

## II.1. Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation.

Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

## II.2. Amélioration de sol

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de:

- Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement,
- Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

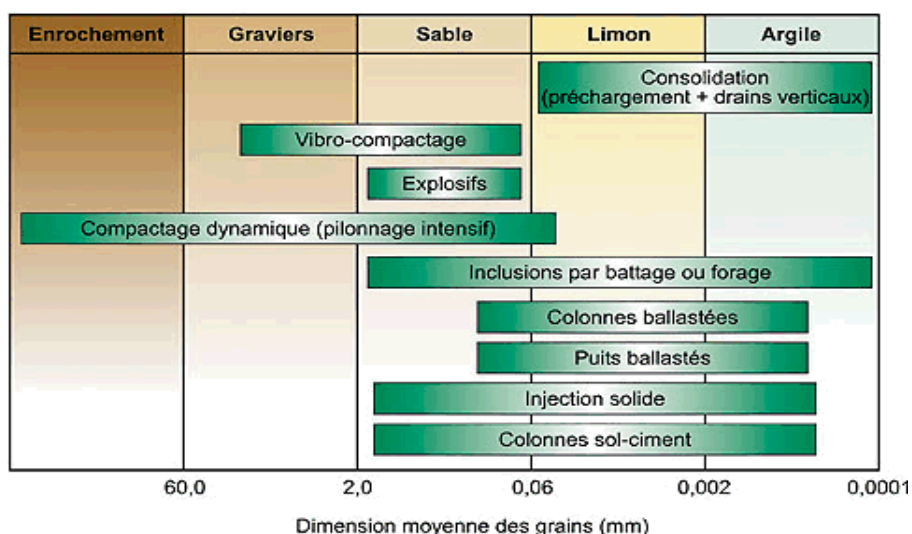


Figure II.1: Techniques d'amélioration des sols

### II.3. Définition des sols

Dans le cadre de l'amélioration des sols nous nous limiterons à l'étude des sols ayant un comportement mécanique ne pouvant pas répondre aux besoins d'un projet du génie civil.

#### II.3.1. Définition géotechnique des sols

Nous schématiserons les sols comme étant composé de quatre phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelle: eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse. La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes.

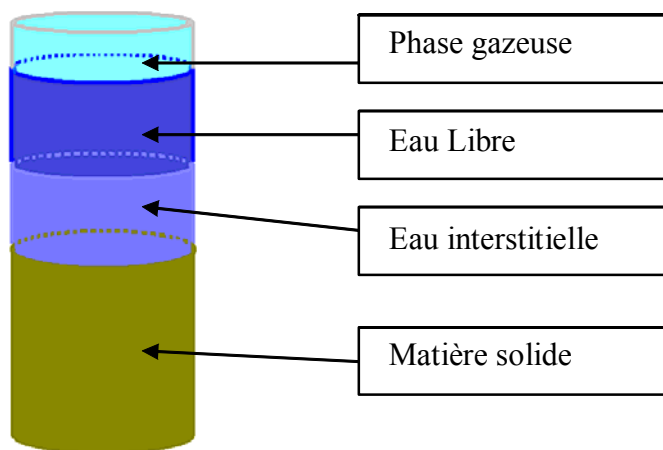


Figure II .2: Paramètres caractéristiques des sols

#### II.3.2. Phase solide

Trois types de sols ressortent comme étant les plus souvent rencontrés sur un chantier :

Sols grenus

Sols fins

Sols organiques

##### II.3.2.1. Classification des sols: sols grenus, sols fins

Première classification: limite adopté:  $20\mu\text{m}$

Sols grenus $d > 20\mu\text{m}$	Sols fins $d < 20\mu\text{m}$
Cailloux, grave, sable	Limon, argile

- Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, moraines  $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$ .

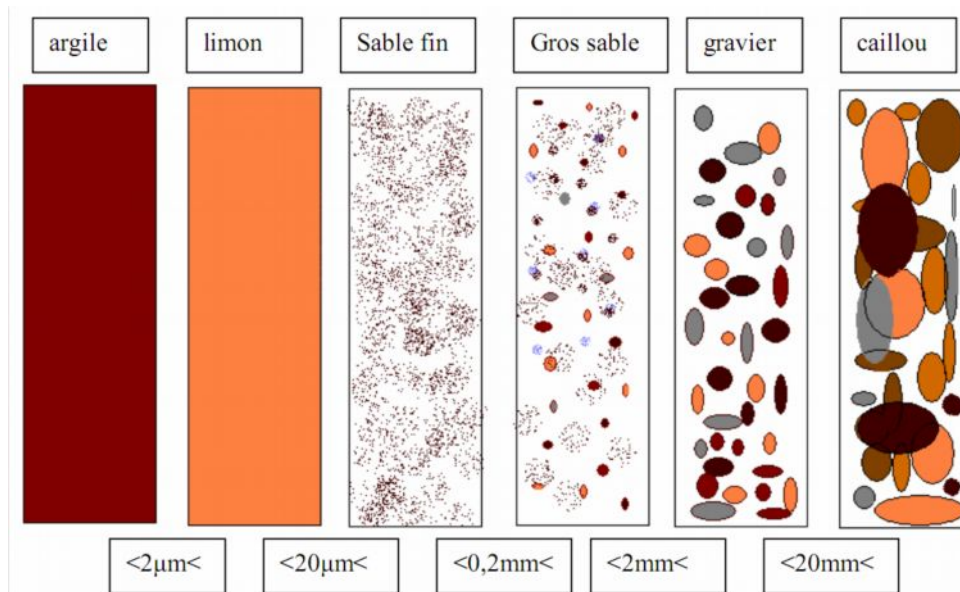
- Grave (fragment de roche mère): sédiments détritiques généralement formés de plusieurs

minéraux  $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$ .

- Sables (fragment de roche mère): sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral :  $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$ .

- Limons (fragment de roche mère): mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses:  $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$ .

- Les argiles (altération physico-chimique de certains minéraux des roches): particules  $< 2\mu\text{m}$ .



**Figure II.3:** Classification des sols

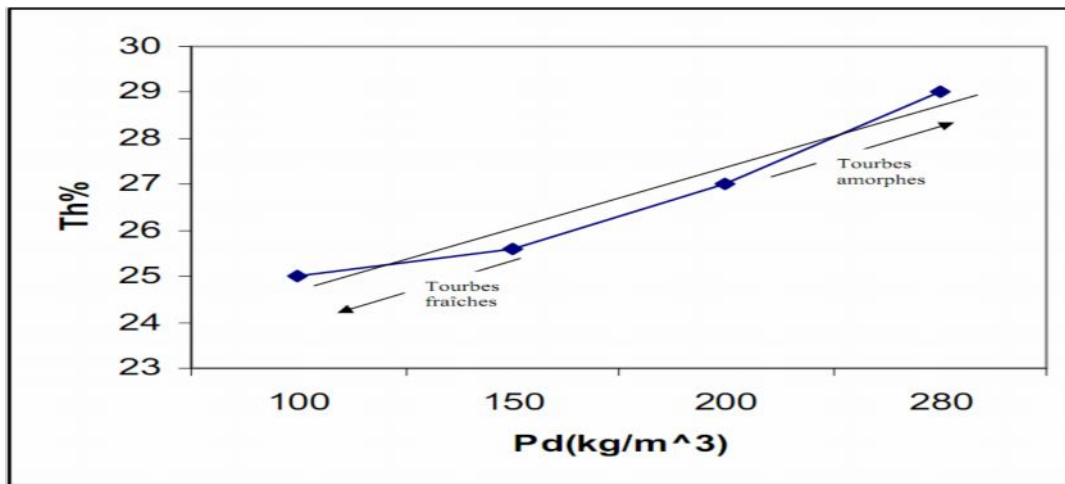
### II.3.2.2. Sols organiques

Les vases et les tourbes renferment deux types de matières organiques:

- Matières organiques libres: débris végétaux et résidus animaux;
- Matières organiques liées: colloïdes humiques fixés à la phase minérale.

La transformation de la matière organique fraîche en humus colloïdale est l'humification. La transformation des tourbes franches en tourbe amorphe est la tourbification; suivant les degrés de tourbification les propriétés physico-chimiques seront différentes.

Le complexe argilo humique est l'association intime de la phase argileuse et des matières humiques. La matière organique a un rôle important dans le comportement des sols. Si la matière organique est un peu évoluée et abondante (tourbe fraîche) sa texture retient beaucoup d'eau et est très compressible.



**Figure II.4:** La masse volumique de la tourbe et fonction de la densité des matières solides la composant.

Une tourbe amorphe nécessitera un traitement plus long pour obtenir de cette dernière un comportement mécanique optimal du fait des pressions interstitiel plus important. Cependant après traitement sa résistance au fluage est plus importante qu'une tourbe dite fraîche après traitement.

