

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة يحي فارس – المدية –

Université Yahia Farès – Médéa –

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil



**THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT LMD**

**En : Génie Civil**

**Spécialité : Ingénierie de Constructions et Risques Géotechniques**

**Par : GADOURI Hamid**

**Thème**

**Influence de la présence des sulfates sur le traitement des  
sols argileux par des ajouts minéraux**

Soutenue publiquement le : 24 / 05 / 2017

Devant le jury composé de:

DEBIEB Farid	Professeur	Université de Médéa	Président
BAHAR Ramdhan	Professeur	Université de Bab Ezzouar	Examineur
KHEMISSA Mohamed	Professeur	Université de M'Sila	Examineur
ZITOUNI Zein El-Abidine	Maitre de Conférences (A)	Université de Blida	Examineur
HARICHANE Khelifa	Maitre de Conférences (A)	Université de Chlef	Directeur de thèse
GHRICI Mohamed	Professeur	Université de Chlef	Co-Directeur de thèse

# Chapitre 1

---

## Techniques d'Amélioration des Sols Instables

- 1.1. *Introduction*
- 1.2. *Les mauvais sols*
- 1.3. *Techniques d'amélioration des sols*
- 1.4. *Conclusions*

## 1.1 Introduction

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours de ces dernières décennies. D'une part le développement impose de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels...etc. D'autre part le sol, matériau peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction que l'on cherche, où les raisons souvent économiques nous conduisent à utiliser des sols de qualité médiocre dont nous devons les améliorer.

Il en a résulté le développement d'un très grand nombre de techniques destinées à améliorer les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou apportés d'ailleurs. Nous pouvons donc distinguer deux grandes catégories de techniques à savoir: celles où la structure du sol est améliorée par un additif, un liant, ou modifiée par réduction des vides entre les grains. Il y a aussi celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique: ce sont des techniques de renforcement des sols.

Dans ce chapitre et en premier lieu, une étude bibliographique sera développée sur les trois principales familles d'argiles. En deuxième lieu, les différentes techniques d'amélioration et de renforcement des sols instables seront aussi présentées.

## 1.2 Les mauvais sols

Le sol supporte les fondations d'ouvrages, sert comme matériaux de construction (barrages, remblai), peut comporter des ouvrages souterrains (tunnels), reçoit des matériaux à stocker (déchets industriels et nucléaires) et sert à extraire des minéraux et autres ressources de production de l'énergie et des matériaux. Il est donc très important de se renseigner des caractéristiques des mauvais sols (principalement les sols argileux et organiques qui sont la cause d'instabilité des structures projetées) pour qu'on puisse les améliorer.

### 1.2.1 Les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à  $5\mu\text{m}$ , composées pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à  $0,2\text{ mm/h}$ ), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert. Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites

lorsqu'elles absorbent de l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol.

Les argiles constituent en général une assise acceptable lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

### **1.2.1.1 Minéralogie des argiles**

Les sols en général, sont constitués principalement des minéraux silicatés (le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas), des carbonates, des oxydes et des hydroxydes métalliques. Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres, de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns et d'agrégats correspondant à des fragments de roches (Cabane, 2004).

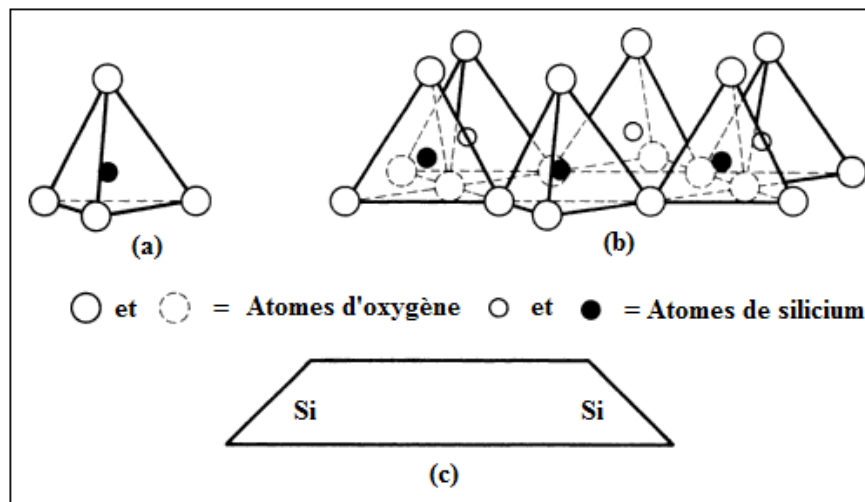
Le quartz est une forme cristalline très commune de la silice ( $\text{SiO}_2$ ). Sa dureté et sa très faible solubilité en font un élément résistant à l'altération, il est donc très présent dans les sols. On peut également retrouver dans les sols d'autres minéraux appartenant à la famille des silicates: feldspaths, silico-aluminates potassiques, sodiques, ou calciques de la famille des tectosilicates, ou micas, de la famille des phyllosilicates, minéraux plus sensibles à l'altération qui sont donc moins présents dans les sols (Le Borgne, 2010). D'après Le Pluart (2002), les phyllosilicates sont également appelés silicates lamellaires.

Il existe plusieurs définitions des argiles. Le terme « argile » n'aura pas le même sens en mécanique des sols, mécanique des roches, ou en physique du sol; il désigne, selon les cas, un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Sous cette appellation générique se cache donc une grande variété de matériaux, dont le point commun est de posséder des minéraux argileux, qui sont de nature bien précise (à base de silicates) et dont la structure confère à ces matériaux comparativement à d'autres types de sols ou de roches des propriétés bien spécifiques quant à leur interaction avec l'eau (Kouloughli, 2007).

### **1.2.1.2 Structure moléculaire microscopique des argiles**

Les argiles sont issues de la dégradation des minéraux suite à l'altération qui appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ces minéraux argileux sont caractérisés par leur structure en

feuillet. Le réseau cristallographique des phyllosilicates est basé sur un assemblage de tétraèdres ( $\text{SiO}_2$ ), chaque tétraèdre partageant trois sommets avec les tétraèdres voisins. L'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan est partagé avec un octaèdre  $\text{Al}(\text{OH})_6$ . C'est l'association de couches tétraédriques et de couches octaédriques qui constituent le motif (ou feuillet) du réseau cristallin de chaque argile (Le Borgne, 2010). Le feuillet en tétraèdre est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un atome unique de silicium. Le réseau est formé par l'arrangement hexagonal des tétraèdres (Fig. 1.1).

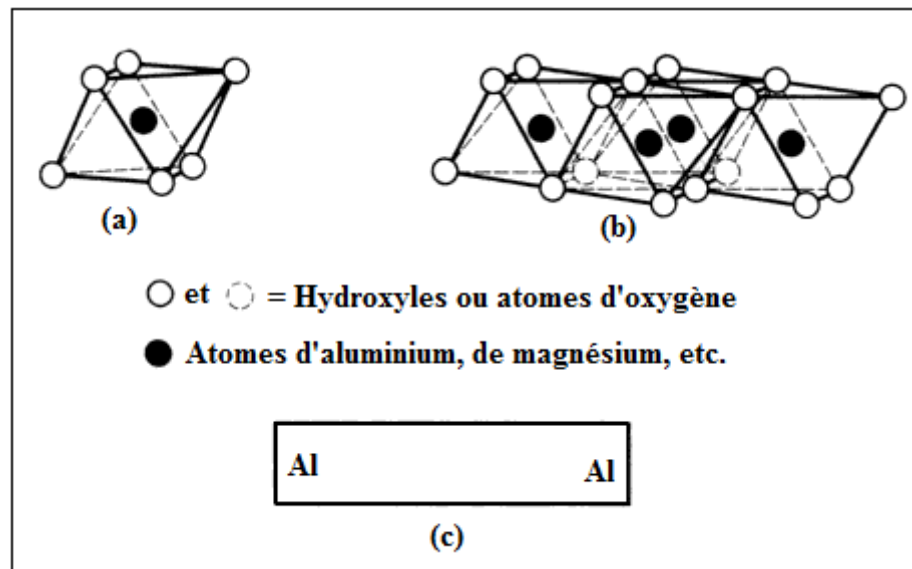


**Fig. 1.1** — Structure du tétraèdre, (a): Tétraèdre de silice (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet de silice (Lambe, 1953).

Le feuillet en octaèdre est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément. Le réseau est formé par l'arrangement linéaire des octaèdres (Fig. 1.2).

