

## *Amélioration des sols*



Réalisé par Natacha SERTIER

Jean Charles BOURDEAU  
Alain  
Assina

## 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.

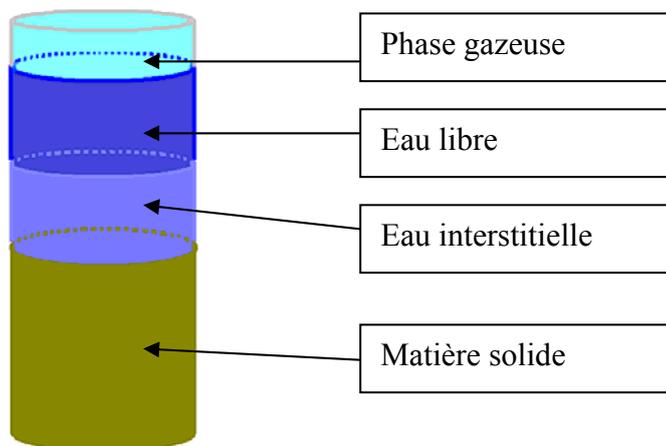
TERRAIN \ INTERVENTIONS	ARGILLES	LIMONS	SABLES	GRAVIER	ROCHES FRACTURÉES	ROCHES
INJECTIONS TRADITIONNELLES		■	■	■	■	■
CONGÉLATION	■	■				
JET-GROUTING SOUS-HORIZONTAL		■	■	■	■	
PRETUNNEL *				■	■	■
RÉNFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE	■	■				
PREDECOUPAGE MÉCANIQUE	■	■				
ARC CELLULAIRE		■	■	■	■	

## 2. 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.

### 2.1. Définition géotechnique des sols

Nous schématiserons les sols comme étant composé de quatre phases. Une phase solide composé de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelé : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse.



La phase solide est le seul élément pouvant supporter des contraintes importantes.

### 2.2. Phase solide

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

- Sols grenus
- Sols fins
- Sols organiques

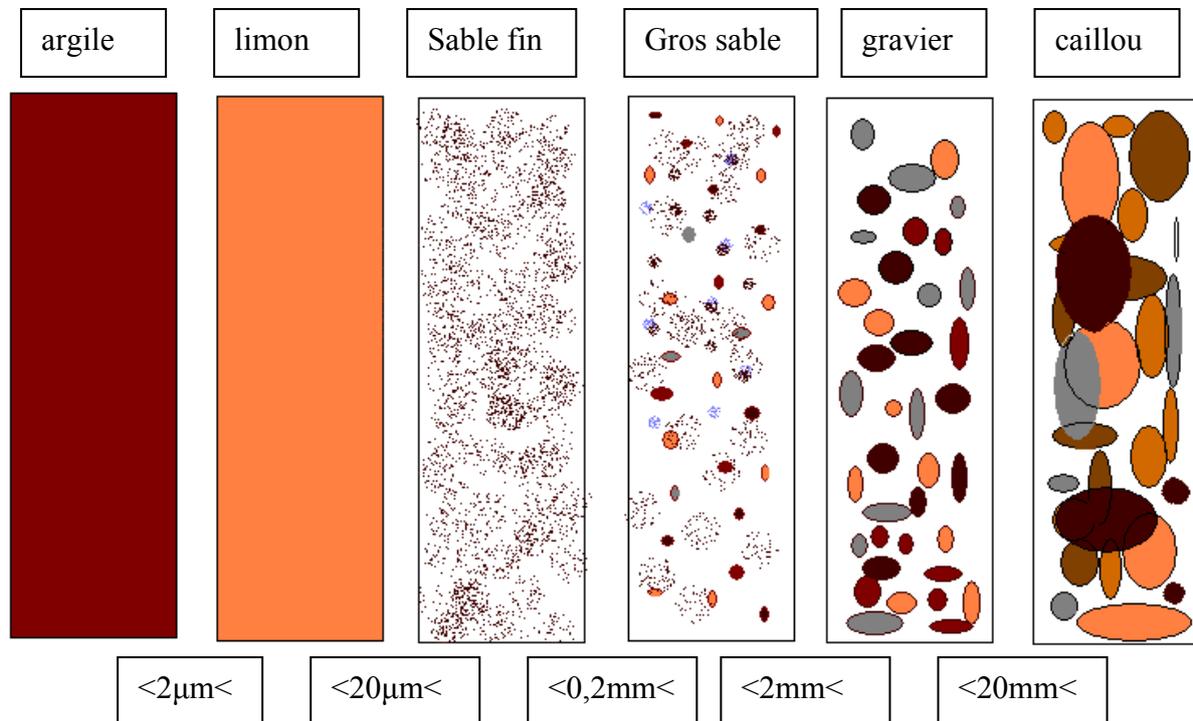
#### 2.2.1. Classification des sols : sols grenus, sols fins

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 certain minéraux des roches) : particules  $< 2\mu\text{m}$ .



### 2.2.2. Sols organiques

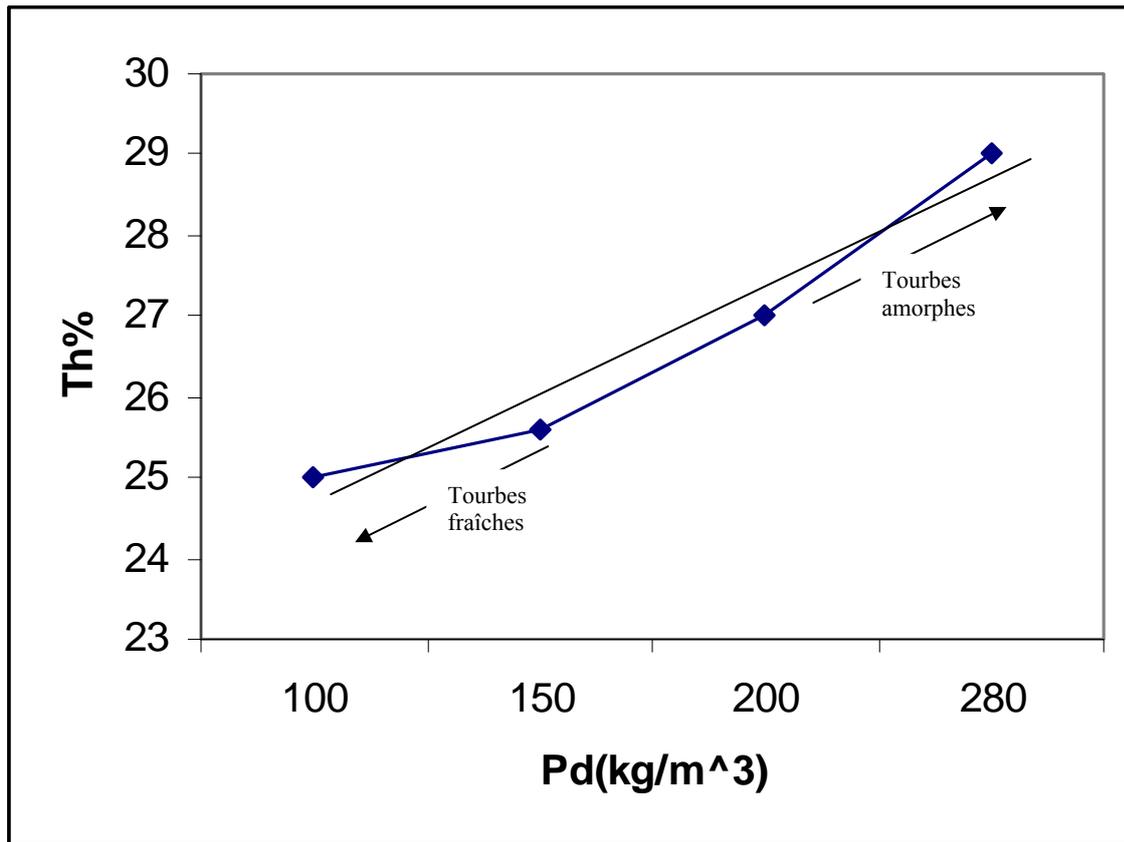
Les vases et les tourbes renferment 2 types de matières organiques :

- Matière organique libre : débris végétaux et résidus animaux
- Matières organique liées : colloïde humiques fixés a la phase minéral

La transformation de la matière organique fraîche en humus colloïdal est l'humification. La transformation des tourbes franches en tourbe amorphe est la tourbification ; suivant le degré de tourbification les propriétés physicochimique 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.



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.

### 2.3. Interprétation

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

- tourbe 0,2 à 0,5 MPa ;
- argile molle (récente) 1 à 5 MPa ;
- argile raide 10 à 50 MPa ;
- sable lâche 5 à 20 MPa ;
- sable dense 100 à 200 MPa

### 3. 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

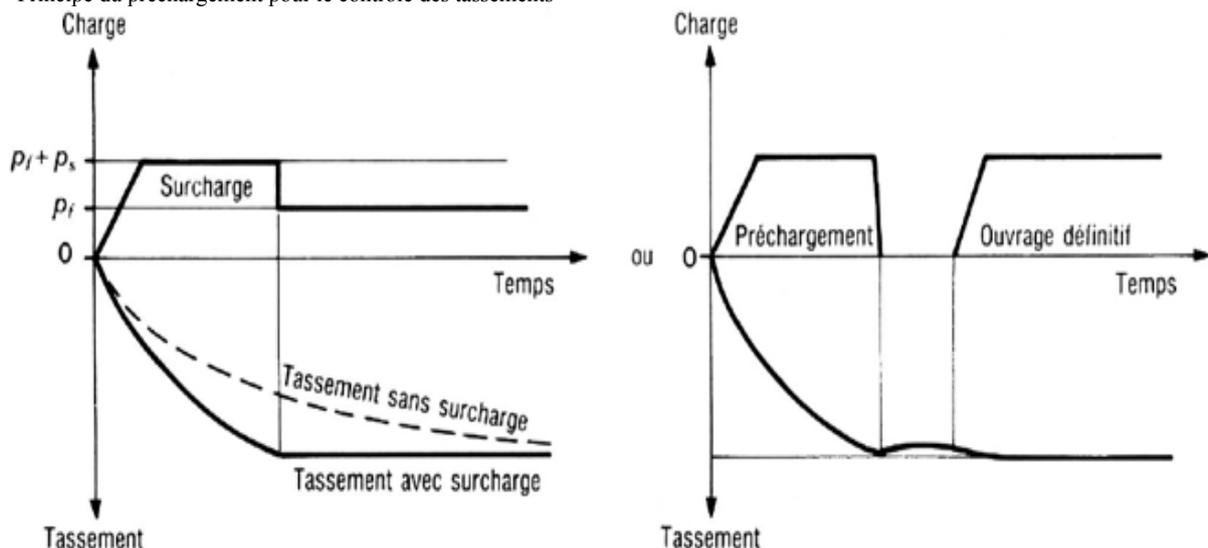
Le préchargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux.

Préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage

#### 3.1.Principe

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

- Principe du préchargement pour le contrôle des tassements

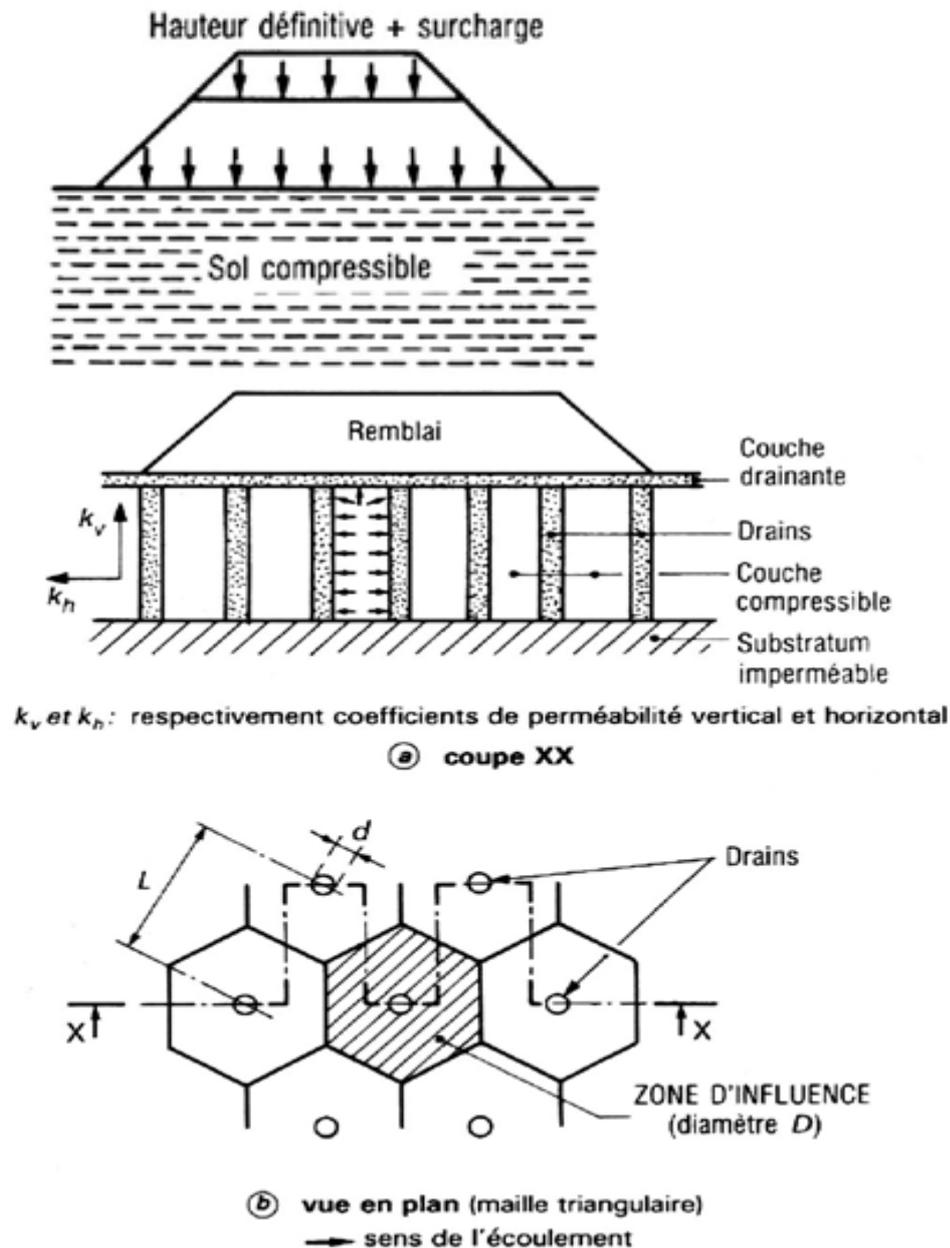


- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels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

#### 3.2.surcharge en terre

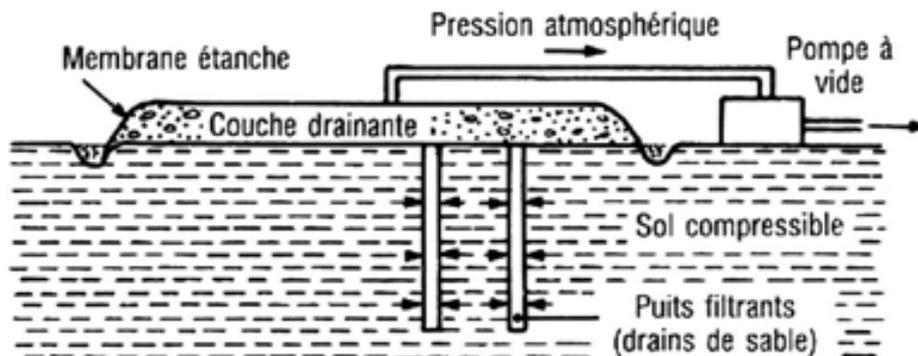
Lorsqu'un projet est déterminé, on met en place sur le terrain un volume de remblai correspondant à la future charge de l'ouvrage. Sur des sols saturés à très faible perméabilité,

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.



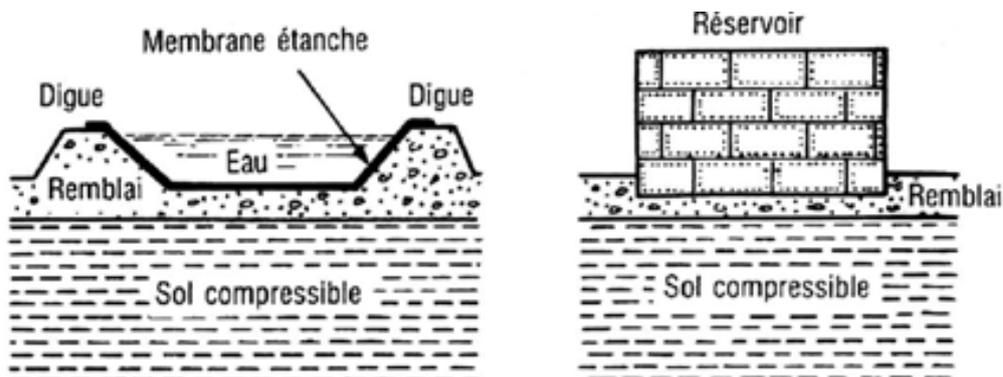
### 3.3. consolidation atmosphérique

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.



### 3.4. L'inondation

Une digue en terre est édiflée 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)



### 3.5. 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 piezométrique

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

## 4. Géotextile

### 5.

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.

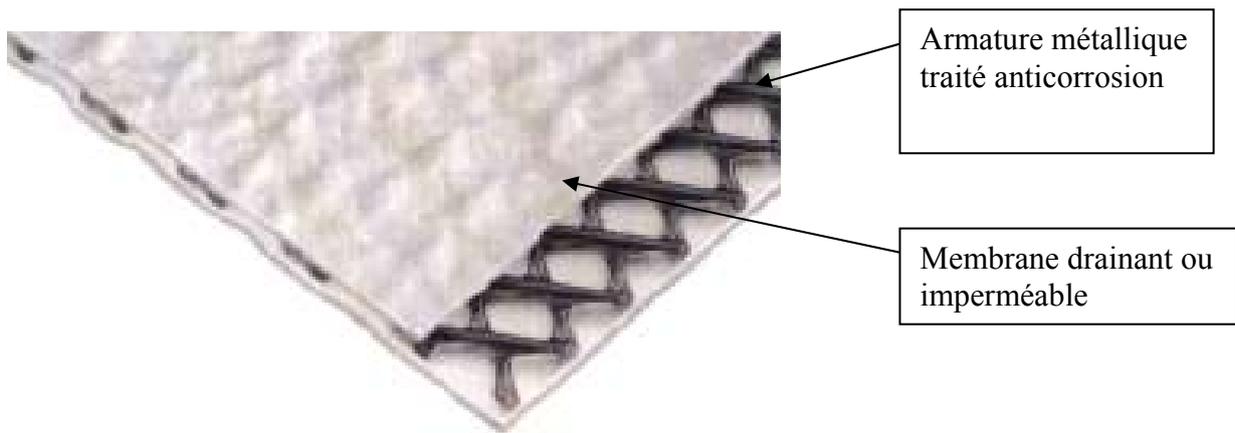
### 5.1. les caractéristiques

Le géotextile hydraulique et mécanique assure :

- Une dissipation plus rapide des variations de pressions.
- Une meilleure mise en oeuvre 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

### 5.2. Mécanique

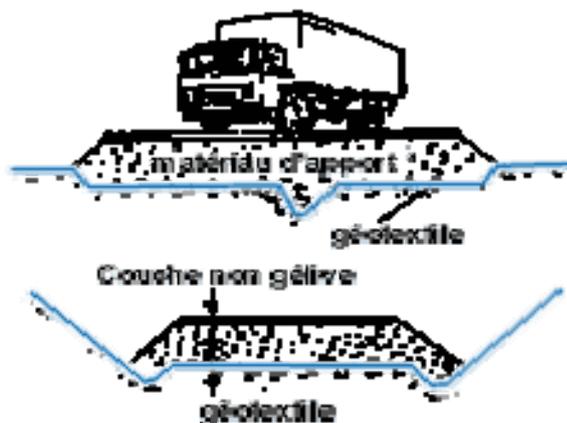
Le géotextile du type mécanique peut être assimilé à un matériau polymérique armé. L'armature peut être de différents types à fin d'attribuer des caractéristiques mécaniques adaptées aux différentes mises en oeuvre. Les armatures peuvent être caractérisées par leur maillage ainsi que par le type d'alliage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



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

### 5.2.1. 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.



### 5.2.2. Terrassements généraux

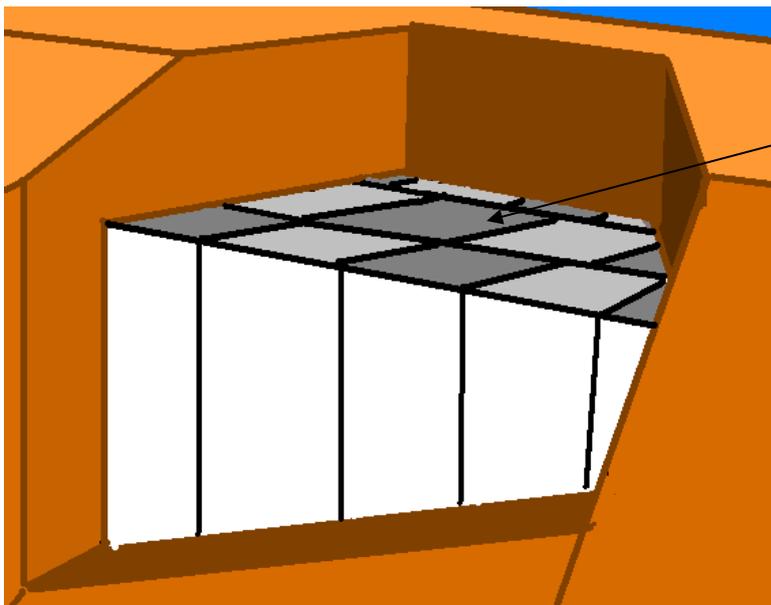
Permet de réaliser, sur tous terrains sensibles à l'eau (argiles, limon) ou marécageux (vase, tourbe), des travaux de terrassement dans des conditions optimales.



- Gain de temps; pas de décapage préalable du sol naturel.
- Facilité de mise en oeuvre: 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 ce dernier donnent maintenant lieu à des applications de plus en plus nombreuses 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 parfaites et des efforts de recherches importants sont encore à réaliser. Cependant, il ressort une technique de renforcement armé au géotextile des remblais comme suit :

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 armée pouvant être exposée à des contraintes climatiques et chimiques beaucoup plus importantes que certaines solutions déjà existantes.



Structure alvéolaire en carré lui donnant des propriétés d'amortissement et de déformation plus importantes que celle en triangle.

Ce système a été développé pour amortir des phénomènes géologiques majeurs du type avalanche et éboulement menaçant des activités humaines.

### 5.2.3. Tavaux ferroviaires

#### Chemins de fer

#### Au niveau de la structure de la voie



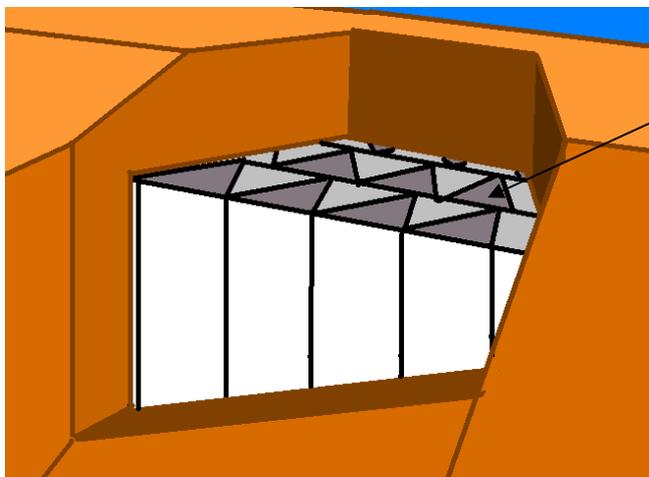
Le géotextile associé à la sous-couche constitue un écran anticontaminant efficace qui empêche la migration des éléments fins vers le ballast.

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.

