République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Dr Yahia FARES -MEDEA-

Département des sciences de la matière

Institut des Sciences et de la Technologie

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme

de Master en Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème :

Analyse des Micropieux et leurs contribution à la stabilité des talus

Proposé et dirigé par :

Dr. Dj. AMAR BOUZID

Etudié par :

* M^elle RAHMANI Souad

*M^elle CHIKER Samia

Promotion 2011-2012

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère étoile de ma vie qui m'a aidée et encouragée durant toute ma carrière.
A mon père qui m'a soutenue moralement et matériellement durant toute mon cursus.

A ma très chère sœur Fouzia et son époux Bachir.
A mes chères frères : Hamza et sa fiancée Sadia ,
Omar et sa femme Hadjer .
A la petite Wissal et Maya.

A ma très cher grand-père que dieu le protège.
A mon oncle Rachid et Hocine et sa femme Ghania.

A mes amies : Samia , Hadjira , yousra , Akila et Yasmina .
A tous mes collègues sans exceptions , et à toutes personnes qui m'aiment.
A toute la promotion des sciences et techniques 2011-2012.

Souad

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail qui est l'accomplissement de longues années d'études:

A mes chers parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie pour arriver la ou je suis.

A mes deux frères Kamel et Hamza et ma sœur Mounira qui ont été toujours derrière moi.

A ma grand-mère que dieu la protège.

A toute ma famille au grand complet.

A mes amis avec qui je partage d'inoubliables souvenirs.

Samia

REMERCIEMENT

Le présent travail est pour nous une occasion d'exprimer encore une fois notre reconnaissance et notre gratitude envers Allah *tout puissant.*

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'aide et la participation de plusieurs personnes avec lesquelles nous avons étroitement élaboré et qui nous ont fait part de leurs connaissances et leur savoir faire.

Avant tout nous remercions :

Nos chers parents qui grâce à eux on est arrivé à ce stade, grâce à leurs encouragements, leur compréhension, qui nous ont guidé depuis notre enfance vers le chemin du savoir.

Notre promoteur Dr. Amar Bouzid Djillali pour son aide, son encouragement et son suivi pour réaliser ce travail.

Nos enseignants : D.Amar Bouzid, Menaa, Rahmani, Dbeieb, Mir et tout les professeurs du département des sciences de la matière, sans oublier les membres de jury.

Merci à toutes et à tous…

Principales notations

Lettres latines

A	section du forage.
B	diamètre du fût du micropieu
c	cohésion du sol
d	diamètre du micropieu
D	longueur du pieu
D_b	diamètre du trou de forage
D_e	hauteur d'encastrement mécanique
D_1	S_{max}= l'espacement entre deux micropieux ascendants ou vers l'aval
D_2	ouverture entre les micropieux
EI	rigidité à la flexion du micropieu
ELU	états limites ultimes
ELS	états limites de service
FA	actions accidentelles
FS	facteur sécurité
F_c	force critique de flambement
F_w	actions hydrodynamiques
G	actions permanentes;
G_{max}	actions permanentes défavorables,
G_{min}	actions permanentes favorables,
G_w	actions des pressions de l'eau,
G_{sn}	actions éventuelles de frottement négatif,
G_{sp}	actions éventuelles de poussées latérales,
H_{req}	force supplémentaire

H_{ult}	La force latérale maximale
q_s	frottement latéral limite (unitaire)
k_p	facteur de portance de la pointe
p_l	pression limite pressiométrique au niveau de la pointe
p_o	contrainte horizontale (sur un plan vertical) totale au moment de l'essai pressiométrique au niveau envisagé pour la pointe
q_o	contrainte totale verticale au niveau de la pointe
σ_{vo}	contrainte totale verticale.
u	pression interstitielle.
K_o	coefficient de poussée des terres au repos
K	module de réaction du sol en prenant le diamètre total B du micropieu
l	½ longueur du micropieu dans la couche où le micropieu risque de flamber
L_{dessus}	longueur du micropieu de la surface de glissement
M_0	moment fléchissant
M_{ult}	moment résistant de flexion
P	réaction de sol
P_{ult}	surface de rupture
P	forces axiales représentées
N_0	effort normal
q_c	résistance de pointe
Q_u	traction limite
Q_c	traction critique de fluage
Q_{1k}	valeur caractéristique de l'action variable de base,
S_{offset}	l'espacement entre deux micropieux
S_{max}	l'espacement entre deux micropieux ascendants ou vers l'aval

s_u	résistance au cisaillement
T_0	effort tranchant
γ	coefficients de pondération
$\psi_{0i}Q_{ik}$	valeur de combinaison d'une action variable d'accompagnement
φ	diamètre de l'armature (barre ou tube).
$\alpha_{bond-dessus}$	force coulis-sol ultime lien (bond) au-dessus de la surface de glissement critique.
η	Facteur d'efficacité
ψ	L'angle d'inclinaison
ψ_{us}	l'angle d'inclinaison pour vers l'amont d'un micropieu
ψ_{ds}	l'angle d'inclinaison pour la pente aval d'un micropieu
φ	angle de frottement du sol
γ	unité de poids du sol
$\overline{z}$	profondeur de la surface du sol

الملخص:

هذا العمل يتمثل في مذكرة لمشروع نهاية الدراسة الذي كان مبنيا في المقام الأول على دراسة و تحليل أوتا د صغيرة ومساهمتها في استقرار المنحدر من خلال دراسة سلوك هذه الأوتاد الصغيرة في مجموعات معزولة أو شبكات تحت التحميل المحوري والعرضي و وضع نموذج لسلوكها باستخدام البرنامج الرقمي" سلايد" للحصول على عامل أمان لحالة استقرار المنحدرات من التربة أو الصخور.

كلمات البحث : أوتا د صغيرة ، جماعات ، شبكات ، استقرار،منحدر، تحميل محوري ، تحميل عرضي ، سلايد .

Résumé :

Ce travail représente un projet de fin d'étude qui a été essentiellement basé sur l'analyse des micropieux et leurs contribution à la stabilité des talus à travers l'étude du comportement des micropieux isolés en groupes ou en réseaux sous chargement axial et transversal et il s'agit ainsi de modéliser le comportement des micropieux numériquement en se servant du logiciel SLIDE pour obtenir un coefficient de sécurité de l'état d'équilibre des pentes des sols ou des roches.

Mots clés : micropieux, groupes, réseaux, stabilité, talus, chargement axial, chargement transversal, SLIDE.

Abstract :

This work represents a final project study that was primarily based on the analysis of micropiles and their contribution to slope stability by studying the behavior of micropiles in isolated groups or networks under axial and transverse loading and it is well to model the behavior of micropiles digitally using the software SLIDE for a safety factor of steady-state slopes of soil or rock.

Key words: micropiles, groups, networks, stability, slope, axial loading, transverse loading , horizontal loading, SLIDE.

CHAPITRE I :

Introduction générale

Introduction générale

En raison de nombreuses contraintes d'origine naturelle ou urbaine, les constructions sont réalisées sur des sols de plus en plus médiocres et contiguës à des ouvrages existants. Afin d'y palier, de nouvelles techniques de renforcement et d'amélioration des sols se sont développées ces dernières années, dont les micropieux. En effet, ils permettent de répondre à de nombreux problèmes, dont la stabilité des pentes et talus, la reprise en sous-oeuvre, le renforcement des sols, la protection de structures existantes, les fondations nouvelles, ...

Les micropieux sont utilisés depuis plus de quarante ans et offrent une solution économique, afin d'augmenter la capacité portante du sol ou de limiter les déplacements, de coût souvent intermédiaire entre celui des fondations profondes et celui des fondations superficielles. Lorsqu'ils sont utilisés comme des micropieux isolés ils fonctionnent comme des fondations profondes, par contre en groupes ou en réseaux dans lequel ils ont un rôle de renforcement du sol, ils sont rarement mis en place par éléments isolés, mais sont plutôt disposés en groupes ou en réseaux. **[3]**

Le comportement d'un groupe de micropieux est fonction du comportement élémentaire de chaque micropieu du groupe et de l'interaction simple entre eux. Quant au comportement d'un réseau (groupe de micropieux dont la majorité des éléments sont inclinés d'une manière convergente), il est également fonction du comportement élémentaire des micropieux, de l'interaction mécanique simple entre ces micropieux, mais aussi de l'éventuel effet d'enserrement du sol entre les micropieux enchevêtrés. L'effet de groupe est, dans certains cas, positif.

Cet effet positif pourrait résulter de la méthode de mise en place des micropieux et/ou de la densification du sol environnant. En revanche l'interaction mécanique simple entre les micropieux, telle qu'elle est évaluée pour le cas des pieux, induit un effet de groupe négatif et réduit la raideur globale des micropieux du groupe.

Les méthodes de calcul en déplacement actuelles de groupes (de pieux ou micropieux) tiennent compte de cette interaction mécanique simple, alors que les effets bénéfiques ne peuvent être introduits que directement par les paramètres mécaniques du sol.

Les réseaux de micropieux sont généralement calculés selon l'une des deux hypothèses suivantes : le réseau se comporte comme un groupe, ainsi les méthodes de calculs sont analogues à celles des groupes ne tenant compte que de l'effet d'interaction mécanique simple entre les micropieux ; la deuxième hypothèse tient compte d'une manière très simplifiées de l'effet d'enserrement du sol entre les micropieux enchevêtrés, le sol et les micropieux étant considérés comme un bloc monolithique. **[3]**

Le mémoire présenté est structuré en six chapitres :

- Le chapitre I : présente une introduction générale sur ce thème.
- Le chapitre II: est consacré à l'étude des pieux des micropieux : les différents types, les matériaux constitutifs de ce genre de fondation, leur mise en œuvre et enfin, quelques exemples d'application.

- Le chapitre III: est contribué à l'étude de dimensionnement des micropieux les différentes méthodes de calculs existantes des micropieux (isolés, en groupes ou en réseaux) sous chargement axial et transversal.
- Le chapitre IV: concernant l'analyse de la stabilité des talus renforcés par micropieux.
- Le chapitre V: présente une modélisation numérique en se servant de SLIDE : programme d'équilibre limite en 2D de la stabilité des pentes.
- Le chapitre VI : conclusions générales principales tirées de cette étude ont été présentées à la fin de ce mémoire.

CHAPITRE II :

Etude des pieux

&

des micropieux

II) Etude des pieux & des micropieux :

II.1) Introduction : [1]

Ce premier chapitre est consacré à l'étude de la technique des pieux et des micropieux, à travers une étude bibliographique brève sur les pieux pour différencier entre les deux techniques, un historique du développement de ce système de fondations profondes met en valeur l'expansion de cette technique en Europe et dans le monde, depuis son invention en 1952 par l'ingénieur italien F. Lizzi jusqu'aux dernières recherches réalisées.

La classification des micropieux concerne les principales distinctions de types de micropieux reconnues en France, en Europe, et aux Etats Unis.

Les applications, citées dans le dernier paragraphe de ce chapitre, sont classées selon le domaine d'utilisation des micropieux.

II.2) Etude des pieux :

II.2.1) Définition : [2]

Les pieux sont des fondations élancées qui reportent les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture de sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles.

Les pieux sont constitués de trois parties principales : la tête, la pointe et le fût compris entre la tête et la pointe. La longueur d'ancrage h est la longueur de pénétration du pieu dans les couches de terrain résistantes.

D'un point de vue mécanique on distingue la longueur D du pieu de la hauteur d'encastrement mécanique De**.**

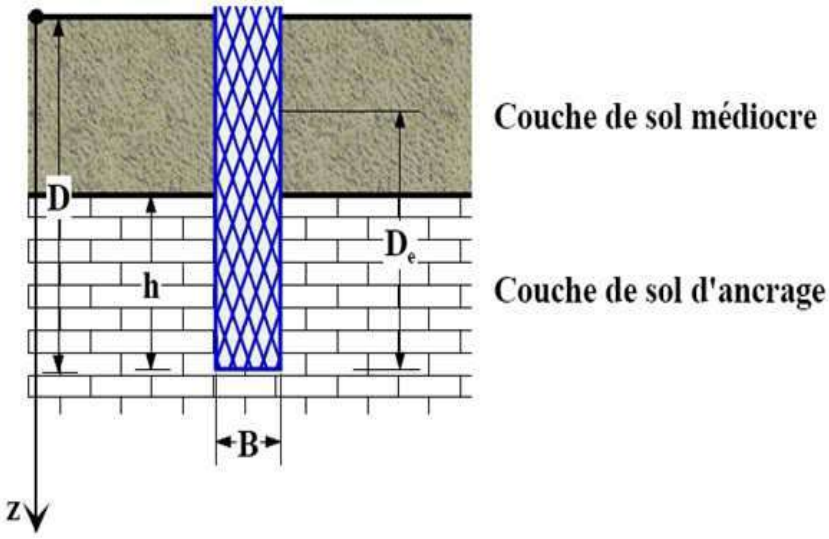


Fig. II.1 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique et mécanique De.

II.2.2) Classification des pieux : [1]

Les pieux sont classés suivant :

- La nature du matériau constitutif (les pieux, en bois, métalliques, en béton).
- Le mode de mise en place dans le sol. (Pieux battus, Pieux forés).

La mise en œuvre de ces pieux à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyennes mécaniques tel que tarière, benne,…etc.

- La classification des micropieux diffère de celle des pieux. Cette dernière

distingue deux catégories :

Les pieux refoulant et les pieux non refoulant. Cette distinction découle de la méthode de mise en place du pieu dans le sol. Dans la première catégorie, le sol est refoulé latéralement lors de l'installation du pieu : c'est le cas des pieux foncés, lancés, ou battus. Dans la deuxième catégorie, le sol existant est prélevé et remplacé par le pieu : c'est le cas des pieux forés ou moulés en place.

II.2.3) Mode de fonctionnement des pieux : [1]

II.2.3.1) Pour le chargement axial :

Les pieux résistent par :

- Soit ils agissent par frottement latéral avec le terrain, dans le cas où le bon sol est profond, ce sont des pieux flottants, figure (II.2.a) ;
- Soit ils reposent sur les couches profondes du terrain et reportent les charges que les couches superficielles ne pourraient pas supporter à la Pointe, c'est alors un pieu résistant par pointe, figure (II.2.b) ;
- Soit ils agissent par deux façons en même temps (par pointe et frottement latéral), figure (II.2.c)

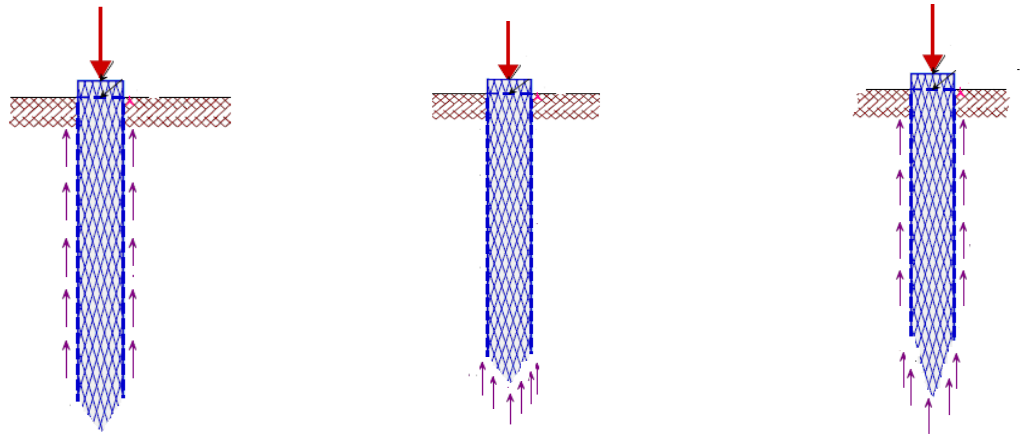


Fig. (II.2.a) Fig. (II.2.b) Fig. (II.2.c)

Fig. II.2 : pieu soumis à des charges axiales

II.2.3.2) Pour le chargement latéral : [1]

On cite trois modes de résistance :

- Les efforts horizontaux étaient redistribués en disposant des pieux inclinés,
- Les moments étaient repris par des groupes des pieux,
- L'apparition des pieux de grand diamètre et des barrettes moulées à très fortes inerties a permet d'absorber directement par un seul élément de fondation de efforts horizontaux et des moments très élevés.

II.3) Etude des micropieux : [3]

II.3.1) Historique :

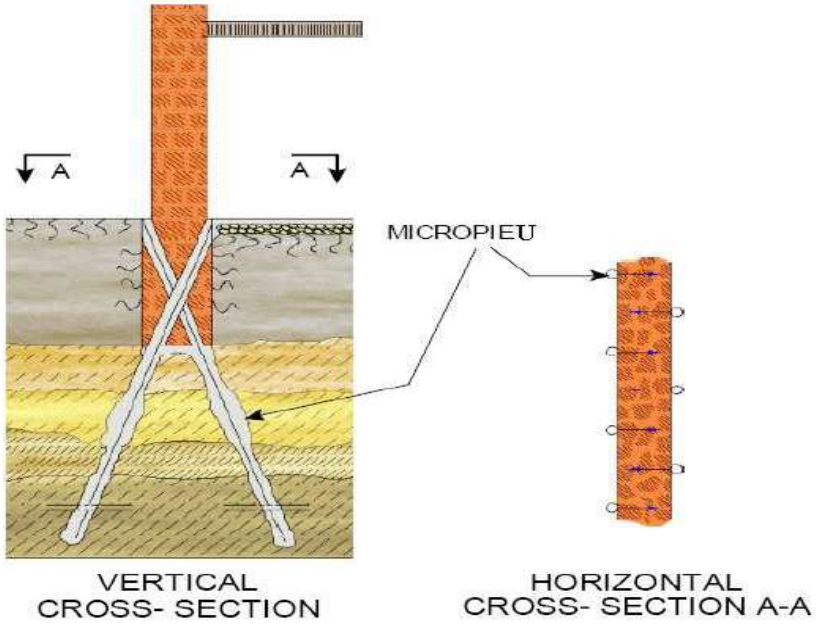
La technique des micropieux a été développée en 1952 par l'entreprise Fondedile sous la direction technique de F. Lizzi (1982a). Ces premiers pieux de petits diamètres (B = 100 mm) étaient forés et scellés au terrain par un mortier figure. II .2). Ils ont été initialement utilisés en Italie pour les travaux de reprise en sous-œuvre de bâtiments anciens et étaient connus sous l'appellation de « pieux racines » ou « pali radice ».

En l'espace d'un demi-siècle, la technique des micropieux est pratiquée à travers le monde et connue sous multiples termes : pali radice, pieux racines, pieux aiguilles, minipieux ou micropieux (en français), minipiles, micropiles, pin piles, root piles ou needle piles (en anglais).

L'essor de cette technique dans les années 50 en Italie résulte du besoin de la restauration des bâtiments historiques endommagés par la deuxième guerre mondiale. Le développement de ce système de fondations profondes découle de la diversité de ses applications et de ses multiples avantages. En effet, à la fin

des années 50, la pratique des micropieux s'étend à la stabilisation des pentes, aux renforcements des sols et à la protection des ouvrages souterrains. Les micropieux y sont utilisés en réseaux enchevêtrés "réseaux de pali radice".

Au niveau technique, on observe l'apparition des micropieux injectés sous forte pression qui ont permis d'obtenir des portances plus élevées (Lizzi, 1982b).



(Lizzi, 1982b) (Lizzi, 1982a)

<u>Fig. II.3</u> : **Schéma typique de l'application des pieux racines (Pali radice) (Lizzi ,1982). [7]**

L'entreprise Fondedile introduit la technique du pieu racine en Grande Bretagne en 1962 pour la restauration des bâtiments anciens. En 1965, des micropieux similaires aux 'pieux racines' sont utilisés en Allemagne pour la réalisation des ouvrages souterrains en milieu urbain. Les pieux racines sont également utilisés lors de l'exécution des travaux du métro de Milan en Italie.

Les entrepreneurs européens commencent à développer leurs propres techniques au début des années 60. Leurs filiales mondiales participent, par la suite, à l'exportation de la technique vers les autres continents.

En France, la pratique des systèmes de fondations par micropieux concerne plusieurs domaines d'application. Si l'usage de cette technique est moins répandu en France qu'en Italie, les recherches menées en France, quant à elles, ont donné un élan à la maîtrise de cette technique sur une échelle internationale. Dès le début des années soixante, le développement de la mise en place des micropieux s'inspire de la méthode d'injection sélective du coulis des tirants d'ancrages. Cette nouvelle méthode d'injection de coulis acquiert aux micropieux une portance plus importante et une meilleure adaptation aux contraintes du sol.

Ce n'est qu'en 1973 que l'entreprise Fondedile introduit, en Amérique du Nord, le pieu racine pour l'exécution de travaux de reprise en sous-œuvre dans les villes de Boston et New York. Le premier réseau de 'pieux racines' est réalisé aux Etats-Unis en 1975 pour la stabilisation de la fondation d'une pile d'un pont sur l'autoroute 55 au Missouri. L'expansion de l'application de cette technique

aux Etats-Unis débute vers le milieu des années 80.

II.3.2) Définition et classification des micropieux : [3]

II.3.2.1) Définition :

Les micropieux sont définis par le Document Technique Unifié D.T.U 13-2

(1978) comme des pieux forés de diamètre inférieur à 250 mm, qui comporte des armatures centrales scellées dans un coulis de ciment. Ils travaillent seulement en compression ou en traction.

Du fait de leur grand élancement, ils travaillent essentiellement au frottement latéral et peu en pointe, ils sont utilisés en groupes ou en réseaux : en groupes lorsqu'ils sont verticaux, en réseaux lorsqu'ils sont orientés et souvent croisés dans des directions différentes. A l'origine ils étaient destinés à reprendre des charges de 150 à 250 kN, actuellement ils peuvent atteindre 1000 kN.

II.3.2.2) Classification : [3]

Le développement et la complexité technologique de la mise en place des micropieux lui ont valu une classification spéciale propre à leur méthode d'installation. Cette classification a évolué durant les deux dernières décennies avec l'apparition de nouvelles méthodes de mise en place. Vingt années après l'apparition du 'pieu racine' en 1952, les entrepreneurs distinguent les pieux forés remplis de mortier de ciment et les micropieux injectés.

- La première classification en France a été proposée par le D.T.U 13-2 (1978)

qui définit deux types de micropieux et donne des dispositions constructives pour leur réalisation :

- **Micropieu de type I :**

C'est un pieu foré tubé de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé ou non d'armatures et rempli d'un mortier au tube plongeur. Le tubage est ensuite obturé en tête et l'intérieur du tubage au-dessus du mortier est mis sous pression. Le tubage est récupéré en maintenant la pression sur le mortier. Ce type de micropieux n'est pratiquement pas utilisé pour les ouvrages d'art.
Les 'pieux racines' brevetés par Fondedile ont été les premiers micropieux de cette catégorie.

- **Micropieu de type II :**

C'est un pieu foré de diamètre inférieur à 250 mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est le plus souvent un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. Si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection. Les caractéristiques mécaniques de l'ancrage sont améliorées par l'injection sous pression d'un coulis de scellement.

Les documents techniques publiées dans les années 80 (Cadilhac, 1982 ; Cette – Setra, 1986) reprennent cette classification et citent les nouvelles méthodes de mise en place pratiquées par les entrepreneurs français, notamment en ce qui concerne la mise en place des micropieux par battage et par fonçage.

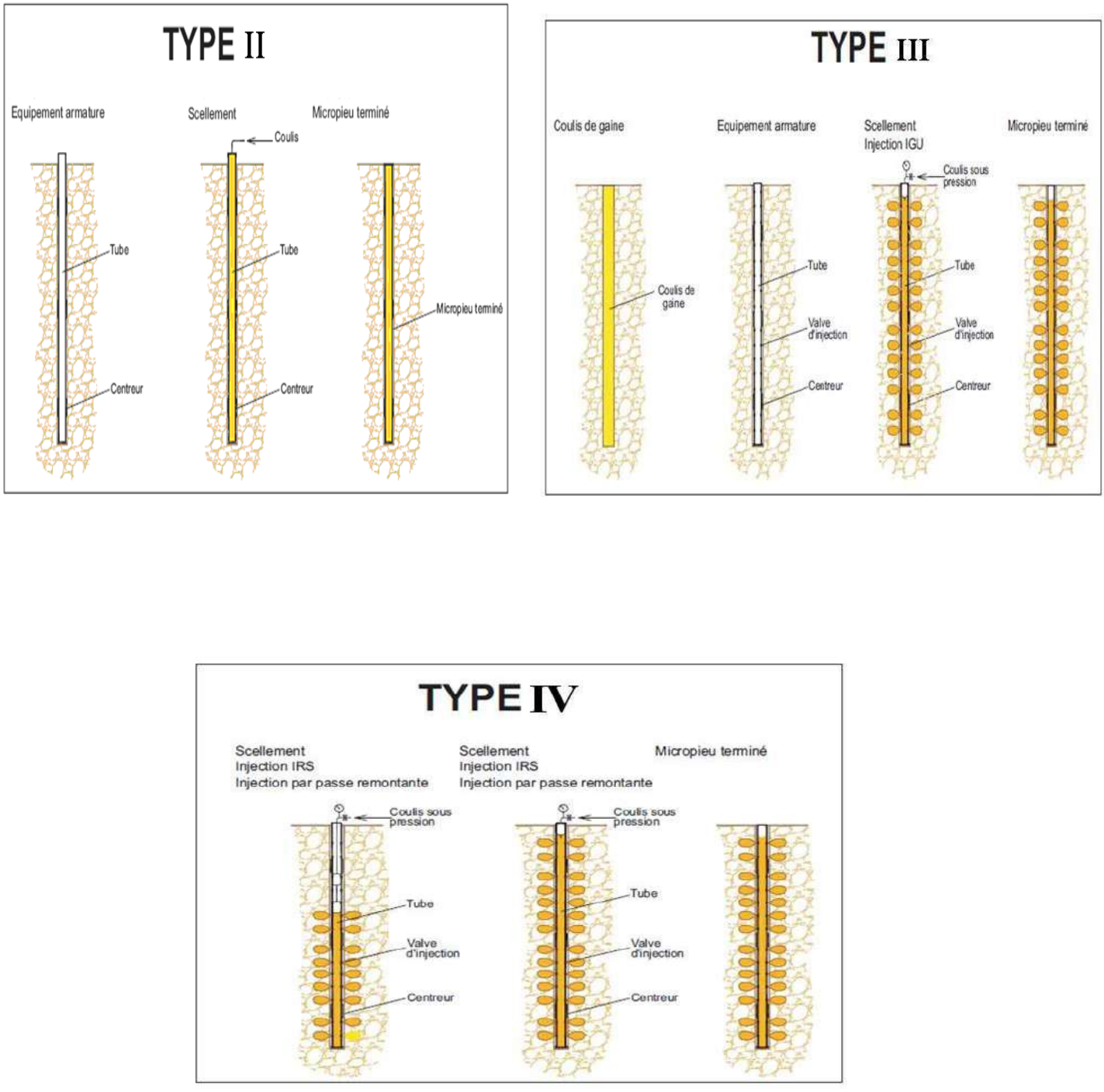
- La classification actuelle reconnue en France date de 1991, et est donnée par

l'additif modificatif n°2 au document technique unifié (D.T.U. 13-2 / Additif, 1991). Cette même classification est reprise par le Fascicule 62 – Titre V (1993) et par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Amar, 1993).

Le tableau (II .1) montre ces 4 types de micropieux. Cette classification est faite selon le matériel de forage et également selon le remplissage du forage :

<u>Tableau II.1</u> : Différents types des micropieux (d'après additif modificatif n°2, 1991 du D.T.U 13-2 ,1978) [4]

Type	Diamètre (mm)	Description et matériel du forage	Remplissage de forage	Remarque	Dénomination
I	<250	Pieu foré tubé, le forage est équipé ou non d'armatures	Remplir d'un mortier de ciment au moyen d'un tube plongeur	Le tubage est récupéré en l'obturant en tête et en le mettant sous pression au –dessus du mortier	-
II	<250	pieu foré, le forage est équipé d'armatures	Remplir d'un coulis ou de mortier de scellement par gravité ou sous une très faible pression au moyen d'un tube plongeur	Le forage peut être remplacé le lançage, le battage ou fonçage, si la nature du sol le permet	-
III	<250	Pieu foré, le forage est équipé d'armature et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine ; si l'armature est un tube métallique, ce tube peut être équipé de manchettes et tenir lieu de système d'injection	Injection faite en tête à une pression supérieure ou égale à 1 Mpa ; elle est globale et unitaire		IGU (injection globale et unitaire)
IV	<250		Injection à l'obturateur simple ou double d'un coulis ou mortier de scellement à une pression d'injection supérieure ou égale à 1 Mpa ; elle est répétitive et sélective		IRS (injection répétitive et sélective)



<u>Fig. II .4</u>: Réalisation des différents types de micropieux

- **micropieu autoforeur : [8]**

Le schéma de la figure (II.5) donne une vue globale du système d'un micropieu autoforeur (doc.Ischebeck) et présente tous les différents éléments qui sont associés à l'élément porteur lors de la réalisation d'un micropieu. La tête du micropieu peut être liaisonnée à la structure par une plaque prise entre deux écrous à rotule ou par la barre elle-même si l'épaisseur de la structure est suffisante pour reprendre l'effort par adhérence barre- structure (massif en béton ou maçonnerie). Dans la zone de transition on met en place un tube de protection en plastique ondulé, contre la corrosion de la barre, entre le sol et le béton de l'ouvrage. Le diamètre intérieur de ce tube doit être supérieur d'au moins 20 mm au diamètre extérieur de la barre Titan. L'intervalle entre le tube et la barre doit être soigneusement rempli de coulis de ciment.

