



République Tunisienne
Ministère De L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université De Tunis El Manar
École Nationale D'ingénieurs de Tunis



Département De Génie Civil

Réparation par Micropieux

Encadré Par : M. Mongi Ben Ouezdou

Réalisé Par : Amani Barhoumi

Majdouline Salmeni

Classe : 3AGC

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre **profonde gratitude** à Professeur **Mongi BEN OUEZDOU**, notre encadrant, pour son accompagnement exceptionnel tout au long de ce projet. Sa **disponibilité constante**, sa **bienveillance** et son **expertise approfondie** ont été des sources précieuses de guidance et de motivation. Ses conseils avisés, sa capacité à nous orienter face aux difficultés et son soutien tout au long des différentes étapes du projet ont grandement contribué à notre apprentissage et à la **réussite de ce travail**. Nous lui sommes sincèrement reconnaissants pour le temps et l'attention qu'il nous a consacrés.

Résumé

Ce travail porte sur la **reprise en sous-œuvre par micropieux**, une technique efficace pour renforcer ou stabiliser les fondations dégradées. Plus légers et moins intrusifs que les pieux classiques, les micropieux s'adaptent à tous types de sols et aux espaces restreints, tout en assurant une bonne capacité portante. Leur mise en œuvre rapide et flexible permet d'intervenir même à proximité d'ouvrages existants sans perturber leur stabilité.

L'étude présente les **principes techniques**, les **caractéristiques** et les **étapes d'exécution** de cette méthode, depuis le forage jusqu'à la connexion aux fondations. Elle aborde également les **contrôles de qualité**, les **précautions de sécurité** et l'apport des **outils numériques**, tels que le logiciel GEO5 Micropieux, pour le calcul et la conception. Une attention particulière est portée à la compréhension du comportement géotechnique du sol et à l'interaction sol-structure.

Les résultats montrent que les micropieux constituent une **solution durable, économique et performante** pour la stabilisation des ouvrages, notamment dans les environnements urbains contraints. Ils offrent ainsi une réponse adaptée aux besoins actuels de réhabilitation et de préservation du patrimoine bâti.

Abstract

This work focuses on **underpinning using micropiles**, an effective technique for strengthening or stabilizing deteriorated foundations. Lighter and less intrusive than conventional piles, micropiles can be adapted to all types of soils and confined spaces while ensuring excellent load-bearing capacity. Their fast and flexible installation allows intervention near existing structures without compromising their stability.

The study presents the **technical principles, characteristics, and execution stages** of this method, from drilling to the connection with the foundations. It also addresses **quality control procedures, safety precautions**, and the use of **digital tools**, such as the GEO5 Micropiles software, for design and calculation purposes. Special attention is given to the geotechnical behavior of the soil and the soil–structure interaction.

The results show that micropiles represent a **durable, economical, and high-performance solution** for the stabilization of structures, especially in constrained urban environments. They thus provide an appropriate response to the current needs for rehabilitation and preservation of the built heritage.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Remerciements</i>	2
Résumé	3
Abstract.....	4
Introduction générale	10
Chapitre1 : Présentation du Sujet	12
1.1. Introduction générale :	12
1.2. Introduction aux pieux :	12
1.3. Définition et rôle des micropieux dans la construction :	12
1.4. Comparaison : micropieux vs pieux classiques :	13
1.5. Critères de choix entre pieux et micropieux :	14
1.6. Principes techniques des micropieux :	14
1.7. Domaines d'application des micropieux :.....	15
1.8. Conclusion :	18
2.1. Introduction :	20
2.2. Micropieux : Types et Spécifications.....	20
2.2.1. Types des micropieux :.....	20
2.2.2. Techniques d'exécution selon le type de micropieux :	22
2.3. Orientation et disposition des micropieux :	24
2.4. Comportement des Micropieux :	25
2.4.1. Frottement latéral :	25
2.4.2. Effet de groupe :.....	25
2.5. Avantages et limites de la technique des micropieux :	26
2.6. Conclusion :	27
Chapitre 3 : Etapes & Méthodologie d'Exécution.....	29
3.1. Introduction :.....	29
3.2. Étude préliminaire :.....	29
3.3. Pose de micropieux :	29

3.3.1. Réalisation du forage :	30
3.3.2. Mise en place de l'armature :.....	31
3.3.3. Injection du coulis de ciment :.....	31
3.4. Connexion aux fondations :	31
3.5. Matériel utilisé pour la mise en œuvre des micropieux :	31
3.6. Contrôles et essais des Micropieux :.....	33
3.7. Les Normes et Critères des essais :.....	34
3.8. Sécurité et précautions d'exécution :	36
3.9. Conclusion :	36
Chapitre 4 : Outils et Acteurs du domaine.....	38
4.1. Introduction :	38
4.2. Le Logiciel GEO5 – Micropieux :.....	38
4.2.1. Présentation du Logiciel :	38
4.2.2. Fonctionnalités principales :	39
4.3. Acteurs du domaine des micropieux en Tunisie :.....	40
Conclusion Générale.....	42

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Fissures structurelles due à des tassements différentiels	12
Figure 2:Critères de choix des pieux ou de micropieux [1]	14
Figure 3:Réalisation des micropieux de reprise en sous-œuvre [20]	15
Figure 4:Micropieux pour Renforcement des bâtiments anciens [19]	15
Figure 5:Micropieux lors des conditions géotechniques complexes [17].....	16
Figure 6: Stabilisation des fouilles.....	16
Figure 7:Stabilisation d'un talus [14]	16
Figure 8: Utilisation des micropieux pour constructions neuves [18]	17
Figure 9:Reprise en sous-œuvre du Pont Vecchio à Florence [5]	17
Figure 10: Réparation par micropieux après sinistres [15]	18
Figure 11: Stabilisation des pylônes [4]	18
Figure 12 : Types des micropieux	21
Figure 13:Etapes d'exécution du micropieu de type I [1]	22
Figure 14: Etapes d'exécution du type II [14]	23
Figure 15: Etapes d'exécution de type IGU [13].....	23
Figure 16: Etapes d'exécution de type IRS [13].....	24
Figure 17 : Disposition des micropieux [12]	25
Figure 18 : Coefficient d ' efficacité des pieux en groupe [5]	26
Figure 19 : La tarière creuse	30
Figure 20 : Le marteau fond de trou	30
Figure 21 : La roto-percussion	30
Figure 22 : Equipements de forage [16].....	32
Figure 23 : Manchettes pour injection de type IRS	32
Figure 24 : Armatures d'un micropieu [21]	33
Figure 25 : Logo logiciel GEO5 [2].....	38
Figure 26 : Fonctionnalités du logiciel [2].....	39
Figure 27 : Quelques Acteurs du domaine des micropieux.....	40

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Etude comparative entre pieux et micropieux	13
Tableau 2 : Avantages et limites des micropieux	26
Tableau 3: Synthèse des contrôles et essais de réception des micropieux	35

LISTES DES ACRONYMES

IGU : Injection globale et unitaire

IRS : Injection répétée et sélective

DTU : Document Technique Unifié

Introduction générale

La stabilité et la durabilité des fondations constituent des éléments essentiels à la sécurité des ouvrages de génie civil. Cependant, de nombreux bâtiments ou infrastructures subissent, au fil du temps, des désordres tels que des tassements différentiels, des fissurations ou des affaissements, souvent liés à la nature du sol ou à des modifications des charges en service.

Face à ces problématiques, la réparation par micropieus s'impose comme une solution efficace, durable et peu invasive. Cette technique permet de renforcer ou de reprendre les fondations existantes sans nécessiter de lourdes interventions, tout en assurant une transmission optimale des charges vers les couches de sol plus résistantes.

Ce rapport présente les principes généraux de la réparation par micropieus, leurs caractéristiques techniques, les méthodes d'exécution ainsi que les critères de conception et de contrôle. L'objectif est de mieux comprendre le rôle des micropieus dans le renforcement des fondations et d'illustrer leur application dans des contextes géotechniques variés.

CHAPITRE 1

Présentation du Sujet

1.1. Introduction générale :

Les fondations constituent l'élément clé de toute construction, assurant la transmission des charges du bâtiment vers le sol. Lorsque le sol présente des caractéristiques instables ou que les fondations deviennent insuffisantes, des désordres tels que des fissures (Voir Figure1), des tassements ou des mouvements structurels peuvent apparaître. Ces phénomènes compromettent la stabilité et la durabilité de l'ouvrage, rendant nécessaire la mise en place de solutions de **réparation adaptées**.

