resserrement du squelette (injection de claquage), ou bien constituer des colonnes de mortier dotées de propriétés mécaniques dont il n'est généralement pas tenu compte. Seules les nouvelles caractéristiques du sol amélioré sont prises en compte.

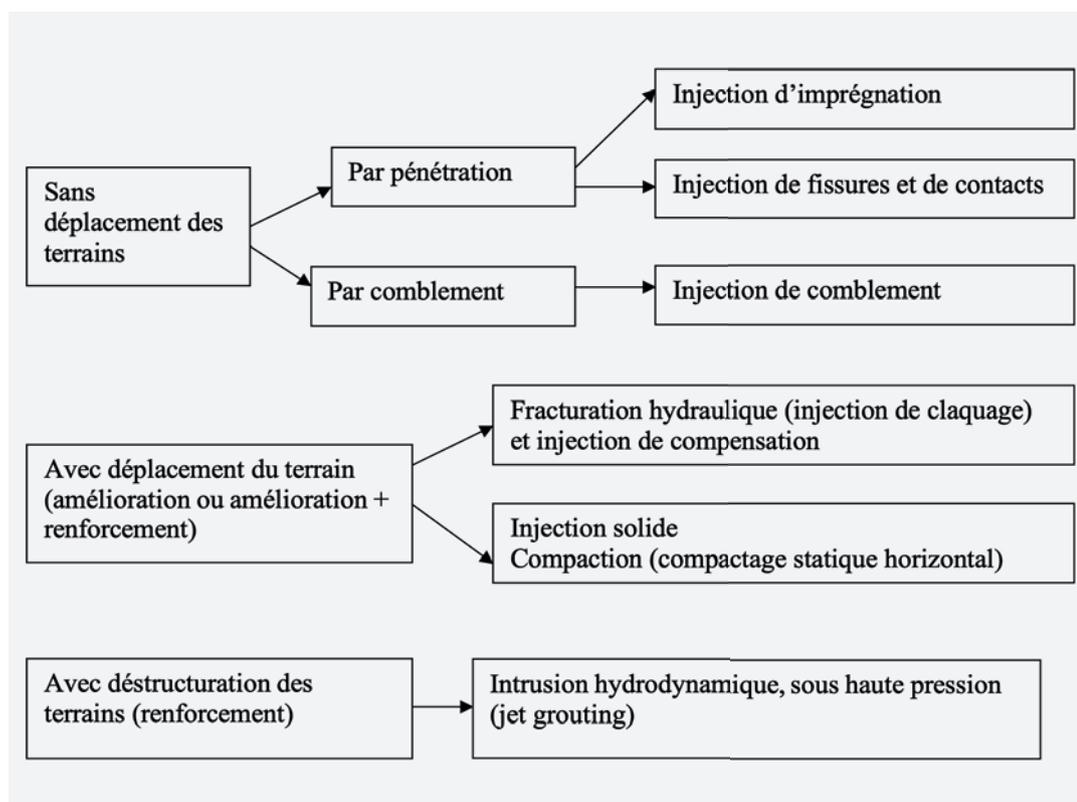
Avec l'amélioration, les propriétés du massif augmentent donc après traitement ; la cohésion ou l'angle de frottement supplémentaire obtenu, de même que la déformabilité réduite, confèrent globalement une meilleure capacité, de même qu'une perméabilité plus faible, essentiellement dans le cas de l'injection traditionnelle.

Le « renforcement » qualifie l'opération qui consiste à créer, par l'injection, des éléments porteurs ou de soutien, faisant fonction de puits ou soutènement ; si le sol au sein duquel ils sont mis en œuvre est amélioré, le plus souvent après exécution de l'élément, il n'en est pas tenu compte dans les justificatifs de dimensionnement. Seules les caractéristiques initiales du sol sont introduites en tant que besoin pour ceux-ci. Ces éléments sont obtenus par une déstructuration des terrains, avec une intrusion hydrodynamique ou un malaxage mécanique après introduction d'un liant (colonne de sol traité à la chaux par exemple). Un procédé de renforcement particulier est celui de l'injection de coulis dans des enveloppes métalliques ou géosynthétiques expansives mises en place au préalable dans des forages, des cavités ou à la surface du sol. Le procédé est utilisé, par exemple, pour combler des affouillements autour ou sous des piles de ponts de rivière.

Amélioration et renforcement peuvent être simultanés, dans la mesure où le procédé est destiné à améliorer le sol, en même temps qu'il crée des éléments dont on maîtrise les caractéristiques et la géométrie ; c'est le cas de colonnes de mortier (injection solide) évoquées ci avant.

3.1.2 CLASSIFICATION DES MÉTHODES DE TRAITEMENT PAR INJECTION

> Le traitement des sols ou roches, avec incorporation de liants par injection, se ramène à un certain nombre de techniques, qui sont les suivantes



À noter que les injections sans déplacement et avec déplacement peuvent être mises en œuvre parallèlement, notamment en cas de sol hétérogène.

3.1.3 CHOIX DE LA MÉTHODE

Si, pour réparer ou renforcer un ouvrage en béton, on s'oriente vers un traitement de sol, le choix de la technique d'injection est fonction de plusieurs paramètres, qu'il y a lieu de bien analyser. Au final, plusieurs solutions peuvent techniquement s'avérer convenir et c'est souvent un problème de coût qui permettra de les départager.

> En particulier :

- le type et l'importance de l'ouvrage et son histoire, telle que définie dans la première partie,
- la nature des problèmes à résoudre et les objectifs à atteindre : augmentation de capacité portante, arrêt de déformation différée, étanchement, en tenant compte de l'environnement,
- la connaissance géotechnique du milieu à traiter, lequel peut être déjà connu par des études antérieures ; il sera cependant souvent nécessaire de procéder à des investigations, complétant les éléments géotechniques déjà disponibles ou a fortiori inexistantes.

> De manière exhaustive, les éléments géotechniques fondamentaux nécessaires sont les suivants :

■ **en amélioration ou renforcement en terrains meubles :**

- la courbe granulométrique des particules composant les terrains et la densité relative de leur arrangement,
- la nature physico-chimique de ces particules,
- les caractéristiques mécaniques (cisaillement, compressibilité) avant traitement et à obtenir après traitement,
- le régime et la composition des eaux baignant ces terrains,
- l'état de chargement des terrains par les structures sus-jacentes et voisines,
- les déformations admissibles de ces structures.

■ **en amélioration ou renforcement en terrain rocheux :**

- la nature physico-chimique des terrains,
- la répartition des vides et des joints et la nature des remplissages,
- la perméabilité Lugeon avant traitement et à obtenir après traitement,
- le module de déformation avant traitement et à obtenir,
- le régime et la composition chimique des eaux baignant ces terrains,
- l'état de chargement des terrains par les structures sus-jacentes et voisines et les déformations admissibles des ces structures ;

■ **en étanchement, il faut ajouter aux paramètres cités ci-dessus :**

- pour les terrains meubles : la perméabilité globale de chacune des différentes formations des terrains à étancher avant traitement et à obtenir après ce dernier, ainsi que le régime piézométrique avant et après traitement, l'existence d'une éventuelle pollution ;
- pour les terrains rocheux il sera ajouté le régime d'écoulement avant le traitement et celui à obtenir après celui-ci ;

Dans le cas où l'étanchement est le seul but recherché, la connaissance des paramètres de résistance mécanique et de déformabilité n'est généralement pas indispensable.

Ces éléments, très complets, concernent le cas de l'injection traditionnelle de consolidation et d'étanchement : ils sont alors indispensables. En revanche, ils s'avèrent surabondants pour d'autres techniques. Dans ces conditions, il est souhaitable, au niveau du projet, d'opter pour une solution particulière de traitement a priori, ce qui limite les investigations sur le site à la technique choisie.

3.1.4 RÉALISATION DES TRAVAUX

Les travaux d'injection sont de plus en plus automatisés, ce qui nécessite parallèlement la mise en place de méthodologies bien codifiées, de conditions de pilotage multicritères et d'une restitution de résultats propice à la compréhension des travaux et à la prise de décision.

Les nombreuses techniques nécessitent aussi le développement de compétences pour la réalisation des études préalables, la définition des méthodologies et des procédures d'exécution, pour le suivi du déroulement des travaux, leur réception et la caractérisation des milieux traités afin de la situer par rapport aux objectifs assignés.

> **De manière exhaustive, il y a trois phases dans ces travaux :**

■ **la conception qui implique :**

- la prise en compte des objets et leur chiffrage,
- la définition des méthodes et des moyens selon les caractéristiques initiales du milieu à traiter et selon la nature de l'ouvrage,
- l'établissement des procédures et des critères de décision au cours du processus d'injection,

■ **l'exécution des travaux relevant de :**

- l'application des méthodes et l'utilisation des moyens selon la réaction du milieu concerné,
- l'adaptation des produits d'injection et des critères selon la réponse du milieu traité,
- le déroulement des travaux selon la programmation prévisionnelle ;

■ **le contrôle des travaux imposant :**

- la surveillance de leur déroulement, du bon fonctionnement des moyens et de la qualité des produits,
- la vérification de l'efficacité et la caractérisation finale du milieu traité vis-à-vis des exigences fixées.

L'importance de chacune de ces phases est évidemment variable suivant la nature et l'importance de l'ouvrage.

3.2.1 DÉFINITION ET PRINCIPES

Une injection classique est une injection qui agit a priori sans déplacement des terrains. C'est donc une technique de comblement et d'imprégnation, destinée à remplir les vides naturels, qui sont, soit des fissures (terrains cohérents, rocher), soit les vides des terrains granulaires. Le remplissage se fait avec un coulis sans déformation intentionnelle du sol.

Le résultat de l'injection est donc une diminution de la perméabilité du massif, ce qui est le plus souvent le but recherché. Mais une amélioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité est également obtenue. Dans cette optique, l'injection, telle que définie, peut donc stabiliser un ouvrage en stoppant des déformations. Cette technique de confortement est donc envisageable dans la mesure où l'ouvrage présente des désordres encore acceptables et où le simple arrêt de leur évolution est suffisant.

3.2.2 FORAGES

Le moyen recherché est d'introduire le produit injecté en forçant le sol. L'opération se fait à partir de forages de faibles diamètres (50 à 80 mm), soit à « trou ouvert » avec un obturateur simple et en montant ou descendant (et re-forage dans ce cas), soit avec un tube à manchettes et un obturateur double. Les pressions sont basses (jusqu'à environ 2MPa) et il n'y a aucun rejet d'une partie du terrain vers la surface.

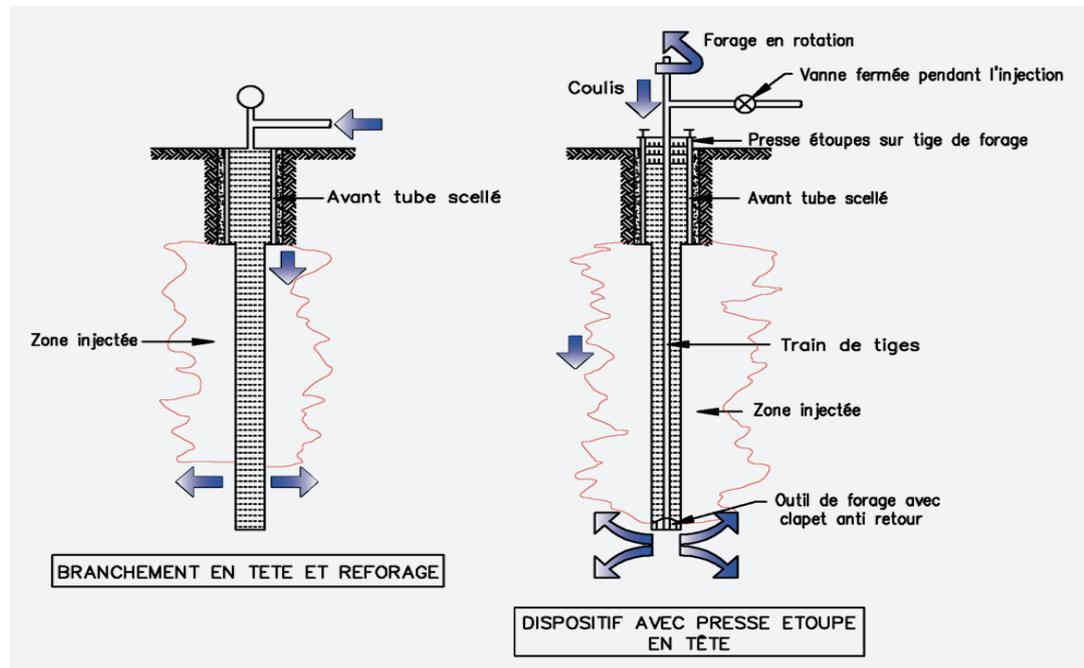


Figure n° 8a : injection au rocher en descendant.

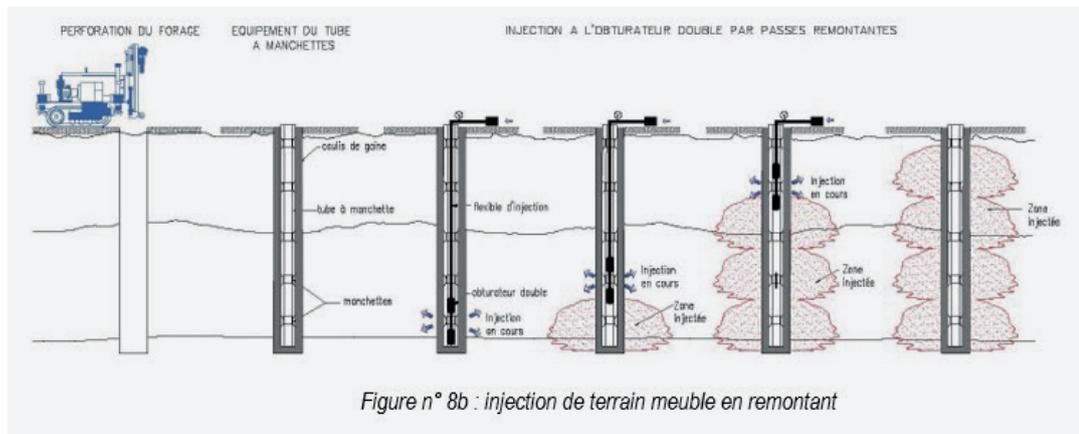


Figure n° 8b : injection de terrain meuble en remontant.



Photo n° 1 : tube à manchette/obturateur double (photo Solétanche-Bachy).

La distribution des forages et des points d'injection dépend du volume du traitement, global avec un maillage assez lâche ou localisé avec un maillage très serré. Les conditions géométriques de l'ouvrage et de son environnement, le rayon d'action du coulis et le type de sol sont autant de paramètres qui déterminent le maillage.

À titre indicatif, pour les terrains meubles, l'espacement peut varier de 1,00 m pour les sables fins, 1,50 m dans les sables et graviers, 3,00 à 5,00 m pour les graves. Dans le rocher, l'espacement varie de 1,00 à 3,00 m en cas de fissures fines et de 2,00 à 4,00 m en cas de fissures ouvertes.

Un enregistrement systématique des paramètres de forage permet une meilleure conduite du chantier.

Le choix d'une bonne méthode de forage est un élément important pour la réussite du chantier. Plusieurs procédés, pour le choix desquels la connaissance géotechnique du massif est indispensable, sont disponibles : rotation (tarière, tricône, taillant) et percussion (en tête, fond de trou), avec tubage de travail ou non (tige tube, méthode Odex) et la possibilité ou nécessité d'un fluide de forage particulier : air, eau, boue ou polymère.

3.2.3 LES COULIS

> Il y a deux catégories principales de coulis :

- les suspensions granulaires : mélange eau + ciment, cendres volantes, argile, bentonite, chaux, sable. Ils sont instables ou stables, rigidifiés ou fluidifiés. Leur avantage est un coût modéré, une résistance mécanique élevée ; ils sont pérennes et non toxiques ;
- les liquides ou solutions, au comportement rhéologique simple, mais de coût élevé, pour obtenir une résistance mécanique qui reste limitée, dont la pérennité doit être assurée.

Le coulis doit cheminer dans le massif et sa capacité à pénétrer dépend de ses caractéristiques intrinsèques : la taille des particules, sa stabilité, sa viscosité et la variation du rapport C/E par filtration ; s'y ajoutent la nature des terrains absorbants, la pression et le débit d'injection.

Le matériau d'injection adéquat est déterminé par la nature du sol et principalement par sa porosité. Ainsi l'injection de mortier est recommandée dans les graviers grossiers et les vides karstiques. Les coulis à base de ciment ultra-fin peuvent être utilisés pour les sables et graviers dont les perméabilités restent supérieures à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Lorsque seule l'étanchéité est recherchée, les coulis de silicate de soude et de réactifs minéraux (bicarbonate de soude par exemple) peuvent être employés pour les sols fins ayant des perméabilités comprises entre 10^{-3} et 10^{-5} m/s. La norme sur les injections donne toutes les informations à ce sujet.

3.2.4 LE PLOT D'ESSAI

Il peut s'avérer nécessaire de procéder à l'exécution d'un ou plusieurs plots d'essais, afin de s'assurer de l'efficacité du traitement. Ils sont réalisés dans la ou les zones les plus représentatives de l'ensemble des travaux d'injection à effectuer. Les techniques de forage, d'équipement et d'injection, les caractéristiques des coulis, permettant d'aboutir aux objectifs fixés, seront ceux retenus pour le chantier. Généralement le plot d'essai est distinct du chantier proprement dit.

3.2.5 CONTRÔLE DE MISE EN ŒUVRE ET D'EFFICACITÉ

> La mise en œuvre d'un chantier d'injection s'accompagne de contrôles continus :

- soit réguliers et portant sur la réalisation des forages, les presses d'injection, le coulis (conformité, débit, quantité) ;
- soit périodiques et consistant en sondages géotechniques, nécessaires pour expliquer des différences significatives détectées par les paramètres de foration.

L'efficacité de l'injection et donc la qualité du traitement sont estimées par des essais permettant de caractériser le sol traité et ainsi de s'assurer de la conformité avec les objets fixés. Il est important à ce niveau de mettre en œuvre des moyens de contrôle analogues à ceux ayant permis de caractériser l'état initial.

