

II.1. Introduction

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours des dernières décennies. D'une part le développement imposé de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels.

D'autre part le sol, matériaux peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction et l'on cherche, pour des raisons souvent économiques, à pouvoir utiliser les sols de qualité médiocre.

Il en a résulté le développement d'un très grand nombre de techniques destiné à augmenter les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou rapportés. On peut distinguer trois grandes catégories de techniques:

- Les techniques d'amélioration: Compactage par explosifs, compactage dynamique, vibrocompactage, drainage et électro-osmose;
- Les techniques de traitement: Déshydratation, congélation et les addition des ajouts minéraux;
- Les techniques de renforcement: Les géosynthétiques et les inclusions rigides verticales.

L'amélioration, traitement et le renforcement des sols ont été de plus en plus utilisés pour des ouvrages définitifs, dans des zones sismiques et pour la réparation des ouvrages anciens (reprise en sous-oeuvre, confortations, etc.) il est à noter également que les mécanismes de comportement et la connaissance de l'amélioration apportée ont nécessité de nombreuses expérimentations en vraie grandeur, lesquelles ont constitué un élément essentiel de la recherche.

II.2. Domaine et limites d'application des différentes techniques

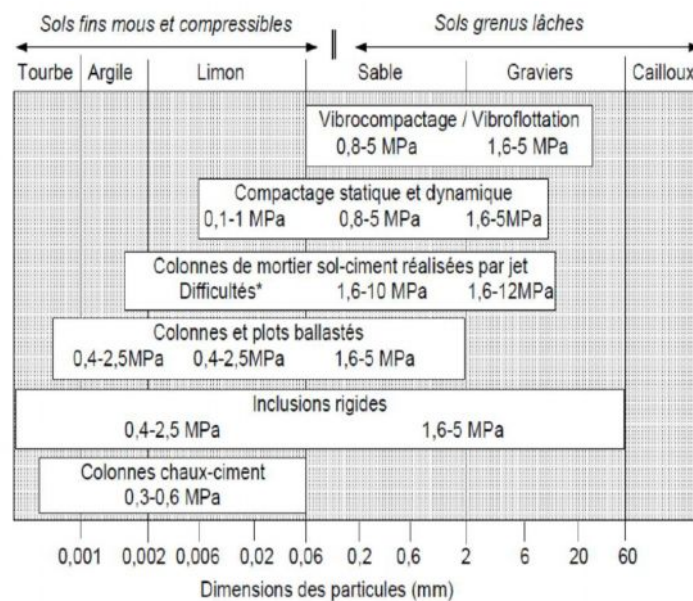
La démarche d'application d'une technique d'amélioration des sols comporte quatre étapes (Dhouib, 2003):

- Définition des critères du projet: Emprise, sollicitations, tassements tolérés;
- Identification des sols: Nature, granulométrie, présence d'eau;
- Choix de la solution d'amélioration des sols;
- Optimisation de la solution d'amélioration des sols la mieux adaptée.

L'application des techniques d'amélioration des sols est directement liée à la granulométrie des sols à traiter.

La figure II.1 présente une description des domaines d'utilisation des différentes méthodes d'amélioration des sols par création d'inclusions, qui combine les classes granulométriques et l'état du sol, représenté par sa résistance de cône q_c au pénétromètre statique.

L'amélioration des sols a en effet un domaine d'action optimale pour chaque technique, qui dépend de la nature des sols mais aussi de leur état de compacité et de surconsolidation. Des gammes de résistance différentes sont spécifiées pour les sols fins, d'une part, et pour les sols grenus, d'autre part. La classification d'après les essais au pénétromètre statique peut être remplacée par une classification au scissomètre de chantier pour les sols fins, au pénétromètre à carottier (SPT) pour les sables lâches, en particulier, et au pressiomètre, en général.



* Utilisation de grande énergie ou de double jet.

Figure II.1: Limites et domaine de validité des techniques d'amélioration des sols.

II.3. Les méthodes d'amélioration des sols

II.3.1. Compactage par explosifs

Utilisé généralement loin des zones urbaines, Il permet un compactage rapide et non coûteux de grands volumes de sol atteignant des profondeurs importantes. L'explosion induit une onde de choc qui se tend en comprimant le sol; ainsi produite, l'onde de choc génère dans le sol des contraintes de cisaillement alternées. En dépassant la résistance frottement entre grains, elles engendrent des déplacements relatifs entre ces grains. Ces mouvements des grains induisent une diminution du volume des vides, si le sol est saturé cette diminution génère une augmentation de la pression interstitielle qui nous conduira à la liquéfaction. Dans le cas d'un sable, la dissipation de la surpression est très rapide, le sol obtient un nouveau réarrangement plus dense.