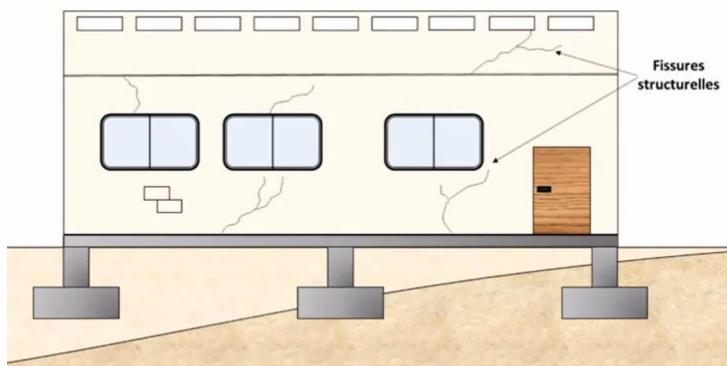


Figure 1: Fissures structurelles due à des tassements différentiels

1.2. Introduction aux pieux :

Parmi les solutions de fondations profondes, les pieux constituent une technique classique permettant de transférer les charges d'un ouvrage vers des couches de sol résistantes en profondeur, notamment lorsque le sol en surface est peu porteur ou que les fondations existantes présentent des désordres. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite souvent des engins importants et peut générer des nuisances (vibrations, bruit), ce qui limite leur utilisation en milieu urbain dense. Ces contraintes ont conduit au développement de solutions plus légères et plus flexibles, telles que les micropieux, capables d'assurer des performances satisfaisantes tout en s'adaptant aux sites contraints.

1.3. Définition et rôle des micropieux dans la construction :

Les micropieux sont des fondations profondes de petit diamètre, réalisés par forage et injection d'un coulis de ciment autour d'une armature métallique. Ils transfèrent les charges d'un ouvrage vers des couches de sol plus résistantes, utiles lorsque le terrain de surface est faible ou hétérogène.

Ils assurent le renforcement, la stabilisation et la reprise en sous-œuvre des fondations existantes, et sont particulièrement adaptés aux sites urbains confinés, aux ouvrages sensibles aux vibrations, ou aux sols présentant des contraintes géotechniques.

En construction neuve, ils transmettent les charges verticales et horizontales vers des sols stables, tandis qu'en réhabilitation, ils corrigent les désordres liés aux tassements, à l'érosion ou à l'insuffisance de portance. Leur installation verticale ou inclinée, avec un impact limité sur l'environnement immédiat, les rend adaptés aux bâtiments anciens, ouvrages d'art et structures sensibles.

Ainsi, les micropieux se distinguent par leur polyvalence, leur efficacité structurelle et leur capacité à s'adapter à des contextes géotechniques complexes, faisant d'eux un outil clé du génie civil moderne.

1.4. Comparaison : micropieux vs pieux classiques :

Les micropieux, pieux légers de petit diamètre, sont forés et remplis d'armature injectée de coulis, permettant leur installation dans des espaces restreints ou sous des structures existantes. Adaptés à des sols variés, y compris instables, ils limitent les excavations et assurent une reprise progressive des charges. Leur flexibilité, précision et durabilité en font une solution efficace pour le renforcement des fondations.

Tableau 1.1 : Etude comparative entre pieux et micropieux

Critère	Pieux classiques	Micropieux
Méthode	Lourde	Légère
Diamètre	Généralement > 250 mm	Petit (< 250 mm)
Armature	Armature massive selon dimension	Tube ou barre d'acier
Scellement	Coulis ou béton compacté	Coulis de ciment
Flexibilité de mise en œuvre	Faible	Élevée
Intrusion sur le site	Importante	Faible
Espaces restreints	Difficile à réaliser	Adapté aux espaces restreints
Types de sols	Sols porteurs stables	Tous types de sols, y compris argileux
Détection de dégradations	Nécessite étude préalable approfondie	Intervention rapide possible
Coût	Élevé	Relativement moins élevé
Durée des travaux	Longue	Plus courte
Efficacité	Très efficace pour charges lourdes	Efficace pour stabilisation et consolidation

1.5. Critères de choix entre pieux et micropieux :

La figure 2 compare différents types de pieux selon leur domaine d'application. Les micropieux se distinguent par leur grande adaptabilité aux terrains de faible résistance, aux milieux urbains contraints et aux travaux de reprise en sous-œuvre proches d'ouvrages existants. Leur capacité à reprendre des charges très concentrées reste toutefois inférieure à celle des pieux de grand diamètre. Le choix entre pieux classiques et micropieux dépend donc du contexte géotechnique, de la sensibilité de l'environnement et des conditions d'exécution. Grâce à leur flexibilité, les micropieux sont privilégiés pour le renforcement et la réparation des fondations existantes.[1]

Critères	Pieux →	Micropieux	Pieux tubés battus injectés	Pieux Atlas	Pieux forés	Pieux tarière creuse	Pieux moulés pilonnés base énergie FRANKI	Pieux battus moulés dans le sol	Pieux battus moulés pilonnés petit diamètre
Reprise de charges concentrées importantes	-3	-2	+1	+3	-2	+3	+3	+2	
Tassement différentiel	+2	+2	+2	+3	-2	+3	+3	+2	
Résistance aux efforts latéraux	-3	+2	+1	+3	-2	+2	+2	+2	
Résistance à la traction	+2	+2	+2	+2		+3	+3	+1	
Adaptations à la faible résistance du terrain		-1	+2	+1	-2	+3	+2	+1	
Niveau de vibrations	+3	+1	+3	+3	+3	-1	-1	-2	
Niveau de bruit	+1	+1	+3	+2	+3	+1	+1	+1	
Passage d'obstacles enterrés	+3	-2	-3	+1		-1	-1	-1	
Grande profondeur	+1	+1	+1	+3	+1	+1	+1	+1	
Possibilité d'exécution "en incliné"	+3	+1	+2	+1	-3	+3	+3	+3	
Exécution sous eau	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+3	
Exécution sous hauteur réduite	+3	+3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	
Niveau de recépage > 3 m sous le niveau du		+2	-3	+3	-2	+3	+3	+1	
Distance de l'axe par rapport à des bâtiments existants	+3	+3	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
Coûts relatifs	-1	-1	+2	-1	+2	+2	+2	+2	
Délai d'exécution	+1	+1	+2	-1	+2	+2	+2	+3	
Préavis requis	+1	+1	+3	+1	+3	+3	+3	+3	
Importance relative des frais fixes	-2	+2	+2	-2	+2	+1	+1	+2	
Adaptation aux variations pendant l'exécution	+2	+2	+3	+2	+3	+3	+3	+3	
Adaptation aux variations dans le sol	+1	+2	+1	+3	+1	+3	+3	+2	
Déviation pendant l'exécution	+2	-1	+1	+1	+1	+2	+2	+2	
Possibilités de "quality tests"	-2	+3	+1	+3	+2	+2	+2	+3	

Legend:

- Idéal (Green)
- à conseiller (Yellow)
- adapté (Light Green)
- moins adapté (Orange)
- à déconseiller (Red)
- pas applicable (Grey)

Figure 2:Critères de choix des pieux ou de micropieux [1]

1.6. Principes techniques des micropieux :

Le principe des micropieux repose sur le transfert des charges d'un ouvrage vers des couches de sol plus profondes et plus résistantes, afin d'éviter les zones de terrain défaillantes en surface. Ces éléments de petit diamètre sont mis en place par forage puis injection de coulis, et leur portance est assurée principalement par le frottement latéral entre le coulis et le sol, et parfois par appui en fond de pieu. Le choix des dimensions, de la profondeur et du type de micropieu dépend de l'étude géotechnique. Cette technique, qui garantit une bonne continuité mécanique entre l'acier et le coulis, est particulièrement adaptée aux interventions sous fondations existantes, permettant de renforcer ou stabiliser un ouvrage sans démolition importante. [8]

1.7. Domaines d'application des micropieux :

Les micropieux constituent une solution de fondation et de renforcement particulièrement adaptée aux terrains à faible portance, aux conditions d'accès difficiles, et aux constructions existantes nécessitant une reprise en sous-œuvre. Ils offrent une réponse fiable, compacte et polyvalente face aux contraintes géotechniques, structurelles et environnementales rencontrées sur les chantiers modernes.

De manière générale, les micropieux sont utilisés dans les domaines suivants :[9]

1.7.1. Reprise en sous-œuvre de fondations existantes :

La reprise en sous-œuvre renforce ou approfondit des fondations insuffisantes, souvent à cause de tassements différentiels ou d'augmentation de charges. Les micropieux (Voir Figure 3) transfèrent alors les efforts vers des sols résistants en profondeur, sans démolition, permettant d'intervenir sur des bâtiments occupés ou proches d'autres constructions.