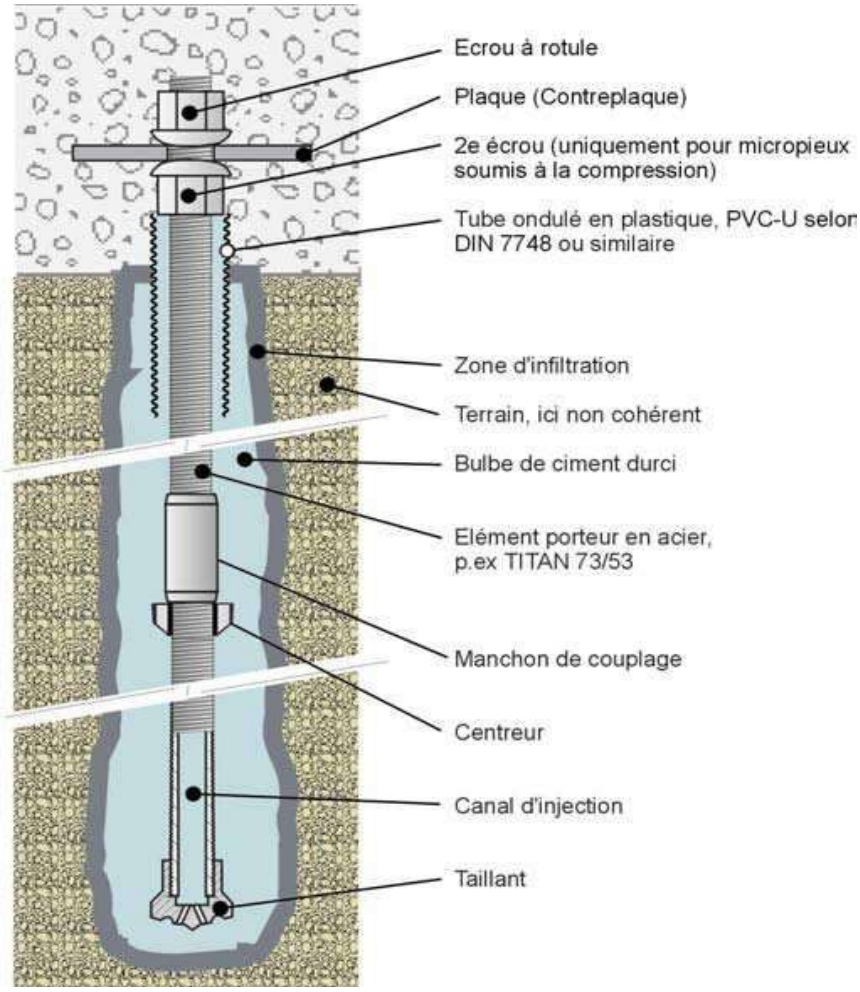


Fig. II.5 : Schéma de principe d'un micropieu autoforeur (doc. Ischebeck)

II.3.3) Choix du type de micropieux : [5]

Des efforts de traction peuvent apparaître au niveau des fondations en fonction des différentes combinaisons de cas de charges (séisme) donc, il est nécessaire de mettre en œuvre des micropieux équipés d'armatures et résistant à cette traction. Ceci interdit l'utilisation de micropieux de type I qui proposent une très faible résistance au flambement et à la traction.

La présence d'une nappe phréatique et de nombreux obstacles et cavités dans le sol empêchent la réalisation de micropieux de type II.

Les fondations seront donc réalisées sur des micropieux de type III ou IV mais, injectés à basse pression pour ne pas risquer de soulever les fondations qui sont très proches (1 à 2 mètres).

II.3.3.1) Dénomination suivant le type d'armature employé : [5]

La classification ci-dessus peut être étendue en fonction du type d'armature mis en place ; on distingue ainsi :

- **Le micropieu à tube :**

L'armature est constituée par un tube en acier de diamètre, d'épaisseur et de qualité variables suivant la valeur des charges à reprendre (le tube acier constituant ou non le tube d'injection sous pression dans le cas de micropieu de type II).

- **Le micropieu à barres :**

L'armature est constituée par une ou plusieurs barres groupées, en acier H .A . pour béton armé ou en acier de précontrainte (barres DYWIDAG). Dans le cas de micropieu de type II, le tube d'injection pression est intégré au faisceau de barres.

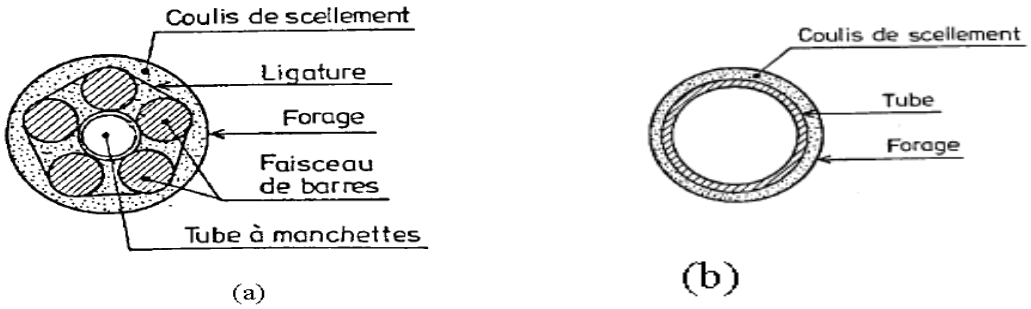


Fig.6 : Types d'armatures (a) barre (b) tube [5]

- **Le micropieu à double armature :**

-A armature mixte : tube-barre, c'est le cas du pilot composite formé d'une barre centrale et d'un tube extérieur à manchettes.

-A tube avec adjonction d'un tube intérieur

II.3.4) Matériaux constitutifs des micropieux : [4]

II.3.4.1) Coulis de ciment :

La composition de base du coulis est un mélange de ciment et d'eau, réalisé le plus souvent à l'aide d'un turbo-malaxeur, ce qui permet d'assurer une défloculation efficace des grains de ciment. On y ajoute parfois un adjuvant superplastifiant. Le ciment doit être compatible avec les conditions d'agressivité du sol et des eaux souterraines. On se réfère généralement aux textes relatifs aux bétons (Afnor P18-011, EN 206-1).

Il est à noter que le rapport pondéral ciment/eau (C/E) influence les caractéristiques mécaniques du coulis. La valeur de ce rapport utilisée typiquement pour les micropieux varie de 1.8 à 2.2 d'après Bruce (1992) et de 2 à 2.5 d'après Vezole (1994). Selon ce dernier, on s'écarte parfois de ces valeurs, en particulier, lorsqu'un coulis est utilisé comme fluide de forage.

Pour le coulis d'injection, le D.T.U 13-2 (1978) impose un dosage minimal en ciment de 1200 Kg /m^3, ce qui correspond à un rapport pondéral (C/E) de 2 environ. Les produits d'addition peuvent être ajoutés en relativement petite quantité, afin de modifier les propriétés du coulis.

Nota: certaines méthodes de scellement comportent des phases d'injection pendant lesquelles il est nécessaire de connaître l'ordre de grandeur des pressions appliquées, ainsi que les débits et quantités; on n'a un accès direct

qu'à la pression à la sortie de la presse, à la pompe ou en tête de forage, selon le positionnement du manomètre; on pourrait en principe imaginer des corrections tenant compte de la profondeur et des pertes de charges (linéiques et singulières)… en admettant que l'on connaisse le seuil de rigidité et la viscosité du coulis, mais on sombrerait dans des complications très lourdes, sans réel intérêt pratique.

II.3.4.2) Armatures en acier : [6]

Les micropieux peuvent être équipés de barres d'acier ou de tubes. Les aciers sont des aciers de béton armé ou des aciers de précontrainte.

La charge que doivent supporter les micropieux dicte la quantité d'armatures. Par exemple, les micropieux de petite capacité réagissant seulement en compression, ont une cage de barres à hautes résistance supportées par des renforcements hélicoïdaux ou un nombre limité de barres à hautes résistance.

Pour les capacités plus élevés et afin de minimiser la déflexion ou résister à des actions latérales importantes, des tubes sont généralement utilisés.

Dans la pratique, les armatures utilisés pour les micropieux :

- **Des barres d'acier à haute adhérence :**

Pour rabouter des aciers HA ordinaires, on peut recourir à la soudure, en s'assurant que les aciers sont bien soudables et en veillant au respect de l'alignement des barres, ou à des extrémités filetées permettant d'utiliser des manchons vissés (filetage cylindrique ou conique, et réductions éventuelles de section utile).

- **Des groupes de barres :**

Ces barres sont généralement solidarisées entre elles par des cerces ou dispositifs équivalents, pour respecter les entraxes prévus et aussi de manière à prévenir tout risque de flambement individu des barres.

- **Des Profilés en « acier de construction » :**

Ce peut être des laminés marchands (H et autres I) ou des tubes en acier de nuance généralement comprise entre fe E 240 et fe E 360. Ils peuvent être associés à des barres (disposition surtout rencontrée avec des tubes).

- **Des tubes « gaz » ou « pétroliers » :**

Il s'agit en général de tubes de récupération dont la gamme habituelle comprend des diamètres de 101 à 178mm pour des épaisseurs de 9 à10 mm. Qui ont été utilisés pour un forage pétrolier, et qui sont récupérés pour utilisation en génie civil (on n'utilise pas un même tube pour plusieurs forages pétroliers).

Le coût de tels tubes, s'ils sont neufs, n'est pas compatible avec l'économie des projets de génie civil, et ceux qui sont utilisés sont souvent qualifiés «déclassés », ou de « deuxième choix ».

II.3.5) Mise en œuvre des micropieux : [4]

II.3.5.1) Réalisation du forage :

La perforation est, en général, réalisée avec l'utilisation d'un tubage ; il peut être vertical ou incliné et d'un diamètre le plus souvent compris entre 100 et 200mm (Azuar et Renault ,1986) .Le tubage est systématiquement utilisé lors de la perforation en terrain meuble. Les avantages considérables d'utilisation du tubage est, d'une part, assurer une vitesse de perforation importantes, et d'autre part, éviter une forte décompression du terrain.

Il est à noter que ce forage est fait par des machines de forage légères et donc avec une réduction importante d'encombrement. Ce mode d'application est très adapté au cas des reprises en sous-œuvre (Amar ,1993).

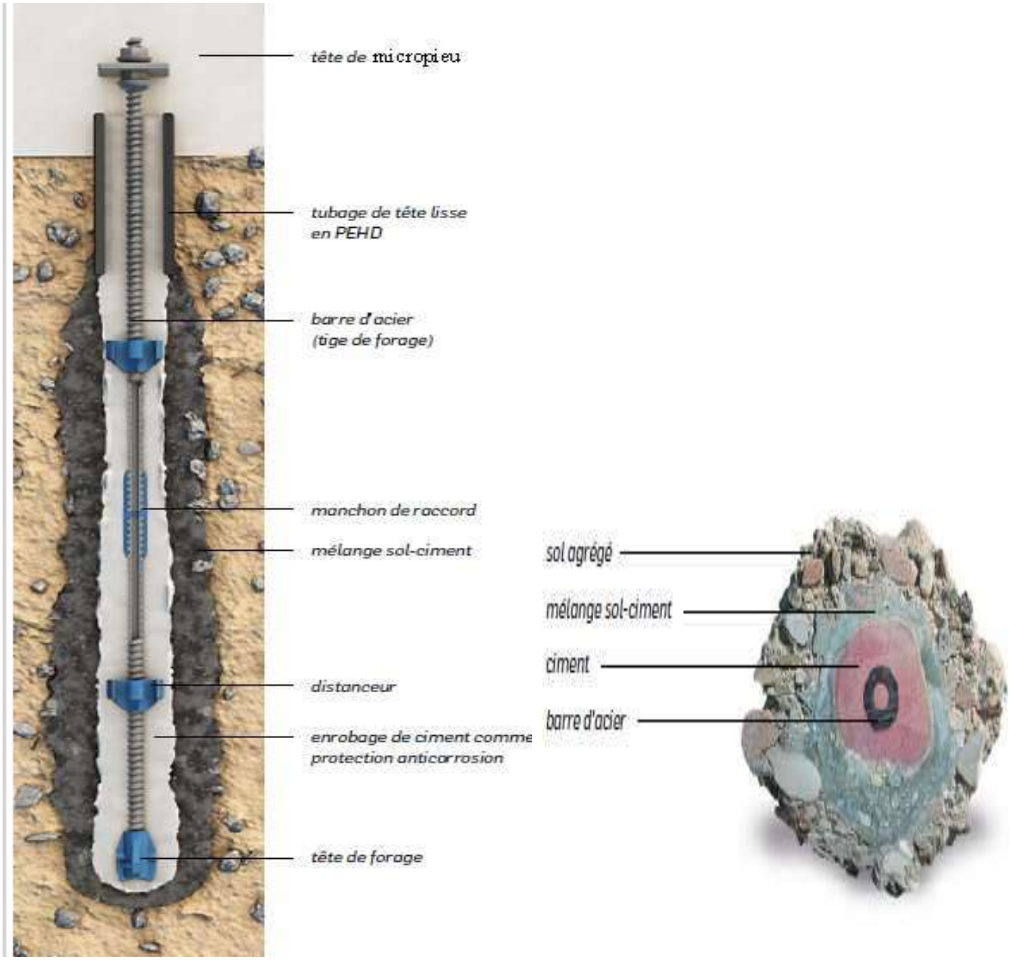


Fig. II.7 : **Coupe d'un forage**

Le forage peut être exécuté par :

- Soit par un marteau fond de trou dans les terrains à forte proportion rocheuse et hors d'eau.
- Soit par tricône, à l'eau ou à la boue de forage, dans la majorité des cas. La boue bentonique utilisée est parfois additionnée de ciment (100 à 300 kg/m^3)

pour limiter des pertes et pour assurer une préinjection du terrain encaissant (avec une simple pression gravitaire).

- Soit par une tarière élicoïdale ou par rotopercussion.



Forage par tarière [8]





Tillant tricône [7]



Taillants tripales



Marteaux « fond du trou »



Taillant ODEX [6]

<u>Fig. II.8</u> : **Outils de forage**

II.3.5.2) Mise en place des armatures : [4]

Les armatures des micropieux sont généralement mises en place par jonction d'éléments de longueur unitaire généralement inférieure à 2 m, Deux types de raboutage sont essentiellement utilisés : le manchonnage et la soudure (Azuar et Renault.1986). Les manchons peuvent être vissés.

Pour les micropieux de types III et IV, outre les armatures, le trou de forage est équipé d'un tube à manchette afin d'injecter sous pression .Ces manchettes permettent l'injection du coulis en plusieurs phases.

La figure (II.9) montre le schéma de fonctionnement d'un tube à manchette (Bustamante, 1979).

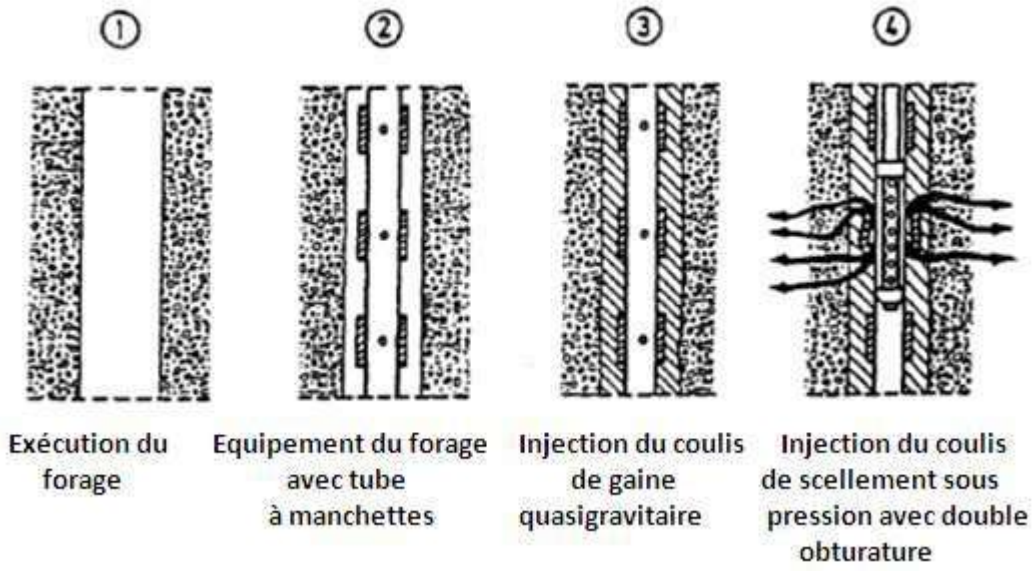


Fig. II.9: Schéma de principe d'un tube à manchette et phases de réalisation (Bustamante, 1979). [4]

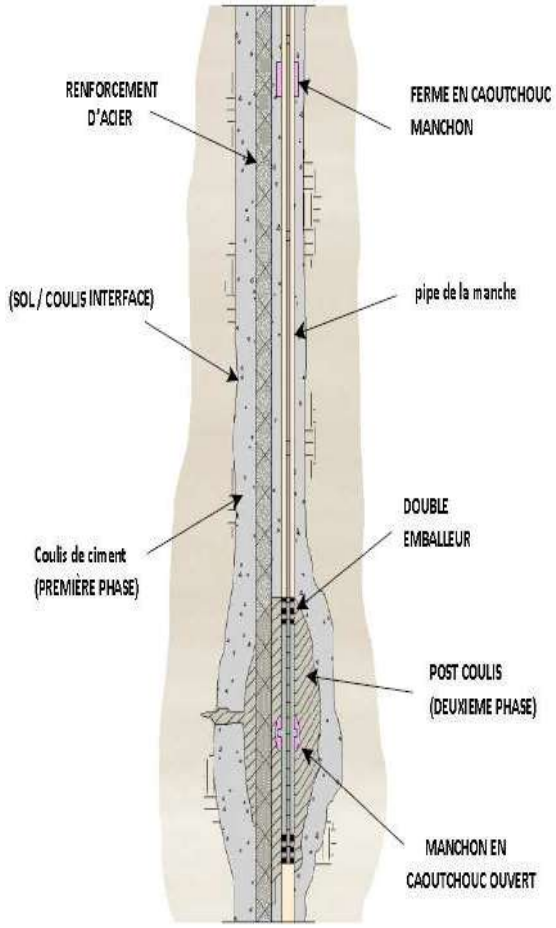


Fig. II.10 : Principe d'injection de la méthode du tube à Manchette [7]

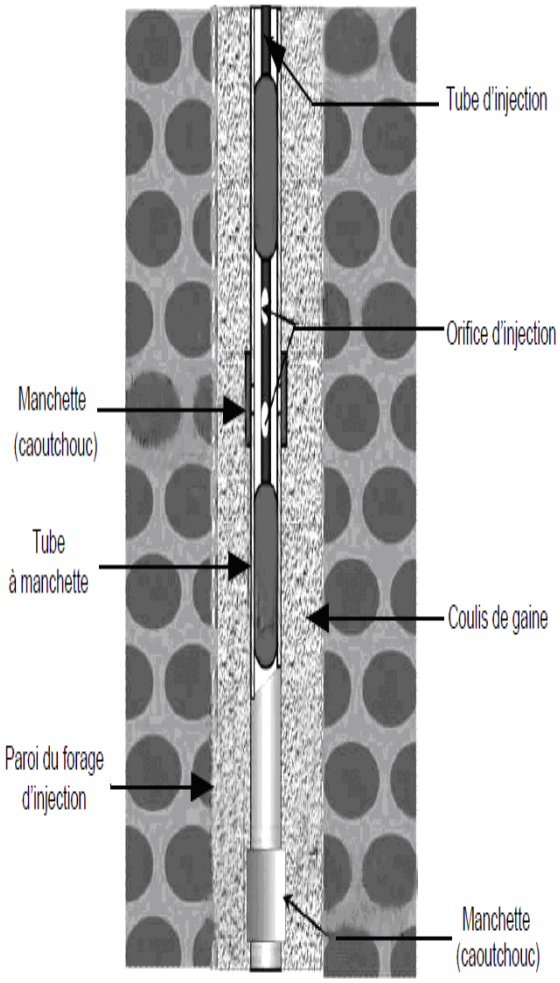


Fig. II.11 : un obturateur double [6]

II.3.5.3) Scellement du micropieu au terrain : [4]

L'ancrage du micropieu au terrain dépend du type de micropieux.

Pour les micropieux types I et II, le forage est rempli par un mortier, mis en place au tube plongeur. On doit maintenir, pendant le remplissage, une pression modérée au-dessus du mortier pour assurer la mise en contact du mortier avec le terrain. Ceci est appliqué, par exemple, pour des «pieux racines »brevetés par Fondedile (Arrigo et Salama ,1970).

Azuar et Renault (1986) indiquent qu'un ancrage réalisé selon cette méthode confère au micropieu un fonctionnement comparable à celui des pieux forés classiques mobilisant le frottement latéral coulis-sol .Il est à noter que la pression appliquée pour la mise en place ne permet ni de recomprimer le terrain, ni d'essorer le coulis, la figure (II.12) montre schématiquement les différentes phases d'exécution des micropieux de type I.

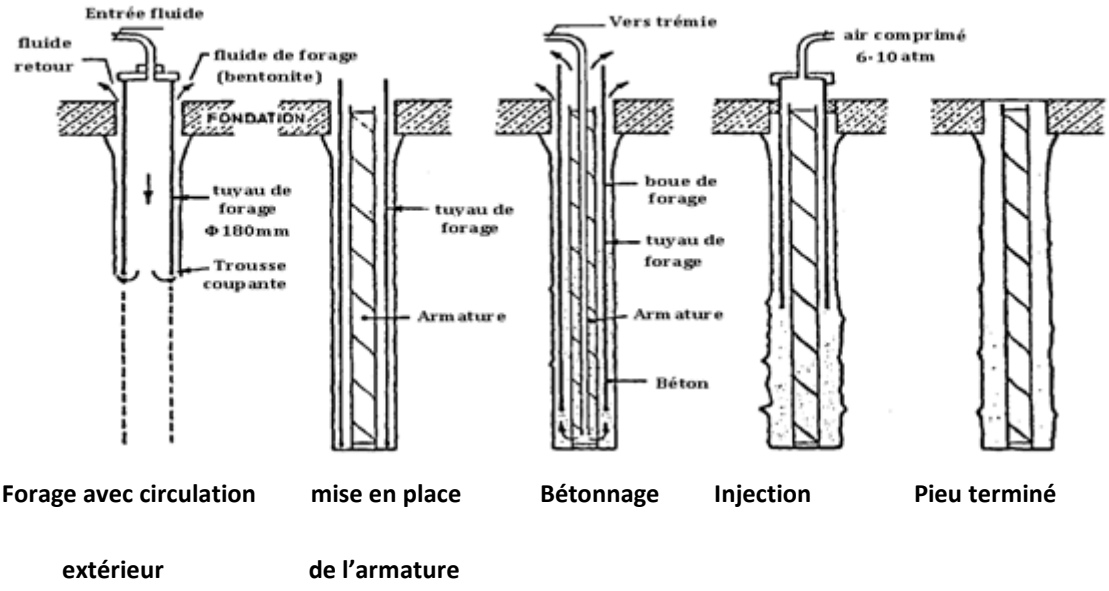


Fig. II.12: Réalisation des micropieux de type I

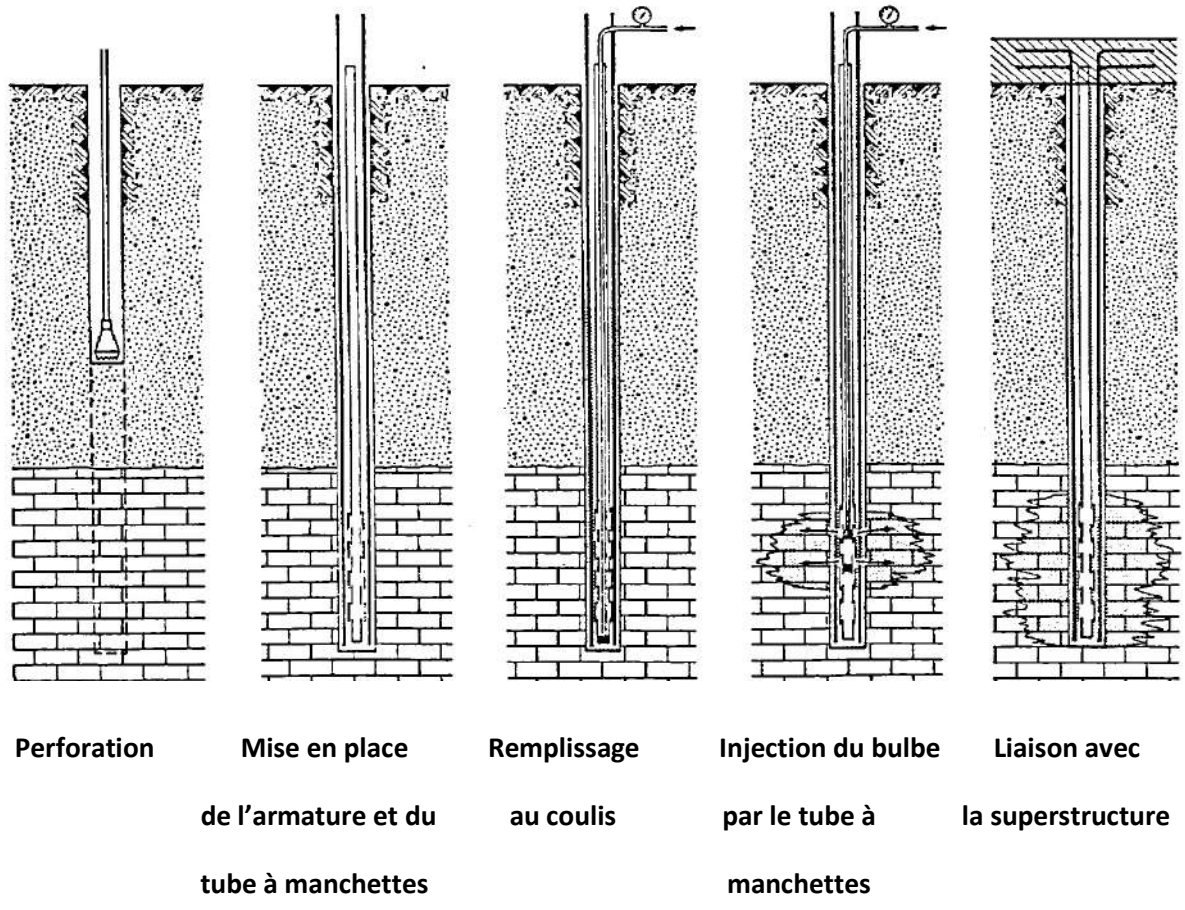
(Azuar et Renault, 1986) [4]

Pour les micropieux de type III et IV, l'injection de la partie scellée du micropieu est faite à travers des manchettes.Cette injection a normalement lieu

après durcissement du coulis de gaine.

Azuar et Renault (1986) précisent que des clapets ou manchettes répartis dans la zone d'ancrage permettent de distribuer de manière homogène le coulis de scellement.

La figure (II.13) indique les différentes phases de réalisation d'un micropieu injecté (Fenoux,1976).



<u>Fig.II.13</u>: Les différentes phases de réalisation d'un micropieu injecté (Fenoux,1976) [4]

II.3.5.4) Liaison micropieu–structure :

Liaison avec la fondation existante (cas de reprise en sous-œuvre) : La liaison est assurée, selon le type de fondation, soit par l'installation d'une longrine-chevalet passant sous la semelle existante et appuyée sur les têtes de deux micropieux, soit par une équerre métallique soutenant la semelle et solidarisé avec la tête du micropieux.

II.3.6)Applications des micropieux : [3]

Les micropieux ont connu un vaste domaine d'application, Une étude statistique réalisée par Van Impe (1997) montre qu'en 1997 l'utilisation des micropieux (ayant un diamètre inférieur à 150 mm) constituait 6% du marché international des pieux. En Europe, ce même rapport est de 7%. On présente, dans ce paragraphe, quelques exemples des applications historiques ou récentes des micropieux dans les différents domaines :

- pour la réalisation de reprises en sous- œuvre (fondation existante de portance insuffisante).
-le confortement des pentes : amélioration de stabilité des pentes par clouage,
- le renforcement des sols dans lequel le micropieu est associé au sol pour donner un matériau composite.
- la réalisation de fondations neuves dans des espaces réduits non accessibles aux équipements pieux traditionnels :
- les fondations de radiers soumis à des sous pressions (combinaison d'efforts traction /compression) ;

- les fondations de pylônes électriques ou hertziens ;

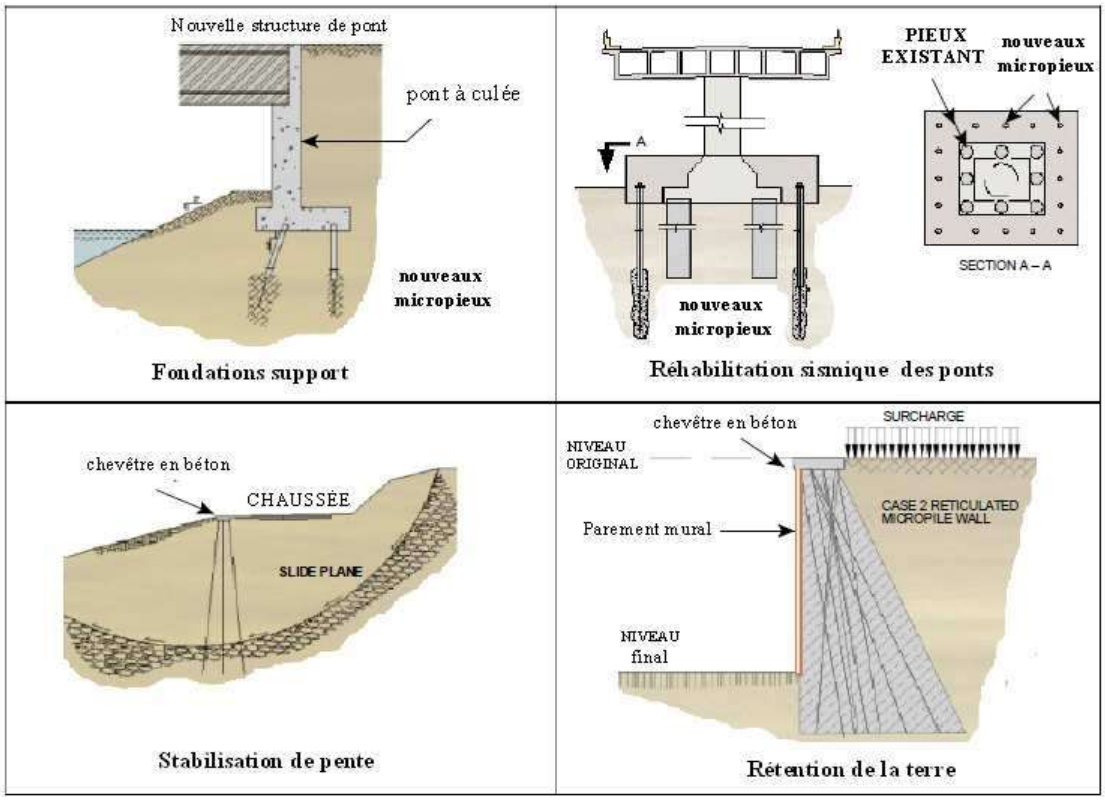
- les fondations d'éoliennes ;

- la réparation de glissements de terrain par frettage du sol ;

- la fondation d'écrans anti bruits ;

- le confinement en travaux souterrains (voute parapluie, Puits . . .).

- protection des ouvrages souterrains lors des travaux d'excavations, ainsi que pour les fondations neuves de bâtiments.



II.3.6.1) Reprise en sous-œuvre et confortement de bâtiments anciens :

L'application la plus connue des micropieux est la reprise en sous-œuvre des monuments et immeubles anciens .Le but de cette reprise est de conforter les fondations exitantes pour minimiser les tassements différentiels.

- Les travaux de rénovations de la gare du quai d'Orsay, transformée en musée, ont eu également recours aux micropieux.