La microstructure des phyllosilicates est basée sur les anions  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$  qui occupent les sommets d'assemblages octaédriques ( $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$ ) et tétraédriques  $\text{O}^{2-}$  (Caillère et al., 1982). Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables ( $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet.

L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par  $\text{Al}^{3+}$  (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique.



**Fig. 1.2** — Structure de l'octaèdre, (a): octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Grim, 1959), (b): vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (Grim, 1959), (c): schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (Lambe, 1953).

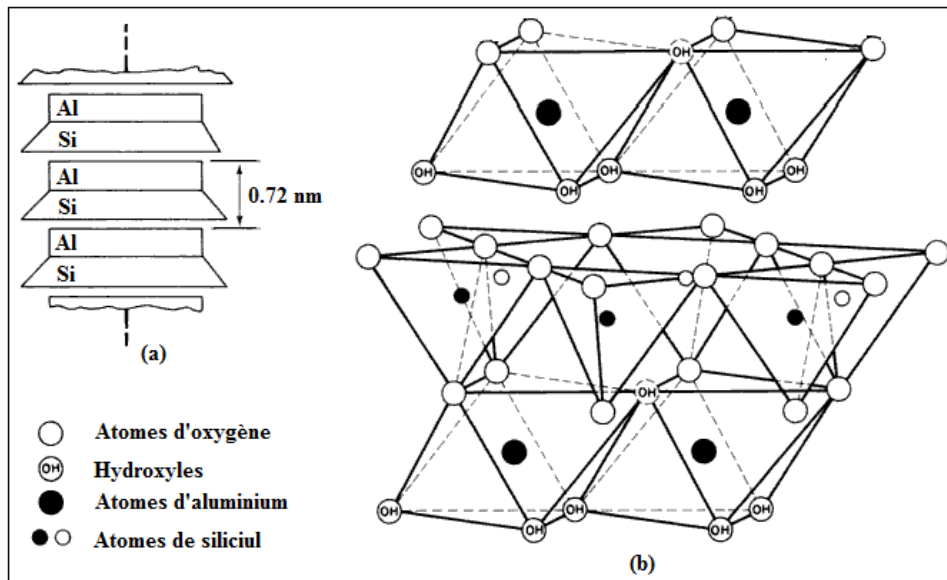
Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques ( $\text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$ ) et /ou octaédrique ( $\text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}$ , ou  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Li}^+$ ). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs (Kouloughli, 2007).

### 1.2.1.3 Principales familles des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont constitués de deux feuillets de base qui sont empilés d'une façon caractéristique et qui comportent certains cations dans les feuillets en tétraèdre et en octaèdre. Dans le domaine de l'ingénierie, on ne relève toutefois que les minéraux argileux les plus courants contenus dans les sols dits argileux. Nous allons donc détailler beaucoup plus les trois familles des minéraux argileux les plus importantes et les plus dominantes.

#### ○ *Les kaolinites*

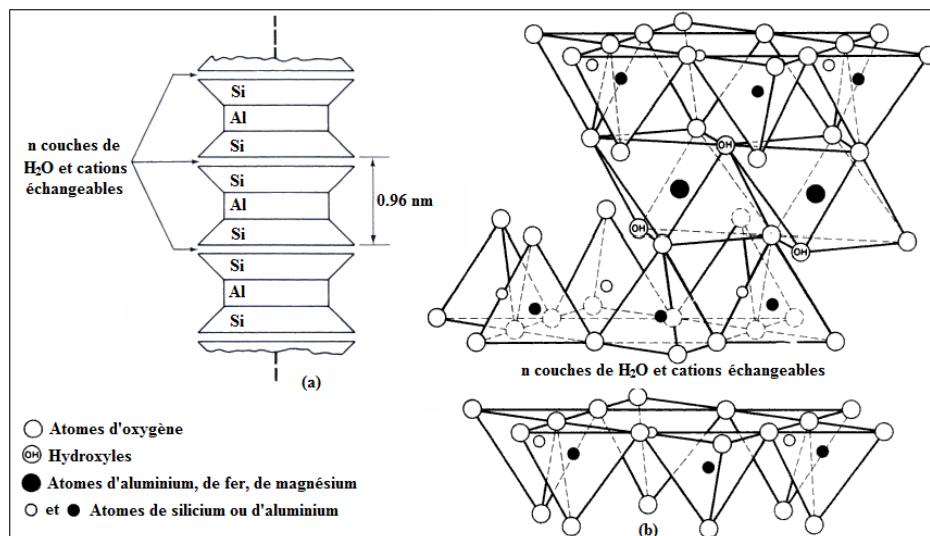
La kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets (silice) et de feuillets en octaèdre d'aluminium ou de gibbsite (Holtz and Kovacs., 1981) (Fig. 1.3). A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, on considère la kaolinite comme un minéral argileux 1:1 sachant que son épaisseur est de 7 Å. Chaque feuillet est relié à l'autre par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets. La kaolinite est connue par la formule chimique suivante :  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  (Cabane, 2004).



**Fig. 1.3** — (a): Schéma de la structure de la kaolinite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (Grim, 1959).

○ *Les montmorillonites*

La montmorillonite est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite). Elle est désignée comme un minéral 2:1 (Holtz and Kovacs., 1981) (Fig. 1.4). Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer.



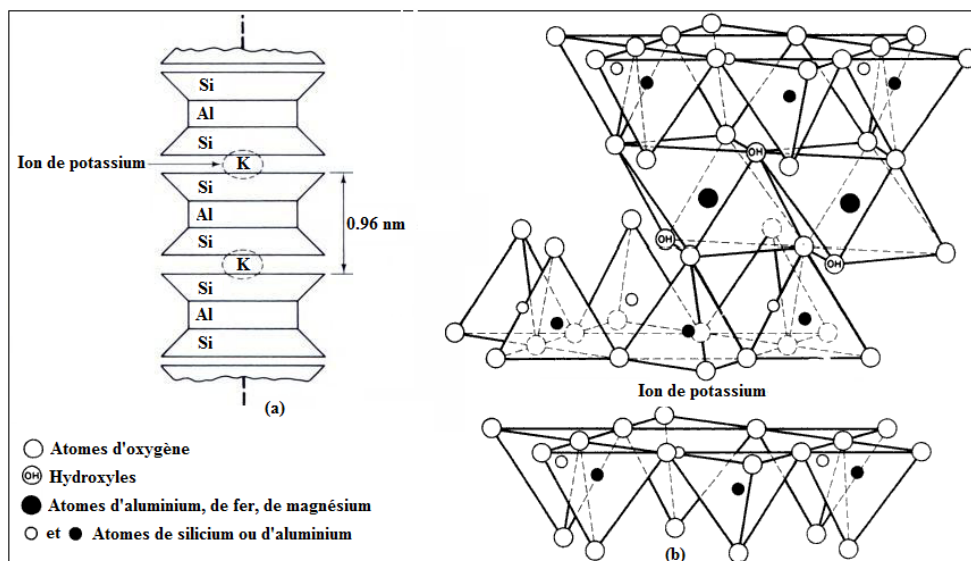
**Fig. 1.4** — (a): Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (Grim, 1959).

La compensation des charges négatives excédentaires s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T:O:T) d'un cation ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ). Ces cations interfoliaires ont la particularité de pouvoir être solvatés par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal, l'espace interfoliaire passe de 14 à 17 Å en

présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et de 13 Å jusqu'à l'infini en présence de  $\text{Na}^+$ . Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres, la montmorillonite a pour une formule chimique  $[(\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$  (Cabane, 2004). D'après Luckham and Rossi, (1999), le phénomène d'hydratation interfeuille est responsable de l'augmentation de la distance entre les feuillets (distance basale).

#### ○ Les illites

L'illite est une autre composante importante des sols argileux. Comme la montmorillonite, elle a une structure 2:1. En effet, la seule différence entre cette composante et celle de la montmorillonite c'est que l'espace interfoliaire de l'illite est rempli par un cation de potassium qui crée un lien très fort entre les couches qui la constitue (Holtz and Kovacs., 1981). Un quart des atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. La compensation des charges négatives s'effectue par l'introduction dans l'espace interfoliaire d'un cation  $\text{K}^+$ . On peut aussi rencontrer, dans le feuillet de silice, certaines substitutions isomorphes de silicium par l'aluminium (Fig. 1.5). La composition minéralogique de l'illite a pour formule chimique  $[\text{K}_{2-x}(\text{Al}, \text{Fe})_{4-y}(\text{Fe}, \text{Mg})_y(\text{Si}_{6+x}\text{Al}_{2-x})\text{O}_{20}(\text{OH})_4]$  (Cabane, 2004).