II.3.2. Compactage dynamique

Le principe de cette méthode consiste à faire tomber en chute libre une masse de 10 à 30 tonnes d'une hauteur de 15 à 20 mètres. La masse ainsi lancée produit un impact de forte énergie au contact du sol; ce dernier va se compacter sous l'influence des contraintes de cisaillement provoquées par le choc qui induit des mouvements relatifs entre les grains du sol.

Dans le cas d'un sol pulvérulent, la densification mène à la liquéfaction de la zone perturbée et un nouveau réarrangement est obtenu après dissipation de la surpression interstitielle toujours sous l'influence de la gravité. La figure II.2a montre un atelier de compactage dynamique en action et la figure II.2b des impacts de compactage dynamique à la surface du terrain, avant qu'ils soient rebouchés.



a. Atelier de compactage dynamique (Document Ménard Sol traitement).

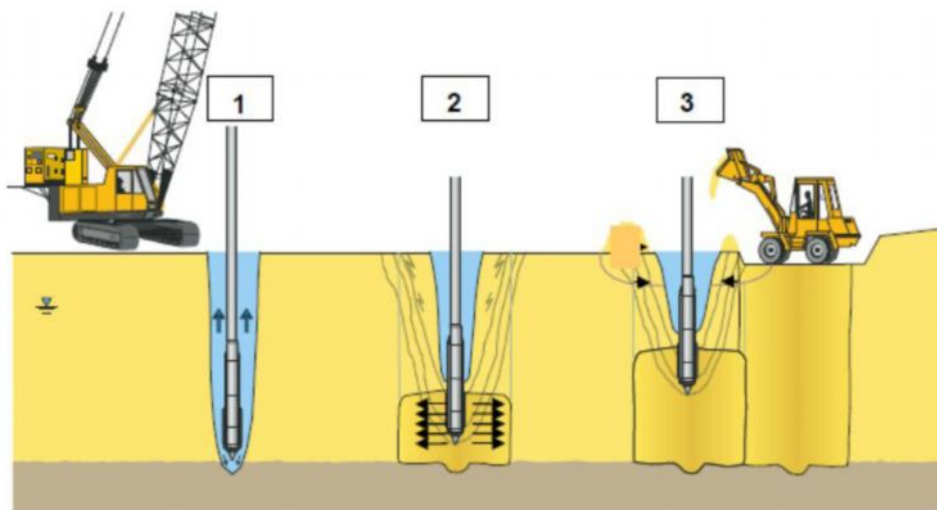


b. Impacts de la masse à la surface du sol

Figure II.2: Atelier de compactage dynamique et impacts de la masse (Document Keller).

II.3.3. Vibrocompactage

Ce procédé est utilisé pour les sites à proximité des habitations. Le principe consiste à enfoncez un tube dans le sol à l'aide d'un jet d'eau sous pression. Le jet d'eau est placé à l'extrémité inférieure du tube, il facilite la pénétration de ce dernier dans le sol en affaiblissant les propriétés du sol attaqué. Lors de sa remontée, celui-ci est mis en vibration. Elles génèrent des contraintes de cisaillement alternées qui vont provoquer par la suite induire des mouvements relatifs des grains réduisant l'indice des vides et provoquant un nouvel arrangement plus dense si le sol est saturé, la réduction du volume des vides produit une liquéfaction totale du sol autour du tube et de la zone perturbée, après dissipation de la surpression interstitielle, un tassement et un nouveau réarrangement des grains est obtenu sous l'influence de la gravité (Figure II.3).



1: Fonçage du vibreur 2: Compactage des sols 3: Apport des matériaux et finition

Figure II.3: Etapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller).

II.3.4. Amélioration des conditions de drainage

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de préchargement. Il permet une consolidation plus rapide du sol. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement (Figure II.4).

