





# Traitement des sols

*Université Khemis-Miliana*  
*Dr. Hamid GADOURI*



## Légende

-  Entrée du glossaire
-  Abréviation
-  Référence Bibliographique
-  Référence générale

# Table des matières



<b>Objectifs</b>	4
<b>I - Information sur le cours</b>	5
<b>II - Objectifs intermédiaires du chapitre VI</b>	6
<b>III - Chapitre VI : Stabilisation et renforcement des sols</b>	7
1. Exercice : Pré-test - Essais et propriétés géotechniques .....	7
1.1. Exercice : Question n°01 .....	7
1.2. Exercice : Question n°02 .....	7
1.3. Exercice : Question n°03 .....	7
1.4. Exercice : Question n°04 .....	7
2. Introduction .....	7
3. Traitement chimique par des additifs minéraux .....	8
3.1. Capacité d'échange cationique (CEC) .....	8
3.2. Traitement à la chaux .....	9
3.3. Traitement au ciment .....	10
4. Amélioration des sols par renforcement des terres .....	11
4.1. Terre renforcée .....	11
4.2. Renforcement par clouage .....	12
4.3. Renforcement par matériaux synthétiques .....	12
4.4. Autres techniques d'amélioration des sols .....	13
5. Activités d'apprentissage locales du chapitre II .....	15
5.1. Exercice : Questions de cours .....	16
5.2. Exercice n°01 .....	16
5.3. Exercice n°02 .....	17
<b>IV - Conclusion</b>	18
<b>Solutions des exercices</b>	19
<b>Glossaire</b>	22
<b>Bibliographie</b>	25

# Objectifs

Ce cours intitulé « *Traitement des sols* » est destiné aux étudiants du M2-*Géotechnique*. Il comporte un ensemble des connaissances *théoriques et pratiques* qui permettent à l'étudiant de résoudre les problèmes liés aux sols instables à travers du choix d'une technique de traitement appropriée ou d'une méthode de renforcement adéquate. Le *contenu détaillé* de ce cours a été présenté ci-dessus (voir tables des matières). Ce cours consiste à transmettre à l'étudiant la conduite à tenir pour pouvoir résoudre les problèmes d'instabilités causés par les sols médiocres (ou par d'autres facteurs) à travers le choix convenable d'une technique de traitement qui doit aussi être simple, économique et durable. Les objectifs généraux de ce cours est de mettre à la disposition du futur ingénieur géotechnicien, tous les outils et toutes les techniques de traitement et de renforcement des sols à problème. Voici les thèmes qui seront abordés lors de ces deux chapitres :

- Les objectifs du traitement ou du renforcement d'un sol ;
- Les différentes techniques de traitement des sols ;
- Le choix de la technique de traitement convenablement ;
- L'aspect économique et technique en matière du traitement des sols ;
- Le principe de chaque méthode d'amélioration et son objectif ;
- Les avantages et les inconvénients des méthodes d'amélioration des sols ;
- Les limites d'utilisation et les domaines d'application des méthodes d'amélioration ;
- Interprétation et analyse des différents résultats issus des méthodes d'amélioration.

# Information sur le cours



*Université* : Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana

*Faculté* : Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre

*Département* : Sciences de la Terre

*Public ciblé* : M2-Géotechnique (Semestre 3)

*Crédit* : 1

*Coefficient* : 1

*Intitulé du cours* : Traitement des sols

*Volume horaire du cours* : 45 heures

*Horaire* : Dimanche de 11h00min jusqu'à 14h00min

*Salle* : 08

*Enseignant* : Dr. GADOURI Hamid

*Contact* : hamid.gadouri@univ-dbkm.dz



# Chapitre VI : Stabilisation et renforcement des sols



Exercice : Pré-test - Essais et propriétés géotechniques	7
Introduction	7
Traitement chimique par des additifs minéraux	8
Amélioration des sols par renforcement des terres	11
Activités d'apprentissage locales du chapitre II	15

## 1. Exercice : Pré-test - Essais et propriétés géotechniques

[solution n°1 p.19]

### 1.1. Exercice : Question n°01

Quels sont les paramètres de cisaillement intrinsèques d'un sol ?

### 1.2. Exercice : Question n°02

Quels sont les essais qui permettent la détermination des paramètres de cisaillement intrinsèques d'un sol ?