### II.3.3. Interprétation

Les caractéristiques mécaniques des sols sont fonction de la concentration des différentes phases. Donc après traitement les sols dit grenus dans un meilleur comportement mécanique, les ordres de grandeur suivants sont souvent rencontrés:

- Tourbe de 0.2 à 0.5 MPa;
- Argile molle (récente) de 1 à 5 MPa;
- Argile raide de 10 à 50 MPa;
- Sable lâche de 5 à 20 MPa;
- Sable dense de 100 à 200 MPa.

## II.4. Différentes méthodes

### II.4.1. Préchargement

Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement.

Le préchargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir

l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux. Préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage

### II.4.1.1. Principe

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive  $P_f$  augmentée éventuellement d'une surcharge  $p$  qui assure tout ou partie des effets suivants:

- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants;
- Augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes.

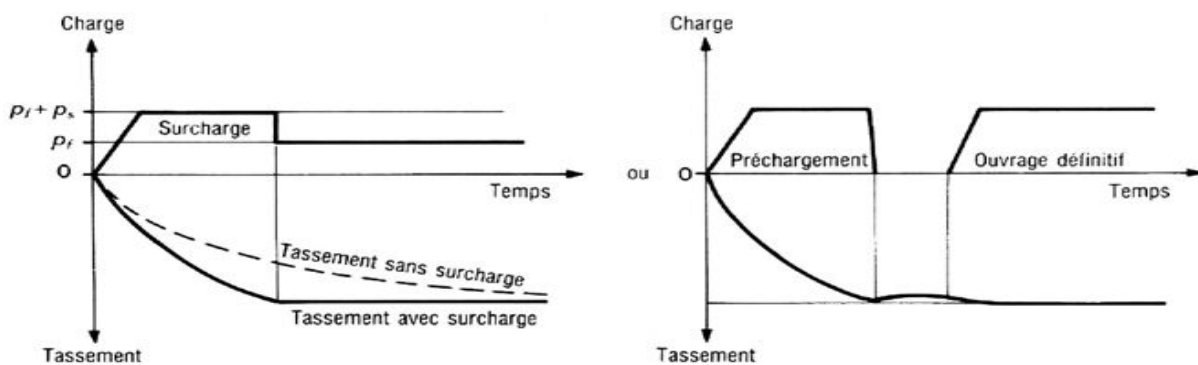


Figure II.5: Principe du préchargement pour le contrôle des tassements

### II.4.1.2. Surcharge en terre.

Lorsqu'un projet est déterminé, on met en place sur le terrain un volume de remblai correspondant à la future charge de l'ouvrage. Sur des sols saturés à très faible perméabilité, ce procédé va permettre l'évacuation de l'eau interstitielle du terrain. La qualité du tassement est directement proportionnelle à la durée du préchargement. De plus, la lenteur des phénomènes permet le déchargement du terrain pendant la construction sans risque de gonflement et de retour à l'état initial du terrain (phénomènes élastiques). Lors de la mise en place de ce procédé, une couche de sable est préalablement installée pour épouser les déformations du sol sous-jacent et contribue à l'évacuation de l'eau qui peut arriver à la surface.

Sur des sols très peu perméables, on peut associer le préchargement à un réseau de drains verticaux afin de faciliter l'évacuation de l'eau. Avec un repère préalablement fixé, on mesure régulièrement

le tassement du sol et, lorsqu'il a atteint une valeur considérée acceptable, on peut décharger et exécuter la construction des fondations superficielles. En général, si la hauteur du mauvais terrain dépasse 5 mètres, on prévoit après le chargement un système de fondation en radier car il reste des risques de tassement différentiels.

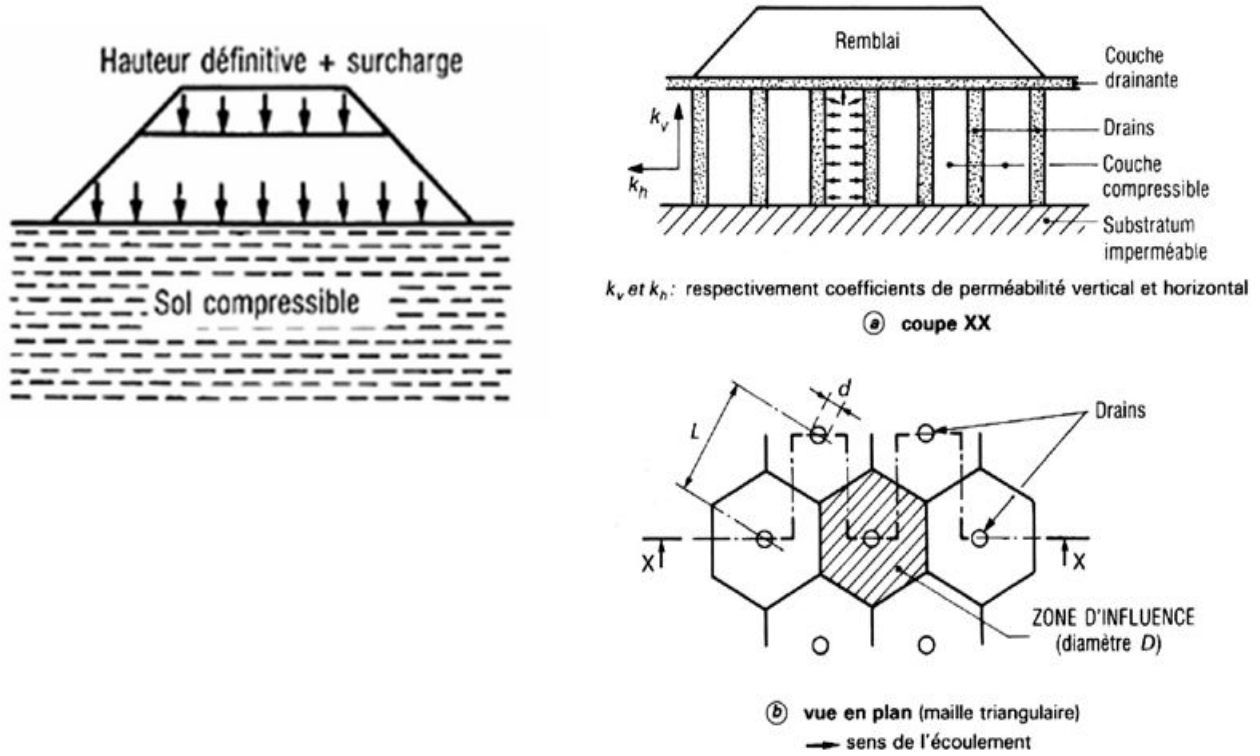


Figure II.6: Principe de la surcharge en terre

### II.4.1.3. Consolidation atmosphérique

C'est une variante du préchargement par du remblai. Cette méthode est de type isotrope. Elle permet une amélioration des caractéristiques du sol et la rupture et le fluage latéral sont impossibles. Le terrain est recouvert par une membrane étanche sous laquelle on fait le vide : le sol est ainsi chargé par la pression atmosphérique. Ce système est toujours couplé à un réseau de drainage vertical et parfois horizontal.

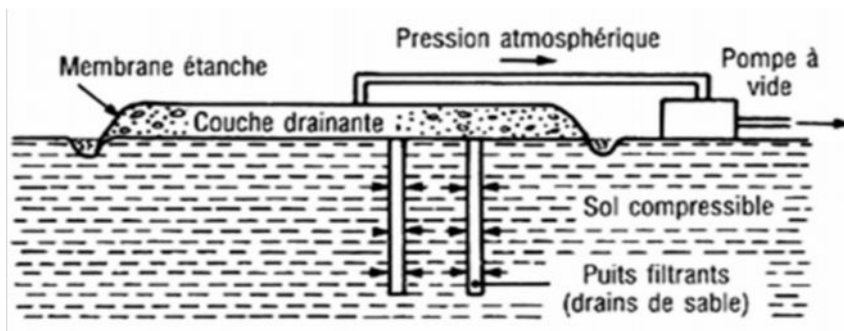


Figure II.7: Consolidation atmosphérique

#### II.4.1.4. L'inondation

Une digue en terre est édifée autour de la zone à surcharger et le bassin ainsi créé est étanché par une membrane souple (élastomère ou plastique armé) puis rempli d'eau. Ce système nécessite une hauteur d'eau deux fois supérieure à la hauteur de remblai qui aurait été nécessaire, c'est pourquoi cette méthode est intéressante que si l'eau est gratuite et à faible distance (eau de mer par exemple)

