

### 3.1. Introduction

Une large variété des méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques les plus appropriées sont d'habitude classées comme les méthodes mécaniques, hydromécaniques thermiques et chimiques. Les méthodes thermiques concernent surtout la stabilisation par congélation ou par chauffage. Ce sont donc des méthodes d'amélioration temporaires, par contre les méthodes mécaniques et chimiques sont permanentes. Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que, les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnements.

### 3.2. Méthodes mécaniques

#### 3.2.1 Compactage de surface

Le compactage ou le tassement des sols est l'augmentation de leur densité apparente résultant de l'application d'une charge sur ces derniers. L'utilisation de cette méthode permet de réduire le volume d'air dans le sol, réduire la diffusion des gaz par asphyxie des racines, des vers de terre et de la vie dans le sol, réduire la circulation de l'eau dans le sol, augmenter l'énergie de l'unité motrice pour effectuer le travail de sol, décomposer lentement la matière organique. L'action du compactage se traduit par:

- Rapprochement des grains du sol entre eux (tassement T);
- Une expulsion d'air.

Le compactage de surface est utilisé pour une profondeur maximale d'environ 3m à 4m (figure 3.1).

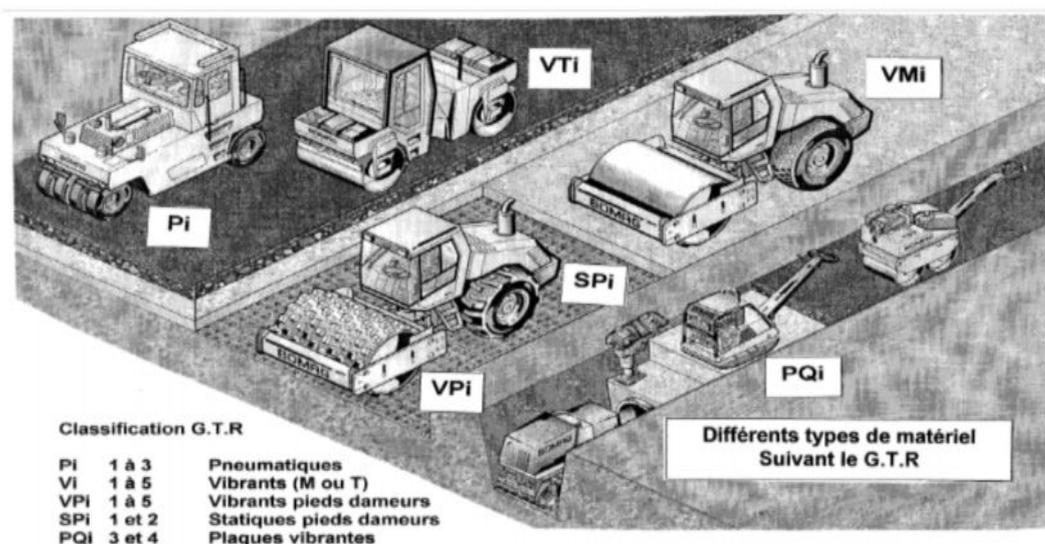


Figure 3.1: Compactage de surface; matériels utilisés

### 3.2.2. Compactage dynamique

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse en surface. Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulièrement intensif de manière à atteindre le plus rationnellement possible le but recherché. Le compactage dynamique est applicable dans tous les types de sols à comportement granulaire. Il s'applique particulièrement bien aux remblais hétérogènes inertes ainsi qu'aux terrains rapportés de composition variable, y compris lorsqu'ils contiennent des blocs. Le compactage dynamique peut s'appliquer aussi bien à des sols non saturés qu'à des sols situés sous la nappe (figure 3.2).



**Figure 3.2:** Chantier d'un compactage dynamique profond (Compactage dynamique à très haute énergie (4000 t.m) aéroport de Nice (1978)

### 3.2.3. Vibrocompactage

La pénétration du vibreur dans le sol jusqu'à la profondeur souhaitée sous l'effet des vibrations et du lançage à l'eau ou à l'air (compactage du sol in-situ sous l'effet des vibrations dans un domaine de profondeur de 3m à 65m avec une zone de traitement de 2m à 5.5m et une densité relative atteinte:  $D_r = 60\%$  à  $80\%$ ).