### 1.3. Exercice : Question n°03

Quels sont les caractéristiques de compressibilité d'un sol ?

### 1.4. Exercice : Question n°04

Quel est l'essai qui permet la détermination des caractéristiques de compressibilité d'un sol ?

## 2. Introduction

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 cationique*<sup>p.22</sup> de base avec les particules d'argile (cation) et les

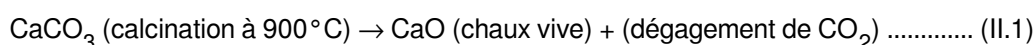




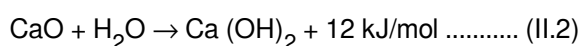
### 3.2. Traitement à la chaux

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 établi 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 *G.T.R.92*<sup>p.26</sup> (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*<sup>p.27</sup>).

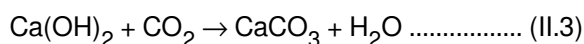
La chaux est généralement une poudre fine obtenue par la calcination de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), à une température supérieure à 900 °C, qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium (CaO) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) (Eq. II.1).



Au contact de l'eau, la chaux vive obtenue par calcination, peut se transformer en chaux éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>) accompagné par un fort dégagement de chaleur, (Eq. II.2).



La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante (Ca(OH)<sub>2</sub>), se carbonater sous l'action du CO<sub>2</sub> atmosphérique, (Eq. II.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.

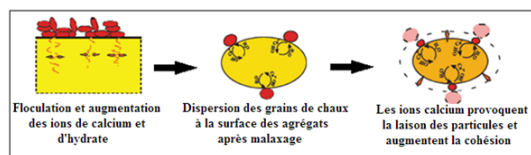
Le principe de l'action de chaux avec les minéraux argileux en présence d'eau, peuvent être résumés en deux phases principales à savoir:

*Action à court terme :*

Elle peut se résumer en cinq étapes successives (*Fig.II.1*) (*Locat et al.1990*<sup>p.27</sup> ; *Bell 1996*<sup>p.25</sup> ; *Cabane 2004*<sup>p.25</sup> ; *Le Borgne 2010*<sup>p.27</sup> ):

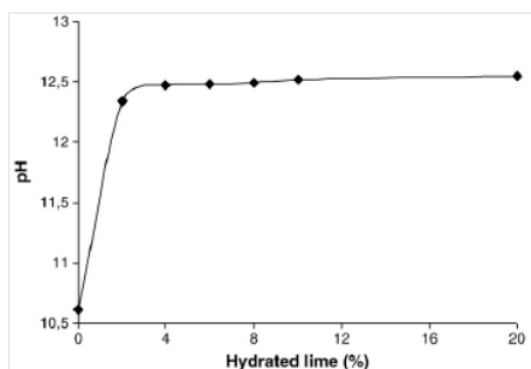
- l'ajout de la chaux provoque l'évaporation de l'eau avec l'ionisation de la Chaux éteinte qui libère des ions Ca<sup>2+</sup> et OH<sup>-</sup> ;

Fig. II.1 — Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane 2004<sup>p.25</sup> ☞ ).



- 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. II.2) (Al-Mukhtar et al. 2010<sup>p.25</sup> ☞ ) ;
- 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. II.2 — Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al. 2010<sup>p.25</sup> ☞ ).



#### 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 ( Gadouri et al. 2016<sup>p.26</sup> ☞ , 2017<sup>p.26</sup> ☞ ) ;
- formation des produits cimentaires à savoir les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et les aluminates de calcium hydratés (C-A-H) (Harichane and Ghrici 2009<sup>p.26</sup> ☞ ; Harichane et al. 2012<sup>p.26</sup> ☞ ).

### 3.3. Traitement au 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.).

## 4. Amélioration des sols par renforcement des terres

Terre renforcée	11
Renforcement par clouage	12
Renforcement par matériaux synthétiques	12
Autres techniques d'amélioration des sols	13

### 4.1. Terre renforcée

La *terre renforcée* est un matériau composite qui consiste en un sol contenant des éléments le renforcement (ex : bandes d'*acier galvanisées* ).

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 ou le renforcement commence à travailler (frottement).

Pour les sols fins ou 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 arrangees 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* actionnant 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.