> Ces moyens sont divers et sont profondément différents selon qu'il s'agit d'amélioration mécanique ou d'étanchement :

- les méthodes géophysiques de surface ou entre forages sont envisageables dans la mesure où l'on dispose, à partir de la mesure physique, de la possibilité d'apprécier la caractéristique mécanique ou hydraulique ;
- les méthodes pénétrométriques sans frottement sur les tiges ou les mesures pressiométriques sont adaptées aux terrains meubles ou tendres, alors que dans les terrains indurés, l'essai pressiométrique, avec diagraphie de foration, pourra convenir. Des essais en laboratoire sur prélèvements intacts par carottage sont également envisageables ;

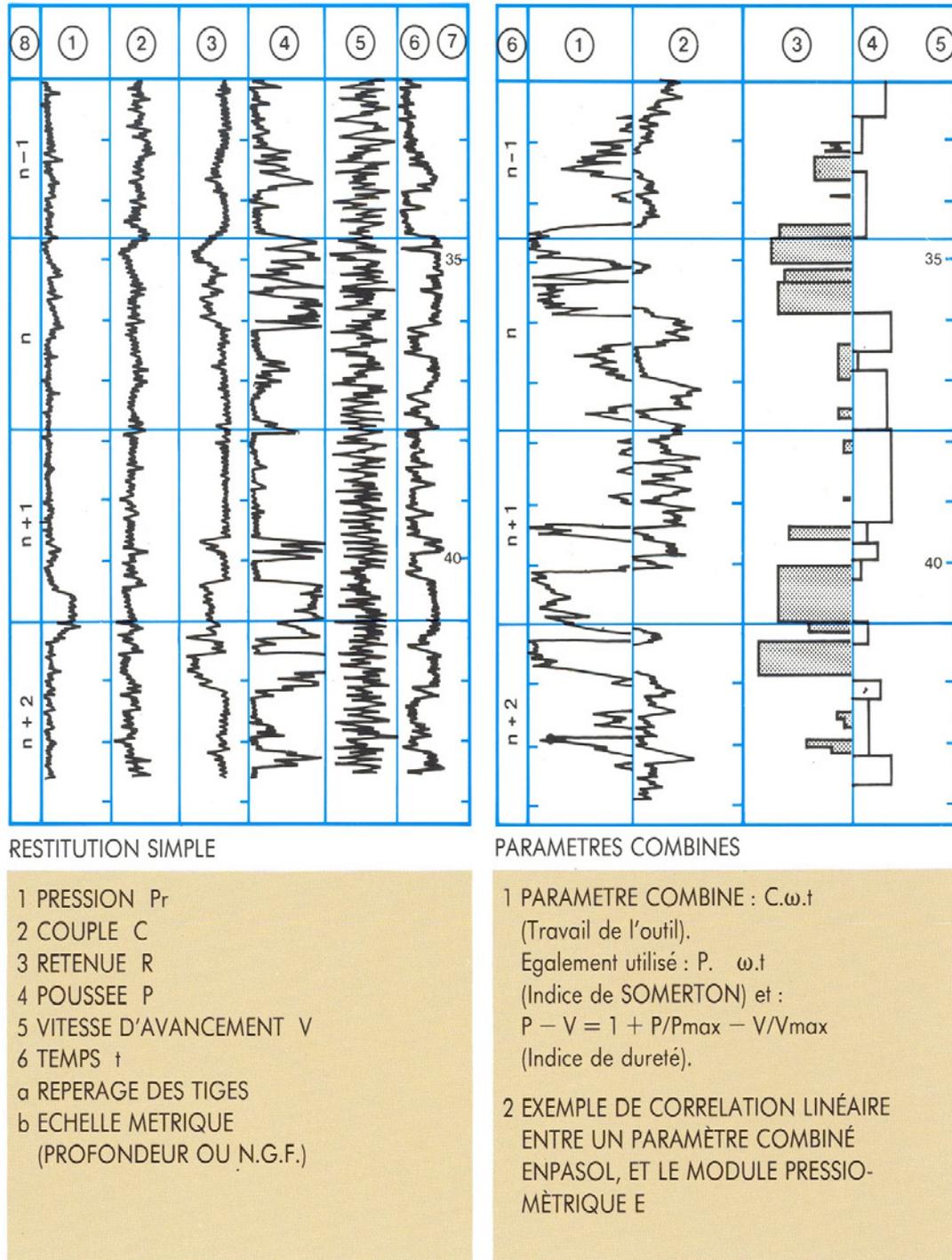


Figure n° 9 : Enregistrement de paramètres de forage (document Solétanche-Bachy).

- pour les caractéristiques hydrauliques, l'efficacité sera appréciée par les essais classiques LEFRANC ou LUGEON, ou par essai de pompage avec équipement de piézomètres autour de forages de pompage.

3.2.6 DOMAINES D'UTILISATION DE L'INJECTION CLASSIQUE

> L'injection classique est bien adaptée pour les situations suivantes :

- la reprise par injection des maçonneries d'ouvrages anciens, où il y a en parallèle nécessité d'améliorer le sol. Le choix, si possible, d'une méthode d'injection unique pour les deux milieux est alors judicieux,
- le comblement de cavités, mettant en péril les ouvrages les surplombant ; il s'agit de cavités franches ou plus ou moins remplies, susceptibles de mettre en péril les constructions. Elles sont ou parfaitement identifiées, ou au contraire présentes mais diffuses. En cas de vide franc, ce coulis serait alors très rustique, peu chargé, avec des formulations qui peuvent faire appel à des matériaux locaux (limon, cendres volantes, sable...) ; les risques de cheminement incontrôlés et de résurgences existent et sont à contrôler,

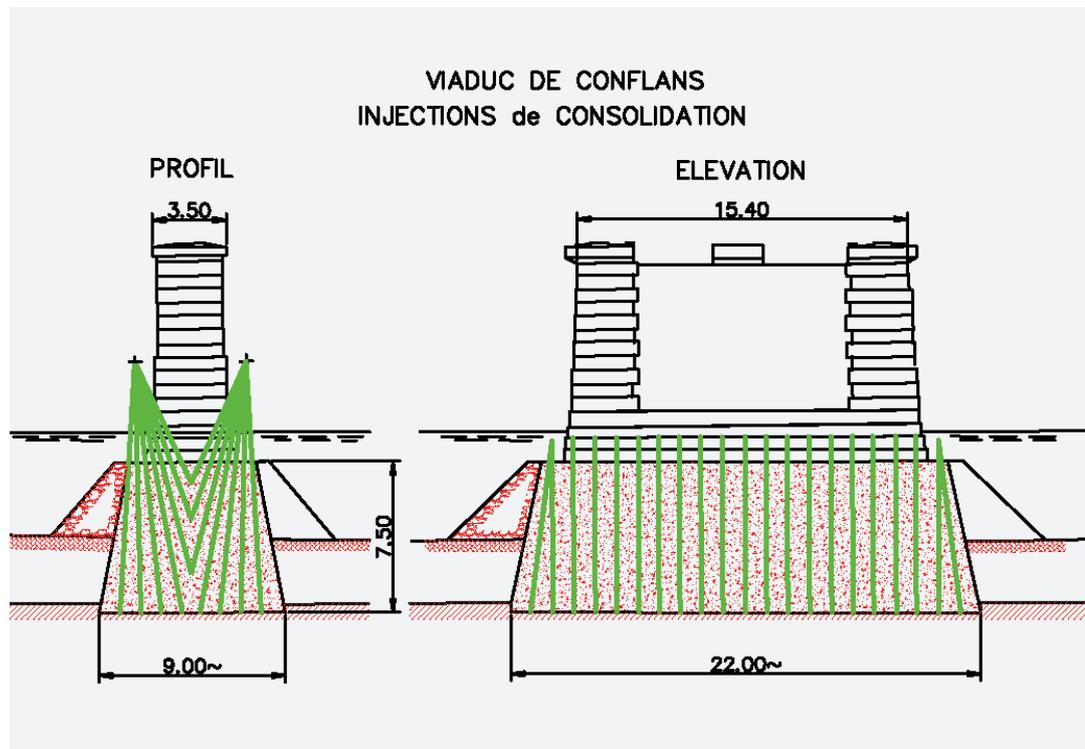


Figure n° 10 : renforcement des fondations d'un pont.

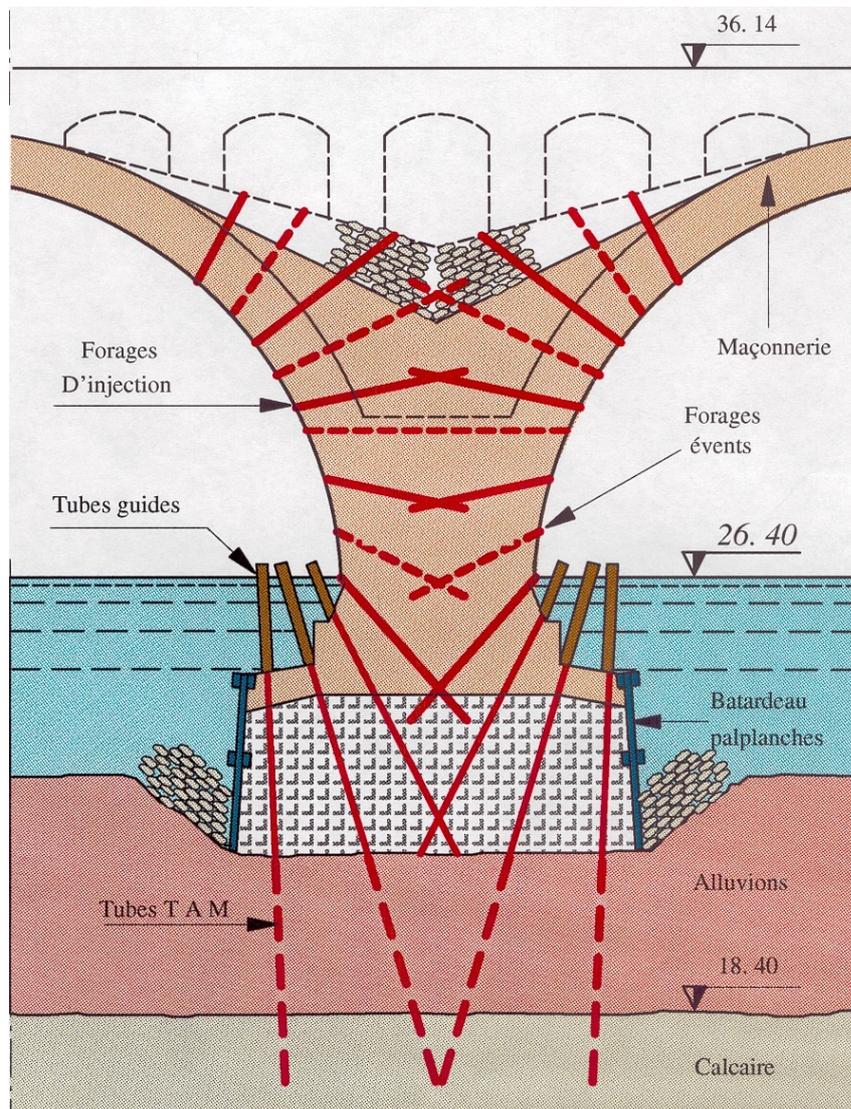


Figure n° 11 : renforcement simultané du massif encaissant, des fondations et des maçonneries d'un pont (pont de Bercy – document Solétanche-Bachy).

- l'injection d'enveloppes expansives est une solution un peu particulière. Il s'agit d'injection de coulis dans des enveloppes géosynthétiques expansives, mises en place au préalable dans des forages, des cavités, ou le plus souvent à la surface du sol. L'avantage est une délimitation des volumes à injecter, l'encapsulation d'objets à protéger et une réalisation possible tant en site terrestre qu'aquatique. L'inconvénient est la nécessité de prévoir une préfabrication et une mise en place adéquate,
- l'étanchement de sous-sols. Les modifications du régime hydraulique des nappes par remontée de ces dernières (par exemple en site urbain) entraînent des inondations de sous-sols qui ne peuvent plus remplir leur rôle. Si le sol est perméable, l'injection peut constituer une solution d'étanchement, le plus souvent associée à un confortement par épingleage ou tirants, afin de résister aux sous-pressions ; l'accessibilité peut constituer cependant un obstacle important. La diminution de la perméabilité peut aussi être associée à un drainage avec pompage, nécessitant une maintenance ultérieure, pas toujours aisée, du fait d'une conception et mise en œuvre postérieure à l'ouvrage. Un traitement sur forte épaisseur peut également permettre de réaliser un massif poids.

3.3.1 DÉFINITION ET PRINCIPES

L'injection de claquage diffère de l'injection classique dont elle constitue souvent un complément. C'est une injection qui provoque le mouvement du terrain par rupture de ce dernier, soit par compactage, soit par déplacement. C'est un procédé interactif, qui a vu le jour grâce aux développements des moyens de saisies et du monitoring. Les opérations d'injection par claquage sont en effet accompagnées de mesures, généralement de déplacements, dont les valeurs seuils sont fixées à l'avance et qui guident en conséquence les opérations d'injections, qui sont le plus souvent limitées en volume et répétitives.

Ainsi, pour assurer la stabilité de l'ouvrage auprès duquel sont prévues des excavations, les tassements peuvent être corrigés par une injection immédiate, préventive ou compensatoire, si elle est réalisée avant ou si elle est réalisée durant l'excavation.

Dans le cas de tassements excessifs constatés, d'origine autre, la remise à niveau est opérée par une injection corrective.

3.3.2 LA FISSURATION DU SOL

Cette fissuration est provoquée par un procédé hydraulique à partir de forages (voir 3.2.2.) dans lesquels, pour les procédés les plus classiques, sont disposés des tubes à manchettes qui permettent l'injection dans les zones ou tranches de terrain concernées. La génération des fissures n'est pas contrôlable, car elle dépend des contraintes locales initiales régnant dans le massif. En général, dans un sol homogène, la fracture ou rupture se développe par traction le long du plan des contraintes principales minimales.

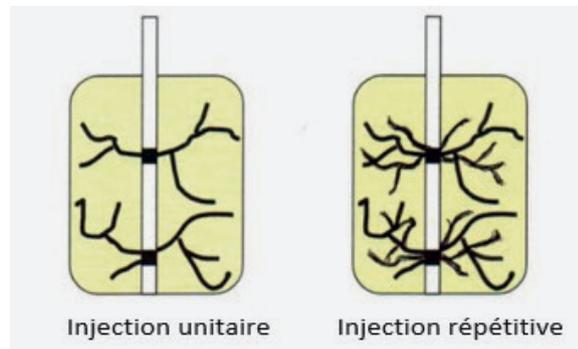


Figure n° 12 : principe de l'injection de claquage.

L'injection répétitive : selon le but à atteindre, chaque manchette fera l'objet d'une ou plusieurs injections en fonction des mouvements observés. Les critères à respecter seront les quantités à injecter, la pression maximale d'injection et, lors d'injections répétitives, le temps de prise entre deux passes successives.

Mise en place de tubes à manchettes : des forages réalisés dans le sol à traiter permettent la mise en œuvre de tubes à manchettes. L'espace annulaire entre le tube à manchettes et le sol est rempli à l'aide d'un coulis de gaine pour éviter la remontée ultérieure du coulis d'injection par le vide annulaire.

L'injection de claquage (Soilfracturing) : un flexible d'injection muni à son extrémité d'un obturateur gonflable double est introduit dans le tube à manchettes et permet d'isoler individuellement chaque manchette. Ce dispositif permet donc une injection sélective.

Dans les terrains très peu perméables au coulis, la fissuration est obtenue par une pression d'injection qui doit être supérieure à la résistance à la traction au niveau considéré dans le massif. Dans les terrains perméables, c'est la recherche d'un débit d'injection supérieur à la capacité d'absorption du terrain qui permet la fissuration.

3.3.3 LES PRODUITS D'INJECTION

Les produits utilisés sont adaptés au but recherché, sachant que certains d'entre eux peuvent, en maîtrisant la mise en œuvre, agir comme dans une injection classique, c'est-à-dire sans déplacement du sol.

Les coulis traditionnels sont des coulis de ciment à viscosité moyenne, riches en éléments solides et les plus stables possibles. Le coulis est destiné à ne remplir que le réseau de fissures créé, réseau qui peut être densifié par des injections répétitives et sélectives.

Les volumes de coulis absorbés par les fissures ainsi provoquées entraînent, soit un resserrement des sols, soit un déplacement de ceux-ci, suivant leur nature.

Certains produits, développés dans des procédés particuliers, provoquent le même effet mais agissent différemment. En particulier, la résine de polyuréthane injectée sous forme liquide durcit en quelques secondes avec une expansion très importante. Le rayon d'action autour du forage d'injection est donc très limité, le mode d'action sur le terrain étant analogue à celui d'un coulis traditionnel.

3.3.4 COMPORTEMENT DES SOLS ET CONDUITE DE L'INJECTION

Les performances des matériels d'injection limitent les possibilités de fissuration et ne permettent pas de traiter les sols très denses, marneux ou les roches compactes, qui ne sont pas de toute manière le siège des désordres apparaissant sous les ouvrages.

Il est donc possible en principe de traiter tous les terrains, mais plus ils sont imperméables, plus les opérations d'injection sont difficiles et délicates.

Dans les sols très perméables l'action de l'injection conduit à une augmentation de volume du massif : c'est le but recherché, résultat d'un resserrement des grains, compensé ou dépassé par le volume occupé par le coulis dans les fissures. Cette augmentation est acquise immédiatement et durablement.

À l'opposé, pour les sols fins, imperméables et compressibles, le claquage déplace le terrain et induit des pressions interstitielles ; le volume du massif augmente immédiatement d'une quantité égale au volume de produit injecté ou expansé. La consolidation se développe ensuite et se traduit par une diminution du volume de massif. Ces phénomènes sont dans ce cas difficilement maîtrisables et peuvent demander des injections répétées dans le temps jusqu'à obtenir une relaxation acceptable, mais ces sols sont plutôt à exclure pour ce type d'injection.



Photo n° 2 : opération de stabilisation d'un bâtiment avec contrôle de niveau (photo URETEKI).

La réalisation de la technique de claquage se fait au minimum selon deux phases : les phases de prétraitement puis de compensation. Pendant la phase de prétraitement, le sol se trouve amélioré et la phase s'achève après apparition de très légers mouvements du sol en surface. La phase de compensation se poursuit jusqu'à l'obtention des valeurs et de la distribution souhaitée des mouvements.

En fonction du sol concerné et avec la complexité croissante de son comportement, le nombre de phases d'injection peut augmenter, sachant que les tubes à manchettes peuvent être réutilisés sur de longues périodes. L'injection nécessite donc, dans le cas de remise à niveau d'une fondation, un contrôle actif en temps réel d'une haute précision et de type système automatique.

Le développement de la technique a conduit à la mise au point d'unités de traitement très mobiles, peu encombrantes, qui permettent des interventions en espace restreint. Certains procédés ne nécessitent que des forages de très faibles diamètres (10 à 20 mm) réalisés manuellement.

3.3.5 AVANTAGES, INCONVÉNIENTS ET LIMITATIONS

> Parmi les avantages, il faut citer, suivant les procédés :

- une possibilité d'intervention directe au travers de la fondation, sans endommager le structure,
- l'absence de vibrations,
- le maintien, le plus souvent, de l'activité économique ; le bâtiment peut rester en service,
- la reprise ultérieure facile des travaux d'injection,
- le relevage des structures, ce qui est un des buts essentiels de la technique.

> **Parmi les inconvénients et limitations :**

- Risque d'utilisation abusive de la technique dans des sols mal adaptés, au comportement délicat, tels les sols compressibles ou les sols sujets à retrait-gonflement (sécheresse, humidification). Pour ces derniers, en particulier, une très bonne identification, même minéralogique est indispensable ; pour les argiles très plastiques à forte teneur en montmorillonite, le traitement par injection de claquage n'est pas efficace.

Dans ces conditions, il est nécessaire de faire réaliser les travaux de confortement par des entreprises très spécialisées et présentant des références.

3.3.6 CONTRÔLES

Les contrôles d'efficacité, compte tenu des buts les plus souvent recherchés, portent sur le suivi en temps réel des mesures de l'amplitude des mouvements, confrontés aux valeurs seuils imposées.

Dans le massif, puisqu'il s'agit d'une méthode d'amélioration, les essais pressiométriques ou pénétrométriques sont les plus adaptés.

3.3.7 APPLICATIONS

Les applications possibles s'avèrent nombreuses et le développement de procédés légers permet la stabilisation ou le relevage de fondations ou dallages, depuis des maisons individuelles, les dallages industriels, jusqu'à des bâtiments importants, dont les désordres et leur origine, ainsi que la structure, ont été parfaitement analysés.

L'amélioration de la capacité portante des fondations, nécessaire à la suite d'une modification des conditions d'exploitation de l'ouvrage, trouve également une solution avec l'injection par claquage, pour laquelle les mouvements imposés à l'ouvrage existant seront le plus souvent insignifiants ; seule l'amélioration du sol par compactage est recherchée.

> **Il est possible de citer :**

- l'élimination des battements de dalles, le relevage des dallages et des dalles de transition d'ouvrages d'art. Les désordres à réparer font souvent suite à une mauvaise qualité des remblais les supportant,



Photo n° 3 : élimination de battements de dalles (photo URETEK).