#### \* Remblaiement

Le compactage s'effectue avec remblaiement depuis la surface, ou simplement en laissant s'abaisser le niveau du sol en place

### \* Compactage

L'aiguille vibrante est remontée par passes de 50cm à 1m. Le sable ou le gravier en place descend vers la pointe du vibreur. Ce procédé consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol granulaire au moyen d'une aiguille vibrante. La densification du matériau provoquée par la vibration de l'aiguille, se traduit donc par l'affaissement du sol autour du vibreur (Lawton, 2004). L'application de cette méthode contribue à augmenter la capacité de portance, la réduction du tassement, l'augmentation de la résistance au cisaillement des sols de fondation, des remblais de barrages et enfin la réduction du potentiel de liquéfaction des sables lâches saturés et des limons.



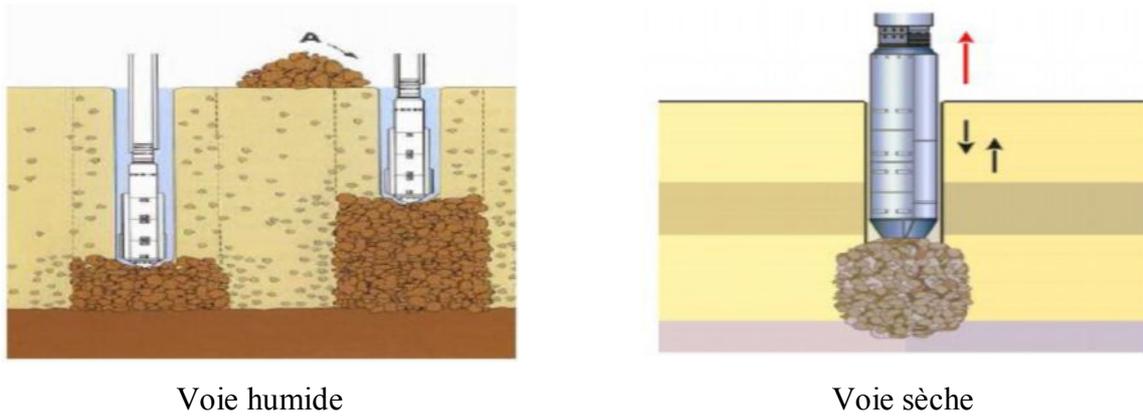
**Figure 3.3:** Vibrocompactage (Journée du 14 nombre 2012 : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques)

#### 3.2.4. Colonnes ballastées

Les colonnes renforcent et drainent le sol. Améliorer le sol encaissant est aussi un but. But principal pour la diminution du risque de liquéfaction. Domaine de profondeur: 3m à 30m, maille de traitement: 1.0m à 3.0m, diamètre de colonne: 0.6m à 1.5m. Pendant le traitement : enregistrements profondeur / intensité et consommation de ballast par niveau. Après: Essais de chargement, essais in-situ dans et entre colonnes.

#### \* Les avantages:

- Diminution de la sollicitation de cisaillement dans le sol;
- Effet bénéfique du drainage;
- Diminuer les tassements totaux et différentiels;
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant;
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.



**Figure 3.4:** Colonnes ballastées (Journée du 14 nombre 2012 : Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques)

### 3.3. Méthodes hydromécaniques

#### 3.3.1. Amélioration des conditions de drainage

La méthode consiste à placer des drains verticaux dans la couche sujette à la liquéfaction. Le plan d'implantation, le nombre et le diamètre de ces drains seront déterminés de façon qu'ils puissent être capables à dissiper la surpression dans les limites du temps de passage du séisme. Généralement on utilise comme matériaux de drainage le gravier, mais actuellement il est de plus remplacé par des grilles recouvertes par des géotextiles. La figure montre les résultats obtenus sur table vibrante par Watari et Fujiwara (1977). On note que pour un pouvoir drainant identique des drains et pour un même temps d'excitation, l'évolution maximale de la surpression interstitielle diminue avec le rapprochement des drains. Le développement de la pression interstitielle dépendait du nombre et de l'espacement des drains.