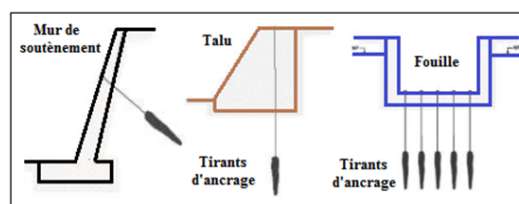
## 4.2. Renforcement par clouage

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 ( *Plumelle 1987*<sup>p.28</sup> ).

Il y a deux techniques de renforcement des sols in situ pour stabiliser les pentes et les excavations: clouage des sols, micro pieux réticulés (*Fig. II.3*).

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  $45^\circ$  à  $60^\circ$  environ. Ces méthodes sont comparables à celles de clouage des parois rocheuses fracturées.

Fig. II.3 — Technique de renforcement in situ par tirants d'ancrage.



## 4.3. Renforcement par 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 *géo-grides*, les *géo-membranes*, les *géotextiles* (*Atlas Fondations*<sup>p.25</sup> ), les *géo-composites*...etc.

#### 4.4. Autres techniques d'amélioration des sols

Électro-osmose	13
Électrochimie	13
Terre renforcée (armée)	14
Stabilisation provisoire par congélation	14
Induction hydraulique	15

##### 4.4.1. Électro-osmose

L'*électro-osmose* a été initialement mise au point par *Casagrande (1947)*<sup>p.25</sup> 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. II.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.

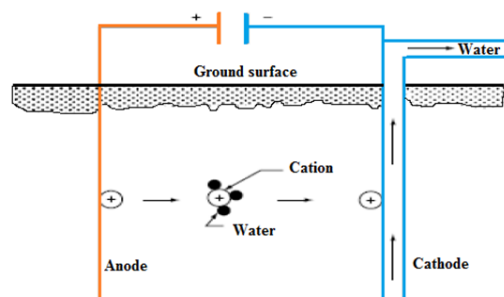


Fig. II.4 — Principe de la technique électro-osmose.

##### 4.4.2. Électrochimie

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. II.5*).

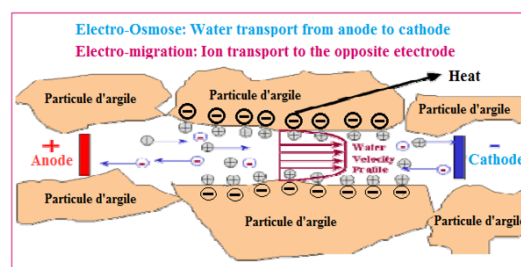


Fig. II.5 — Principe de la technique électrochimie.

Les *cations* associées 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.

#### 4.4.3. Terre renforcée (armée)

La terre renforcée est un matériau composite qui consiste en un sol contenant des éléments de 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, 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 de frottement entre le sol et le renforcement, ou par rupture de la traction des éléments renforçant.

#### 4.4.4. Stabilisation provisoire par congélation

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.

- 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, lorsque 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.

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.

#### 4.4.5. Induction hydraulique

La technique d'*induction hydraulique* se distingue du *vibro-compactage* 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. 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).

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.

## 5. Activités d'apprentissage locales du chapitre II

Exercice : Questions de cours

16

Exercice n°01

16

Exercice n°02

17

## 5.1. Exercice : Questions de cours

[solution n°2 p.19]

### 5.1.1. Exercice : Question n°01

Améliorer ou renforcer un sol : pourquoi ?

### 5.1.2. Exercice : Question n°02

L'amélioration des sols peut se faire par traitement (stabilisation) ou par renforcement, quelle est la différence entre le traitement (stabilisation) et le renforcement ?

## 5.2. Exercice n°01

Question

[solution n°3 p.20]

1. Calculer la charge permanente (CP) des deux argiles présentées ci-dessous ?

- *Kaolinite* :  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- *Montmorillonite* :  $(\text{Al}_{3.4}\text{Mg}_{0.6})\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

2. Que signifient les deux valeurs obtenues ?



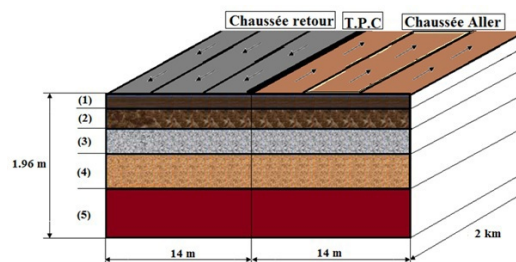
## 5.3. Exercice n°02

Question

[solution n°4 p.20]

Nous voulons décaper seulement les matériaux constituant la chaussée aller endommagée (Fig. II.6) de la voie autoroutière et de les remplacer par d'autres matériaux apportés d'ailleurs sur une longueur de «  $L = 2 \text{ km}$  », d'épaisseur de «  $e = 1.7 \text{ m}$  » (sans tenir compte des épaisseurs de BB et de GB) et de largeur de «  $b = 14 \text{ m}$  ».