Les inconvénients:

- La perméabilité du sol est difficile à estimer avec une précision meilleure que un ou deux ordres de grandeur;

- Ce qui a des conséquences énormes sur le choix de la maille de drainage;
- Le problème étant accru du fait de la variabilité naturelle des terrains liquéfiables (teneurs en fines variables notamment);
- En outre il ne faut pas négliger le risque de colmatage des drains dans le temps ou au moment de la mise en oeuvre (cas des colonnes ballastées notamment);
- Il est alors difficile de garantir que la quantité d'eau nécessaire puisse être évacuée au cours des quelques secondes ou dizaines de secondes critiques d'un tremblement.



Figure II.4: Installation des drains.

II.3.5. Electro-osmose

L'électro-osmose a été initialement mise au point par Casagrande (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte. Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro-osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique (Figure II.5).

Le phénomène d'électro-osmose sert à appliquer une différence de potentiel dans un matériau poreux saturé, l'électrolyte se déplace de l'anode vers la cathode.

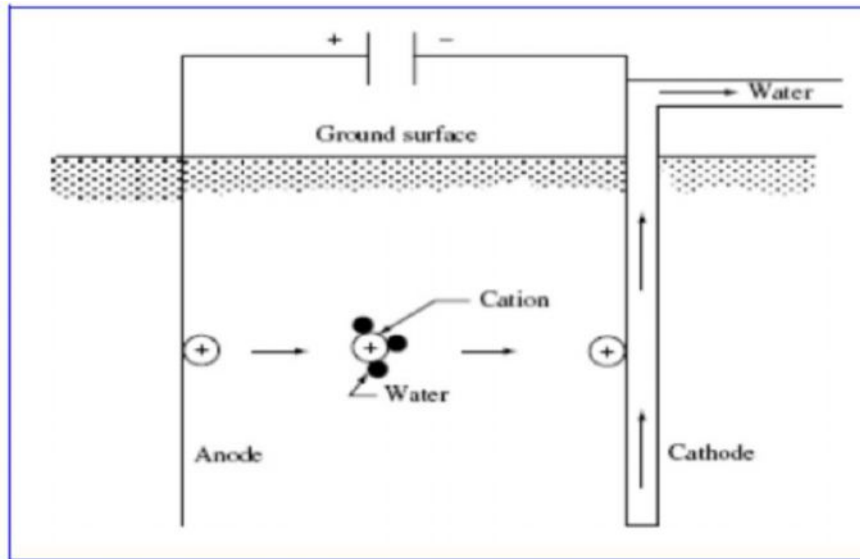


Figure II.5: Eléctro-osmose.

II.4. Méthodes de traitement des sols

II.4.1. Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

II.4.2. Congélation

Pour les sols fins: La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsque aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel (Figure II.6).

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (Azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

Pour les sols grenus: La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (Azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.



Figure II.6: Traitement par congélation à Nice d'une zone sous chaussée traversée en tunnel et à Vienne sous bâtiment pour tunnel de métro.

II.4.3. Traitement des sols par addition d'ajouts minéraux

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que réactions d'échange de base avec les particules d'argile (Cation) et les réactions pouzzolaniques (Cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (Capacité portante) et de durabilité. Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé surtout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en oeuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

II.4.3.1. Ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique et stabilité à l'eau et au gel. Les doses varient de 3.5 à 5% du poids de sol sec à traiter. (Bulletin Cfr-info, 2002. Le traitement des sols) (Figure II.7).

L'action de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement des sols de surface (Thomas et al. 2002).

D'après Haofeng et al (2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment (Figure II.8).



Figure II.8: Chantier de traitement du sol au ciment.

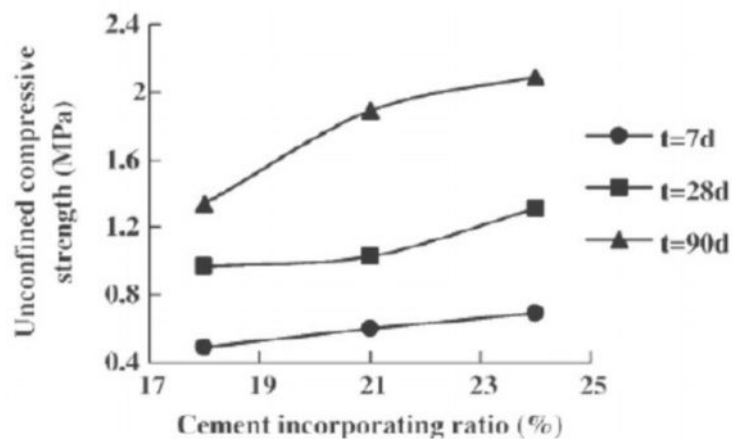


Figure II.7: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Haofeng et al.,2009).