Figure 3: Réalisation des micropieux de reprise en sous-œuvre [20]

1.7.2. Renforcement et stabilisation de bâtiments anciens :

Les micropieux sont largement utilisés pour stabiliser les bâtiments anciens (Voir Figure 4) présentant des fissures ou des affaissements. Ils assurent une reprise de charge efficace lorsque les fondations d'origine sont fragilisées ou mal dimensionnées. Cette solution, adaptée aux ouvrages patrimoniaux, permet de consolider la structure tout en préservant l'intégrité du bâti existant.



Figure 4: Micropieux pour Renforcement des bâtiments anciens [19]

1.7.3. Sites difficiles et conditions géotechniques complexes :

Les micropieux sont adaptés aux sites à accès restreint (Voir Figure 5). Leur petit diamètre et leur forage léger permettent une installation rapide et peu invasive. Utilisés lorsque les fondations classiques sont inadaptées, notamment en sols instables ou en présence d'eau, ils transmettent les charges vers des couches résistantes tout en limitant vibrations et nuisances.



Figure 5: Micropile lors des conditions géotechniques complexes [17]

1.7.4. Stabilisation de talus, glissements de terrain et fouilles :

Les micropieux sont largement utilisés pour stabiliser les pentes instables, les fouilles profondes (Voir Figures 6 et 7) et les zones sujettes aux glissements de terrain. En paroi berlinoise, ils servent à ancrer le sol et à renforcer les structures de soutènement lors des excavations.

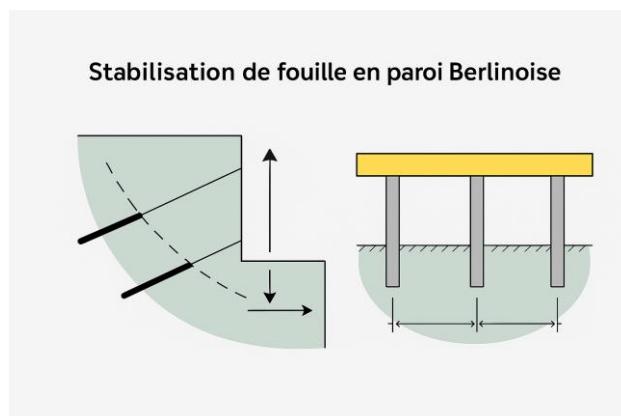


Figure 6: Stabilisation des fouilles [4]

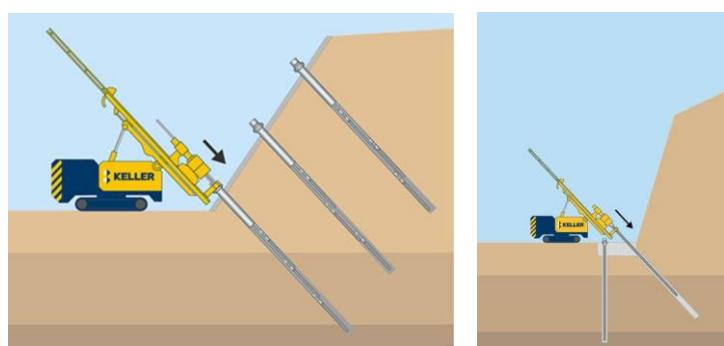


Figure 7: Stabilisation d'un talus [14]

1.7.5. Constructions neuves sur sols médiocres :

Dans les projets neufs, les micropieux servent à fonder les ouvrages sur des terrains à faible portance. Ils garantissent une base solide et réduisent les tassements, notamment sur les sols argileux, limoneux ou remblayés. (Voir Figure 8)



Figure 8: Utilisation des micropieux pour constructions neuves [18]

1.7.6. Renforcement d'ouvrages d'art :

Les micropieux sont utilisés pour renforcer les ouvrages d'art tels que les ponts (Voir Figure 9), viaducs, murs de soutènement ou piles. Ils permettent de transférer les charges vers des couches de sol plus résistantes, assurant ainsi la stabilité et la pérennité de la structure.

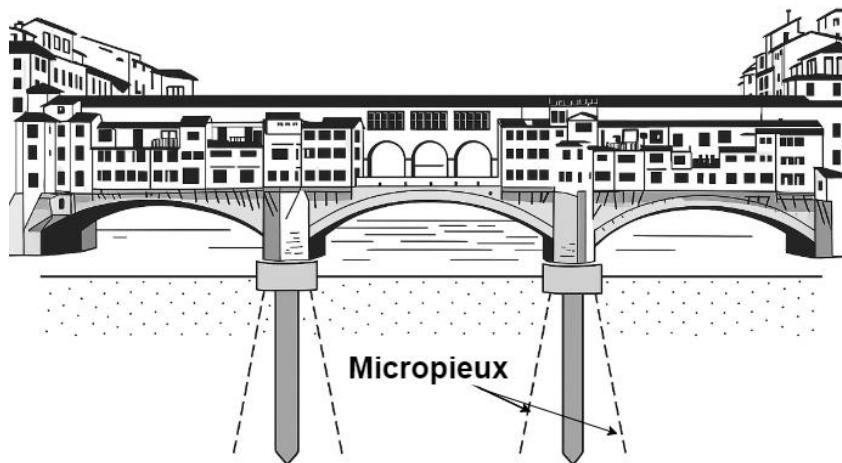


Figure 9:Reprise en sous-œuvre du Pont Vecchio à Florence [5]

1.7.7. Réparation et confortement après sinistres :

Après un sinistre lié au retrait-gonflement des argiles (Voir Figure 10), à un mouvement de terrain ou à une perte de portance du sol, les micropieux permettent de restaurer et de consolider les fondations existantes sans nécessiter de démolition majeure.[11]



Figure 10: Réparation par micropieux après sinistres [15]

1.7.8. Ancrage et stabilisation d'éléments structurels :

Les micropieux servent également à ancrer et stabiliser des structures telles que les écrans de soutènement, les pylônes (Voir Figure 11) ou les mâts. Ils garantissent la reprise des efforts horizontaux et verticaux, renforçant la sécurité et la durabilité de ces ouvrages.

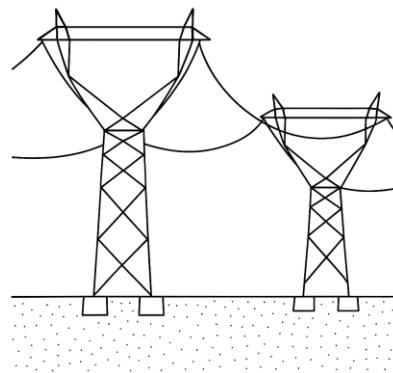


Figure 11: Stabilisation des pylônes [4]

1.8. Conclusion :

L'étude des pieux et des micropieux met en évidence l'évolution des techniques de fondation vers des solutions plus adaptées, précises et respectueuses des contraintes du terrain. Grâce à leur polyvalence et leur facilité d'exécution, les micropieux s'imposent aujourd'hui comme une alternative performante aux pieux classiques, notamment dans les projets de réhabilitation et de reprise en sous-œuvre. Ce chapitre a ainsi posé les bases nécessaires à la compréhension des principes techniques et du domaine d'application des micropieux, qui seront approfondis dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2

Caractéristiques des Micropieux

Chapitre 2 : Caractéristiques des Micropieux

2.1. Introduction :

Les micropieux sont des éléments de fondation de **petit diamètre généralement <250 mm**, forés et injectés avec du coulis de ciment pour transmettre les charges au sol porteur, qui se caractérise par leurs types et procédé d'exécution.

Ils permettent de renforcer ou de stabiliser des fondations existantes, même dans des espaces restreints ou sur des sols difficiles.

2.2. Micropieux : Types et Spécifications

Les micropieux sont classés en quatre types principaux (I à IV), différenciés selon leur méthode de mise en œuvre, la technique d'injection utilisée, et la nature des efforts à reprendre. Leur typologie, définie par le DTU 13.2, repose sur le procédé d'exécution, la pression d'injection du coulis et la configuration de l'armature, permettant ainsi d'adapter chaque type de micropieu aux conditions géotechniques et aux exigences structurelles du projet.

Ces types se distinguent également selon leur fonction structurelle : micropieux de compression, de traction ou d'ancre. Le choix dépend de la nature du sol, des charges à reprendre et des conditions d'exécution. (Voir Figure 12).