### 5.3.hydraulique

#### 5.3.1. 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.

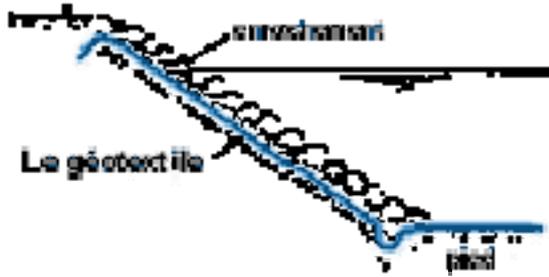


Structure alvéolaire en triangle remplie de différents types de granulométrie ou d'argiles.

Ce système a été développé pour la réalisation de digue et de brise-lames et de jetées sur fond marin mou

Le pouvoir de séparation évite l'enfoncement des enrochements dans le sol mou.

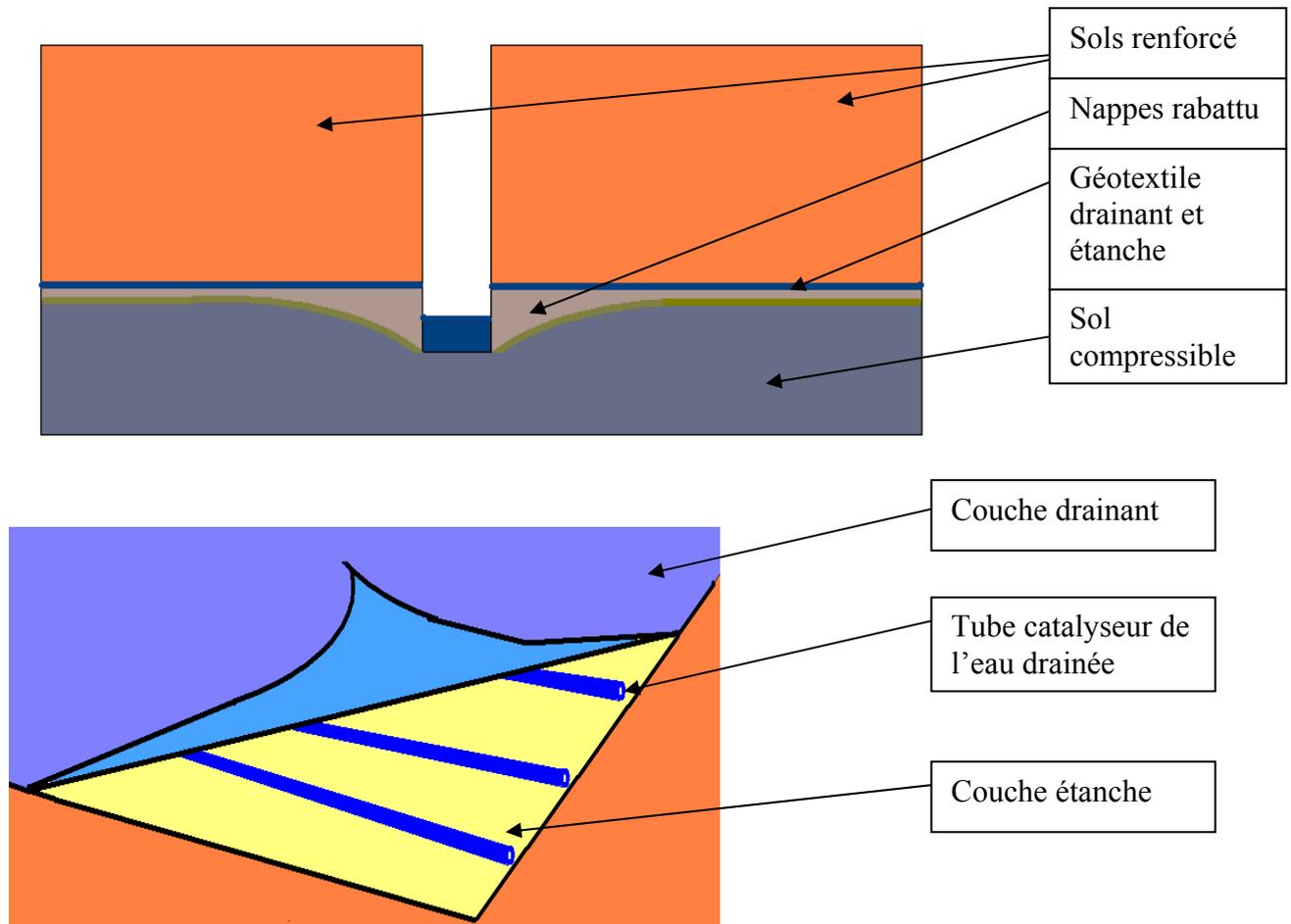
Dans la réalisation d'ouvrages face à la mer (épis, digues, défenses de côtes), remplace avantageusement les tapis filtrants et parafouilles.



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.

### 5.3.2. 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.



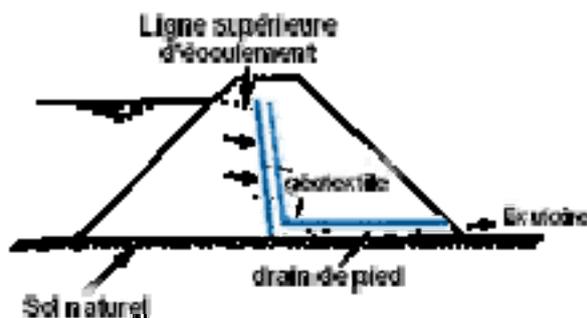
Dans la mise en place de systèmes drainant, les géotextiles intervient :

- 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 amont.



Il enveloppe le drain de pied constitué de tranchées drainantes.

Il protège le tapis drainant granulaire qui récolte le débit de fuite.

Raccordé directement au collecteur, il fait office de drain-cheminée.

## 6. 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,
- ❖ l'étanchement des sols
- ❖ la réparation 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.

### 6.1. 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.

## 6.2. 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 micropieux et des tirants.
- La reconstitution du contact extradados / terrain pour les ouvrages anciens enterrés.

## 6.3. les 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

### 6.3.1. L'injection de comblement

## Remplissage de cavités par injection de coulis et de mortier



#### 6.3.1.1.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...).

#### 6.3.1.2.Applications

Ce type d'injection a 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...).

#### 6.3.1.3.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.

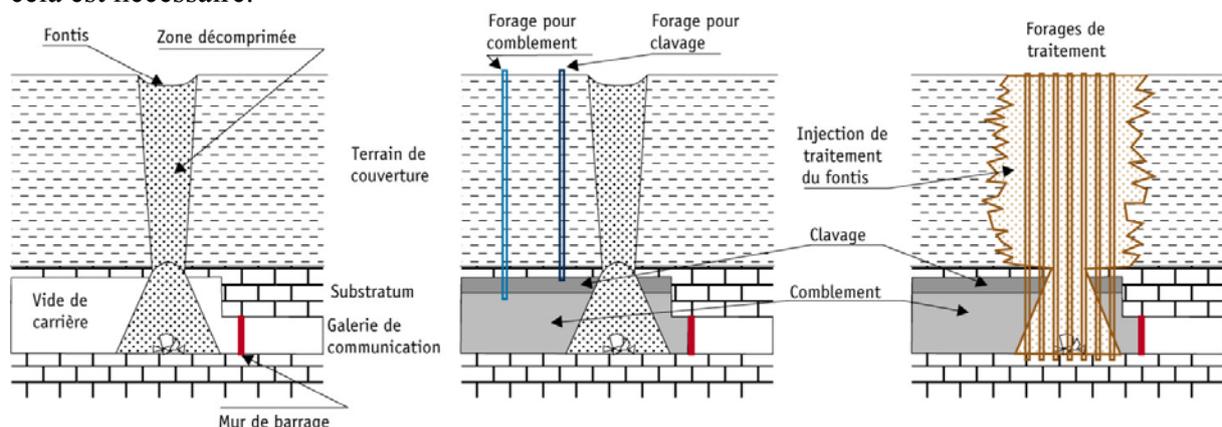


*Marnière en cours de comblement*

#### 6.3.1.4. 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**

### 6.3.2. Le voile d'étanchéité de barrage

## Etanchement de massif rocheux par injection

#### 6.3.2.1.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.

#### 6.3.2.2.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,

#### 6.3.2.3.Moyen mis en oeuvre

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

- ❖ l'atelier de forage, qui perfore le béton puis le rocher, selon un maillage et des inclinaisons définis par des plots d'essais,
- ❖ l'atelier d'injection, qui permet la fabrication automatisée et la mise en oeuvre 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.

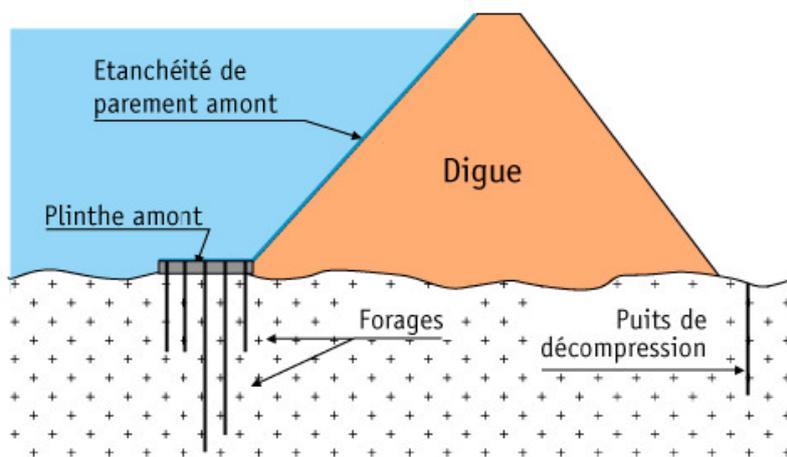
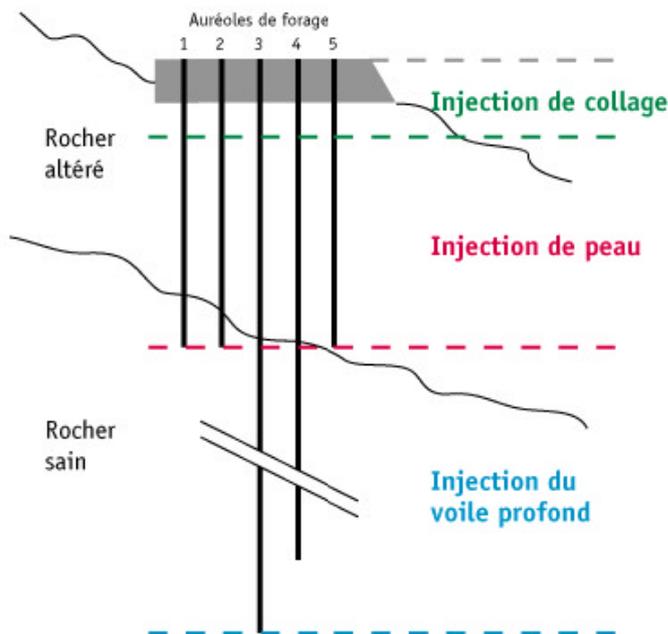
## Coupe type

Le profil d'un voile étanche présente généralement plusieurs lignes de forages.

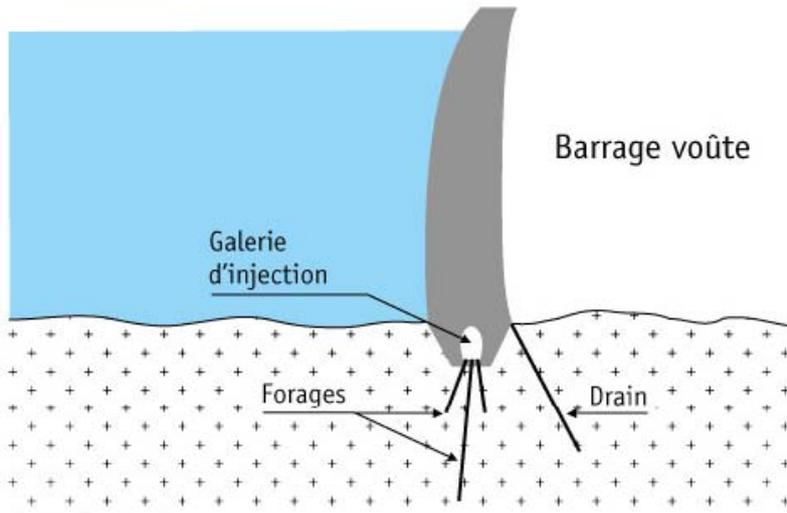
Chaque forage est lui même injecté par passes :

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

Le plus souvent, un voile de drainage, réalisé à l'aval du voile d'étanchéité, permet de dissiper les sous-pressions à la base de l'ouvrage.