II.4.3.2. Chaux

La stabilisation par ajout de la chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux), L'utilisation de cette technique permet:

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres;
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé;
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient (Figure II.9).



Figure II.9: Chantier de traitement d'un sol à la chaux (France, 2009).

II.4.3.3. Cendres volantes

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols (Matea, 1964).

Zalihe Nalbantoglu, (2002) a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement.

II.4.3.4. Fumées de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre de l'ordre de $0.1\mu\text{m}$. Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à $15\text{m}^2/\text{g}$.

Les fumées de silice ont des propriétés pouzzolaniques avérées, (Kumar-Mehta et Malhotra, 1996). Asavapisit et al (2001) présentent l'évolution de résistances à la compression simple R_c avec l'âge (Figure II.10) de boues de clapage. La meilleure valeur de R_c est obtenue avec 10% de fumées de silice, mais au-delà et pour 20% de fumées de silice ajoutée, R_c diminue (Figure II.11). Ainsi il existerait une valeur optimale. Il est possible que les fumées de silice en excès occupent les pores et réduise la place disponible pour les produits d'hydratation et ainsi limite l'étendue hydraulique.

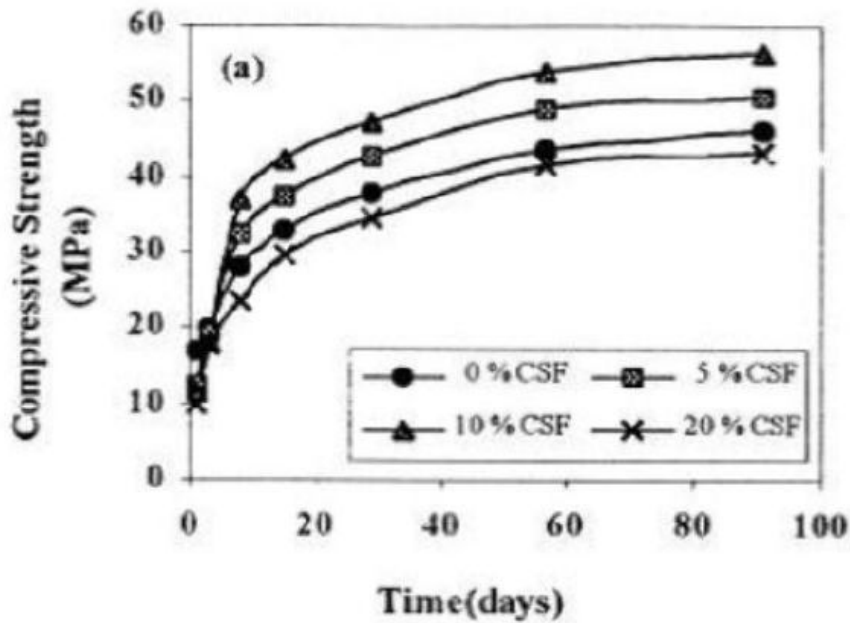


Figure II.10: Evolution des R_c de boues de clapage: Mélange de ciment et de Fumées de silice (CSF), d'après (Asavapisit et al. 2001).

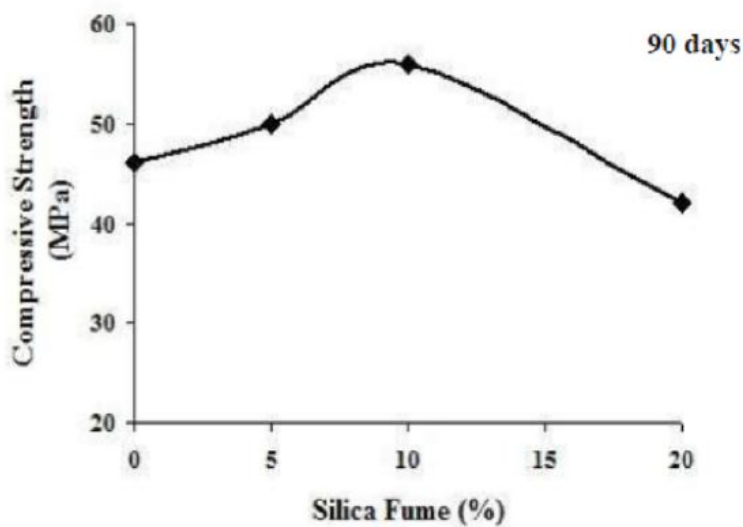


Figure II.11: Evolution de R_c de boues de clapage selon différents dosages en fumées de silice: 0, 5, 10 et 20% (Asavapisit et al., 2001).