2.2.1. Types des micropieux :

Le **DTU 13.2** distingue quatre grands types de micropieux en fonction de la méthode de forage et du mode d'injection :

Type I :

Ce type de micropieu est principalement destiné à la reprise de faibles efforts et présente une résistance limitée à la flexion. Le mortier de scellement utilisé contient en moyenne 500 kg de ciment par mètre cube, assurant une cohésion suffisante pour des charges modérées. Le coulis de ciment est mis en place par gravité directement dans le forage, ce qui simplifie la mise en œuvre tout en garantissant un bon remplissage du trou. Ce procédé est particulièrement adapté aux sols peu compressibles et convient aux ouvrages sollicités par des charges modérées, où une forte résistance à la flexion n'est pas requise. [4]

Type II :

Le micropieu de type II est un pieu foré et armé, injecté sous faible pression, conçu pour reprendre des efforts plus importants que ceux du type I. Le coulis de scellement utilisé est généralement un mortier dosé à au moins 1 200 kg de ciment par mètre cube, garantissant une meilleure résistance mécanique. L'injection du coulis s'effectue en une seule étape, après le forage et la mise en place de l'armature, permettant une bonne adhérence entre le sol et le micropieu. Ce type de micropieu est particulièrement adapté aux sols hétérogènes et aux ouvrages soumis à des charges normales. [4]

Type III : Injection Globale et Unique IGU

Le micropieu de type III correspond à un pieu foré injecté sous une pression supérieure ou égale à 1 MPa, à l'aide d'un coulis dosé à au moins 1 200 kg de ciment par mètre cube. Ce procédé d'injection sous pression permet d'améliorer la compacité du sol environnant et d'augmenter la capacité portante du micropieu. Grâce à cette technique, le type III est particulièrement adapté aux sols compressibles ou irréguliers ainsi qu'aux ouvrages soumis à des charges importantes. [12]

Type IV : Injection répétée et sélective IRS

Le micropieu de type IV est un pieu foré injecté sous une pression supérieure ou égale à 1 MPa, utilisant un coulis dosé à au moins 1 200 kg de ciment par mètre cube. Sa particularité réside dans la réalisation d'injections multiples, permettant un contrôle précis de la pression et un ajustement en fonction de la résistance du sol rencontré. Cette technique offre une amélioration significative du contact sol-ciment et une augmentation de la portance. Les micropieus de type IV sont ainsi privilégiés pour les sols très hétérogènes, les charges particulièrement lourdes et les projets de fondations complexes exigeant une grande fiabilité. [4]

TYPES des micropieux -DTU 13.2			
TYPE I	TYPE II	TYPE III	TYPE IV
Micropieu foré et tubé sans armatures	foré et accompagné d'armatures	foré et accompagné d'armatures	foré et accompagné d'armatures
Remplissage gravitaire Remplissage en pression	Remplissage gravitaire Remplissage faible pression	Injection Globale et Unique IGU ($P > 1 \text{ MPa}$)	Injection répétée et sélective IRS
Le coulis de ciment est injecté par gravité dans le forage.	Injection d'un coulis sous pression à une seule étape après forage et mise en place de l'armature.	Injection quantité de coulis en une seule fois(injection unique) .	Injection multiple avec contrôle de pression et ajustement selon la résistance du sol.

Figure 12 : Types des micropieux

2.2.2. Techniques d'exécution selon le type de micropieu :

La classification des micropieus selon les étapes d'exécution, définie par le **DTU 13.2**, repose sur la manière dont le coulis de scellement est injecté et sur le contrôle exercé lors de cette injection. Cette approche permet de distinguer **quatre types principaux**, chacun correspondant à un niveau croissant de technicité et d'efficacité du transfert de charge vers le sol.

Type I : (Voir Figure 13)

- ➔ **Forage** : Réalisation du forage à l'aide d'un tubage approprié.
- ➔ **Remplissage du tubage** : Introduction du **coulis de mortier**, (avec éventuellement la mise en place des **armatures**.)
- ➔ **Dé-tubage** : Retrait du tubage tout en maintenant la **pression sur le mortier**, afin d'assurer sa compaction et son adhérence au sol.

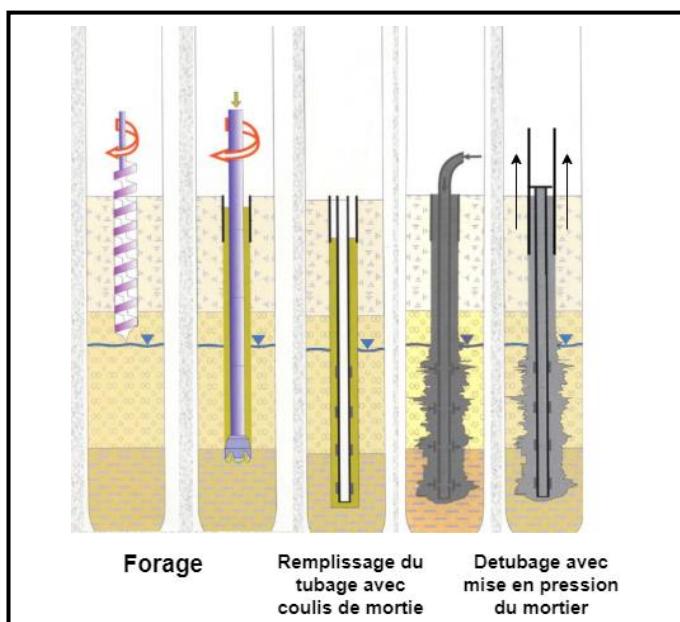


Figure 13: Etapes d'exécution du micropieu de type I [1]

Type II : (Voir Figure 14)

- ➔ **Forage** : Réalisation du forage à l'aide de la **ligne d'outils adaptée** au diamètre et à la profondeur du micropieu.
- ➔ **Mise en place de l'armature** : Insertion de la **barre ou du tube d'armature** dans le forage préparé.

- ➔ **Remplissage du forage** : Injection du **coulis ou du mortier** au niveau du pied de l’armature, soit **gravitairement**, soit **sous faible pression**, afin d’assurer une bonne adhérence avec le sol et l’armature.

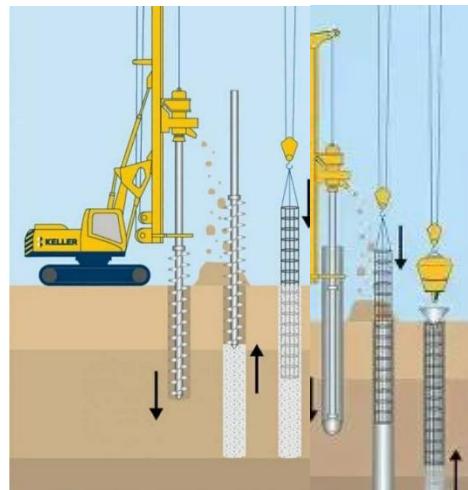


Figure 14: Etapes d'exécution du type II [14]

Type III : Injection Globale et Unique IGU (Voir Figure 15)

- ➔ **Forage** : Réalisation du forage, **avec ou sans tubage**, selon les conditions du sol.
- ➔ **Mise en place du coulis de gaine** : Remplissage initial du forage pour assurer le contact avec le sol.
- ➔ **Insertion de l’armature** : Installation de l’armature équipée de **manchettes** (soit un tube micropieu avec manchettes, soit des barres avec tube à manchettes).
- ➔ **Injection en tête** : Injection du coulis ou mortier en **une seule phase** (IGU – Injection Globale et Unique) sous **pression supérieure ou égale à 1 MPa**, garantissant la continuité et la compaction du micropieu.



Figure 15: Etapes d'exécution de type IGU [13]

Type IV : Injection répétée et sélective IRS (Voir Figure 16)

- ➔ **Forage** : Réalisation du forage, **avec ou sans tubage**, en fonction des caractéristiques du sol.
- ➔ **Mise en place du coulis de gaine** : Remplissage initial du forage pour assurer un **bon contact avec le sol**.
- ➔ **Insertion de l'armature** : Installation de l'armature équipée de **manchettes** (tube micropieu avec manchettes ou barres avec tube à manchettes).
- ➔ **Injection en tête** : Injection multiple du coulis ou du mortier (**IRS – Injection Répétée Sélective**) sous pression $\geq 1 \text{ MPa}$, garantissant la **continuité, la compaction et l'ancrage optimal** du micropieu.



Figure 16: Etapes d'exécution de type IRS [13]

2.3. Orientation et disposition des micropieux :

Les micropieux peuvent être **implantés verticalement** ou **inclinés** (Voir figure 17), selon les contraintes du site et la nature des efforts à reprendre.

- **Les micropieux verticaux** sont généralement utilisés pour la reprise des charges verticales, notamment celles liées au poids propre des structures ou aux surcharges d'exploitation.
- **Les micropieux inclinés**, quant à eux, sont privilégiés lorsque l'ouvrage est soumis à des **efforts horizontaux** ou à des **mouvements de terrain**, tels que les poussées de remblais ou les glissements de talus.

Cette flexibilité d'orientation permet d'adapter la solution de fondation ou de renforcement aux spécificités géotechniques du terrain et à la configuration structurelle de l'ouvrage à soutenir.