- les injections de compensation destinées à compenser les mouvements verticaux provoqués par des excavations à réaliser (fouilles, tunnels...) ou par des ruptures de canalisations entraînant une déstructuration ou une décompression du sol d'assise,
- le relevage « actif » d'immeubles importants, atteignant 2 à 3 dm a été rendu possible par les produits expansifs pouvant développer des pressions d'expansion atteignant 0,4 à 0,5 MPa. Pour ces amplitudes importantes, les opérations de redressement sont cependant associées à l'utilisation de vérins.

3.4.1 PRINCIPE

Le compactage statique horizontal (ou injection solide) consiste à introduire sous pression dans le sol un mortier de consistance raide. Réalisée à partir d'un forage, l'injection de mortier n'imprègne, ni ne claque le terrain. Elle refoule le sol environnant et peut ainsi en améliorer les caractéristiques géotechniques. C'est donc une méthode d'amélioration, pour laquelle les inclusions de mortier ainsi formées sont réparties suivant un maillage qui apporte une amélioration supplémentaire, voire un renforcement, au sens où cela a été défini en 3.1.1.

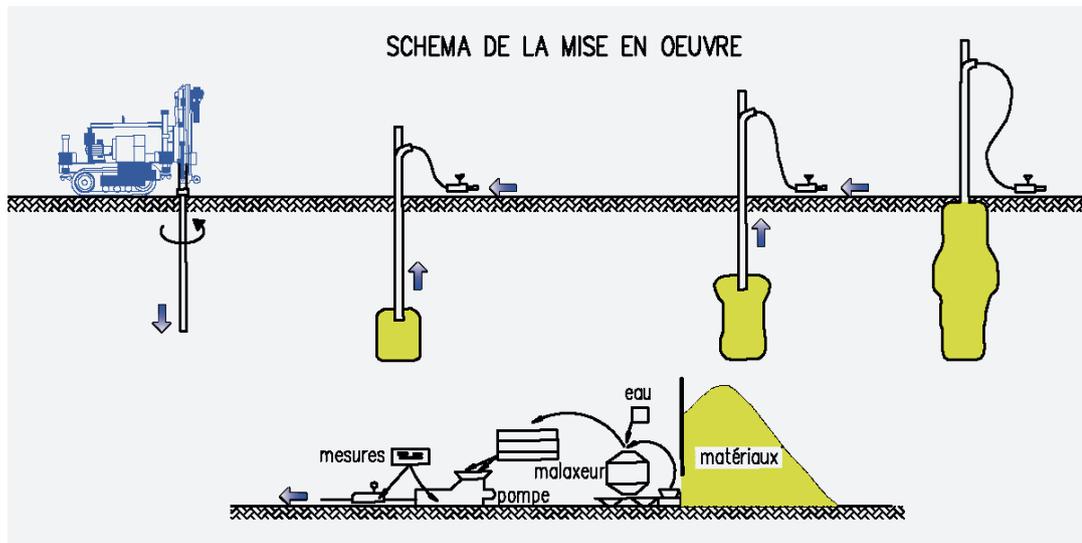


Figure n° 13 : mise en œuvre du compactage statique horizontal.

3.4.2 LES MATÉRIELS ET LA MISE EN ŒUVRE

Les matériels comportent des unités de préparation et de malaxage du mortier et une pompe d'injection permettant des débits jusqu'à 10 m³/h et des pressions jusqu'à 8 MPa à la pompe, laquelle constitue un élément essentiel du dispositif.

L'injection peut être réalisée soit en descendant, soit en remontant ce qui est le plus souvent le cas. D'un diamètre de l'ordre de 100 mm, il comporte des tubages de soutien remontés après traitement de chaque tranche de sol. Les hauteurs de tranches sont couramment comprises entre 0,5 et 2 m.

Les éléments traités ainsi créés forment un chapelet de bulbes dont le diamètre est fonction de la compacité réelle en place (auto-adaptation du procédé) et des pressions admissibles (contrôle de déformations). En général, seule l'amélioration du terrain encaissant est prise en compte, mais, dans certains cas, il est possible de tenir compte de l'inclusion représentée par la colonne de mortier.

Le maillage des forages dépend du problème à résoudre et est lié au rayon d'action de l'injection, lequel est fonction du sol, des paramètres d'incorporation, de la profondeur du traitement et des objectifs à atteindre. La maille est couramment comprise entre 1, 50 et 5 m. Elle sera plus resserrée dans les terrains proches de la surface ou dans le cas de travaux à proximité d'existants ou de reprise en sous-œuvre.

L'injection se fait souvent à partir de forages primaires, puis secondaires, voire tertiaires, comme dans les techniques d'injection traditionnelles ; cette pratique permet de mieux contrôler au cours des travaux l'efficacité et la qualité du traitement. Si la maille et la quantité prédéterminée sont correctement dimensionnées, une forte augmentation des pressions d'injection associée à un ralentissement de la vitesse d'injection est observée en fin d'injection des forages secondaires

Lors de la confortation d'ouvrages, il est préférable de commencer pas les points de traitements intérieurs, afin d'éviter des soulèvements non souhaités ; ce sera plutôt l'inverse si le but est de relever une structure autour de laquelle il s'agit de réaliser un encagement latéral initial, qui favorise ensuite le soulèvement vertical du sol traité supportant la fondation à relever.

La quantité globale de mortier à incorporer est déterminée en fonction de l'amélioration recherchée et plus généralement du résultat souhaité : stabilisation, amélioration de la capacité portante, relèvement d'un ouvrage. Cette quantité s'exprime sous forme d'un taux d'incorporation qui s'avère très variable (2 à 12 % en volume) avec une moyenne de 5 à 8 %. Elle dépend, pour un objectif fixé, de la nature et de la compacité du sol, puisque cette quantité est directement liée à l'indice des vides du terrain.

3.4.3 MATÉRIAU D'INJECTION

Le mortier d'injection doit être pompable sous pression, ne pas claquer le terrain, ne pas bloquer prématurément l'expansion de la masse injectée par suite d'un essorage trop rapide au contact du sol en place. Le mortier comprend du sable (D_{max} : 4 à 6 mm) avec, en général, des fines constituées de cendres volantes, fillers calcaires, limons ou pouzzolane, conduisant à une granulométrie étalée. Le ciment et les adjuvants éventuels complètent le mélange. La résistance à la compression R_c , éventuellement nécessaire, en cas de renforcement par exemple, détermine la quantité de liant et d'eau. La valeur d'affaissement au cône doit être inférieure à 10 et est située le plus souvent entre 3 et 8 cm.

La mauvaise qualité du mortier, à savoir une trop grande fluidité et certaines propriétés rhéologiques, est une cause de difficultés, provoquées par un claquage, non recherché, du terrain, ou un refus en pression dû à l'essorage du coulis.

3.4.4 LES SOLS TRAITABLES, LES LIMITES D'APPLICATION

Hormis les sols extrêmement durs et peu déformables, rarement susceptibles d'occasionner des désordres, tous les sols ou roches tendres sont susceptibles d'être traités par compactage statique horizontal.

Les remarques fondamentales à formuler sont celles indiquées pour l'injection de claquage ; il y a lieu de distinguer les sols très perméables pour lesquels la déformation acquise par le massif après traitement est immédiatement définitive, contrairement aux sols saturés, fins et compressibles, où les phénomènes de consolidation à long terme limitent fortement l'usage de l'injection solide comme moyen de confortement des fondations d'ouvrage en béton.

L'essai pressiométrique, très proche dans son action de celle de l'injection, peut permettre de définir à partir de la pression limite (du terrain) certains critères du traitement ; de plus il est tout à fait adapté comme moyen de contrôle de l'efficacité de l'opération mais ne peut être prépondérant dans le choix de la technique pour pallier ou prévenir des déformations.

La technique offre un avantage dans les terrains hétérogènes, lorsqu'elle est adaptée, car les zones les plus lâches reçoivent plus de mortier, ce qui contribue à une homogénéisation des caractéristiques du terrain.

Enfin les terrains de type karstique et donc naturels, à la matrice très dure, présentent des vides qui peuvent, de manière anarchique, être soit remplis de matériaux décomprimés, soit vides. L'injection solide peut constituer un moyen de parade, car elle permet, en même temps qu'elle améliore les zones décomprimées, de combler les vides francs. Cependant, la proportion de ces derniers doit rester modérée, une technique autre et moins onéreuse lui étant préférable si ces vides francs sont prédominants.

3.4.5 ESSAIS ET CONTRÔLES

Les sondages pénétrométriques et pressiométriques constituent les essais préalables les mieux adaptés mécaniquement pour aider à l'établissement d'un projet de confortement ou de réparation d'ouvrage. Ils seront cependant nécessairement accompagnés d'une identification des terrains concernés, d'ailleurs indispensables pour poser un diagnostic quant aux causes de désordres apparus.

Durant la conduite des travaux, l'injection de chaque forage constitue une composante élémentaire du traitement global, la réponse du terrain étant liée à son état local de compacité. Il est donc intéressant d'enregistrer les paramètres de foration et d'injection qui lui sont directement liés et d'ajuster, si besoin est, ces paramètres.

La surveillance continue du nivellement est indispensable. Elle pourra être complétée par le suivi du comportement d'ouvrages adjacents sensibles situés à des niveaux voisins de celui du traitement (par exemple, des mesures inclinométriques destinées à détecter des mouvements horizontaux provoqués par les pressions horizontales ou latérales, générées par l'injection solide).

L'amélioration apportée par le traitement peut être appréciée par la réalisation des mêmes essais in situ que ceux déjà cités. Ce sera le cas s'il s'agit de vérifier que les nouvelles caractéristiques fixées sont bien atteintes, dans le cas d'une stabilisation des tassements ou d'une augmentation des charges transmises à l'ouvrage.

La détermination de ces caractéristiques nouvelles à atteindre peut résulter de la réalisation, rendue nécessaire, d'un plot d'essai.

Mais le contrôle de l'efficacité repose sur un suivi en temps réel des mouvements de la structure, s'il s'agit d'une reprise en sous-œuvre nécessitant un relevage de cette structure.

Pour les colonnes de mortier elles-mêmes, il n'existe pas de moyens de contrôle fiable de leur géométrie, pour deux raisons principales :

- la colonne créée est le plus souvent d'un diamètre très irrégulier,
- l'accessibilité en tête est le plus souvent impossible.

La première raison, essentielle, fait que l'injection solide est rarement utilisée comme moyen de renforcement en tant qu'élément porteur.

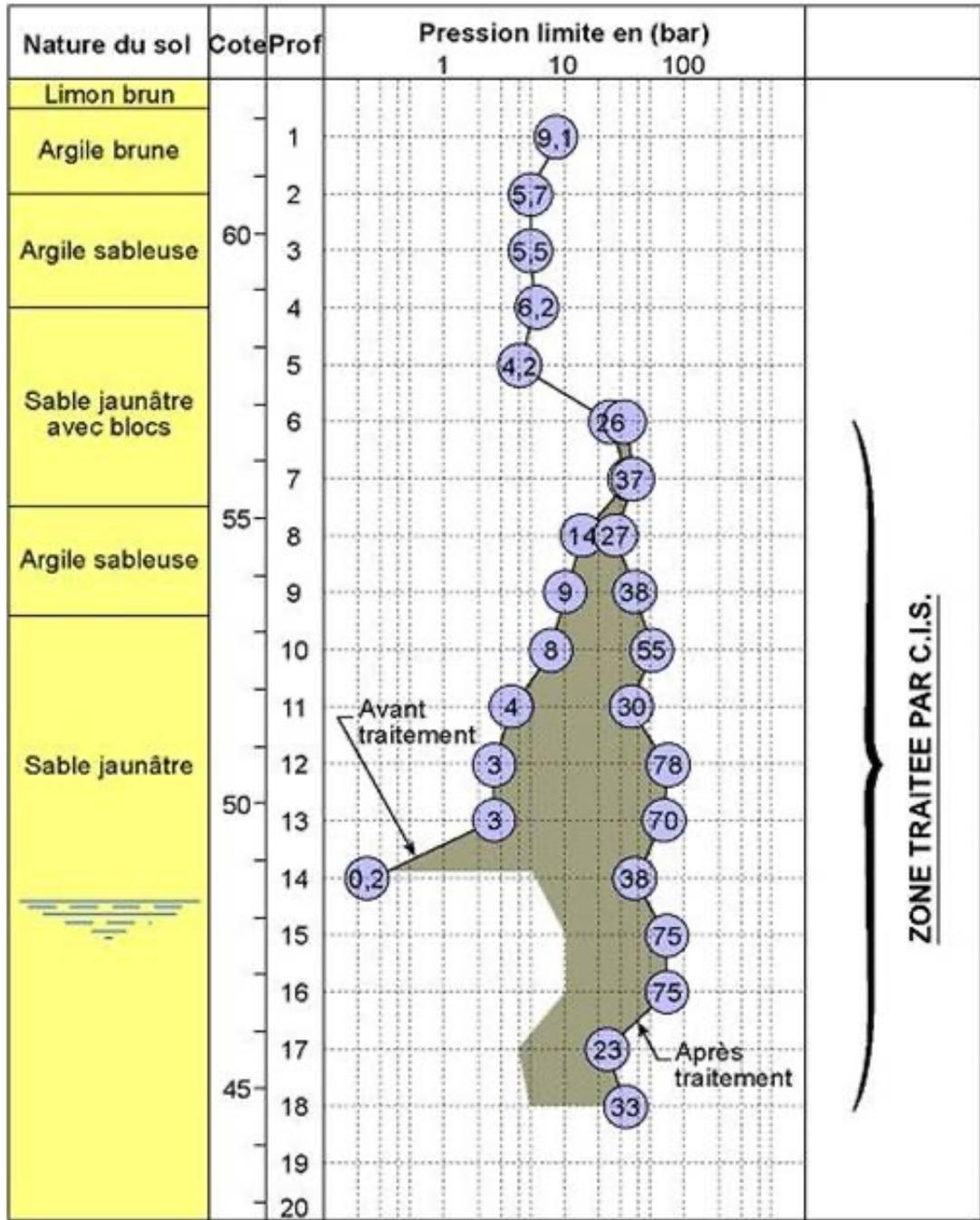


Figure n° 14 : courbes pressiométriques avant et après traitement.

3.4.6 AVANTAGES, INCONVÉNIENTS ET LIMITATIONS

- l'injection solide permet plus de précision que l'injection classique dans la localisation du matériau injecté ; elle est donc plus souple,
- c'est un procédé qui n'entraîne ni rejet, ni évacuation de déblais,
- elle ne produit pas de vibration et, de ce fait, les risques de tassement en cours de travaux dans les sols sableux lâches sont inexistantes,
- la densification, alliée à la présence des éléments rigides que constituent les colonnes de mortier, diminue le risque de liquéfaction,
- il est préférable de se limiter à la densification des sols limoneux ou sableux ; pour les sols cohérents fins et saturés, déplacés lors de l'injection, les pressions interstitielles développées, en se dissipant, entraînent ultérieurement de légers tassements,
- en l'absence de surcharge superficielle au point d'injection, il apparaît le plus souvent des décompressions et des soulèvements concernant le sol sur 1 à 2 m en partie supérieure, qui peuvent être dommageables.

3.4.7 TYPES D'APPLICATIONS

- Injection solide : il s'agit surtout d'une technique de reprise en sous-œuvre ou de confortation de fondation d'ouvrages ayant subi des tassements. Le traitement peut être envisagé avec ou sans remise à niveau de l'ouvrage.
- Ces remises à niveau peuvent atteindre plusieurs décimètres, avec une précision annoncée de quelques millimètres. Si les relèvements sont importants, des vérins hydrauliques sont conjointement utilisés et le vide créé est alors comblé en fin de traitement.
- Amélioration recherchée de la capacité portante dans le cas d'une augmentation de charges apportées aux fondations existantes.
- Traitement des zones karstiques, dans la mesure où il s'agit surtout d'améliorer des zones décomprimées. L'injection solide ne s'avère pas en effet la plus intéressante pour le remplissage en grand de vides francs.
- Enfin, quelques exemples qui concernent l'amélioration de la capacité à la traction de tirants, du frottement latéral et de la résistance en pointe de pieux, et la compensation en terrains meubles de tassements lors de la construction de fouilles ou tunnels en site urbain.



Photo n° 4 : amélioration du sol de fondation de la nouvelle digue de Monaco
(photo Solétanche-Bachy).



Photo n° 5: confortement de quai (photo Solétanche-Bachy).

Le jet grouting est un procédé de traitement des sols, par une injection à grande vitesse et pression, de fluides et coulis. Effectuée de manière continue ou discontinue, il permet la réalisation de colonnes, demi-colonnes, lamelles ou parois. Il est applicable à tous les terrains meubles, hormis les sols très organiques.

3.5.1 LE PRINCIPE

> Le traitement par jet grouting conduit à réaliser des éléments rigides d'un mélange de sol ciment, dont la mise en œuvre fait appel à trois phénomènes distincts intervenant indépendamment ou en combinaison :

- une déstructuration des terrains en place sous un jet à très grande vitesse,
- une extraction d'une partie des éléments constitutifs du sol en place, additionnée de coulis (rejets de découpage ou spoil),
- une incorporation de matériaux d'apport sous la forme d'un jet de coulis de composition adaptée à la résistance recherchée.

Le jet grouting conduit à un renforcement du sol et c'est l'obtention de caractéristiques géométriques et mécaniques qui est recherchée. Le sol hors colonne ne subit pas ou peu d'amélioration. Cette méthode d'injection se distingue donc fondamentalement des injections classiques ou de claquage. Dans le domaine des fondations ou soutènements, le jet conduit donc à de véritables éléments porteurs ou de soutien assimilables à leurs équivalents traditionnels.

Le jet grouting permet également de remplir des fonctions d'étanchéité.

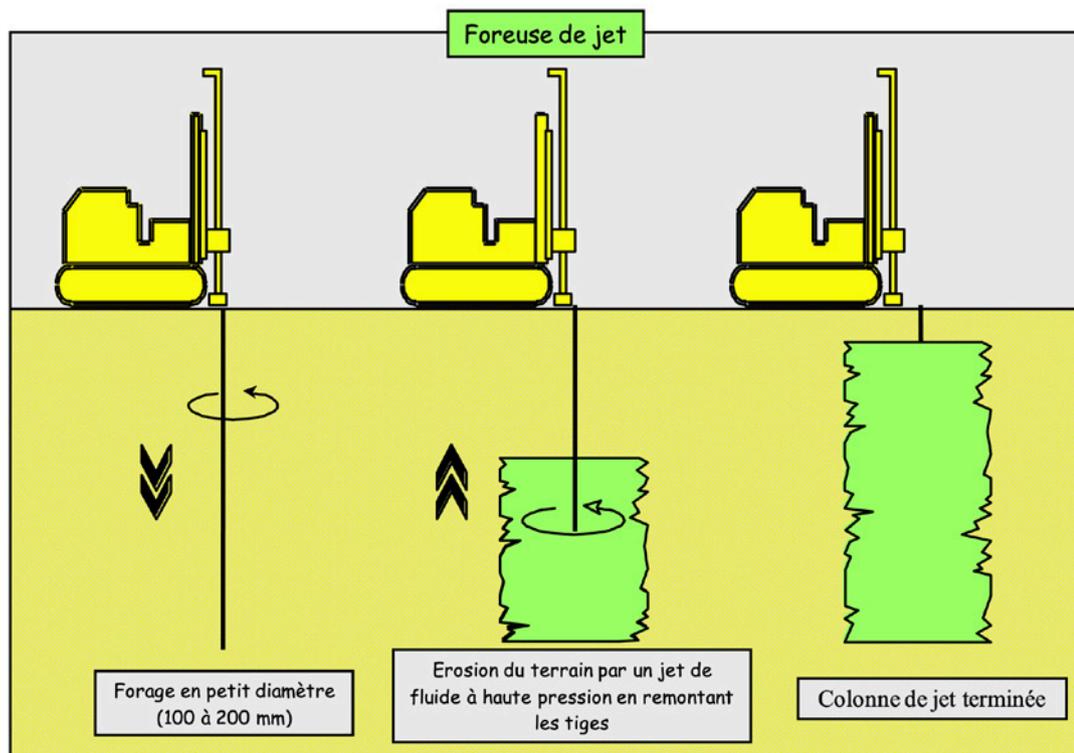


Figure n° 15 : principe de réalisation d'une colonne de jet grouting.