II.5. Méthodes de renforcement des sols

II.5.1. Géosynthétiques

Un géo synthétique est défini, selon la société internationale de géosynthétique (IGS, 1998), comme un matériau polymérique (synthétique ou naturel) utilisé en contact avec le sol/roche et/ou autre matériau géotechnique dans les applications de l'ingénierie.

Selon la même société, ces matériaux peuvent assurer les fonctions suivantes: Soutènement, drainage, filtration, séparation, protection et renforcement (résister aux contraintes et déformations dans les structures géotechniques). Les différents types de matériaux geosynthétiques sont:

- Produits polymériques (polypropylène, polyester, polyéthylène, polyamide, polyvinylechloride, polystyrène);
- Géotextiles;
- Geogrids;
- Geonets;
- Geomembranes;
- Geocomposites.

Dans la fonction de renforcement, le rôle des géosynthétiques est d'ajouter les propriétés de résistance à la traction au sol (qui est un matériau avec de bonnes caractéristiques en compression) pour produire un matériau qui a à la fois les caractéristiques de résistance à la traction et à la compression. Le renforcement est le résultat du transfert des contraintes de traction du sol vers le géosynthétique à l'aide du frottement développé entre les deux.

- Vessely et al (2002), ont montré que les inclusions de géosynthétiques sont efficaces sur la réduction du potentiel de gonflement des sols expansifs;
- Ikizler et al 2008, ont reporté que la réduction du potentiel et la pression de gonflement est le résultat de l'inclusion de polystyrène placé entre un sol expansive et un mur rigide;
- Tang et al (2007), montrent que le renforcement par les fibres augmente la résistance à la compression et permet de réduire le potentiel de gonflement des argiles expansives;

- Cai et al (2006), reportent que l'augmentation de contenu en fibre implique une réduction dans le potentiel de gonflement des argiles stabilisées à la chaux;
- Viswanadham et al (2006), ont montré que les mélanges renforcés par les fibres engendrent une grande réduction du gonflement avec des faibles pourcentages (0.25%) et des petites fractions de 15 et 30 (Figure II.12).

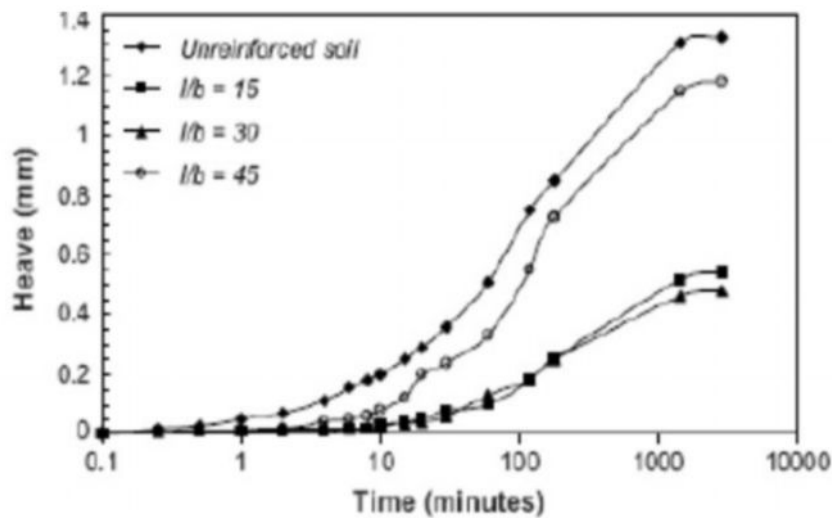


Figure II.12: Variation du gonflement en fonction du temps ($f = 0.25\%$).

(Viswanadham et al. 2006),

f: Continue de fibre dans le sol;

l: Largeur de fibre;

b: Longueur de fibre différence de potentiel.