**Fig. 1.5** — (a): Schéma de la structure de l'illite (Lambe, 1953), (b): vue isométrique de la structure atomique de l'illite (Grim, 1959).

### 1.2.2 Les limons

Les limons, constitués principalement de silt, de loess, possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles; mais sa teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles.



### 1.2.3 Les marnes

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon le taux de  $\text{CaCO}_3$ , trois grandes catégories:

- les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35% de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ;
- les marnes proprement dites contenant 35 à 65% de  $\text{CaCO}_3$  ;
- les calcaires marneux qui possèdent 65 à 95% de  $\text{CaCO}_3$ .

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de se fissurer sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement :

- de la chaux avec les marnes argileuses ;
- de la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ;
- du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux.

D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne en l'absence du gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature.

Nous pouvons conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles...etc., qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification: gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques).

## 1.3 Techniques d'amélioration des sols

Lorsque les sols posent des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements de sol sont en général la première option étudiée car ils peuvent permettre de préserver le mode de fondation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre, à savoir les fondations superficielles.

Il existe plusieurs techniques servant à valoriser les sols présentant des mauvaises caractéristiques géotechniques. Ces différentes techniques d'amélioration permettent d'augmenter la densité du sol, de diminuer ou augmenter la perméabilité, de réduire la compressibilité, de minimiser la sensibilité à l'eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Il s'agit de la stabilisation:

- par sol de remplacement (remplacement du mauvais sol par le bon) ;
- mécanique (compactage de surface, compactage dynamique, vibrocompactage...etc.) ;
- hydrodynamique (préchargement ou précompression, accélération de la consolidation par les drains verticaux...etc.) ;
- thermique (congélation, cuisson...etc.) ;
- chimique (ajouts de produits minéraux: chaux, ciment, pouzzolane naturelle, fumé de silice, cendres volantes, laitier...etc.) ;
- par renforcement (terre renforcé, matériaux synthétiques...etc.) ;
- par substitution ou inclusion souples constituées de gravier (colonnes ballastées, inclusion solide...etc.) ;
- hydraulique (drainage, rabattement de la nappe...etc.) ;
- électrique (électro-osmose, électrochimie...etc.) ;

La résistance au cisaillement des sols compressibles est augmentée pour assurer une meilleure portance. La compressibilité est réduite du fait que la consolidation des sols est accélérée dans le cas d'inclusions du gravier ou du sable et une augmentation du coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en bref un exemple pour chaque technique. Cependant, la technique de la stabilisation chimique sera détaillée où nous présenterons quelques principaux additifs (chaux et ciment) qui peuvent être utilisés ainsi que le mécanisme de la stabilisation des sols fins aux liants hydrauliques.

### **1.3.1 Amélioration par remplacement du sol**

D'après Gaafer et al. (2015), le remplacement du sol est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus simples qui améliorent les conditions du sol support. Le sol support peut être amélioré par le remplacement des sols médiocres (les sols organiques et argile molle) avec des matériaux de capacité portante élevée tels que le sable, le gravier ou de pierre concassée. Cependant, certains sols sont plus difficiles à compacter que d'autres, lorsqu'ils sont utilisés en tant qu'une couche de remplacement. Le tassement vertical diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche de remplacement. De plus, Gabr (2012) a observé que l'utilisation du sol de remplacement peut réduire considérablement les tassements ainsi que les coûts de construction où il a déclaré aussi que malgré les avantages de remplacement du sol, la détermination de l'épaisseur du sol de remplacement est basée sur l'expérience qui, dans de nombreux cas est discutable. Pratiquement, l'utilisation du sol de remplacement sous une fondation superficielle est facile et peut être aussi une solution moins chère que son utilisation sous une fondation profonde.

### 1.3.2 Méthodes mécaniques

#### 1.3.2.1 Compactage de surface

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols (Fig. 1.6). La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. La technique du compactage est fonction de quatre paramètres essentiels : (l'énergie et le mode de compactage, la masse volumique du sol sec, la teneur en eau et le type de sol), elle sert à :

- augmenter la densité jusqu'à l'optimum ;
- améliorer la résistance donc la capacité portante du sol ;
- diminuer la déformabilité ainsi qu'une réduction de la perméabilité ;
- réduire ou éliminer les risques de tassement ;
- augmenter la stabilité des talus ;
- prévenir la liquéfaction des sols ;
- limiter les variations de volumes indésirables causées, plus souvent, par le phénomène retrait-gonflement.



**Fig. 1.6** — Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie).

### 1.3.2.2 Compactage dynamique

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

En pratique, la technique consiste à laisser tomber en chute libre ou en quasi-chute libre, d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes (Fig. 1.7). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage. Les paramètres du compactage, à savoir l'espacement entre les impacts, le nombre de coups par impact, le nombre de passes de compactage...etc., sont déterminés sur site en fonction des différents essais de contrôle (essais de calibration, mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ...etc.).

Lors du compactage, on distingue un effet immédiat qui est prépondérant dans la plupart des applications pratiques. Il s'agit d'une réduction immédiate de l'indice des vides du sol traduite par le tassement du terrain et d'une augmentation de la pression interstitielle durant l'impact qui peut aller jusqu'à la liquéfaction locale du sol. Celle-ci est suivie par une phase de dissipation progressive de la surpression interstitielle et par la restructuration du matériau en un état plus dense.



**Fig. 1.7** — Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).

Cette technique présente plusieurs champs d'applications à savoir:

- traitement sous bâtiments industriels, plates-formes portuaires et aéroportuaires, remblais routiers et ferroviaires...etc. ;
- particulièrement adaptée pour le traitement des sols de composition variable ou des remblais hétérogènes inertes contenant des blocs, source de faux-refus pour les solutions de renforcement de sol (inclusions, colonnes ballastées...etc.) ;
- bien adaptée pour les ouvrages de grande surface par sa très grande vitesse d'exécution ;
- bien adaptée et couramment utilisée pour réduire, ou voire éliminer, le risque de la liquéfaction des sols.

### 1.3.2.3 Vibrocompactage

La technique du vibrocompactage (ou compactage par résonance vibratoire) consiste en la vibration de profilés spécialement développés à l'aide de vibreurs verticaux fortement puissants à fréquence variable, installés et adéquatement fixés à la tête du profilé (Fig. 1.8).

L'énergie vibratoire est transmise sur toute la longueur du profilé et provoquant le compactage du sol en place, sans qu'un matériau de remplacement soit nécessaire. Ce type de densification fonctionne de façon optimale dans des sols sableux saturés, les vibrations font développer alors des pressions interstitielles. La mobilité des particules de sable augmente et elles se réorganisent donc plus facilement.



**Fig. 1.8** — Densification par vibrocompactage (Cas d'un sable lâche ayant 5m d'épaisseur d'un hall industriel construit en Belgique) (De Cock and Bottiau, 2004).

Dans les sols non saturés, ces pressions interstitielles ne se développent pas et la cohésion capillaire rend par ailleurs la réorganisation des particules encore plus difficile (De Cock and Bottiau, 2004). Il est important de signaler que les nuisances vibratoires liées à l'utilisation des compacteurs vibrants doivent être prises en considération par les concepteurs d'infrastructures. En effet, les dégâts occasionnés par exemple sur les structures environnantes constituent actuellement la principale source de contentieux en travaux publics. En effet, on peut assister à une interruption des travaux et des surcoûts importants si une fois les contraintes vibratoires ne sont pas prises en compte au préalable.

#### **1.3.2.4 Induction hydraulique**

Elle se distingue du vibrocompactage par l'utilisation d'un vibreur spécifique de fabrication Keller, monté sur un porteur qui permet d'exercer en plus des vibrations, une poussée sur celui-ci. L'induction hydraulique combine donc les vibrations horizontales générées par le vibreur et le refoulement latéral du sol pour obtenir un compactage optimal de celui-ci. Dans le cas de plot isolé de substitution, le refoulement latéral du matériau compacté par induction hydraulique permet d'assurer un confinement du sol décomprimé en périphérie.