3.5.2 RÉALISATION D'UNE COLONNE DE JET

La réalisation de cette technique débute, sur toute la hauteur à traiter, par un forage de diamètre le plus souvent compris entre 100 et 200 mm. Le train de tiges est doté d'une tête de perforation classique (tricône par exemple) et d'un dispositif de lançage. Par cette colonne de lançage (de 70 à 100 mm de diamètre) on met en vitesse un jet de coulis envoyé par une pompe à haute pression (plusieurs dizaines de MPa) à travers une ou plusieurs buses de petit diamètre (1 à 10 mm) placés en pied. Ensuite les tiges sont remontées lentement avec mise en rotation, pour former la colonne de béton de sol sur toute la hauteur du traitement. Pendant la phase « jet », les volumes en excès du mélange sol-ciment, appelés rejets ou spoil, doivent ressortir librement en tête de forage et être évacués. Théoriquement ce volume est équivalent au volume de coulis injecté sauf en présence de terrains très ouverts qui peuvent absorber une partie du spoil. Sans cette remontée, l'excès de matériau risque de claquer le terrain et de créer des désordres au voisinage.

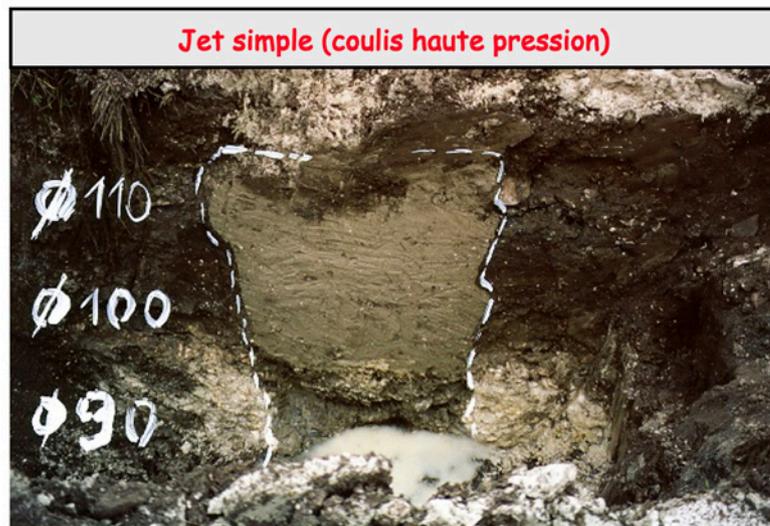


Photo n° 6 : colonnes de jet dégagées (photos Solétanche-Bachy).

> Trois méthodes de réalisation sont actuellement disponibles.

■ méthode du jet simple.

Dans ce cas, les trois phases, déstructuration, extraction et incorporation, sont assurées par le jet d'un seul fluide, le coulis de ciment. Cette technique est plutôt utilisée dans les terrains peu compacts, de faible cohésion, dans lesquels il n'est pas recherché un rayon d'action important. L'outillage se réduit à un train de tiges simple à un seul niveau de sortie équipé d'une ou deux buses simples ; cette ligne d'outil est utilisée comme train de tiges de forage.

Il faut veiller à ce qu'une trop forte viscosité du spoil ne gêne pas sa remontée jusqu'en tête de forage.

■ méthode du jet double.

Elle améliore la précédente, un jet d'air étant ajouté en protection du jet de coulis, ce qui permet d'augmenter considérablement le rayon d'action du jet. Le second rôle de l'air est d'améliorer les possibilités d'extraction du terrain en place par le phénomène d'air-lift.

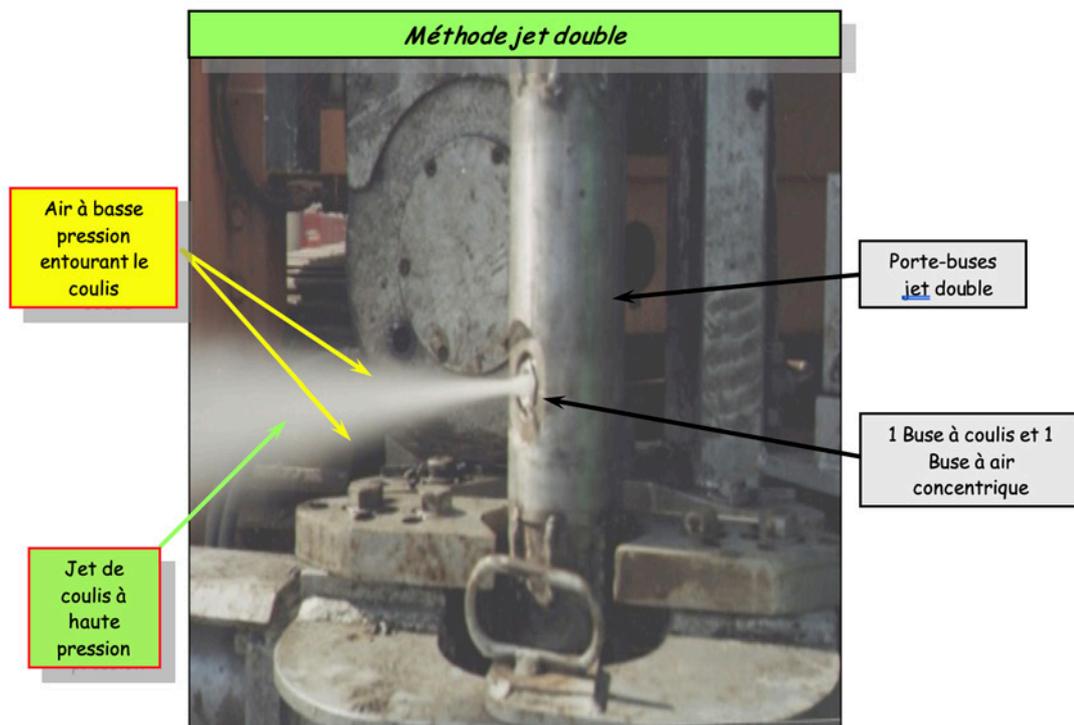


Photo n° 7 : procédé jet double (air + coulis) (document Solétanche Bachy).

■ méthode du jet triple.

Dans ce procédé, mis en œuvre en forage ouvert, un jet d'eau à très haute énergie, communiquée par une pression de 40 à 50 MPa, est utilisé pour la déstructuration du terrain en place. L'eau, en s'échappant ensuite par le forage ouvert, entraîne avec elle une fraction des éléments constitutifs du terrain. Un jet d'air, injecté sous 0,5 à 0,7 MPa, enveloppe le jet d'eau, augmentant notablement l'effet de déstructuration de ce dernier. Le jet d'air permet non seulement d'augmenter le rayon d'action de l'eau, mais, par l'émulsion qu'il provoque, il facilite l'extraction d'une partie des éléments du terrain.

Enfin, le jet de coulis, envoyé séparément sous une pression de 3 à 5 MPa, permet l'incorporation du matériau d'apport dans la masse de terrain remanié par l'action combinée des jets d'eau et d'air ci-dessus.

Cette méthode demande des pompes d'injection distinctes et une ligne d'outils à triple buse permettant l'amenée des trois fluides.

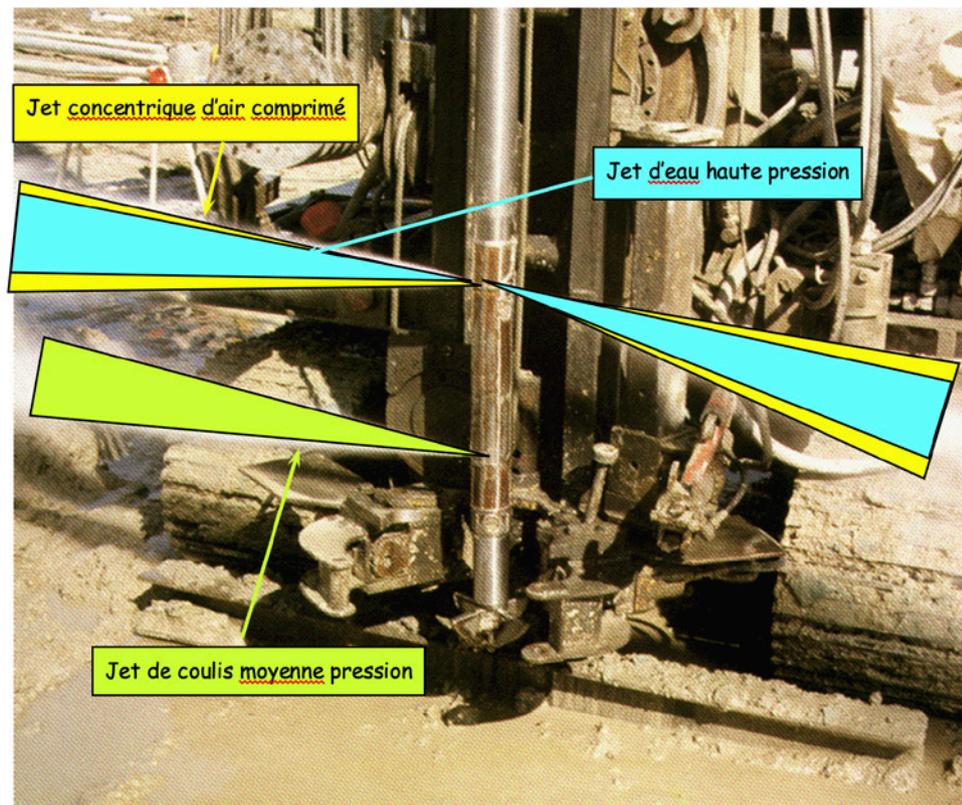


Photo n° 8 : méthode du jet triple (photos Solétanche-Bachy).

3.5.3 PARAMÈTRES DES COLONNES DE JET

Les caractéristiques essentielles de la colonne de jet sont son diamètre et sa résistance. La géométrie dépend de plusieurs paramètres, qui sont liés aux réglages mécaniques du matériel (vitesses de remontée et de rotation, pressions et débits), à la nature et aux caractéristiques mécaniques du sol et à la méthode de réalisation : simple, double ou triple jet. Le jet simple permet d'atteindre un diamètre maximal de 1,00 m et les jets double et triple de 2 à 3 m. Les derniers développements technologiques (superjet) conduisent jusqu'à 4,50 m. Les terrains sableux et graveleux sont plus facilement déstructurés que les terrains argileux pour lesquels l'érosion peut s'avérer difficile, pouvant nécessiter une phase de pré-découpage par jet afin d'obtenir le diamètre souhaité.

La résistance, exprimée en résistance à la compression simple R_c , dépend de la qualité du ciment, du rapport C/E et de la nature du sol. Ainsi la valeur R_c obtenue dans les sables et graviers est-elle plus élevée que dans les limons et argiles. Le tableau ci-dessous fournit des valeurs courantes de R_c (en MPa) pour les colonnes réalisées en terrain sableux ou argileux et traitées au ciment CLK 45 :

C/E coulis	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1
Sol sableux	1	2	3.5	5	6.5	8	10	12	14	16
Sol argileux		0.5	1.5	2	3.5	4.5	6	7.5	9	11

L'injection du coulis réduit également fortement la perméabilité de la colonne ainsi formée, ce dont il est tiré profit pour les applications.

3.5.4 AVANTAGES, INCONVÉNIENTS ET LIMITATIONS

> Parmi les avantages, il est possible de citer :

- la relative indépendance du procédé par rapport au type de sol, homogène ou non,
- la possibilité de fabrication d'éléments de grande taille (fort diamètre) à partir de perforations de faible diamètre,
- la possibilité de réaliser des éléments de fondation ou de soutènements de géométrie définie, ce qui autorise des calculs de dimensionnement. Les expérimentations accumulées montrent qu'une colonne de jet peut être assimilée à un pieu de type « injecté faible pression »,
- le contact entre les fondations existantes à renforcer et les colonnes de jet, qui peut être d'excellente qualité,
- l'absence de vibrations,
- la réalisation de travaux dans des terrains difficilement accessibles.

> Parmi les inconvénients ou limitations :

- production d'excédent de mélange sol coulis qui doit être évacué, les quantités étant beaucoup plus importantes en présence de sols cohérents que pour les sols pulvérulents. S'il y a blocage des rejets dans l'espace annulaire entre tige et forage lors de la remontée, un claquage du terrain et un soulèvement brutal peuvent rapidement survenir. Il est possible d'envisager de tuber les terrains mous pour éviter cela ou pratiquer un « prejet » à l'eau qui doit faire l'objet d'une procédure particulière en début de chantier,
- dans les sols argileux, la mise en œuvre des fluides à haute énergie cinétique peut générer une augmentation momentanée des pressions interstitielles et créer des désordres au voisinage de la colonne,
- il y a baisse de portance momentanée immédiatement après la réalisation de la colonne (phases de déstructuration et de prise du coulis) ; cette baisse doit être contrebalancée par le nombre de colonnes déjà réalisées et par un phasage d'exécution),
- dans les matériaux graveleux ou les sables grossiers, il peut se produire une décantation rapide du mortier frais avant prise du coulis et un essorage à travers la surface de contact sol-colonne, notamment en terrain non saturé. La baisse de niveau du coulis risque alors d'occasionner une interruption de la colonne ou une perte de contact avec la structure reprise en sous-œuvre. Pour l'éviter, une solution consiste à maintenir le niveau du coulis au-dessus du niveau de contact colonne-structure en réalisant, par exemple, une prétranchée au pied de la structure, dont on surveillera le remplissage, ou bien laisser un tubage en tête.

Ces risques font que le procédé est coûteux, car il nécessite des charges importantes de personnel, lequel doit être parfaitement formé, et d'équipements avec des coûts d'amenée et de repli élevés. En revanche, cette technique permet des reprises en sous-œuvre sans déchaussement des fondations existantes et sans nécessité de poutre ou massif de liaison.

3.5.5 ESSAIS ET CONTRÔLES

Le rôle que l'on souhaite faire jouer aux éléments de jet grouting, portance, soutien et perméabilité, nécessite de s'assurer, après réalisation, des caractéristiques fixées : géométrie et résistance. La mise au point du projet de confortement ou de réparation demande donc, entre autres, la connaissance du sol, afin de parvenir à un projet qui s'avère effectivement réalisable.

Une ou des colonnes d'essai pourront précéder le chantier et un terrassement autour des éléments fabriqués, sur la plus grande hauteur possible, constitue une vérification, limitée, de l'obtention du diamètre souhaité.

Dans le cas de travaux importants, un essai de chargement statique pourra préciser le dimensionnement.

L'une des difficultés présentées par les colonnes, en tant que fondation, est de garantir, tout le long du fût, d'un diamètre effectif minimal qui assure le respect des contraintes admissibles. Dans les rideaux formant barrière à l'eau, l'étanchéité doit être assurée par la continuité des éléments.

Méthodes de contrôle d'une colonne de jet grouting

- **La méthode du cylindre électrique**, brevetée, qui consiste à mesurer et analyser les différences de potentiels autour d'un forage lorsqu'un courant électrique est envoyé à l'intérieur à celui-ci. Dans le cas des colonnes de jet, le principe est basé sur la grande différence de résistivité entre le terrain et le coulis frais liquide contenu dans la colonne. Connaissant ces résistivités, il est possible de simuler numériquement la forme des courbes d'isoresistivité résultant d'une colonne plus ou moins grosse. Il suffit donc de comparer diverses simulations avec les résultats de mesure pour connaître le diamètre de la colonne. Avec la prise, la résistivité du coulis augmente ; il est donc nécessaire de mesurer cette résistivité le plus rapidement possible après l'achèvement de la colonne. Les différentes applications sur chantier ont montré l'intérêt de cette méthode au coût modique et aux résultats quasi immédiats qui permettent, s'il le faut, de rectifier rapidement les procédures en cours de chantier.
- **La méthode d'impédance mécanique**. Cette méthode connue pour le contrôle d'intégrité des fûts de pieux a été améliorée par une augmentation de l'énergie développée par choc en tête de colonne et par les moyens d'analyse des vitesses de propagation des ondes. Cette méthode, qui nécessite d'avoir accès à la tête de la colonne et ne peut se faire qu'après durcissement du coulis, est rarement mise en œuvre.
- Une troisième méthode, développée et utilisée en Allemagne, mais peu utilisée en France, consiste à enregistrer le passage du jet à l'aide d'un microphone, à chaque rotation de l'outil et sur toute la hauteur du train de tige. Pour la mesure du diamètre de la colonne de jet, un forage supplémentaire est descendu dans le terrain parallèlement au forage de travail et à une distance égale au rayon demandé pour la colonne. Ce forage est ensuite équipé d'un tubage scellé par un coulis, puis rempli d'eau. Il faut s'assurer de la verticalité par mesures inclinométriques avec une tolérance de 3% au plus. En fonction du signal obtenu qui peut présenter quatre signatures, il est possible de conclure à l'obtention d'un rayon de colonne, inférieur, égal ou supérieur à la distance entre tubes.
- Deux autres méthodes sont basées sur le placement de tiges métalliques à des distances connues et mesurées de l'axe de la colonne à exécuter. Soit on enregistre l'impact du jet sur les tiges à l'aide de microphones, soit, lorsque les tiges sont peintes, on les extrait pour visualiser l'impact du jet sur celles-ci.
- À signaler également une méthode consistant à descendre un gabarit articulé dans le forage, l'ouverture du gabarit indiquant le diamètre de la colonne.

Les caractéristiques mécaniques des colonnes, R_c ou vitesse de propagation des ondes, sont obtenues à partir de carottages. Ceux-ci, en tant que méthode de contrôle de l'intégrité, sont de moins en moins utilisés ; le carottage est d'autant plus délicat que la colonne est longue (sortie latérale d'outils) et il ne renseigne pas sur le diamètre.

Devant la difficulté qu'il peut y avoir à mettre en œuvre les contrôles ci-dessus, les contrôles de fabrication et de mise en œuvre (paramètres de forage, de pression, de débit, volume des rejets...) constituent des auxiliaires indispensables.

3.5.6 APPLICATIONS

Par sa souplesse dans la réalisation d'ouvrages de géométries variées, le jet, applicable en tous terrains meubles, trouve de très nombreuses applications, aussi bien dans le domaine des réparations que dans celui du confortement d'ouvrages de toutes natures :

- la reprise en sous-œuvre des fondations de murs de quai, d'ouvrages d'art et de bâtiments, tant au niveau de la charge portante qu'à celui de la fonction soutènement. Il s'agit de stabiliser des ouvrages pour lesquels des modifications diverses sont intervenues pour eux-mêmes ou dans leur environnement immédiat. Il peut s'agir aussi d'augmenter la capacité portante de fondations existantes ;

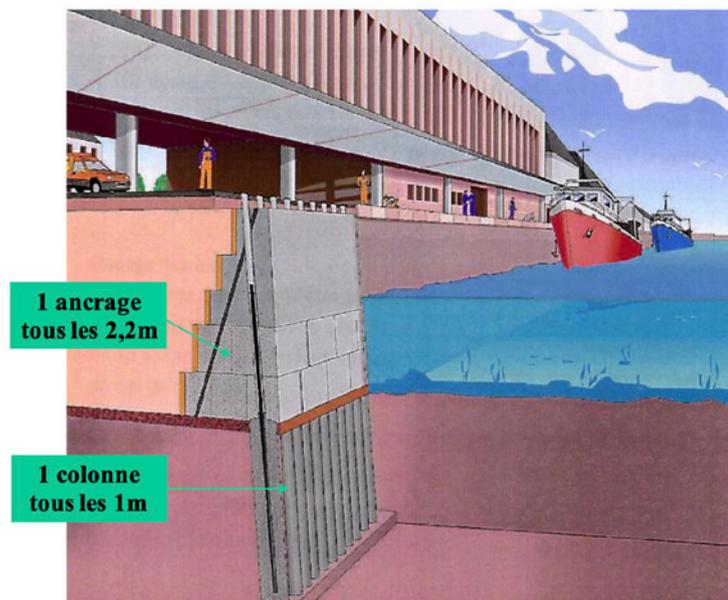


Figure n° 16 : réparation de quai (document Solétanche-Bachy).