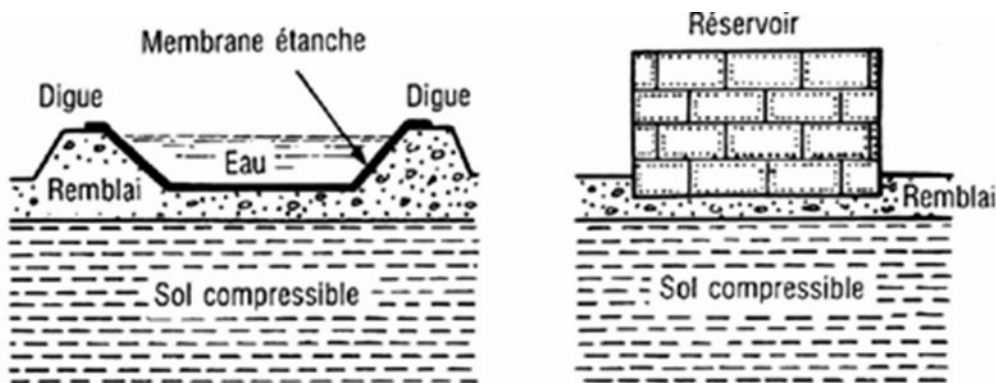


Figure II.8: Principe inondation de terre

#### II.4.1.5. Paramètre d'exécution.

Lors de l'exécution du projet après un préchargement, il faut tenir compte de la décompression des terrains entre les points d'appuis de l'édifice en intégrant, par exemple, des petits vides sanitaires (hauteur décimétrique).

Pour tous les travaux de chargement dont la durée est mensuelle, il faut prendre des précautions avec le mouvement annuel des nappes. La qualité du tassement sera différente en fonction de la hauteur du niveau piézométrique.

Le contrôle de l'amélioration du sol est réalisé en général au moyen d'essais au pénétromètre ou au pressiomètre régulièrement répartis sur le site, et comparés à des essais réalisés avant traitement dans les mêmes zones. On peut aussi contrôler l'augmentation de la densité du sol en réalisant des diagraphies.

#### II.4.2. Géotextile

Si l'utilisation des ouates polyester, de coton ou de laine et celle des feutres et aiguilletés est courante, le recours aux propriétés du géotextile pour les infrastructures (consolidation des routes, pistes d'atterrissage, barrages, lacs et tunnels) appartient aux techniques d'avant garde. En effet le renforcement mécanique des sols par ce procédé est très ressenti.

Des résultats prometteurs donnent lieu à des études approfondies de ce système. En effet, il ressort que les géotextiles améliorent de manière significative le comportement mécanique des sols meubles.

Du fait de leur capacité à se déformer et leur grande résistance mécanique, il est possible d'associer le comportement de certains sols à celui des tissus pour obtenir un sol au comportement spécifique.

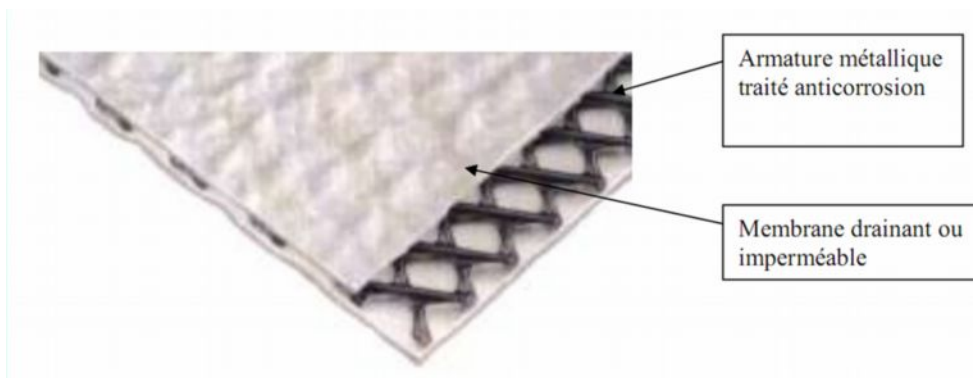
#### II.4.2.1. Les caractéristiques

Le géotextile hydraulique et mécanique assure :

- Une dissipation plus rapide des variations de pressions.
- Une meilleure mise en œuvre des matériaux granulaires.
- Une économie sur le volume des enrochements ou du remblai hydraulique.
- Une stabilisation accrue de la fondation des ouvrages.
- Une protection contre la contamination des sols en place.
- Un drainage des eaux interstitielles.

#### II.4.2.2. Mécanique

Le géotextile du type mécanique peut être assimilé à un matériau polymérique armé. L'armature peut être de différents types à fin d'attribuer des caractéristiques mécaniques adaptées aux différentes mises en œuvre. Les armatures peuvent être caractérisées par leur maillage ainsi que par le type d'alliage employé.



**Figure II.9:** Géotextile du type mécanique

La mise en œuvre des géotextiles mécaniques couvre un large domaine du génie civil :

##### II.4.2.2.1. Travaux routiers

- Empêche la contamination de la couche non gélive par le sol en place gélif.
- Permet un meilleur compactage et des économies de matériaux d'apport.
- Ecran filtrant et anticontaminant.



- Evite l'interpénétration du sol naturel avec les agrégats.
- Conserve intégralement les propriétés des matériaux d'apport.
- Permet, en cours d'exécution du chantier, de circuler sur la couche de fondation en la maintenant exempte de toute contamination.



**Figure II.10:** Géotextile sur les travaux routiers

#### II.4.2.2.2. Terrassements généraux

Permet de réaliser, sur tous terrains sensibles à l'eau (argiles, limon) ou marécageux (vase, tourbe), des travaux de terrassement dans des conditions optimales.



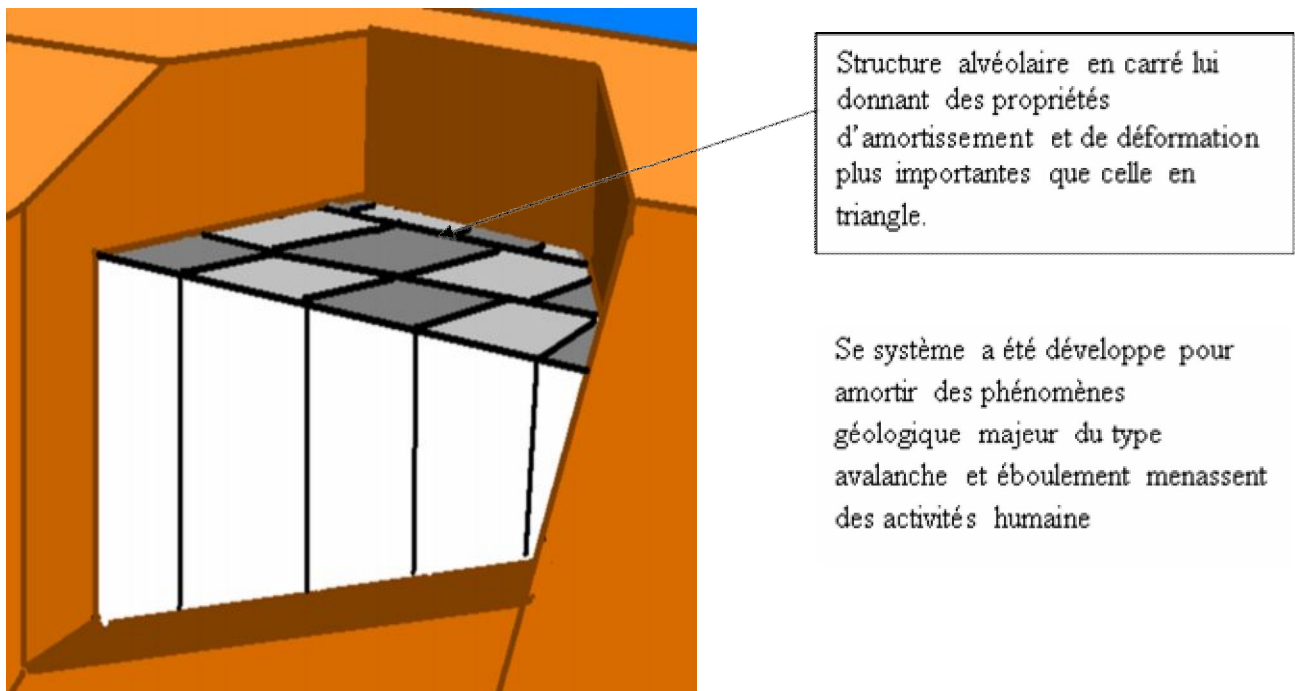
**Figure II.11:** Géotextile sur les travaux de terrassement

- Gain de temps; pas de décapage préalable du sol naturel.
- Facilité de mise en œuvre: simple déroulement des nappes à l'avancement.
- Economie de matériaux granulaires.
- Diminution de l'amplitude des tassements différentiels.
- Accélération de la vitesse de consolidation des remblais.