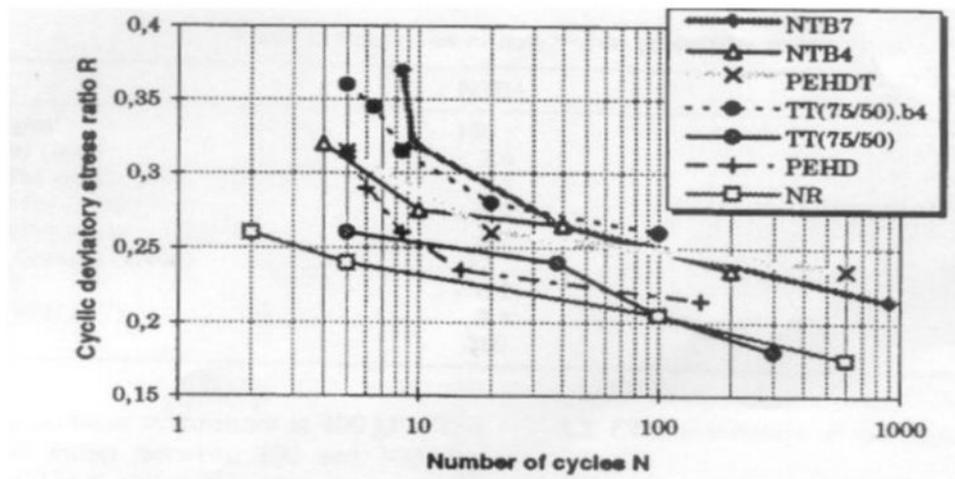
#### 3.3.2. Amélioration par Inclusions de géo synthétiques

Plusieurs auteurs ont étudiés l'influence de matériaux synthétiques sur la résistance à la liquéfaction (Vercueil et al 1997, Unnikrishan et al 2002, Boominathan et Sari 2002). Par leurs expériences, ils ont montré que l'apport du géo synthétiques à un effet significatif sur la résistance à la liquéfaction.

#### 3.3.3. Amélioration par inclusion des nappes de géotextile

Vercueil, Billet et Cordary (1997) ont étudié le comportement du sable d'Hostun Rf renforcé par des nappes de géotextiles. La figure 3.6 montre les résultats obtenus et met en évidence l'influence du renforcement sur la résistance à la liquéfaction. On note que pour des valeurs de  $N/l$  la finition de surface du géotextile joue un rôle déterminant dans le gain pour la résistance à la liquéfaction, après cinq cycles la résistance à liquéfaction coïncide pour les matériaux testés avec du PEHD et PEHDT (PEHD = polyéthylène avec surface lisse, PEHDT = polyéthylène de très grande densité avec

surface rugueuse); tandis que pour des valeurs  $N_l > 20$  les courbes de résistance à la liquéfaction se dispersent graduellement à la baisse. Pour les valeurs  $N_l < 20$ , le matériau renforcé par NTB7 (NTB = géotextile constitué de fibres polyester non tissé, TT = géotextile constitué de mono-filament polyester) et avec une meilleure compressibilité donne de bons résultats. Le géotextile NTB4 avec la même finition de surface et une compressibilité différente présente presque la même résistance à la liquéfaction que le NTB7 pour des valeurs de  $N_l > 20$  et une faible résistance pour  $N_l < 20$ . On note aussi que pour des valeurs de  $N_l$  (nombre de cycles) inférieur à 20, la compressibilité est un facteur déterminant dans l'amélioration de la résistance à la liquéfaction (figure 3.5).



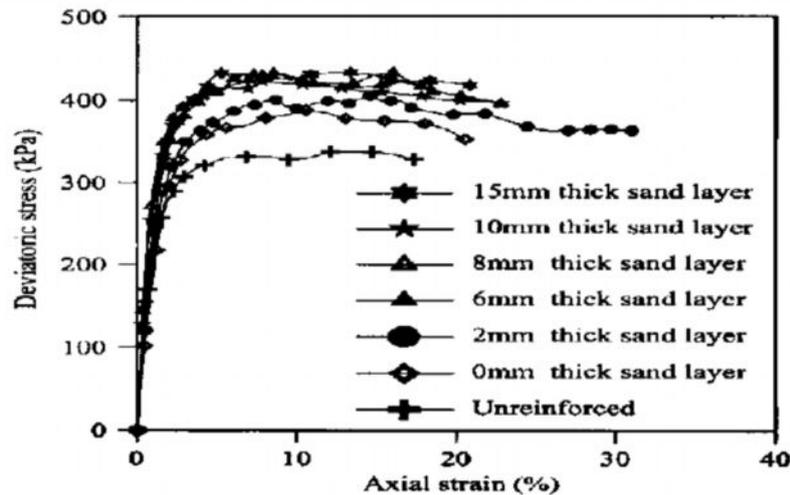
**Figure 3.5:** Influence du renforcement sur la résistance à la liquéfaction  
Vercueil et Cordary (1997)