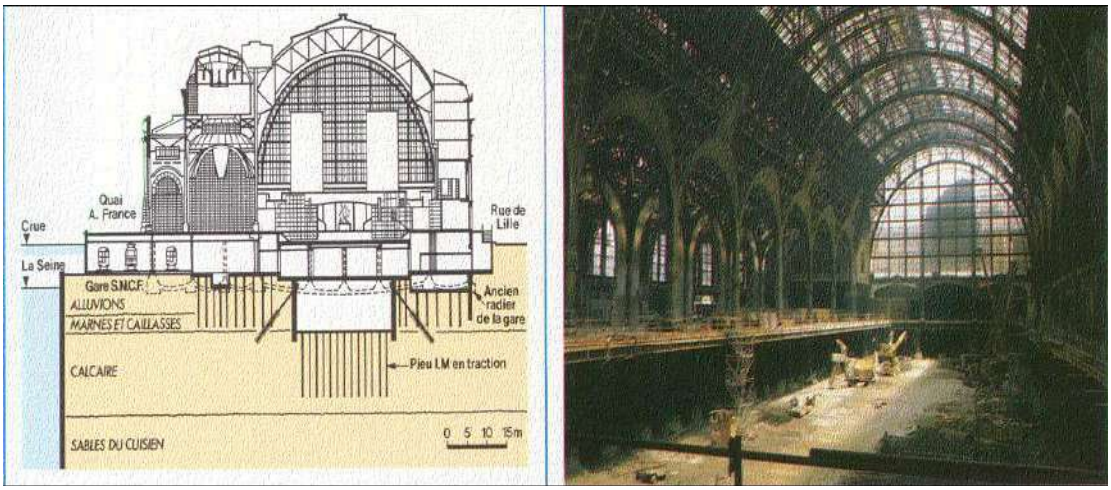


Fig. II.14 : Rénovation de la gare du quai d'Orsay transformée en Musée (Soletanche).

- La construction d'un hôtel de 6 étages dans le centre ville historique de Barcelone exige la mise en place d'un système de fondation complexe à travers des ouvrages souterrains existants (Alonso et Casanova, 1991). Le recours à un système de fondations par micropieux a été adopté.

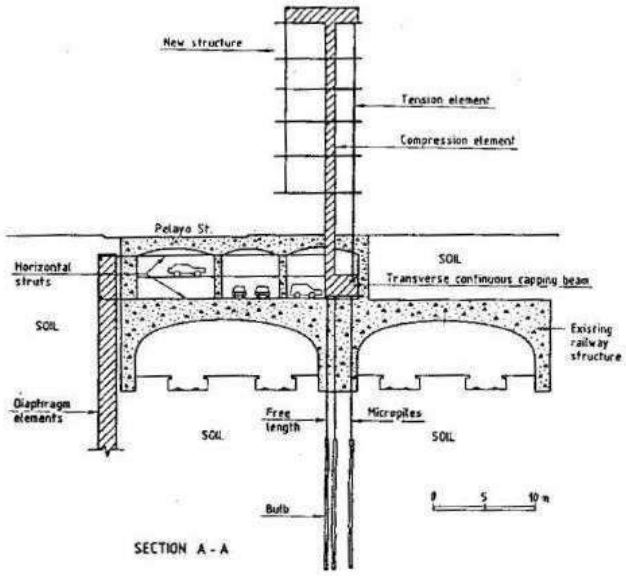


Fig. II.15 : Schéma d'une section du projet de construction d'un immeuble sur ouvrages existants (Lizzi, 1982b).

II.3.5.2) Renforcement des sols :

Selon les résultats des statistiques réalisés par Van Impe (1997), le renforcement des sols par micropieux occupe 9% du marché international du renforcement. On y distingue la stabilité des pentes ou des talus, et la protection des ouvrages souterrains lors des excavations.

II.3.5.2.1) Protection des ouvrages souterrains lors des travaux d'excavation :

La figure (II.16) montre des schémas de renforcement du sol autour d'un tunnel.

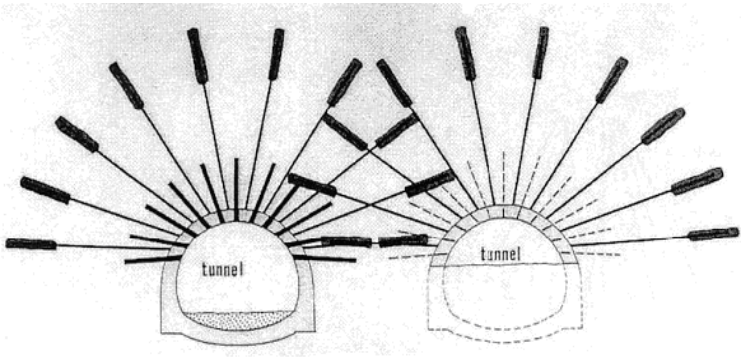


Fig. II.16 : Schéma de renforcement de l'arche d'un tunnel (Fiorotto, 2000).

L'utilisation des micropieux comme fondations pour constructions et ouvrages neufs est parfois aussi pratiquée. En France, quelques applications ont été réalisées.

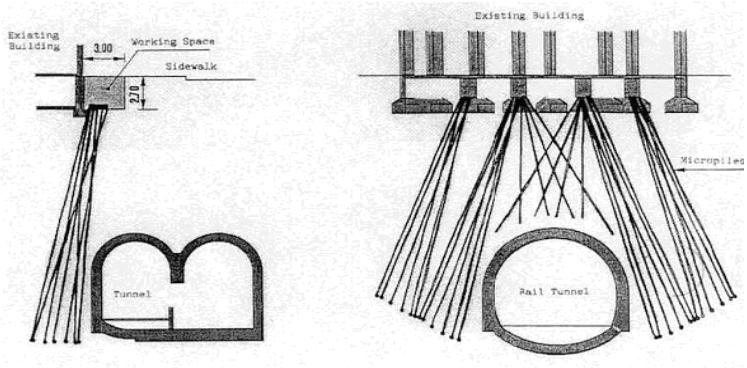


Fig. II.17 : **Schéma du système de stabilisation de la pente par micropieux (Fiorotto, 2000)**

II.3.5.2.2) Stabilisation des pentes et des talus :

La stabilisation des glissements de talus par des réseaux simples de micropieux (en chevalets) est répandue aux Etats-Unis. La figure (II.17) montre une application pour la stabilisation d'une pente sur l'autoroute 26/89 dans le Wyoming (Wolosick et al. 1998).

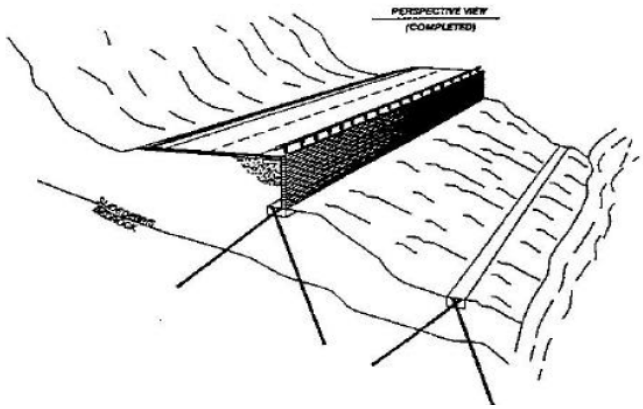


Fig. II.18:Schéma du système de stabilisation de la pente par micropieux

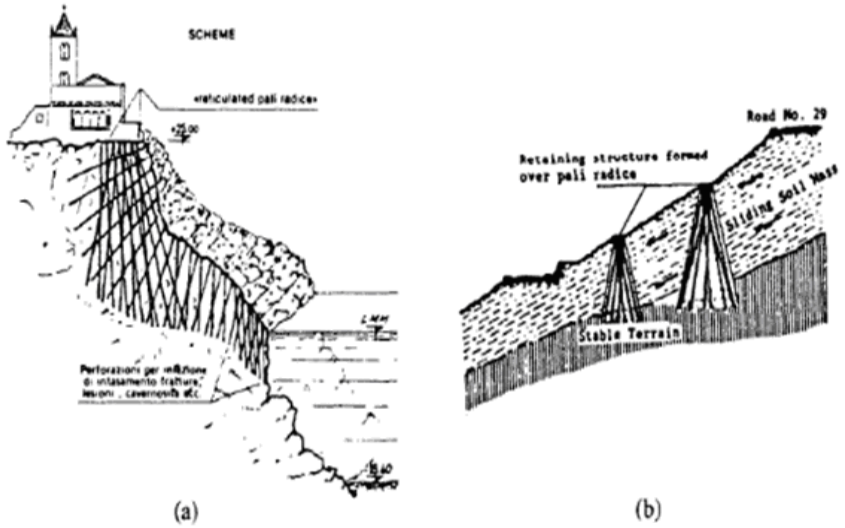


Fig. II.19 : stabilisation des pentes, Lizzi (1982) [4]

Une autre utilisation consiste à créer, à l'aide d'un réseau de micropieu, un genre de mur de soutènement en place, constitué par le sol enserré et les inclusions.

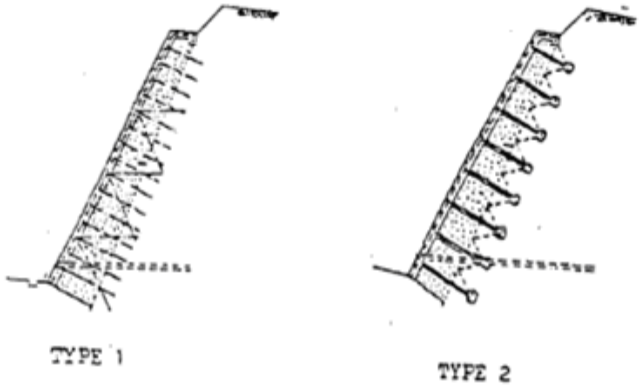


Fig. II.20 : méthode de pieu racine, RPM, "Root pile Method"

(Iwabushi, 1979)

Nota : Plus de détails sur la stabilité des pentes et des talus dans le chapitre IV.

II.4) Conclusion:

Les micropieux sont des pieux élancés de faible diamètre (inférieur à 25 cm), classés dans les types de fondations profondes :

- leurs exécutions ne nécessitant qu'un outillage de faible encombrement et minimales perturbations à l'équilibre de la structure, du sol et de l'environnement.

- Ils travaillent dans des conditions souvent difficiles ou l'utilisation de matériels classiques d'exécution des pieux normaux est difficile.

- la différence de diamètre permet de travailler dans des espaces réduits.

-La classification des micropieux diffère de celle des pieux. Cette dernière distingue deux catégories :
Les pieux refoulant et les pieux non refoulant. Cette distinction découle de la méthode de mise en place du pieu dans le sol. Dans la première catégorie, le sol est refoulé latéralement lors de l'installation du pieu. Dans la deuxième catégorie, le sol existant est prélevé et remplacé par le pieu.

CHAPITRE III :

Dimensionnement

des micropieux

III) Dimensionnement des micropieux :

III.1) Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude du dimensionnement des micropieux. Il se décompose en trois parties : La première partie présente l'étude des micropieux sous chargement axiale, il en résulte que, le comportement d'un micropieu est principalement régi par le frottement latéral qui se développe le long du fût.

La résistance de pointe reste en général négligeable, elle n'est mobilisée que tardivement, après le frottement latéral. La deuxième partie est concernée par l'étude des micropieux sous chargement transversal et la troisième partie comporte une méthode du calcul des micropieux isolés, en groupe et en réseaux à travers les méthodes des éléments finis et la méthode des fonctions de transfert de charge .ainsi que la détermination de la capacité des micropieux dans les sols cohérents et pulvérulents.

III.2) Dimensionnement des micropieux sous charge axiale : [6]

III.2.1) Calculs des micropieux soumis à des charges axiales :

En 2002, il existe deux règlements français concernant le calcul des micropieux.

La norme P 11-212-1 (DTU13-2) s'applique au calcul des micropieux de bâtiment, le fascicule 62-titre V (1983) aux micropieux de génie civil.

On présentera, dans ce document, le fascicule 62-titre V qui est plus précis que la norme P 11-212-1 et prend bien en compte les actions sur les fondations profondes (frottement négatif, poussées latérales…). Si les principes sont les mêmes pour la norme P 11-212-1, les tableaux, abaques et coefficients de sécurité partiels sont différents.

II.2.1.1) Principes du calcul :

Les principes de justification des micropieux sont conformes à la théorie générale du calcul aux états limites qui consiste, pour un état limite donné, à vérifier que la charge axiale de calcul reste égale ou inférieure à la capacité portante de l'élément de fondation.

On distingue:

– les états limites ultimes (ELU) : qui ont pour objet de s'assurer que la probabilité de ruine de l'ouvrage est acceptable;

– les états limites de service (ELS) : qui ont pour objet des s'assurer qu'un seuil de déplacement jugé critique est acceptable.

La charge axiale de calcul résulte, pour une situation donnée, de la détermination de la sollicitation de calcul à partir d'une combinaison d'actions. Les actions sont multipliées par des coefficients de pondération γ et il est appliqué un coefficient de méthode de 1,125 dans le calcul de la sollicitation due aux actions.

La capacité portante, dans un état limite donné, est obtenue en divisant par un coefficient de sécurité partiel la charge limite de ce même état.

III.2.1.2. Situations et actions : [6]

❖ **Situations :**

La justification de la structure est envisagée pour différentes actions:

– situations en cours de construction;

– situations en cours d'exploitation;

– situations accidentelles.

❖ **Actions :**

Les actions sont classées en actions permanentes, variables et accidentelles:

– G actions permanentes;

– Q actions variables;

– F_A actions accidentelles.

Les valeurs représentatives des actions sont:

– pour les actions permanentes: G_k ;

– pour les actions variables :

– valeurs caractéristiques Q_{ik} de l'action Q_i ;

– valeurs de combinaison $\Psi_{0i} .Q_{ik}$;

– valeurs fréquentes $\Psi_{1i}. Q_{ik}$;

– valeurs quasi permanentes $\Psi_{2i} .Q_{ik}$;

Les actions sont transmises aux micropieux:

– directement par la structure (par exemple, les charges de ponts routiers définies par le fascicule 61-Titre II), en tenant compte éventuellement de l'interaction sol-structure;

➢ **par le sol** :

• actions dues à un déplacement d'ensemble du sol:

– tassement du sol entraînant un frottement négatif (action permanente G_{sn}),

– instabilité du sol pour des fondations dans une pente entraînant des poussées latérales (action permanente G_{sp}),

– fluage du sol, dans le cas par exemple de fondations profondes implantées à proximité d'un remblai sur sol compressible entraînant des poussées latérales (action permanente G_{sn});

• **actions dues à l'eau** : **[6]**

– Pressions interstitielles en tenant compte des forces d'écoulement si elles existent (action G_w avec $\gamma_w = 10$ kN/m^3),

– Effets hydrodynamiques (poussée de courant, houles, séisme…).

III.2.1.3) Combinaisons d'actions et sollicitations de calcul :

Les sollicitations (efforts internes) dans les micropieux sont calculées à partir des actions (efforts externes) en tenant compte de modèles de comportement plus ou moins complexes et représentatifs de la réalité.

❖ **Combinaisons d'actions et sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites ultimes :**

- **Combinaisons fondamentales :**

$$1.125S\left\{1.2G_{max}+0.9G_{min}+\gamma_{Gw}G_w+[\gamma_{sn}G_{sn}]+\gamma_{sp}G_{sp}+\gamma_{Fw}F_w+\gamma_{F1Q1}Q_{1k}+\sum_{i>1}1.15\psi_{0i}Q_{ik}\right\}$$

G_{max}: actions permanentes défavorables,

G_{min}: actions permanentes favorables,

G_w: actions des pressions de l'eau,

G_{sn} : actions éventuelles de frottement négatif,

G_{sp} : actions éventuelles de poussées latérales,

F_w: actions hydrodynamiques

Q_{1k}: valeur caractéristique de l'action variable de base,

$\psi_{0i}Q_{ik}$: valeur de combinaison d'une action variable d'accompagnement.

Les sollicitations dues au frottement négatif ont été isolées car elles ne se cumulent pas intégralement avec celles dues aux actions variables. Pour les justifications on prendra le maximum, soit des actions permanentes et du frottement négatif, soit des actions permanentes et des surcharges.

En ce qui concerne les coefficients de pondération:

γ_{Gw} vaut 1,0 lorsque la pression interstitielle présente un caractère favorable,

1,05 lorsque la pression interstitielle présente un caractère défavorable;

γ_{sn} vaut 1,2 ou 1, sa valeur étant choisie de manière à obtenir l'effet le plus défavorable;

γ_{sp} vaut 1,2 ou 0,6, sa valeur étant choisie de manière à obtenir l'effet le plus défavorable;

γ_{Fw} vaut 1,2 ou 0,9, sa valeur étant choisie de manière à obtenir l'effet le plus défavorable;

$\gamma_{F1\ Q1}$ vaut 1,33 dans le cas général,

1,20 pour les charges d'exploitation étroitement bornées ou de caractère particulier.

- **Combinaisons accidentelles :**

$$S\left\{G_{max} + G_{min} + G_w + [G_{sn}] + G_{sp} + F_w + F_A + \psi_{11}Q_{1k} + \sum \psi_{2i}Q_{ik}\right\}$$

❖ **Combinaisons d'actions et sollicitations de calcul vis-à-vis des états limites de service :**

• **Combinaisons rares :**

$$S\left\{G_{max} + G_{min} + G_w + [G_{sn}] + G_{sp} + F_w + Q_{1k} + \sum \psi_{0i}Q_{ik}\right\}$$

• **Combinaisons fréquentes :**

$$S\left\{G_{max} + G_{min} + G_w + [G_{sn}] + G_{sp} + F_w + \psi_{11}Q_{1k} + \sum \psi_{2i}Q_{ik}\right\}$$

• **Combinaisons quasi permanentes :**

$$S\left\{G_{max} + G_{min} + G_w + G_{sn} + G_{sp} + F_w + \sum \psi_{2i}Q_{ik}\right\}$$

III.2.2) Détermination de la Capacité portante :

III.2.2.1) Evaluation de l'effort total mobilisable par frottement latéral q_s :

Les valeurs du frottement latéral limite (unitaire) q_s données dans les règlements ont généralement été établies empiriquement à partir d'essais de chargement de micropieu et/ou de tirants d'ancrage.

La valeur du frottement latéral unitaire q_s dépend beaucoup du mode d'exécution du micropieu (outil de forage, fluide de forage, type d'injection, pression d'injection…).

Même si la nature du sol et sa compacité jouent un rôle important, c'est le couple type de micropieu/nature du sol qui est dimensionnant.

La valeur du frottement latéral q_s, pour un sol donné, est fournie par des jeux d'abaques en fonction de la valeur de la pression limite $p_l(z)$ mesurée au pressiomètre normal Ménard ou en fonction de la résistance de pointe $q_c(z)$ mesurée au pénétromètre statique.

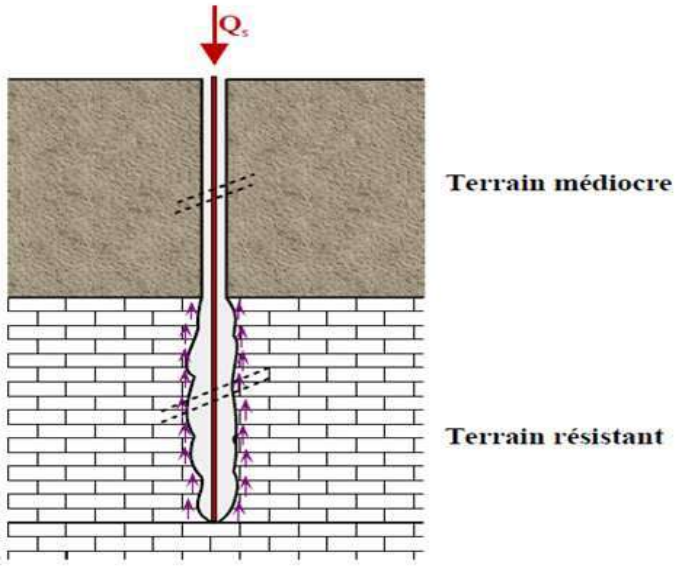


Fig. III.1 : Frottement latéral

III.2.2.2) Evaluation de l'effort total mobilisable sous la pointe :

Ceci intéresse les micropieux de type I et les micropieux de type II des diamètres les plus importants. Il convient par ailleurs de rappeler également les problèmes de tassement que l'on peut rencontrer quand on envisage de mobiliser la résistance de pointe.

L'effort total mobilisable sous la pointe peut se mettre sous la forme :

$$\mathbf{Q_{pl} = A.\ (k_p\ (p_l - p_o) + (q_o))}$$

Où : k_p : est le facteur de portance de la pointe (tableau III)

p_l : est la pression limite pressiométrique au niveau de la pointe.

p_o : est la contrainte horizontale (sur un plan vertical) totale au moment de l'essai pressiométrique au niveau envisagé pour la pointe

q_o : représente la contrainte totale verticale au niveau de la pointe calculée dans la situation où l'on justifie le micropieu.

A : est la section du forage.

Où l'équation décrivant la contrainte horizontale (p_o) est :

$$\mathbf{p_o = u + (\sigma_{vo} - u)\ .K_o}$$

Avec : σ_{vo} : contrainte totale verticale.

u : pression interstitielle.

K_o : coefficient de poussée des terres au repos.

Tableaux III.1 : facteur de portance de la pointe en fonction du type de sol

sol	k_p
Argiles - Limons	1,2
Sables - Graves	1,1
Craies - Marnes Marno-calcaires	1,8
Rocher altéré ou fragmenté	1,1 à 1,8

III.2.3) Justification des micropieux : [6]

❖ **Justifications vis-à-vis du sol :**

Elles consistent à vérifier que la charge axiale de calcul reste comprise entre Q_{min} (traction) et Q_{max} (compression) dans les deux états limites.

Etats Limites Ultimes	Q_{min}	Q_{max}
Combinaisons fondamentales	$-\frac{Q_{tu}}{1,40}$	$\frac{Q_u}{1,40}$
Combinaison accidentelles	$-\frac{Q_{tu}}{1,20}$	$\frac{Q_u}{1,20}$

Etats Limites de Services	Q_{min}	Q_{max}
Combinaisons rares	$-\frac{Q_{tc}}{1,10}$	$\frac{Q_c}{1,10}$
Combinaison quasi-permanentes	$-\frac{Q_{tc}}{1,40}$	$\frac{Q_c}{1,40}$

❖ **Justifications des micropieux vis-à-vis des critères de résistance des matériaux**

Les justifications qui suivent ne concernent que les micropieux de type II, qui sont pratiquement les seuls utilisés pour les ouvrages d'art.

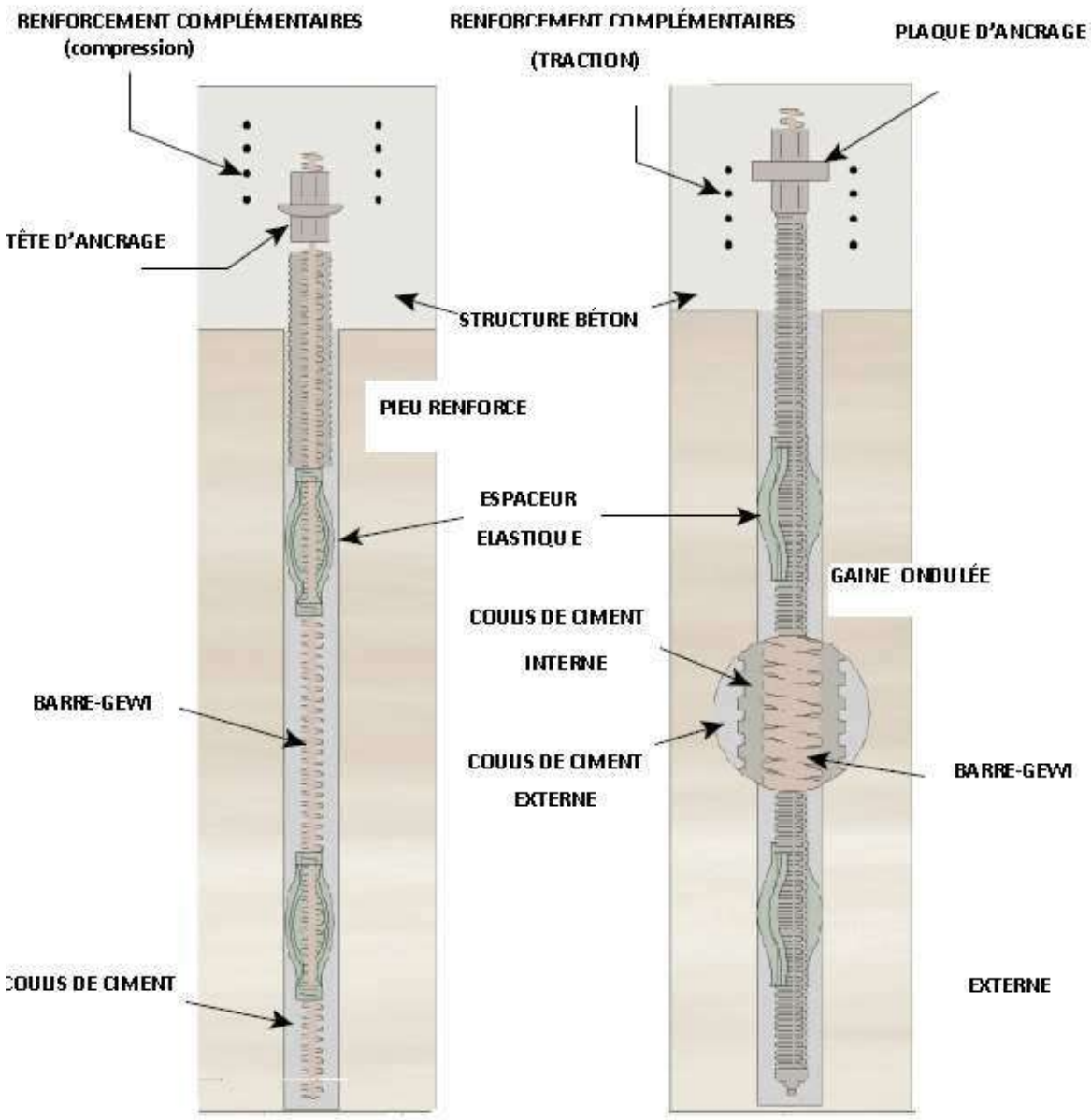
A) phénomènes de corrosion :

Les calculs justificatifs sont conduits en ne tenant compte que de la section d'acier réduite par corrosion, c'est-à-dire en neutralisant une certaine épaisseur de métal sur l'ensemble du périmètre de la section étudiée.

Le tableau III ci-dessous donne, à titre indicatif, des valeurs moyennes du taux de corrosion, que l'on pourra adopter en l'absence d'études spécifiques

Tableau III.2 : Taux de corrosion des aciers

Nature du milieu	Taux de corrosion annuelle par face
Terrain non agressif hors d ' eau	0,02 mm
Présence d'une nappe non agressive	0,03 mm
Micropieu en eau douce polluée biologiquement ou chimiquement	0,03 à 0,08 mm selon intensité
Micropieu en eau de mer	0,1 mm
Micropieu en eau de mer avec effet d'érosion ou en eau très chaude	0,14 mm



<u>Fig. III.2</u>: Pieux GEWI avec la protection de coulis : (a)protection de coulis seulement, et (b) Double protection contre la corrosion [7]

B) phénomène de flambement (stabilité de forme des micropieux) :

On vérifie que les micropieux travaillant en compression ne flambent pas, spécialement quand ils traversent, en tête des sols médiocres. En effet, contrairement aux pieux qui ont une inertie de flexion, EI, suffisante pour ne pas flamber, les micropieux ont une très faible inertie surtout quand ils sont équipés de barres.

Pour des charges importantes et à la traversée de sols peu résistants on utilisera donc plutôt des tubes pour bénéficier d'une inertie suffisante qui évitera le flambement du micropieu. Dans tous les cas on vérifiera les micropieux au flambement en appliquant la méthode de MANDEL ou à l'aide de logiciels adaptés à ce type de problème.

Les abaques de MANDEL permettent d'obtenir la force critique de flambement F_c dans un sol homogène**,** avec :

- EI: la rigidité à la flexion du micropieu en ne prenant en compte que l'armature;
- k: module de réaction du sol en prenant le diamètre total B du micropieu (armature +coulis), calculé à partir du module pressiométrique et sous longue durée d'application.
- l : ½ longueur du micropieu dans la couche où le micropieu risque de flamber.

La force de flambement tend rapidement vers une valeur limite pour

$$\lambda = l \times \left(kB/EI\right)^{\frac{1}{4}} \geq 2.$$

Cette valeur vaut :

♦ 1 pour un micropieu libre ou encastré à une extrémité et libre à l'autre ;

♦ 2 pour un micropieu biarticulé ou encastré aux deux extrémités.

$$F_c = 2\sqrt{kBEI}$$

III.3) Dimensionnement sous chargement transversal :

III.3.1) Définitions des différents types de sollicitations transversales : [6]

Les micropieux peuvent être sollicités par des efforts latéraux soit en tête, soit sur une partie du fût. Classiquement dans ce type d'ouvrage on considère les axes x, z avec z positif dirigé vers le bas.

On désigne par B le diamètre du fût du micropieu et par φ le diamètre de l'armature (barre ou tube).

En tête, les efforts sont transmis par la superstructure (Fig. III.2). Ils peuvent être représentés par leurs éléments de réduction, N_0 (effort normal), T_0 (effort tranchant) et M_0 (moment fléchissant). On peut découpler l'effet de l'effort normal de ceux de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

Sur une partie du fût, les efforts sont transmis par des poussées latérales du terrain d'autant plus importantes que ce terrain est instable; $g(z)$ désigne le déplacement libre du sol et $y(z)$ celui du micropieu (Fig. III.3).

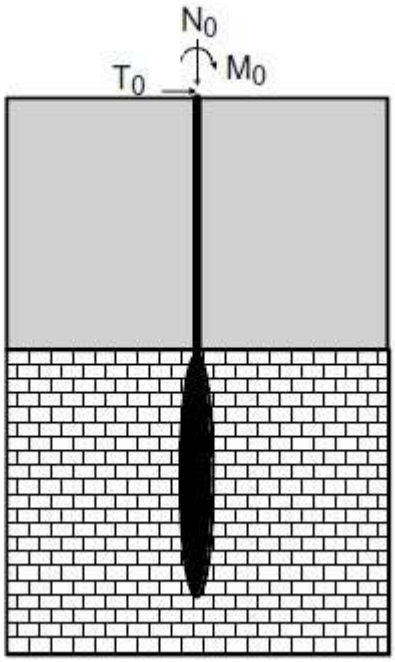


Fig.III.3 : Micropieu soumis

à des efforts en tête N_0, T_0 et M_0.

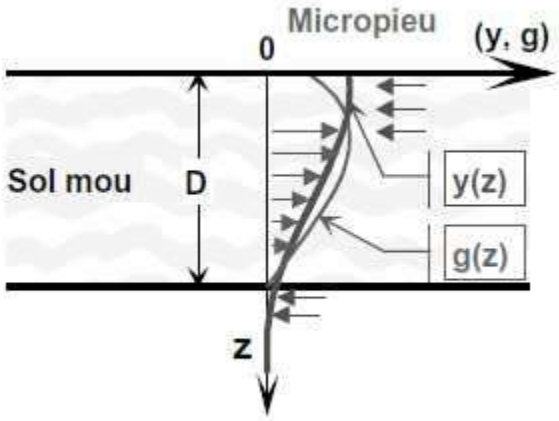
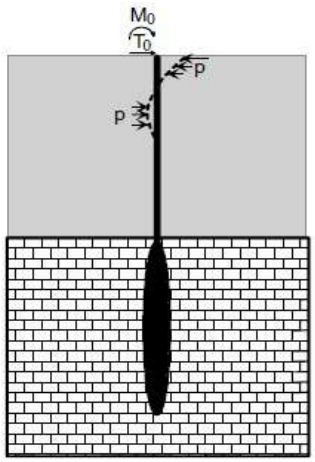


Fig. III.4: Micropieu soumis à des efforts latéraux sur une partie du fût.