II.5.1.1. Fibres de polypropylène

a. Définition

Le polypropylène est un matériau polymère hydrocarboné synthétique, il est l'un d'un groupe de fibres synthétiques, de polymères (Y compris, mais sans s'y limiter, le nylon, le polyester et le polyéthylène) adapté de l'industrie textile, qui ont été ajoutés au PCC dans une tentative d'améliorer performance. Actuellement polypropylène est le plus largement utilisé de la synthèse des fibres pour les applications de pavage (Zollo, 1985). Il y a plusieurs types de polypropylène comme montre la figure II.13.

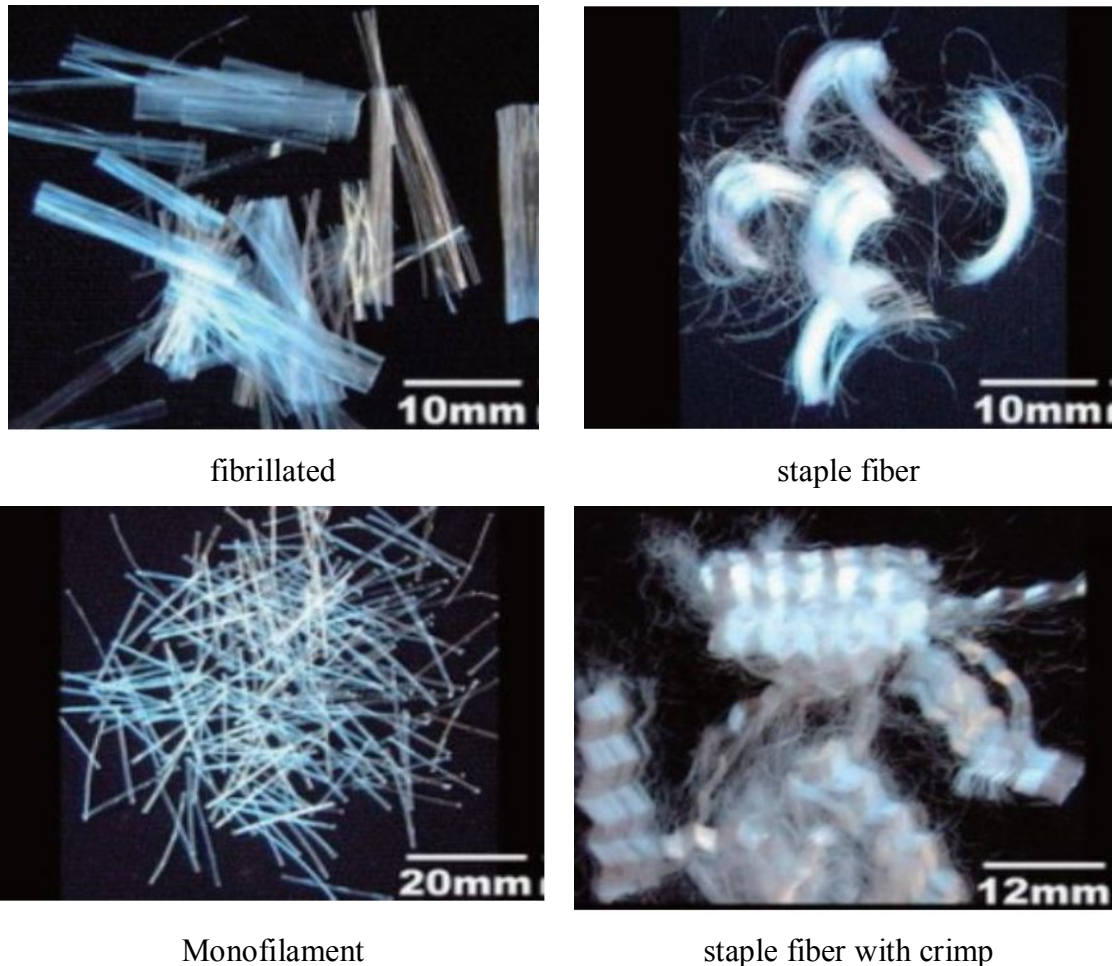


Figure II.13: Les types de polypropylène.