### 3.3.4. Amélioration par couche sandwich

L'interaction entre le sol et le renforcement est plus importante dans le cas de la structure des sols renforcés soumis aux charges de cycle (chemin de fer, routes, digue etc.). La résistance des sols sous chargement cyclique dépend d'un certain nombre de facteurs comme le nombre de cycles, la fréquence de chargement et la magnitude de la contrainte cyclique (Seed et Lee, 1966; Diyaljee et Raymond 1982, Krishnaswamy et Isaac 1994 et 1995), ces derniers ont rapporté que le renforcement aide à réduire le potentiel de liquéfaction des sols. Plusieurs études ont été réalisées à l'appareil triaxial en variant le type de renforcement, les couches sandwichs (sandwich layer), magnitude de la pression de cellule, nombre et renforcement des couches, la teneur en eau etc.

Unnikrishnan, Rajagopal et Krishnaswamy (2002) ont étudié l'influence du renforcement par la technique de couche sandwich (couche de sable de chaque côté du géotextile) sur un sol argileux du nord de Chennai city (Inde). Le sable provient des couches de sable de la rivière Ennore du même périmètre que l'argile. Des échantillons de diamètre 38 et 100mm avec des hauteurs respectives de 76 et 200mm ont été testés à l'appareil triaxial en cisaillement monotone sur chemin UU (non

drainé non consolidé) avec une vitesse de déformation axiale constante de 1.5%/min; simulant le comportement d'un sol sujet à un chargement rapide après construction. Trois types de renforcement ont été utilisés dans cette étude, à savoir géotextile tissé et non tissé, et micro-grille. La micro-grille est un écran de plastique très fin avec de petites ouvertures de 0.5mm, très approprié pour les essais à petite échelle.

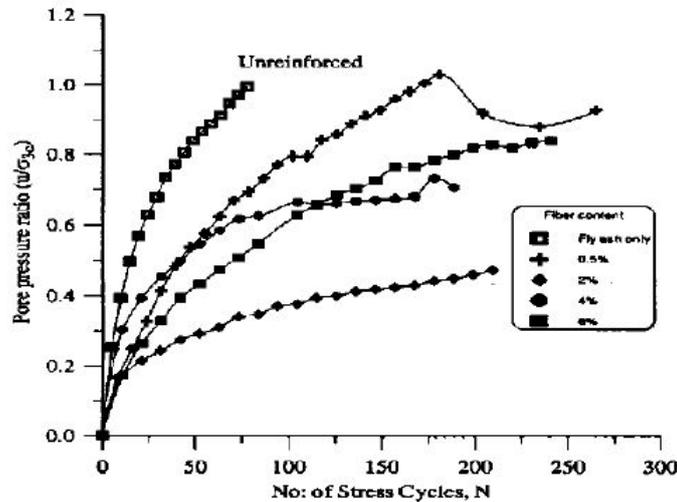


**Figure 3.6:** Influence d'épaisseurs de couches de sable sur le déviateur ( $\sigma_{3c} = 110\text{kPa}$ , renforcement avec du géotextile tissé) Vercueil et al. (1997)

### 3.3.5. Amélioration par inclusion de fibres et mailles géosynthétiques

Le renforcement des sols par la technique d'inclusion de fibres synthétiques aléatoirement est utilisé dans les structures de soutènement, digues etc. Divers types d'éléments répartis aléatoirement, comme éléments de mailles polymères, fibres métalliques, fibres synthétiques sont utilisés pour le renforcement des sols. Cependant, l'étude du comportement des sols renforcés par la technique aléatoire d'inclusion des éléments synthétiques sous chargement cyclique est très limitée dans la littérature. Boominathan et Hari 2002 ont étudié le comportement du matériau " Fly Ash" renforcé par des fibres et mailles géosynthétiques. Le matériau de renforcement a été utilisé avec une proportion d'aspect AR (Aspect ratio) de 20 pour les fibres ( $AR = l/L$ ) et 10 pour les mailles ( $AR = l/L$ ). Les essais ont été réalisés sur des échantillons de densité  $D_r = 50\%$  et une teneur en fibres synthétiques de 0.5 à 2% du poids sec du FLY ASH. On note que la pression interstitielle diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Il est à noter qu'avec une plus grande teneur en fibre l'homogénéité de l'échantillon n'est pas la même à cause de la ségrégation entre les particules du FLY ASH et le renforcement. On observe que l'effet sur la résistance à la liquéfaction est très significatif, l'échantillon renforcé par des mailles ( $AR = 20$ ) donne une faible valeur de pression interstitielle que l'échantillon renforcé par avec un  $AR = 10$  qui montre une meilleure résistance à la