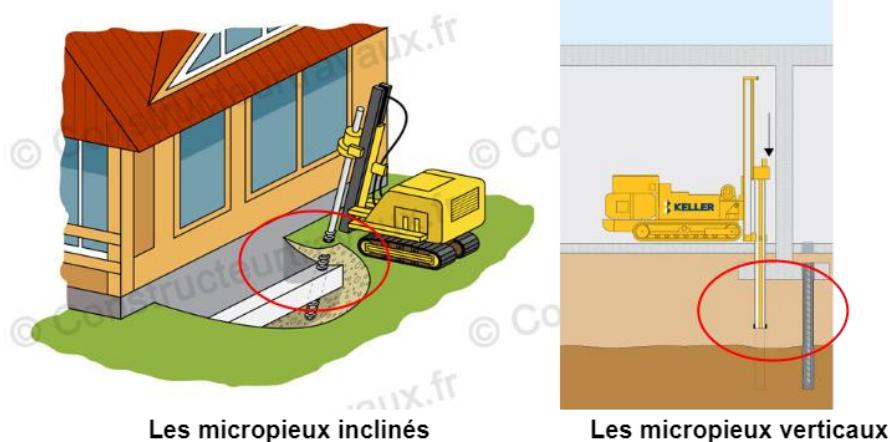


Figure 17 : Disposition des micropieux [12]

2.4. Comportement des Micropieux :

2.4.1. Frottement latéral :

Étant donné la faible section des micropieux, la charge est principalement transmise au sol par frottement latéral. Pour les micropieux de type II, l'injection sous pression augmente ce frottement en créant un bulbe de scellement avec une surface irrégulière qui améliore l'adhérence au sol, et en consolidant le terrain autour du pieu. De plus, le coulis devient plus rigide dans les sols perméables ou peu perméables, renforçant l'adhérence à l'acier et réduisant le risque de rupture. En comparaison, les micropieux de type I, avec une faible pression de mortier, ne font que compenser la décompression du sol après forage.[5]

2.4.2. Effet de groupe :

Lorsque plusieurs pieux sont proches les uns des autres, la capacité portante du groupe de pieux peut différer de la somme des capacités des pieux pris isolément. Ce phénomène, appelé effet de groupe, est caractérisé par le coefficient d'efficacité C_e :

$$C_e = \frac{\text{charge limite du groupe}}{n \cdot \text{charge limite du pieu isolé}}$$

Avec n le nombre de pieux du groupe. L'effet de groupe est négligeable pour les pieux travaillant en pointe et ne devient significatif que pour les pieux résistant par frottement latéral, comme c'est le cas pour la plupart des micropieux. Selon le type de sol, le mode d'exécution et l'espacement des pieux, la capacité portante du groupe peut être légèrement supérieure ou inférieure à la somme des portances des pieux isolés.

Des essais réalisés par **MM. LIZZI** (Voir Figure 18) sur des modèles réduits de micropieux montrent que l'espacement entre les pieux influence directement le coefficient d'efficacité C_e , ce qui affecte la capacité portante du groupe de pieux.[5]

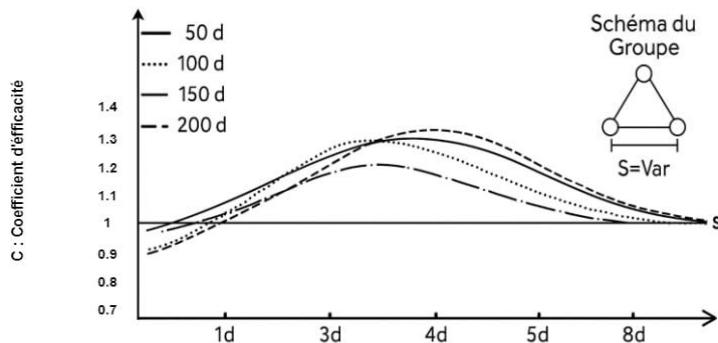


Figure 18 : Coefficient d'efficacité des pieux en groupe [5]

2.5. Avantages et limites de la technique des micropieux :

L'analyse des avantages et des limites permet d'évaluer avec précision la pertinence des micropieux en fonction des spécificités du projet et des conditions géotechniques rencontrées. Bien qu'ils constituent une solution performante et adaptable pour la reprise de fondations et les interventions en milieux contraints, leur mise en œuvre exige un suivi rigoureux ainsi qu'une reconnaissance géotechnique approfondie. La connaissance de leurs avantages constitue un levier pour optimiser le choix technique, tandis que la maîtrise de leurs limites demeure indispensable pour répondre efficacement aux exigences d'exécution et de durabilité de l'ouvrage.

Les principaux avantages et limites des micropieux sont regroupés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2) :

Tableau 1 : Avantages et limites des micropieux

Aspects	Avantages	Limites
Mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> - Faible encombrement du matériel - Possibilité d'intervention dans des zones à accès difficile ou confinées - Vibrations et nuisances sonores très réduites 	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure d'exécution délicate nécessitant une main-d'œuvre qualifiée - Temps d'exécution parfois plus long que les pieux classiques
Performance technique	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne capacité portante et forte adhérence sol-structure - Adaptation à divers types de sols, y compris ceux de faible cohésion - Compatible avec la reprise en sous-œuvre d'ouvrages existants 	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance limitée en traction ou flexion selon le type - Sensibilité à la qualité du coulis et au contrôle de l'injection
Économie et durabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des coûts d'intervention pour des ouvrages existants - Peu d'impact sur les structures voisines - Longue durée de vie si bien exécutés 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût unitaire relativement élevé - Nécessite une reconnaissance géotechnique approfondie
Applications	<ul style="list-style-type: none"> - Reprise de fondations défaillantes - Travaux en site urbain ou en milieu contraint - Stabilisation de talus ou d'ouvrages enterrés 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins adapté aux charges très élevées ou aux terrains fortement hétérogènes

2.6. Conclusion :

En conclusion, les micropieux représentent une solution de fondation et de renforcement performante, adaptée à une grande variété de contextes géotechniques. Leur diversité typologique permet de répondre efficacement aux besoins spécifiques de chaque projet, qu'il s'agisse de charges verticales, horizontales ou de reprises en sous-œuvre. Leur souplesse d'orientation et de mise en œuvre constitue un atout majeur, notamment en milieu contraint. Toutefois, la maîtrise de leurs limites et le contrôle rigoureux de l'exécution demeurent essentiels pour garantir la durabilité et la performance de l'ouvrage.

CHAPITRE 3

Etapes & Méthodologie d'Exécution

3.1. Introduction :

L'exécution des micropieux requiert une méthodologie rigoureuse afin de garantir la **qualité**, la **durabilité** et la **capacité portante** de l'ouvrage. Chaque étape du processus, depuis la préparation du site jusqu'au contrôle final, doit être réalisée conformément aux prescriptions du **DTU 13.2** et aux prescriptions des normes **EN 14199** et **NF P94-262**.

Cette procédure repose sur une succession d'opérations précises visant à assurer la **stabilité du forage**, la **bonne mise en place du coulis et des armatures**, ainsi que le **contrôle de la qualité des injections**. Les différentes phases d'exécution sont adaptées en fonction du type de micropieu (Type I, II, III ou IV), de la nature du sol et des conditions du chantier.

3.2. Étude préliminaire :

Avant toute installation de micropieux, la réalisation d'une **étude géotechnique approfondie** est une étape essentielle. Elle permet de comprendre la **nature du sol**, sa **stratification** et sa **résistance mécanique**, afin de concevoir un système de renforcement adapté. Une mauvaise caractérisation du sol peut en effet conduire à une sous-estimation des longueurs nécessaires des micropieux ou à des solutions inadaptées.

L'étude comprend généralement plusieurs **investigations de terrain et de laboratoire** telles que :

- Des **sondages SPT** pour estimer la résistance du sol et son indice de compacité.
- Des **essais pressiométriques** permettant de mesurer les **modules de déformation in situ**.
- Des **carottages** destinés à l'analyse granulométrique et à l'identification des horizons du terrain.
- Parfois des **mesures de perméabilité** pour évaluer la circulation de l'eau et la stabilité du coulis d'injection.

Ces données permettent de **localiser les couches résistantes**, d'évaluer le **tassement potentiel**, et d'estimer la **capacité portante** du sol. Elles sont ensuite utilisées pour déterminer le **diamètre**, la **profondeur**, le **type de coulis**, ainsi que le **mode d'exécution** des micropieux.

3.3. Pose de micropieux :

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes étapes de la pose des micropieux, depuis le forage jusqu'à leur mise en charge. Chaque phase du processus joue un rôle essentiel pour assurer la qualité, la durabilité et l'efficacité du renforcement des fondations.