En fonction de la nature et de l'importance des charges à reprendre, on peut procéder à un traitement dans la masse par un maillage régulier ou un traitement localisé sous des semelles (Fig. 1.9). Si des couches superficielles de sols limono-argileux non compactables sont présentes, il faudra procéder au préalable à une purge partielle ou totale de ces matériaux pour les remplacer par un matériau sablo-graveleux. Le plot substitué induit peut être associé par un traitement en profondeur de type colonnes ballastées, inclusions rigides ou colonnes à modules mixte (CMM).



**Fig. 1.9** — Amélioration d'un terrain par induction hydraulique (Substitution du sol par du gravier dans un chantier à Saint Martin d'Hères en 2006, France).

La technique d'induction hydraulique présente beaucoup d'avantages à savoir dans le cas de plot isolé de substitution, le refoulement latéral du matériau compacté par inclusion hydraulique permet d'assurer un confinement du sol décomprimé en périphérie. De plus, cette technique permet d'obtenir des tassements faibles sous les sollicitations cycliques (machines vibrantes, éoliennes, turbines...etc.) et un compactage optimal des matériaux de substitution même sous l'eau.

### 1.3.3 Méthodes hydrodynamiques

#### 1.3.3.1 Préchargement ou Précompression

La technique de précompression ou de préchargement est tout simplement de placer une surcharge en supplément au dessus du sol qui nécessite un grand tassement de consolidation qui doit avoir lieu avant que la construction soit réalisée (Fig. 1.10). Une fois la consolidation suffisante a eu lieu, la surcharge peut être retirée et le processus de construction peut être entamé. D'une manière générale, cette technique est plus efficace et adéquate dans le sol argileux. Comme les sols argileux ont une faible perméabilité, la consolidation souhaitée prend très longtemps à se produire, même avec une surcharge en supplément très élevée. Par conséquent, avec les calendriers de construction serrés, le préchargement peut ne pas être une solution réalisable. A ce moment là, des drains de sable verticaux peuvent être utilisés pour accélérer le processus de consolidation en diminuant la longueur des chemins de drainage. L'installation des drains de sable verticaux offre une meilleure solution pour accélérer le

processus de consolidation pour acquérir une résistance au cisaillement suffisante (Radhakrishnan et al., 2010).

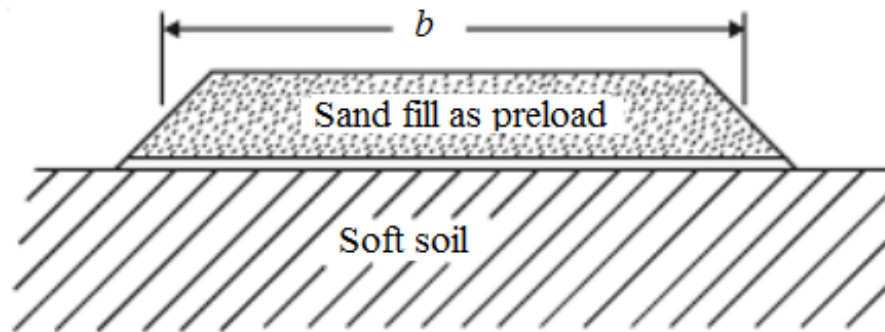


Fig. 1.10 — Amélioration d'un sol mou par la technique de préchargement (Varghese, 2005).

### 1.3.3.2 Accélération de la consolidation par les drains verticaux

Les drains verticaux est une technique où les drains sont installés sous une charge en supplément pour accélérer le drainage des sols relativement imperméables et d'accélérer ainsi la consolidation. Ces drains fournissent un chemin plus court pour l'eau de circuler à travers le sol. Ainsi, le temps de drainage des couches d'argile peut être réduit de plusieurs années à quelques mois. Les types courants de drains verticaux sont des drains de sable et des drains verticaux préfabriqués (Gaafer et al., 2015).

Les drains de sable (Fig. 1.11a) sont construits en perçant des trous à travers la couche d'argile à l'aide d'un forage rotatif ou de tarière continue dans le sol. Les trous sont ensuite remplis de sable. Quand un supplément de surcharge est appliqué à la surface du sol, la pression de l'eau interstitielle dans l'argile va augmenter, et elle sera dissipée par le drainage dans les deux directions verticales et horizontales. Le tassement est alors accéléré.

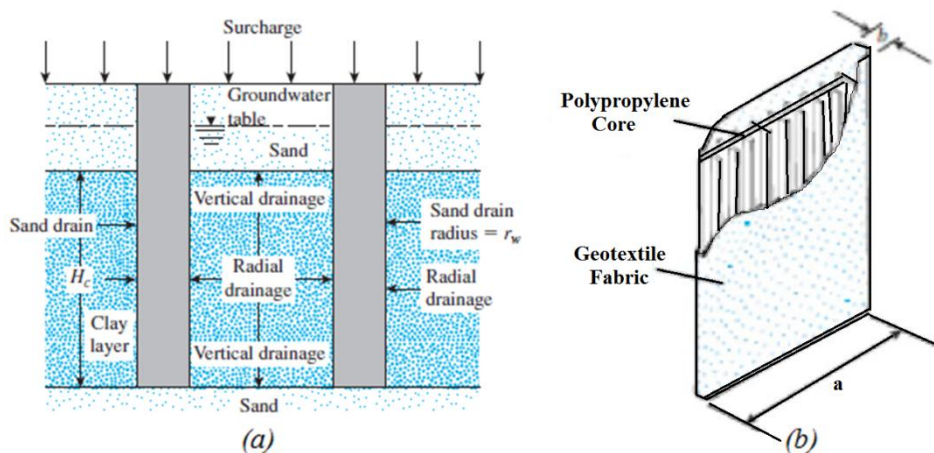


Fig. 1.11 — Amélioration des mous par la technique de l'Accélération de la consolidation par les drains verticaux, (a): drains de sable verticaux, (b): drains verticaux préfabriqués (Das, 1983).



Cependant, les drains verticaux préfabriqués sont également appelés drains verticaux constitués de matières synthétiques canalisés avec un noyau enveloppé dans un tissu de géotextile comme le montre la (Fig. 1.11b). Ils sont flexibles, durables, peu coûteux et ne nécessitent pas de forage. Les drains verticaux préfabriqués sont les mieux adaptés pour les argiles, les limons, les couches argileuses organiques et le sable limoneux. Ils sont placés dans une plaque d'ancrage en acier puis les pousser dans le sol à la profondeur voulue. Ensuite, les drains verticaux préfabriqués seront coupés légèrement au-dessus du sol après drainage (Taube, 2008).

Le drain vertical vise à diminuer le temps requis pour la consolidation des sols mous en accélérant, à l'aide d'une surcharge, l'expulsion de l'eau qu'ils contiennent. Il est constitué d'une plaquette ondulée ou surmontée de "chevilles" en polymère flexible. Cette plaquette, mesurant 100 mm de largeur sur 6 mm d'épaisseur, est enrobée d'une membrane géotextile synthétique, choisie en fonction des propriétés de filtration recherchées et de sa capacité à résister à l'abrasion lors de son installation. Le drain est inséré dans le sol à l'aide d'un mandrin creux fixé à une flèche verticale rattachée à une rétro-caveuse ou à une grue sur chenilles. Une force statique est utilisée pour enfoncer le mandrin et ancrer le drain à la profondeur désirée. En présence de couches de matériaux raides, un vibreur est ajouté au mandrin, ou des avant-trous sont pratiqués pour passer à travers des couches très raides. Après leur installation, un coussin de sable filtrant et une surcharge placée au-dessus de la surface de travail pour provoquer l'acheminement de l'eau interstitielle vers les drains qui, à leur tour, l'amèneront vers la surface, accélérant dès lors la consolidation des sols mous.

#### **1.3.4 Méthodes thermiques**

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 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 font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

##### *o Cas des sols fins*

La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la

congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

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

○ *Cas des sols grenus*

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet à une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée. (Fig. 1.12).

Le problème majeur de cette technique c'est que l'augmentation du volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut engendrer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.



**Fig. 1.12** — Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.

### **1.3.5 Méthodes Chimiques**

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol telles que les réactions d'échange de base avec les particules d'argile

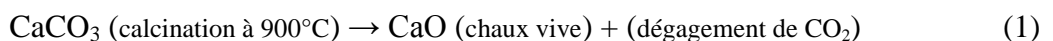
(cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. Pratiquement tous les sols peuvent être traités. La stabilisation peut être utilisée, avant compactage, in situ ou avec des sols excavés ou amenés d'ailleurs. Cependant une analyse préalable de leur nature est nécessaire avant chaque traitement. Elle détermine la technique et les moyens les plus appropriés à mettre en œuvre, en fonction des spécificités du terrain qui demande une attention particulière concernant l'épaisseur du sol à traiter, le type d'additifs à utiliser et les dosages des ajouts à respecter.