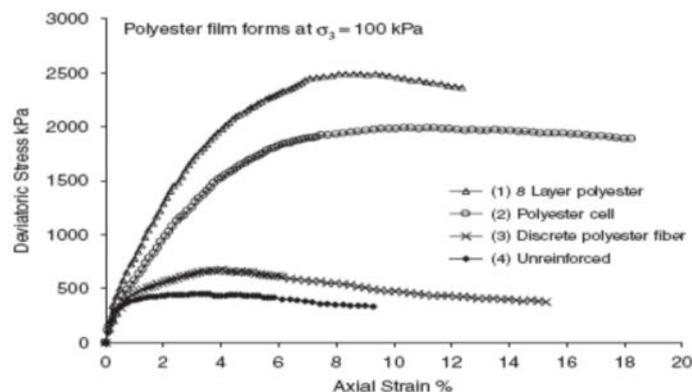
liquéfaction. On note que le renforcement par mailles indique une supériorité sur le renforcement par fibres sur la résistance à la liquéfaction. On peut conclure que l'inclusion de mailles synthétiques dissipe facilement la pression interstitielle et fournit un meilleur emboîtement dans le matériau (figure 3.7).



**Figure 3.7:** Influence de la teneur de fibres sur la résistance à la liquéfaction  
(Unnikrishnan et al. 2002)

### 3.3.6. Renforcement géo synthétiques (polyester)

D'après Madhavi et al 2006, ont étudié l'influence du renforcement du sol par des différentes formes de géo synthétiques. On note que la présence du polyester améliore d'une manière considérable la résistance du sable. L'échantillon renforcé par huit couches de polyester donne une meilleure valeur de résistance (2500kPa) que les autres échantillons. On observe l'utilisation du sable renforcé par un film polyester présenté une résistance plus élevée par rapport l'échantillon renforcé par géotextiles et géogrilles (figure 3.8).



**Figure 3.8:** Evolution de la résistance du sable renforcé par des différentes formes de polyester  
(Madhavi et al. 2006)

### 3.3.7. Le rabattement

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

- Le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et sur creusé d'environ 0.5 à 1m par rapport à ce dernier;
- Le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée, adaptée au terrain, à l'eau claire, à la boue autodestructrice ou tubés.

## 3.4. Méthodes thermiques

### 3.4.1. Déshydratation

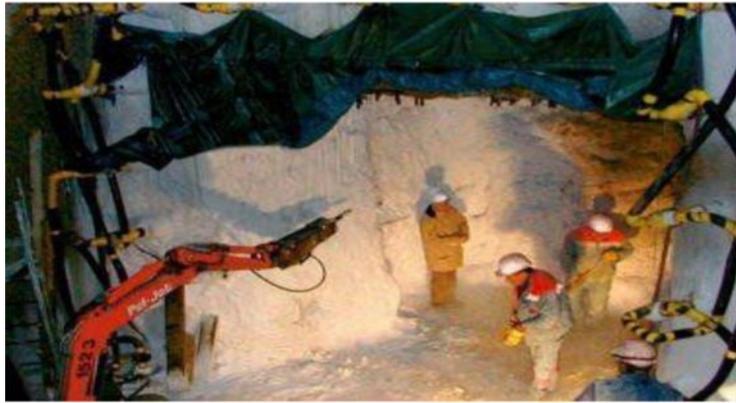
La déshydratation par la chaleur est très une technique rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

### 3.4.2. Amélioration temporaire par congélation

Cette technique permet d'aller excaver des terrains dans des sols saturés en eau (dans une nappe aquifère ou même sous une rivière ou un fleuve). La congélation des terrains aquifères instables à l'azote liquide ou à la saumure est un procédé ancien, à caractère provisoire, et permet une consolidation et un étanchement temporaire du sol. La première est reconnue sûre, rapide mais reste très onéreuse de par la quantité d'azote liquide nécessaire (figure 3.9).

