

4.1 Autres techniques de stabilisation et de renforcement

4.1.1 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.

4.1.2 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. 4.1). 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. 4.1 — 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.

4.1.3 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. 4.2).

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. 4.2 — Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.

4.1.4 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.

4.1.5 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.

4.1.6 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. 4.3).

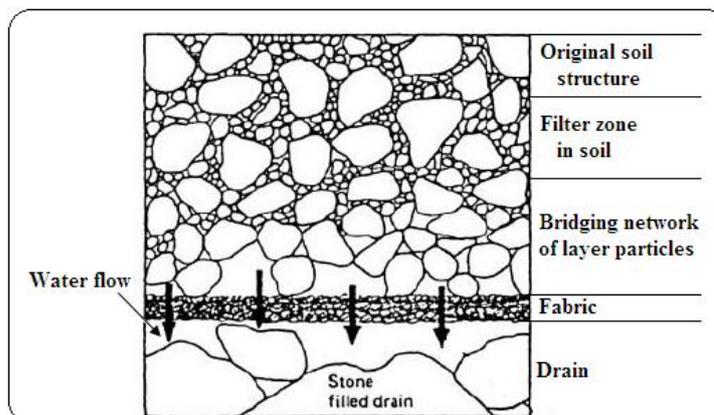


Fig. 4.3 — Technique de drainage par un drain filtre.

4.1.7 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.

4.1.8 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. 4.4). 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.

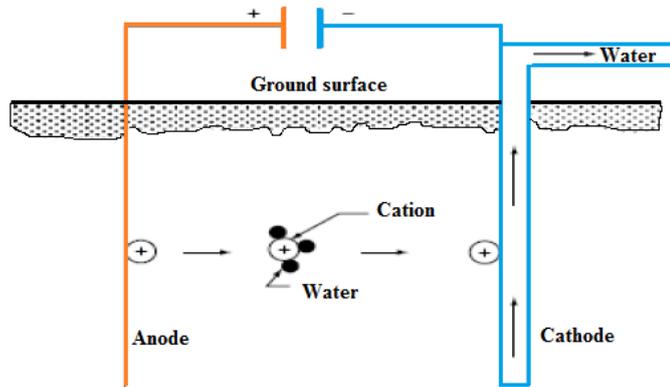


Fig. 4.4 — Principe de la technique électro-osmose.

4.1.9 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. 4.5).

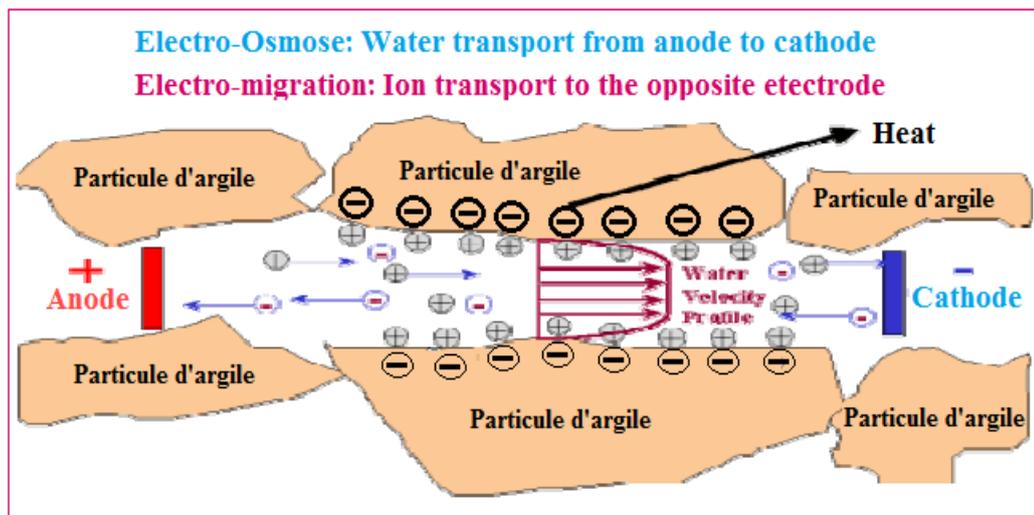


Fig. 4.5 — Principe de la technique électrochimie.

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.