Le traitement des sols en place ou rapportés par l'utilisation des additifs seuls ou combinés (ciment, chaux, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice...etc.) est actuellement très largement employé dans la plupart des pays du monde.

### 1.3.5.1 Utilisation de la chaux

La chaux a été utilisée depuis longtemps comme stabilisateur des sols sensibles à l'eau (remblai, couches de formes...etc.). De plus, la chaux est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution. Le premier guide de base a été établis par le SETRA et le LCPC en 1972 : «Recommandation pour le traitement des sols fins à la chaux». Le second a été élaboré en 1992 nommé GTR (Guide des terrassements routiers, Réalisation des remblais et des couches de formes). Le dernier qui les complète issu en 2000 portant le titre «Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques». Ces guides peuvent fournir des informations importantes sur le choix du type de traitement à utiliser (Le Borgne 2010).

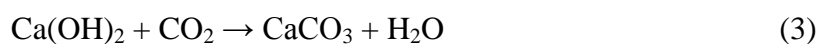
La chaux est généralement une poudre fine obtenue par la calcination de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), à une température supérieure à  $900^\circ\text{C}$ , qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (Eq. 1).



Au contact de l'eau, la chaux vive obtenue par calcination, peut se transformer en chaux éteinte ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) accompagné par un fort dégagement de chaleur, (Eq. 2).



La chaux vive  $\text{CaO}$  peut, après hydratation par l'humidité ambiante ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se carbonater sous l'action du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, (Eq. 3).



Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols. Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte. La réactivité définie par la norme (NF P 98-102). Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et est essentiellement fonction de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux.

### 1.3.5.2 Mécanisme de stabilisation à la chaux

Le principe de l'action de chaux avec les minéraux argileux en présence d'eau, peuvent être résumés en deux phases principales à savoir:

#### ○ Action à court terme

Elle peut se résumer en cinq étapes successives (Fig.1.13) (Locat et al., 1990; Bell, 1996; Cabane, 2004; Le borgne, 2010):

- l'ajout de la chaux provoque l'évaporation de l'eau avec l'ionisation de la Chaux éteinte qui libère des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  ;

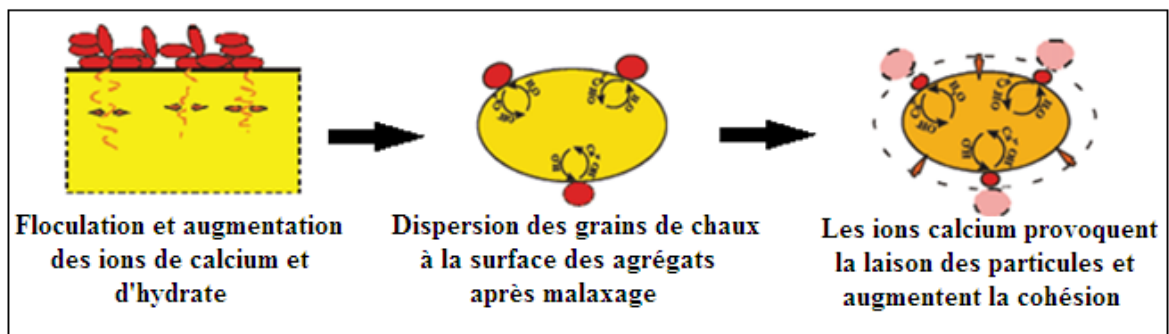
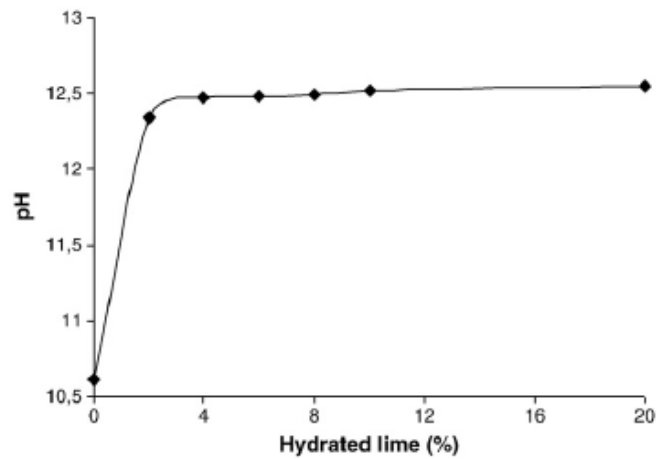


Fig. 1.13 — Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).

- la forte concentration en ion  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  entraîne un échange cationique entre les ions absorbés et les cations apportés qui modifie la CEC et augmente le pH du sol à plus de 12.5 (Fig. 1.14) (Al-Mukhtar et al., 2010) ;
- réduction de la taille de la double couche des particules argileuses et diminution des forces de répulsion entre elles ;
- floculation (par l'ajout de chaux) et agrégation (par malaxage) des particules argileuses ;
- modification des propriétés géotechniques, formation des grumeaux de taille millimétrique et diminution de la sensibilité à l'eau.



**Fig. 1.14** — Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al., 2010).

○ *Action à moyen et à long terme*

L'amélioration des caractéristiques mécaniques ainsi que la diminution ou la suppression du gonflement est liée à la formation des nouveaux produits cimentaires par l'action de chaux à long terme qui peut se faire comme suit:

- la forte concentration en ion  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  augmente le pH du sol ( $\text{pH} \geq 12,5$ ) ;
- un fort pH, entraîne la dissolution de la silice et de l'alumine des particules argileuses et rentrent en réaction avec le calcium apporté par la chaux d'où viennent les réactions pouzzolaniques ;
- formation des produits cimentaires à savoir les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et les aluminates de calcium hydratés (C-A-H).

### 1.3.5.3 Utilisation du ciment

Un ciment est un liant hydraulique composé de matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'ailleurs, pour les travaux de terrassement, la norme NF- P15-108 met en évidence des liants hydrauliques routiers destinés notamment, à la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements.

La norme NF- EN 197-1 subdivise les liants hydrauliques en cinq type en fonction de leur composition à savoir: le ciment Portland (CEM I), le ciment Portland composé (CEM II), le ciment de haut-fourneau (CEM III), le ciment pouzzolanique (CEM IV) et le ciment composé (CEM V). En général, tous les liants doivent contenir un ou plusieurs constituants qui présentent l'une au moins l'une des propriétés suivantes:

- propriétés hydrauliques: elles font développer, par réaction avec de l'eau, des composées hydratées stables très peu solubles dans l'eau ;
- propriétés pouzzolaniques: c'est la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables ;
- propriétés physiques: elles font améliorer certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage...etc.).

### **1.3.6 Amélioration des sols par renforcement des terres**

#### **1.3.6.1 Terre renforcé**

La terre renforcée est un matériau composite qui consiste en un sol contenant des éléments le renforcement (bandes d'acier galvanisé ou des négrides plastiques).

Le sol grenu est généralement faible en traction en plaçant à l'intérieur de celui-ci des éléments de renforcement alors les forces de traction peuvent être transmises du sol aux éléments. Le matériau composite possède alors une résistance à la traction dans la direction où le renforcement commence à travailler (frottement).

Pour les sols fins où l'adhésion entre le remblai et le renforcement est mauvaise et peut être réduite par l'augmentation de «U» on utilisera donc des matériaux sandwichs (couche de sable en contact avec les éléments renforçant). L'efficacité du renforcement est commandée par sa résistance à la traction et la liaison qu'il développe avec le sol adjacent.

Plusieurs éléments de renforcement peuvent être utilisés par exemple les bandes d'acier ou d'aluminium, les câbles d'acier, les matériaux polymère ou géosynthétiques, les treillis métalliques, les grilles sont des éléments métalliques ou en polymère arrangés en réseaux rectangulaires (maillages), les fibres sont en géotextiles, métalliques ou en fibres naturelles...etc.

Le mécanisme de transfert de charge entre le sol et l'élément renforçant est gouverné par le frottement qui se développe à l'interface entre les deux constituants. Dans le cas des murs en terre renforcée, les deux éléments sont considérés comme un bloc cohérent dans l'analyse de la stabilité, avec une pression des terres active agissant derrière le bloc (analyse contre le glissement, renversement et rupture de la capacité portante). La rupture interne peut arriver uniquement s'il y a une perte du frottement entre le sol et le renforcement, ou par rupture de la traction des éléments renforçant.