La grande majorité des géotextiles sont fabriqués à partir de polypropylène ou de polyester polymères formés sous forme de fibres ou de fils et enfin dans un tissu tissé ou non-tissé. Les feuilles sont flexibles et perméable et généralement ont l'apparence d'un tissu. Il y a au moins 80 domaines d'application spécifiques pour les géotextiles qui ont été développés; Cependant, le tissu effectue toujours au moins un des cinq fonctions distinctes:

- Séparation;
- Renforcer;
- Filtration;
- Drainage;
- Contrôle de l'érosion.

b. Caractéristiques générales

- Bonne stabilité thermique;

- Faible densité;
- Résistance haute température;
- Ecologique;
- Rigides bonne résistance à l'impact;
- Bonne résistance à la fissure sous tension;
- Solide et durable;
- Imperméable.

c. Structure moléculaire et la chaîne

Polypropylène est une synthèse, moléculaire plus linéaire de masse élevée de propène. En 1955 Natta et al. Suffisamment grandes quantités préparées de PP pour isoler et caractériser divers stéréoisomères, ce qui a conduit à une nouvelle nomenclature descriptive encore Utilisé aujourd'hui. Intérêt commercial réside principalement dans le polypropylène hautement cristallin. Avec ses autres modifications par copolymérisation.

En polypropylène parfaitement isostatique, chaque unité monomère dans la chaîne est disposée dans un ensemble régulier Bandeaux-bêche, sans aucune ramification ou de 1, 3 ajouts. Ceci est le résultat de type matrice de contraintes par le catalyseur stéréospécifique hétérogène. Dans la pratique, une telle perfection est difficile à achever une erreur occasionnelle, une moyenne d'environ 0.3-1.5 par centaine de maillons de la chaîne se produit dans certains, mais pas également dans toutes les chaînes. La nature multisite du catalyseur solide est considérée comme responsable de ce comportement.

Solvay et $MgCl_2$ pris en charge les systèmes réduisent l'ampleur de ces erreurs, et avec eux la quantité de non cristalline (a tactique) polymère. Encore au stade de développement, les catalyseurs à site unique à base de métallocène (SSCS) produisent également des erreurs de stéréorégularité, mais ceux-ci semblent être répartis de manière plus uniforme le long des chaînes, quel que soit leur longueur. Ce qui contraste avec les catalyseurs multisite (MSC) pour lesquels mauvais placement varient en fréquence et en nombre. La tendance est ici pour la fraction de masse moléculaire élevée pour contenir moins de défauts, tandis que les chaînes courtes souffrent de perturbations excessives, qui conduisent à cristallinité réduite.

II.5.2. Inclusions rigides verticales

II.5.2.1. Principe de la méthode

Le principe du renforcement est illustré par la figure II.14. La charge appliquée en surface est transmise à un substratum rigide par l'intermédiaire de la combinaison d'un réseau d'inclusions rigides et d'un matelas de transfert de charge.

Le matelas de transfert de charge est disposé entre le sol compressible renforcé par les inclusions et l'ouvrage en surface. Sa fonction est de réduire et d'homogénéiser les tassements sous l'ouvrage en assurant le transfert des charges vers les têtes d'inclusion. Le matelas de transfert de charge est constitué de sol granulaire. Le tassement différentiel en base du matelas entre les inclusions rigides et le sol compressible induit du cisaillement dans le sol granulaire et donc la formation de voûtes qui assurent le transfert des charges vers les têtes d'inclusion, l'homogénéisation et la réduction des tassements en surface. La présence de ce matelas différencie cette technique de celle des pieux, car les inclusions sont désolidarisées de l'ouvrage en surface.

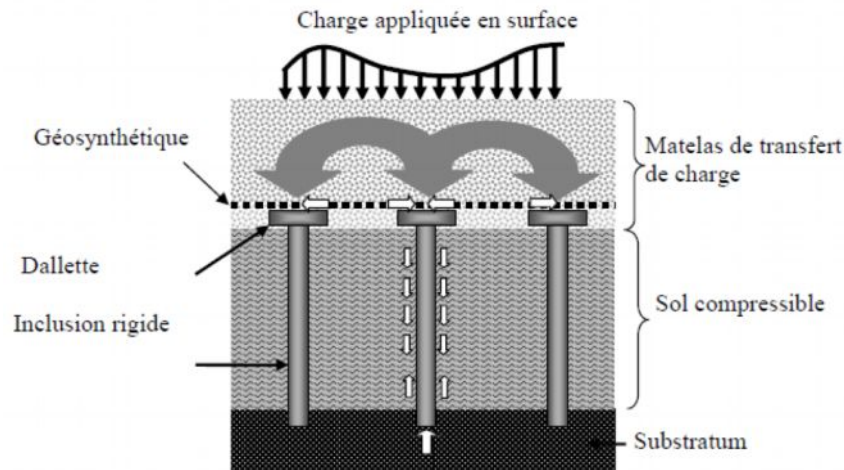


Figure II.14: Principe de la méthode.