III.3.2) Comportement du micropieu sous sollicitations transversales :

Lorsqu'un micropieu est soumis en tête à des efforts transversaux: moment M_0 et effort tranchant T_0, il va se déplacer pour mobiliser dans le sol des réactions p équilibrant en tout point z, le moment fléchissant $M(z)$ et l'effort tranchant $T(z)$ (Fig. III.5).

La réaction du sol sur le micropieu $P=p.B$ (kN/m) est fonction du déplacement y perpendiculaire au micropieu. La courbe de réaction du sol P (y) a généralement l'allure d'une courbe hyperbolique (Fig. III.6).



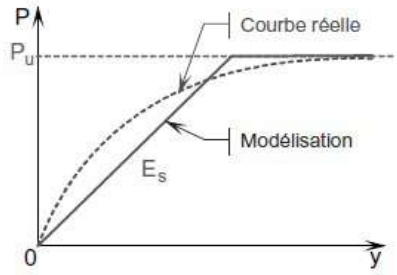


Fig. III.5 : Mobilisation de la réaction latérale du sol par un micropieu

Fig.III.6 : Courbe de réaction sol -micropieu

Si on linéarise la courbe de réaction du sol par une seule droite sécante et par une valeur limite pour un certain déplacement, on définit le module de réaction Es par la pente (Fig. III.6).

$$E_s = \frac{P}{y} \text{ (kPa)}$$

Le coefficient de réaction *k* est défini :

$$k = \frac{P}{y} \text{ (kN/m}^3 \text{ ou kPa/m)}$$

On a donc:

$$E_s = k \times B$$

Le comportement du micropieu dépend à la fois de sa propre rigidité à la flexion (E_p .I_p) et de celle du sol E_s, donc de la rigidité relative micropieu-sol. On l'exprime, classiquement, par la longueur de transfert l_0.

Un micropieu, compte tenu de son grand élancement, généralement supérieur à 100, a le comportement souple d'un pieu relativement long dans la terminologie du calcul des pieux sous efforts transversaux. On tiendra compte de sa déformée propre, mais les conditions en pointe n'auront pas d'influence sur les efforts et déplacements de la partie supérieure.

Il est important de signaler que la plupart des méthodes de calculs adoptées pour les micropieux, ont été développées, à l'origine, pour les pieux. On précisera, éventuellement, s'il s'agit d'une méthode de calcul propre aux micropieux.

Le cas du chargement statique (vertical ou horizontal) des micropieux, est uniquement traité dans ce chapitre et dans les chapitres qui suivent. On notera, toutefois, que le comportement des micropieux (isolés, en groupes ou en réseaux) sous chargement sismique fait l'objet de plusieurs recherches.

Parmi les recherches récentes, citons celles menées dans le cadre de FOREVER, en France (Ousta 1998; Shahrour et al. 2001 ; et FOREVER, 2002), et aux Etats-Unis (Benslimane, 1998; Juran et al. 2001).

III.4) Méthodes de calcul :

III.4.1) Micropieu isolé :

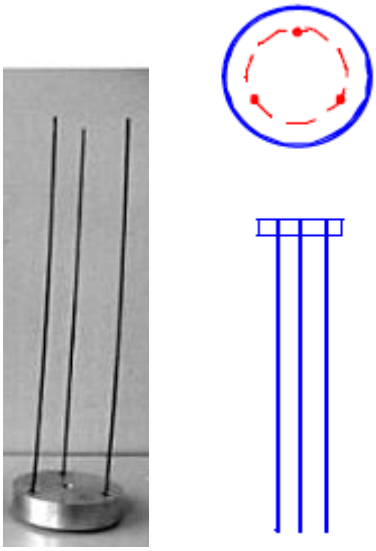


Fig.III.7 : **micropieux isolés [6]**

III.4.1.1) Chargement axial :

Les différentes méthodes de calcul des micropieux isolés soumis à un chargement axial permettent de déterminer les sollicitations internes le long du micropieu, d'évaluer son tassement ou sa portance.

III.4.1.1.1) Les méthodes numériques :

- **Méthode des éléments finis : [3]**

Les applications de cette méthode pour le calcul des pieux sont relativement rares (si on les compare aux autres méthodes). Cet outil permet, toutefois, de modéliser le chargement des pieux ainsi que leur mise en place dans le sol par forage ou par battage (Mestat, 1998).

Ellison et al. (1971) ont, parmi les premiers, utilisé une analyse axisymétrique par éléments finis pour étudier le comportement de pieux isolés sous charge axiale.

Frank, Guenot et Humbert (1980) utilisent la méthode des éléments finis pour modéliser des essais de chargement axial de pieux en vraie grandeur (CRAN et PLANCOET). Le sol est considéré comme élastique linéaire isotrope. L'interaction sol-pieu est modélisée par des éléments de contacts.

Trochanis et al. (1991a et 1991b) ont étudié l'effet d'un modèle non linéaire du sol sur le comportement de pieux isolés (et de groupe de deux pieux) par un calcul élasto-plastique tridimensionnel.

De Gennaro (1999) utilise la méthode des éléments finis pour étudier le comportement d'interface entre un milieu granulaire et une structure métallique rugueuse. Cette étude a été réalisée dans le cadre de la théorie de l'élastoplasticité.

Dans le cadre du Projet national FOREVER, l'influence de l'inclinaison d'un micropieu isolé sur son comportement sous un chargement axial (ou horizontal) a fait l'objet d'une étude par éléments finis en déformation plane, par Shahrour et Ata (1994).

- **Méthode des fonctions de transfert de charge :**

Le principe de cette méthode consiste à modéliser le sol par un nombre de ressorts indépendants répartis le long du fût du pieu ainsi que sous sa base (modèle de Winkler / méthode du module de réaction).

Le module des courbes de mobilisations ('t-z' pour le frottement axial et 'q-z' pour la réaction en pointe) de ces ressorts sont définis à partir d'essais divers, notamment les essais pressiométriques, le CPT, ou le SPT, ou à partir de lois de comportement.

III.4.1.2) Chargement transversal :

III.4.1.2.1) Les méthodes numériques :

- **Méthode des éléments finis :**

Baguelin, Carayannacou-Trézos et Frank (1979) étudient l'effet de la forme et les effets tridimensionnels sur le comportement des pieux sous charge horizontale. La méthode des éléments finis en déformation plane est utilisée pour étudier le comportement de sections de pieux qui se déplacent dans un plan horizontal. Une méthode de construction des courbes de réaction pour le cas des barrettes est ainsi proposée. La variation du module de réaction avec la profondeur est également étudiée.

Lane et Griffiths (1988) utilisent une approche en déformation plane par éléments finis pour étudier le cas d'un pieu isolé, de section circulaire, soumis à une charge horizontale en tête et en déduisent la charge limite obtenue pour un sol pulvérulent et deux types d'interfaces : lisse et rugueuse.

- **Méthode des fonctions de transfert de charge :** **[3]**

Cette méthode est la plus pratiquée pour le calcul des pieux chargés horizontalement.

Matlock and Reese (1960), Ménard (1962) et Davidson (1970), présentent une méthode de résolution très générale, et dégagent les paramètres essentiels intervenant dans le comportement des pieux soumis à une charge horizontale, notamment la définition du module des courbes de réaction (figure III.8).

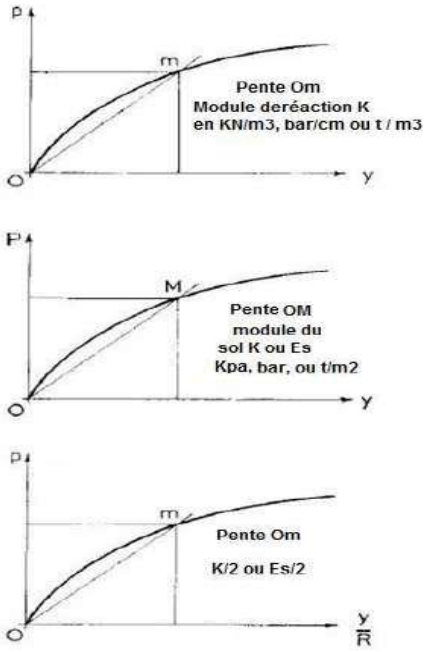


Fig. III.8 : Courbes de réaction et modules[6]

III.4.2) Groupes de micropieux : [6]

III.4.2.1) Définition :

Un élément de fondation ou une semelle repose généralement sur deux ou trois micropieux au minimum, pour tenir compte des éventuelles excentricités de chargement.

On appelle groupe de micropieux un ensemble de micropieux verticaux (avec, dans le cas d'un grand nombre de micropieux, éventuellement quelques micropieux du pourtour inclinés vers l'extérieur).

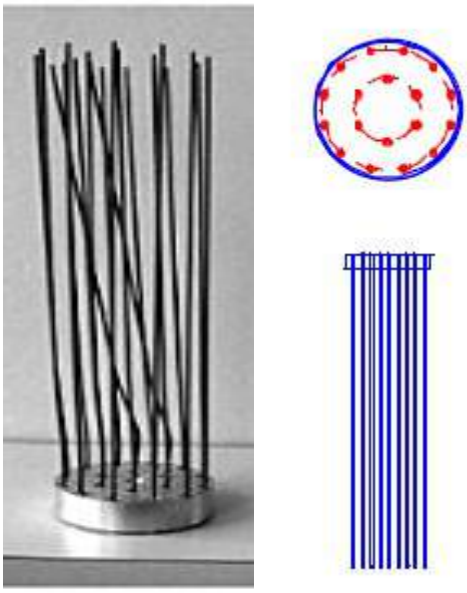


Fig.III.9 : Groupe vertical [6]

III.4.2.2) Chargement axial :

III.4.2.2.1) Les méthodes numériques : [3]

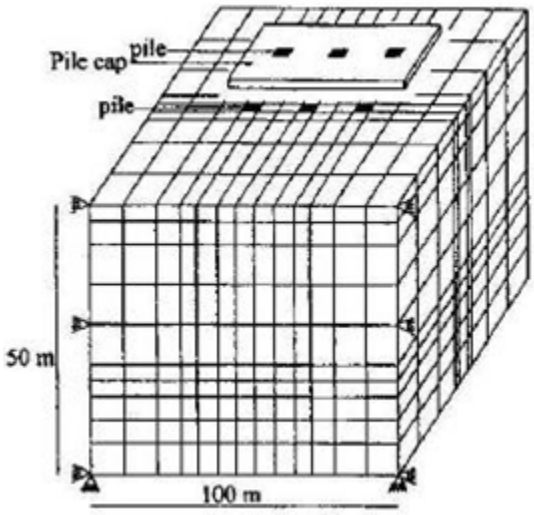
- **Méthode des éléments finis :**

La méthode des éléments finis est également utilisée pour l'étude du comportement des groupes de pieux sous charge verticale. Desai et al. (1974) et Schad (1992) modélisent des groupes de pieux dans une étude bi-dimensionnelle en déformation plane.

Preesly et Poulos (1986) adoptent une modélisation axisymétrique d'un groupe de 4 pieux reliés en tête par une semelle de liaison. Le sol est assimilé à un matériau ayant un comportement élastoplastique sans écrouissage. L'interaction entre le pieu et le sol est modélisée par des éléments de conatcts. Cette étude montre, que pour des pieux à faible espacement, le système de rupture du groupe se produit au niveau des faces externes des pieux (rupture du bloc). Alors que pour des espacements plus grands la rupture a lieu au niveau de chaque pieu du groupe.

Ottaviani (1975) réalise la première modélisation tridimensionnelle par éléments finis pour étudier l'influence du contact avec le sol de la semelle de liaison des pieux d'un groupe.

Jeong et al. (1997) utilisent une modélisation tridimensionnelle pour étudier l'effet d'interaction entre les pieux foncés d'un groupe (figure III.10). L'étude paramétrique a permis d'obtenir des coefficients d'interaction pour des pieux flottants et des pieux dont la portance est assurée par la pointe ; ceci pour deux valeurs d'entr'axe (S/B = 2.5 et S/B = 5) entre les pieux et pour deux hypothèses de lois de comportement du sol (de l'argile) (élastique linéaire, ou élasto-plastique).



<u>Fig.III.10 :</u> Maillage tridimensionnel d'un groupe de pieux. [6]

➢ <u>Méthode des fonctions de transfert de charge :</u>

Si la méthode des fonctions de transfert de charge reste la plus courante pour le calcul du comportement des groupes de pieux chargés verticalement, l'application de cette technique fait toujours appel à d'autres méthodes pour la prise en compte de l'interaction entre les pieux du groupe.

III.4.2.3) Chargement transversal :

Si le calcul des groupes de pieux chargés axialement se limitait à l'évaluation de l'interaction sol- pieu (interaction essentiellement due à leur mise en place ou à leur chargement), le cas des groupes de pieux chargés horizontalement présente, quant à lui, un phénomène plus complexe d'interaction 'pieu-sol-pieu' résultant non seulement de la méthode de mise en place des pieux et de leur chargement mais aussi de l'effet d'ombre créé entre les micropieux (Brown et al. (1988)).

III.4.2.3.1) Les méthodes numériques : [3]

- **Méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis a été adoptée par plusieurs chercheurs pour l'étude de l'effet du groupe et notamment l'effet d'ombre créé entre les pieux d'un groupe chargé horizontalement.

Deux approches sont utilisées: bidimensionnelle (Yegian et Wright, 1973, Kay et al. 1983) ou tridimensionnelle (Muktadir et Desai, 1986; Brown et Shie, 1990; Wakai et al. 1999).

Dans le cadre du projet national FOREVER, Shahrour et Ata (1995), présentent une confrontation entre les résultats de calculs par éléments finis : calculs bidimensionnels avec le code PECPLAS, en contraintes planes et en déformations planes, et calculs tridimensionnels de Brown et Shie (1991).

L'étude porte sur un ou deux rangs infinis de micropieux (perpendiculaire(s) à l'effort transversal) et plusieurs espacements sont étudiés (S/B = 2, 3, 5 et 10). Les micropieux ont un diamètre B de 27 cm. La conclusion principale de cette étude numérique est que la courbe p-y tridimensionnelle peut être encadrée par les courbes bidimensionnelles.

Cette première approche bidimensionnelle est complétée par une deuxième approche tridimensionnelle (Shahrour et Ata, 1996), à l'aide du logiciel PECPLAS3D de l'EC Lille) et qui concerne le comportement de micropieux

isolés, de groupes de 2 micropieux (en file dans la direction de l'effort horizontal, avec un espacement S/B = 2 et S/B = 5) et d'un groupe de trois micropieux (en file dans la direction de l'effort, avec un espacement S/B = 2).

La conclusion des auteurs est que l'approche bidimensionnelle est d'une précision suffisante et ne donne pas d'écart sensiblement supérieur à 20 % sur le comportement global. Les courbes de réaction bidimensionnelle sont trop raides uniquement près de la surface (pour z < 5B), sans doute à cause de la non prise en compte du cisaillement entre les tranches horizontales du sol.

- **Méthode des fonctions de transfert de charge:** **[3]**

La prise en compte de l'effet de groupe dans le cas de l'approche par les fonctions de transfert de charge, consiste à introduire des coefficients correcteurs des courbes de réaction (p-y).

Ces coefficients peuvent être empiriques et sont appliqués directement sur les courbes de réaction.

III.4.3.4) Évaluation de la capacité de compression de groupe des micropieux : [7]

- **Dans des sols cohésifs :**

L'efficacité d'un groupe de micropieu installé dans les sols cohérents est une fonction de centre à centre de l'espacement des micropieux, s, et l'état de contact entre le fond de la base de chevêtre des micropieux et le sol près de la surface du sol , D_b = diamètre du trou de forage (voir le tableau III.4).

<u>Tableau III.3</u> : Les facteurs d'efficacité pour des micropieux en groupes dans des sols cohésifs. [7]

cas	Facteur d'efficacité, η
Si le chevêtre est en contact avec le sol ferme	1.0
Si le chevêtre n'est pas en contact avec le sol ferme et le sol est rigide (à savoir, au résistance au cisaillement du sol est supérieure à 95 kPa (1tonne par mètre carré)	1.0
Si le chevêtre n'est pas en contact avec le sol ferme et le sol est relativement mou (à savoir, la résistance au cisaillement du sol est moins de 95 kPa) ou est perturbé	
• $s = 2.5\ D_b$	0.65
• $s = 3.0\ D_b$	0.70
• $s = 6.0\ D_b$	1.0
• $3.0\ D_b < s < 6.0\ D_b$	Interpoler entre 0,70 et 1,0

À l'espacement des micropieux petits, le potentiel pour le groupe de micropieux à l'échec comme un «bloc» doit être évalué. Pour un groupe de micropieux B_g largeur et la longueur, L_g et la profondeur D (comme le montre la figure III.9), la capacité ultime du groupe de micropieux, Q_g, est donnée par:

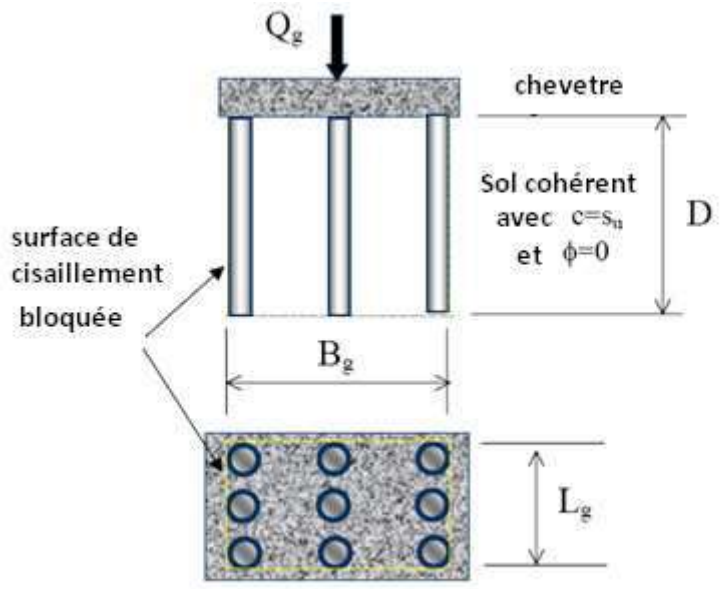
$$Q_g = (2B_g + 2L_g) D \times \overline{s_u} + B_g L_g \times N_c s_u$$

où :

$\overline{s_u}$: est la résistance au cisaillement moyenne non drainée le long de la profondeur de pénétration des micropieux et s_u est la résistance au cisaillement à la base du micropieu en groupe. Le facteur de capacité portante utilisée dans l'équation précédente est calculé selon la formule suivante:

$$N_c = 5\left(1+\frac{0.2B_g}{L_g}\right)\left(1+\frac{0.2D}{B_g}\right) \text{ pour } \frac{D}{B_g} \le 2.5$$

$$N_c = 7.5\left(1+\frac{0.2B_g}{L_g}\right) \text{ pour } \frac{D}{L_g} > 2.5$$



<u>Fig.III.11</u> : Modèle d'échec du bloc pour le groupe de micropieu dans le sol cohésif avec chevêtre en contact avec le sol. [7]

La capacité de groupe à être utilisée pour la conception est évaluée en utilisant les étapes suivantes:

Étape 1: Calculer la capacité du groupe ultime:

$$Q_g = \left(\alpha_{bond} \times \pi \times D_b \times L_b\right) \times no.of\ micropiles\ in\ group \times \eta$$

Où : η :est obtenue à partir du tableau (III.4)

Étape 2: Calculer la capacité du groupe ultime selon l'équation. 5-14 et utiliser une valeur plus basse (à savoir, à partir de l'étape 1 et étape 2) pour la conception.

Étape 3: Utilisez une valeur de 2,0 FS pour calculer une capacité autorisée de groupe.

- **Dans des sols pulvérulents : [7]**

Pour que l'espacement centre à centre des micropieux dans un groupe est supérieur à trois fois le diamètre du corps injecté ($s > 3D_b$), la capacité d'un micropieu groupe dans les sols cohérents peut être calculé comme la somme de la résistance de tous les micropieux individuels dans le groupe, avec η = 1,0.

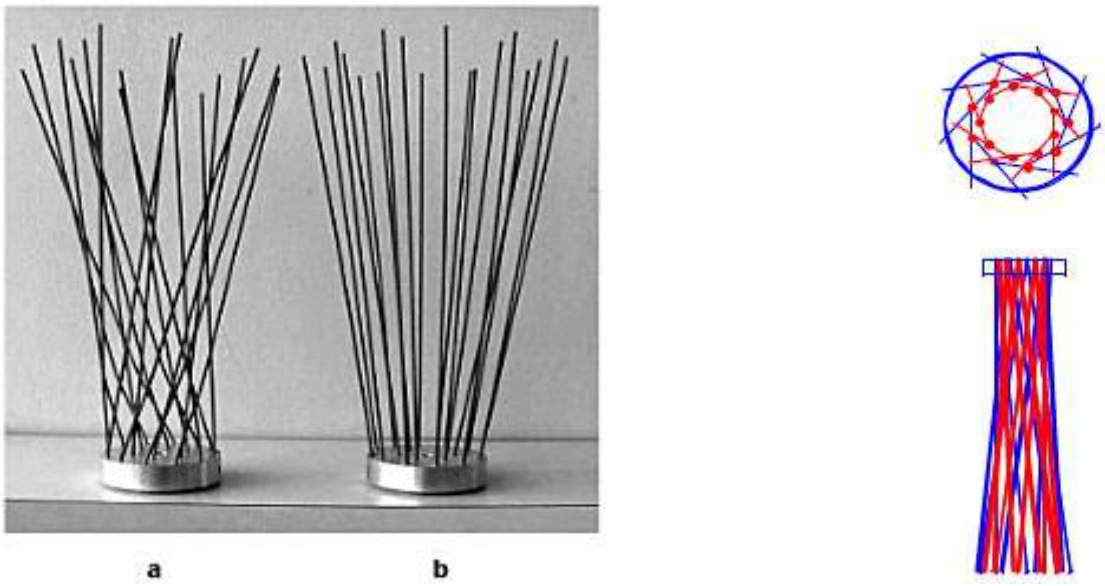
III.4.3) Réseaux de micropieux : [6]

III.4.3.1) Définition :

On appelle réseau de micropieux un ensemble de micropieux rapprochés dont la majorité est inclinés d'une manière convergente (entrecroisement dans le sol). Les réseaux de micropieux constituent un système de fondation dont le comportement est complexe. Les réseaux ont été particulièrement développés par Lizzi en Italie pour le renforcement des fondations de constructions

anciennes, élancées pour la plupart (campaniles, tours, etc.) (Lizzi, 1982). Outre un bien meilleur comportement que les groupes sous chargement horizontal, l'intérêt des réseaux pourrait aussi résider dans une portance verticale plus élevée que celle du groupe équivalent, comme observé par
Lizzi (1978).

Le comportement des réseaux diffère de celui des groupes par l'effet de l'inclinaison et l'entrecroisement des pieux. Outre la sollicitation en flexion des micropieux inclinés du réseau, l'inclinaison et l'enchevêtrement développent un enserrement du sol entre les pieux (ou les micropieux) ce qui rend le comportement des réseaux d'une complexité particulière et difficile à résoudre.



<u>Fig.III.12</u> : types des réseaux des micropieux

(a) réseau «vrille» ;(b) réseau«divergent» [6]

<u>III.4.3.2) méthodes de calcul des réseaux :</u> [6]

Les de micropieux ne sont pas nombreuses; il est toutefois utile de distinguer deux catégories:

- les méthodes ne prenant en considération que l'effet géométrique de l'inclinaison des micropieux dans des réseaux élémentaires (en chevalets, double chevalets ou en étoile), négligeant ainsi l'effet d'enserrement du sol; ces méthodes ne sont autres que les méthodes traditionnelles utilisées pour les groupes de pieux sous chargement vertical et/ou horizontal. Les groupes sont ainsi considérés comme une somme de pieux isolés avec interactions éventuelles;
- les méthodes qui assimilent le système 'réseau de micropieux + sol enserré' à un bloc monolithique et qui tiennent compte, en conséquence, de l'effet d'enserrement du sol; ces méthodes généralement empiriques sont propres aux réseaux enchevêtrés de micropieux et dépendent du domaine d'application : stabilisation des pentes ou des talus; soutènement des excavations.

Le comportement des réseaux de micropieux inclinés soumis à un chargement vertical est d'autant moins évident à déterminer en méthodes de calcul qu'en pratique. En revanche, l'utilisation de ces réseaux par Lizzi (1982) dans le cas des reprises en sous-oeuvre de monuments historiques anciens et leur importante capacité portante relevée lors de quelques essais expérimentaux (Lizzi, 1978; Lee et al. 1993), ont abouti à plusieurs études et recherches sur le comportement des réseaux de micropieux sous chargement vertical **[6]**

III.4.3.2.1.1) Les méthodes numériques: [3]

- **Méthode des éléments finis:**

Zaman et al. (1993) étudient l'effet de l'inclinaison des pieux dans un réseau élémentaire de 4 pieux en béton.

Shahrour et Ata (1994) étudient l'effet de l'inclinaison des micropieux isolés sous chargement vertical et horizontal en tête. Cette étude en déformation plane, par éléments finis, aboutit à des résultats utiles pour le calcul des réseaux

élémentaires: à savoir qu'un découplage peut être fait entre les composantes transversales et axiales du chargement vertical d'un micropieu incliné.

Foerster et Modaressi (1995, F0/94/04) ont proposé une nouvelle méthode de calcul, par éléments finis et en déformation plane, des réseaux et des groupes de micropieux. Cette méthode est un compromis entre l'approche classique dans laquelle le micropieu, le sol et l'interface sont modélisés séparément et une approche simplifiée qui consiste à remplacer l'ensemble sol/inclusion par un milieu élastique ou élasto-plastique équivalent. Il a été utilisé pour cela la technique des « macroéléments », introduite essentiellement pour les matériaux composites et qui permet la prise en compte locale, au sein d'un élément du maillage, de discontinuités entre les matériaux.

Même si cette technique des macroéléments ne permet pas de simuler complètement l'interface sol/micropieu, elle présente cependant l'avantage d'effectuer une étude paramétrique pour le pré-dimensionnement d'un réseau de micropieux sans modifier le maillage initial, ce qui est d'un grand intérêt pour le projeteur.

Dans le cadre de la présente thèse, une étude tridimensionnelle, par éléments finis, sur le comportement d'un réseau élémentaire de 4 micropieux sous chargement vertical.

- **Méthode des fonctions de transfert de charge [3] :**

La méthode des fonctions de transfert de charge est utilisée dans le cadre de la présente thèse pour l'étude du comportement d'un double chevalet de micropieux.

III.5) paramètres influant sur la portance verticale et horizontale des micropieux : [3]

- Espacement des micropieux et direction du chargement : l’espacement de centre à centre des micropieux est au moins 760 mm et la longueur des micropieux est plus grande que 90 m.
- Densité du sol
- Nombre de micropieux
- Ordre d’installation
- Influence de la semelle de liaison
- Effet de la mise en place des micropieux
- Effet de l’orientation (inclinaison et enchevêtrement) des micropieux

III.6) Conclusion:

Le comportement du micropieu isolé sous chargement vertical est relativement bien connu, il n'en est pas de même pour les groupes et les réseaux de micropieux .Un réseaux dans lequel les micropieux sont placés
Subverticalement, mais dans des directions variées permet d'avoir une très bonne interaction entre le sol et les micropieux qui l'enserrent.

CHAPITRE IV:

Analyse de la stabilité des talus renforcés par micropieux

IV) Analyse de la stabilité des talus renforcés par micropieux :

IV.1) Généralités :

Dans l'analyse de stabilité des pentes, il faut résoudre deux problèmes :

1 - Définir la résistance au cisaillement mobilisable;

2 - Mécanique, stabilité d'une masse (analyse des τ, σ analyse de contrainte), Probabiliste, F.S. = s/τ.

- **Causes de rupture des pentes :**

Fondamentalement, il y a rupture lorsque :

La contrainte de cisaillement appliquée >= la résistance au cisaillement.

- **Principe de l'analyse de stabilité :**

Comme la plupart des problèmes de mécanique des sols, on analyse la stabilité des pentes par équilibre limite S/τ aucune donnée sur la déformation. C'est à dire en équilibrant la résistance maximum (mobilisable) du sol aux efforts existants sur un plan de rupture donnée.

Pour résoudre le problème de la stabilité des talus en fait recours à l'application des micropieux avec une modélisation numérique du logiciel Slide.

IV.2) Introduction: [7]

En plus de soutien de la fondation structurale, les micropieux sont également utilisés pour la stabilisation de la pente structurale. Dans cette application, les micropieux sont conçus pour fournir la mesure de contention des forces requises, pour stabiliser une pente en utilisant l'une des deux approches :

*** Approche 1:** Les micropieux battus sont installés à travers la pente instable à une profondeur particulière sous la surface potentielle de glissement. Dans cette approche, les micropieux sont apposés à la surface du sol à une poutre (chevêtre) en béton (voir Figure IV-1), les micropieux individuels fournissent des forces de résistance grâce à la mobilisation axiale, le cisaillement et la résistance à la flexion. L'espacement des micropieux le long de la longueur de la pente est

évalué en considérant le nombre de micropieux nécessaires (par mètre linéaire) pour fournir le minimum de la force stabilisée requise. La force est généralement cette force requise pour augmenter la stabilité de la pente à un minimum coefficient de sécurité prescrit.

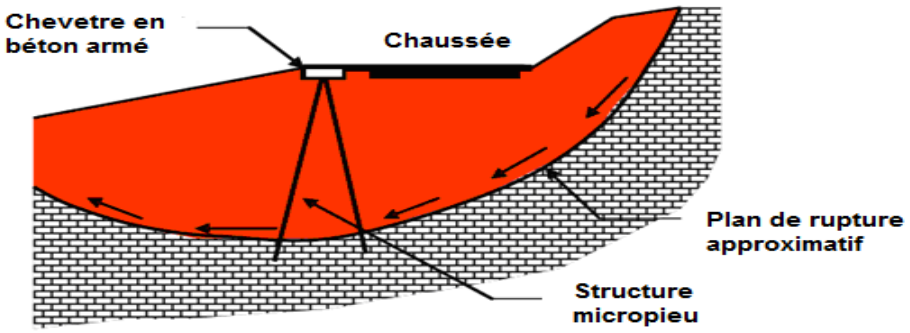


Fig. IV.1 : Système de Micropieu dans l'approche 1

***Approche 2** : Les micropieux sont installés de la même approche que pour l'approche 1, sauf beaucoup plus des micropieux sont utilisés (voir figure IV-2). Dans ce cas, les micropieux sont placés suffisamment proches les uns des autres pour créer une structure cohérente des micropieux et le sol. Cette structure est supposée se comporter un peu comme un mur de soutènement gravité (de pesanteur) en ce que la force nécessaire de retenu pour stabiliser une pente de glissement est réalisée par la résistance développée le long du fond du groupe de micropieux. Pour cette raison, les micropieux individuels sont sujets à des charges relativement petites. Le groupe renforce l'intérieur de la masse du sol de sorte qu'il agit comme une unité.