Exemple d'application de forage pour injection près d'une digue



Exemple d'application de forage pour injection près d'un barrage



*Lignes de forages du voile d'injection*

### 6.3.2.4. Les contrôles

#### **Injection assistée par ordinateur**

Les injections suivent des procédures qui définissent les formulations des coulis, les critères d'arrêt (pression, volume, limite GIN...), le maillage des forages, l'ordre de traitement des lignes...

G.T.S. dispose de centrales automatisées, qui gèrent simultanément la fabrication des différents coulis, l'injection proprement dite par des presses hydrauliques asservies ainsi que le contrôle, l'affichage et l'enregistrement en temps réel des paramètres d'injection.

### 6.3.3. L'injection solide

#### **Amélioration de sol par injection de compactage**



### 6.3.3.1.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.

### 6.3.3.2.Application

La réalisation d'injections au travers de forages tubés autorise 5 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-oeuvre 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.

### 6.3.3.3.moyen mis en oeuvre

La réalisation des colonnes nécessite trois ateliers distincts :

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



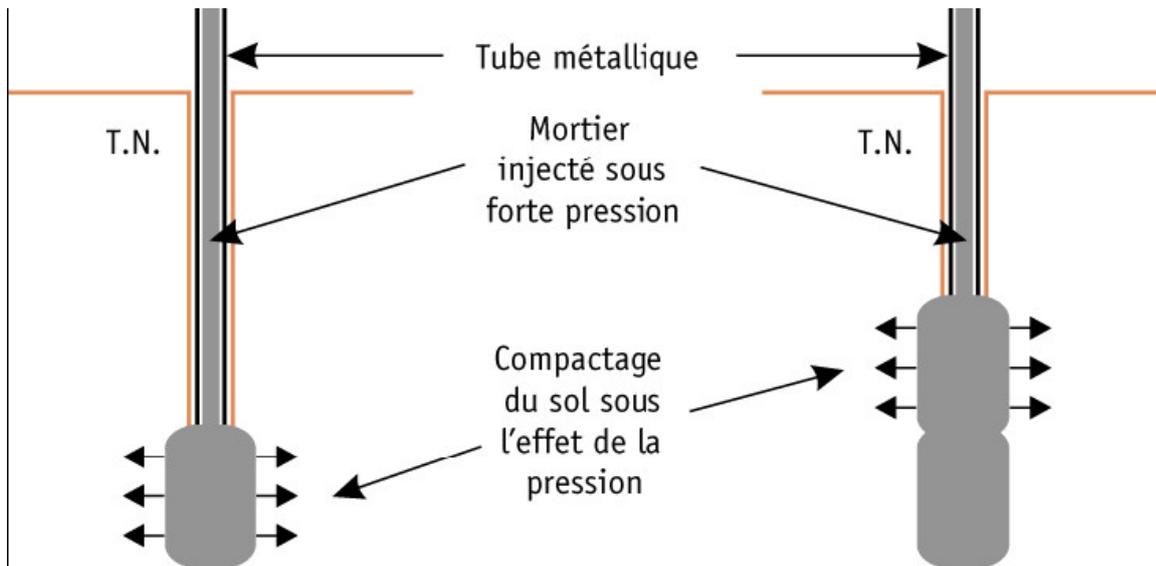
*Essai au cône d'Abrams*

### Plot d'essai

Un plot d'essai initial permet de déterminer, en fonction du résultat recherché :

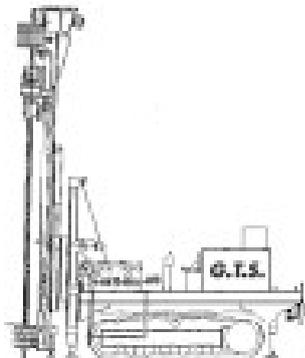
- ❖ Le maillage des injections, qui comprend souvent 2 ou 3 séries de forages intercalées,
- ❖ Les critères de pression et volume à respecter en fonction des zones et des profondeurs.

### 6.3.3.4. 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



1 - Le tube d'injection métallique est mis en place par forage.



*Injection : centrale de pilotage et d'enregistrement*

### 6.3.3.5. Les contrôles

#### **Contrôle en temps réel des injections**

Les différents paramètres d'injection sont contrôlés en continu et en temps réel à l'aide :

- d'un laser rotatif avec dispositif d'alarme pour maîtriser les déplacements altimétriques du fond de forme,
- d'une centrale informatisée de pilotage des pompes, avec affichage en continu des pressions, volumes et débits d'injection, impression graphique et enregistrement numérique pour traitement sur PC.

### 6.3.4. L'injection de consolidation

#### **Consolidation d'ouvrages par injection de coulis**



### 6.3.4.1.Principe et objectifs

L'injection de consolidation vise à conforter un ouvrage ou un terrain ne présentant pas ou plus les caractéristiques mécaniques souhaitées, du fait d'une porosité, d'une fissuration et/ou fracturation trop importante. Ce type de traitement se fait en injectant un coulis sous pression par l'intermédiaire de forages traversant les zones concernées.

### 6.3.4.2.Application

L'injection de consolidation a plusieurs applications :

1. La consolidation de terrains d'assises d'ouvrages (sous culées ou piles d'ouvrage, sous semelles de fondations...),
2. Le traitement de terrains encaissants traversés par un ouvrage souterrain,
3. La régénération du monolithisme des maçonneries...

### 6.3.4.3.moyen mis en oeuvre

L'injection de consolidation nécessite:

1. Un atelier de forage,
2. Un atelier de fabrication des coulis,
3. Un atelier composé de presses d'injection et d'une centrale de pilotage et d'enregistrement.



*Consolidation des murs bajoyers d'une écluse*

#### Accessibilité

Les moyens à mobiliser pour ces travaux de réparation varient en fonction de l'ouvrage. Selon les cas, il peut être nécessaire de réaliser des batardeaux provisoires, de travailler sur barges ou d'avoir recours à des techniques de travaux sur cordes.

De même, en fonction des désordres, les procédés d'injection vont varier, aussi bien pour ce qui est des produits injectés que des matériels utilisés.

Ces injections peuvent aussi être couplées à un traitement d'étanchéité et/ou à des travaux de consolidation classiques par tirants actifs ou ancrages passifs.

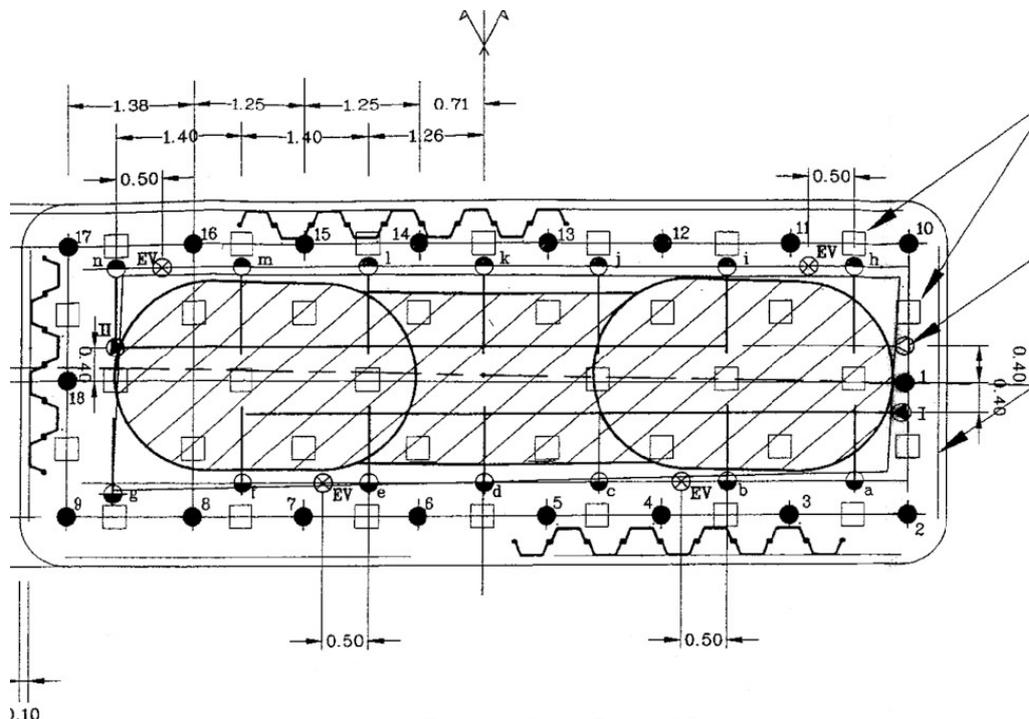


*Atelier de forage et centrale d'injection*

#### 6.3.4.4. Phasage

Les travaux de consolidation se font généralement en quatre phases :

1. Forage selon un maillage et des orientations définis en fonction du site et des objectifs recherchés,
2. Equipement éventuel des trous par des tubes crépinés ou à manchettes,
3. Injection du coulis sous pression en cherchant à atteindre des critères prédéfinis de pression ou de volume,
4. Contrôle des travaux.



*Maillage type des forages sur une pile de pont*

2005/2006

### 6.3.4.5. Les contrôles

#### Contrôle des injections

L'efficacité des injections est vérifiée en cours et à l'issue des travaux par différents types d'essais in situ :

- suivi et enregistrement en continu des paramètres de l'injection (pression, volume, débit),
- carottages et essais d'écrasement sur éprouvettes,
- essais d'eau et mesure de perméabilité (lefranc, lugeon...),
- essais mécaniques (forages pressiométriques),
- auscultation de l'ouvrage (contrôle de vibration, de niveau par laser).

## 7. Les méthodes chimiques

### 7.1. 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** ( $\text{CaO}$ ) ou éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) 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.

## 7.2. Quelques types de traitements chimiques

### Consolidation des sols à la chaux et au ciment

Il existe 3 types de traitement chimiques courant :

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

## 7.3. Les méthodes d'applications

### 7.3.1. Les améliorations des sols à la chaux

#### 7.3.1.1. Principe et objectifs

Elles permettent de mettre en oeuvre 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.

#### 7.3.1.2. 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

#### 7.3.1.3. Moyens mis en oeuvre

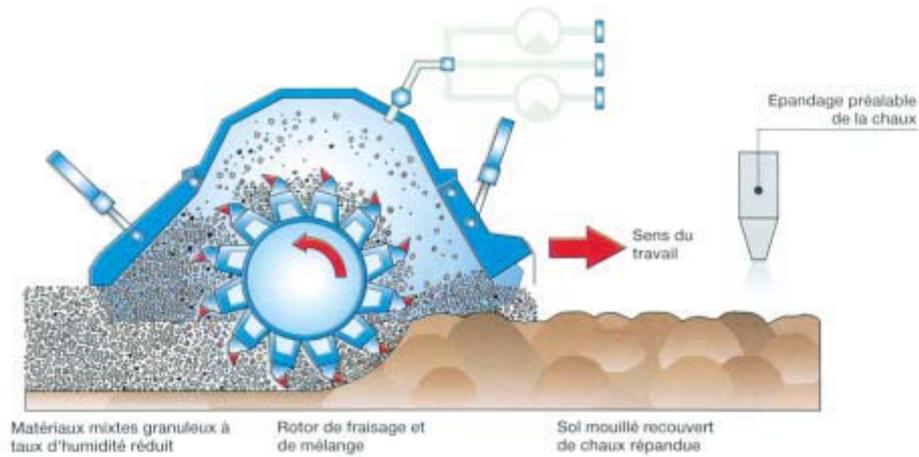
La mise en oeuvre de la chaux nécessite des engins idéals pour l'incorporation de chaux dans les sols mouillés,

### Composition

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

### 7.3.1.4. Phasage

#### Incorporation de la chaux préalablement répandue



Epandeur de chaux



### 7.3.2. Les améliorations des sols au ciment

#### 7.3.2.1.Principe et objectif

Cette technique de stabilisation au ciment a pour effet de rendre les sols plus résistants contre les sollicitations causées par la circulation et les facteurs climatiques.