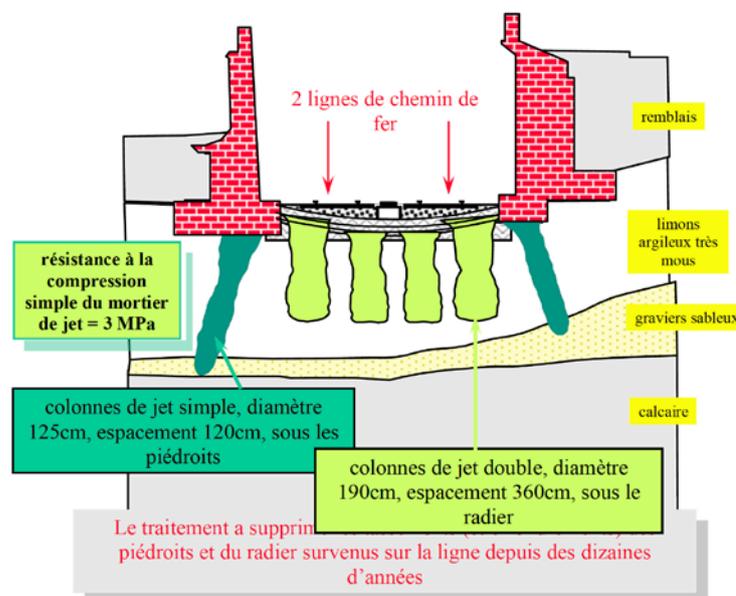


Figure n° 17 : reprise en sous-œuvre de voies du RER C (document Solétanche-Bachy).

- une seconde application concerne l'étanchement qu'une succession de colonnes jointives ou de colonnes associées à des panneaux de jet peut constituer. Aussi il est possible de citer :
 - le prolongement vertical de rideaux ou parois de fiche hydrauliquement insuffisante,
 - l'étanchement de gabions cellulaires anciens présentant une corrosion avancée et des risques de dégrafage. La ceinture de colonne ainsi constituée remplit souvent dans ce cas le rôle complémentaire de soutènement. De même, la réparation de joints défectueux entre panneaux de parois moulées procède du même principe,
 - la confection de radier injecté, dans des sous-sols menacés par la remontée de nappes et où l'injection classique est à proscrire du fait d'une hétérogénéité importante du terrain perméable. Le jet grouting s'avère adapté car il peut remplacer complètement le sol par confection d'un massif étanche. Si ce radier injecté est profond, il peut résister aux sous-pressions et constituer un massif poids.

Pour cette fonction étanchement, la possibilité des techniques de jet est directement liée à la maîtrise de deux paramètres : le rayon d'action et la précision de forage. Ce sont ces deux paramètres qui limitent en tout état de cause la profondeur que l'on peut espérer atteindre dans cette fonction. Des équipements de suivi en continu de la trajectoire des outils de forage existent et peuvent assurer une meilleure conduite des opérations.



Photo n° 9 : exemple d'un mur jet étanche entre deux parois moulées (photo Solétanche Bachy).

4

Pieux et micropieux

- 4.1 Généralités
- 4.2 Principes et domaines d'application
- 4.3 Réalisation des travaux
- 4.4 Essais et contrôles

Les fondations des structures existantes, quelle que soit leur nature, bâtiment ou ouvrage de génie civil, peuvent s'avérer insuffisantes, soit par suite d'une modification prévisible ou non des caractéristiques du sol d'assise, soit par suite d'une modification des conditions d'exploitation entraînant une augmentation des charges à porter.

Dans le cas d'une fondation superficielle et si le niveau de fondation est suffisamment proche du niveau initial, la technique de la reprise en sous-œuvre, telle que définie au paragraphe 4.3, est applicable.

Celle-ci n'est possible que dans la mesure où il n'y a pas de difficultés techniques majeures, telles que la présence d'une nappe très abondante qu'il serait risqué de rabattre, ou celle de terrains de mauvaise tenue dont le soutènement provisoire pendant les opérations de reprise en sous-œuvre serait préjudiciable pour la stabilité de l'ouvrage existant.

> L'adjonction de pieux ou micropieux solidarités aux structures existantes peut donc être envisagée dans les cas suivants :

- l'ouvrage existant est porté par des fondations superficielles, semelles ou radier, qui se révèlent insuffisantes,
- il comporte déjà des pieux assurant le transfert des charges à un terrain porteur ; il s'agit de renforcer ou remplacer ces pieux par d'autres descendus au même horizon,
- le terrain porteur des pieux s'est dégradé ou s'est avéré impropre à porter les charges ; les nouveaux pieux ou micropieux doivent être prolongés jusqu'à une formation plus profonde en mesure de supporter les charges de l'ouvrage.

La solution pieux ou micropieux peut également être retenue pour des raisons de coût plus réduit qu'une solution de reprise en sous-œuvre techniquement possible.

Le principe des pieux ou micropieux est de reprendre les charges pour les transmettre à des couches compactes et profondes susceptibles de les supporter dans des conditions satisfaisantes de stabilité et de tassement.

Il existe de nombreux ouvrages de synthèse décrivant le principe d'exécution des différents types de pieux ou micropieux, ainsi que leur domaine d'application respectifs. Il faut citer les plus courants, qui ont en outre un caractère officiel, que sont le fascicule 68 du CCTG de 2017, pour l'exécution et le fascicule 62 titre V de 2008 pour le calcul, destinés aux ouvrages de génie civil, ainsi que le D.T.U 13 de 2020 pour le bâtiment. Depuis ces parutions, certains procédés particuliers ont vu le jour qui sont rattachables aux grandes catégories décrites dans ces deux documents.

Les procédés traditionnels amenaient à classer les pieux en deux catégories essentielles, les pieux battus ou foncés, refoulant le sol et accompagnées de règles de dimensionnement adaptées à ce caractère refoulant, et les pieux forés avec excavation du sol avec les règles de calcul correspondantes. L'évolution des techniques permet maintenant l'exécution de pieux s'apparentant aux pieux forés du fait des matériels utilisés pour les réaliser, mais également aux premiers dont ils présentent le caractère, en fonction du volume de sol extrait qui peut être nul. Ces pieux, de technologie récente, ont fait l'objet d'essais expérimentaux pour en donner des règles de calcul appropriées. Il s'agit des pieux à la tarière creuse, avec une classification liée à la nature des éboulements utilisés, et des pieux vissés moulés, vissés tubés.

Enfin, les pieux injectés et les micropieux résultent de techniques de réalisation permettant d'améliorer fortement les capacités portantes par une forte augmentation des frottements entre le sol et la fondation réalisée. Ils sont aussi l'objet, selon les paramètres de mise en œuvre, d'un classement qui leur confère des capacités portantes également codifiées.

Tous les types de fondations profondes peuvent être a priori utilisés pour réparer les fondations d'ouvrages existants. Cependant, en pratique, pour des raisons de stabilité et de sensibilité des ouvrages portés ou mitoyens, les procédés par battage, vibration, vibrofonçage ou lançage à l'eau seront le plus souvent à proscrire. Ils sont susceptibles de produire des ébranlements néfastes ou de comprimer par tassement des terrains en place. Il sera plus volontiers fait appel aux techniques de forage, judicieusement choisies (il importe d'éviter toute décompression, voire éboulement) et aux pieux refoulant en cours de forage.

La réparation ou le confortement, faisant appel au fonçage par vérinage d'éléments de pieux préfabriqués, est applicable, dans la mesure où la structure est suffisamment lourde et résistante pour que le vérin puisse y prendre appui.

Tous ces types de pieux sont néanmoins très difficilement réalisables lorsqu'il y a nécessité de les exécuter à travers les structures à conforter, du fait de l'encombrement des matériels, du diamètre des outils. Seule la mise en œuvre de pieux extérieurs à l'ouvrage et qui y sont solidarités après leur exécution, évitent ces inconvénients. Mais la jonction mécanique avec l'ouvrage à conforter en présente, le plus souvent, d'autres.

Le procédé plus particulièrement adapté pour les confortements est celui des micropieux. Il convient d'appeler micropieu un élément porteur foré d'un diamètre inférieur ou égal à 300 mm avec une mise en œuvre « forcée » de mortier ou coulis. Le procédé présente donc des avantages, puisque la faible section droite minimise les désordres dans la structure traversée (rupture d'aciers), de même qu'au sein du massif de sol. Il faut néanmoins veiller à ce que les pressions d'injection, moyennes ou fortes, ne produisent pas de soulèvement de la superstructure.

Les normes de réalisation des travaux sont la NF EN 1536 et la NF EN 14199 pour les micropieux.

4.3.1 TRAVAUX PRÉPARATOIRES ; CHOIX DU PROCÉDÉ

Les travaux préparatoires consistent en la recherche de la position exacte des fondations de l'ouvrage existant et de leur configuration.

La définition des efforts globaux à reprendre, de l'état de l'ouvrage (constat contradictoire), de la position, de l'état et de la position des mitoyens éventuels, de la situation des couches porteuses, etc., se fait conformément aux prescriptions de la première partie.

Compte tenu de la multiplicité des techniques de fondation profonde, la solution qui sera finalement retenue peut résulter de démarches variées entre les différents intervenants : Maître d'Ouvrage, Maître d'œuvre, Bureau de contrôle ou Entreprise. Le choix final devra être fait de manière à satisfaire aux exigences qui ont été développées dans le paragraphe 4.2, pour ne compromettre ni la stabilité ni la sécurité de l'ouvrage en cours de travaux.

Un des critères de choix des matériels résulte souvent, pour les travaux de confortement, des conditions d'accès souvent difficiles, telles que l'implantation de pieux contre une façade de grande hauteur, de pieux à exécuter à l'intérieur du périmètre de l'ouvrage, n'offrant qu'une hauteur libre réduite entre planchers, etc. Le matériel mettant en œuvre le procédé devra se plier à ces sujétions et, dans de nombreux cas, une technique sera retenue en fonction de ses capacités d'adaptation au site. Aussi les micropieux, que des machines de faible encombrement permettent de mettre en œuvre, sont souvent bien adaptés aux travaux de renforcement.

Le choix doit faire également l'objet d'une attention particulière pour limiter le possible traumatisme dont la fondation existante et, plus généralement, la structure, pourraient souffrir. Ainsi, un carottage des parties à traverser, préalablement à la réalisation des nouveaux pieux ou micropieux, peut s'avérer nécessaire.

4.3.2 RACCORDEMENT À LA STRUCTURE ET MISE EN CHARGE

Il est rare que les nouveaux éléments porteurs se raccordent facilement à la structure existante laquelle se présente sous forme d'une semelle, longrine ou fondation massive.... Dans de nombreux cas, il y a lieu de détruire partiellement et ensuite de renforcer et élargir la partie de l'ouvrage (semelle) se raccordant à la tête des pieux ou micropieux.

Il arrive fréquemment qu'il ne soit pas possible d'élargir aux dimensions souhaitées les semelles prévues sous les murs porteurs existants, du fait de la mitoyenneté ou d'obstacles. Il est recommandé, dans ces circonstances, d'utiliser des éléments porteurs de forte capacité unitaire, pieux de gros diamètre, de moindre encombrement global qu'un groupe de micropieux assurant la même charge ; il faudra tenir compte, dans la structure existante des concentrations de charges ainsi créées.

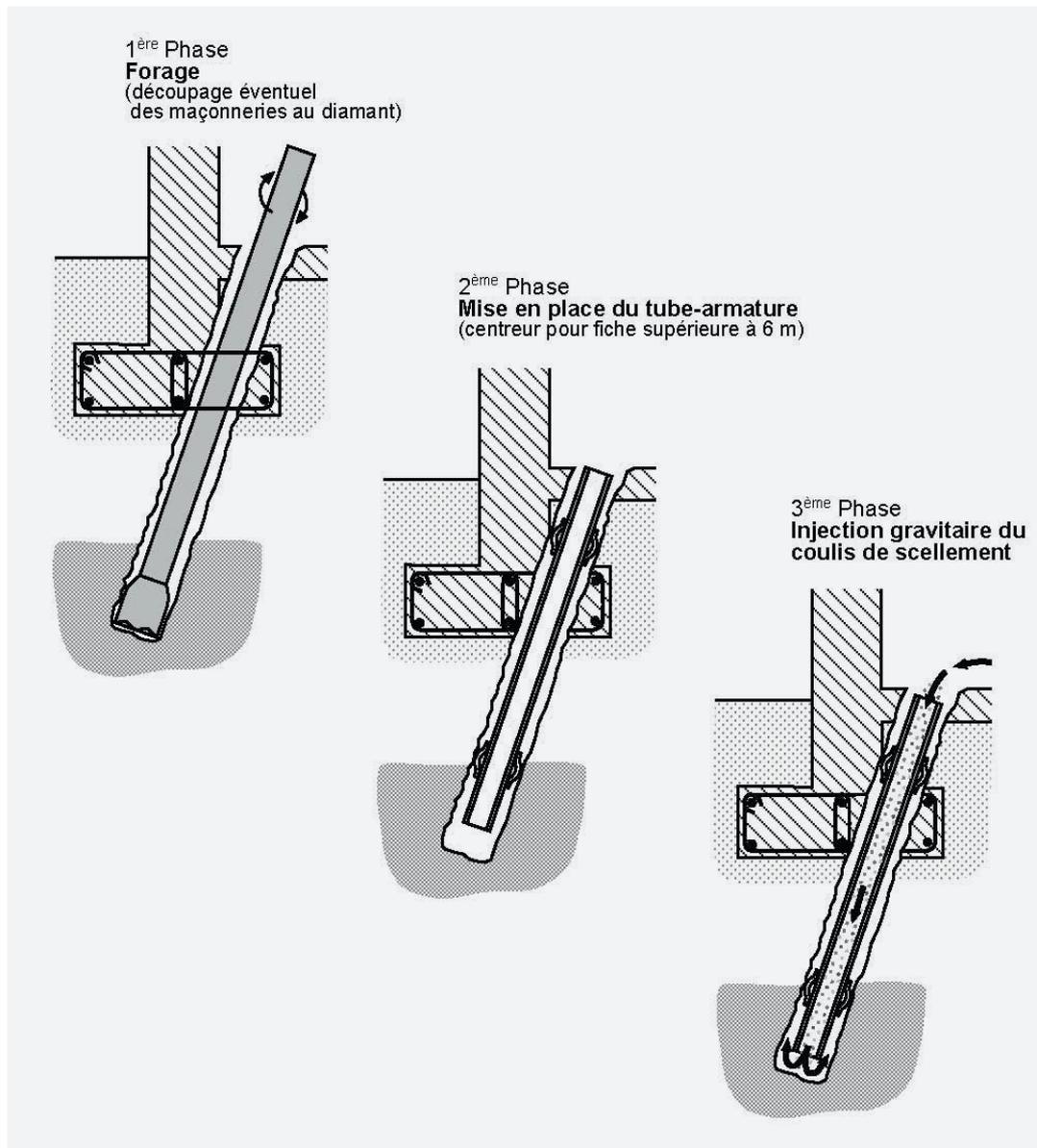


Figure n° 18 : micropieu de type II – injection gravitaire.

Les problèmes d'accès, auxquels s'ajoutent ceux d'encombrement de la tête des pieux, rendent souvent malaisé le centrage des réactions sous les charges verticales. Un dispositif souvent utilisé associe dans ce cas un pieu comprimé à des micropieux inclinés tendus, ces derniers permettant le recentrage des réactions. Dans tous les cas, il convient de se préoccuper des risques de moment de flexion éventuellement générés.

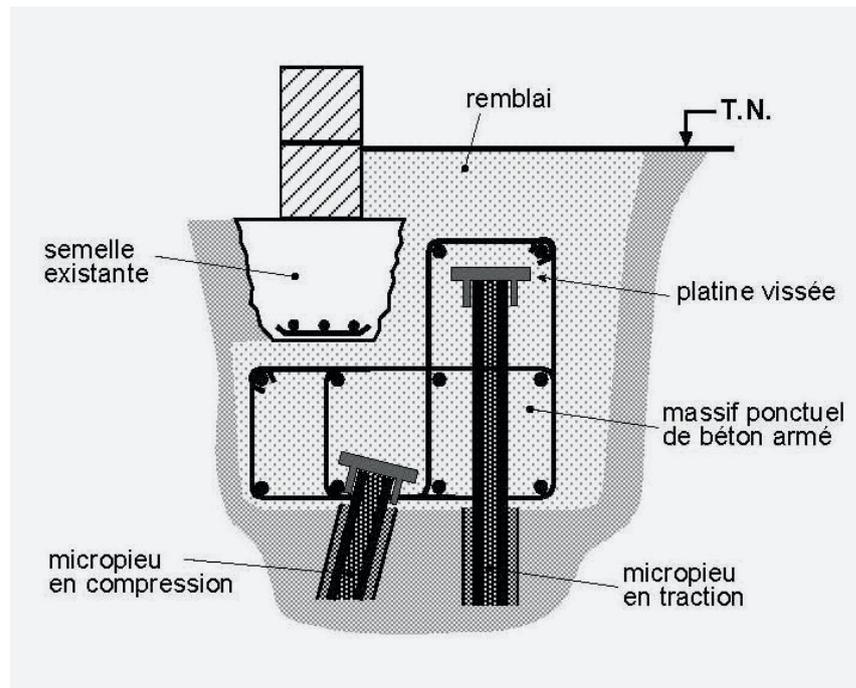


Figure n° 19 : chevêtre ponctuel en sous-œuvre.

Très souvent, les nouveaux éléments porteurs sont simplement raccordés à la structure existante. Il va de soi que, sans précautions particulières, leur mise en charge ne peut se produire qu'au prix d'un tassement supplémentaire de l'ouvrage.

D'autres procédés sont également utilisés pour transmettre la charge aux nouveaux pieux ou micropieux en s'efforçant de réduire les tassements supplémentaires de l'ouvrage existant, tout en soulageant les anciennes fondations et en améliorant leur sécurité : il s'agit de la mise en charge par vérin injecté et bloqué entre la tête du pieu et la superstructure, ou de l'utilisation de mortier expansif permettant d'assurer un contact efficace.

Les micropieux, particulièrement utilisés dans le cadre des pathologies liées à la sécheresse, doivent faire l'objet de précautions particulières, sans lesquels leur rôle peut être compromis et les désordres, censés être arrêtés, se poursuivre. De nombreux cas de réparation, dans le cadre évoqué, ont montré que les micropieux proprement dits ne sont pas en cause, l'origine de la persistance des désordres se situant au niveau des dispositions constructives du mode de transfert des charges de l'ouvrage aux micropieux. Il est ainsi possible de noter :

- des défauts de scellement dans la fondation existante, par suite d'absence d'armatures, une épaisseur ou un débord insuffisant, se traduisant par des mouvements résiduels et leurs conséquences, la réapparition de la fissuration,
- une reprise des efforts mal assurée par une liaison ponctuelle, qui conduit à accroître l'excentricité et à mal solliciter les micropieux,
- le développement de compression et traction sur des assemblages mal adaptés,
- des manchons de raccordement non filetés,
- des plots indépendants trop espacés dans une fondation existante fissurée,
- une insuffisance de force portante par suite d'une longueur trop faible vis-à-vis du sol.