### 1.3.6.2 Technique de renforcement in situ

Le principe de base consiste à mobiliser un certain volume de terrain ou de rocher encaissant de façon à rétablir ou à renforcer la stabilité d'une fondation au renversement, au glissement ou au soulèvement.

Il ya 02 techniques de renforcement des sols in situ pour stabiliser les pentes et les excavations: clouage des sols, micro pieux réticulés (Fig. 1.15).

La méthode consiste à sceller des barres d'acier dans les masses de rochers fracturées rendant ainsi au "rocher" son monolithisme. Elle vise à stabiliser les déplacements différentiels des parois de la faille par un clouage multidirectionnel variant de 45° à 60° environ. Ces méthodes sont comparables à celles de clouage des parois rocheuses fracturées.

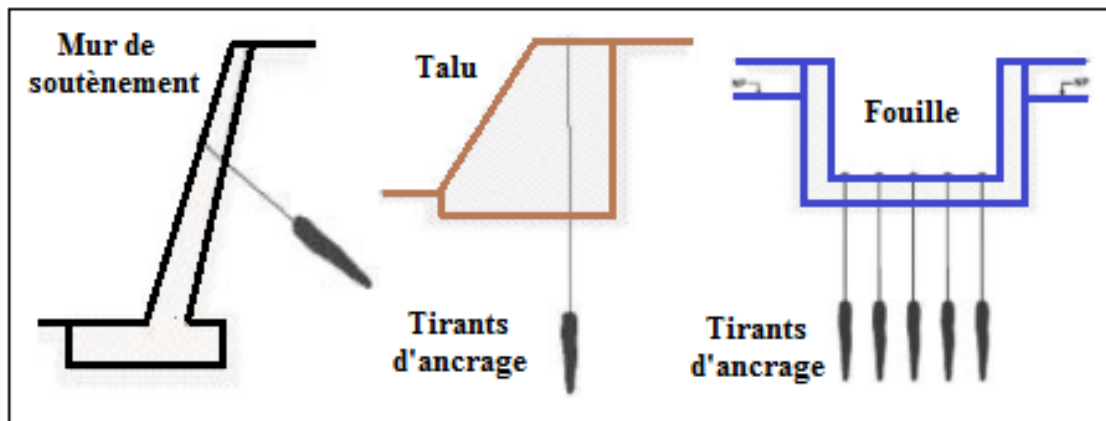


Fig. 1.15 — Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage.

### 1.3.6.3 Matériaux synthétiques

La construction de remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Il y en a plusieurs types de matériaux géosynthétiques à savoir les produits polymériques (polypropylène, polyester, polyéthylène, polyamide, polyvinyle Chloride, polystyrène), les géonets, les géogrids, les géomembranes, les géotextiles, les géocomposites...etc.

## 1.3.7 Amélioration des sols par inclusion

### 1.3.7.1 Colonnes à module contrôlé

Les colonnes à module contrôlé sont des inclusions semi-rigides et cimentées dont les modules de déformation peuvent varier de 500 à 12,000 MPa, ou de l'ordre de 5 à 30 fois plus faibles que ceux du béton. Elles sont mises en œuvre comme procédé de renforcement de sol.

Ce type de traitement ne vise donc pas à réaliser des pieux devant supporter la totalité de la charge apportée par l'ouvrage, mais à réduire la déformabilité globale du sol à l'aide d'éléments semi-rigides régulièrement repartis.

Cette technique est préférable aux colonnes ballastées, réalisées par Vibro-Remplacement, lorsque:

- le sol est trop mou ou organique et n'offre pas d'étreinte latérale suffisante ;
- les charges sont élevées ou les tolérances de tassement sévères.

Les colonnes à module contrôlé sont généralement réalisées à l'aide d'une vis spécialement conçue par MENARD SOL-TRAITEMENT pour refouler le sol. L'outil est vissé dans le sol jusqu'à la profondeur désirée puis remontée lentement sans déblais vers la surface. Simultanément, un coulis ou mortier est injecté dans le sol par l'âme de la tarière creuse de la vis spéciale en utilisant des pressions modérées. Ainsi, l'on constitue une colonne de 450 à 600 cm de diamètre de matériau cimenté qui admet des contraintes de 10 à 50 bars, selon les dosages.

### 1.3.7.2 Colonnes ballastées

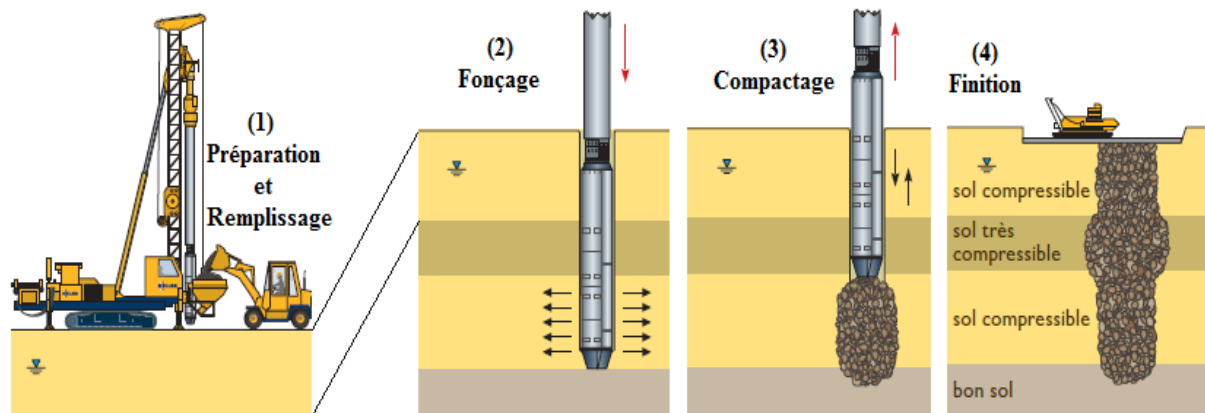
Le procédé des colonnes ballastées est une technique d'amélioration de sol permettant de créer des colonnes de granulats expansées afin d'augmenter la portance d'un sol et d'en réduire sa compressibilité. Cette technique est particulièrement performante dont il est possible de mettre en œuvre des semelles superficielles avec une contrainte de sol de l'ordre de 0,2 à 0,3 MPa. C'est une alternative aux fondations profondes de type pieux et dalle portée, ou aux fondations semi-profondes de type puits. En effet, construire un ouvrage sur des colonnes ballastées permet de le fonder comme sur du «bon sol» et donc de respecter les règles usuelles de fondations superficielles.

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives (Fig. 1.16). Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels que les limons et les argiles. 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.



**Fig. 1.16** — Principe de renforcement des sols par colonnes ballastées.

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un «maillage» de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes:

- augmenter la capacité portante du sol ;
- diminuer les tassements totaux et différentiels ;
- diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant ;
- diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes.

### 1.3.7.3 Inclusion rigide

Le procédé de renforcement de sol par inclusions rigides associe un réseau d'inclusions rigides verticales non armées et un matelas intercalaire situé entre les têtes d'inclusions et l'ouvrage. Contrairement aux pieux, ce procédé se caractérise par l'absence de liaison structurelle entre les ouvrages et les inclusions.

D'ailleurs, le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides permet de réaliser la fondation d'ouvrages de grandes longueurs (remblais routiers, ferroviaires...etc.) ou de grandes dimensions (bâtiments industriels, réservoir de stockage...etc.) sur des sols à caractéristiques médiocres tout en étant économiquement intéressants. Ce procédé, en superposant un matelas granulaire à un réseau d'inclusions rigides verticales, tire parti des transferts de charges se mettant en place dans tout matériau granulaire. Cette technologie, par la mise en œuvre d'un matelas granulaire associé ou non à un rigides permet de reporter vers le réseau de pieux un maximum de charge (Fig. 1.17).