Fig. II.6 - Différentes couches constituant la chaussée autoroutière endommagée.



D'autre part, le *Tableau II.1* représente les dimensions géométriques et les propriétés de compactage qui correspondent à chacune des épaisseurs partielles constituant la chaussée autoroutière endommagée.

**Tableau II.1** – Dimensions géométriques et caractéristiques de compactage des différentes couches de la chaussée autoroutière endommagée.

Composantes de la chaussée autoroutière	Nom de la couche + Matériau de remplacement	Epaisseur de la couche (m)	Caractéristiques de compactage	
			$V_{\text{Dmax}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\text{OPM}}$ (%)
3	Couche de fondation (graves concassées ou tuf, GC)	0.30	17.3	12.5
4	Couche de forme (Tout venant d'oued, TVO)	0.40	16.3	14.5
5	Sol support (apportés d'ailleurs)	1.00	15.3	22.5

1. Calculer les volumes géométriques (en m<sup>3</sup>) des matériaux de remplacement des couches (3), (4) et (5) ?
2. Calculer les poids (en tonnes) des matériaux de remplacement des couches (3), (4) et (5) ?
3. Déterminer les volumes d'eau (en m<sup>3</sup>) pour les matériaux de remplacement des couches (3), (4) et (5) nécessaires à utiliser lors du compactage pour atteindre les densités sèches maximales ?

# Conclusion



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 est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce cas, différentes techniques ont été développées depuis des décennies.

Grâce 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.

# Solutions des exercices



## > Solution n° 1

Exercice p. 7

Exercice : Question n° 01

Quels sont les paramètres de cisaillement intrinsèques d'un sol ?

La cohésion et l'angle de frottement interne.

Exercice : Question n° 02

Quels sont les essais qui permettent la détermination des paramètres de cisaillement intrinsèques d'un sol ?

Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande et l'essai triaxial.

Exercice : Question n° 03

Quels sont les caractéristiques de compressibilité d'un sol ?

Le coefficient de compression, le coefficient de gonflement et la pression de pré-consolidation.

Exercice : Question n° 04

Quel est l'essai qui permet la détermination des caractéristiques de compressibilité d'un sol ?

Essai de compressibilité à l'oedomètre.

## > Solution n° 2

Exercice p. 16

Exercice : Question n° 01

Améliorer ou renforcer un sol : pourquoi ?

L'amélioration et le renforcement des sols font partie des techniques qui rendent possible la construction en compliquant les travaux.

Exercice : Question n° 02

L'amélioration des sols peut se faire par traitement (stabilisation) ou par renforcement, quelle est la différence entre le traitement (stabilisation) et le renforcement ?

Le traitement ou la stabilisation des sols consistent en l'amélioration des caractéristiques géotechniques de la masse du sol elle-même par différentes méthodes telles que le compactage dynamique, le vibro-compactage, stabilisation chimique...etc. Par contre, le renforcement consiste en l'introduction des éléments rigides ou souples dans la matrice du sol à améliorer tels que les géotextiles, les plaques



métalliques, les ballastes, les cloues en acier...etc.

### > Solution n°3

Exercice p. 16

1/. Calcul la charge permanente (CP) de la Kaolinite :  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

- Le bilan de charge est constitué de 4 atomes  $\text{Si}^{4+}$  + 4 atomes  $\text{Al}^{3+}$  + 18 atomes  $\text{O}^{2-}$  + 8 atomes  $\text{H}^+$ .
- $\text{CP} = (4 \cdot 4) + (4 \cdot 3) + [18 \cdot (-2)] + (8 \cdot 1)$ , Donc :  $\text{CP} = 0$  (charge nulle)
- Signification : Cette argile n'a pas de charge permanente et donc aucun cation interfoliaire pour neutraliser la charge. La totalité de la capacité d'échange de cette argile est liée à ses charges variables de bordure.