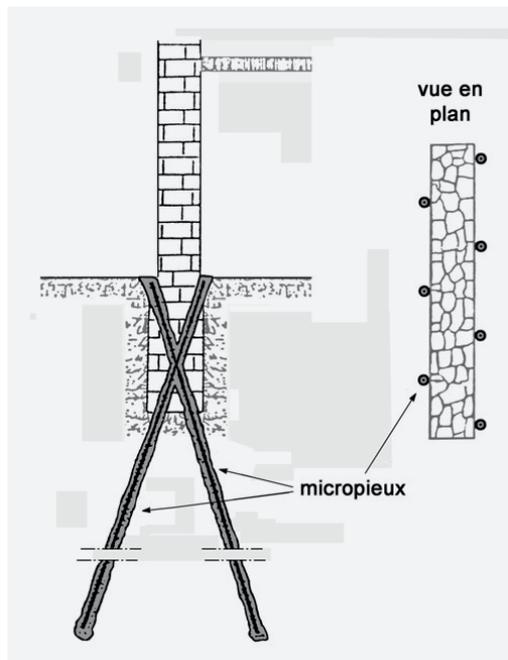


Figure n°20 : reprise en sous-œuvre d'un mur.

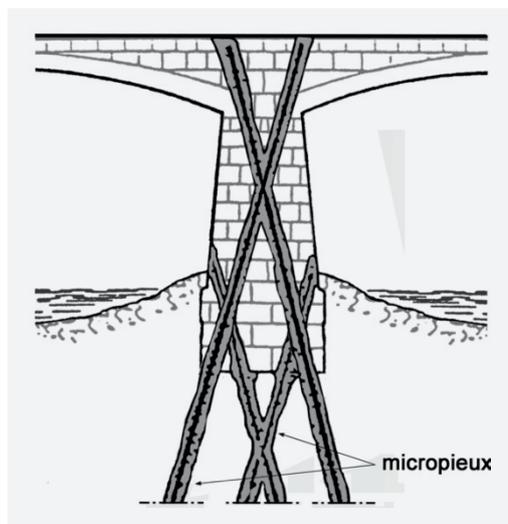


Figure n°22 : reprise en sous-œuvre d'une pile de pont en maçonnerie.

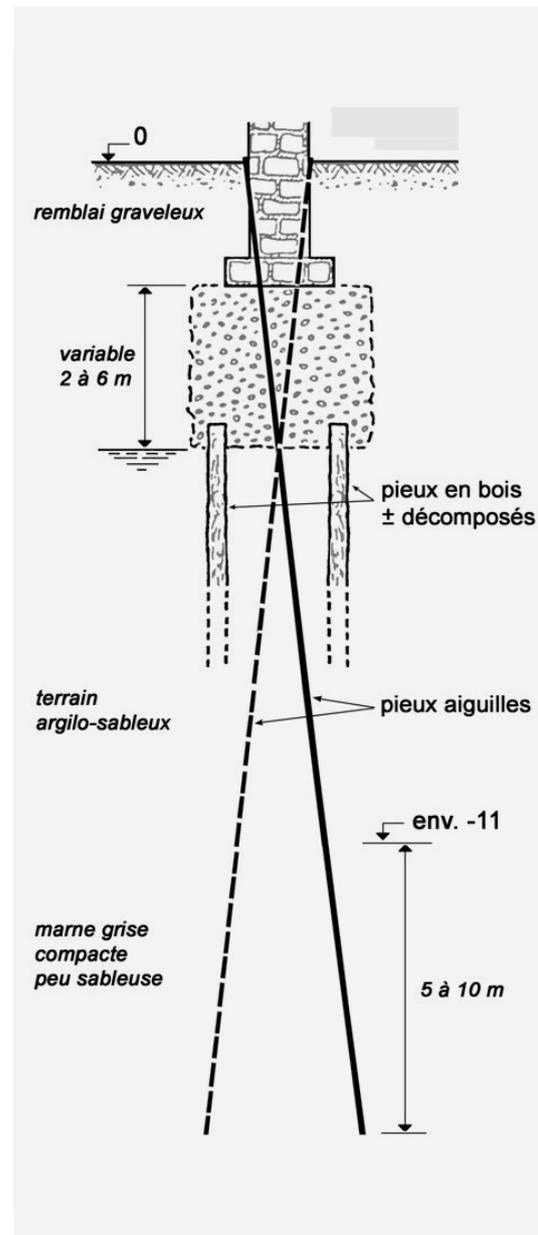


Figure n°21 : renforcement des fondations du Palais de Justice de Marseille.

4.3.3 EXÉCUTION DES PIEUX ET MICROPIEUX PROPREMENT DITS

Les travaux relatifs à ces fondations sont largement décrits dans les documents normatifs cités dans l'annexe à ce guide.

> **On y trouve le descriptif des différents types de fondations profondes, dont celles les plus couramment envisageables :**

- les pieux forés, en y intégrant les pieux réalisés en tarière creuse, dont les performances atteignent largement celles des pieux forés traditionnels,
- les micropieux, dont le diamètre est inférieur à 300 mm, sont classés en quatre type (1 à 4) en fonction essentiellement de la méthode d'injection du scellement.

> **Vis-à-vis de la résistance de l'élément de fondation exécuté, les dispositions constructives suivantes sont à respecter :**

- pour les pieux forés, ils comportent un remplissage de béton dont le dosage minimal est de 350 kg de ciment par mètre cube de béton mis en œuvre, ainsi qu'une cage d'armatures. Dans le cas d'une compression seule transmise au pieu, un ferrailage minimal par barres longitudinales et spires est imposé pour assurer le raccordement du pieu à la superstructure. Dans cette situation, le béton de fibres est une alternative au béton armé, le pieu pouvant en outre supporter une flexion modérée. Pour les pieux susceptibles d'être soumis à des sollicitations de flexion, les pieux inclinés et ceux soumis à des tractions, le ferrailage court sur toute leur longueur et est adapté aux efforts correspondants,
- pour les micropieux, la structure résistante est constituée par la section équivalente du mortier ou coulis (très rarement prise en compte dans les calculs), du tubage métallique éventuellement laissé dans le forage et du faisceau de barres en acier prévu dans le micropieu.

Dans les micropieux, qui sont d'un emploi très fréquent en réparation ou confortement, après le forage, le tubage, la mise en place du coulis de gaine éventuel puis du faisceau de barres, le mortier ou le coulis sont obligatoirement mis en place sous pression. Même dans le cas de longueur faible des micropieux, ce qui est souvent le cas pour les reprises en sous-œuvre liées à la sécheresse, la mise en place du mortier ne peut sous aucun prétexte être effectuée manuellement par simple déversement gravitaire (méthode dite au « broc ») qui est quelquefois pratiquée à tort ; elle ne concerne cependant pratiquement jamais les ouvrages de génie civil, objets de ce guide.



Photo n° 10 : micropieux excavés (photo projet national Forever).



Photo n° 11 : reprise en sous-œuvre par micropieux.



Photo n° 12 : sondeuse pour micropieux.

4.3.4 CONTRAINTES ADMISSIBLES

Pour la conception de ces fondations se référer aux normes suivantes :

- NF 94-262 Justification des ouvrages géotechniques-Normes d'application nationale de l'Eurocode 7- Fondations profondes 07/2012 ;
- NF 94-262/A1 Justification des ouvrages géotechniques-Normes d'application nationale de l'Eurocode 7-Fondations profondes- Amendement 1 07/2018.

Les contrôles d'exécution doivent permettre de s'assurer de la continuité et de la qualité de l'élément de fondation réalisé. Ils comportent un suivi de l'exécution proprement dit, s'assurant du respect des procédures, permettant l'adaptation de certains paramètres aux variations rencontrées des niveaux des horizons du sol ou des nappes. Ainsi, à titre d'exemple, la mise en œuvre prévue d'un tubage de travail provisoire de longueur limitée doit voir cette longueur augmentée si les terrains à soutenir sont localement plus épais que prévus.

Ces contrôles sont d'autant plus importants que le contrôle a posteriori, sur la fondation terminée, porte sur la continuité et la qualité du fût et de la pointe du pieu. Ce type de contrôle est pratiquement irréalisable sur les micropieux, actuellement les plus utilisés pour réparer ou conforter, du fait d'un diamètre très faible comparé à celui des pieux forés pour lesquels ce contrôle a été développé. Pour ces derniers, les techniques les plus employées sont :

- les mesures soniques, effectuées par transparence tout le long du pieu, à travers des tubes de diamètre intérieur 40 mm, remplis d'eau et ligaturés à la cage d'armatures ; elles sont l'objet d'une norme d'essai,
- les mesures d'impédance mécanique ou par réflexion, de signaux générés par choc appliqué sur la tête du pieu, objet également d'une norme d'essai.

Le diagnostic sur la qualité finale de l'exécution peut nécessiter l'utilisation conjointe des deux méthodes du fait de difficultés d'interprétation propres à chacune d'elles et pouvant conduire à déclarer défectueuse une fondation ne présentant en réalité que des défauts mineurs sans inconvénients.

Le carottage mécanique du béton de pieu doit rester l'ultime recours. Il est surtout prévu pour s'assurer de la qualité du contact en pointe béton-sol, quand ce contact assure majoritairement la capacité portante. Il est procédé à ce carottage quand les résultats de contrôles fournis par les deux techniques précédentes ne permettent pas de conclure de manière sûre sur cette qualité. Lorsqu'il est envisagé, un tube de diamètre 80 mm minimum, obturé à sa base, est disposé à la périphérie de la cage et arrêté à quelques décimètres de la base du pieu ; il est maintenu vide et évite ainsi un carottage intégral du fût, qui se heurterait à des problèmes de verticalité d'autant plus aigus que le pieu est long.

Pour les micropieux, le contrôle n'est envisageable que sous forme d'un essai de chargement, facilité quand la possibilité de prendre appui sur la structure existe.

Dans la mesure où le contrôle a posteriori conduit à devoir effectuer des réparations sur les fondations nouvelles elles-mêmes, il faut procéder immédiatement à leur mise en œuvre, et ce, avant toute solidarisation avec la structure. Il s'agira de l'injection de consolidation de la pointe, de la régénération du béton du fût, de l'injection périphérique du contact béton-fût, ou de la réalisation de pieux supplémentaires, techniques dont certaines ne sont plus réalisables une fois le chantier de réparation terminé.

Tous ces contrôles sont le plus souvent mis en œuvre par des organismes spécialisés, du fait d'un niveau d'expertise nécessaire.

Les matériaux constitutifs de la fondation, le béton et l'acier pour les pieux forés, le mortier et l'acier pour les micropieux, font strictement l'objet des mêmes contrôles que pour un ouvrage neuf.

De même, ceux des matériaux utilisés provisoirement, mais qui sont essentiels à la qualité de la réalisation, sont l'objet de contrôle. Il s'agit principalement, dans le cas des pieux forés sous boue, du suivi de la composition et des caractéristiques chimiques et rhéologiques de cette dernière, paramètres contrôlés en cours de forage et surtout avant le bétonnage.

5

Réparation et renforcement des fondations par tirants, boulons d'ancrage et clous

- 5.1 Généralités
- 5.2 Principe et domaine d'application
- 5.3 Tirants d'ancrage - Études et mise en œuvre
- 5.4 Boulons d'ancrage - Études et mise en œuvre
- 5.5 Clouage

Tirants et boulons d'ancrage sont des éléments sollicités en traction.

Les tirants sont en général de capacité unitaire et de longueur nettement supérieures à celle des boulons d'ancrage. Leur armature, en acier à haute résistance, peut être constituée par une barre unique, quelquefois un faisceau de barres, le plus souvent un ensemble de fils ou torons parallèles. Les tirants sont en général mis en précontrainte, c'est-à-dire qu'on leur applique une traction préalable au moins égale à celle qui leur sera transmise par la structure au moment de sa mise en service. L'utilisation de tirants passifs n'est généralement pas recommandée en réparation à cause des déformations résultant de l'allongement de l'acier et de la mise en charge du terrain.

Les tirants d'ancrage peuvent être aussi bien mis en œuvre dans les terrains meubles que dans le rocher.

Les boulons d'ancrage sont en général de capacité unitaire faible à moyenne (quelques dizaines de kN), de longueur courte (quelques mètres). Ils sont toujours constitués par une barre ou par un tube le plus souvent en acier. Ils sont le plus souvent passifs, c'est-à-dire que leur mise en tension ne se produit qu'à la mise en charge même de l'ouvrage. Ils peuvent néanmoins être mis en précontrainte partielle de façon à assurer leur blocage sur la structure et diminuer les déplacements ultérieurs.

Les boulons d'ancrage, comme les clous, sont mis en œuvre dans le rocher, la maçonnerie ou les structures en béton.

Les documents normatifs ou recommandations sont spécifiques à chaque technique (tirants d'ancrage, clous et boulons).

Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume de terrain ou de rocher encaissant de façon à rétablir ou à renforcer la stabilité d'une fondation au renversement, au glissement ou au soulèvement.

Les domaines d'application les plus courants sont donc le renforcement des murs de soutènement sous-dimensionnés, des massifs de fondation de poids insuffisant, des radiers soumis à des sous-pressions, etc.

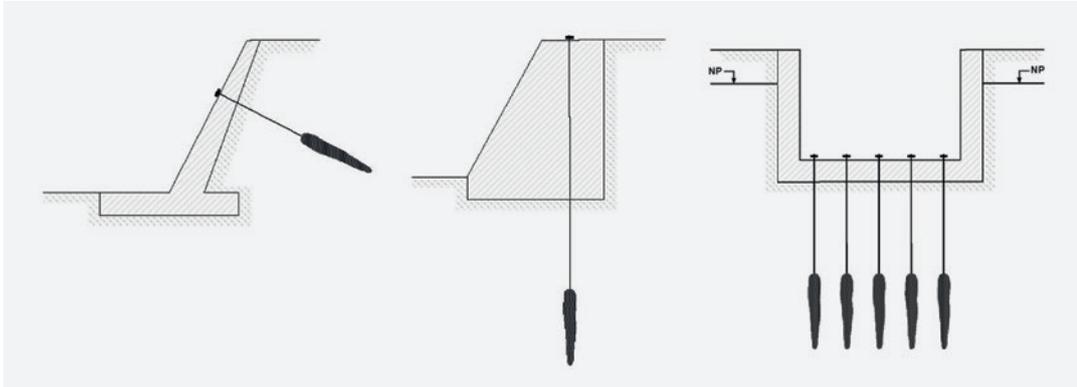


Figure n° 23 : diverses applications de tirants d'ancrage en confortement.

Les études et la mise en œuvre des tirants d'ancrage ont fait l'objet de Recommandations successives : TA 86, TA 95, TA 2020, puis d'une récente norme d'exécution NF EN 1537 ; ces deux derniers documents, compatibles, sont actuellement applicables. Il faut garder à l'esprit que :

- les ancrages utilisés sont en général de puissance moyenne,
- la suite homogène des différents essais de tirants prévus dans les textes pourra être adaptée au caractère particulier du travail à réaliser,
- le phasage des travaux prend une importance toute particulière.

La réalisation même des ancrages peut imposer des précautions supplémentaires.

5.3.1 CONCEPTION ET ÉTUDES

La recherche des plans des fondations existantes telles qu'elles ont été effectivement réalisées (dimensionnement, ferrailage, implantation, etc.), la définition des efforts appliqués, la position, l'état des mitoyens et l'état de l'ouvrage (constats contradictoires) sont nécessaires avant tout travaux. L'obtention des plans d'occupation du sous-sol au voisinage et des autorisations auprès des propriétaires riverains concernés est indispensable et incombe toujours au propriétaire de l'ouvrage à réparer. Il y a lieu d'insister sur cet aspect préliminaire aux travaux, car les tirants à réaliser intéressent le plus souvent, particulièrement en site urbain, des sols ou structures enterrées appartenant à des tiers. Les éléments géotechniques et l'implantation des obstacles éventuels enterrés sont également des données nécessaires à l'établissement du projet. Pour ce dernier, quel qu'en soit l'auteur, il peut s'avérer utile de consulter une entreprise spécialiste en tirants, compte tenu des technologies existantes et des capacités très variables qui en résultent.

Les ancrages utilisés en réparation ou renforcement d'ouvrages existants ne seront que rarement des ancrages de forte puissance, sauf dans le cas de consolidation ou de renforcement d'ouvrages-poids très particuliers (massif de culée, barrages, etc.).

En effet, si la mise en œuvre de nouveaux ancrages est nécessitée par le comportement défectueux d'ancrages existants, la tendance première sera d'envisager l'utilisation d'ancrages de puissance inférieure, surtout si la structure n'a pas été conçue à l'origine pour reprendre les efforts transmis par ces nouveaux ancrages.

C'est cette même considération qui tendra à limiter la puissance d'ancrage mise en œuvre sur une structure n'ayant pas été prévue pour supporter l'application d'efforts importants et localisés.

> Dans le cas particulier de défaillance de tirants existants, il faut distinguer deux cas :

- le tirant incriminé présente des signes de fluage du scellement, car il se trouve effectivement sollicité au-delà de la traction admissible réelle correspondant à la capacité du couple terrain - type de tirant utilisé. Après vérification de la force de traction effectivement imposée par l'ouvrage, deux solutions peuvent être adoptées :
 - la réalisation à proximité du tirant défaillant d'un nouveau tirant de capacité supérieure et détente du tirant incriminé,
 - la diminution de la sollicitation du tirant jusqu'à une valeur où disparaissent les phénomènes de fluage du scellement, puis installation d'un ancrage complémentaire ;
- le tirant en cause présente des signes de corrosion ; la seule solution consiste en la réalisation à proximité du tirant défaillant d'un nouveau tirant présentant un dispositif de protection contre la corrosion satisfaisant compte tenu de l'analyse des phénomènes ayant entraîné la corrosion de l'ancrage en cause et en la détente de ce dernier.

Il faut signaler que, dans le domaine des travaux géotechniques, les tirants sont généralement cachés et souvent inaccessibles ; aussi le diagnostic de leur état s'avère difficile.

Il faut noter qu'un tirant d'ancrage ne peut en général être ni refait, ni remplacé par substitution d'un nouveau tirant installé au même emplacement.

5.3.2 SPÉCIFICATION DES FOURNITURES

Le choix du type de tirants et de sa puissance unitaire est fait en fonction de l'importance des efforts à reprendre, des caractéristiques de la structure et de celles du terrain d'ancrage. Ce choix doit tenir compte des possibilités d'accès du matériel aux emplacements prévus pour l'installation des nouveaux ancrages. Par exemple, la mise en œuvre de tirants barres nécessite une certaine possibilité de recul au droit du forage pour l'installation de la barre elle-même si cette dernière ne peut être fractionnée et manchonnée.

Le choix du type de protection contre la corrosion est fait en fonction de la durée de vie prévue pour le tirant, inférieure ou supérieure à 2 ans, et de l'agressivité du milieu ambiant.

Toutes les fournitures devront satisfaire aux exigences imposées par les Recommandations ou Normes.

5.3.3 PROTECTION CONTRE LA CORROSION

La protection contre la corrosion est une préoccupation importante qui doit faire l'objet d'une attention particulière lors de recours aux tirants ou assimilés dans le confortement ou le renforcement d'ouvrages.

Le niveau de protection du tirant d'ancrage contre la corrosion dépend notamment de :

- la durée de vie du tirant (dès que la vie du tirant excède 2 ans la protection doit être « permanente » (P)),
- l'agressivité des terrains et ambiances dans lesquelles il est réalisé,
- des exigences du maître d'ouvrage.