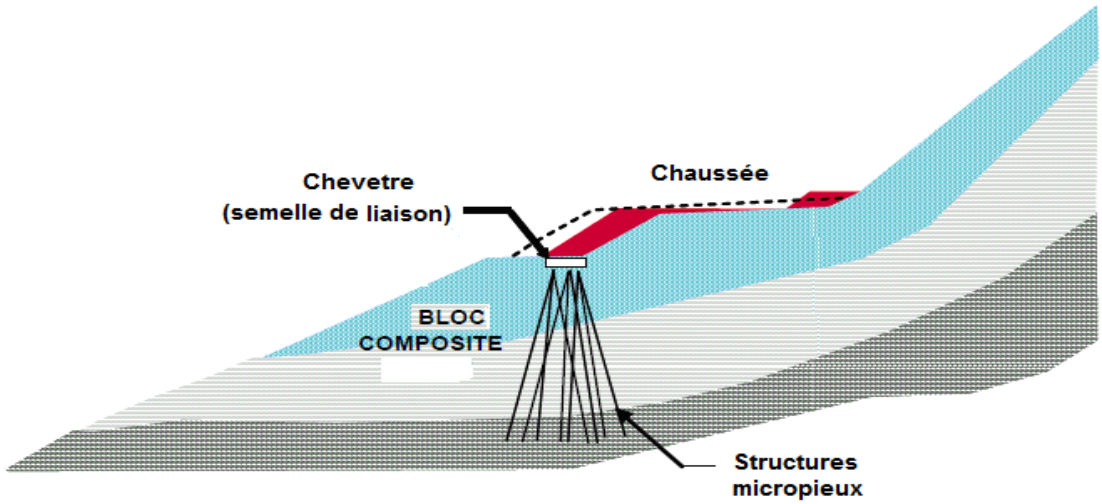


Fig. IV.2 : Système de micropieu dans l'approche 2

Dans ce chapitre, une méthode de conception étape par étape pour les micropieux basée sur l'approche 1 est présentée.

Une méthode de conception étape par étape pour les groupes des micropieux basée sur l'approche 2, en revanche, ne peut pas être développée à cette époque puisque les données limitées sont disponibles pour confirmer une méthode de conception spécifique et puisque le système micropieux de l'approche 2 a limité l'applicabilité dans la pratique actuelle des États-Unis.

IV.3) Informations disponibles et données géotechnique :

La collecte de l'information, l'exploration du sous-sol et le programme de tests en laboratoire devraient être développées dans le but d'obtenir les informations suivantes:

- Topographie de la région.
- Étendue latérale du glissement de terrain ou la zone d'éboulement potentiel.
- Profil du sous-sol et des eaux souterraines.
- Paramètres des sols et des roches.

- Surface de glissement critique.
- Sismicité du site.

IV.4) facteur de sécurité de la pente existante : [7]

les méthodes d'analyse de stabilité des pentes sont utilisées pour évaluer le facteur de sécurité de stabilité de la pente qui doit être stabilisé.
Cette pente a un coefficient de sécurité de stabilité d'environ 1,0 (si la pente a subi des mouvements importants)

Le coefficient de sécurité est généralement défini comme le rapport de la charge de rupture à la charge de service. Cette définition est adaptée aux fondations, mais non aux remblais ou aux ouvrages de soutènement en palplanches. Dans ces derniers cas, il est plus approprié d'utiliser la définition du coefficient de sécurité de la mécanique des sols, c'est à dire le rapport entre la résistance au cisaillement mobilisable et la résistance au cisaillement mobilisée à l'équilibre.

Les micropieux doivent être capables de fournir la force nécessaire pour stabiliser la pente. Cette force est la force nécessaire pour augmenter le facteur de sécurité de la pente à partir d'une valeur existante d'une valeur cible. Les programmes d'analyse de stabilité des pentes sont utilisés pour déterminer cette force supplémentaire (H_{req}).

IV.4.1) Localisation des micropieux dans la coupe de la pente :

L'amplitude de H_{req} varie en fonction de l'emplacement du micropieu dans la pente. Cet affect est démontré à l'aide de la géométrie de la pente exemple fourni dans la figure (IV-3).

Plusieurs analyses sont effectuées dans lequel l'emplacement d'un micropieu unique a été ajusté dans la section transversale. À chaque endroit, la force de cisaillement fournie par le micropieu est augmentée jusqu'à un facteur de sécurité visé (FS_{min}) de 1,3 a été atteint pour la pente.

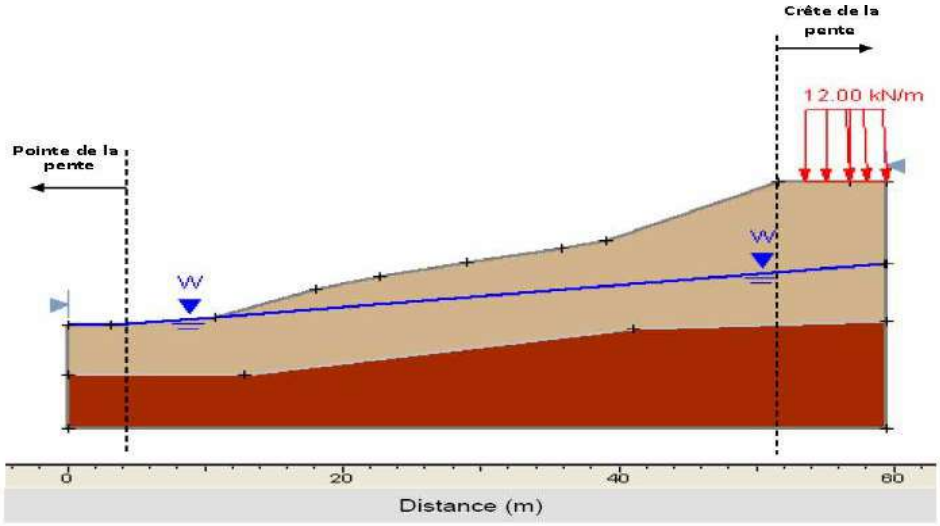


Fig. IV.3 : Exemple de géométrie de la pente

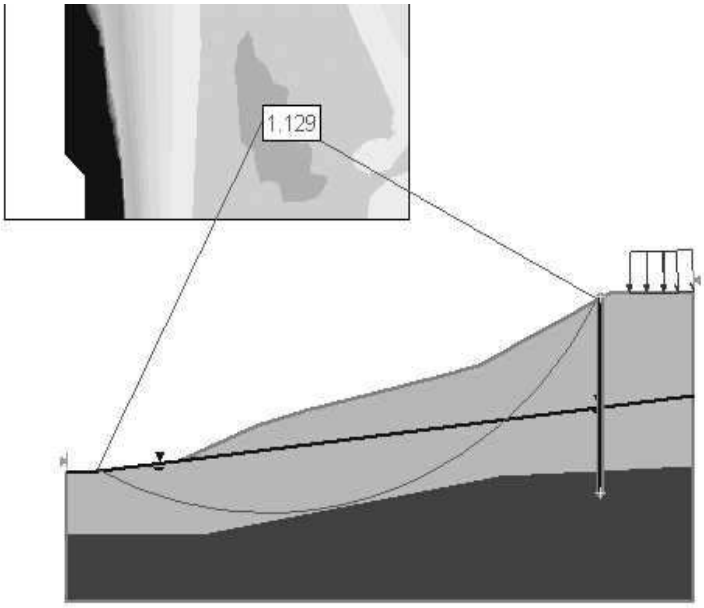


Fig. IV.4 : Effet de Micropieu placé trop loin de la pente ascendante

(FS_{min} <1,3).

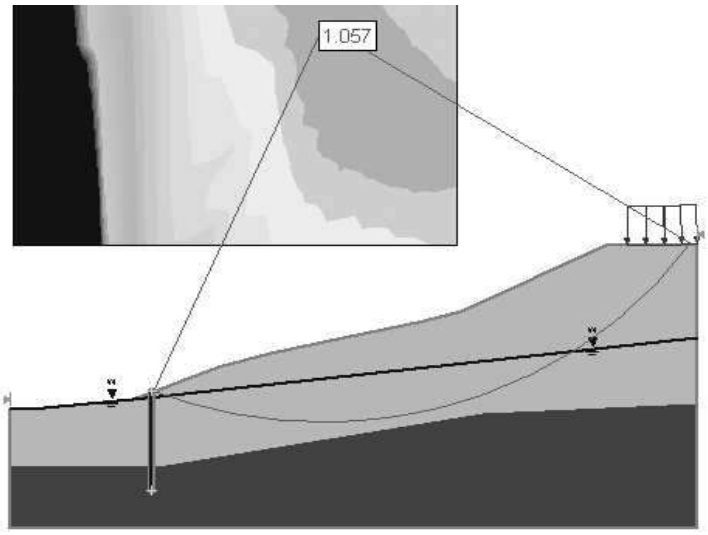


Fig.IV.5: Effet de micropieu placé trop loin vers l'aval (FS_{min} <1,3).

Les résultats de l'exemple ci-dessus indiquent que le maximum d'avantages de micropieux correspond à une structure micropieu placée dans le voisinage du milieu de la pente.

IV.4.2) Méthodes de la force de résistance d'un modèle de micropieu :

Bien qu'il soit reconnu que les structures des micropieux pour la stabilisation des talus comprend habituellement une pente battue ascendante "jambe" et une pente battue descendante "jambe" connecté à la surface du sol via une poutre en béton (figure IV-6), la structure des micropieux est modélisée envisage un micropieu vertical unique de la surface du sol (à l'emplacement du faisceau de chevêtre) à une profondeur suffisante dans une couche compétente (voir la figure IV-7). Dans les étapes de conception ultérieures, la résistance au cisaillement, l'inclinaison, et le nombre de micropieux nécessaires pour résister H_{req} est évaluée.

Les effets d'un micropieu vertical simple, comme décrits ci-dessous.

• Approche 1: La résistance au cisaillement fournie par le micropieu vertical unique, H_{req}, peut être modélisée comme une résistance au cisaillement de cohésion relativement importante attribuée à la couche de sol où le micropieu traverse la surface de glissement potentiel. En sélectionnant une largeur de 0,5 le programme d'analyse de stabilité de pente va développer une seule tranche d'une largeur de 0,5 m ayant la résistance au cisaillement cohésive relativement élevée. La relation entre H_{req} et la force de cohésion est montrée à la figure (IV-8) pour cette approche. Il convient de noter H_{req} est orientée selon le même angle que le fond de la tranche. Répétez la stabilité de la pente d'analyses et modifier la force de cohésion jusqu'à un facteur de sécurité égal à la cible valeur obtenue.

• Approche 2: Certains logiciels de stabilité des pentes permettent à l'utilisateur de saisir directement une force de retenue des micropieux à un endroit donné. Avec cette approche, il n'est pas nécessaire d'obtenir indirectement la force de retenue par l'introduction d'une mince couche de sol posé avec une force cohésive relativement grande. Répéter les analyses de stabilité des pentes et modifier la valeur de la force de retenue jusqu'à ce qu'un coefficient de sécurité égal à la cible valeur obtenue.

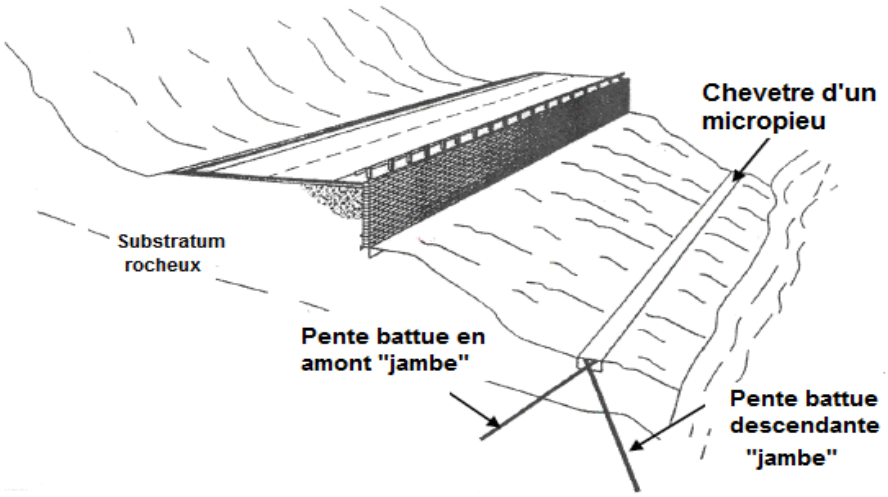


Fig.IV.6 : Micropieux avec une pente battue vers l'amont ″jambe″ et une pente battue descendante (modification d'après Hasenkamp, 1999).

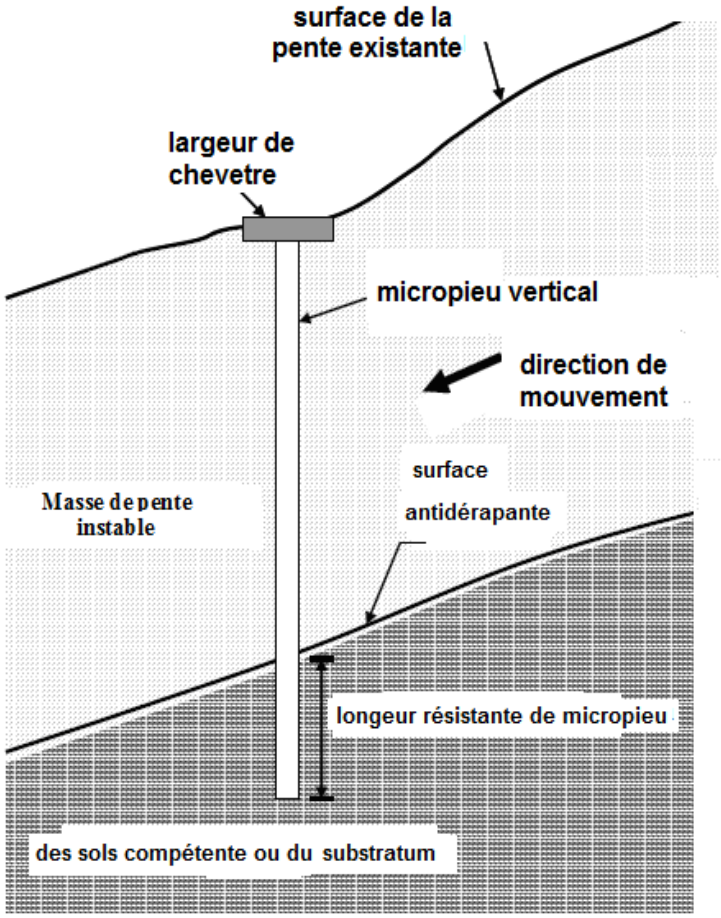
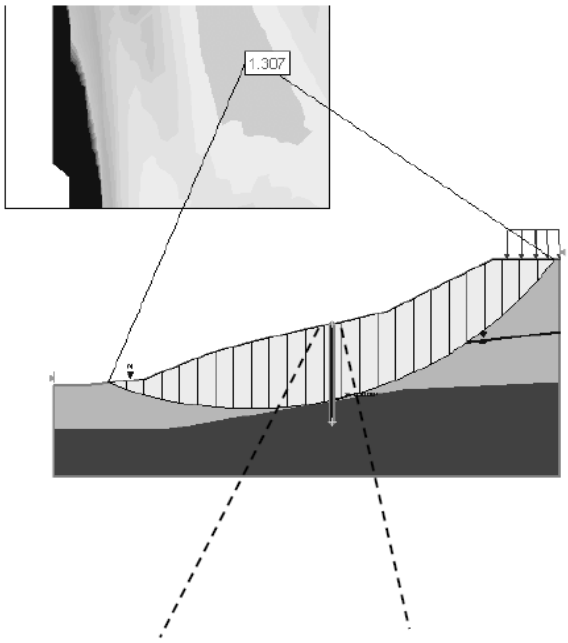
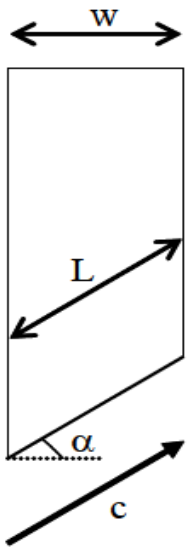


Fig. IV.7 : Modèle vertical simple de micropieu pour des analyses de conception.





$$H_{req} = c \times L$$

$$H_{req} = c \times w \times \frac{1}{\cos\alpha}$$

c : force de cohésion

W : Largeur de la tranche

L : Longueur de la tranche

α = Angle de la base de tranche

H_{req} = force de cisaillement requise.

<u>Fig. IV.8</u> : Rapport entre H_{req} et force cohésive pour le modèle d'analyse de Micropieu.

IV.4.3) Évaluation de la stabilité des pentes loin de micropieu :

Les résultats de l'analyse de stabilité de pente précédente indiquer l'emplacement et la force nécessaire de retenue pour que la pente atteindre le facteur cible de sécurité. Cependant, il est possible que les surfaces de glissement loin des micropieux peuvent avoir des valeurs de sécurité facteur de moins que la valeur cible et, par conséquent, d'autres analyses de stabilité des pentes doit être effectuée. Pour ces analyses, la présence du micropieu est ignoré par la fixation des limites de recherche pour le potentiel des surfaces antidérapantes situées entièrement vers l'amont du micropieu et pour la surface de glissement potentiel située entièrement en courbe descendante du micropieu .

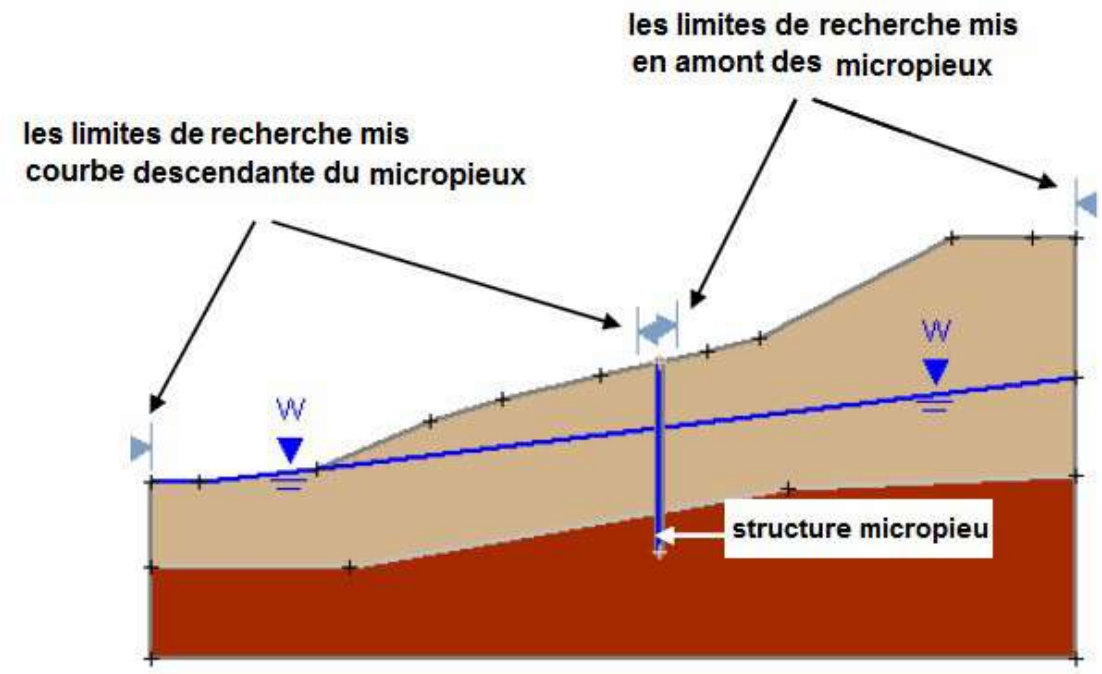


Fig. IV.9 : Limites de recherche d'Analyse de stabilité de pente loin de l'endroit de micropieu.

Des questions pratiques spécifiques sont associées à l'évaluation de la stabilité vers l'aval (comme pour Figure IV-10). Si, par exemple, une chaussée est située au pied de la pente, il est alors possible que l'avenir élargissement de l'autoroute, il faudrait d'excavation au pied de la pente. Excavation près de la base (pied) de la pente peut également être associée à l'entretien des certaines pistes à longue terme d'activités. Pour que la terre de nombreux ouvrages de soutènement utilisés stabiliser les pentes, la résistance fourni par le sol devant la paroi (résistance passive du sol) est conservativement négligée en raison de la possibilité que ce matériel doit être enlevé à une date ultérieure. Cette hypothèse de conception ne peut être en juste proportion adressée avec les de nombreuse systèmes de retenue terrestres. Pour des micropieux, il est explicitement noté que l'hypothèse de la résistance passive nulle du sol en face de micropieu n'est pas considérée en utilisant la méthode de conception présentée ci-dessus.

Si le matériel de pente, en avant du micropieu devait éloigner de la structure en en raison de l'instabilité du sol ou si le sol est enlevé dans le cadre d'une activité de maintenance, il est probable que la structure micropieu éprouverait le débattement excessif d'expérience ou défaillance structurale de la pente micropieux en raison de la perte de support latéral.

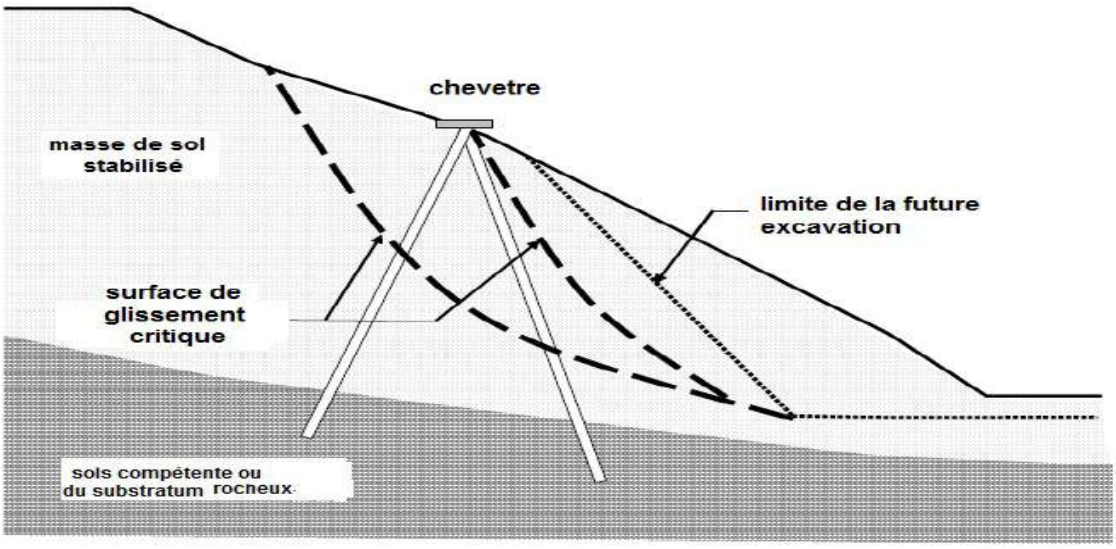


Fig. IV.10 : L'instabilité potentielle résultant de la future excavation

Il existe deux approches pour résoudre ces problèmes :

• Dans le cadre de la soumission de la conception, le propriétaire peut exiger des calculs à effectuer qui établissent le montant maximal des travaux d'excavation qui pourraient être réalisées en face des micropieux. Cette géométrie critique serait montrée la plus grande longueur d'excavation dans la pente de telle sorte qu'un minimum facteur de sécurité est maintenu ainsi que le sol avant la structure micropieu reste stable fournissant ainsi le besoin d'un soutien latéral à la première rangée de micropieux. En outre, il est recommandé dans le présent que cette vérification de la conception être effectuée et l'information soit fourni au propriétaire, indépendamment de savoir si un tel contrôle est expressément demandé dans les documents contractuels.

• Lorsque les structures micropieux sont utilisés, le propriétaire peut clôturer les signes de la zone et après alerte que l'excavation ne doit pas être effectuée dans la région.

IV.5) Efforts influant sur la stabilité des talus renforcés:

IV.5.1) Transfert de charge dans les micropieux :

Les micropieux résistent aux forces de pente instable à travers une combinaison de la résistance axiale développée à l'interface coulis-sol au-dessus et en dessous de la surface de glissement (À savoir, la résistance de cisaillement et de flexion), le micropieu latéral assume que le mouvement se produire à proximité de l'élévation de la surface potentielle de glissement. C'est une hypothèse raisonnable pour micropieux puisqu' ils sont relativement flexibles.

La capacité de différents micropieux utilisés pour la stabilisation des talus peut être augmentée de manière significative par la conception des micropieux inclinés par rapport à la surface potentielle de glissement.

La force axiale maximale dans un micropieu va se produire à proximité de l'emplacement de la puissance surface critique antidérapante. En ce sens, le développement de la résistance axiale est similaire à celle des clous dans le sol. Pour que les micropieux développent la résistance axiale requise pour la conception, le micropieu doit être embarqué suffisamment dans le sol en dessous de la surface de glissement critique pour prévenir les micropieux.

La capacité latérale de résistance du micropieu au –dessous de la surface potentielle de glissement doit être suffisante pour résister aux forces axiales développées ci-dessus la surface potentielle de glissement (voir Figure IV-11).

La force axiale nécessaire pour être résistée par le micropieu au-dessous de la surface potentielle de glissement est supposée être égale à la résistance ultime finale du micropieu pouvant élaborer au-dessus de la surface de rupture avec un facteur de sécurité. La résistance latérale ultime du micropieu ci-dessus de la surface de rupture, P_{ult}, peut être calculée comme suit :

$$P_{ult} = \alpha_{bond\text{-}dessus} \times L_{dessus} \times \pi \times d \qquad \textbf{(Eq. IV.1)}$$

Où :

$\alpha_{bond\text{-}dessus}$: est la force coulis-sol ultime lien (bond) au-dessus de la surface de glissement critique.

L_{dessus} : est la longueur du micropieu de la surface de glissement vers le bas de la poutre chevêtre.

d : est le diamètre du micropieu. La valeur de α lien-dessus est estimée en utilisant le tableau (IV-1).

En plus de la résistance axiale, les micropieux développent une résistance à la flexion. L'objectif de conception, par conséquent, consiste à sélectionner un système de micropieux avec une capacité structurale suffisante pour résister à la vigueur pente asymétrique (H_{req}) .

Par conséquent, la longueur requise du micropieu dessous la surface de glissement, $L_{dessous}$, est calculé comme suit:

$$L_{dessous} = \frac{P_{ult}}{\alpha_{bond\text{-}dessous} \times \pi \times d} \times FS \qquad \textbf{(Eq. IV.2)}$$

Où :

P_{ult} : est calculée en utilisant l'équation (IV -1),

$\alpha_{bond\text{-}dessous}$: est la force d'adhésion ultime coulis-sol dessous de la surface de glissement critique et est estimée en utilisant le tableau (IV.1) un $F_S = 2{,}0$ devrait être utilisé dans l'équation (IV-2).

<u>Tableau IV.1</u> : Valeurs des $\alpha_{bond\ (adhésion)}$ typique (ciment-sol) pour la conception micropieu [7]

Description de Sol / Roche	Forces d'adhésion ciment-sol ultime kPa (psi)			
	Type I	Type II	Type III	Type IV
Limon & argile (un peu de sable) (doux, moyen en plastique)	35-70 (5-10)	35-95 (5-14)	50-120 (5-17.5)	50-145 (5-21)
Limon & argile (un peu de sable) (raide, dense à très dense)	50-120 (5-17.5)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95-190 (14-27.5)
Sable (un peu de limon) (amende, lâche-milieu dense)	70-145 (10-21)	70-190 (10-27.5)	95-190 (14-27.5)	95- 240 (14-35)
Sable (un peu de limon, de gravier) (fin-grossier, Med.-très dense)	95-215 (14-31)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
Gravier (un peu de sable) (moyennes très dense)	95-265 (14-38.5)	120-360 (17.5-52)	145-360 (21-52)	145-385 (21-56)
des schistes molle (frais modérée fracturation, peu ou pas d'altération)	205-550 (30-80)	N/A	N/A	N/A

Ardoises et schistes durs (frais modérés fracturation, peu ou pas de intempéries)	515-1,380 (75-200)	N/A	N/A	N/A
Calcaire (frais modérés fracturation, peu ou pas d'altération)	1,035-2,070 (150-300)	**N/A**	**N/A**	**N/A**
Grès (frais modérés fracturation, peu ou pas d'altération)	520-1,725 (75.5-250)	**N/A**	**N/A**	**N/A**
Granit et de basalte (frais modérés fracturation, peu ou pas de intempéries)	1,380-4,200 (200-609)	**N/A**	**N/A**	**N/A**

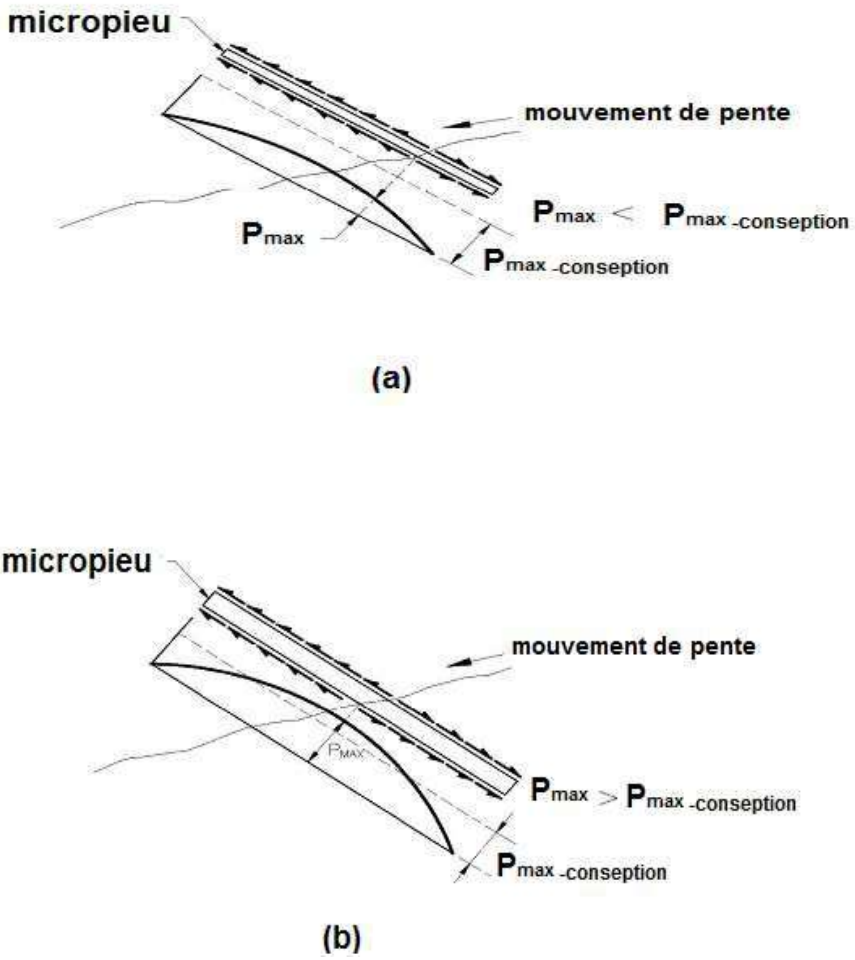


Fig. IV.11: (a) Longueur résistance de micropieu pas suffi à empêcher le dégagement (b) Longueur résistance de micropieu suffisante pour prévenir le dégagement.