2/. Calcul la charge permanente (CP) de la Montmorillonite :  $(\text{Al}_{3.4}, \text{Mg}_{0.6})\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

- Le bilan de charge est constitué de 8 atomes  $\text{Si}^{4+}$  + 3.4 atomes  $\text{Al}^{3+}$  + 0.6 atomes  $\text{Mg}^{2+}$  + 24 atomes  $\text{O}^{2-}$  + 4 atomes  $\text{H}^+$ .
- $\text{CP} = (8 \cdot 4) + (3.4 \cdot 3) + (0.6 \cdot 2) + [24 \cdot (-2)] + (4 \cdot 1)$ , Donc:  $\text{CP} = - 0.6$  (déficit de charge permanente négative).
- Signification : ce déficit est comblé par l'incorporation de 0.6 cations monovalent, ou 0.3 cations divalent (dans l'exemple on considère  $(\text{Na})_{0.6}$  :  $[(\text{Na})_{0.6}(\text{Al}_{3.4}, \text{Mg}_{0.6})\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ ). La totalité de la capacité d'échange cationique de cette argile est liée à ses charges permanentes ainsi qu'à ses charges de bordure.

### > Solution n°4

Exercice p. 17

1/. Calcul des volumes géométriques

- $V_{g(3)} = e_{(3)} \cdot b \cdot L$  ; AN :  $V_{g(3)} = 0.3 \cdot 14 \cdot 2000 = 8400 \text{ m}^3$  ;  $V_{g(3)} = 8400 \text{ m}^3$
- $V_{g(4)} = e_{(4)} \cdot b \cdot L$  ; AN :  $V_{g(4)} = 0.4 \cdot 14 \cdot 2000 = 11200 \text{ m}^3$  ;  $V_{g(4)} = 11200 \text{ m}^3$
- $V_{g(5)} = e_{(5)} \cdot b \cdot L$  ; AN :  $V_{g(5)} = 1.0 \cdot 14 \cdot 2000 = 28000 \text{ m}^3$  ;  $V_{g(5)} = 28000 \text{ m}^3$

2/. Calcul des poids des matériaux de remplacement (en tonne)

- $Y_{dmax(3)} = P_{S(3)} / V_{g(3)}$  ;  $P_{S(3)} = Y_{dmax(3)} \cdot V_{g(3)}$  ; AN :  $P_{S(3)} = 17.3 \cdot 8400 = 145320 \text{ kN}$  ;  $P_{S(3)} = 14532 \text{ t}$
- $Y_{dmax(4)} = P_{S(4)} / V_{g(4)}$  ;  $P_{S(4)} = Y_{dmax(4)} \cdot V_{g(4)}$  ; AN :  $P_{S(4)} = 16.3 \cdot 11200 = 428400 \text{ kN}$  ;  $P_{S(4)} = 42840 \text{ t}$

- $Y_{dmax(5)} = P_{S(5)} / V_{g(5)}$  ;  $P_{S(5)} = Y_{dmax(5)} * V_{g(5)}$  ; AN :  $P_{S(5)} = 15.3 * 28000 = 145320 \text{ kN}$  ;  $P_{S(5)} = 14532 \text{ t}$

### 3/. Calcul des volumes d'eau (en m<sup>3</sup>)

- $W_{opt(3)} = P_{W(3)} / P_{S(3)}$  ;  $P_{W(3)} = W_{pot(3)} * P_{S(3)}$  ; AN :  $P_{W(3)} = 0.125 * 14532 = 1816.5 \text{ t}$  ;  $P_{W(3)} = 1816.5 \text{ m}^3$
- $W_{opt(4)} = P_{W(4)} / P_{S(4)}$  ;  $P_{W(4)} = W_{opt(4)} * P_{S(4)}$  ; AN :  $P_{W(4)} = 0.125 * 14532 = 1816.5 \text{ t}$  ;  $P_{W(4)} = 1816.5 \text{ m}^3$
- $W_{opt(5)} = P_{W(5)} / P_{S(5)}$  ;  $P_{W(5)} = W_{opt(5)} * P_{S(5)}$  ; AN :  $P_{W(5)} = 0.125 * 14532 = 1816.5 \text{ t}$  ;  $P_{W(5)} = 1816.5 \text{ m}^3$

# Glossaire



## **Additif minéral**

Ajout cimentaire permettant d'améliorer les propriétés mécaniques des matériaux de construction (bétons, sols, etc.).