- Empêche la contamination par le sol en place.
- N'empêche pas le tassement global.

L'utilisation des géotextiles dans le développement de remblais a été utilisée plus tardivement, cependant les aspects de cette dernière donne maintenant lieu a des applications de plus en plus nombreuse et prometteuses. La déformabilité et la grande résistance des nappes de géotextile s'adaptent en effet particulièrement bien aux propriétés des sols meubles. Les méthodes de dimensionnement des ouvrages ainsi renforcés sont nonobstant loin d'être parfait et des efforts de recherches importants sont encore à réaliser. Cependant il ressort une technique de renforcement armé au géotextile des remblais comme suivant:

Une structure alvéolaire permet de donner des caractéristiques mécaniques différentes aux remblais. En effet le maillage en carré admet des déformations du fait de sa cinétique. Cela revient à créer une terre armé pouvant être exposé a des contrainte climatique et chimique beaucoup plus importante que certaine solution déjà existante.



**Figure II.12:** Technique de renforcement armé au géotextile des remblais

#### II.4.2.2.3. Tavaux ferroviaires

Le géotextile associé à la sous-couche constitue un écran anticontaminant efficace qui empêche la migration des éléments fins vers le ballast.

Le géotextile placé sur un fond de forme avec une pente correcte, constitue une surface drainante qui ressuie la plate-forme et crée un chemin préférentiel à l'évacuation des eaux.

## Chemins de fer

### Au niveau de la structure de la voie

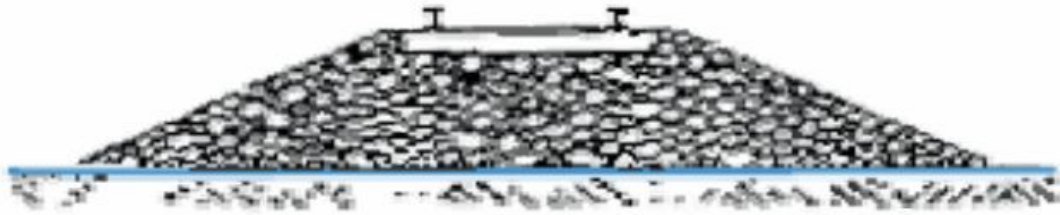


Figure II.13: Technique de renforcement au géotextile de chemin de fer

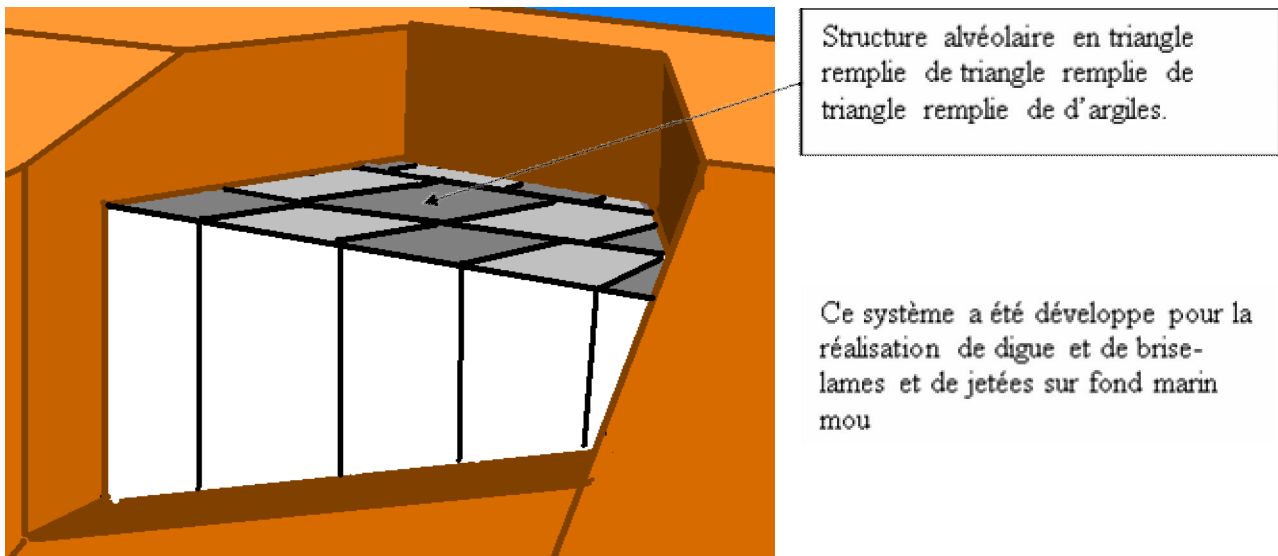


Figure II.14: Technique de renforcement armé au géotextile des remblais

### II.4.2.3. Hydraulique

#### II.4.2.3.1. Travaux maritimes

Le maillage en triangle admet très peu de déformation du fait de sa cinétique contrairement au carré, ce qui le prédispose à accepter les fortes contraintes du au marnage.

Le pouvoir de séparation évite l'enfoncement des enrochements dans le sol mou. Dans la réalisation d'ouvrages face à la mer (épis, digues, défenses de côtes), remplace avantageusement les tapis filtrants et parafouilles.

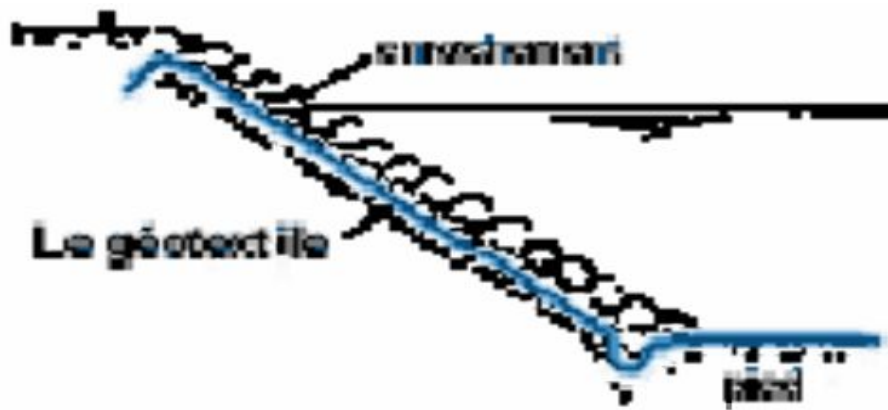


Figure II.15: Technique de renforcement au géotextile d'ouvrages face à la mer

Dans les travaux de protection de berges, de lutte contre l'érosion engendrée par les courants ou le batillage, le géotextile associé à des enrochements naturels, ou artificiels, joue le rôle de filtre. En maintenant en place les fines particules du sol, malgré la succion engendrée par les courants de retour dus au batillage. En dissipant plus efficacement les sous-pressions produites par les variations de niveau de la nappe phréatique dans le talus.

II.4.2.3.2. Travaux hydrauliques

Le drainage est une méthode permet de réaliser un rabattement des nappes a fin d'augmenter les caractéristique mécanique du sol. Un réseau de drain en géotextile permet de maîtrisé l'hydrométrie du sol et la hauteur de la nappe. Cette méthode et aussi utilisé pour le drainage des remblais.