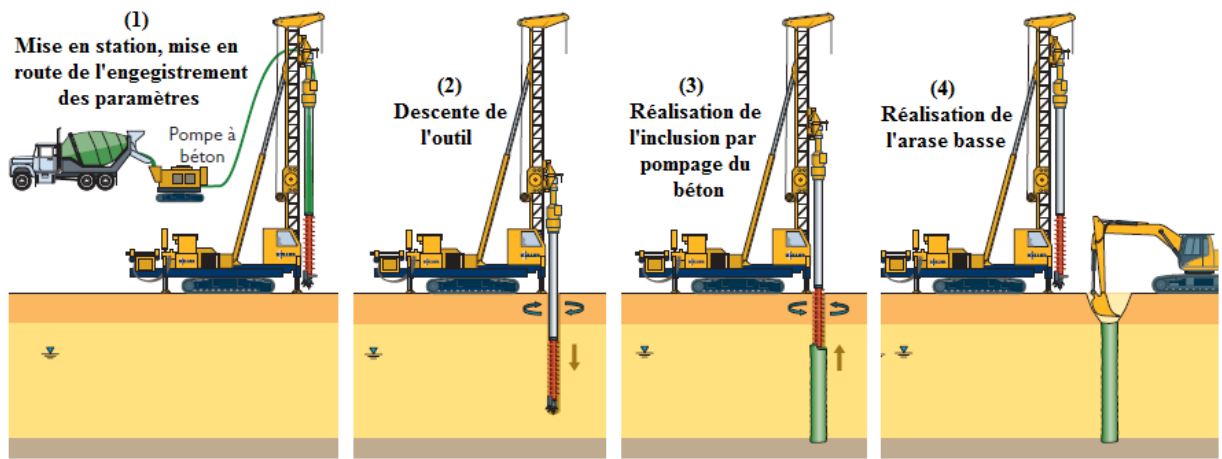


Fig. 1.17 — Principe de renforcement des sols compressibles par inclusion rigide.

### 1.3.8 Amélioration des sols par injection

#### 1.3.8.1 Injections classiques (Jet grouting)

Une injection classique est une injection qui agit à priori sans déplacement des terrains ; sa mise en œuvre n'est en tout cas pas destinée à resserrer ceux-ci. C'est donc une technique de comblement et d'imprégnation, destinée à remplir des vides naturels, qui sont, soit des fissures (terrains cohérents, rocher), soit les vides des terrains granulaires. Le remplissage se fait avec un coulis sans déformation intentionnelle du sol (Fig. 1.18).

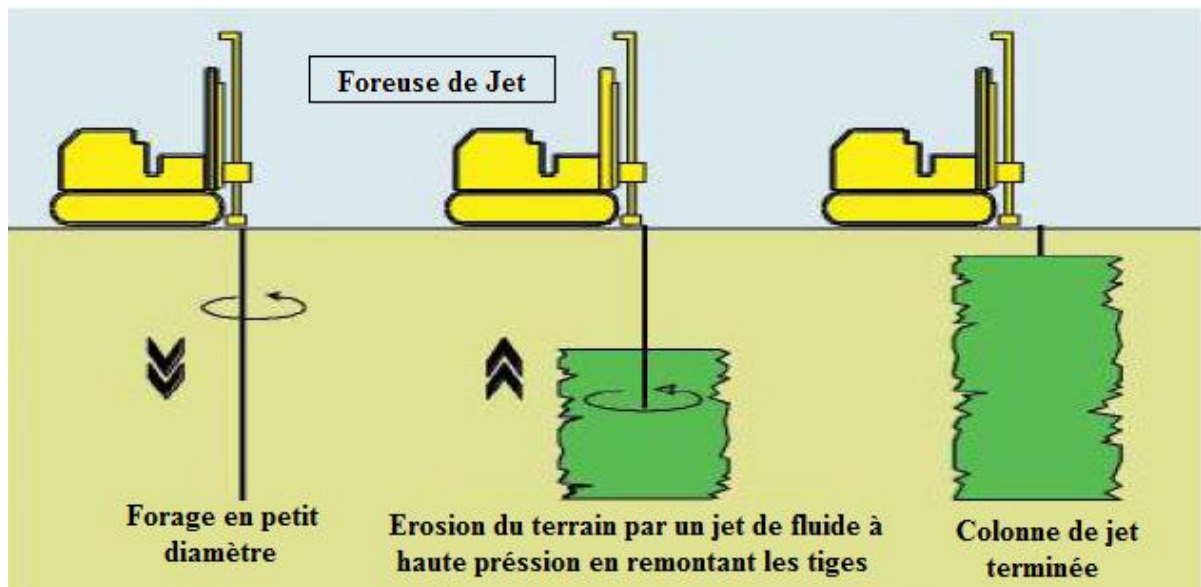


Fig. 1.18 — Principe de réalisation d'une colonne de jet grouting.

Le traitement par jet grouting conduit à réaliser des éléments rigides d'un mélange de sol ciment, dont la mise en œuvre fait appel à trois phénomènes distincts intervenant indépendamment ou en combinaison:

- une déstructuration des terrains en place sous un jet à très grande vitesse ;

- une extraction d'une partie des éléments constitutifs du sol en place, addition de coulis ;
- une incorporation de matériaux d'apport sous la forme d'un jet de coulis de composition adaptée à la résistance recherchée.

Le sol hors colonne ne subit pas ou peu d'amélioration. Cette méthode d'injection se distingue donc fondamentalement des injections classiques ou de claquage. Le jet grouting permet de remplir des fonctions d'étanchéité.

### **1.3.8.2 Injections de claquage (Injections de compensation)**

À l'origine, le procédé d'injection de compensation a été utilisé par l'industrie pétrolière, afin de créer dans le sous-sol des cheminements préférentiels du pétrole vers les pompes d'extraction. Dans les années 1960, les ingénieurs de Keller ont trouvé pour cette technique d'intéressantes applications dans le domaine des fondations. Cette technique permet aujourd'hui de résoudre les problèmes de fondation ou de stabilisation d'ouvrages, partout où les procédés d'injection classique ne sont pas applicables. De même, cette technique permet le relèvement d'ouvrages affaissés. De plus, grâce aux techniques spécifiques de mesure, d'analyse et d'asservissements développés dans ce but, il est possible de réaliser des relevages d'importance pluri-décimétrique des ouvrages à traiter.

Ce procédé provoque des petites fractures dans le sol, qui se remplissent de coulis qui y fait prise. Grâce à des injections répétitives et sélectives et un système de mesure de tassement perfectionné, on peut améliorer n'importe quel terrain et également provoquer des soulèvements contrôlés.

## **1.3.9 Méthodes hydrauliques**

### **1.3.9.1 Technique de drainage**

L'évacuation de l'eau par drainage, est applicable sur des terrains présentant une perméabilité faible à très faible, et notamment, les argiles, les marnes, les limons...etc. Les systèmes de drainage sont fabriqués de filtres d'agrégats poreux pour collecter l'eau et ensuite la drainer ailleurs. Les drains doivent être capables de drainer toute l'eau qui s'y infiltre sans provoquer une accumulation excessive de la charge. Il est important de réduire la perte de charge due au flux à travers le filtre à une valeur basse compatible avec la granulométrie dictée, et également, De concevoir une couche d'agrégat fin gradué pour filtrer et d'une couche d'agrégat grossier à forte perméabilité pour drainer l'eau. Cela va limiter le problème de colmatage de vides des drains par la migration des fines des sols adjacents. (Fig. 1.19).

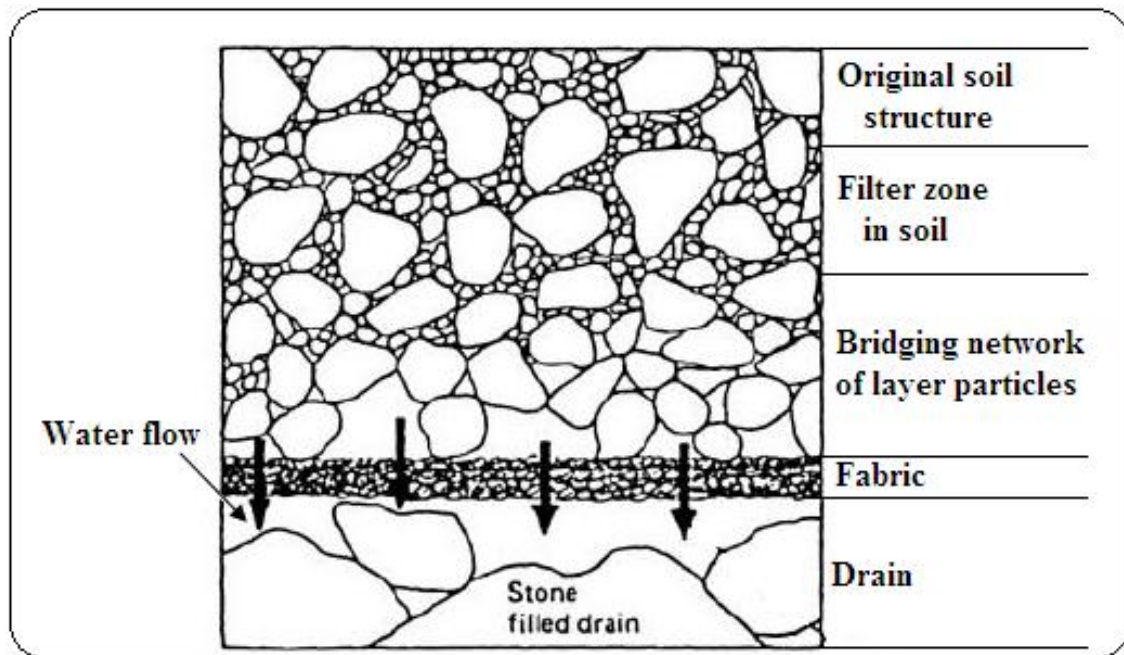


Fig. 1.19 — Technique de drainage par un drain filtre.