Le recours à ce procédé nécessite de bien connaître les transports thermiques liés à la congélation et de bien maîtriser la technologie de mise en oeuvre. De plus, dans certains cas, cette technique peut permettre de faire des économies substantielles dans le cadre d'une bonne mise en oeuvre et d'un contrôle rigoureux des opérations.

La congélation fut employée dès la fin du XIXe siècle avec de la saumure puis plus tardivement avec de l'azote liquide, plus onéreux.



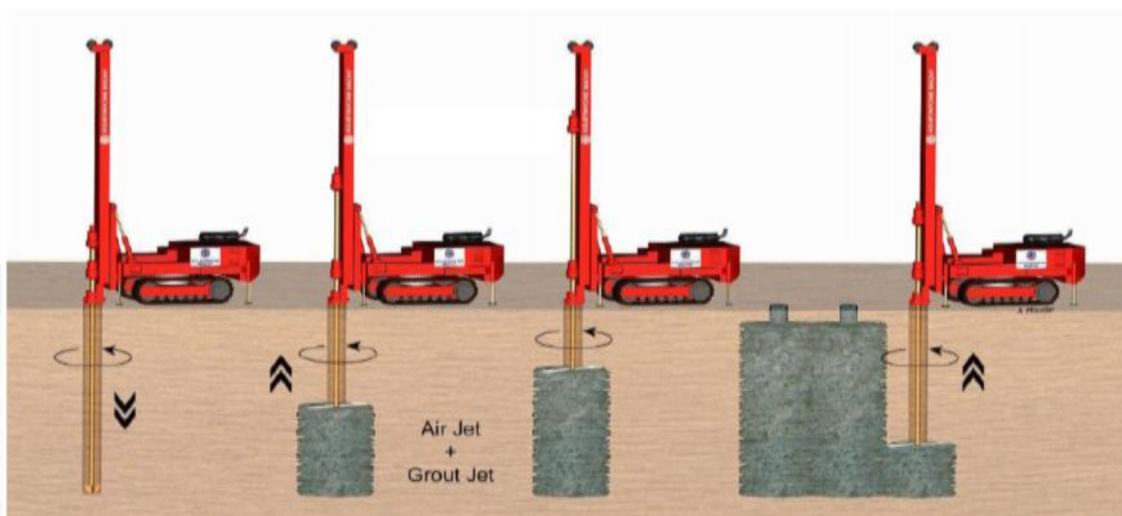
**Figure 3.9:** Amélioration par congélation (Sotraisol fondations)

### 3.5. Méthodes chimiques

#### 3.5.1. Amélioration des sols par injection

##### 3.5.1.1. Jet-Grouting

Le procédé Jet Grouting (figure 3.10) s'applique aux terrains difficilement injectables par les procédés classiques. Il correspond à un traitement de sol dans la masse par mise en œuvre sous haute pression d'un jet de coulis à base de ciment réalisant in-situ un mélange sol-ciment. Le terrain est déstructuré par la pression du jet et devient un mélange sol-coulis aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées. Le terrain est déstructuré par la pression du jet et devient un mélange sol-coulis aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées. L'atelier se compose d'une partie fixe (stockage du ciment, centrale de fabrication du coulis, pompe haute pression) reliée par une conduite à une foreuse mobile sur chenilles. La tête de forage est munie de buses d'injection spécifiquement choisies en fonction des terrains rencontrés et des caractéristiques du résultat recherché.