## **Amélioration (Improvement)**

opération quasi instantanée qui consiste à améliorer les propriétés géotechniques du sol (augmentation de la portance, de la résistance à la pénétration, amélioration de l'aptitude du sol au compactage), alors que la nature du sol reste la même. Cette opération permet d'assurer la mise en œuvre du sol avec les ateliers traditionnels de terrassement. Ce traitement ne donne pas une garantie de durabilité vis-à-vis de l'eau et du gel.

## **Capacité d'échange cationique (Cation exchange capacity)**

Quantité totale de cations échangeables que le sol peut adsorber. Se dit parfois: capacité totale d'échange; pouvoir d'échange de cations; ou capacité d'adsorption de cations. Elle s'exprime en milliéquivalents par 100 g de sol ou de toute autre substance adsorbante, comme l'argile.

## **Charge permanente (permanent charge)**

Charge nette, négative ou positive, des particules d'argile, propre au réseau cristallin de la particule. Elle est indépendante des variations du pH et des réactions d'échange ionique.

## **Chaux (Lime)**

Consiste principalement en carbonate de calcium, contenant aussi du carbonate de magnésium et parfois d'autres substances. Utilisé comme source de calcium et de magnésium qui sont deux éléments essentiels dans la croissance des plantes, et pour neutraliser l'acidité du sol.

## **Échange cationique (cation exchange)**

Échange de cations entre une solution et la surface de toute substance comme les colloïdes organiques.

## **Espace interfoliaire (interfoliaire space )**

La distance basale entre deux feuillets argileux consécutifs.

## **Gypse (gypsum)**

Sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

## **Kaolinite (kaolin)**

Silicates d'aluminium hydratés ayant la structure 1:1 des phyllosilicates et ne possédant aucune charge permanente.

### **Liant hydraulique**

Additif minéral sert à améliorer les propriétés physico-mécaniques des matériaux de construction (ciment, chaux etc.).

### **Liquéfaction (Liquefaction)**

Baisse importante et soudaine de la résistance au cisaillement d'un sol sans cohésion. Cette baisse est due à un effondrement de la structure causé par un choc ou une autre force, et est associée à un accroissement subit et temporaire de la pression de l'eau interstitielle. Ce phénomène comporte une transformation temporaire de la matière en une masse fluide.

### **Montmorillonite (same in English : montmorillonite)**

Minéraux argileux ayant un réseau cristallin 2:1 expansible. La substitution isomorphe donne naissance aux divers types de montmorillonite et crée une charge nette permanente équilibrée par des cations, de telle sorte que l'eau peut s'infiltrer entre les feuillets, produisant un échange réversible de cations et lui donnant des propriétés notables de plasticité.

### **Perméabilité (Permeability)**

(I) facilité avec laquelle les gaz et les liquides pénètrent ou traversent une masse brute ou une couche de sol. Comme les divers horizons possèdent des perméabilités différentes, l'horizon doit être spécifié. (ii) Propriété que possède un corps poreux de laisser passer plus ou moins facilement les gaz ou les liquides. La perméabilité était autrefois associée au facteur «k» de la loi de Darcy. Il s'agit du facteur «K» de la perméabilité intrinsèque.

### **pH du sol (Soil pH)**

Logarithme négatif de l'activité des ions d'hydrogène d'un sol. Degré d'acidité ou d'alcalinité, mesuré au moyen d'une électrode en verre, d'une électrode ou Indicateur approprié, d'un sol ayant une teneur en eau ou un rapport sol/eau déterminé; s'exprime en unités de l'échelle des pH.

### **Pouzzolane naturelle (Natural pozzolana)**

Roche volcanique très poreuse et très riche en silice réactive. Elle est utilisée comme additif dans la fabrication des ciments, mélangée avec la chaux pour stabiliser les sols mous et aussi utilisée comme ballastes dans les systèmes de drainage des eaux.

### **Réactions pouzzolaniques**

Réactions chimiques se produisant entre le calcium apporté par l'ajout cimentaire (ex : chaux) et les particules d'argiles (silice, alumine, etc.) en présence d'eau à haut pH.

### **Renforcement des sols (soils reinforcement)**

inclusions de matériaux résistants au sein du sol.