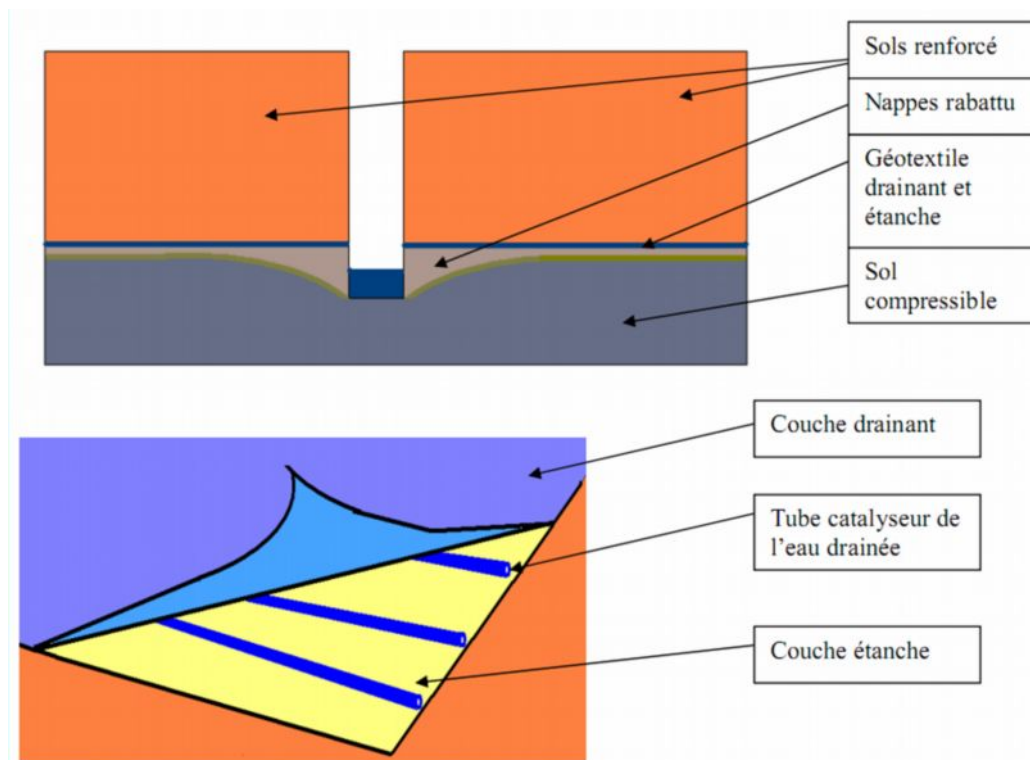


Figure II.16: Réseau de drain en géotextile

Dans la mise en place de systèmes drainant, les géotextiles interviennent:

- Tranchées drainantes ou Fosses septiques.

Dans la mise en place de systèmes drainants, les géotextiles interviennent:

- Comme enveloppe filtrante autour d'un milieu très perméable (tranchées drainantes, tuyaux perforés, etc.).
- Pour éviter le colmatage interne du système.
- Pour limiter le lessivage du sol environnant.
- Pour améliorer les conditions de pénétration de l'eau vers le drain.
- Pour augmenter la surface drainante en contact avec le sol.

Dans la réalisation de barrages en terre le géotextile joue un rôle efficace dans plusieurs domaines:

- Drains cheminée et de pied pour barrage en terre par ses propriétés hydrauliques;
- Associé à des enrochements naturels ou artificiels, il sert de filtre anti-érosion du parement.

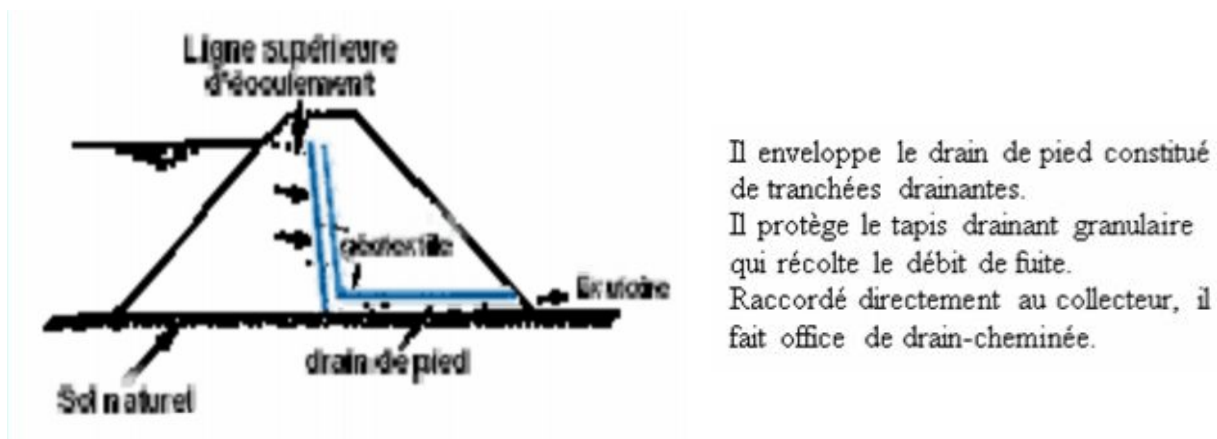


Figure II.17: Technique de renforcement au géotextile de barrages en terre

#### II.4.3. Qu'est que l'injection ?

L'application des injections, il y a quelques années était limitée aux terrains très perméables (graviers et sables) ou aux roches fracturées, pour:

- Améliorer les caractéristiques mécaniques des sols fins ou grenus,
- Consolider,
- Etanchement des sols
- Réfection des ouvrages.

Le matériel d'injection normalement utilisé consistait en un mélange eau-ciment, éventuellement stabilisé avec de l'argile ou de la bentonite.

Aujourd'hui avec l'aide de nouvelles technologies d'injections sous pression et de nouveaux

mélanges, il est possible de traiter des terrains de perméabilité moyenne-basse (jusqu'aux sables fins). Ces évolutions récentes des techniques d'injection, l'utilisation de nouveaux coulis et la maîtrise du contrôle des travaux ouvrent de nouvelles possibilités aux concepteurs dans l'élaboration de leurs projets.

#### **II.4.3.1. Domaines d'application**

Quelques types d'injection appliquée, selon la classe du sol à traiter (sols fins ou grenus):

- Injection de consolidation;
- Injection d'étanchéité;
- Injection de bourrage et de collage;
- Injection de comblement;
- Injection solide.

Ces techniques se font sous pression ou par un maillage de forages très serrés soit:

- Par forages horizontaux (ex: les tunnels), à l'intérieur des tunnels, lorsque la surface n'est pas accessible ou que les ouvrages sont très profonds. Dans ce cas, il faut traiter dans un premier temps, puis creuser, puis refaire un traitement sur une certaine longueur, puis recreuser sur cette même longueur, car on ne peut creuser que dans le terrain consolidé.
- Par forages verticaux traitement depuis la surface (ex: à la ville), on creuse souvent à faible profondeur. Alors le chantier d'injection se déplace en surface en précédant le tunnel. Mais le problème en ville pour traiter depuis la surface est un problème d'espace.

#### **II.4.3.2. Méthodes d'applications**

Quelques domaines d'application:

- Le renforcement ou le compactage des sols décomprimés.
- Le traitement des poches de dissolution.
- La création de radiers ou de voiles étanches.
- Le comblement et la confortation d'anciennes carrières souterraines.
- Le traitement des sols préalable à la création d'ouvrages souterrains.
- La consolidation d'ouvrages fissurés.
- Le scellement des micro pieux et des tirants.
- La reconstitution du contact extradados / terrain pour les ouvrages anciens enterrés.

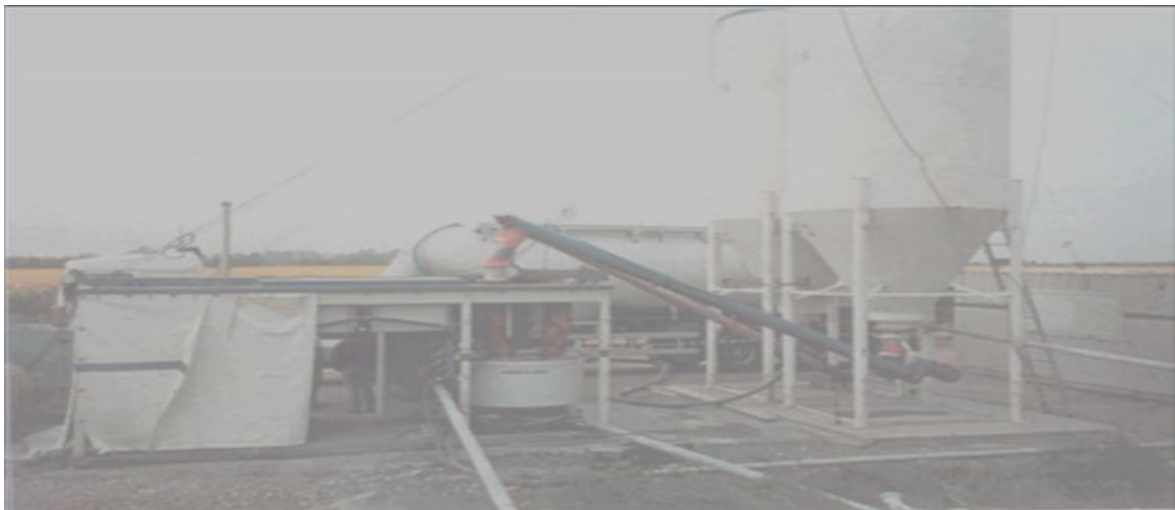
### II.4.3.3. Différents types d'injection

Quelques types d'injection appliquée, selon la classe du sol à traiter (sols fins ou grenus):

- Injection de consolidation
- Injection d'étanchéité
- Injection de bourrage et de collage
- Injection de comblement
- Injection solide

Ces techniques se font sous pression ou par un maillage de forages très serrés soit: par forages horizontaux (ex: les tunnels), à l'intérieur des tunnels, lorsque la surface n'est pas accessible ou que les ouvrages sont très profonds. Dans ce cas, il faut traiter dans un premier temps, puis creuser, puis refaire un traitement sur une certaine longueur, puis recreuser sur cette même longueur, car on ne peut creuser que dans le terrain consolidé, par forages verticaux traitement depuis la surface (ex: à la ville), on creuse souvent à faible profondeur. Alors le chantier d'injection se déplace en surface en précédant le tunnel. Mais le problème en ville pour traiter depuis la surface est un problème d'espace

#### II.4.3.3.1. L'injection de comblement



**Figure II.18:** Remplissage de cavités par injection de coulis et de mortier

##### II.4.3.3.1.1. Principe et objectifs

L'injection de comblement vise à remplir des vides souterrains, pour éviter leur effondrement, et à traiter les fontis des terrains de couverture. Ces vides peuvent être d'origine naturelle (grottes, karsts...), artificielle (mines, carrières, souterrains...).