3.3.1. Réalisation du forage :

Le forage du sol constitue la première étape de la mise en œuvre des micropieux. Il consiste à percer le terrain à l'aide d'outils adaptés à la nature du sol, tels que la tarière creuse, le marteau fond de trou ou la roto-percussion (Voir Figures 19,20,21). Cette opération permet de créer les trous de forage dans lesquels seront ensuite insérés les micropieux. Pendant le forage, un fluide est souvent utilisé pour stabiliser les parois du trou. La localisation, la profondeur et le diamètre des forages sont déterminés à partir des résultats de l'étude géotechnique préalable, assurant une implantation précise et conforme aux caractéristiques du sol rencontré.

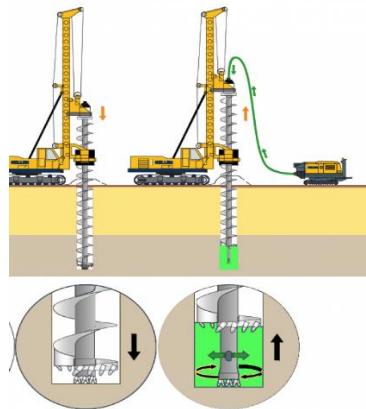


Figure 19 : La tarière creuse



Figure 20 : Le marteau fond de trou



Figure 21 : La roto-percussion

3.3.2. Mise en place de l'armature :

La mise en place de l'armature constitue une étape essentielle dans la réalisation des micropieux. L'armature en acier est installée sur toute la profondeur du forage afin de renforcer le pieu et de lui permettre de résister aux efforts verticaux et horizontaux. Il est important de centrer correctement l'armature pour garantir un enrobage homogène par le coulis de ciment et éviter tout contact direct avec le sol, ce qui assure la durabilité et la stabilité du micropieu.

3.3.3. Injection du coulis de ciment :

Une fois l'armature en place, le forage est rempli par un coulis de ciment qui remplace le fluide initial utilisé lors du forage. Ce fluide, de masse volumique plus faible, remonte naturellement lors de l'injection, permettant un remplissage complet du forage. Le coulis solidifie l'armature dans le sol et, dans le cas des micropieux de type II, forme un bulbe de scellement capable de transférer efficacement les efforts du sol vers le pieu. La profondeur et le dimensionnement du micropieu sont définis après une étude géotechnique et le calcul des charges de l'ouvrage, afin de garantir la capacité portante et la stabilité de l'ensemble.

3.4. Connexion aux fondations :

Une fois l'ancrage réalisé et le coulis complètement durci, les micropieux sont connectés à l'ouvrage existant au moyen d'éléments en béton armé. Cette connexion permet d'assurer la transmission des efforts de la structure vers les micropieux et garantit ainsi un travail en continuité avec les fondations existantes. Elle constitue la dernière étape de mise en œuvre, car elle assure définitivement la reprise de charge par les micropieux et la stabilisation de l'ouvrage.

3.5. Matériel utilisé pour la mise en œuvre des micropieux :

La réalisation des micropieux nécessite un **ensemble d'équipements spécialisés** permettant d'assurer le forage, l'injection du coulis, ainsi que la mise en place des armatures et des dispositifs d'injection. Le choix du matériel dépend de la nature du terrain, du type de micropieu et des conditions d'accès au chantier.

a) Équipements de forage :

Le forage est réalisé à l'aide de **foreuses légères, compactes et polyvalentes**, adaptées aux travaux en site exigu ou en sous-œuvre. Les principaux équipements utilisés sont :

- Les **foreuses rotatives ou roto-percutantes**, montées sur chenilles ou sur châssis portatif
- Les **tiges de forage et outils de coupe** (trépan, taillant tricône, tarière, etc.) choisis selon la nature du sol ou de la roche ;
- Les **circuits de circulation des fluides de forage**, permettant l'évacuation des déblais et le maintien de la stabilité du trou. (Voir figure 22)



Figure 22 : Equipements de forage [16]

b) Systèmes d'injection :

L'injection du coulis de ciment est réalisée à l'aide :

- D'un **malaxeur à haute performance**, garantissant l'homogénéité du coulis ;
- D'une **pompe à injection** (simple ou double effet) permettant de maintenir une pression de 0,5 à 4 MPa selon le type de micropieu ;
- D'un **tuyau plongeur** ou d'un **tube à manchettes** (voir figure 23), selon la technique d'injection adoptée (simple, répétitive ou sélective).

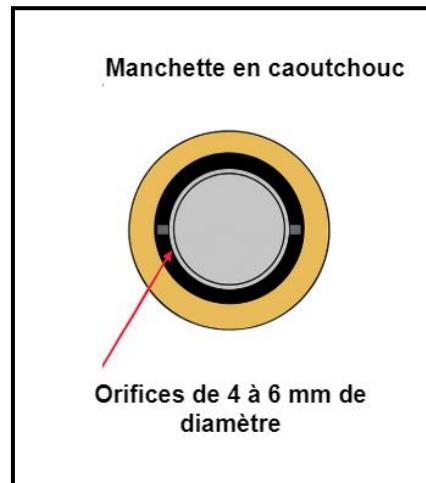


Figure 23 : Manchettes pour injection de type IRS

c) Armatures :

Les micropieux sont armés par (Voir Figure 24) :

- Des **barres en acier haute adhérence (HA)** ;
- Des **tubes métalliques** pouvant servir à la fois d'armature et de système d'injection ;
- Des **cadres d'espacement ou cales de centrage** assurant un bon enrobage de coulis autour de l'armature.



Figure 24 : Armatures d'un micropieu [21]

d) Matériaux d'injection :

Le coulis utilisé est principalement un **mélange de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants** destinés à améliorer la stabilité, la fluidité et la résistance mécanique. La teneur minimale en ciment est généralement de **1 200 kg/m³**, conformément aux exigences du **DTU 13.2**.

3.6. Contrôles et essais des Micropieux :

Afin de garantir la qualité d'exécution et la capacité portante réelle des micropieux, plusieurs essais peuvent être réalisés in situ. Les principaux sont [22] :

Types d'essais :

- **Essais de chargement statique :**
 - **Objectif** : Mesurer la capacité portante d'un micropieu sous compression ou traction.
 - **Méthode** : Application progressive d'une charge par paliers. Chaque palier est maintenu un certain temps pour mesurer le déplacement du micropieu.
 - **Contrôle** : Un essai de contrôle est effectué pour vérifier la capacité portante jusqu'à 1.3 fois la charge de service prévue. Un essai à la rupture est réalisé jusqu'à l'arrachement du micropieu pour connaître sa capacité maximale.
- **Essais de chargement dynamiques :**
 - **Objectif** : Contrôler la capacité portante de manière rapide et non destructive.
 - **Méthode** : Utilisation de capteurs et d'un marteau pour mesurer les impacts et calculer la force statique et le déplacement en temps réel.
 - **Avantages** : Rapidité, facilité de transport et méthode "tout-terrain".

- **Essais d'intégrité :**
 - **Objectif** : Vérifier la qualité et l'intégrité du micropieu et de son scellement.
 - **Méthode** (méthode impulsionale) : Frappe du micropieu avec un marteau pour analyser l'onde de choc qui remonte.
 - **Contrôle du scellement** : Un essai de chargement à 1,5 fois la charge de service est effectué pour s'assurer qu'il n'y a pas de rupture.

- **Essai d'arrachement :**

L'essai d'arrachement consiste à appliquer une charge croissante sur un micropieu afin de mesurer sa résistance à l'extraction et son comportement sous contrainte.[22]

- **Objectif** : déterminer la résistance maximale que peut supporter un micropieu avant sa rupture, tout en analysant le comportement du sol (adhérence, frottement et cohésion) afin de vérifier la conformité de l'ancrage aux normes en vigueur.
- **Procédure** : préparer la tête du micropieu, installer un vérin hydraulique relié à un système de mesure et à des poutrelles d'appui servant de référence. La charge est appliquée progressivement en tête du micropieu tandis que les déplacements sont mesurés avec précision. Enfin, les forces appliquées et les tassements sont enregistrés afin d'évaluer la performance du micropieu et de déterminer sa résistance à l'arrachement.

3.7. Les Normes et Critères des essais :

Les essais sur micropieus doivent être réalisés conformément aux prescriptions de la norme NBN EN 14199, ainsi qu'aux autres références pertinentes telles que la NFP-94-242-1. Ces normes définissent les procédures détaillées pour les essais de chargement statique, dynamique et de vérification d'intégrité, garantissant la qualité et la sécurité des micropieus. Les critères de réception varient en fonction du type d'essai. Par exemple, lors d'un essai de contrôle de fluage, l'allongement relatif mesuré ne doit pas dépasser 2 mm sur la période spécifiée, assurant ainsi que le micropieu peut supporter les charges prévues sans déformation excessive.