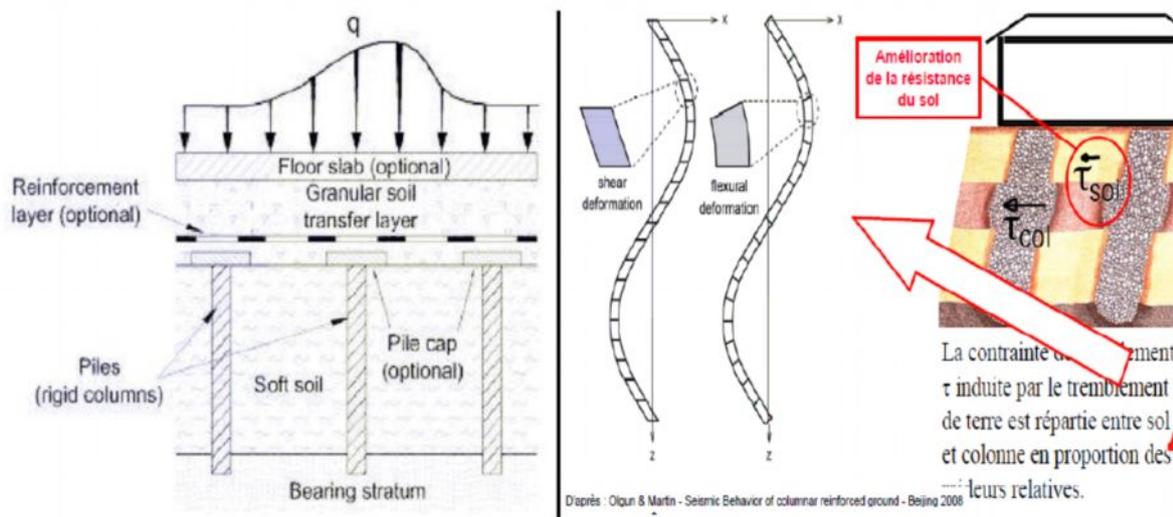


**Figure 3.10:** Technique de jet-Grouting (Journée du 14 novembre 2012: Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques)

### 3.5.2. Amélioration par injection (rigides et souples)

Utilisée pour le traitement des terrains sableux, limoneux ou argileux, humides ou saturés, la technique d'injection solide ou de densification statique horizontale consiste à injecter sous pression un mortier très visqueux suivant un quadrillage spécifique établi en fonction de la structure du terrain (figure 3.11).

Technique éprouvée, économique et souple, elle permet en outre de réduire le potentiel de liquéfaction en cas de séisme. Elle peut être utilisée sous des constructions existantes.



**Figure 3.11:** Inclusion rigide et inclusion souple (Journée du 14 nombre 2012: Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques)

### 3.5.3. Amélioration des sols par ajout 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 réaction d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et réaction pouzzolanique (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en oeuvre, fonction spécificités du terrain:

- Utilisation d'addition (chaux, ciment, minéraux...);
- Dosage à respecter;
- Epaisseur du sol à traiter.

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en oeuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

- La chaux;
- Le ciment;
- Les ajouts cimentaires (laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes et fumée de silice...).

### **3.5.3.1. Utilisation de la chaux**

Le traitement à la chaux des sols trop humides et/ou trop plastiques, tels les sols argileux ou limoneux, est une solution souvent préconisée pour rendre les terrassements réalisables et stabiliser les sols (figure 3.12).

Lors du traitement de ceux-ci à la chaux deux réactions différentes se produisent:

- Une réaction directe et rapide responsable des effets immédiats produits par la chaux (amélioration du sol). La réaction d'hydratation de la chaux vive avec l'eau présente dans les sols diminue la teneur en eau de ceux-ci. Les raisons en sont multiples: la réaction chimique d'hydratation fixe un volume d'eau; cette réaction exothermique dégage de la chaleur, ce qui réchauffe le sol et entraîne l'évaporation de l'eau et enfin l'aération du sol qui se produit lors du malaxage facilite l'évaporation et contribue à réduire le taux d'humidité. La chaux hydratée peut alors réagir avec les minéraux argileux, provoquant une floculation des argiles. Cette floculation augmente l'aptitude au compactage du sol.
- Une réaction lente, qui durcit progressivement le mélange sol-chaux compacté, responsable des effets à long terme (stabilisation du sol). L'alcalinité de la chaux augmente le pH du sol, ce qui libère les aluminates et les silicates. Ces derniers peuvent alors réagir avec le calcium apporté par la chaux et l'eau présente dans le sol. Dès ce moment débute le durcissement du sol, sa stabilisation. Le résultat final, principalement la portance du sol, dépend de la nature et de la réactivité des minéraux argileux présents dans le sol ainsi que de la quantité de chaux ajoutée. Par ailleurs, la réussite de la stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que le temps.