IV.5.2) Moment de flexion et de résistance au cisaillement de micropieu vertical unique:

IV.5.2.1) moment de flexion de micropieu vertical :

La résistance au cisaillement d'un micropieu correspond à la force de cisaillement maximale qui peut être appliquée au micropieu qui entraîne un moment de flexion maximum dans le micropieu (à n'importe quel endroit) pour être juste égale au moment ultime de flexion du micropieu à évaluer la

résistance au cisaillement d'un micropieu unique, le moment résistant de flexion (M_{ult}) peut être évalué à l'aide du programme informatique ou d'autres programmes d'interaction sol-structure .

La capacité de moment de flexion d'un seul micropieu est vérifiée les conditions de charge axiales:

(1) charge axiale égale à zéro, p = 0,

(2) une charge axiale égale à la résistance ultime côté du micropieu, $P = P_{ult}$

(Où P_{ult} est calculée en utilisant l'équation (IV-1)).

IV.5.2.2) la résistance au cisaillement du micropieu vertical:

A) micropieux isolés :

la capacité d'un effort de cisaillement vertical unique micropieu est déterminé en analysant séparément la partie du micropieu-dessus de la surface potentielle de glissement est dite (analyses en "haut") et la partie du micropieu dessous de la surface de glissement de potentiel (dite analyses en "bas").

Cela nécessite, pour l'analyse, l'ajustement de l'emplacement de préalablement déterminée les courbes (p-y) par rapport à la partie supérieure de pieu dans l'analyse.la figure (IV-12) montre les courbes (p-y) de toute la longueur du micropieu et la figure (IV-13) montre la façon dont ils sont ajustés pour tenir le haut et les analyses descendantes.

Les deux analyses sont effectuées à la résistance axiale minimale (P = 0) en premier et ensuite pour un maximum de conditions de résistance axiales

($P = P_{ult}$).

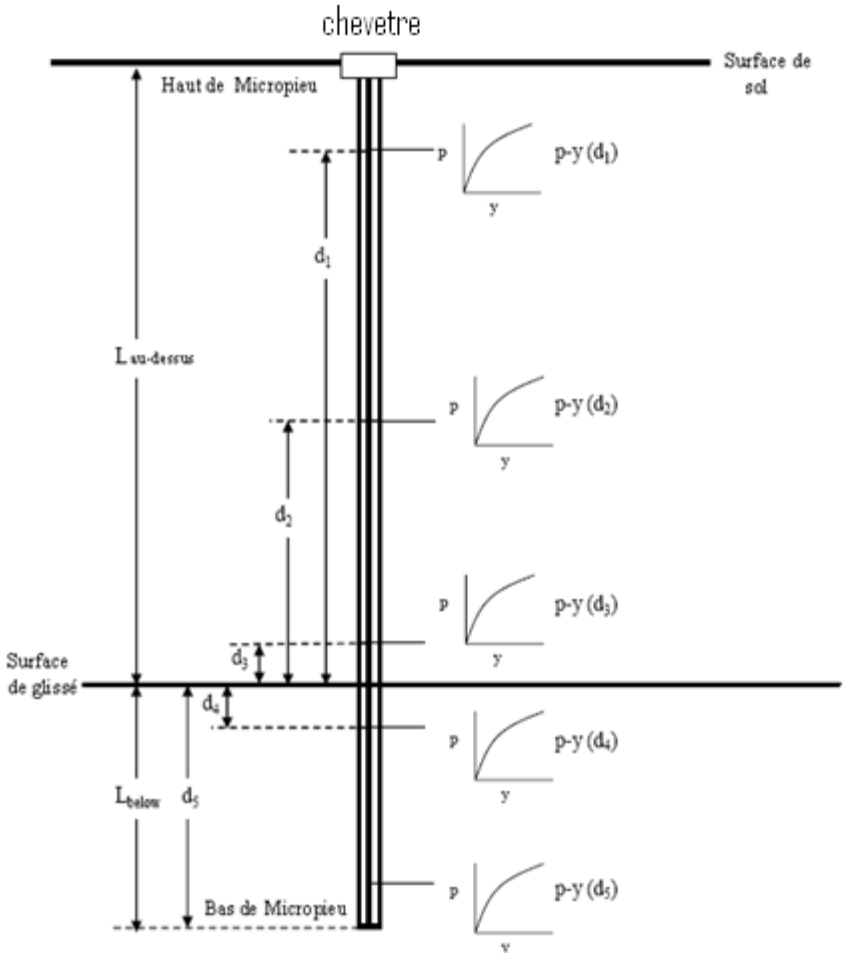
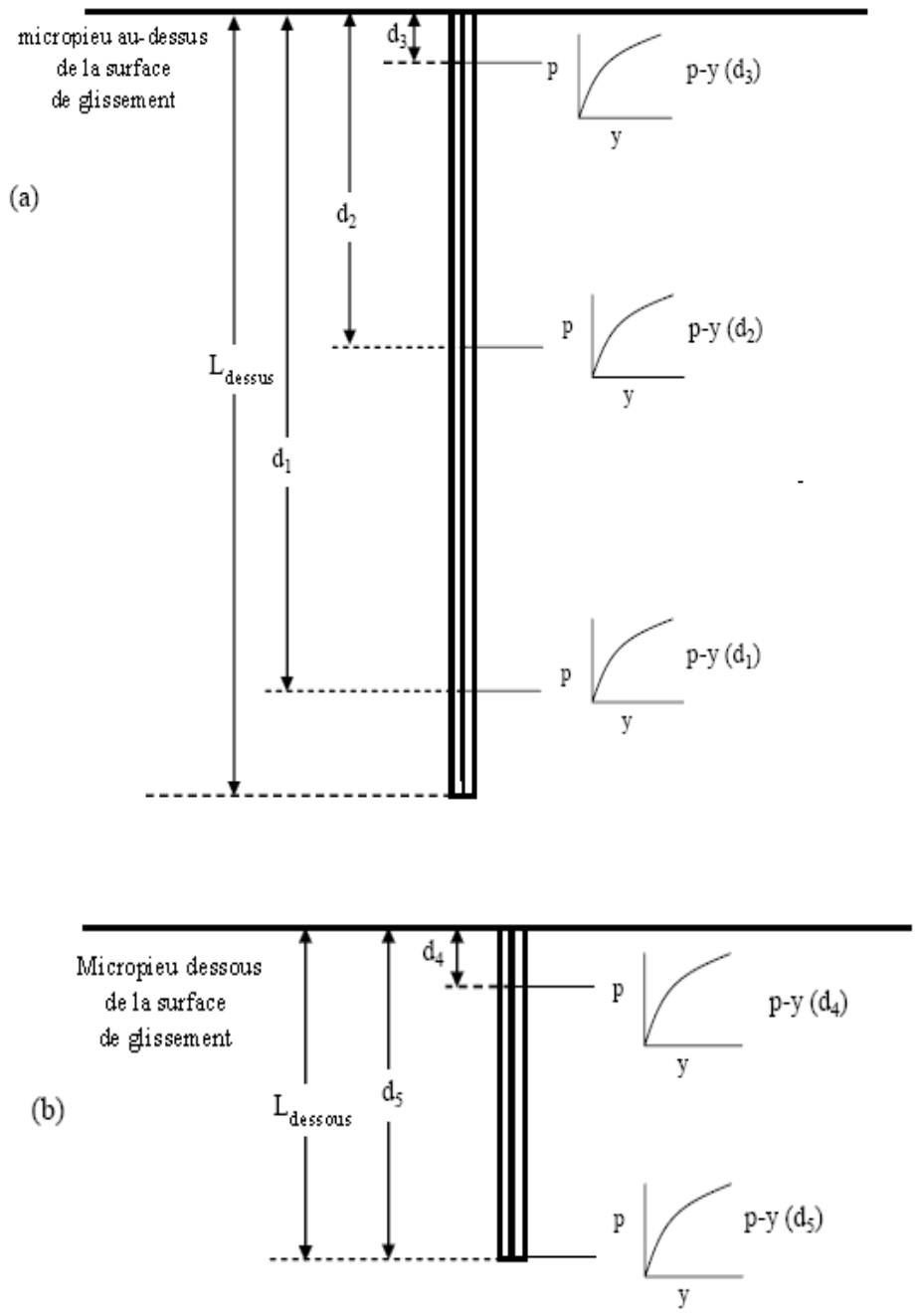


Fig.IV.12 : Un exemple de distribution des courbes (p-y) avec la profondeur obtenue à partir d'analyse chargé latéralement de Pieu.



<u>Fig. IV.13</u> : Utilisation des courbes (p-y) obtenues par l'analyse de pieu chargée latéralement dans: (a) Analyse vers le haut (b) Analyse de bas.

B) micropieux en groupe :

Les forces agissant sur un micropieu assumé sont présentés dans la figure (IV-14a) pour le cas d'un micropieu vertical (où la résistance axiale est supposée égale à zéro, c'est à dire, P = 0) et pour un micropieu incliné (où la résistance axiale est supposée être égale à la résistance ultime axiale fourni par le sol au-dessus de la surface de glissement, $P = P_{ult}$). L'angle d'inclinaison (ψ) peut être défini comme l'angle entre la surface de glissement et l'axe vertical du pieu.

Additionner le cisaillement axial (Q) et (P) les forces axiales représentées sur la figure (IV-14 b) dans le sens x et y. Les résultats de ce qui suit:

$$Q = H\cos\psi - V\sin\psi \qquad \textbf{(Eq. IV-3)}$$

$$P = V\cos\psi + H\sin\psi \qquad \textbf{(Eq. IV-4)}$$

Ces équations peuvent être résolues simultanément pour fournir la charge d'un micropieu latéral (le long de la fiche de surface):

$$H = Q\cos\psi + P\sin\psi \qquad \textbf{(Eq. IV-5)}$$

Cette charge latérale, H, coïncide avec l'orientation de H_{req} (voir la figure IV.8). Le but de cette analyse est d'évaluer la capacité ultime des micropieux, correspondants des valeurs ultimes pour P et Q dans l'équation (IV-5) sont choisis. La résistance axiale minimale d'un micropieu simple est zéro et on assume que la résistance axiale maximum égale P_{ult}. Par l'équation(IV.5) est une fonction de l'inclinaison par rapport à la surface de micropieu, il est nécessaire

de sélectionner une gamme d'angles d'inclinaison pour lequel les analyses correspondant à P = 0 est valide et pour lequel les analyses correspondante

à $P = P_{ult}$ est valide.

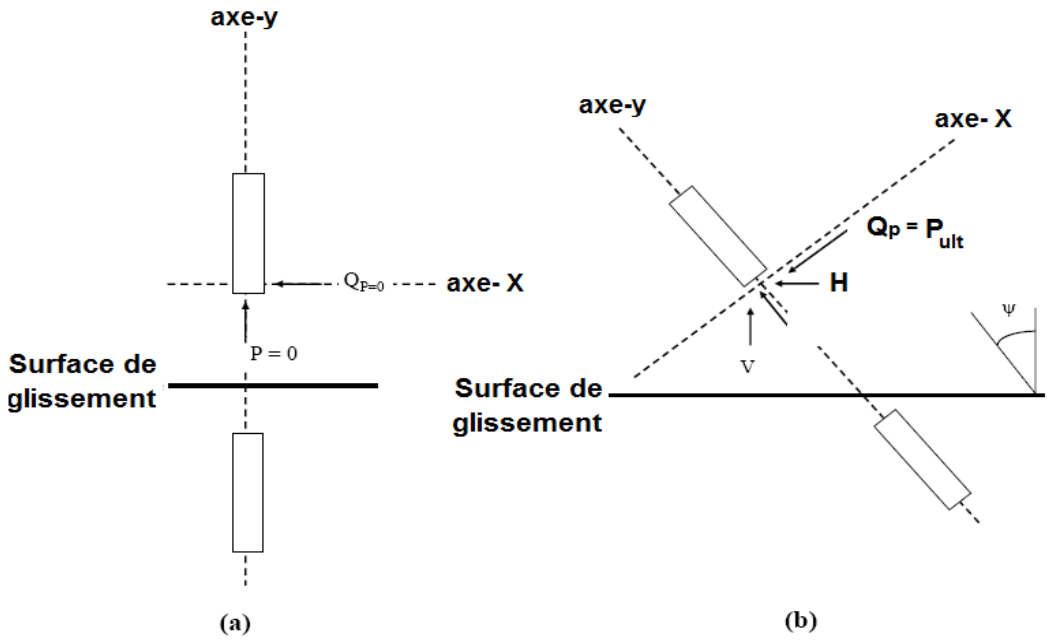
Selon Poulos et Davis (1980), P_{ult} peut être supposée se développer dans un pieu qui est incliné à environ 30 degrés. Par conséquent, Q et P dans l'équation

(IV -5) sont définies comme suit:

Pour $\psi = 0^o \rightarrow P = 0$ et $Q = Q_P = 0$; donc $H_{ult} = Q_P = 0$ (Eq. IV.6)

Pour $\psi \geq 30^o \rightarrow P = P_{ult}$ et $Q = QP = P_{ult}$; donc $H_{ult} = QP = P_{ult} \cos\psi + P_{ult} \sin\psi$ (Eq. IV.7).

Bien que la résistance axiale des micropieux doit être mobilisée, même à très faible inclinaison d'angles, il est prudent de supposer que la résistance axiale n'est pas mobilisée jusqu'à un montant nominal de la quantité d'inclinaison est réalisée. En outre, s'appuyant sur la résistance axiale à faible inclinaison d'angles implique un niveau de certitude de l'angle de la surface de glissement qui ne peut probablement pas être atteint pratiquement au moyen d'enquêtes sous-sol ; l'évaluation précise de l'angle de la surface de rupture peut être difficile à atteindre.



<u>Fig. IV.14 :</u> Les Forces agissant sur (a) Micropieu vertical (b) Micropieu incliné le long du Surface de glissement.

Par conséquent, pour la procédure de conception présentée ici, les recommandations suivantes sont fournies pour des angles d'inclinaison entre 0 et 30 degrés:

Pour $0 < \psi \leq 10^o \rightarrow H_{ult} = Q_P = 0$ (Eq. IV.8)

Pour $10 < \psi < 30^o \rightarrow H_{ult}$ est interpolée (voir la figure IV.20) (Eq. IV.9)

L'angle d'inclinaison ψ est définie comme l'angle entre l'axe perpendiculaire à la surface barbotine et l'axe de micropieu ou l'angle entre l'axe perpendiculaire au micropieu et la surface de glissement figure (IV.14). Les solutions pour les angles d'inclinaisons positifs et négatifs sont identiques pour les équations. (IV-3 et IV-4) (Poulos et Davis, 1980). Par conséquent, ψ doit être écrite comme positif dans l'équation (IV.5) indépendamment de son signe.

Utilisant de l'équation (IV.5), la capacité de la pente vers l'amont d'un micropieu et l'aval peut être évaluée selon les critères présentés sur les valeurs appropriées pour Q et P, et en fonction de l'angle d'inclinaison des micropieux,

ψ. L'angle d'inclinaison doit être évalué à l'emplacement où chacun des deux micropieux traverse la surface de glissement. Le combiné de la capacité de la courbe ascendante et descendante de micropieu est déterminé comme suit:

$$H_{ult\text{-}pair} = H_{ult\ (\Psi_{us})} + H_{ult\ (\Psi_{ds})} \qquad \textbf{(Eq. IV.10)}$$

Où :

ψ_{us} : est l'angle d'inclinaison pour vers l'amont d'un micropieu

ψ_{ds} : est l'angle d'inclinaison pour la pente aval d'un micropieu.

IV.5.3) Espacement requis pour fournir une force nécessaire pour stabiliser la pente :

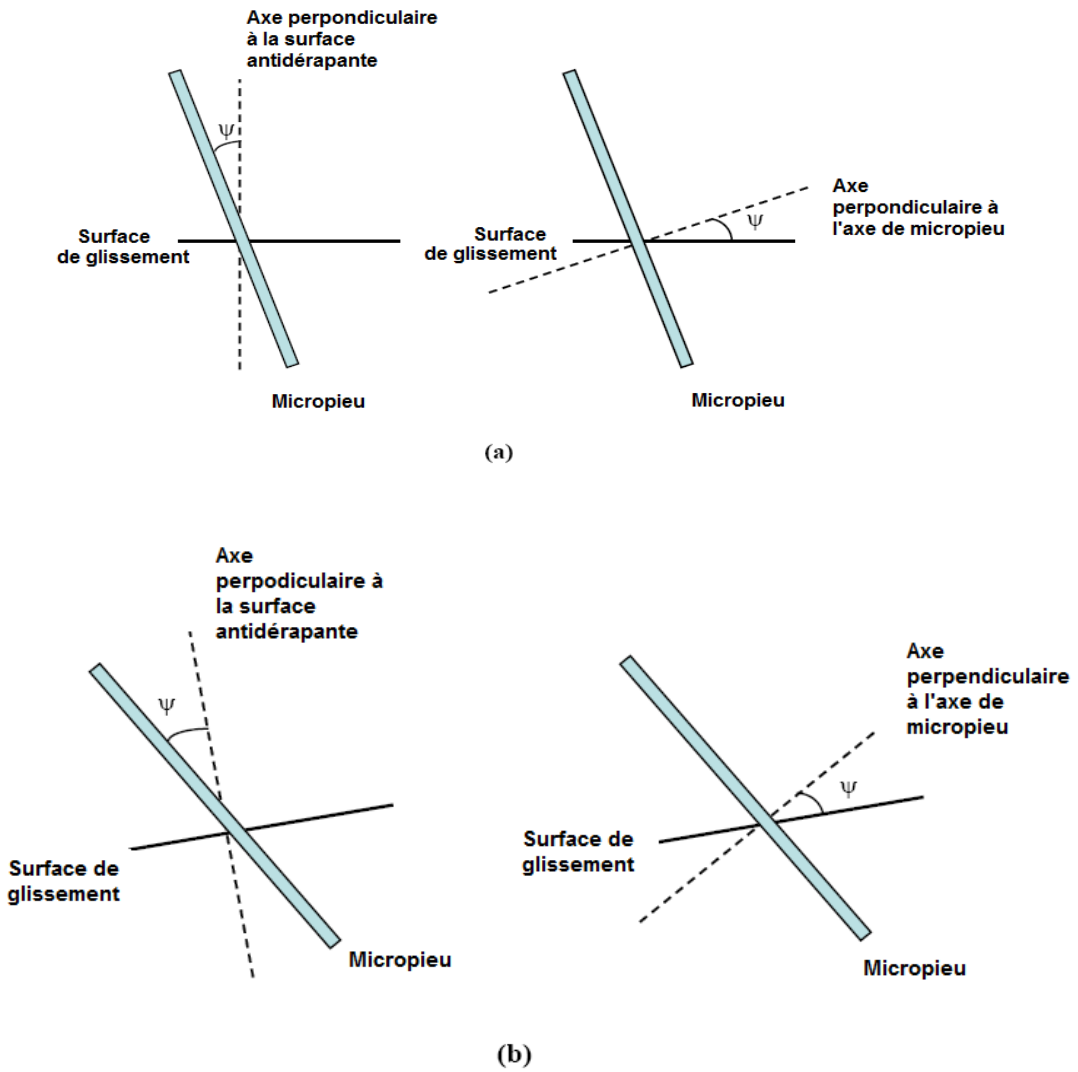
La figure (IV-15) montre un détail d'une mise typique des micropieux à l'emplacement du. L'ampleur de la force de résistance fournie par les micropieux sur une longueur par unité de chevêtre de faisceau de base doit être au moins égale à H_{req} (calculé à partir de l'analyse la stabilité des pentes).

En outre, la distance entre les micropieux individuels le long de la poutre (semelle de liaison) (S_{offset}) doit avoir une surface suffisante pour permettre la facilité de construction des éléments des micropieux.

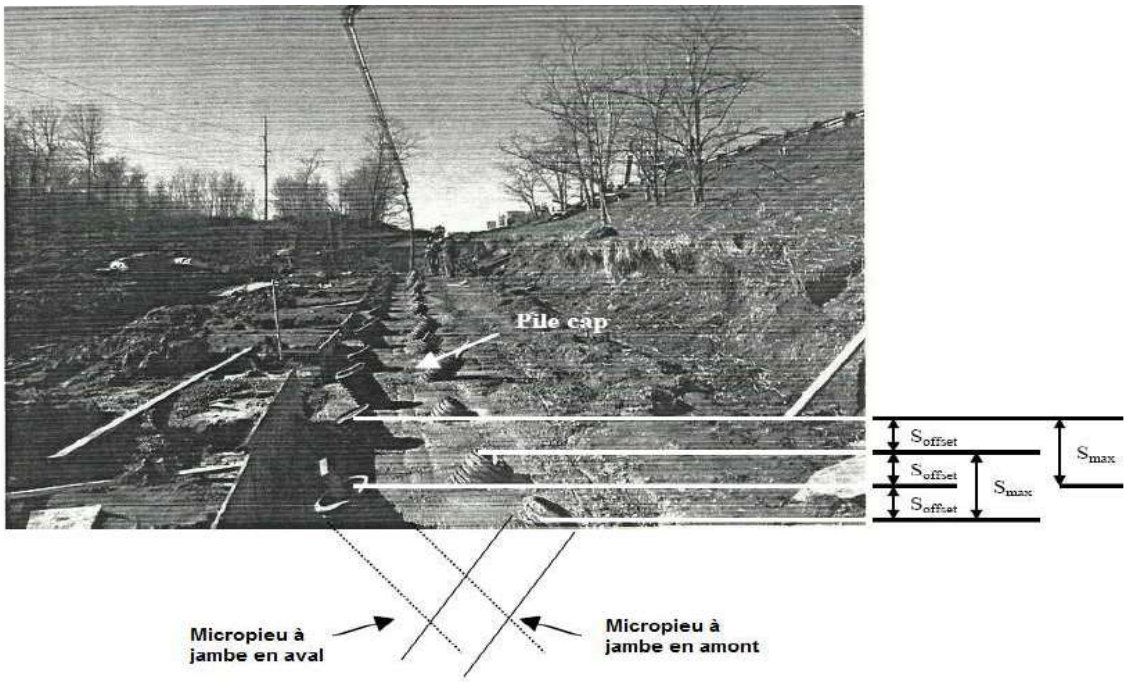
La résistance au cisaillement du micropieu battu vers amont ($H_{ult}(\Psi_{us})$) et micropieu battu vers l'aval ($H_{ult}(\Psi_{ds})$) sont évalués en utilisant l'équation(IV.5) et la capacité combinée de la courbe ascendante et la pente des micropieux

(Hult-paire) est calculée en utilisant l'équation (IV-10). De cela, Smax (voir la figure IV.15) peuvent être évaluée comme:

$$S_{max} = \frac{H_{ult\text{-}pair}}{H_{req}} \qquad \textbf{(Eq. IV.11)}$$



<u>Fig. IV.15</u> : Définition de l'angle d'inclinaison Lorsque (a) la surface de glissement est horizontal et (b) la surface n'est pas horizontale.



Notes : S_{offset} **: l'espacement entre deux micropieux**

S_{max}**: l'espacement entre deux micropieux ascendants ou vers l'aval**

Fig. IV.16 : Espacement entre les micropieux.

IV.5.4) Potentiel pour l'écoulement de sol entre micropieux :

Si les micropieux sont trop espacées et / ou si le sol au-dessus de la surface de glissement est très faible, il ya un potentiel pour les matériaux du sol de se déplacer entre-deux micropieux adjacents (Figure IV.23).

Ce mécanisme de rupture a été appelé l'écoulement plastique. Ito et Matsui (1975) a élaboré une théorie pour évaluer les flux en plastique entre les pieux. La force latérale par unité d'épaisseur de sol agissant sur le micropieu, q est calculé comme suit (Hassiotis et al, 1997.)

$$q = A \times c \times \left(\frac{1}{N_\phi \tan\phi} \times \{B-(2\times E)-1\} + F \right) - c \times \left(D_1 \times F - 2 \times D_2 \times N_\phi^{-(1/2)} \right) + \frac{\gamma \bar{z}}{N_\phi} \times \left\{ (A \times B) - D_2 \right\} \qquad \text{(Eq .IV .12)}$$

Où :

c = la cohésion du sol

φ = angle de frottement du sol

γ = unité de poids du sol

$\overline{z}$ = profondeur de la surface du sol

D1 = S_{max} (Eq. IV.11)

D2 = ouverture entre les micropieux

(Fig .IV.23)

$$N_\phi = \tan^2\left[(\pi/4)+(\phi/2)\right]$$

$$A = D_1 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{\left[N_\phi^{(1/2)}\ \tan\phi + N_\phi - 1\right]}$$

$$B = \exp\left[\frac{D_1 - D_2}{D_2} \times N_\phi \tan\phi \tan\left(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4}\right)\right]$$

$$E = N_\phi^{(1/2)} \tan\phi$$

$$F = \frac{(2\times\tan\phi)+\left(2\ N_\phi^{(1/2)}\right)+N_\phi^{(1/2)}}{E+N_\phi - 1}$$

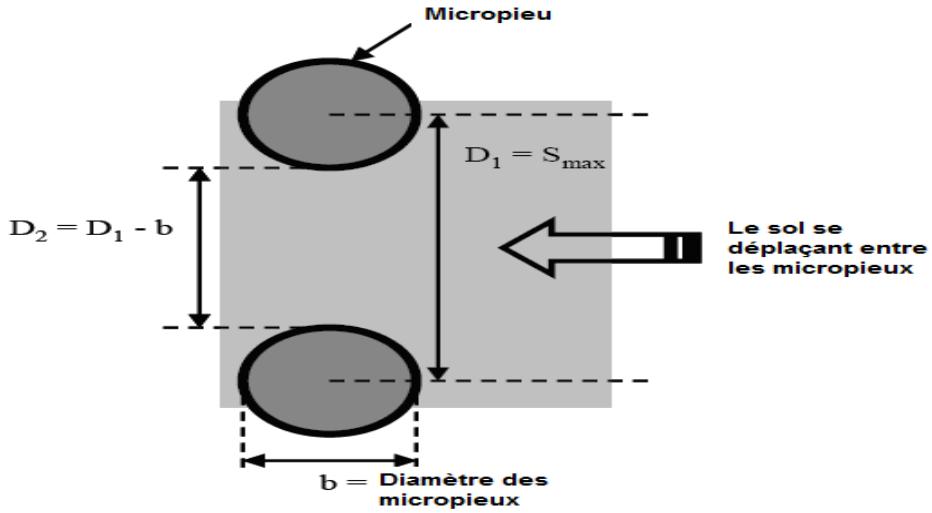


Fig .IV.17 : Déformation plastique du sol entre deux micropieux adjacents.

La force ultime horizontale agissant sur le micropieu en raison du mouvement du sol entre micropieux adjacents , $H_{ult\text{-}sol/pieu}$ est la valeur pour intégré sur la longueur du micropieu de la surface glisser à la poutre plafond, l'évaluation de l'espacement entre micropieux, $H_{ult\text{-}sol/pieu}$ calculée est comparée à la résistance moyenne fournie par la pente paire vers l' amont et l'aval ($H_{ult\text{-}paire}$ / 2) comme indiqué ci-dessous:

• Si les conditions d'écoulement en plastique sont satisfaites, alors S_{max} précédemment calculée en utilisant l'équation. (IV.11) n'a pas besoin d'être réduite.

• Si $H_{ult\text{-}sol/pieu} < H_{ult\text{-}paire}$ / 2, puis des conditions d'écoulement en plastique gouverner et S_{max} doit être réduites. L'analyse du flux de plastique doit être répétée en fonction de l'espacement de nouveau pieu correspondant à la

S_{max} réduite. L'espacement de conception finale devrait être sélectionné comme espacement qui satisfait $H_{ult\text{-}sol/pieu} \geq H_{ult\text{-}paire}$ / 2.

IV.6) Conclusion :

L'utilisation des micropieux comme solution pour le renforcement des talus est entrée considérablement en faveur des projets de stabilisation des pentes, car la construction des micropieux est relativement simple et nécessite un petit espace de travail, et ils peuvent être facilement installés dans les zones où l'accès au matériel est limité, comme pour les glissements de terrain situées dans les collines, des zones escarpées, ou montagneux Les micropieux peuvent être conçus pour résister relativement au grand charges en les battant pour mobiliser les forces axiales de contrainte .

CHAPITRE V :

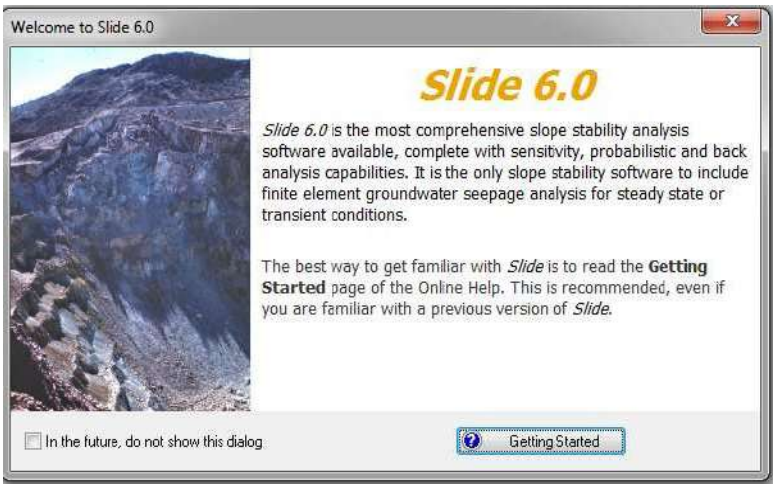
Modélisation en se servant de SLIDE

V) Modélisation en se servant de SLIDE :

V.1) Introduction :

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, le logiciel SLIDE est devenu éventuellement le plus performant des méthodes numériques vu son grand champ d'application où il est utilisé dans de nombreux secteurs de l'industrie : génie civile, géotechnique...

V.2) Présentation de SLIDE : [9]



Slide est un programme d'équilibre limite en 2D de la stabilité des pentes pour évaluer le facteur de sécurité ou de la probabilité de rupture dans des surfaces de rupture circulaires ou non circulaires pour les pentes du sol ou de roche. Ainsi, il permet d'analyser la stabilité des surfaces de glissement en utilisant des méthodes verticales des limites d'équilibre de la tranche, comprend également l'infiltration d'élément fini des eaux souterraines intégré directement dans le programme, à la fois pour l'état d'équilibre et les conditions transitoires.

Le programme se compose de 3 diapositives modules du programme:

• Modèle (model)

• Calculer (compute)

• Interpréter (interpret)

V.3) Géométrie :

La définition géométrique retenue pour cette étude est représentée sur les figures (V.1)**.** Le problème est modélisé par un modèle géométrique plan (2D).