#### 7.3.2.2.Application

La stabilisation de sols au ciment trouve son application tant pour les couches de surface que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous-couche de fondation ou de la sous-couche de routes et chemins de toute nature.

On l'utilise également pour d'autres surfaces de circulation, telles que :

- Les chemins ruraux, pistes cyclables ou chemins pour piétons,
- Les aires de trafic sur les aéroports,
- Les sites industriels,
- Les sols de halls,
- Les dalles de fondation,
- Les terrains de sport, etc.

Dans le secteur de la construction ferroviaire, la stabilisation des sols au ciment se pratique par exemple pour réaliser une plate-forme.

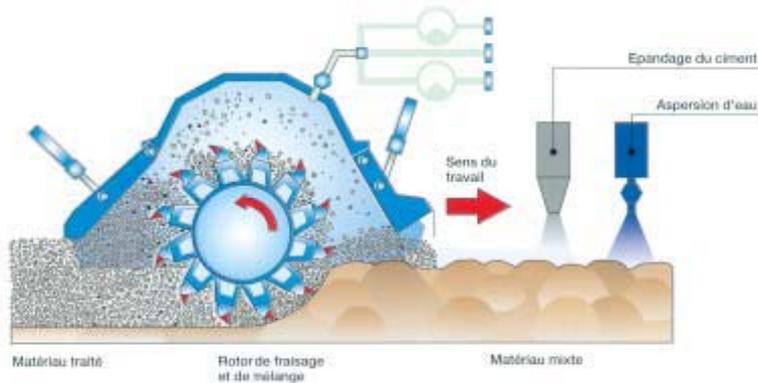
#### 7.3.2.3.Moyens de mis en oeuvre

La mise en oeuvre du ciment nécessite :

- Des épandeurs automoteurs pour le ciment
- D'un camion citerne pour asperger l'eau

### 7.3.2.4. Phasage

#### Épandage du ciment et injection de l'eau



Épandeur de ciment



Incorporation de ciment avec apport simultané d'eau par le WR 2500 dans un mélange d'enrobés, de sable et de granulat.



Moyens de mis en oeuvre

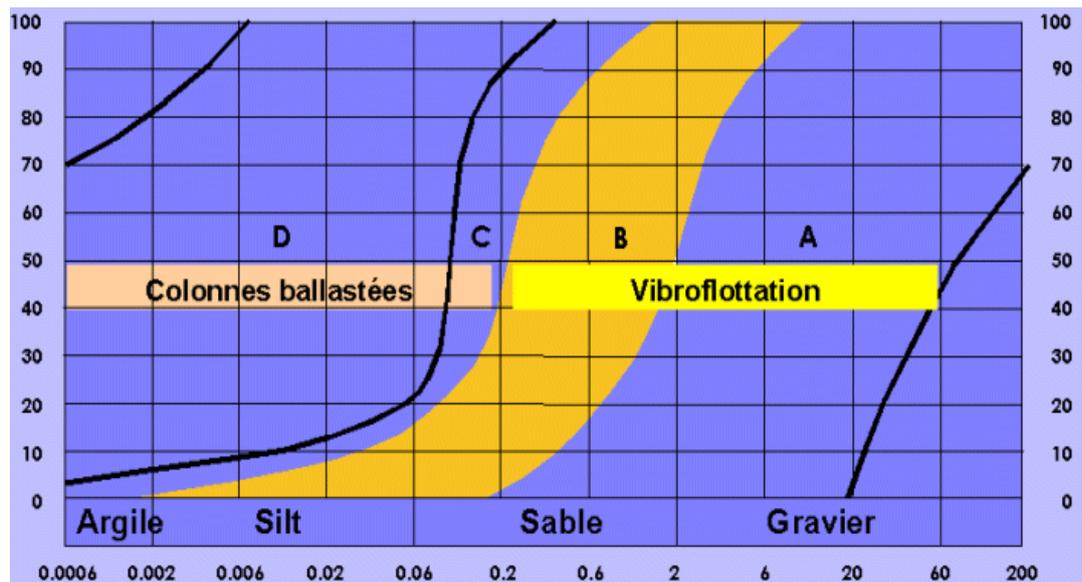


## 8. Le compactage du sol

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

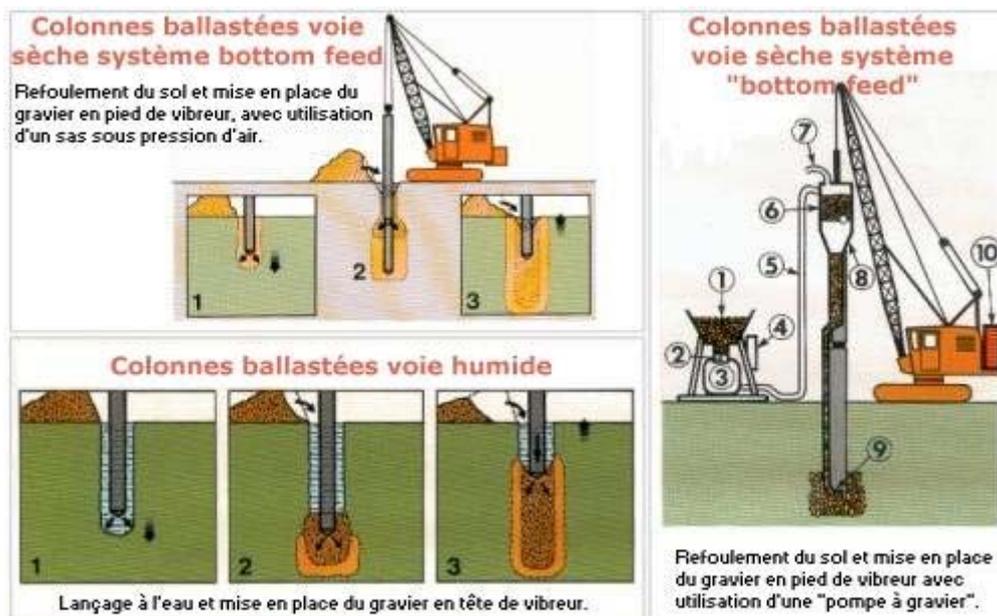
Pour quel type de terrain?

Tableau d'adéquation des procédés d'amélioration par vibration des sols en place en fonction de leur granulométrie



### 8.1. Colonnes ballastées

Schéma de principe du procédé



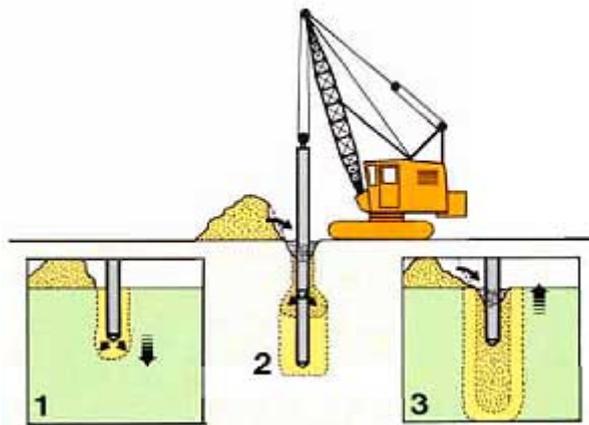
Cette technique est utilisée dans les sols **cohérents** tels **limons et argiles**. Sol tanche Bachy a récemment mis au point la machine SolVibro<sup>®</sup>, spécialement conçue pour les **colonnes ballastées**. Le dispositif de **forage** est composé d'un **tube prolongé en partie basse par un vibreur 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.

## 8.2. 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 lançage 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 (vibroflottation).



**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.

**MODE OPERATOIRE :** 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.



**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.

### 8.3. Méthodes par ondes de chocs ou vibrations

L'utilisation d'effet d'onde de choc ou de vibrations facilite la rupture des contacts intergranulaires, 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 :**

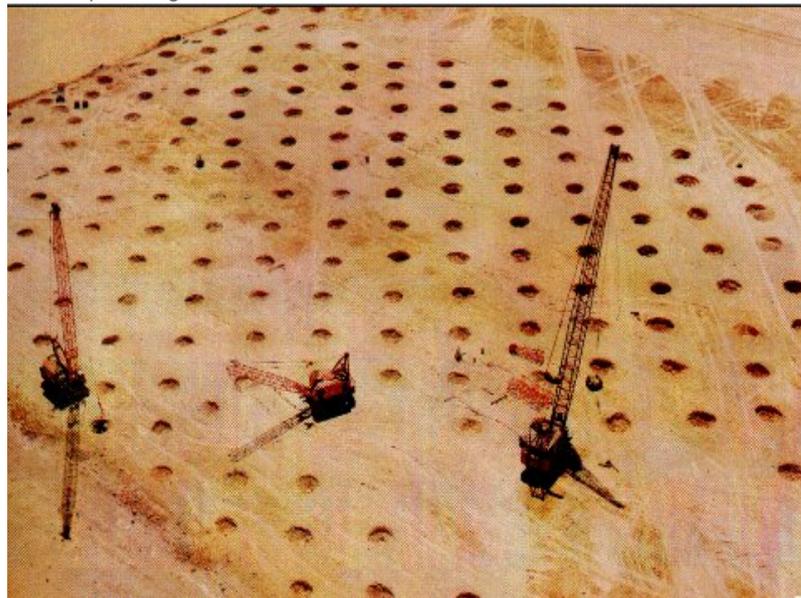
Le pilonnage intensif est obtenu par des chocs superficiels. Un pilon de 10 à 40 tonnes et d'une section de 4 à 6 m<sup>2</sup> tombe toutes les 30 secondes d'une hauteur de 14 à 40 mètres. Le résultat obtenu dépend de l'énergie mise en oeuvre. Le déroulement a lieu par passe successif (8 en général), 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.

Cette méthode s'applique sur des sols compressibles très variés : remblais en tout venant, remblais poubelliers, sable lâche, tourbes (limon) ...

Les phases de pilonnages provoquent souvent des surpressions interstitielles qui mettent un certain temps à se dissiper. (par filtration vers la surface). Il devient indispensable d'attendre la dissipation de ces surpressions avant d'effectuer une nouvelle phase, et parfois, d'installer un réseau de pompage afin de drainer les eaux de surface.

Le programme de pilonnage (énergie, nombre de phases, délai) s'établit à partir d'indications relatives au projet et au sol. La condition majeure étant la capacité du terrain à supporter des engins de travaux relativement lourds). Il est nécessaire pendant les travaux de suivre l'évolution du terrain afin d'éviter le soulèvement des sols voisins ou l'ébranlement de constructions voisines. Par exemple, cette méthode n'est pas applicable en site urbain.

Figure 9 - Chantier de pilonnage



### 8.4. Vibrocompactage

Cette technique est utilisée depuis les années trente. Elle consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante (figure 9). Cette vibration provoque une densification du matériau qui se traduit par l'affaissement du sol autour du vibreur.