Le chapitre 6 du TA 2020 donne les classes de protection P ou T en fonction de la corrosivité des sols, des ambiances, et de la durée de vie du tirant.

Également, pour chaque type de protection T et P, pour chaque partie du tirant (longueur libre, longueur scellée, coupleur, tête d'ancrage, système d'appui, les différents modes de protection sont classées en inutile, possible ou interdit.

L'agressivité des sols est jugée selon la norme NF EN 14490 et l'ambiance dans laquelle il est exposé, selon la norme NF EN ISO 12944-2.

La mise en œuvre de la protection doit conduire à ce que cette dernière ne comporte aucune solution de continuité d'une extrémité à l'autre d'un tirant. Chaque système de tirant doit faire l'objet d'une notice technique portant sur les dispositions, les modes opératoires et les produits utilisés, avec, pour ces derniers les consignes d'utilisations en relation avec la sécurité.

5.3.4 ESSAIS PRÉALABLES

Reconnaitances préalables

La connaissance de la nature et des caractéristiques géotechniques des terrains où doivent être réalisés les ancrages est fondamentale. Si les dossiers établis au moment de la construction de l'ouvrage ne permettent pas d'obtenir les renseignements valables correspondants, l'exécution de sondages de reconnaissance, permettant d'identifier et de caractériser mécaniquement les sols, est indispensable

Essais de tirants

L'ouvrage à réparer ou à renforcer étant en place, il peut être difficile sinon impossible de réaliser les essais préalables ou les essais de conformité tels que prévus par les textes, les tirants d'essai ne devant pas être intégrés par la structure.

> **Deux cas se présentent :**

■ **l'ouvrage d'origine comporte des tirants d'ancrage.**

Quelles que soient les raisons qui conduisent à envisager la mise en œuvre de nouveaux tirants, le projeteur dispose le plus souvent de toutes les données et renseignements qui ont conduit à la définition des tirants d'origine, essais préalables, essais de conformité, essais de contrôle, essais de mise en tension. Il dispose également d'informations utiles sur le comportement dans le temps des tirants déjà incorporés à l'ouvrage.

Dans la quasi-totalité des cas il lui est donc possible de définir en toute sécurité les caractéristiques des nouveaux ancrages en adoptant par précaution supplémentaire une solution « a minima » (compatible, en outre, avec la résistance propre de la structure), sans qu'il soit nécessaire de réaliser des essais préalables ou des essais de conformité.

■ **l'ouvrage d'origine ne comporte pas de tirants d'ancrage.**

Si la réalisation d'essais préalables ou d'essais de conformité se révèle difficilement envisageable pour des raisons pratiques d'implantation, il peut être admis, en dérogation aux Recommandations, de passer directement à la réalisation des tirants du projet de confortement sur la base de la traction admissible définie ci-dessous.

Compte tenu de l'expérience acquise dans des terrains similaires, le projeteur peut être en mesure, en général, de définir une fourchette de tension d'ancrage possible dont il choisira par sécurité la limite inférieure comme traction admissible, pour autant qu'elle soit compatible avec la résistance propre de la structure.

5.3.5 MISE EN ŒUVRE

> **Lors de la mise en œuvre, certaines précautions doivent être prises :**

- pour la traversée des maçonneries et bétons existants et plus particulièrement pour celle des zones de béton armé, par les forages des nouveaux ancrages, de façon à altérer le moins possible leur résistance intrinsèque et leur comportement mécanique. Le choix des outils, du diamètre et de la méthode de perforation est donc important ;
- pour le forage du terrain dans lequel seront scellés les tirants, de façon à modifier le moins possible l'état du sol de fondation de l'ouvrage. La méthode de perforation devra être choisie en donnant la priorité à la non-décompression du terrain en place et au contrôle des nappes phréatiques ou captives pouvant y contribuer ;
- pour les injections de scellement, de façon à perturber le moins possible l'équilibre, a priori limite, de l'ouvrage lorsqu'il s'agit de le conforter.

5.3.6 PHASAGE DES TRAVAUX ET CONTRÔLE EN COURS D'EXÉCUTION

> **Une attention toute particulière doit être portée au contrôle des travaux, en veillant plus spécialement :**

- à la mise en place des organes de renforcement de la structure devant lui permettre de supporter la nouvelle répartition des efforts tant en valeur qu'en emplacement ;

- aux transferts des efforts au moment de la mise en tension d'ancrages supplémentaires ou de la mise hors service ou de la décharge d'ancrages existants.

Un programme précis doit être établi et strictement respecté afin d'éviter l'apparition de nouveaux désordres ou l'aggravation de désordres existants.

5.3.7 MISE EN TENSION DES ANCRAGES ET CONTRÔLE FINAL

Chaque tirant d'ancrage est mis en tension en suivant en principe les procédures fixées par les Recommandations. Le rôle particulier en renforcement ou de réparation conféré à chaque ancrage peut conduire à procéder à la mise en charge de la structure et, par suite, à la mise en tension de chaque tirant en plusieurs phases séparées par des périodes d'observation du comportement général de l'ouvrage. À cet effet, la structure existante peut être équipée d'un certain nombre d'appareils de mesure permettant d'en suivre l'évolution pendant le chargement : mesures de déplacement, de tassement, d'ouverture et d'extension de la fissuration existante.

Du fait de l'obligation de mettre, en général, les tirants en tension, tous les tirants sont éprouvés ; c'est une caractéristique particulièrement intéressante dans le cas de la réparation ou du renforcement d'un ouvrage, car elle permet d'apprécier dès leur mise en œuvre le degré d'efficacité et le comportement de la solution confortative adoptée. Cette obligation ouvre en outre la possibilité de réaliser des tirants de technologie nouvelle, par exemple plus performants.

Les dispositions relatives au contrôle de la traction des tirants d'ancrage dans le temps, telles que prévues par les procédures, sont applicables dans leur principe général et prennent une importance toute particulière dans le cas du suivi et de la surveillance d'un ouvrage ayant donné lieu à une intervention de réparation et de renforcement.

Les dernières recommandations de l'AFTES sur les boulons d'ancrage sont applicables dans leur généralité au renforcement et à la réparation des fondations.

5.4.1 CONCEPTION ET ÉTUDES

Les démarches préliminaires à tous travaux de boulonnage sont identiques à celles menées pour les tirants. On notera cependant que les boulons sont en général de longueur courte, de force unitaire faible, scellés dans le rocher ou parfois dans le béton et le plus souvent passifs, c'est-à-dire sollicités seulement au moment de la mise en charge de la structure. Du fait des domaines d'application des boulons, les problèmes d'occupation de l'espace avoisinant se posent avec beaucoup moins d'acuité que pour les tirants.

> **Les paramètres d'un projet de boulonnage sont principalement :**

- le type de boulon,
- la longueur et la section de la barre,
- le plan de boulonnage (espacement, orientation),
- la nature de l'appui,
- la mise en tension éventuelle.

5.4.2 SPÉCIFICATION DES FOURNITURES

> **Il existe deux types de boulon d'ancrage :**

- les boulons à ancrage ponctuel, soit mécanique par coquilles à expansion, soit par scellement sur une faible longueur,
- les boulons scellés sur toute leur longueur, au mortier de ciment ou de résine, ou par expansion du tube creux constituant le corps du boulon.

Pour la consolidation et le renforcement d'un ouvrage dans sa masse, il est fait le plus souvent appel à des boulons d'ancrage scellés sur toute leur longueur.

Pour l'amélioration ou le rétablissement de la stabilité locale ou d'ensemble par solidarisation d'un volume de terrain environnant, il est possible d'utiliser, soit des boulons scellés sur toute leur longueur, soit des boulons à ancrage ponctuel.

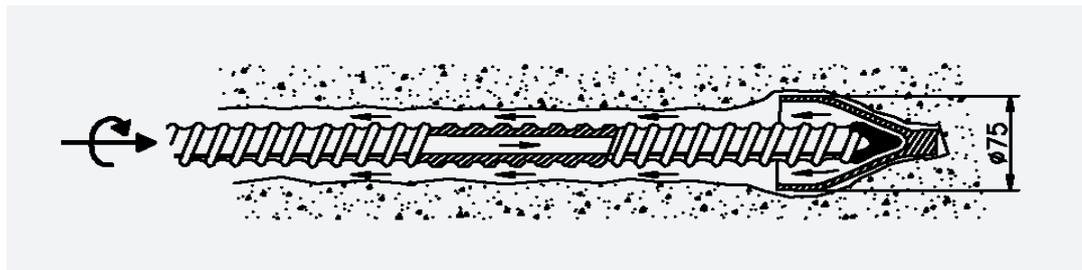


Figure n° 24 : exemple de boulon d'ancrage autoforeur.

5.4.3 ESSAIS PRÉALABLES ET MISE EN ŒUVRE

La procédure des essais préalables, telle que définie dans les TA 95, ne s'applique pas aux boulons d'ancrage.

La perforation, comme pour les tirants, des maçonneries et bétons existants et plus particulièrement la traversée des zones de béton armé, doivent être réalisées de façon à modifier le moins possible leur résistance intrinsèque et leur comportement mécanique.

De même, les injections de scellement doivent être conduites de façon à perturber le moins possible l'équilibre de l'ouvrage à conforter, surtout si cet équilibre est limite.

5.4.4 CONTRÔLES EN COURS ET EN FIN D'EXÉCUTION

Avant la parution des Recommandations Clouterre, les boulons d'ancrage n'étant généralement pas mis en précontrainte complète, le contrôle systématique de la capacité de chaque boulon ne se trouvait pas automatiquement réalisé au cours des travaux, comme cela est fait pour les tirants d'ancrage.

C'est la raison pour laquelle les premiers boulons exécutés devaient être essayés à une tension égale à 1,3 fois la tension maximale prévue pendant la vie de l'ouvrage, de façon à vérifier l'aptitude du procédé d'exécution adopté. Dans la suite des travaux, le nombre de boulons qu'il est prévu d'essayer est précisé dans le marché de travaux en fonction de l'importance de l'ouvrage.

Les Recommandations, qui concernent des clous passifs, ont introduit diverses procédures d'essais de traction qui peuvent être appliqués pour les boulons.

Il sera possible de s'y référer, tant pour des contrôles en cours d'exécution que pour des contrôles finaux, sachant que, pour ces derniers, les dispositions relatives au contrôle de la traction dans le temps, telles que prévues aux TA, ne sont pas applicables aux tirants d'ancrage. Cependant, il peut être utile et souhaitable, dans le cas d'ouvrages particulièrement sensibles, de suivre la mise en charge de quelques boulons d'ancrage judicieusement répartis pour contrôler le comportement effectif de la structure au moment de sa remise en service.



Photo n° 13 : bulbes de boulons d'ancrage déterrés (photos Ischebeck).

Les clous utilisés dans le clouage des soutènements peuvent être considérés comme des éléments intermédiaires entre les tirants et les boulons. Cette technique, très utilisée en travaux neufs, trouve des applications intéressantes en confortement et en cas de reconfiguration d'ouvrages, souvent liée à des fonctionnalités nouvelles.

Les clous, ainsi dénommés du fait de leur fonction, sont des barres passives qui peuvent être métalliques ou en fibres de verre et scellées, métalliques et battues.

Les Recommandations Clouterre s'appliquent alors pleinement.

6

Rabattements et drainage

- 6.1** Généralités
- 6.2** Principes, domaines d'application et réalisation
- 6.3** Conception et études
- 6.4** Contrôles

Les dommages engendrés par l'eau peuvent résulter de sa seule présence, venues d'eau infiltration, submersion... sans désordres structuraux, mais entraînant des pertes d'exploitation. Mais l'eau, par son action mécanique sur le sol, peut conduire à des mouvements du terrain mettant en cause la solidité des ouvrages qu'il supporte (glissement de pentes, érosion interne ou externe, sous-pression...).

Le but du drainage, au sens large du terme, est donc, soit de supprimer la présence de l'eau, soit de rétablir un champ de contraintes dans le massif de sol compatible avec la bonne tenue des ouvrages portés ; il s'agit alors de limiter l'action hydrodynamique de l'eau.

La majorité des ouvrages affectés par les problèmes hydrauliques sont des bâtiments. Ils ne rentrent donc pas, à proprement parler, dans le cadre de ce guide, dédié aux ouvrages de génie civil. Ils constituent cependant des exemples illustrant parfaitement l'origine des désordres. Il en est ainsi des radiers profonds drainants pour lesquels un colmatage progressif entraîne des sous-pressions non admissibles. De même, l'effet de coupure provoqué en site urbain par la réalisation de parois moulées peut conduire, par interception de l'écoulement de la nappe, à une remontée du niveau de celle-ci avec les conséquences évidentes sur le milieu environnant. La remontée généralisée de nappes dont le pompage permanent à grande échelle a cessé (pompage industriel) a les mêmes effets.

Les mouvements de terrain, tels les glissements à cinématique très lente, affectent les ouvrages fondés dans le volume en mouvement concerné. L'eau est effectivement très souvent l'élément moteur et les relations entre précipitations météoriques, niveau piézométrique de la nappe d'eau et déformations du terrain, à défaut d'être parfaitement quantifiées, sont néanmoins connues et permettent d'agir en connaissance de cause.

Il convient de souligner que la maîtrise des effets négatifs prévisibles ou connus de l'eau, par les techniques de drainage ou rabattement, est généralement plus facile à mettre en œuvre dans le cas des ouvrages neufs. Pour les désordres liés à l'eau se manifestant après achèvement de l'ouvrage, les mises en œuvre de drainage ou rabattement sont souvent plus compliquées et le recours à des techniques différentes s'avère souvent plus approprié du fait d'une mise en œuvre plus aisée et plus pérenne.

6.2.1 LE RABATTEMENT

Il consiste à abaisser la pression des nappes à l'intérieur d'un volume de terrain déterminé, en dessous de la surface extérieure du volume considéré. Il est obtenu par un nombre approprié de captages disposés autour du volume à rabattre et dans lesquels un pompage permanent est assuré. Plusieurs procédés de rabattement peuvent être distingués, en fonction de la nature des terrains rencontrés :

- le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et surcreusé d'environ 0,5 à 1 m par rapport à ce dernier. C'est une technique simple et économique qui nécessite, pour éviter le blindage, un talutage important en raison des forces hydrodynamiques qui se développent dans le terrain et peuvent rendre instables les parois de la fouille. En outre l'eau doit être éliminée sans entraînement de matériau ; il faut donc prendre garde aux phénomènes de renard et de boulangerie qui pourraient se produire en fond de fouille ;
- le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables ; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée, adaptée au terrain, à l'eau claire, à la boue autodestructrice ou tubés. Ils sont d'un diamètre courant de 0,50 m et la gamme habituelle de profondeur varie de 10 à 50 m. Ils sont équipés de crépines et tubages, soit en acier soit en PVC, et d'un dispositif filtrant. Le filtre est adapté à la courbe granulométrique du terrain et les caractéristiques de la crépine sont fonctions du matériau filtrant. Le choix des pompes dépend de la profondeur du rabattement et du débit à assurer : pompes situées en haut de fouille avec crépines plongeantes ou électropompes immergées pour un fond de fouille situé à plus de 6 m ;
- le rabattement par pointes filtrantes est employé pour des sols peu perméables dont la perméabilité est inférieure à 10^{-4} m/s et pour des rabattements peu profonds. Son domaine normal d'emploi est en outre celui des terrains à faible cohésion et à granulométrie fine, de façon à pouvoir mettre en place les pointes. La mise en place dans le terrain est habituellement réalisée en raccordant la tête du tube à une pompe et en « lançant » la pointe, enfoncée par l'eau envoyée à l'intérieur de la crépine. Les crépines sont adaptées à la courbe granulométrique du sol et, en terrain vraiment peu perméable, un filtre en sable est le plus souvent disposé entre la pointe filtrante et le terrain.
Les pointes sont reliées à un collecteur d'aspiration raccordé au groupe de pompage.
La profondeur moyenne de rabattement se situe aux environs de 5 m, mais il est possible d'obtenir des rabattements plus importants en procédant, si cela est possible, à un terrassement au niveau de la profondeur rabattue, puis à recommencer un second rabattement et ainsi de suite.
On emploie généralement des pointes de 2 pouces (5 cm) et la base des pointes doit se trouver à 2 mètres environ en dessous du niveau rabattu recherché ;
- le rabattement par drains siphons consiste à placer des drains dans des forages verticaux coupant la (ou les) aquifère(s) à rabattre. Les drains sont ensuite siphonnés en profitant de la pente, nécessaire au procédé, du terrain. La nappe est donc maintenue à un niveau bas et un système anti-désamorçage permet l'arrêt du siphon à un débit minimum et son autoamorçage à un débit maximum pouvant descendre à quelques litres par heure en période d'étiage ;
- le rabattement par drains électropneumatiques, récemment développé, permet une stabilisation de glissements profonds, puisqu'il permet d'atteindre des aquifères jusqu'à 40 m de profondeur ;
- le rabattement par tranchée drainante est un procédé simple, mais qui suppose un chantier important et la possibilité de circulation d'une machine trancheuse posant des drains en P.V.C. semi flexibles. Il permet le drainage de terrains à granulométrie fine à moyenne sur une profondeur d'environ 5 mètres. Les extrémités des tubes drainants sont branchées sur des pompes qui évacuent l'eau. Du fait de ces conditions d'utilisation, les tranchées drainantes ne sont pratiquement jamais utilisées en confortement d'ouvrage de génie civil.

6.2.2 LE DRAINAGE

Si le but du drainage est le même que celui du rabattement, les moyens sont différents. Le drainage ne comporte généralement pas de pompage mécanique, car on utilise uniquement l'écoulement gravitaire. Son domaine d'application est surtout celui des terrains peu à très peu perméables.

Le drainage des parties enterrées d'immeubles

Les drains peuvent être situés le long des parties enterrées ou à une certaine distance de celles-ci. La tranchée drainante est remplie de diverses couches de graviers de granulométrie décroissante du haut vers le bas ; un filtre est interposé entre le matériau drainant et le sol en place pour éviter le colmatage du drain. Mais des nappes en géotextile pouvant assurer diverses fonctions (filtrage, drainage, étanchéité) peuvent remplacer avantageusement le matériau drainant et sont maintenant très utilisées.

Les tuyaux de drainage sont constitués de tubes perforés ou de tubes en matériaux poreux. Il y a lieu de prévoir des regards visitables au raccordement des drains, afin de permettre un entretien.

Les radiers drainants

Par suite d'une mauvaise conception initiale ou d'une remontée de la nappe, telle que rappelée dans les généralités, les sous-sols d'immeubles peuvent être inondés temporairement ou définitivement. Une solution de réparation ou de prévention consiste à prévoir, si cela est possible, un radier drainant équipé de puits de décompression munis de pompes de relevage automatiques assurant un drainage permanent. Il peut s'avérer indispensable d'associer ce pompage à une injection autour de l'immeuble, afin de diminuer la perméabilité du terrain.

Le drainage des talus

Les systèmes drainants ont pour but principal d'améliorer la stabilité des pentes. Il est recommandé d'examiner leur faisabilité avant d'envisager des systèmes mécaniques plus coûteux et parfois moins efficace que le drainage.