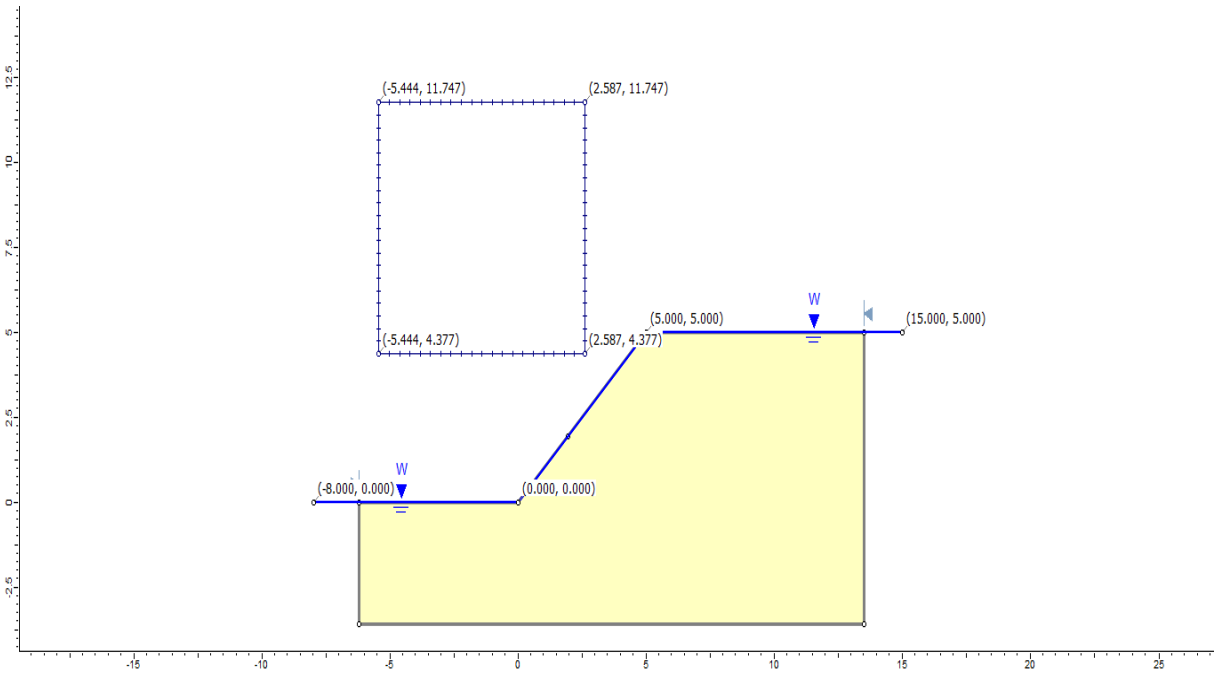


Fig.V.1 : Modèle géométrique

V.4) modélisation numérique :

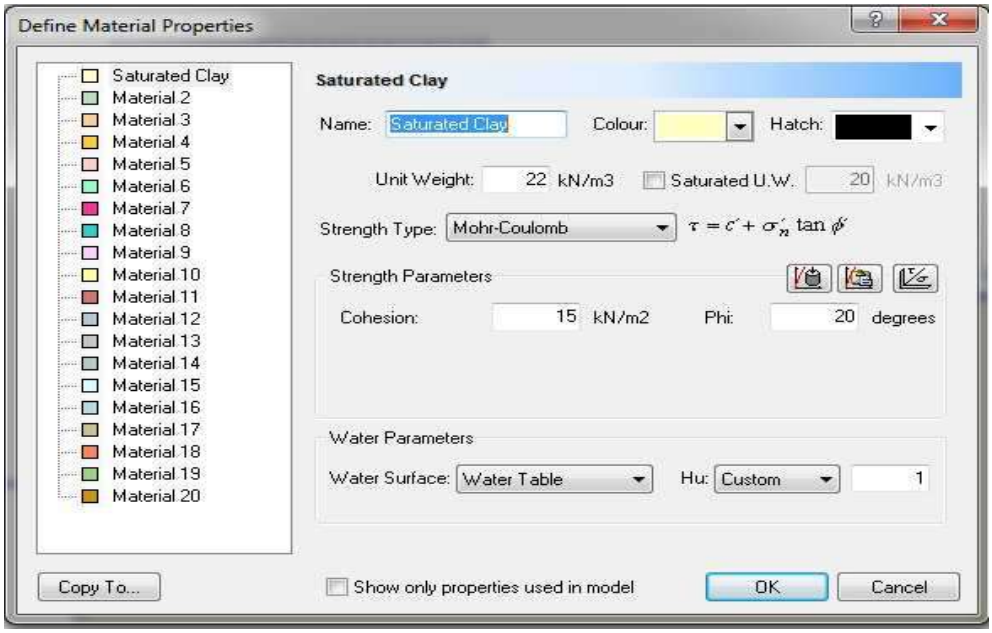
Dans cette analyse, on va étudier le cas de la stabilité des talus avant et après la mise en place des micropieux.

V.4.1) Caractéristiques du sol :

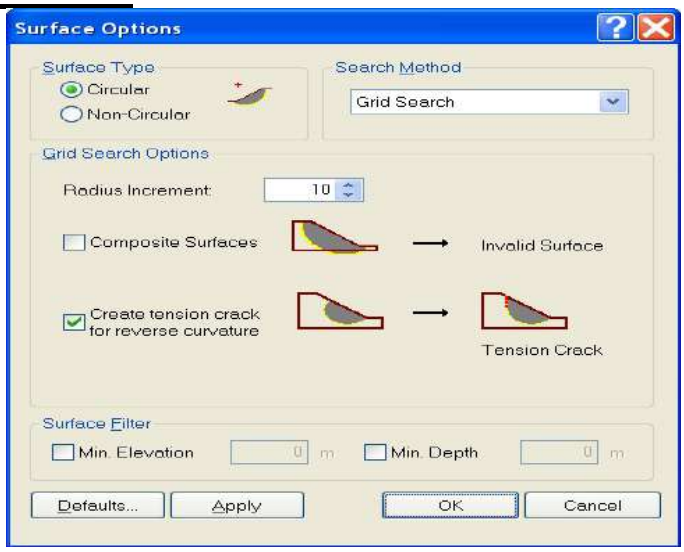
- **Propriétés du sol :**

Pour modéliser le sol (argile saturée) on a décidé d'utiliser le critère non linéaire de **Mohr-coulomb** due à sa simplicité et la disponibilité des paramètres dont on a besoin.

Propriétés	Argile saturée
Couleur	
Type de force	Mohr-Coulomb
Poids volumique [kN/m^3]	22
Cohésion [kPa]	15
Angle de frottement [deg]	20
Surface de l'eau	Table d'eau
Valeur de H_u	1



- **Options de surface :**



- **Les coordonnées de la nappe phréatique :**

X	Y
-8	0
0	0
5	5
15	5

V.5) Méthode d'analyse :

V.5.1) cas d'un sol non renforcé :

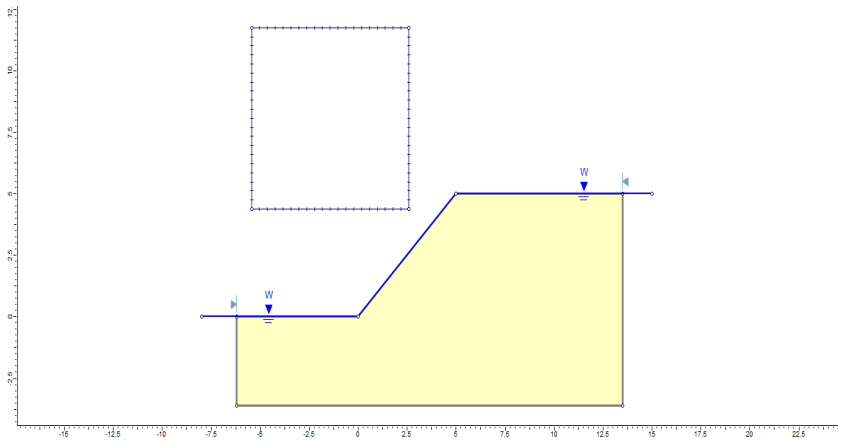


Fig.V.2 : Géométrie du problème pour le sol non renforcé

- **Interprétation des résultats d'analyse:**

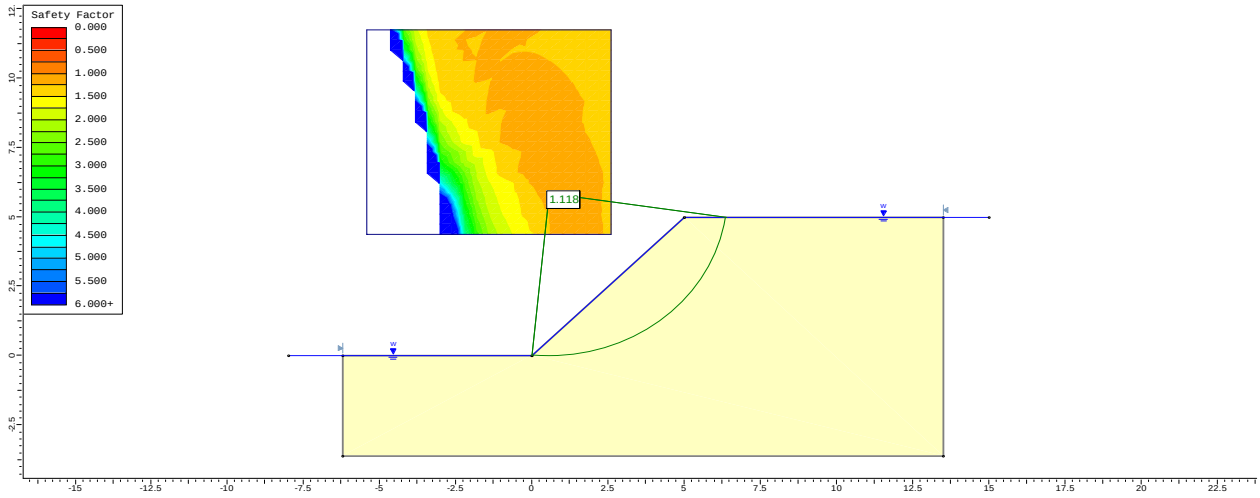
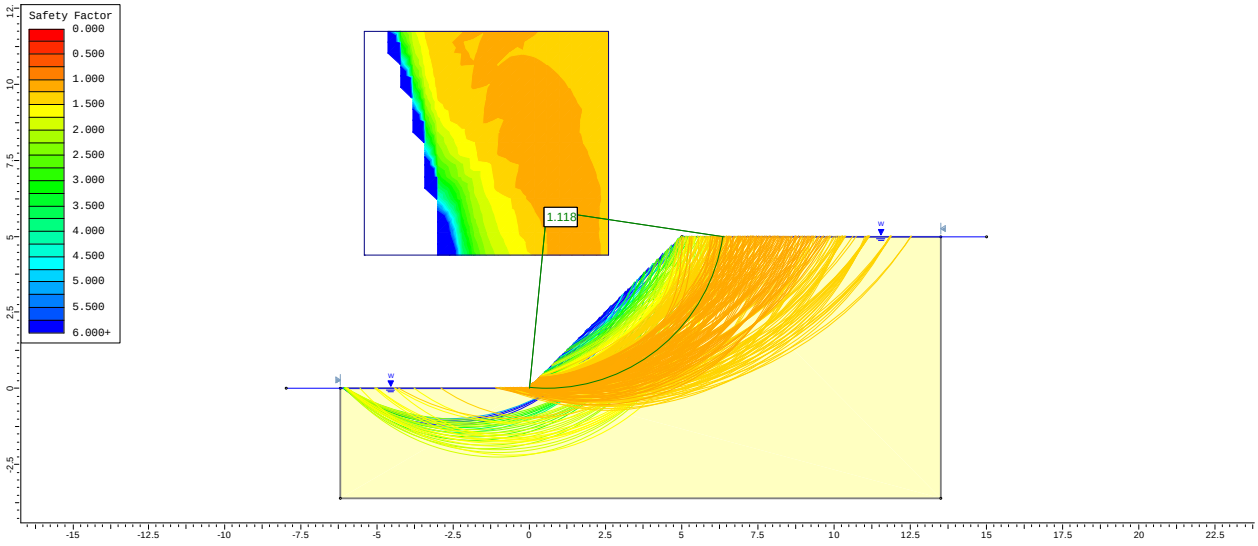


Fig.V.3: Résultats de recherche de la grille.



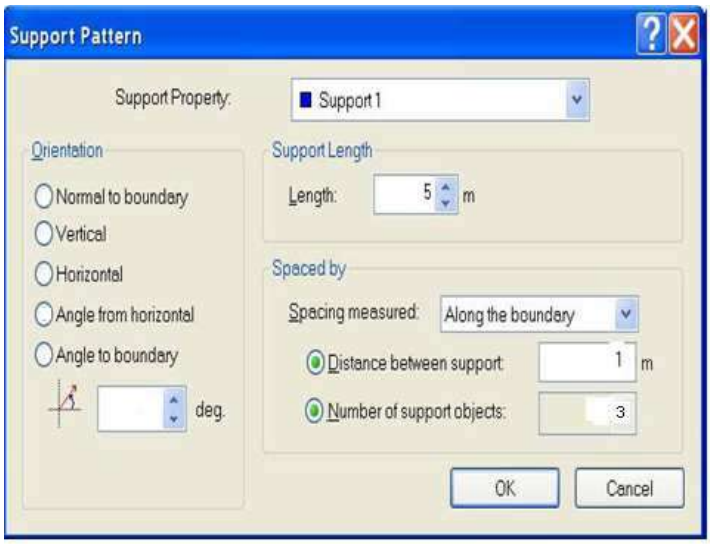
Figv.4: surface circulaire - Surfaces minimales

Par défaut, la surface minimale globale de glissement par la méthode simplifiée **Bishop**. Le facteur de sécurité de cette surface est **1,118** .Cette pente est juste à l'équilibre critique, et aurait certainement besoin de soutènement afin d'être considéré comme stable.

V.5.2) Cas d'un sol renforcé :

- **Propriétés des éléments de renforcement :**

Type de Support	Micropieu
Force d' application	Passive
Espacement entre les micropieux	1 m
Force de caillement	20 kN
Direction de la force	Parallèle à la Surface



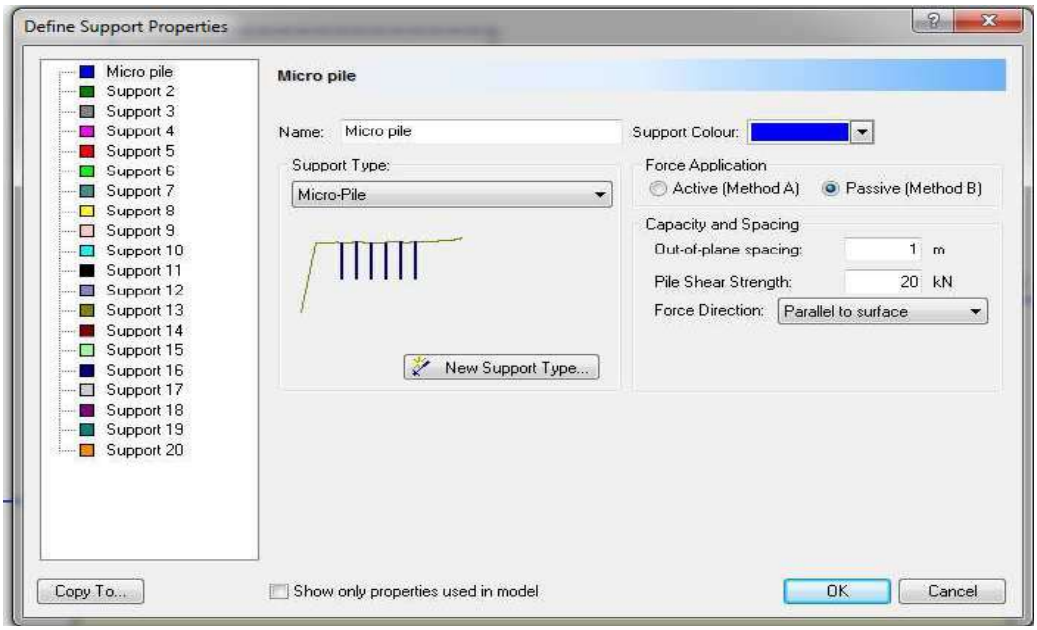


Fig .V.5 : Propriétés des éléments du renforcement

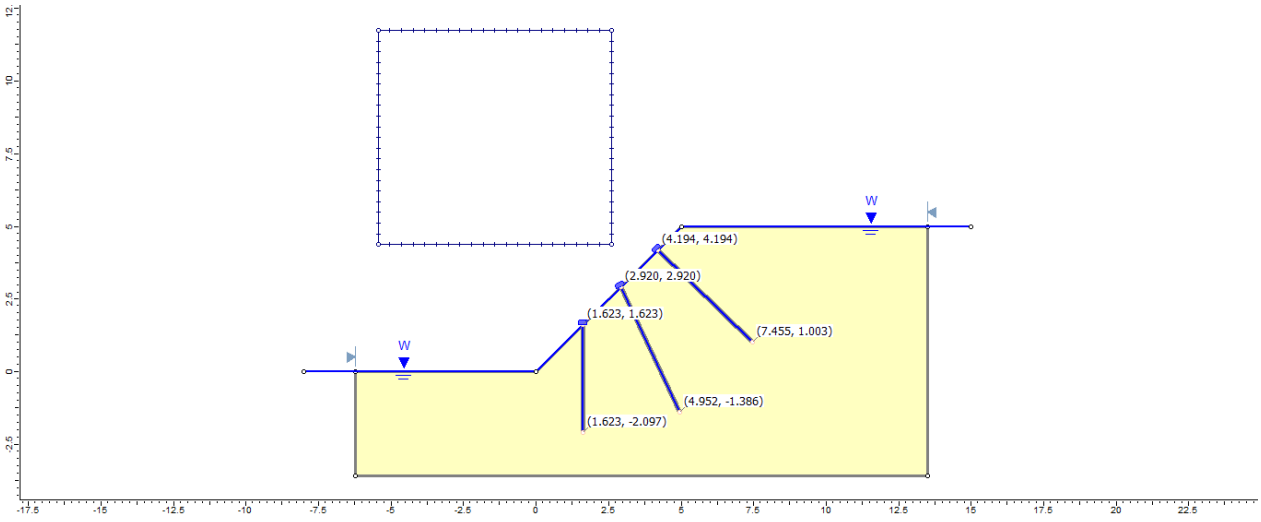


Fig.IV.6 : Géométrie du problème pour le sol renforcé

- **Interprétation des résultats d'analyse:**

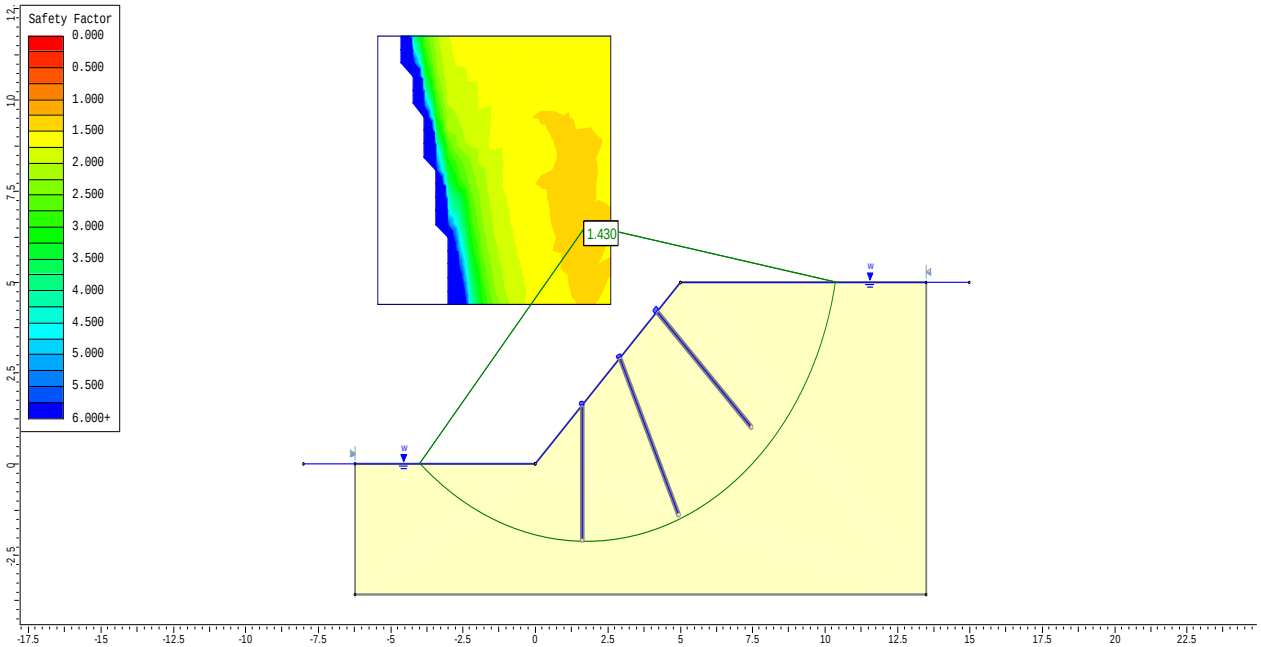


Fig.V.7: Résultats de l'analyse après l'ajout du support des micropieux.

La surface minimale globale de glissement est affichée le facteur de sécurité minimum est maintenant **1,430**, comparativement à **1,118** avant d'ajouter les micropieux. l'utilisation des micropieux permet d'augmenter le coefficient de sécurité .

V.6) comparaison des deux modèles par la méthode « Bishop » :

V.6.1) Surfaces minimale :

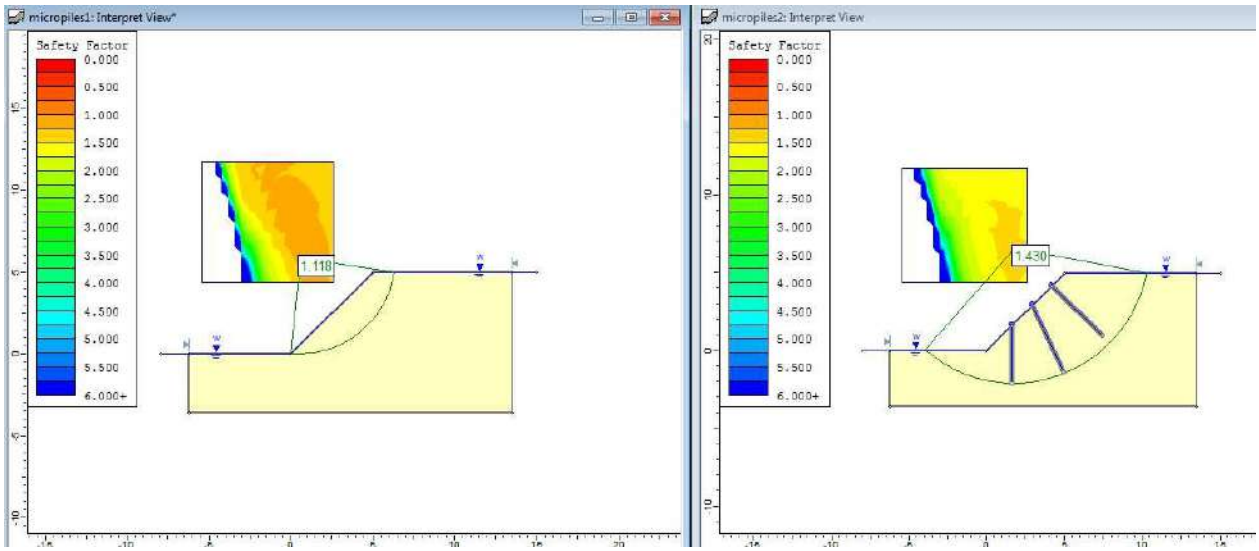


Fig.V.8: surface minimale globale avant et après l'ajout du support.

Trois éléments de renforcement ont été ajoutés au modèle, chaque élément est de 5 mètres de long, et l'espacement entre chaque élément est de 1 mètre (mesurée le long de la pente).

V.6.2) Affichage de toutes les surfaces :

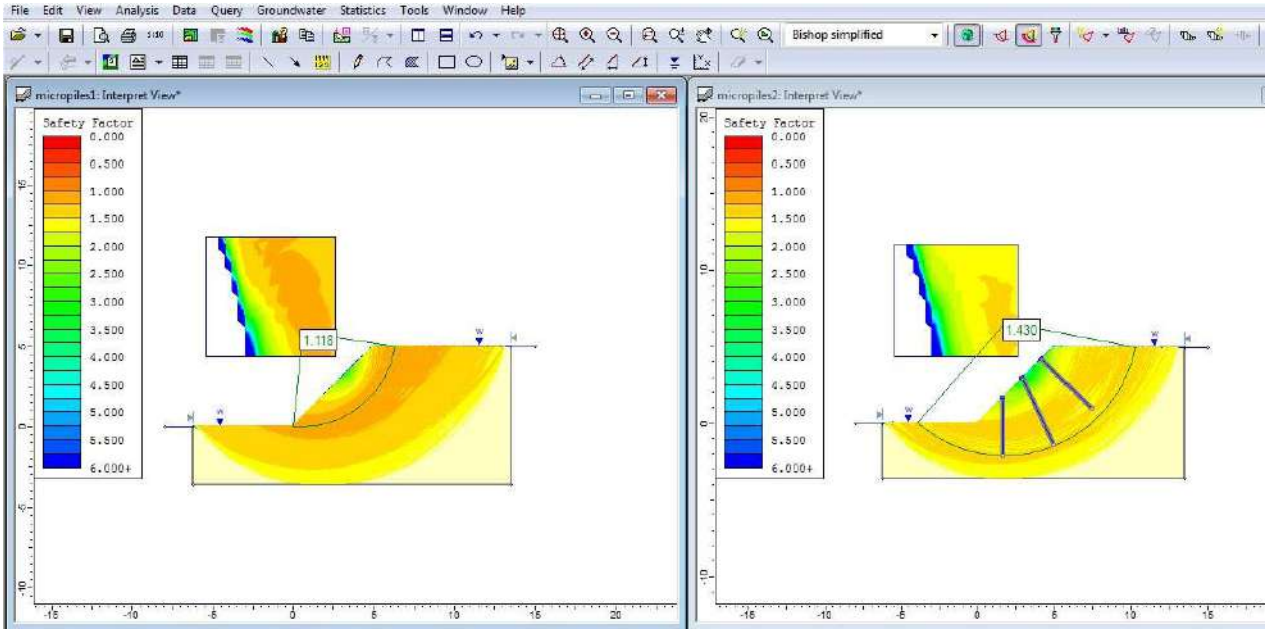
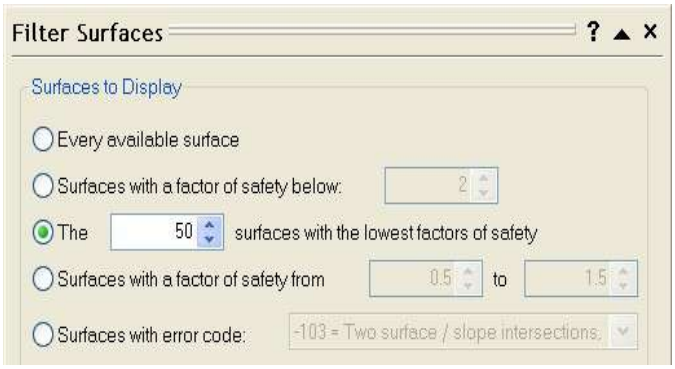


Fig.V.9: Les surfaces minimales affichées pour les deux modèles.

L'effet de support sur l'emplacement de la surface minimale globale peut maintenant être vu. La surface minimale globale a été forcé «l'extérieur» de la région renforcée par le support, et coupe seulement les extrémités de de deux micropieux. La figure montre comment le support a changé le minimum surfaces antidérapantes vers le bas et vers la droite, dans une région de sécurité de plus grand facteur de sécurité.