Chantier de vibrocompactage



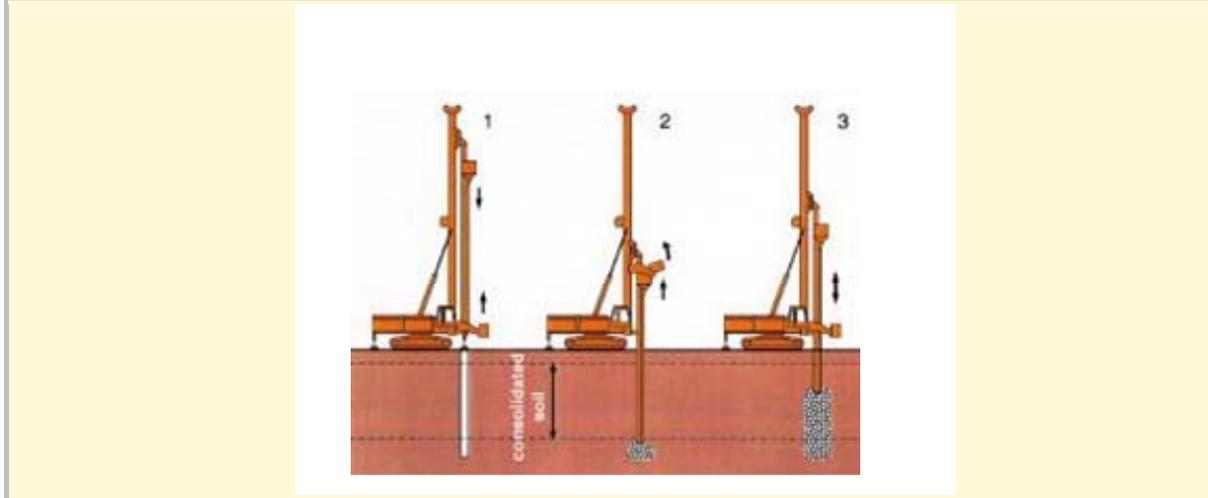
Les vibreurs actuellement utilisés comportent, à l'intérieur de l'aiguille vibrante, un ou plusieurs balourds entraînés par un moteur hydraulique ou électrique. Leur puissance est de l'ordre de 75 à 150 kW. L'appareil est suspendu à un engin de levage et s'introduit dans le sol sous l'effet de son propre poids et de la vibration, avec éventuellement un lancement à l'air ou à l'eau, comme dans le cas des colonnes ballastées (§ 1.3.3.1.). L'aiguille vibrante est descendue jusqu'à la base du sol à traiter, puis le vibreur est remonté lentement par une succession de mouvements verticaux. Le compactage est suivi en observant l'énergie consommée par le vibreur. L'opérateur peut modifier la fréquence des vibrations afin d'améliorer l'efficacité du compactage. On peut, dans certains cas, faire un apport de matériaux grenus, notamment pour jouer le rôle de drains en cas de séisme et lutter contre la liquéfaction des sables lâches. En fin de traitement, une finition de surface doit être réalisée, par réglage et compactage superficiel.

Des techniques voisines sont quelquefois employées : vibration de palplanches ou de profilés métalliques divers, par exemple.

∅

## 8.5. Compactage statique en profondeur

## - Principe du compactage statique en profondeur



On désigne par jet grouting un procédé de construction utilisant un jet de fluide à haute énergie cinétique pour déstructurer un terrain et le mélanger avec un coulis liquide.

Il ne s'agit donc pas exactement d'une technique d'injection, mais plutôt d'un procédé de mélange hydrodynamique terrain-coulis visant à former un « béton de sol » in situ dans la masse du terrain.

L'idée du jet grouting est née au Royaume-Uni à la fin des années 50. Différentes méthodes de jet grouting (jet simple, jet double, jet triple) sont utilisées en fonction de l'énergie hydrodynamique nécessaire pour détruire et mélanger le terrain avec un coulis liquide. Elles s'appliquent aussi bien à des traitements de masse que des traitements linéaires ou des inclusions, dans des sols meubles facilement ou difficilement injectables.

**Le jet grouting fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes physiques :**

- déstructuration du terrain par un jet à très grande vitesse,
- extraction d'une partie du terrain jusqu'à la surface par les fluides de jetting,
- incorporation d'un liant apporté par le coulis.

**Le traitement se déroule généralement ainsi :**

- réalisation d'un forage de petit diamètre (100 à 200 mm) sur la hauteur à traiter,
- dans ce forage, mise en vitesse d'un jet de fluide envoyé par une pompe à haute pression (plusieurs dizaines de MPa) à travers une ou plusieurs buses de petit diamètre (1 à 10 mm) placées sur un « moniteur » au pied d'un train de tiges de diamètre 70 à 100 mm,
- remontée lente des tiges, avec mise en rotation pour former une colonne de béton de sol.
- Pendant la phase jet, les volumes en excès du mélange sol-ciment (appelés « rejets ») doivent ressortir librement en tête de forage (sinon, l'excès de matériaux risque de

« claquer » le terrain et de créer des désordres au voisinage) et être évacués du chantier au fur et à mesure.

- Le résultat (diamètre, composition, résistance des colonnes) dépend des paramètres du traitement (vitesses de translation et de rotation des tiges, pressions et débit des fluides utilisés, dosage du coulis), des caractéristiques du terrain en place (nature, granulométrie, composition, compacité) et de la méthode employée (simple, double ou triple).



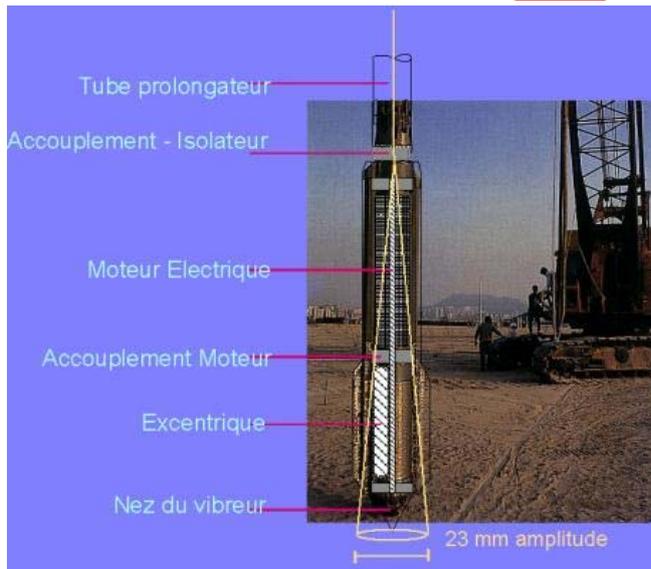
Le béton est livré par la toupie dans la pompe à béton



Réalisation du bétonnage



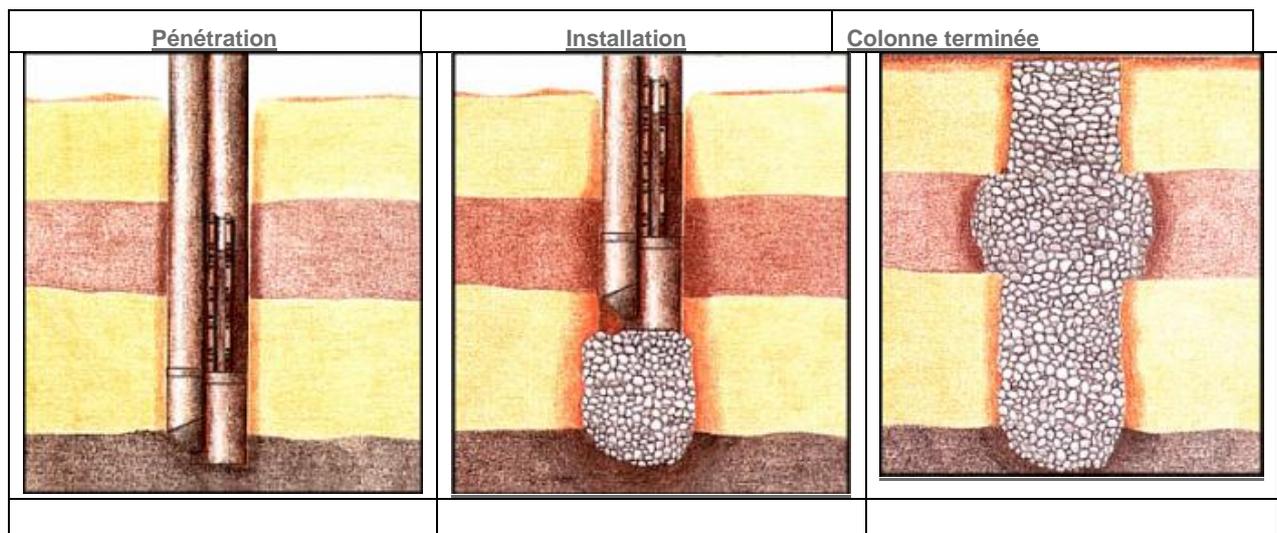
Fin du bétonnage



Fonctionnement d'un vibreur



Mise en La tête de la tarière





On nettoie le tube plongeur avant nouvelle utilisation

## LES PRINCIPALES MÉTHODES

### Jet simple

Dans ce procédé, le fluide du jet est le coulis lui-même, qui assure les trois fonctions de déstructuration, extraction et incorporation.

Une partie importante de l'énergie cinétique du jet est dissipée par frottement dans le terrain mis en suspension et les rejets formés deviennent parfois trop visqueux pour remonter librement jusqu'en tête de forage.

### Jet double

Si on protège le jet de coulis à très grande vitesse par un jet d'air annulaire, le rayon d'action du jet en face du même terrain se trouve considérablement augmenté par le cône d'air enveloppant.

Dans le procédé jet double, le rôle de l'air est d'améliorer les possibilités d'extraction du terrain en place par phénomène d'air lift.

### Jet triple

Dans le jet triple, les fonctions déstructuration et extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air séparément de la fonction d'incorporation du liant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques MPa) par une buse inférieure.

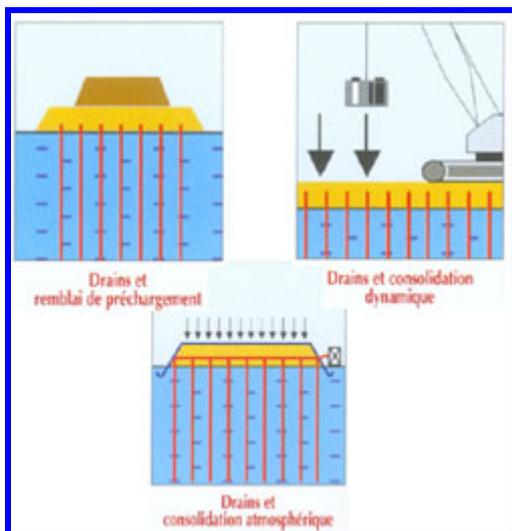
La pompe et le circuit haute pression utilisés en jet triple ne supportent que de l'eau, avec en contre partie la nécessité d'une pompe supplémentaire à basse pression pour le coulis et d'une ligne d'outils à triple tube

## 9. Drainage

### 9.1.drains verticaux

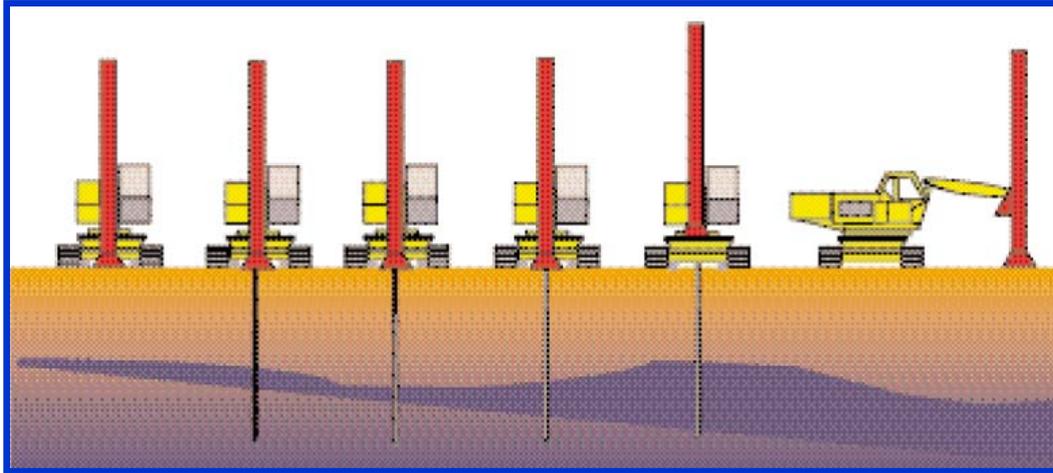


Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de préchargements. Il permet une consolidation plus rapide du sol.



Le drainage vertical s'applique aux terrains peu perméables et permet d'augmenter considérablement leur vitesse de consolidation.

Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration de sols saturés en eau (ex : terrains silteux ou argileux). La technique consiste à fonder verticalement dans le terrain, suivant un maillage déterminé, un drain préfabriqué. Au moment de sa mise en service, le drain véhicule l'eau du terrain jusqu'à la surface. La surcharge est apportée soit par un remblai de préchargement, soit par d'autres méthodes.



Les drains verticaux en plastique souple plats ou cylindriques, peuvent atteindre des profondeurs de 40 mètres ou plus. Selon la nature et la composition des terrains à traiter, les drains peuvent être également réalisés sous forme de colonnes de sable ou de granulats.