### II.4.3.3.1.2. Applications

Ce type d'injection à deux applications majeures:

1. Le comblement d'une cavité au-dessous d'une infrastructure existante ou projetée, afin de garantir la portance du sol de fondation.
2. La mise en sécurité de vides artificiels délaissés (puits et galeries de mines, carrières souterraines...).

### II.4.3.3.1.3. Moyens mis en œuvre

L'injection de coulis de comblement nécessite:

- Un atelier de forage pour atteindre les vides à traiter.
- Une centrale de fabrication des produits d'injection à grand débit.
- Un atelier d'injection composé de pompes et d'une unité de pilotage et d'enregistrement.

### Composition

Les coulis utilisés en injection de comblement sont fabriqués avec:

- Une charge inerte (sable, filler cendres volantes),
- Un liant hydraulique (ciment),
- Un stabilisateur (bentonite),
- Des adjuvants éventuels,
- De l'eau.



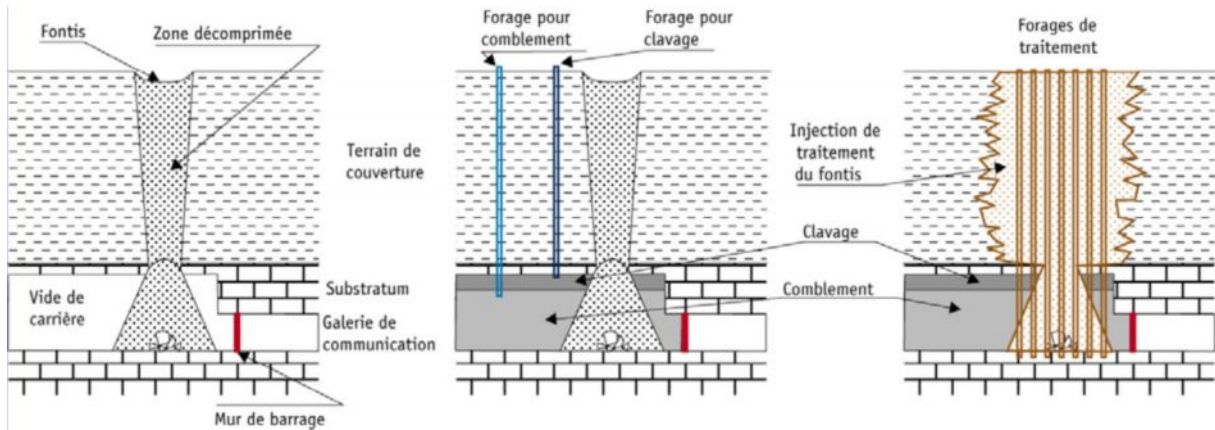
**Figure II.19 :** Marnière en cours de comblement



### II.4.3.3.1.4. Phasage

Les travaux de comblement se font généralement en cinq phases:

1. Localisation des cavités par forage ou exploration directe,
2. Confinement des zones à traiter (murs de barrage, coulis rigidifié...),
3. Comblement gravitaire au coulis,
4. Clavage du toit des cavités par injection sous pression,
5. Traitement des terrains de couverture par injection répétitive et sélective là où cela est nécessaire.



**Atelier de forage et pompes d'injection**

**Figure II.20:** Forage et pompes d'injection

### **II.4.3.3.2. Le voile d'étanchéité de barrage (étanchement des massifs rocheux)**

#### **II.4.3.3.2.1. Principe et objectif**

Le substratum rocheux de tous les barrages nécessite un traitement d'étanchéité afin d'éviter la percolation de l'eau sous la superstructure. Ce traitement est réalisé par injection de coulis sous pression, dans des forages à mailles resserrées.

#### **II.4.3.3.2.2. Application**

Ce type d'injection permet le comblement d'une cavité au-dessous d'une infrastructure existante ou projetée, afin de garantir la portance du sol de fondation et de son étanchéité,

#### **II.4.3.3.2.3. Moyen mis en œuvre**

A partir de la galerie de pied d'un barrage ou de la plinthe amont d'une digue, deux ateliers distincts vont intervenir alternativement:

- Atelier de forage, qui perfore le béton puis le rocher, selon un maillage et des inclinaisons définis par des plots d'essais,
- Atelier d'injection, qui permet la fabrication automatisée et la mise en œuvre des différents coulis, à l'aide de pompes hydrauliques. Chaque point d'implantation est injecté soit par passes descendantes où le forage et l'injection se succèdent alternativement, soit par passes ascendantes.

#### **Coupe type**

Le profil d'un voile étanche présente généralement plusieurs lignes de forages. Chaque forage est lui-même injecté par passes:

- Injection de collage de l'ouvrage au substratum,
- Injection de peau des zones superficielles
- Altérées (étanchéité et consolidation),
- Injection profonde du cœur du massif rocheux (étanchéité).

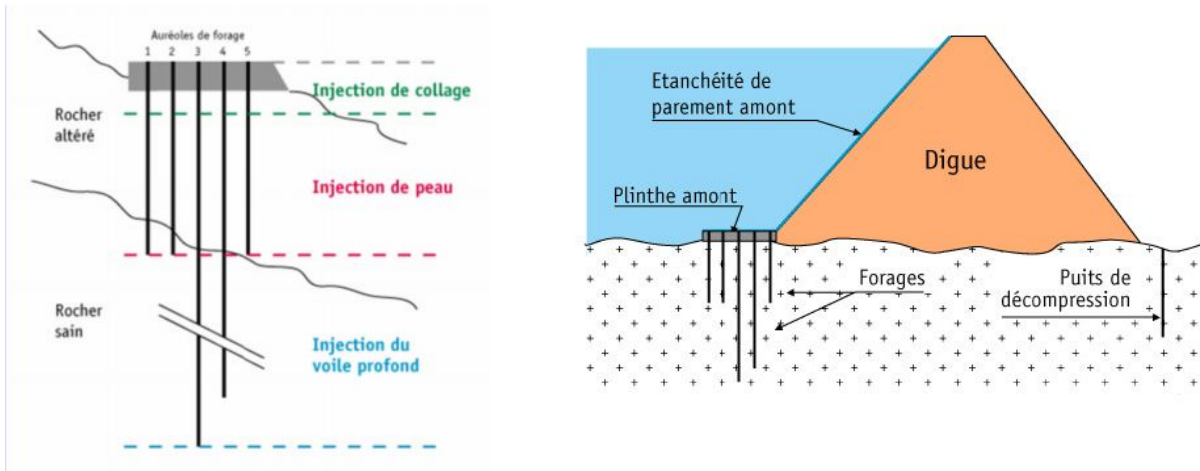


Figure II.21: Exemple d'application de forage pour injection près d'une digue

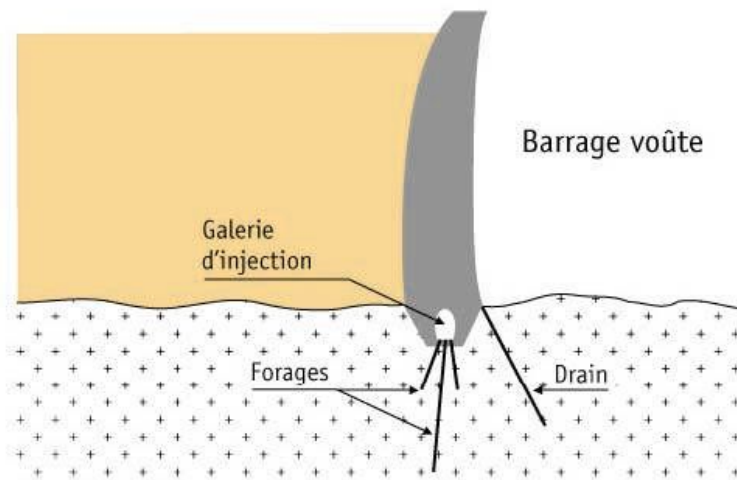


Figure II.22: Exemple d'application de forage pour injection près d'un barrage



Figure II.23: Linges de forages du voile d'injection

### II.4.3.3.3. Injection solide



**Figure II.24:** Amélioration de sol par injection de compactage

#### II.4.3.3.3.1. Principe et objectif

L'injection solide vise à incorporer dans le sol, sous forte pression, un mortier très ferme. L'objectif est de remplir les vides éventuels (terrains karstiques...), et d'assurer un compactage des terrains en place (sols compressibles...) tout en maîtrisant les quantités incorporées.