> Il existe plusieurs procédés :

- dans les tranchées drainantes, perpendiculaires à la pente, un matériau constitué de sable grossier ou de grave enveloppé dans un géotextile non tissé est déposé. L'espacement entre tranchées est lié à la capacité du système à empêcher la nappe rabattue de retrouver entre les drains son niveau piézométrique initial ; la tranchée peut n'avoir, en effet, qu'une action très limitée. Ce procédé est très proche de celui du rabattement par tranchée, examiné ci-dessus ;
- les éperons drainants sont des murs drainants verticaux, parallèles à la ligne de plus grande pente. Ils ont une double fonction stabilisatrice, en rabattant la nappe et en introduisant des efforts résistants de frottement sur les parois verticales au contact éperons/terrain. Au pied des éperons, qui comporte le plus souvent une « bêche », laquelle contribue également à l'amélioration de la stabilité, un drain, canalisant les eaux et reliant les éperons entre eux, est disposé en continu ;

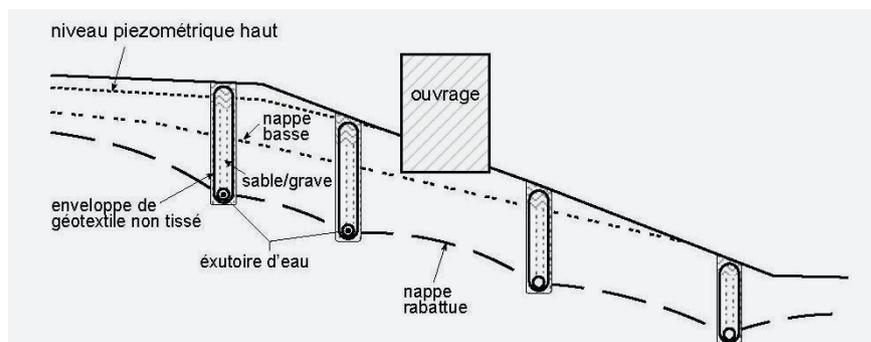


Figure n° 25 : ouvrage sur pente à stabilité précaire en nappe haute ; stabilisation par tranchées drainantes.

- les masques drainants sont constitués de couches de matériaux drainants mis en place sur le talus. Le drainage se fait au contact terrain - masque. Le masque est en réalité une succession d'éperons jointifs ;
- le drainage subhorizontal est utilisé pour stabiliser des terrains instables, de surface libre pentue. L'instabilité est provoquée par une nappe d'eau en charge dont le niveau piézométrique varie et génère un mouvement souvent très lent et épisodique de la surface du terrain. Il s'agit souvent de très grandes surfaces affectées et les ouvrages qui y sont implantés sont sujets à désordres. Les drains, souvent très longs, sont mis en œuvre depuis l'amont des volumes concernés et abaissent la charge de la nappe. Leur mise en œuvre et leur conception est délicate et leur pérennité constitue un réel problème.

6.2.3 LE DRAINAGE PAR BARBACANES

Le drainage par barbacanes est mis en œuvre pour les murs de soutènement peu ou mal drainés et, de ce fait, soumis à des poussées hydrostatiques voire hydrodynamiques qui peuvent conduire à des désordres ou même à la ruine. Dans le cas de sols grenus, à forte perméabilité, le percement de barbacanes sera suffisant. En revanche, en présence de sols fins et peu perméables, ce dispositif doit être complété par la constitution d'un drain situé à l'amont du mur ; la seule présence des barbacanes est en effet insuffisante. La difficulté réside dans la mise en place du drain qui doit le plus souvent être disposé à une profondeur importante.

L'ensemble des techniques de drainage bénéficie depuis une dizaine d'années des recherches et développements menés sur les géosynthétiques et les géomembranes, dont l'utilisation dans le domaine du drainage permet à l'heure actuelle des réalisations autrefois difficilement envisageables et de pérennité meilleure. Il est ainsi possible de disposer de produits aux caractéristiques connues, dont le choix reste néanmoins tributaire de la pertinence du diagnostic et des études préalables à la définition de la solution de réparation.

Il est nécessaire de se reporter aux Recommandations du Comité français des géosynthétiques portant sur les produits et la conception.

Conception et études

6.3

6.3.1 RECONNAISSANCES ET ÉTUDES

- Les reconnaissances et études ayant trait aux techniques de rabattement ou drainage présentent la particularité de demander du temps ; elles sont très liées à la recherche des causes de désordres affectant l'ouvrage à réparer ou conforter. Elles doivent contribuer par leurs conclusions au choix du type de rabattement ou de drainage et aux dispositions des moyens de captage.
- Il est nécessaire d'identifier les sols concernés et particulièrement leur granulométrie et de prévoir une campagne hydraulique et hydrogéologique qui devra déterminer l'origine des venues d'eau, les caractéristiques chimiques de celle-ci et les variations saisonnières des niveaux piézométriques. Ces dernières, en fonction de la nature des sols concernés, peuvent être appréhendées par des piézomètres ouverts équipés de mesures en continu ou peuvent demander la pose de capteurs de pression interstitielle s'il s'agit de sols fins peu perméables.

- La valeur de la perméabilité des sols, indispensable à la mise au point du projet, peut être déterminée en laboratoire à partir d'échantillons intacts. Mais, compte tenu des incertitudes sur sa valeur et des conséquences sur les débits, il est, dans les projets importants, recommandés de procéder à un essai de pompage ; il permet de déterminer un coefficient de perméabilité globale et la courbe de rabattement. Ce type d'essai, qui demande la pose de piézomètres, est préférable à l'essai Lefranc, moins coûteux, mais ponctuel, qui n'indique qu'une valeur locale de la perméabilité, souvent très différente de celle à grande échelle, nécessaire.
- À partir de la campagne de sondages et de la courbe de rabattement, l'entreprise propose la technique à mettre en œuvre, les points d'implantation des puits ou pointes filtrantes, les rabattements à un ou plusieurs niveaux, le débit de pompage prévu et la détermination de la longueur de refoulement de la pompe, l'eau devant être refoulée le plus loin possible pour ne pas réalimenter la nappe.

6.3.2 MATÉRIAUX ET MATÉRIELS

Une attention particulière doit être portée sur la constitution des filtres. Le rabattement et le drainage ont pour but l'extraction de l'eau sans entraîner de particules solides, sans colmatage des systèmes de drainage et en maintenant les capacités du système.

Le filtre comporte la meilleure perméabilité possible à pouvoir filtrant donné. La constitution de ce filtre dépend de la courbe granulométrique du terrain à drainer. La crépine est destinée à assurer le soutènement du filtre tout en laissant passer l'eau.

Deux types de contrôles sont, a priori, à prévoir dans le cas de mise en œuvre de rabattement ou de drainage.

Les premiers concernent les produits quant à leur conformité avec les caractéristiques fixées au projet. Il s'agit en particulier de la nature et de la granulométrie des matériaux drainants et filtrants ; pour les géosynthétiques, les produits sont en général certifiés.

Outre le respect, à la mise en œuvre, des dispositions constructives prévues, le second type de contrôle peut consister en la mise en place d'appareils de suivi d'efficacité. Il faut, dans certains cas, implanter des lignes de piézomètres afin de vérifier les rayons d'action des rabattements et drainage. Les débits obtenus sur chantier sont à comparer à ceux calculés.

Dans le cas de recherche de stabilisation de pentes en terrains peu à très peu perméables, le contrôle consiste à suivre la pression interstitielle par des capteurs conçus à cet effet. Mais la pose de repères de déplacements, le drainage mis en place étant appelé à arrêter ces derniers, constitue un excellent témoin de l'efficacité.

7

Hygiène et sécurité

- 7.1 Principes généraux
- 7.2 Protection des personnes
- 7.3 Protection de l'environnement contre les pollutions

On renverra le lecteur au chapitre « Prévention et sécurité » du GUIDE STRES 0 [Introduction commune à tous les guides] afin d'avoir de plus amples détails sur les exigences générales en la matière.

Le respect de la législation du travail et des règles de sécurité, de la loi sur l'Eau avec les contraintes qu'elle impose, est impératif.

> Il convient à la fois :

- de protéger les personnes et ce, à double titre : contre la toxicité de certains produits et contre les risques mécaniques et électriques,
- de limiter au maximum les risques de pollution, sous toutes ses formes, de l'environnement.

> L'exécution des travaux de réparation ou de confortement doit être conforme aux normes nationales et européennes, ainsi qu'aux spécifications et prescriptions statutaires concernant:

- la sécurité sur chantier,
- la sécurité opérationnelle des équipements et des outils de forage, ainsi que celle des équipements et des outils auxiliaires,
- la sécurité des procédures de travail.

En ce qui concerne les nuisances sonores, des précautions doivent être prises pour s'assurer que les niveaux sonores n'excèdent pas les limites prescrites par les règlements nationaux ou internationaux.

> Pour ce qui est de la toxicité liée à l'utilisation de certains produits, les principales précautions à prendre sont :

- en milieu clos ou peu ventilé, mise en place d'une ventilation assurant un renouvellement de l'atmosphère conforme à la législation du travail,
- protection contre l'incendie en cas d'utilisation de produits inflammables,
- port d'équipement adapté en cas de produits nocifs, tels que port de gants, lunettes de protection, casque léger, utilisation de produits spéciaux pour le nettoyage de la peau.

L'utilisateur doit prendre les précautions précisées sur l'étiquetage des produits toxiques et corrosifs soumis à la législation.

Dans tous les cas, les consignes de sécurité doivent être connues et disponibles sur le chantier, les personnes devant être formées à ces consignes.

Les dommages pouvant résulter des différentes natures de réparations intéressant le sol doivent être réduits au minimum. Ils peuvent avoir pour origine la pollution des terrains, des eaux de surface, des eaux souterraines, de l'air.

> **Le type et l'étendue des nuisances éventuelles et les répercussions sur l'environnement sont fonction, entre autres :**

- de l'emplacement du chantier,
- du type de confortement entrepris,
- de la méthode de travail,
- des procédures réelles,
- des conditions de sols,
- du contexte hydrogéologique (nappe ou non, captage,...)

La loi sur l'Eau a introduit des exigences nouvelles et il est évident qu'on s'achemine vers des contraintes encore plus fortes, tout particulièrement dans l'introduction dans le sol des adjuvants utilisés dans les produits qui y sont injectés, dans certaines techniques de réparation.

TABLE DES FIGURES

- FIGURE N° 1 : LES TROIS INTERVENANTS LE MAÎTRE D'ŒUVRE (LE PRESCRIPTEUR), L'ENTREPRENEUR ET LE CONTRÔLEUR
- FIGURE N° 2 : AUGMENTATION DE LA SURFACE DE LA SEMELLE SANS SURÉPAISSEUR
- FIGURE N° 3 : AUGMENTATION DE LA SURFACE DE LA SEMELLE AVEC SURÉPAISSEUR
- FIGURE N° 4 : PAS D'AUGMENTATION DE LA SURFACE DE LA SEMELLE
- FIGURE N° 5 : RENFORCEMENT DE FONDATION À UN NIVEAU INFÉRIEUR AU NIVEAU D'ORIGINE
- FIGURE N° 6 : EFFORTS REPRIS PAR LE(S) PIEU(X) EN POINTE ET EN FROTTEMENT
- FIGURE N° 7 : PRINCIPE DE LA FONDATION MIXTE
- FIGURE N° 8A : INJECTION AU ROCHER EN DESCENDANT
- FIGURE N° 8B : INJECTION EN TERRAIN MEUBLE EN REMONTANT
- FIGURE N° 9 : ENREGISTREMENT DE PARAMÈTRES DE FORAGE (DOCUMENT SOLÉTANCHE-BACHY)
- FIGURE N° 10 : RENFORCEMENT DES FONDATIONS D'UN PONT
- FIGURE N° 11 : RENFORCEMENT SIMULTANÉ DU MASSIF ENCAISSANT, DES FONDATIONS ET DES MAÇONNERIES D'UN PONT (PONT DE BERCY – DOCUMENT SOLÉTANCHE-BACHY)
- FIGURE N° 12 : PRINCIPE DE L'INJECTION DE CLAQUAGE – SÉQUENCE DES OPÉRATIONS
- FIGURE N° 13 : MISE EN ŒUVRE DU COMPACTAGE STATIQUE HORIZONTAL
- FIGURE N° 14 : COURBES PRESSIOMÉTRIQUES AVANT ET APRÈS TRAITEMENT
- FIGURE N° 15 : PRINCIPE DE RÉALISATION D'UNE COLONNE DE JET GROUTING
- FIGURE N° 16 : RÉPARATION DE QUAI (DOCUMENT SOLÉTANCHE-BACHY)
- FIGURE N° 17 : REPRISE EN SOUS-ŒUVRE DE VOIES DU RER C (DOCUMENT SOLÉTANCHE-BACHY)
- FIGURE N° 18 : MICROPIEU DE TYPE II – INJECTION GRAVITAIRE
- FIGURE N° 19 : CHEVÊTRE PONCTUEL EN SOUS-ŒUVRE
- FIGURE N° 20 : REPRISE EN SOUS-ŒUVRE D'UN MUR
- FIGURE N° 21 : RENFORCEMENT DES FONDATIONS DU PALAIS DE JUSTICE DE MARSEILLE
- FIGURE N° 22 : REPRISE EN SOUS-ŒUVRE D'UNE PILE DE PONT EN MAÇONNERIE
- FIGURE N° 23 : DIVERSES APPLICATIONS DE TIRANTS D'ANCRAGE EN CONFORTEMENT
- FIGURE N° 24 : EXEMPLE DE BOULON D'ANCRAGE AUTOFOREUR
- FIGURE N° 25 : OUVRAGE SUR PENTE À STABILITÉ PRÉCAIRE EN NAPPE HAUTE ; STABILISATION PAR TRANCHÉES DRAINANTES

TABLE DES PHOTOS

- PHOTO N° 1 : TUBE À MANCHETTE/OBTURATEUR DOUBLE (PHOTO SOLÉTANCHE-BACHY)
- PHOTO N° 2 : OPÉRATION DE STABILISATION D'UN BÂTIMENT AVEC CONTRÔLE DE NIVEAU (PHOTO URETEK)
- PHOTO N° 3 : ÉLIMINATION DE BATTEMENTS DE DALLES (PHOTO URETEK)
- PHOTO N° 4 : AMÉLIORATION DU SOL DE FONDATION DE LA NOUVELLE DIGUE DE MONACO (PHOTO SOLÉTANCHE-BACHY)
- PHOTO N° 5 : CONFORTEMENT DE QUAI (PHOTO SOLÉTANCHE-BACHY)
- PHOTO N° 6 : COLONNES DE JET DÉGAGÉES (PHOTOS SOLÉTANCHE-BACHY)
- PHOTO N° 7 : PROCÉDÉ JET DOUBLE (AIR + COULIS) (DOCUMENT SOLÉTANCHE BACHY)
- PHOTO N° 8 : MÉTHODE DU JET TRIPLE (PHOTOS SOLÉTANCHE-BACHY)
- PHOTO N° 9 : EXEMPLE D'UN MUR JET ÉTANCHE ENTRE DEUX PAROIS MOULÉES (PHOTO SOLÉTANCHE BACHY)
- PHOTO N° 10 : MICROPIEUX EXCAVÉS (PHOTO PROJET NATIONAL FOREVER)
- PHOTO N° 11 : REPRISE EN SOUS-ŒUVRE PAR MICROPIEUX
- PHOTO N° 12 : SONDEUSE POUR MICROPIEUX
- PHOTO N° 13 : BULBES DE BOULONS D'ANCRAGE DÉTERRÉ (PHOTOS ISCHEBECK)

PARTIE 1 : PRINCIPES GÉNÉRAUX

- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 11 - Fondations en site terrestre (décembre 1991). Ministère de l'Équipement et du Logement.
- Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 10 - Fondations en site aquatique (mars 1981). Ministère de l'Équipement et du Logement.
- Guides techniques pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement (2003). Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer.
- NF P 95-106 - Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Spécifications relatives aux fondations des ouvrages
- NF P 95-107 - Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des maçonneries - Spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés.
- La Méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages (2005). Presses de l'ENPC sous la direction de D.Allagnat.

PARTIE 2 : REPRISE EN SOUS-ŒUVRE

- LCPC-SETRA - Fondations de ponts en site aquatique en état précaire. Guide pour la surveillance et le confortement (décembre 1980).
- OPPBTP. Code de bonne pratique. Démolition/reprise en sous-œuvre de fondations en réhabilitation (juin 1997).
- LCPC. Calcul d'une fondation mixte semelle-pieux sous charge verticale centrée. Note d'information technique (1988).

PARTIE 3 : AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DES TERRAINS DE FONDATION PAR INJECTION

- Norme homologuée, d'origine européenne NF EN 12715 (P94-330) d'octobre 2000 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux-injection » (56 pages). Cette norme se substitue au fascicule n° 68 du CCTG-travaux du 11 octobre 1993, du Ministère de l'Équipement, qui traite des injections dans son chapitre XI.
- Recommandations de l'AFTES relatives à la conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches. Extrait de « Tunnels et Ouvrages souterrains » n° 194-195 de mai-juin 2006.
- Recommandations de l'AFTES relatives aux opérations préalables aux opérations de réception des travaux de réhabilitation des ouvrages souterrains par l'injection. Extrait de « Tunnels et Ouvrages souterrains » n°189 de mai-juin 2005.
- Etat de l'art des contrôles de l'amélioration des sols par injection, établi dans le cadre du Projet National CRITERRE (IREX) en décembre 2000 (28 pages).
- Norme homologuée d'origine européenne NF EN 12699 de 2015 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux ». Pieux avec refoulement de sol.
- Norme homologuée d'origine européenne NF EN 12716 (P94-331) d'octobre 2018 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux ». Colonnes, panneaux et structure de sol ciment réalisés par jet grouting.
- Projet National CRITERRE. Contrôle du diamètre des colonnes de jet grouting isolées. IREX (2003).

PARTIE 4 : PIEUX ET MICROPIEUX

- Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Pieux forés- NF-EN1536 (2015).
- Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Micropieux –NF-EN14199 (2015).
- Les pieux forés- Recueil des règles de l'art –LCPC-SETRA (1978) ; mise à jour en cours par le CEREMA.

PARTIE 5 : RÉPARATION ET RENFORCEMENT DES FONDATIONS PAR TIRANTS, BOULONS D'ANCRAGE ET CLOUS

- Recommandations AFTES.
- Recommandations Clouterre 1991 et additif 2002, Projet National Clouterre. Presses de l'ENPC.
- Tirants d'ancrage ; Recommandations TA 2020 du Comité français de mécanique des sols et Travaux de fondation.
- Norme NF EN ISO 22477-5. Essai statique de tirant d'ancrage
- Norme NF EN 1537 (P94-321) 2013. Exécution des travaux géotechniques spéciaux ; Tirants d'ancrage.
- Guide technique Ouvrages de soutènement. Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des parois clouées, des poutres et voiles armés par tirants précontraints (juin 2003) : 2 ouvrages (*ce guide, qui ne traite pas de travaux, est indispensable à leur bonne réalisation*).
- Norme NF EN 14490 (septembre 2010). Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Clouage.
- Norme NF P94 270 (2003). Renforcement des sols- Soutènements et talus en sols en place renforcés par des clous- Justification du dimensionnement.

PARTIE 7 : HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

- Norme NF EN 16228 (2009). Machines de forage et fondations. Sécurité.
- Loi sur l'Eau.

TOUTES PARTIES :

- Exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil. Fascicule 68 du CCTG (2017).



Le comité de pilotage chargé du GUIDE STRRES N° 1 de la famille FONDATIONS [FAFO 1] était composé de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Bernard FARGEOT, président d'honneur du STRRES
Philippe ARVILLE, EIFFEL
Didier CHABOT, COFEX
Gil CHARTIER, RCA
Damien COLOMBOT, BAUDIN-CHATEAUNEUF
Xavier JULLIAN, SOLÉTANCHE BACHY
Jean-Pierre GADRET, SOLÉTANCHE BACHY
Christian TOURNEUR, FREYSSINET

Le GUIDE STRRES N° 1 de la famille FONDATIONS [FAFO 1] a été rédigé par :

Olivier COMBARIEU

La révision du GUIDE STRRES N° 1 de la famille FONDATIONS [FAFO 1 – V2] a été assurée par :

Xavier JULLIAN

Avec l'expertise de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Gérard COLLE, vice-président d'honneur du STRRES
Stéphane MONLEAU, SOLÉTANCHE BACHY

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)