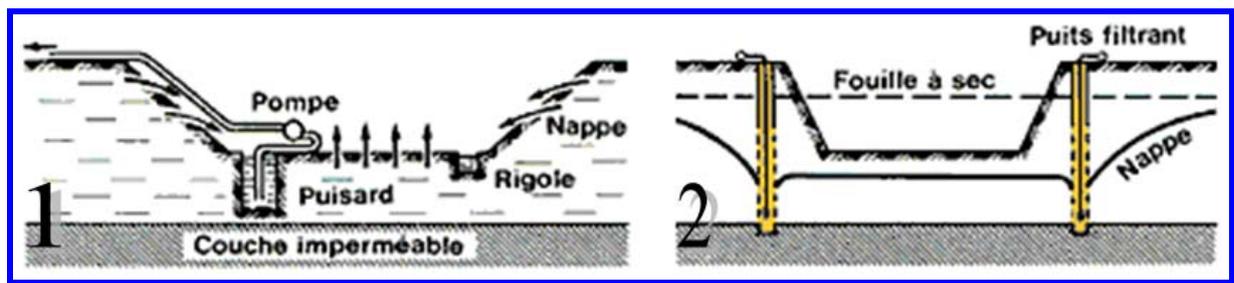
**NB :** Pour la création d'une autoroute au Maroc près de Rabbat plus de 630 km de drains ont été insérés dans le sol.

<b>Rabattement temporaire :</b>	<b>Rabattement permanent :</b>
<p>Il est utilisé dans le cas de fouille dans des terrains naturellement aquifères. Si la nappe a une faible alimentation ou une circulation lente, la cavité terrassée jouera elle-même le rôle de drain. Dans ce cas on réalise <u>des rigoles au fond de la fouille</u> qui canalisent les venues vers u ou plusieurs puisards équipés d'une pompe. On peut aussi tenter de <u>réduire les venues d'eau</u> par un drainage extérieur au chantier ou par le détournement des eaux superficielles. <u>Un rabattement préalable par pompage</u> est indispensable si la filtration de l'eau vers la fouille risque de compromettre la stabilité des talus en cours de creusement. Il est cependant nécessaire avant tout rabattement de <b>connaître avec précisions les points suivants</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le <b>rabattement</b> atteindra-t-il ou non le niveau d'un substratum imperméable ?</li> <li>- quelle est la <b>perméabilité</b> moyenne du terrain aquifère ?</li> <li>- dans le cas d'une hétérogénéité verticale de celui-ci, la variation de la perméabilité se fait-elle dans le sens croissant ou décroissant jusqu'au niveau exigé par le rabattement ?</li> </ul>	<p>Il peut être réalisé par drainage. Ce procédé a déjà été évoqué pour le traitement des mouvements de terrain sur versant. Les techniques sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>les pierrées ou saignées</b> sont des tranchées, tracées selon la ligne de plus grande pente, pénétrant profondément dans un talus ou un versant naturel et remblayées en pierres sèches.</li> <li>- <b>les drainages par forages horizontaux</b> sont applicables si le terrain est suffisamment cohérent. Ils sont équipés d'un tube métallique ou plastique, trépointé dans sa partie supérieure.</li> </ul>

## 9.2. Drainage, rabattement de nappe

Au sens du spécialiste, un rabattement selon les règles de l'art assure trois conditions :

- Non entraînement des fines,
- Fond de fouille sec,
- Fond et talus stables.



1 : Une première façon consiste à utiliser une pompe de surface aspirant l'eau arrivant dans un puisard, soit dans le coin d'une fouille ouverte, soit en fond de fouille blindée. Dans ce cas, les limites sont très vite atteintes : l'eau entraîne les fines du terrain, talus et/ou fond de fouille sont instables.

2 : Le pompage dans une nappe entraîne un abaissement de sa surface libre et une modification du champ d'écoulement : on opère un rabattement de nappe. C'est un procédé de construction simple et économique.



Ce procédé, simple, concerne les sols ayant une faible cohésion et des fortes teneur en eau.

Le drainage de ces terrains va permettre une accélération du tassement naturel du sol par son propre poids. La plupart du temps, cette opération est irréversible. Sur le terrain, la réduction de la teneur en eau peut s'effectuer : par des barrières étanches en amont de la zone de construction tels que des rideau de palplanches, des parois moulées, des drains subhorizontaux... par un réseau de puits de pompages permettant un rabattement suffisant du niveau piézométrique de l'aquifère.

L'eau dans une fouille peut provenir des eaux de ruissellement extérieures et de celles survenant par les parois et le fond de la tranchée.

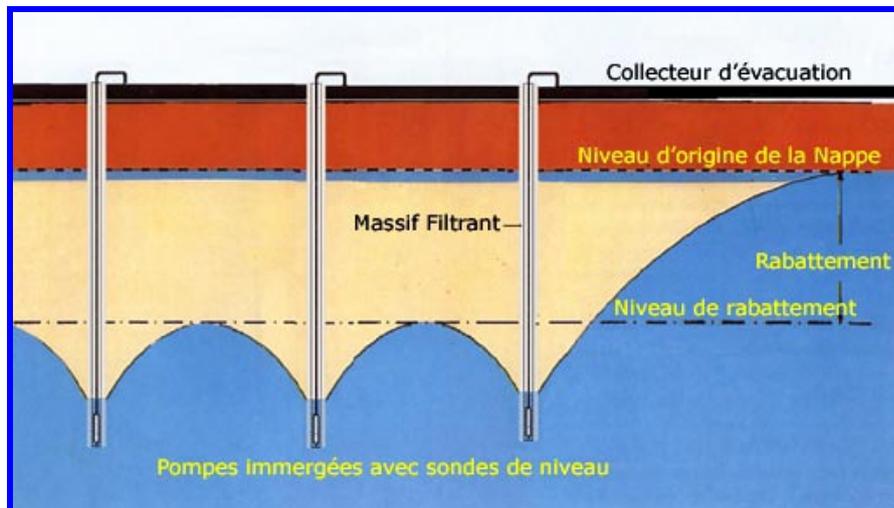
- On se protège des premières en ceinturant la crête de fouille par des rigoles qui évacuent les eaux à une distance convenable des travaux (vers une bouche d'égout quand on est en site urbain).
- Les eaux provenant des infiltrations ou des nappes phréatiques sont captées ou détournées dès leur arrivée dans la tranchée et recueillies dans des rigoles qui l'acheminent vers des **puisards** de rassemblement et de pompage.

En cas de faible infiltration d'eau dans le fond de la fouille, on peut le bétonner, ce qui a pour effet de diminuer l'arrivée d'eau par celui-ci et qui peut éviter le délayage du sol par les eaux provenant des pluies ou des parois. Ceci est valable surtout pour les petits travaux.

Quand le drainage des fouilles par rigoles, par puisards de rassemblement et par pompage est inefficace au dessous de la nappe aquifère, il existe d'autres méthodes qui consistent à pomper directement l'eau dans la nappe.

La quantité d'eau qui s'écoule vers une fouille de dimensions données ainsi que la méthode la plus appropriée au drainage, dépend essentiellement de la perméabilité moyenne des terrains environnant.

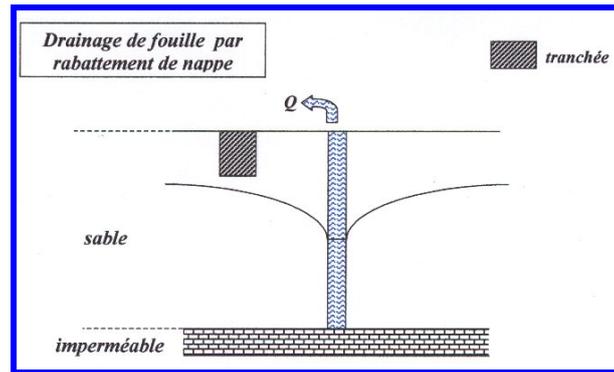
Si l'on veut obtenir des résultats satisfaisants aux moindres frais, il faut que le procédé de drainage tienne compte à la fois de la perméabilité du sol mais aussi de la profondeur de la fouille sous le niveau piézométrique.



### Rabattement de nappe

Cette technique est employée en France et à l'étranger dans de nombreux cas d'assèchement de fouilles en terrains alluvionnaires.

On abaisse le niveau d'une nappe souterraine au dessous de celui où doit être fondé l'ouvrage de façon à permettre son exécution sans avoir à effectuer d'épuisement dans les fouilles elles même.



Cette technique est particulièrement recommandée quand l'épuisement direct des fouilles est susceptible de compromettre la stabilité des talus et de leurs parois.

On utilise des **puits filtrants** dont les caractéristiques et l'espacement est fonction du cas considéré.

Selon les méthodes de rabattement, suivant les débits et dénivelés à obtenir, les pompes sont généralement :

- Soit des pompes classiques soit des pompes à vides qui assurent le fonctionnement d'un élément de rabattement ou de plusieurs à la fois.
- Soit des émulseurs,
- Soit de pompes immergées directement dans ces éléments.

Il est nécessaire de réunir préalablement à l'exécution des travaux, soit par des reconnaissances du sol, soit par des **essais de pompage**, soit par la conjonction de ces deux procédés, les données indispensables sur la perméabilité du sol, le niveau des nappes aquifères, sur les variations piézométriques, sur la température et la qualité de l'eau.

Sauf circonstances locales particulières la côte de rabattement doit être inférieure, d'au moins 40cm à celle du fond de la fouille.

Dans certains cas, il est nécessaire de ne pas laisser la nappe s'abaisser en dehors de la zone de fouille à cause de culture ou de puits exploités voisins. On procède alors à une réalimentation ou à la mise en place d'un écran étanche.

### Les puits filtrants



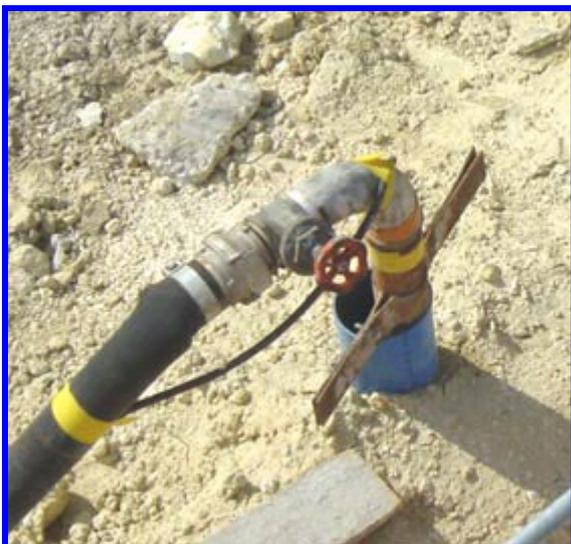
On réalise des drainages par pompage dans des rangées de puits filtrants.

Chaque puits est muni d'un tubage de 20 cm de diamètre, percé de trous et pourvu d'une crépine.

L'eau est pompée hors du tubage au moyen d'un tuyau d'aspiration de 15 cm de diamètre. L'espacement des puits varie de 12m pour les terrains très perméables à 6m pour les terrains peu perméables. Les extrémités des puits sont reliées entre elles par un collecteur qui conduit l'eau à la pompe.

Ce procédé est appelé procédé SIEMENS, il n'est efficace que dans le cas de terrain à perméabilité moyenne à forte.

### Les puits ponctuels



Ce terme désigne l'extrémité inférieure, perforée, d'un tube de 50 à 60 mm de diamètre, de longueur généralement égale à un mètre, qui sert à la fois de tubage et de tuyau d'aspiration.

Les puits ponctuels sont mis en place par lançage à des intervalles de 1 ou 2 m.

C'est le procédé employé pour le drainage de tranchées étroites.

On pompe sur une rangée de puits ponctuels située sur l'un des coté de la tranchée. Il faut que sa profondeur soit très inférieure à la profondeur maximum de rabattement que permettent d'atteindre les puits ponctuels. Si ce n'est pas le cas on met une deuxième rangée de puits de l'autre coté de la tranchée.