Tableau 3.2: Synthèse des contrôles et essais de réception des micropieux

Type d'essai	Objectif principal	Méthode / Principe	Fréquence indicative	Critère de réussite
Essai de traction	Vérifier la résistance à l'arrachement du micropieu	Application d'une charge de traction progressive à l'aide d'un vérin hydraulique	1 essai pour 50 micropieux	Déformation admissible et résistance \geq charge de calcul
Essai de compression	Contrôler la capacité portante verticale	Application d'une charge verticale croissante simulant les charges de service	1 essai pour 200 micropieux	Tassement mesuré \leq valeur limite spécifiée
Essai de portance	Vérifier le comportement global sous charge de service	Mesure du déplacement sous charge de service (statique ou cyclique)	Selon importance du projet	Comportement stable et absence de fluage excessif
Contrôle d'injection	S'assurer de la qualité du coulis et du respect des pressions	Mesure du volume de coulis injecté et du suivi des pressions d'injection	Permanent (chaque micropieu)	Pression conforme au plan d'exécution (≥ 1 MPa selon type)
Essai de convenance	Valider la méthode avant exécution en série	Réalisation d'un micropieu test pour observation du comportement réel	Avant début des travaux	Résultats conformes aux hypothèses de calcul

3.8. Sécurité et précautions d'exécution :

La réalisation des micropieux nécessite une attention particulière en matière de sécurité et de qualité d'exécution. Les opérations de forage, d'injection et de manipulation des équipements doivent être encadrées par un personnel qualifié et formé aux risques liés aux travaux géotechniques. Il est essentiel de veiller à la stabilité des abords du chantier, à la protection des réseaux existants et à la prévention des projections de coulis ou des éboulements.

Des contrôles réguliers doivent être effectués sur les pressions d'injection, la profondeur de forage et la conformité des matériaux utilisés. Le respect des normes en vigueur (NF P94-262, EN 14199) garantit non seulement la sécurité du chantier, mais aussi la durabilité et la performance du renforcement réalisé.

3.9. Conclusion :

La mise en œuvre des micropieux repose sur une méthodologie rigoureuse, alliant précision technique et respect des procédures d'exécution. Chaque étape ; du forage à l'injection, en passant par la mise en place des armatures, joue un rôle déterminant dans la qualité et la performance finale de l'ouvrage. Le succès d'un tel projet dépend de la maîtrise des paramètres d'exécution, du contrôle permanent sur le terrain et du respect strict des normes techniques en vigueur. Cette approche garantit la fiabilité du renforcement et la pérennité de la structure fondée.

CHAPITRE 4

Outils et Acteurs du domaine

4.1. Introduction :

Le dimensionnement des micropieux constitue une étape essentielle dans la conception et la réussite d'un projet de **réparation** ou de **renforcement de fondations**. Il vise à garantir la **stabilité, la durabilité et la sécurité** de l'ouvrage en tenant compte des **caractéristiques géotechniques du sol**, des **charges à reprendre** et du **type de micropieu retenu**. Les calculs portent à la fois sur la **capacité portante en compression et en traction**, la **résistance du fût et de la pointe**, ainsi que sur la **déformation admissible** du système sol–structure.

Afin d'assurer une précision optimale et de réduire les incertitudes, le recours à des **outils numériques spécialisés** tels que **GEO5 – Module Micropieux** s'avère indispensable.

4.2. Le Logiciel GEO5 – Micropieux :

4.2.1. Présentation du Logiciel :

Le module **Micropieux** du logiciel **GEO5**(Voir Figure 25), développé par la société Fine Software, est aujourd’hui considéré comme l’un des outils de référence pour le dimensionnement, la vérification et l’optimisation des micropieux tubulaires. Il permet d’analyser avec précision le comportement du micropieu sous différents types de sollicitations (traction, compression, flexion, etc.), tout en respectant les exigences des normes européennes **EN 14199** et **Eurocode 7**. Grâce à son approche rigoureuse et à ses outils de calcul performants, ce module offre à l’ingénieur un support fiable pour concevoir des solutions de renforcement et de réparation adaptées aux contraintes géotechniques réelles du projet.



Figure 25 : Logo logiciel *GEO5* [2]

Le programme évalue notamment :

- La capacité portante de la pointe du micropieu, en fonction de la résistance du sol d'ancre.
- La résistance du fût, déterminée à partir de l'adhérence sol–coulis et coulis–armature.
- Les déplacements verticaux sous charges appliquées.
- Les efforts internes dans le tube d'acier et le coulis.
- La sécurité globale, tant vis-à-vis des états limites ultimes que des états limites de service.

4.2.2. Fonctionnalités principales :

Le logiciel présente une interface intuitive et offre des outils avancés permettant une étude complète et rigoureuse du micropieu. Il permet d'introduire le profil géotechnique du terrain, en intégrant les différentes couches de sol et leurs propriétés mécaniques (cohésion, angle de frottement, module d'Young, etc.), ainsi que de définir les caractéristiques géométriques du micropieu telles que sa longueur, son diamètre, son inclinaison et le type d'armature utilisé. Il donne également la possibilité de choisir le mode d'injection (simple, répétitive ou sous pression) en fonction de la technique d'exécution prévue. Le logiciel effectue automatiquement les vérifications de portance au niveau du fût et de la pointe, calcule les efforts internes et génère des diagrammes de contraintes et de déplacements. Enfin, il produit des rapports détaillés conformes aux normes, ce qui facilite la documentation technique et le suivi du projet.

Le logiciel offre une interface intuitive et des outils performants facilitant l'étude complète du micropieu. Parmi les fonctionnalités les plus importantes (Voir figure 26) :

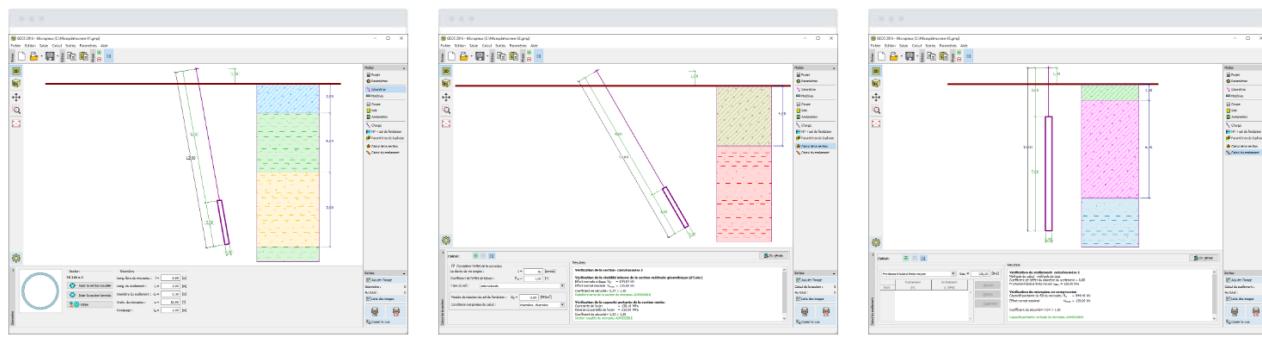


Figure 26 : Fonctionnalités du logiciel [2]

→L'utilisation d'un outil comme **GEO5 – Micropieus** représente un véritable atout pour l'ingénieur géotechnicien. Il permet de réaliser des analyses précises, rapides et conformes aux normes internationales, tout en offrant une modélisation réaliste de l'interaction sol–structure. Grâce à son approche intégrée, le logiciel facilite la compréhension du comportement du micropieu dans son environnement géotechnique et aide à optimiser la conception. Ainsi, il contribue non seulement à renforcer la sécurité globale de l'ouvrage, mais également à rationaliser les coûts liés aux travaux de réparation ou de confortement.

4.3. Acteurs du domaine des micropieux en Tunisie :

En Tunisie, plusieurs entreprises spécialisées en fondations spéciales interviennent dans la réalisation de micropieux. Parmi elles, **Ginger Hydrosol Foundations** se distingue par son expertise en géotechnique et travaux spéciaux tels que les injections et ancrages. **S&G Structures & Géotechniques** propose également des micropieux pour renforcer et consolider les ouvrages. D'autres acteurs comme **Medina Construction** et **SOMATRA-GET** interviennent sur des projets nécessitant des fondations profondes et des techniques de micropieux pour stabiliser le sol et transférer les charges efficacement. (Voir Figure 27).



Figure 27 : Quelques Acteurs du domaine des micropieux.