II.5.2.2. Différents types des inclusions

De nombreux types d'inclusions rigides peuvent être envisagés suivant les propriétés mécaniques et la géométrie de la couche compressible. Les inclusions peuvent être préfabriquées ou construites in situ. Leur module de déformation varie entre 20MPa (Colonne de soil mixing) et 200GPa (pieu métallique).

Parmi les inclusions préfabriquées se retrouvent tous les types de pieux mis en place par battage ou fonçage (pieux bois, pieux métalliques, pieux en béton armé ou précontraint). L'avantage des pieux préfabriqués est qu'ils sont constitués d'un matériau manufacturé. Par contre leur mise en place peut être source de nuisances sonores ou vibratoires et dans certains cas le refoulement latéral du sol peut affecter les structures voisines.

Parmi les inclusions construites in situ on distingue essentiellement les pieux forés, les pieux battus tubés (pieux en béton armé), les pieux de type «Vibro Concrete Column » (VCC), les colonnes à module contrôlé (CMC, Liausu et Pezot, 2001), les colonnes par mélange d'un liant avec le sol (jet grouting, Lime Cement Columns, etc.).

II.5.2.3. Nappes de renforcement

Le renforcement en base du matelas de transfert de charge par des nappes horizontales est peu courant en France mais assez répandu dans de nombreux autres pays (Briançon et al. 2004). Les seules normes ou recommandations existantes dans le domaine préconisent son utilisation (BS8006, 1995; EGBEO, 2004). Lorsque qu'une seule nappe géosynthétique est disposée sur les têtes d'inclusion, elle contribue au renforcement par effet membrane. Lorsque plusieurs nappes sont mises en oeuvre au sein du matelas granulaire, à l'effet membrane se rajoute un effet de rigidification du matelas (Guido et al. 1987; Bell et al. 1994; Collin, 2004). La figure II.15 présente les différentes dispositions de la nappe dans le matelas. Les nappes de renforcement sont généralement constituées soit de géotextiles, soit de géogrilles qui permettent l'enchevêtrement du sol dans la nappe. Dans certains cas, le matelas est également renforcé par un treillis soudé (Combarieu et al. 1994).

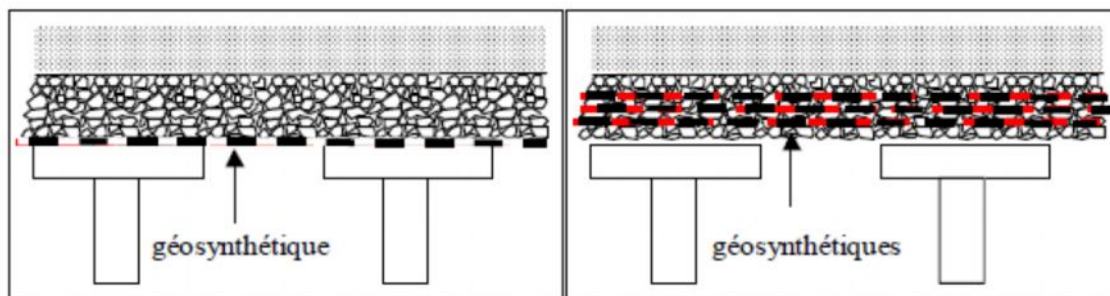


Figure II.15: Différentes dispositions du renforcement horizontal dans le matelas de transfert de charge, d'après (Briançon et al., 2004).

II.6. Conclusion

Les différentes techniques pour l'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde afin de prévenir les risques sismiques ou pour consolider des terrains à la structure hétérogène, inconstructibles en l'état. L'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce but, différentes techniques ont été développées et sans cesse améliorées depuis deux décennies. Grâce à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont sans cesse maintenues à la

pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement mis en oeuvre. Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins. Dans le chapitre suivant on va aborder l'effet de quelques ajouts sur l'amélioration du comportement des sols.