Figure 3.12: Traitement à la chaux (Projet Lhoist-Chanler Pilote)

### 3.5.3.2. Utilisation du ciment

Le ciment portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment portland comme stabilisants, le ciment portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Le ciment portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse (tableau 3.1). Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes ; deux phases de silice calcique et deux phases d'alumine calcique. Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium et l'hydrate de silice calcique. Le premier composant fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et son agglomération tandis que le deuxième composant quant à lui apporte la résistance ainsi que la structure au sol traité.

Name of compound	Chemical formula	Abbreviation
Tricalcium silicate	$3CaO.SiO_2$	C3S
Dicalcium silicate	$2CaO.SiO_2$	C2S
Tricalcium aluminate	$3CaO.Al_2O_3$	C3A
Terracalciumaluminoferrite	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C4AF

Tableau 3.1: Composants principaux du ciment portland [Lawton 2.1]

Lorsque le ciment portland est mélangé à l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile (figure 3.13).



**Figure 3.13:** Chantier de traitement du sol au ciment

Le ciment portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux.

#### **3.5.4. Utilisation des ajouts cimentaires**

Parmi les ajouts cimentaires les plus utilisés il y a les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice les cendres volcaniques, et le calcaire. Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont poussé les chercheurs à trouver d'autres types de liants dans le but d'améliorer les sols instables à faible coût tout en respectant l'environnement. Les cendres volantes sont intimement liées quant à leur processus de stabilisation. Elles sont souvent utilisées conjointement avec la chaux dans les travaux de stabilisation. Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir la cendre volante et la cendre de base.

Les cendres basses relativement grossières se récupèrent en bas de la fournaise tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique.

Les cendres volantes ont une composition très semblable à celle du ciment. Comme les cendres volcaniques, elles présentent des propriétés pouzzolaniques car elles fixent lentement la chaux présente dans le mélange pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés

hydraulique. Elles peuvent être siliceuses ou calciques. Selon leur teneur en chaux libre, les cendres volantes se comportent différemment en présence d'eau. Il existe deux classes de cendre volante à savoir la cendre silico-alumineuse (classe F) et la cendre sulfo-calcique (classe C). Le tableau 3.2 indique la composition chimique des deux classes en comparaison avec le ciment portland (Lav et al. 1997).

Composés chimiques	classe F silico-alumineuse(%)	Classe C Sulfo-calcique(%)	Ciment portland (%)
SiO <sub>2</sub>	55	29	23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	133	4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	9	4
CaO(chaux)	9	41	65
MgO	2	1	2
SO <sub>3</sub>	1	7	2

**Tableau 3.2:** Composition chimique en pourcentage des cendres volantes et du ciment portland (Lav et al. 1997).

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il renferme principalement de la chaux, de la silice et de l'alumine. Le laitier est le constituant primaire le plus utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques routiers. Les liants à base de laitier sont excellents pour le traitement des sols et pour la stabilisation des matériaux de remblai.

La plupart des sols peuvent être traités avec un mélange chaux-cendres volant. L'approche générale du dosage du mélange consiste à ajouter suffisamment de cendres volantes afin de bien remplir les vides du mélange ainsi que d'y apporter une densité maximale.

L'étape suivante consiste à ajouter suffisamment de chaux permettant de favoriser les réactions pouzzolanique entre la chaux et les pouzzolaniques disponibles dans les cendres volantes.

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquence, tout dépend du type des sols, d'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule. Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air mais également dans l'eau. Avec un bon dosage, l'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement.

En conséquence, grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, la chaux et les cendres volantes peuvent continuer à augmenter la résistance mécanique d'un sol pendant plusieurs années. Il est important de noter que les cendres volantes peuvent se comporter différemment en raison de leur teneur en chaux

### **3.5. Conclusion**

Ce chapitre comporte les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols. Ces méthodes sont coûteuses et demandent un savoir-faire élevé ce qui n'est toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés.

Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à Algérien une importante croissance. Aisée à mettre en oeuvre, économique et efficace, elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Les ajouts cimentaires sont produits en Algérie en grandes quantités et à faible coût qui laissent prévoir que cette technique présente des considérations économiques acceptables.

Dans les chapitres suivants, on va effectuer des essais de cisaillement au laboratoire, afin de tester l'effet de types d'ajouts sur le comportement mécanique des sols. Ces ajouts sont moins onéreux donc rentables économiquement et propre d'un point de vue environnemental. Ce sont les fines naturelles tirées du sol lui même.