### 1.3.9.2 Le rabattement de la nappe par pompage

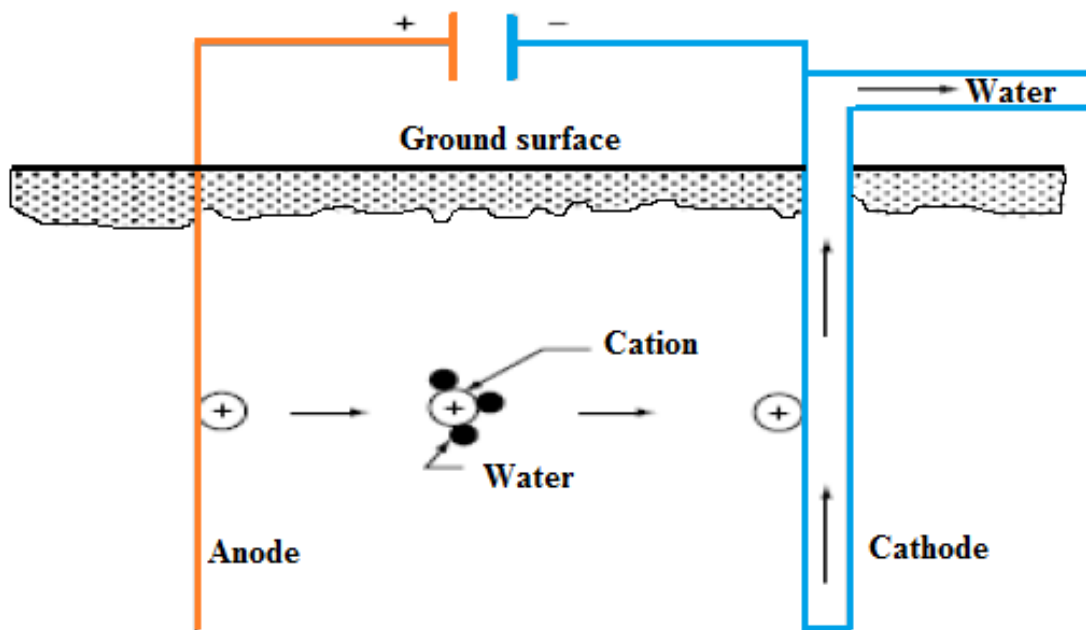
Il consiste à abaisser la pression des nappes à l'intérieur d'un volume de terrain déterminé, en dessous de la surface extérieure du volume considéré. Il est obtenu par un nombre approprié de captages disposés autour du volume à rabattre et dans lesquels un pompage permanent est assuré. Plusieurs procédés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

- le rabattement à pleine fouille, qui consiste à pomper l'eau dans un puisard aménagé au fond de la fouille et surcreusé d'environ 0,5 à 1 m par rapport à ce dernier ;
- le rabattement par puits filtrant est employé pour les terrains perméables; les puits sont perforés au moyen d'une technique appropriée.

### 1.3.10 Autres techniques d'amélioration des sols

#### 1.3.10.1 Electro-osmose

L'électro-osmose a été initialement mise au point par Casagrande (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte (Fig. 1.20).



**Fig. 1.20** — Principe de la technique électro-osmose.

Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique.

### 1.3.10.2 Electrochimie

L'électrochimie a pour effet de réduire suffisamment la teneur en eau des sols et, par conséquent, d'augmenter leur résistance au cisaillement. La consolidation électrochimique est une variante de l'électro osmose. Elle repose sur le fait que si l'on met à l'anode une solution salée, on peut arriver à la faire migrer dans le sol. Si la solution est bien choisie, cette migration créera une consolidation par imprégnation d'ions (Fig. 1.21).

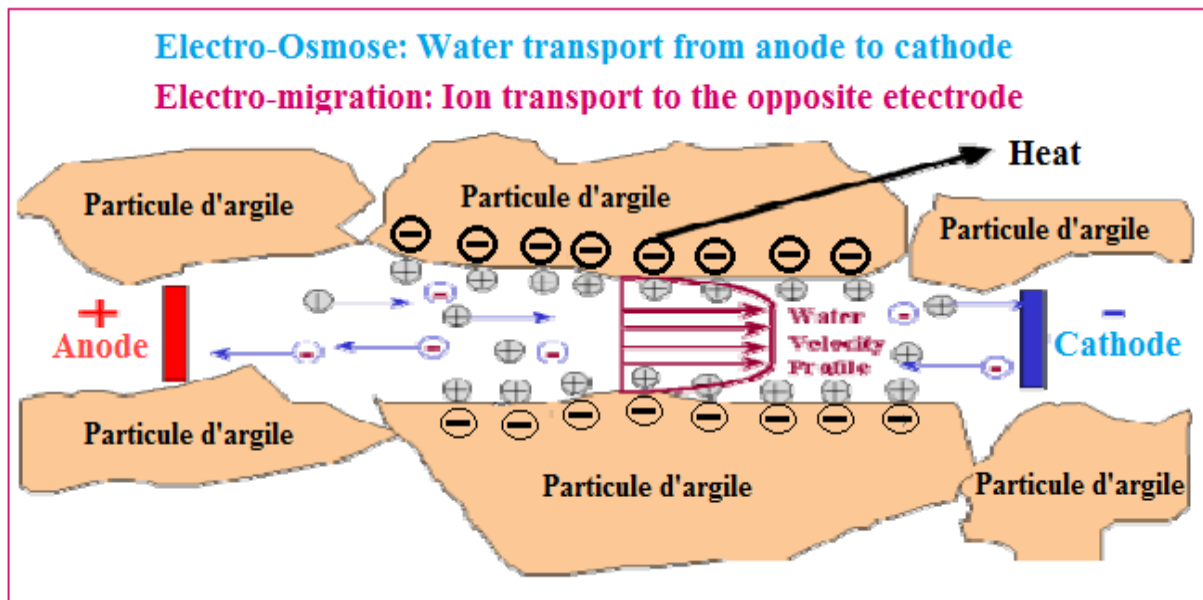


Fig. 1.21 — Principe de la technique électrochimie.

Les cations associés aux argiles sont interchangeables; en conséquence l'introduction dans une argile riche en cations faiblement retenus et ayant une haute capacité d'échange, de solutions contenant un excès de cations mieux retenus conduira à un échange d'ions et améliorera les propriétés du sol. Tel est le fondement de la stabilisation de surface des montmorillonites par addition de chaux, de ciment ou d'autres composants.

## 1.4 Conclusions

Les différentes techniques d'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde en vue de consolider des terrains ayant une structure hétérogène et inconstructible. L'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce cas, différentes techniques ont été développées depuis des décennies.

Grace à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont jusqu'à présent maintenues à la pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement.

Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins.

La stabilisation chimique des sols par l'utilisation des additifs peut être efficace et elle reste jusqu'à présent la plus utilisée et la moins onéreuse. Par conséquent, une synthèse bibliographique détaillée sera développée dans le chapitre suivant afin de se renseigner de l'état d'avancement des recherches de la stabilisation chimique des sols argileux tout en utilisant des liants hydrauliques et des matériaux pouzzolaniques à savoir le ciment, la chaux, les cendres volantes, le laitier, la fumé de silice, la pouzzolane naturelle...etc. L'analyse de l'effet de ces stabilisants sur le traitement des sols argileux avec ou sans présence des sulfates sera également mis en évidence.