V.6.3) Filtrage des surfaces



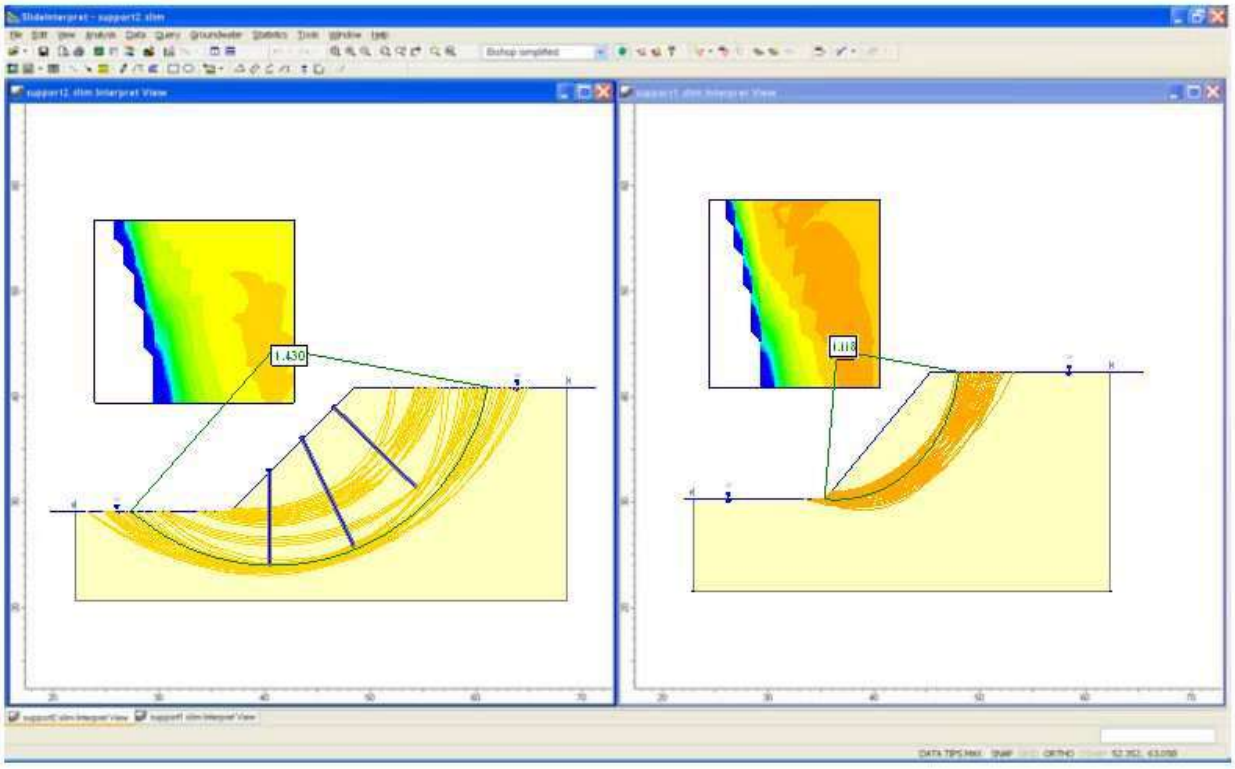


Fig.V.10 : coefficient de sécurité des surfaces filtrées

V.6.4) Affichage des forces de support :

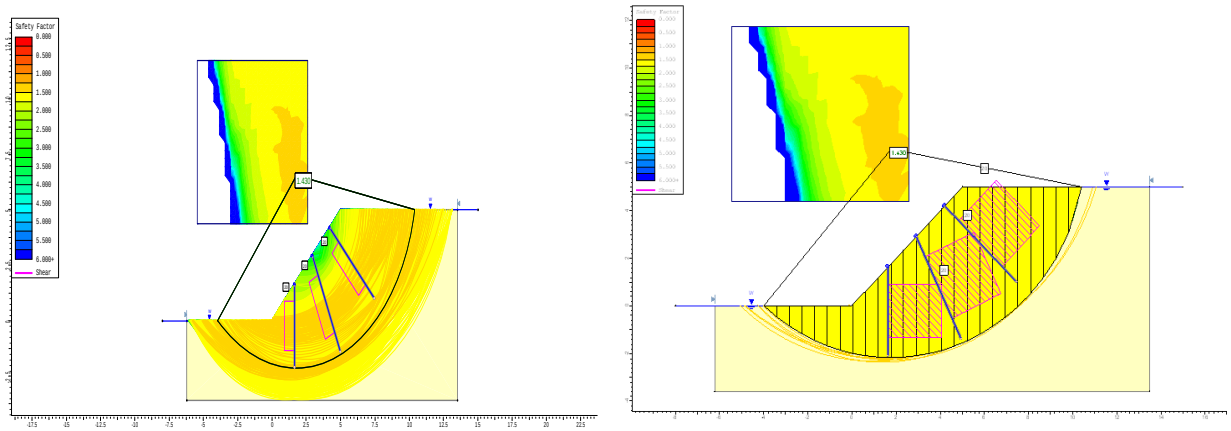
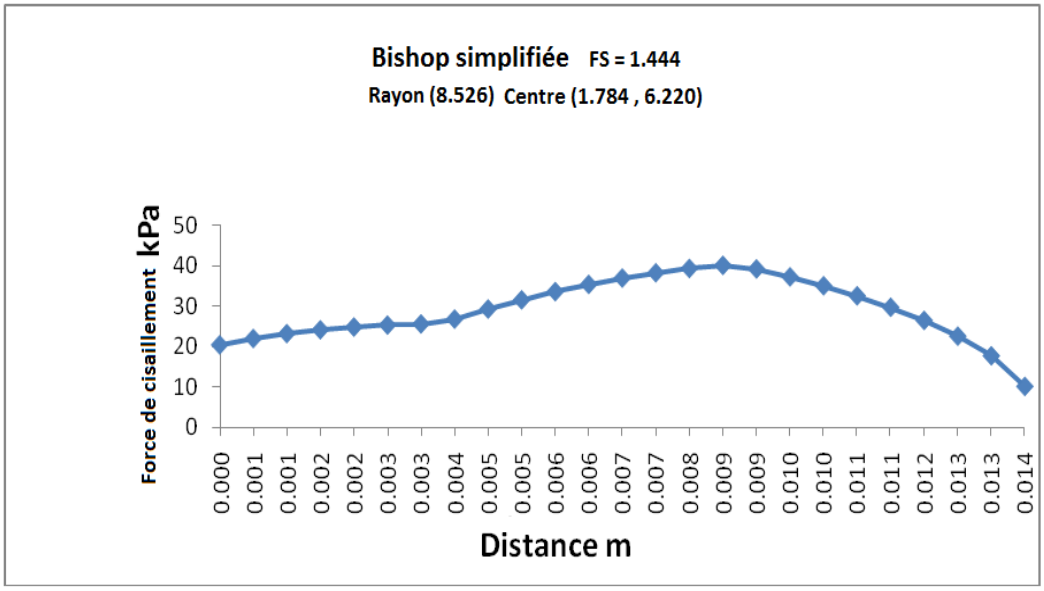
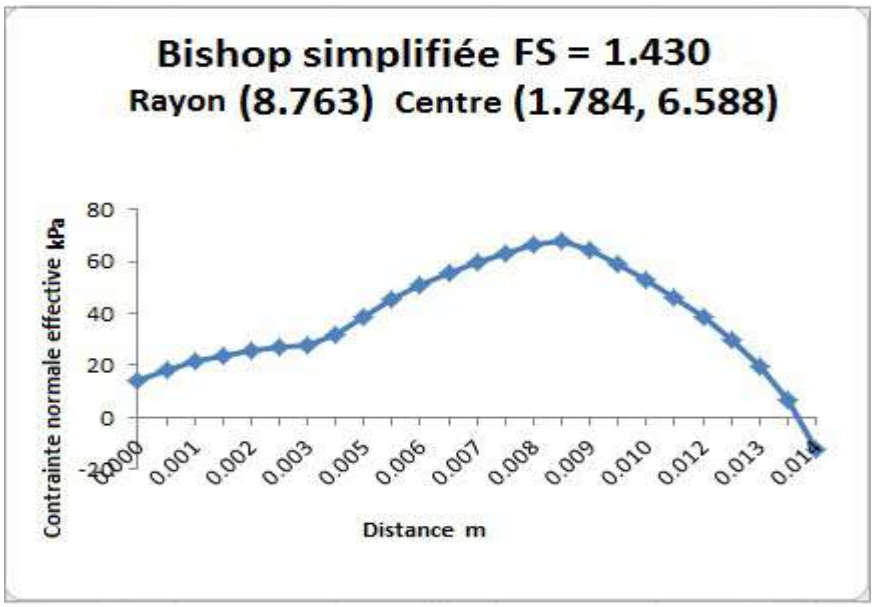


Fig.V.11: Affichage des diagrammes de forces des micropieux

V.6.5) Graphes obtenus :



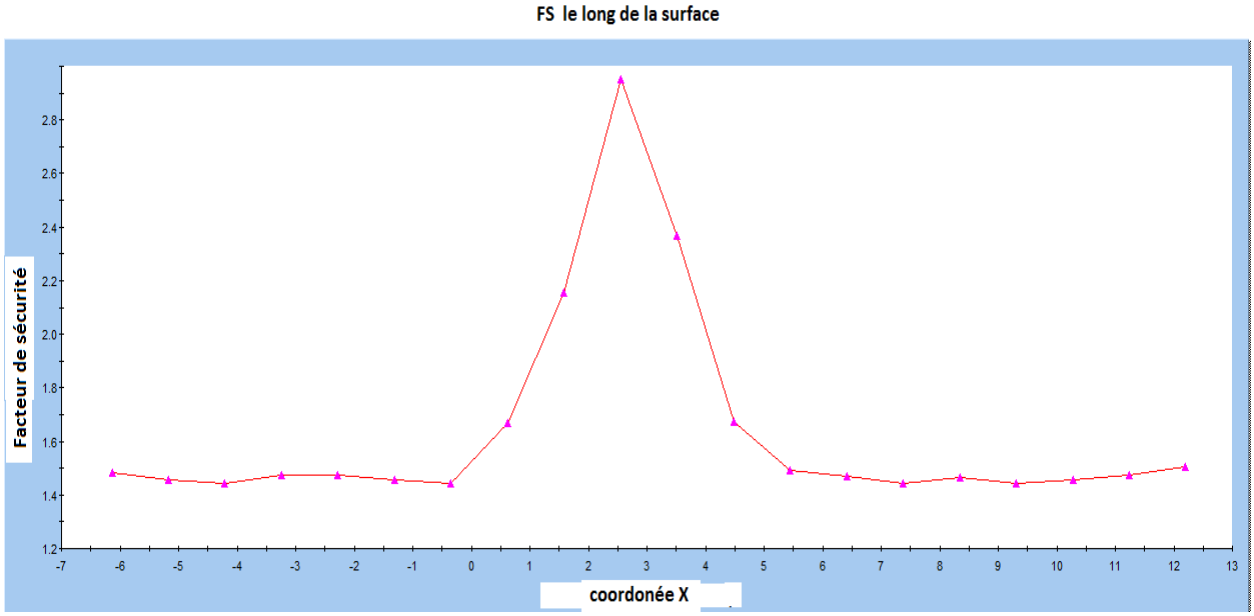
Variation de la force de cisaillement en fonction de la distance



Variation de la contrainte normale effective en fonction de la distance

V.6.6) Facteur de sécurité le long de la surface





Facteur de sécurité le long de la surface

V.7)Conclusion:

un rôle très important dans la technique de renforcement des talus en donnant un facteur de sécurité à la pente plus élevé.

CHAPITRE VI :

Conclusions générales

VI) CONCLUSION GENERALE :

Les études sur les micropieux menées à l'occasion de cette recherche montre que les applications des micropieux pour les fondations et les confortations des structures et la stabilité des talus sont nombreuses et variées et que leur comportement dépend de nombreux facteurs, dont le mode de mise en place et, évidement, les propriétés géotechniques des sols ainsi que l'arrangement géométrique et la nature des chargements appliquées (axiales et transversales) .

Ainsi que les méthodes de calculs actuelles des micropieux, avec une modélisation numérique grâce au logiciel SLIDE.

Les conclusions suivantes ont été observées :

- ✓ Une augmentation significative de la capacité portante due au renforcement et de sa position dans le sol

- ✓ L'utilisation des micropieux augmente le coefficient de sécurité pour la stabilisation de la pente.

- ✓ Ils sont convenables pour une gamme large de type de sols
- ✓ Lorsqu'ils sont utilisés comme des micropieux isolés ils fonctionnent comme des fondations profondes, par contre en groupes ou en réseaux dans lequel ils ont un rôle de renforcement du sol, ils sont rarement mis en place par éléments isolés, mais sont plutôt disposés en groupes ou en réseaux.
- ✓ Enfin, l'utilisation de la modélisation numérique par le logiciel SLIDE programme d'équilibre limite en 2D de la stabilité des pentes pour

évaluer le facteur de sécurité ou de la probabilité de rupture dans des surfaces de rupture circulaires pour les pentes du sol ou de roche permet d’analyser la stabilité des surfaces de glissement en utilisant des méthodes verticales des limites d'équilibre de la tranche.

Saisie des données :

 **Paramètres du projet (Project Settings) :** est utilisé pour configurer les paramètres d'analyse principaux pour le modèle de Slide, comme la direction de rupture, les unités de mesure, les méthodes d'analyses et de méthode des eaux souterraines.

Saisie des limites :

 **Ajouter la limite externe (Add External Boundary) :** La première limite qui doit être définie pour chaque modèle de Slide est la frontière externe. La frontière externe dans la diapositive est une polyligne fermée qui englobe la région du sol que vous souhaitez analyser.

- **Ajouter une table d'eau:**

 Détermination du le niveau de la nappe phréatique

- **Surfaces de glissement :**

Slide peut analyser la stabilité des surfaces circulaire ou non-circulaires de glissement .Différentes surfaces peuvent être analysées, ou une recherche extérieure critique peut être exécutée, pour essayer de trouver la surface de glissement avec le facteur de sécurité le plus bas. Dans Slide, il y a 3 méthodes de recherche disponibles pour les surfaces circulaires de glissement :

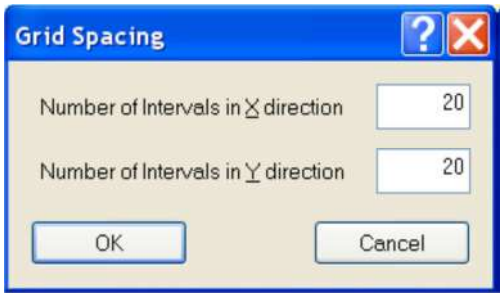
La recherche de grille (Grid Search), la recherche de pente ou la recherche auto raffiner.

L’utilisation de la recherche de grille, qui est une méthode par défaut. Une recherche de Grille exige une grille des centres de glissement.



Ajouter une grille (Add Grid) : Les grilles centrales de glissement peuvent être définies pour l'utilisateur (ajouter l'option de grille) ou automatiquement créé par slide (option automatique de grille) (Auto Grid option). L’espacement de la grille, prenne le nombre par défaut de l’intervalle

(20 x 20). Chaque centre dans une grille de centre de glissement, représente le centre de la rotation de la série de cercles de glissement. Slide détermine automatiquement les rayons de cercle à chaque point de grille, basé sur les limites de pente, et l'incrément de rayon. L'incrément de rayon, détermine le nombre de cercles produits à chaque point de grille.



➢ Limites de la Pente :

- **Filtrage** : Toutes les surfaces de glissement doivent intersecté la frontière externe, dans les limites de pente. Si le début et les points finals d'une surface de glissement ne sont pas dans les limites de pente, alors la surface de glissement est non analysée.

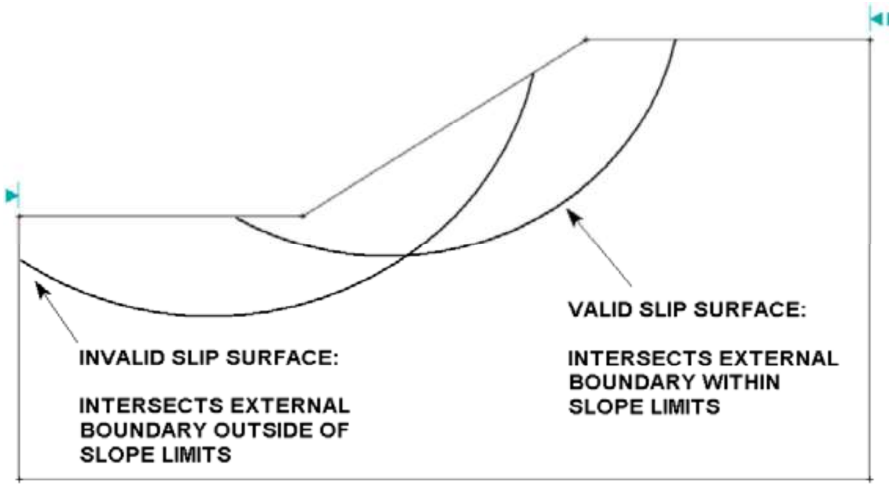


Fig. V.1 :Limites de pente filtrant pour les surfaces valides.

- **Génération de Cercle** : Les sections de la frontière externe entre les limites de pente définissent la surface de pente à analyser.

La surface de pente est employée pour produire des cercles de glissement pour une recherche de grille, comme suit :

- Pour chaque point de grille de centre de glissement , des rayons minimum et maximum appropriés sont déterminés, basés sur les distances à partir du centre de glissement à la surface de pente
- L'incrément de rayon est alors employé pour déterminer le nombre de cercles de glissement produits entre le minimum et de cercles de rayons de maximum à chaque point de la grille.

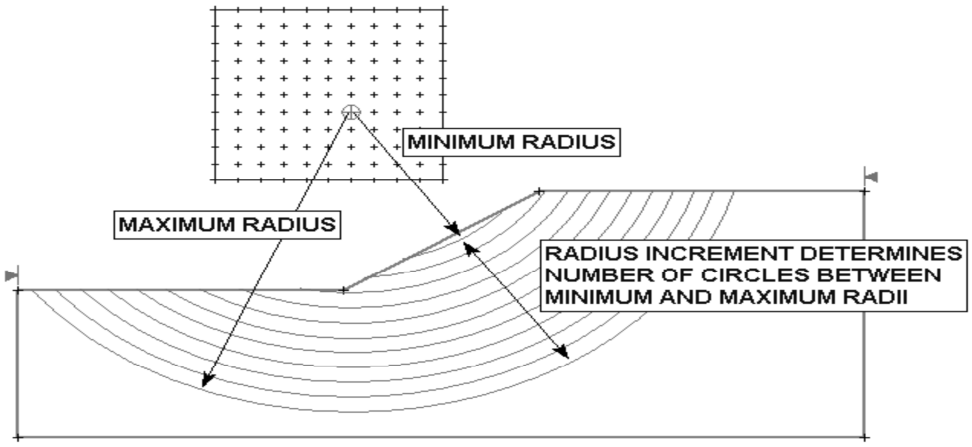


Fig. V.2 : Méthode de génération de cercle de glissement pour la recherche de grille, en utilisant des limites de pente et l'incrément de rayon

NOTE :

•**L'incrément de rayon :** est le nombre d'intervalles entre le minimum et le maximum rayons de cercle à chaque point de la grille. Par conséquent le nombre de cercles de glissement produits à chaque point de grille est égal à l'incrément de rayon + 1.

➢ Changement des limites de la pente :

Par défaut, les limites de pente calculées par Slide, en général, donneront l'assurance maximale pour une recherche de grille et rétrécir la recherche de grille à des secteurs plus spécifiques du modèle.

 **Définir les limites :** La fenêtre de définir les limites de pente permet à l'utilisateur d'adapter les bonnes limites de pente, ou même pour définir deux ensembles de limites (par exemple pour définir les gammes permises pour les points de début et de fin de glissement).

Surface Options :

 Le type de surface est circulaire,

• L'incrément de rayon utilisé pour la recherche de grille, est écrit dans Cette fenêtre.

 **Zoom tout :** La grille sera ajoutée au modèle. Zoomer le tout pour centrer le modèle dans l'écran.

➢ Propriétés (Properties) :

 **Définir les propriétés des matériaux :** Les propriétés des matériaux sont regroupées dans une base de données du projet. Toutes les données figurant dans les bases de données de différents projets peuvent être partagées via une base de données globale.

 **Enregistrement (Save) :** Avant d'analyser le modèle, enregistrer le fichier et exécuter l'analyse.

 **Calcul :** Le programme de calcul se déroulera en exécution de l'analyse. Il ne devrait prendre que quelques secondes. Une fois terminé, Interpréter les résultats. Le facteur de sécurité minimum pour chaque méthode d'analyse est montré pendant que l'analyse procède.

 **Interpréter (Interpret)** : le programme est le module de post-traitement utilisé pour la visualisation de données et l'interprétation des résultats d'analyse de glissement .Ceci inclut des résultats de stabilité de pente aussi bien que des résultats d'élément fini d'eaux souterraines.

Par défaut, la surface minimum globale de glissement par la méthode d'analyse simplifiée « Bishop ».

Si une recherche de grille a été exécutée, des découpes de facteur de sûreté dans la grille de centre de glissement sont apparaître .Les découpes sont basées sur le facteur de sécurité minimum a calculé à chaque centre de glissade de grille.



 **Modeleur (Modeler) :** Le modèle est le programme de prétraitement utilisé pour la saisie et la modification des limites du modèle(les charges, les propriétés des matériaux, les conditions des eaux souterraines, la définition de la surface de glissement, et l'enregistrement du fichier d'entrée).

- **Ajouter un modèle de renforcement (Add Support Pattern) :**

Propriétés de support :

 **Ajouter un modèle de renforcement:** pour ajouter un modèle uniformément espacé de soutien à la pente.

 **Définir le support :** les types suivants de soutien sont disponibles tel que :

• géotextile (géosynthétique , géogrille)

• ongle se sol

• micropieu par la méthode de la force d'application (active, passive)

➢ Surfaces Minimale globales de glissement :

 **Minimum Global** : Pour une méthode d'analyse donnée, la surface minimale globale de glissement, est la surface de glisement avec le facteur de la sécurité est le plus bas, dans toute les surfaces analysées.

- la méthode d'analyse simplifiée par « Janbu ». La méthode de Janbu a localisé une surface minimum globale différente, mais le facteur de sécurité est également moins de 1.



 **Carreau vertical :** comparaison des résultats des deux dossiers des surfaces minimales glogale avant et après la mise de support.

 **Minimum Surfaces :** rappeler que la recherche de grille est exécutée en produisant des cercles de les différents rayons à chaque point de grille dans un glissement au centre de la grille. Pour voir la surface de facteur de sécurité minimum produite à point de la grille

 **Vision de toutes les surfaces :**Pour obtenu toutes les surfaces valides de glissement produites par l'analyse, noter que les surfaces de glissement ont une couleur codée selon le facteur de sécurité , et que ces derniers changeront selon la méthode d'analyse choisie.

NOTE :depuis que les surfaces de glissement recouvrent, Slide dessine les surfaces de glissement commençant par les facteurs de sécurité *LES PLUS ÉLEVÉS*, et terminer par les *PLUS BAS* des facteurs de sécurité, de sorte que la surface de glissement apparaître avec les plus bas facteurs de sécurité sont toujours évident.

 **Filtage des Surfaces :** Le filtrage peut être fait par facteur de sécurité, ou par un nombre indiqué de surfaces plus bas.

 **Query** : Dans le programme d'interprétation, une surface de glissement choisie avec pour le visionnement et le traçage d'analyse détaillée résulte le long de la surface de glissement (par exemple base Effort normal, résistance au cisaillement mobilisée, forces de pression de pore, forces d'Interslice, etc..).

 **Montrer les tranches :** pour les surfaces questionnées au glissement.

 Graphe de coefficient de sécurité (FS) le long de la pente

 **Informations**: affichage de la liste des informations pour chaque méthode d'analyse.

 **Afficher les forces de soutien:** Les diagrammes de forces de soutien pour tous les éléments de soutien peuvent être visionnés avec l'option de soutien des Forces Show.

Le mode de rupture qui fournit la force minimale, à chaque point le long de la longueur du support, détermine le diagramme de force.
Le diagramme de force et le point d'intersection d'une surface de glissement avec un élément de support, déterminer l'amplitude de force qui est appliquée à la surface antidérapante.

 **Copier sur Presse-papiers** : copier dans le presse-papiers de Windows en utilisant l'option de Copier dans la barre d'outils ou le menu Edition. Cela permet de placer l'image sur le presse-papiers, qui peut être collé directement dans le « word » ou l'image de traitement des demandes.

Support actif et passif:

L'importance de la méthode Application de la force est la suivante.
En termes généraux, le coefficient de sécurité est défini comme le rapport des forces résisté à la motion, les forces motrices. Les forces motrices comprennent la masse des chaque tranche accélérée par gravité, des forces sismiques et l'eau dans un fissure de traction. Forces de résistance proviennent de la cohésion et de frottement la force de la surface de glissement.

Le support actif est inclus dans l'analyse de glissement comme dans Eqn.1.

$$F = \frac{resisting\ force + T_N \tan\phi}{driving\ force - T_S} \qquad \text{Eqn.1}$$

Où : T_N est la composante normale et T_S est la composante de cisaillement de la force appliquée à la base d'une tranche, par le support.
Le support actif est supposé agir de manière à diminuer la force motrice de le Facteur de calcul de la sécurité.

Le Support passif est inclus dans l'analyse de glissement comme dans Eqn.2.

$$F = \frac{resisting\ force + T_N \tan\phi + T_S}{driving\ force} \qquad \text{Eqn.2}$$

En général, le soutien passif donnera toujours un facteur inférieur de la sécurité, que le soutien actif (quand un facteur valable de la sécurité peut être calculé pour Application de la force active de soutien).

Méthode d'analyse de slide :

➢ Méthode des tranches :

Si on veut exprimer F.S. en fonction de la contrainte effective$\sigma' = \sigma - u$

$\sigma = c' + \sigma' N \tan\varphi$

$\sigma'_N = \sigma_N - u$

$\sigma'_N\, l = \sigma_N l - u l$

$\sigma'_N\, l = W\cos\alpha - u l$

$F.S = \sum (l_i\, c'i + (W_i \cos\alpha_i - u_i l_i) \tan\varphi') / \sum W_i \sin\alpha_i$

Cette formulation amène cependant certaines difficultés. Lorsqu'a augmenté, σ_N devient de plus en plus petite ($\sigma_N = Wi\ \cos\alpha_i / l_i$).

$W = g.z.b$

$\sigma_N = Wi \cos\alpha / l = g.z.b.\cos\alpha / l$

$l = b/\cos\alpha$

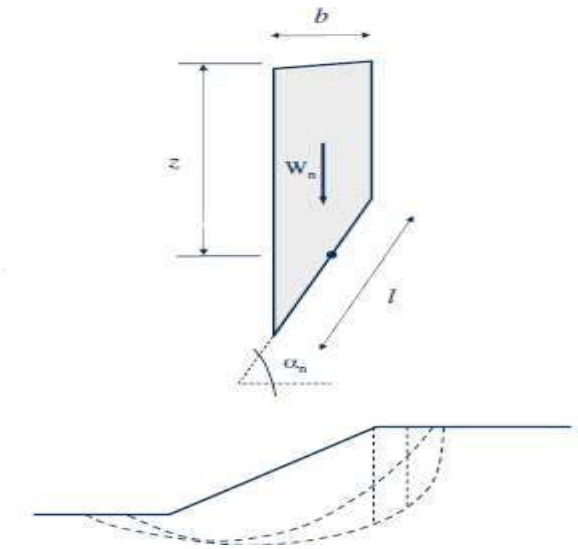
$\sigma_N = g.z.b.\cos\alpha / (b/\cos\alpha) = g.z.\cos^2\alpha$

Donc si le plan de cisaillement est vertical $a = 90 \Rightarrow \sigma_N = 0$

En présence de l'eau ($u > 0$)

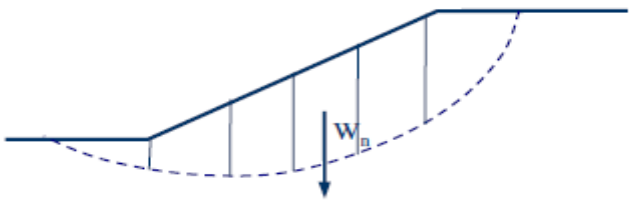
$\sigma'_N = g.z.\cos^2\alpha - u = g.z.\cos^2\alpha - z.gw = g.z.\cos^2\alpha - z.g/2 = g.z.(\cos^2\alpha - 1/2)$

Donc si $a = 45^o$ et nappe en surface $\sigma'_N = 0$



- **<u>Méthode de Bishop (qu'on appelle habituellement Bishop simplifiée) ;</u>**

La méthode de Bishop diffère de celle des tranches surtout parce qu'elle fait l'équilibre dans chacune des tranches pour trouver σ_N au lieu d'assumer celle-ci comme étant égale à Wcosa. $\sigma_N \Rightarrow \sum F_v$.



Équilibre de l'ensemble : $\sum M = 0$ pour déterminer F.S.

De l'équilibre des moments, on a déjà établie :

$F.S = \sum (li\ c'i + \sigma' N_i l_i \tan\varphi') / \sum W_i \sin\alpha_i$ (bishop est différent que dans le calcul de σ'_N). Si nous remplaçons s'N dans l'équation :

$F.S = (1/\sum Wi \sin\alpha_i) . \sum (l_i\ c'i + \{W - ul\cos\alpha - c'l \sin\alpha / F.S.) / (\cos\alpha + \tan\varphi \sin\alpha / F.S.\} \tan\varphi')$

Si on veut une expression avec le même dénominateur, nous faisons

$m_a = \cos\alpha + \tan f \sin\alpha / F.S$

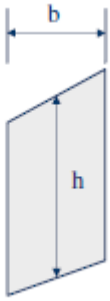
$F.S = (1/\sum Wi \sin\alpha_i) . \sum [li\ c'i\cos\alpha + (W - ul \cos\alpha) \tan\varphi'] / m_a$

À noter ma contient F.S (inconnu). Il faut donc procéder par itération $\Rightarrow$converge rapidement.

Si on travaille à la main, il est plus simple de réécrire cette équation avec

$b = l\cos\alpha \Rightarrow m_a = hb\sin\alpha$; $W = ghb$

$F.S = (1/\sum hibi \sin\alpha i) . \sum [bi\ (c'i + (ghi - ui)\tan f'] / ma$



➢ Méthode simplifiée de Janbu et al. 1956

C'est une bonne méthode à utiliser à la main. Cette méthode assume la localisation des forces P = N-1 hypothèses. On a donc 3N-1 inconnus et 3N équations.

Nous nous retrouvons avec un système sur-déterminé. Ceci peut causer certaines instabilités de la solution surtout lorsqu'on utilise l'ordinateur.

La méthode utilise un coefficient correcteur f_0 pour tenir compte des forces entre les tranches. On calcule d'abord un facteur de sécurité non corrigé $F.S_0$ qui est déterminé comme suit :

$F.S_0 = \sum (c'l\cos\alpha + (P-ul)\tan\varphi'\cos\alpha) / \sum P\sin\alpha$

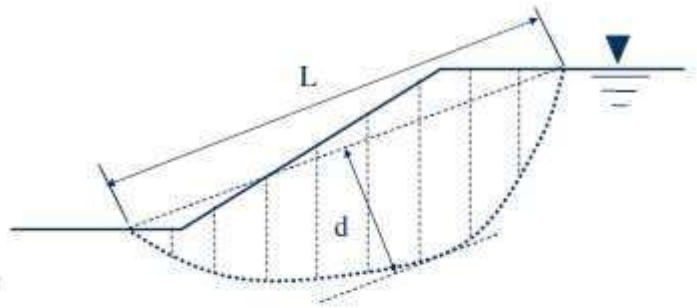
$P = [W-c'l\sin\alpha/F.S. + ul\tan\varphi'\sin\alpha/F.S]/m_a$

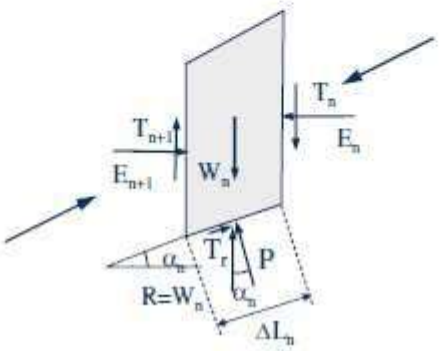
Le coefficient de sécurité corrigé est : $F.S. = f_0 . F.S_0$

Pour obtenir les valeurs de f_0, on se sert du diagramme illustré à la figure (feuilles supplémentaires).

Il existe aussi la méthode dite rigoureuse de Janbu où les forces de cisaillement sont incluses dans le calcul de P.

Lorsqu'on travaille à la main, le terme m_a est assez fastidieux à évaluer. Il existe cependant des tables qui permettent de donner directement le terme en fonction de α et de $\tan\varphi/F.S.$





Bibliographie

[1] Bessaoud R , Gorine D , Mémoire de projet fin d'étude « Etude d'un pieu isolé chargé latéralement par la méthode du module de réaction et élaboration d'un logiciel de calcul " pisol "» , Promotion 2000 .

[2] Philiponnat G , « Fondations et ouvrages en terre » Eyrolles, Paris (1998).

[3] Estephan R , Thèse de Doctorat « Contributions aux méthodes de calcul des groupes et des réseaux de micropieux » , Ecole nationale des ponts et des chaussées , Centre d'enseignement et de recherche mécanique des sols « CERMES » (2003) .

[4] Maleki K , Thèse de Doctorat « Contribution à l'étude du comportement des micropieux isolés et en groupe », Ecole nationale des ponts et des chaussées (1995) .

[5] Azuar M.J.J & Renault M.J , « Les Micropieux », Ministère de l'urbanisme du logement et des transports (Direction des routes) , C.E.T.E et S.E.T.A (1986) .

[6] FOREVER , Synthèse des résultats et recommandations du projet national sur les micropieux , Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France (2004) .

[7] Federal Highway Administration (FHWA) of U.S.A, « Micropiles design and construction », guide line implementation maual, Department of transportation “Publication No. FHWA NHI-05- 0395 ” , (2005)

Sites internet :

[8] Fondations profondes

[9] www.rocscience.com