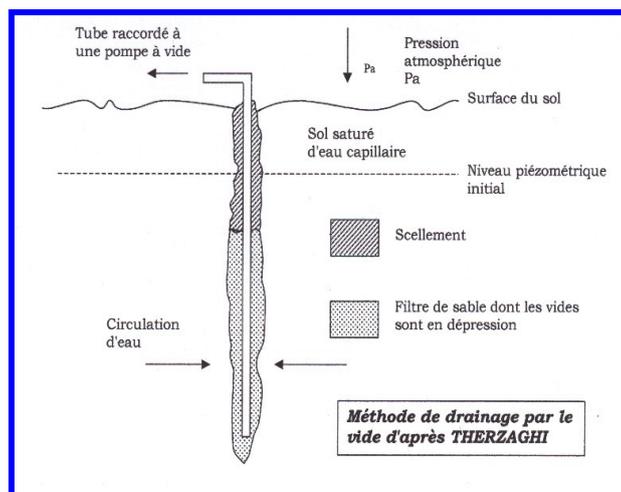
Cette profondeur maximale de rabattement par pompage de puits filtrants ou ponctuels est d'environ 5 à 6m.

On installe généralement une pompe à amorçage automatique tous les 150 à 200m le long de la rangée de puits ponctuels.

### Drainage par le vide

quand le diamètre efficace moyen du sol est inférieur à 0.05mm environ, les méthodes précédentes ne sont pas toujours efficaces, l'eau étant retenue dans les vides du sol par des forces capillaires.

On peut cependant réaliser la stabilisation de sol à éléments très fins en faisant régner le vide dans les filtres qui entourent les puits.



Avant établissement du vide la surface de la couche à éléments fins et le sol entourant le filtre sont soumis à la pression atmosphérique.

Après établissement du vide, la pression qui s'exerce sur le sol entourant le filtre est pratiquement nulle alors que celle qui s'exerce à la surface est toujours égale à la pression atmosphérique.

Cette différence de pression provoque l'expulsion de l'eau vers les filtres jusqu'à équilibre de la pression entre les filtres et la surface.

La résistance du sol augmente simultanément d'une quantité égale à  $\mathbf{Pa} \cdot \tan \phi$  où  $\phi$  est son angle de frottement interne et  $\mathbf{Pa}$  pression atmosphérique.

La différence de pression est maintenue par des pompes (pompes à vide), placées tout les 150m, le long de chaque rangée de puits ponctuels espacés de 0.9m. Les pompes à eau en raison de la faible perméabilité de sol fonctionnent par intermittence.

Cette technique ne doit être utilisée avec prudence ; lorsqu'un sol a été drainé par le vide, ces particules sont maintenues les unes aux autres par une pression effective égale à la différence entre la pression atmosphérique et la pression résiduelle dans les puits, mais les vides sont totalement remplis d'eau.

Par conséquent un sol peu compact, un sable bouillant, un choc brusque (tir de mines, **battage de pieux**) peu entraîner un effondrement de la structure du sol accompagnée d'une " **liquéfaction spontanée** ".

Le matériel affecté aux épuisements (pompes, moteur, transformateur, câbles électriques etc..) doit comprendre des engins de secours permettant de maintenir ces épuisements de façon continue pour assurer la sécurité des travaux ; du personnel et de l'ouvrage.



Pompe

### **Drainage par le gel**

Si la partie supérieure d'une masse de *sol saturé* à grains très fins, se trouve exposé à une température inférieure au point de congélation, l'eau se retire de la partie inférieure et s'accumule dans la partie supérieure, où elle participe à la formation d'une couche de glace. La poussée d'écoulement exercée par l'eau au cours de son déplacement de bas en haut, consolide la partie au-dessous de la zone de congélation.

Cette zone est soumise à un drainage par le gel.

Pour un ouvrage souterrain comme une canalisation (exécutée par fonçage) cela consiste à solidifier le sol, autour du gabarit d'exécution, sur une certaine épaisseur, par injection successive de deux produits chimiques de nature différente réagissant l'un sur l'autre dans les vides du sol en formant un gel insoluble (sorte de liant dur et relativement imperméable).

Dans des sables fins en provenance de lentilles on peut on peut procéder à une consolidation des terrains par injection de gels de silice, additionnées de bicarbonate. Les gels de silice (une sorte de silice amorphe artificielle) résultent de l'action d'un acide sur un silicate alcalin dissous, ils sont doués de propriétés absorbantes souvent mises à profit, comme c'est le cas pour la consolidation d'un sol. On procède aussi quelques fois à une injection mixte de ciment et de gel de silice.

Avec l'utilisation de la atmosphérique ce procédé est coûteux. Il est généralement inefficace chaque fois que le sol contient des couches de faibles perméabilités, comme par exemple, les silts fins et les argiles dont la faible perméabilité empêche leur imprégnation dans des délais raisonnable.

Les principales conditions auxquelles l'installation de congélation doit satisfaire (nombre de tubes congélateurs, puissance de l'installation frigorifique, etc.), la position et les dimensions de l'écran pour lequel la congélation doit être effective, sont fixé par le **C.P.S.** (cahier des prescriptions spéciales).

La congélation d'un sol, d'emploi d'ailleurs assez limité est un procédé qui demande beaucoup d'expérience dans l'exécution. Le contrôle de la congélation doit être permanent. C'est ainsi que dès le départ du chantier, on doit procéder au prélèvement d'échantillons de matériaux afin de constater l'efficacité des injections faites avec les prescriptions du C.P.S et quel en est le résultat.

Il arrive parfois que les quantités de produit varient du simple au double, voir plus, à cause de l'hétérogénéité des terrains rencontrés. C'est un élément nouveau qui peut bouleverser l'économie d'un contrat passé avec l'entreprise. D'où la nécessité d'effectuer au préalable des travaux de reconnaissance de sols, avec prélèvement d'échantillons intacts et relevés piézométriques. L'entreprise doit également avoir connaissance du **coefficient de perméabilité (K)** pour chaque nature de sol rencontré.

## 10. traitement électrique du sol

● **Électro-osmose et electroconsolidation** : procédés coûteux et peu employés, ce système est encore en phase expérimentale. Cette méthode s'applique aux sols argileux et pour lesquels aucune autre méthode de consolidation n'est applicable. Le principe est basé sur la capacité de l'eau à migrer dans une argile sous l'effet d'un champ électrique. Le résultat est analogue à la loi de Darcy régissant l'écoulement de l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique.

Les tassements acquis avec cette méthode sont faibles, et on considère qu'on applique au terrain une consolidation temporaire, utilisée pendant la durée des travaux lorsque des rabattements ne sont pas applicables.

● Lorsque l'eau filtre à travers un milieu poreux, tout se passe comme si elle entraînait des charges positives : il apparaît une différence de potentiel entre l'amont et l'aval. **Le drainage par électro-filtration** consiste à établir un gradient de quelques volts ou dizaines de volts par mètre, qui est l'équivalent d'un gradient de pression de quelques mètres ou dizaines de mètres par mètre parcouru, valeurs très supérieures aux valeurs naturelles. Le drainage est grandement accéléré. Les filets d'eau peuvent être dirigés à volonté, par exemple à l'inverse de leur écoulement normal, pour les détourner d'une fouille.

● Le procédé de **l'échange de base** consiste à prolonger les effets de l'électro-filtration par l'utilisation de cathodes d'aluminium. La perte de masse constatée

dans celles-ci correspond probablement à une modification de la constitution physico-chimique du terrain qui interdit un afflux ultérieure de l'eau. Les qualités du sol sont améliorées et se traduisent par une réduction de la teneur en eau, un accroissement de la cohésion, un abaissement de la limite de liquidité et de la prévention du gonflement du au gel.

## 11. Thermique et électrique

### 11.1. 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.

### 11.2. La congélation



C'est une technique de consolidation provisoire des terrains aquifères. (Pas nécessairement saturés), permettant ainsi de creuser des puits relativement profonds. 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.

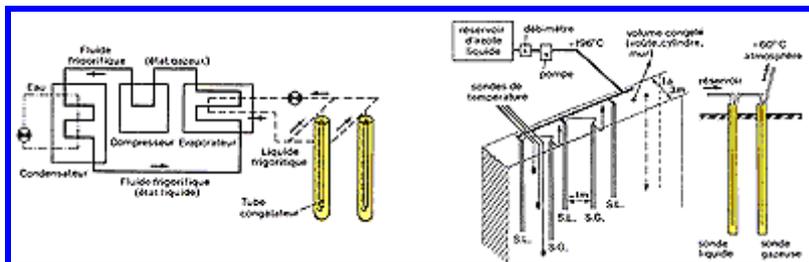
La congélation des terrains aquifères instables est un procédé ancien, à caractère provisoire, employé pour le creusement de fouilles, de puits ou de galeries, qui permet également le "sauvetage" d'ouvrages à la suite d'incidents (renard, débouillage). Elle rend le sol étanche et résistant.

Le schéma de principe du procédé est le suivant:

- exécution de sondages encaissant l'ouvrage à construire, sur la hauteur des couches aquifères, espacement des forages voisin de 1 m,
- mise en place de tubes réfrigérants (sondes): fermés à leur base, ils contiennent des tubes plus petits ouverts à leur partie inférieure,
- mise en circulation d'un liquide à basse température arrivant par le tube intérieur et remontant dans l'espace annulaire en empruntant la chaleur au terrain encaissant,
- congélation progressive des couches autour des sondes, obtention d'une paroi de terrain gelé dur et imperméable,
- maintien de cette paroi durant les travaux de génie civil.

Il existe plusieurs méthodes:

- la méthode ouverte, à l'azote liquide ;
- la méthode fermée, à la saumure ;
- la méthode dite combinée ;



Méthode ouverte et méthode fermée

### La méthode ouverte

Le liquide réfrigérant est l'azote liquide. Il est transporté au chantier par des camions-citernes spéciaux où il est maintenu à une température de  $-196^{\circ}\text{C}$  sous une pression de 5 bars environ.

Cette pression sert à assurer la circulation de l'azote dans les sondes. A l'aval de la dernière sonde une vanne libère l'azote devenu gazeux dans l'atmosphère, à une température de  $-60^{\circ}\text{C}$  environ. Le rejet dans l'atmosphère de l'azote gazeux n'est pas une nuisance, même en ville.

Le rendement cryogénique est de 39 kcal/l pour la chaleur spécifique de vaporisation et de 27 kcal/l pour le passage de  $-196^{\circ}\text{C}$  à  $-60^{\circ}\text{C}$ .

La mise en froid du terrain encaissant est rapide: 2 à 3 jours. Ensuite, on assure simplement l'entretien. La résistance du sol ainsi congelé est généralement élevée: écrasement sous 30 à 50 bars en compression simple.

L'inconvénient principal est le coût élevé de la fourniture en azote liquide. La méthode est bien adaptée aux chantiers de courte durée.

### La méthode fermée

Un circuit frigorifique primaire, au moyen de compresseurs et de condensateurs, liquéfie le fluide. En se vaporisant, ce fluide assure le refroidissement du liquide réfrigérant qui circule dans les sondes, en circuit fermé.

Le fluide primaire peut être l'ammoniaque ou le fréon.

Le liquide réfrigérant est généralement une saumure ayant une température d'utilisation variable entre  $-25$  et  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Dans ce cas, les sondes ont un diamètre plus grand qu'avec l'azote. Cependant, la mise en froid demande souvent 3 à 4 semaines.

### La méthode combinée

Elle consiste à rendre complémentaires les méthodes précédentes, en utilisant les mêmes tubes congélateurs. On combine ainsi une mise en froid rapide (azote) et un entretien économique (saumure).

Souvent, il est nécessaire d'assurer un traitement préalable du terrain par injection. Il s'agit de faire un traitement léger qui a pour objet de fermer les vides ou les circulations importantes, et de consolider un peu le sol. L'avantage est double : économie de frigories (moins de pertes) et sécurité accrue.



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.

## 12. 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 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.

Tableau - Comparaison des méthodes de traitement des sols grenus						
Méthodes	Qualification des entreprises	Délais		Effet sur l'environnement	Dépenses d'énergie	Coût relatif
		d'exécution	d'action			
Préchargement	★★	★ à ★★★	★★★ à ★★★★★	★	★ à ★★★	★
Vibrocompactage	★★★★	★ à ★★	★	★★	★★	★★★ à ★★★★★
Géotextile	★	★	★	★	★	★ à ★★
Pilonnage	★★	★	★	★★★ à ★★★★★	★★	★★
Compactage statique en profondeur, colonnes de sol traité	★★★★	★ à ★★	★	★★	★★	★★★ à ★★★★★
Congélation	★★★★	★★★ à ★★★★★	★	★ à ★★★	★★★★	★★★★

★ faible ★★ moyen ★★★ important.