Hydrosol Foundations a acquis une solide expérience dans l'exécution de travaux de renforcement et de soutènement par micropieux, aussi bien pour des bâtiments que pour des infrastructures. Parmi ses réalisations les plus significatives, on peut citer :

- Le renforcement d'un immeuble à **Ennasr II**
- Les travaux réalisés sur les **cuvettes à gasoil du Grand Dépôt Farhat Hached** à Tunis
- L'intervention sur la **résidence de l'ambassadeur d'Autriche** à Gammarth
- Le confortement structurel de l'immeuble **CNRPS** à El Menzah VI
- Les travaux de fondations réalisés sur le projet des **Jardins de Carthage** à Gammarth
- L'intervention au niveau du **Pont de Oued El Akarit** à Gabès
- Ainsi que les travaux menés sur le **chantier de Korbous**

4. Recommandations pour l'amélioration des pratiques

Pour assurer la qualité et la durabilité des travaux de micropieux, il est essentiel de **standardiser les protocoles de contrôle qualité**, tant sur le chantier qu'en laboratoire. La formation continue des équipes sur les **nouvelles techniques d'injection** et l'utilisation des **outils numériques** est également cruciale pour garantir l'efficacité des interventions.

Une **planification rigoureuse et une coordination optimale** entre le bureau d'études, les fournisseurs et les entreprises d'exécution permettent de réduire les erreurs et d'améliorer la productivité. Enfin, la mise en place d'un **suivi post-intervention** est recommandée pour détecter rapidement tout tassement ou défaut d'ancrage, assurant ainsi la sécurité et la pérennité des ouvrages.

5. Conclusion

Les micropieux représentent une solution technique performante et polyvalente, mais leur efficacité dépend d'une combinaison d'expertise technique, d'outils adaptés et d'une coordination efficace entre tous les acteurs du projet.

L'évolution des matériaux, des techniques d'injection et des outils numériques offre de nouvelles perspectives pour réaliser des interventions plus fiables, plus rapides et plus durables, tout en garantissant la sécurité et la pérennité des structures.

Conclusion Générale

La réparation par micropieux constitue une solution fiable, efficace et durable pour le renforcement et la stabilisation des fondations existantes. Grâce à leur souplesse d'exécution et à leur capacité d'adaptation à des environnements complexes, les micropieux permettent d'intervenir aussi bien en milieux urbains confinés que sur des structures anciennes ou fragilisées, tout en limitant les nuisances et les perturbations sur les ouvrages en place.

Le succès d'une telle intervention repose avant tout sur une étude géotechnique approfondie, permettant d'identifier avec précision la nature du sol, les causes des désordres et les conditions d'ancrage optimales. À cela s'ajoutent une conception rigoureuse, fondée sur des calculs adaptés aux charges à reprendre et au type de micropieu à utiliser, ainsi qu'un contrôle strict lors de l'exécution, garantissant la qualité du coulis, la bonne mise en place des armatures et l'efficacité des injections.

Ainsi, la technique des micropieux s'impose comme une solution de choix pour la réhabilitation des ouvrages endommagés et la prévention des tassements différentiels, à condition que chaque étape de la reconnaissance du terrain à la réception des travaux soit conduite avec la rigueur technique et le suivi qualitatif qu'exige ce type d'intervention

Normes et réglementations des micropieux :

La conception et la réalisation des micropieux sont encadrées par des normes et réglementations strictes, afin d'assurer la sécurité, la performance et la durabilité des ouvrages. Ces normes définissent les critères de dimensionnement, de qualité des matériaux, d'exécution des forages, de mise en place de l'armature et de remplissage par coulis.

- **DTU 13.2** — Documents Techniques Unifiés : définit les règles de mise en œuvre des pieux forés et micropieux
- **EN 14199** — encadre les exigences de conception et d'exécution des micropieux et ancrages
- **NF P94-262**—relative aux essais de pieux et vérification de leur capacité portante

Ces normes précisent les critères de dimensionnement, qualité des matériaux, réalisation du forage, mise en place de l'armature et injection du coulis, afin d'assurer que les micropieux remplissent efficacement leur rôle de reprise de charge et de consolidation des fondations, même dans des sols difficiles ou des ouvrages existants.

Références bibliographiques

- [1] : DOC Génie Civil. (Consulté le 25 octobre 2025). *Les types de pieux*. Disponible sur : <https://www.doc-genie-civil.com/les-types-de-pieux/>
- [2] : FINE Software, 2025. *GEO5 2025 – Logiciel de calcul géotechnique*. Prague, République Tchèque : FINE s.r.o. Disponible sur : <https://www.finesoftware.eu>
- [3] : ALMAV Project – Studio Associato di Ingegneria, Architettura e Amministrazione di Immobili. (s.d.). *Paratia in micropali – Pianoro (BO)*. Consulté le [24/10], sur <https://www.almavproject.com/project/paratia-micropali-pianoro-bo/>
- [4] : “MICROPIEUX : Pathologie” par Mongi Ben Ouezdou (Professeur, École Nationale d’Ingénieurs de Tunis, 2025)
- [5] : SETRA – Cerema. (1986). *Les micropieux*. Bron : Cerema. 62 p. Consulté le 27 octobre 2025, à l’adresse https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/16723/les-micropieux?_lg=fr-FR.
- [6] : Ebène, T. (2025). *Comprendre la reprise en sous-œuvre par micropieux : guide complet*. Je Suis Nul en Bricolage. Consulté le 26 octobre 2025, à l’adresse <https://www.jesuisnulenbricolage.fr/comprendre-la-reprise-en-sous-oeuvre-par-micropieux-guide-complet/>
- [7] : GCBTP. (s. d.). *Micropieux : une solution éprouvée pour les fondations sur sols instables*. Consulté le 1 novembre 2025, à l’adresse <https://gcbtp.fr/spid-reparation-renfort-structures/micropieux-la-solution-efficace-pour-des-fondations-solides-sur-sols-instables/>
- [8] : CFABTP Aquitaine. (s. d.). *Micropieux : fondations existantes*. Consulté le 1 novembre 2025, à l’adresse <https://cfabtp-aquitaine.fr/micropieux-fondations-existantes/>
- [9] : Artisans Locaux. (s. d.). *Renforcement de sol instable : pourquoi choisir les micropieux ?*. Consulté le 28 Octobre 2025, à l’adresse <https://artisans-locaux.com/renforcement-de-sol-instable-pourquoi-choisir-les-micropieux/>
- [10] : OpenGroupe. (s.d.). *Micropieux – Réparer fissure maison*. Consulté le 28 Octobre 2025 à l’adresse <https://opengroupe.fr/micropieux-fissure>
- [11] : Micropieux Travaux. (s.d.). *Travaux de micropieux : réparer durablement votre maison après un sinistre*. Consulté le 29 Octobre 2025 à l’adresse <https://www.micropieux-travaux.fr/>
- [12] : Constructeur Travaux. (s.d.). *Le micropieux type 3 – fondations spéciales*. Consulté le 30 Octobre 2025 à l’adresse <https://constructeurtravaux.fr/micropieux-type-3/>
- [13] : Franki Fondation – Groupe Fayat. (s.d.). *Micropieux*. Consulté le 30 Octobre 2025 à l’adresse <https://franki.fayat.com/expertises/micropieux>
- [14]: Keller North America. (s.d.). *Micropile procedures & design considerations*. Consulté le 30 Octobre 2025 à l’adresse : [Micropiles | Keller North America](https://www.keller-northamerica.com/micropiles)

- [15] : Renfort Solutions. (s.d.). *Renfort Solutions*. Consulté le 31 Octobre 2025 à l'adresse <https://www.renfort-solutions.fr/>
- [16] : Liebherr. (s.d.). *LB 30 Drilling rig (LB series)*. Récupéré de <https://www.liebherr.com/en-us/p/lb30-4424786>
- [17] : Morris-Shea Bridge Company, Inc. (2019, février). *Micropile installation image* . Récupéré de <https://morrishea.com/wp-content/uploads/2019/02/Micropile-6.jpg>
- [18] : Seignobos, L. (2021). *Micropieux – illustration technique* . Wikimedia Commons. Licence : CC BY-SA 4.0. Disponible sur : <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=102495125>
- [19] : SOLTECHNIC. (s.d.). *Micropieux* [Page web]. Récupéré de <https://www.soltechnic.com/techniques/75-micropieux>
- [20] : [Maison Sur Micropieux | Ventana Blog](#)
- [21] : Cortartec. (2020). *Tubes micropieux et accessoires*. Récupéré de <https://cortartec.net/wp-content/uploads/2020/11/53751233660048web8728.jpg>
- [22] : Sol Solution. (s.d.). *Contrôles géotechniques – Ingénierie*. Récupéré de <https://www.sol-solution.com/ingenierie/controles-geotechniques/>