#### II.4.3.3.3.2. Application

La réalisation d'injections au travers de forages tubés autorise cinq types d'applications:

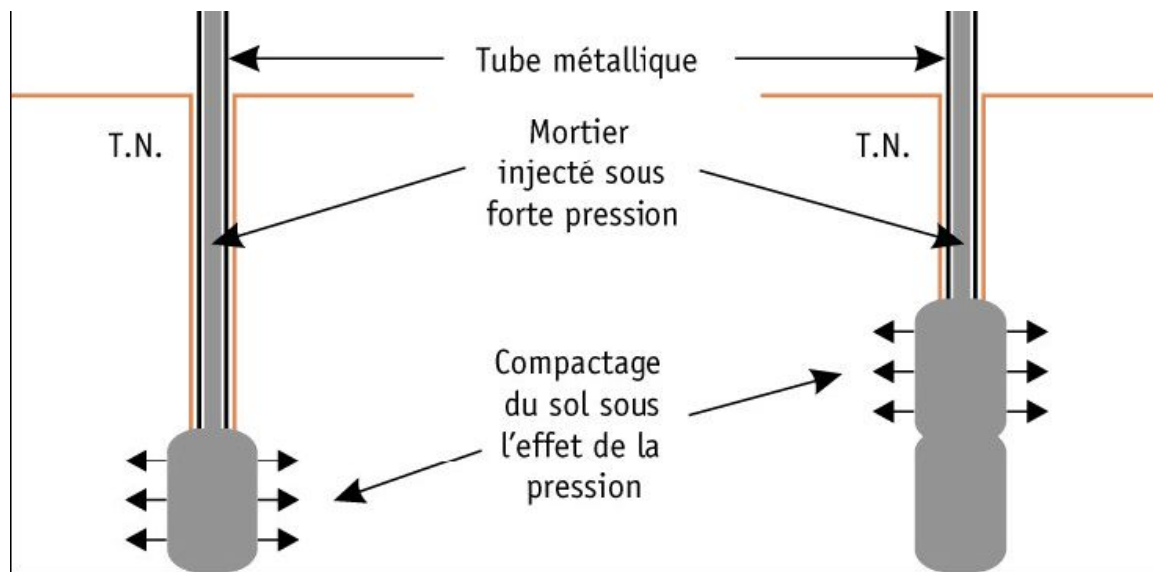
- Amélioration de la portance d'un sol et/ou diminution des tassements.
- Traitement des terrains présentant des vides de dissolution.
- Reprise en sous-œuvre de fondations d'ouvrages, avec ou sans remise à niveau.
- Protection sismique par réduction du potentiel de liquéfaction.
- Injection de compensation lors du creusement d'une galerie.

### II.4.3.3.3. Moyen mis en œuvre

La réalisation des colonnes nécessite trois ateliers distincts:

- Un atelier de forage pour la mise en place d'un tube d'injection métallique Ø100 mm environ.
- Une centrale de fabrication de mortier (centrale chantier ou BPE).
- Un atelier d'injection composé d'une pompe à mortier et d'une centrale de pilotage et d'enregistrement.

### II.4.3.3.4. Phasage



A- Le mortier est injecté en remontant par passes de 0.5 à 2 m avec arrêt sur critères de déplacement, de volume ou de pression (jusqu'à 40 bars).

B - Les passes d'injection sont arrêtées dès que:  
 - un déplacement est observé.  
 - l'un des critères de pression ou de volume est atteint

**Figure II.25:** Le tube d'injection métallique est mis en place par forage

## II.4.4. Les méthodes chimiques

### II.4.4.1. Qu'est-ce que les traitements chimiques des sols

La consolidation chimique vise à traiter les terrains contenant des argiles ou des eaux agressives. Ce traitement contient trois actions:

- Action physicochimique: Déplacement sur les sols des limites d'Atterberg du matériau et modification de la granulométrie par adjonction du liant.
- Action de compactage dynamique: Serrage du sol jusqu'à un état supérieur.

- Réaction d'hydratation: Durcissement plus ou moins élevé du sol à traiter par un mélange de ciment et de chaux, et le conduisant à une certaine maturité.

Il faut savoir que le traitement à la chaux ne s'applique que sur une épaisseur de terrain extrêmement faible.

Pour les sols contenant peu ou presque pas d'argile, l'utilisation de ciment est de 4% à 8% par rapport au poids du sol sec.

Les chaux vives (CaO) ou éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>) s'utilise dans des sols ayant une teneur en argile non négligeable; ils sont employés à raison de 2% à 6% du poids du sol. La chaux vive s'utilise plus particulièrement pour les sols argileux qui contenant beaucoup trop d'eau ; la chaux ayant alors un effet de dessiccation par réaction thermique. Dans certains cas, il est possible de procéder par un traitement mixte: chaux puis ciment.

La chaux doit répondre certains critères granulométriques et chimiques. Elle doit être réactive.

#### **II.4.4.2. Quelques types de traitements chimiques**

Il existe 3 types de traitement chimiques courant:

- Traitement à la chaux
- Traitement au ciment
- Les colonnes de sol traité

#### **II.4.4.3. Les méthodes d'applications**

##### **II.4.4.3.1. Les améliorations des sols à la chaux**

###### **II.4.4.3.1.1. Principe et objectifs**

Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier.

###### **II.4.4.3.1.2. Applications**

La consolidation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures.

Effectuée dans la zone supérieure de la couche de base ou de la sous-couche, cette consolidation à

la chaux peut être utilisée comme technique de construction pour protéger les routes contre les actions du gel ou du dégel.

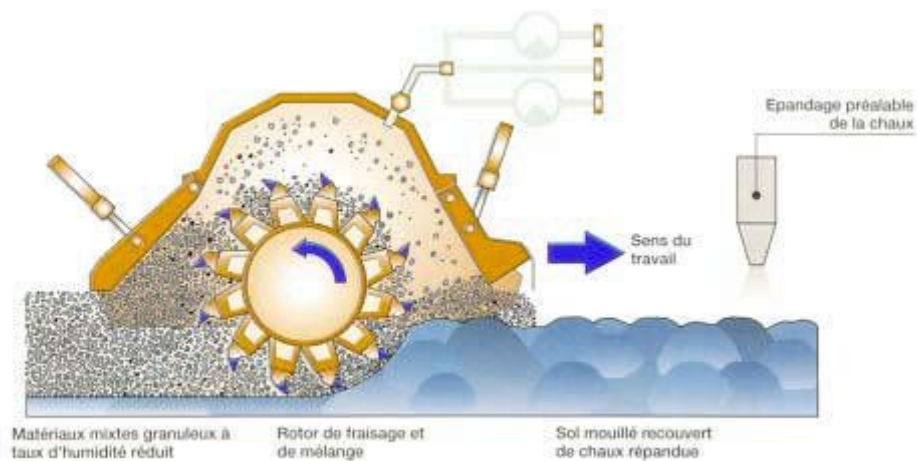
#### II.4.4.3.1.3. Moyens mis en œuvre

La mise en œuvre de la chaux nécessite des engins idéals pour l'incorporation de chaux dans les sols mouillés.

#### Composition

- Ciments (Les ciments haut de gamme ne sont pas nécessaires).
- Ciments à base de laitier.
- Cendres volantes.
- Chaux vives ou éteints.

#### II.4.4.3.1.4. Phasage



**Figure II.26:** Incorporation de la chaux préalablement répandue



**Figure II.27:** Epandeur à chaux ou ciment

## II.4.5. Le compactage de sol

Lors de construction, on a le plus souvent à faire à des sols en place ou à des remblais déjà existants. Il est alors nécessaire de vérifier leur stabilité et le cas échéant de les stabiliser en profondeur afin d'augmenter leur résistance en profondeur

### II.4.5.1. Colonnes ballastées

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels limons et argiles. Sol tanche Bachy a récemment mis au point la machine SolVibro, spécialement conçue pour les colonnes ballastées. Le dispositif de forage est composé d'un tube prolongé en partie basse par un vibreur électrique ou hydraulique. Ce dispositif est foncé dans le sol à l'aide du vibreur et crée ainsi une empreinte en refoulant le terrain jusqu'à la base du massif à consolider. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitairement soit à l'aide d'une pompe à graviers.

Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral.

L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider.

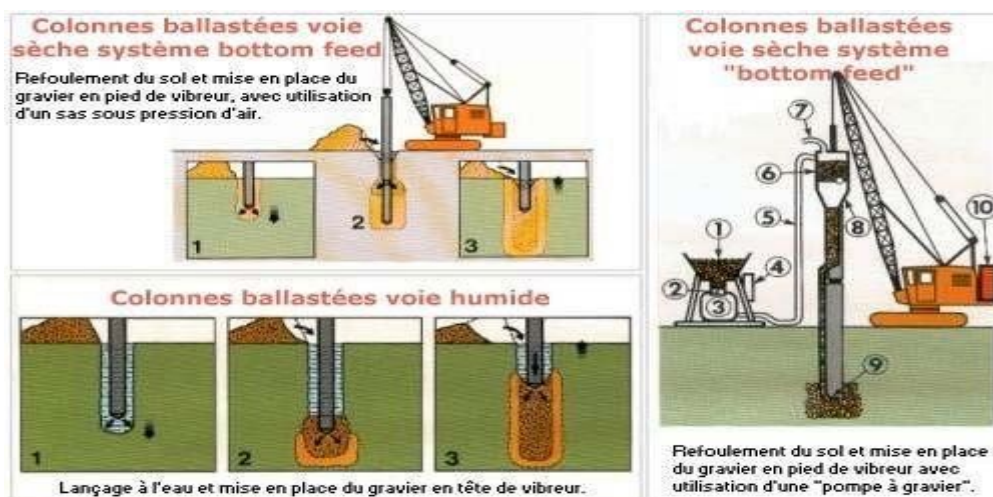


Figure II.28: Schéma de principe du procédé colonnes ballastées

### II.4.5.2. Vibroflotation

Une seconde méthode économique et très efficace, utilise les vibrations pour compacter au niveau



désiré. Dans les sols sableux ou limoneux, saturés d'eau, un vibreur est descendu par lancement jusqu'à la profondeur voulue. Le rendement peut être accru si l'on accompagne la remontée de l'appareil par l'injection d'eau sous pression (vibroflotation).

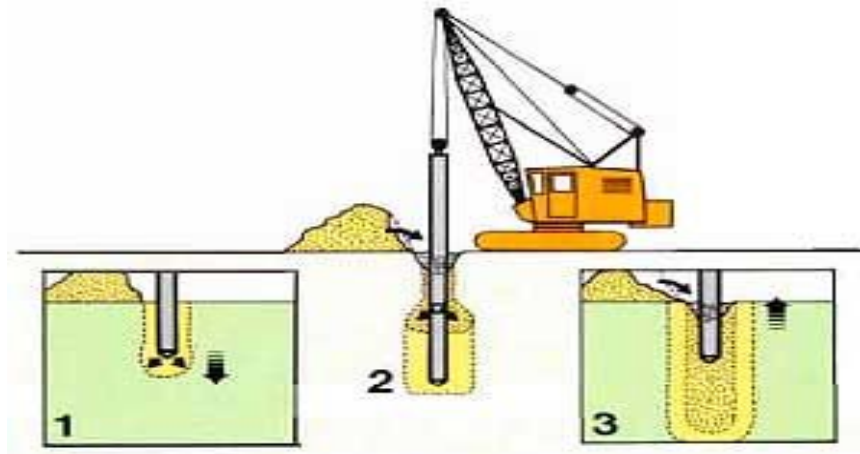


Figure II.29: Schéma de principe du procédé vibroflotation

#### II.4.5.2.1. Principe

Cette technique s'applique aux sols granulaires non cohérents tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles, qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense. Le maillage des points de compactage dépend des caractéristiques initiales et des objectifs à atteindre. La maille retenue doit conduire à un traitement le plus uniforme possible.

#### II.4.5.2.2. Mode opératoire

Le vibreur, manipulé par une grue, est mis en station au-dessus du point de compactage.

##### Phase 1

Sous l'influence de son propre poids, du lancement et des vibrations, le vibreur atteint rapidement la profondeur désirée. Les jets d'eau à la pointe sont alors coupés.

##### Phase 2:

L'eau arrive désormais uniquement par les orifices du haut du vibreur. Le cône obtenu facilite la mise en place de matériau d'apport -sable ou gravier -dans la cavité créée. Le flux d'eau le long du vibreur aide au transport du sable jusqu'à la zone de compactage à la base du vibreur.



**Figure II.30:** Technique du vibroflotation

### Phase 3

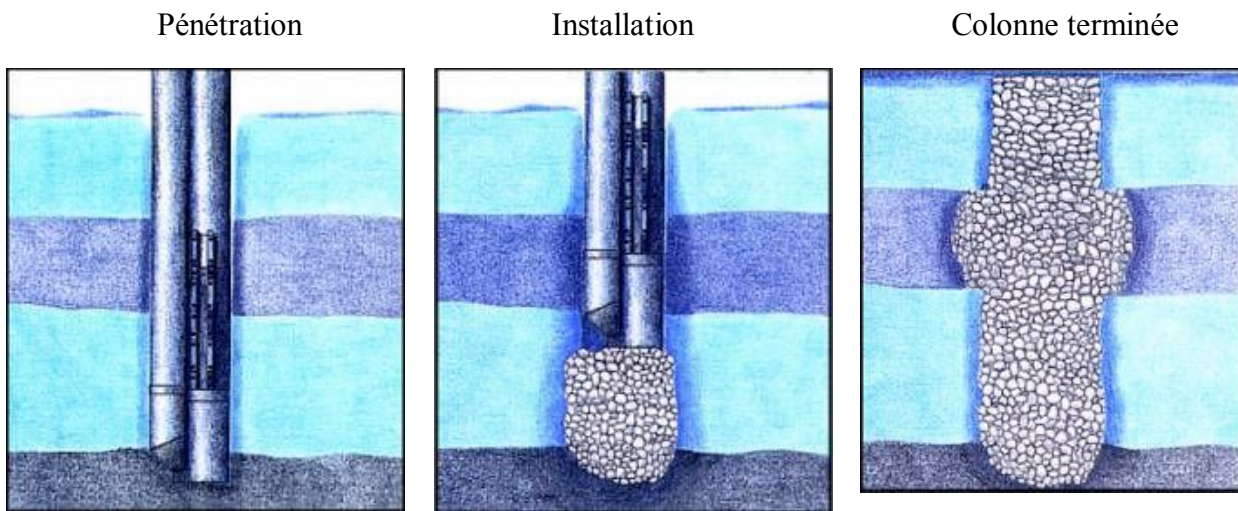
Le vibreur est retiré par étapes et produit de cette manière un cylindre de terrain densifié de 2 à 4 mètres de diamètre.

#### II.4.5.3. Méthodes par ondes de chocs ou vibrations

L'utilisation d'effet d'onde de choc ou de vibrations facilite la rupture des contacts inter granulaires, permettant ainsi, grâce à l'action de la pesanteur et / ou de surcharges, d'obtenir un meilleur enchevêtrement des grains et par conséquent une compacité supérieure.

#### Le compactage intensif

Le pilonnage intensif est obtenu par des chocs superficiels. Un pilon de 10 à 40 tonnes et d'une section de 4 à 6 m<sup>2</sup> tombe toutes les 30 secondes d'une hauteur de 14 à 40 mètres. Le résultat obtenu dépend de l'énergie mise en œuvre. Le déroulement a lieu par passe successif 8 en général), séparées par un intervalle de quelques jours. Sous les premiers chocs, le sol se tasse immédiatement de 40 cm à 1.5 mètres et est densifié sur une épaisseur de 8 à 12 mètres. On termine l'opération quand le tassement entre deux phases devient très faible.



**Figure II.31:** Schéma de principe du procédé (méthodes par ondes de chocs ou vibrations).

## II.5. Conclusion

Les techniques d'amélioration de sols sont très importantes. L'application d'une de ces méthodes nécessite une bonne connaissance du sol à traité (granulométrie, composition, teneur en eau). Il existe un grand nombre de procédés différents, le but est de trouver la solution la plus efficace et la plus économique.

Les traitements peuvent avoir un caractère définitif ou provisoire pendant la phase chantier. Ces techniques restent assez onéreuses car il faut des entreprises spécialisées.