### **Stabilisation (Stabilization)**

opération à moyen ou à long terme consistant à augmenter très sensiblement les caractéristiques mécaniques d'un sol, de manière à conférer durablement au matériau un état définitif de stabilité à l'eau et au gel. Elle se traduit, entre autres par un durcissement graduel du mélange au cours des semaines et des mois qui suivent le compactage. Ces effets pourraient être mis à profit dans le dimensionnement de certaines chaussées, mais n'interviennent pas au niveau des travaux de terrassement.

### **Terrains médiocres**

Ce sont des terrains présentant de mauvaises propriétés géotechniques (forte compressibilité, gonflement élevé, forte plasticité, etc.).

### **Traitement (Treatment)**

terme général pour désigner un procédé consistant à modifier un matériau donné afin qu'il puisse remplir les fonctions auxquelles on le destine.



# Bibliographie



Aguado, P., et al. (2011). Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement. Code de la Construction et de l'Habitation R111-40, Version n° 2 du 16 mars 2011, p. 1–32.

Mécanique des sols, les colonnes ballastées (mise en œuvre et calcul), Algérie équipement n° 35, (2002), 29-32. <http://193.194.92.228/enstp/revue/files/article/35/article%207.pdf>

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Applied Clay Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 191–198, doi:10.1016/j.clay.2010.07.023.

Atlas Fondations, cas réels d'inclusions rigides : [http://www.atlas-fondations.fr/Referenties/Piles/Referenties-verstevigende-insluiting.aspx#ref\\_verst\\_insl\\_5](http://www.atlas-fondations.fr/Referenties/Piles/Referenties-verstevigende-insluiting.aspx#ref_verst_insl_5)

Atlas Fondations, cas réels de colonnes ballastées : <http://www.atlas-fondations.fr/Referenties/Piles/Referenties-grindkern.aspx>

Atlas Fondations, colonnes ballastées : <http://www.atlas-fondations.fr/Business-Units/Piles/Grindkern.aspx>

Atlas Fondations, inclusions rigides : <http://www.atlas-fondations.fr/Business-Units/Piles/Verstevigende-insluiting.aspx>

Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology*, Vol. 42, No. 4, pp. 223–237, doi: 10.1016/0013-7952(96)00028-2.

Bustamante, Gianceselli L. (1994). Portance d'un groupe de colonnes de sol traité par jet grouting sous charge verticale axiale. *Bull. de Liais. Labo. Ponts et Chaussées* 189.

Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Université Jean Monnet.

Casagrande, A. (1947). The pile foundation for the new John Hancock Building in Boston. Graduate School of Engineering, Harvard University.

CRR (2009). Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, Recommandations, centre de recherches routières (CRR). R81/10, Boulevard de la Woluwe 42 – 1200 Bruxelles, p. 126.

Das, B.M. (1983). Principles of foundation engineering. Thomson.

Debats, J.M., (2012). Descriptifs des procédés d'amélioration et renforcement de sol, Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques, Journée du 14 novembre 2012, Guide AFPS/CFMS.

De Cock, F. and Bottiau, M. (2004). Compactage dynamique et vibrocompactage dans un hall industriel en cours de construction: un défi géotechnique. ASEP-GI 2004 –Vol. 2. Magnan (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris.

Gaafer, M., Bassioni, H., Mostafa, T. (2015). Soil Improvement Techniques, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 6, No. 12, pp. 217–222, <http://www.ijser.org>.

Gabr, A.K. (2012). The Uncertainties of Using Replacement Soil in Controlling Settlement. The Journal American of Science, Vol. 8, No. 12, pp. 662–665, doi: 10.7537/marsjas081212.91.

Gadouri H (2017). Influence of sulphates on the stabilization of clayey soils using mineral additives. Ph.D thesis, Medea University, Algeria. [https://www.researchgate.net/publication/330912668\\_Influence\\_of\\_sulphates\\_on\\_the\\_stabilization\\_of\\_clayey\\_soils\\_using\\_mineral\\_additives](https://www.researchgate.net/publication/330912668_Influence_of_sulphates_on_the_stabilization_of_clayey_soils_using_mineral_additives).

Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2016). Effects of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the geotechnical properties of clayey soils stabilised with mineral additives. Int J Geotech Eng 11(5):500–512. doi:10.1080/19386362.2016.1238562.

Gadouri H, Harichane K, Ghrici M (2017). Effect of calcium sulphate on the geotechnical properties of stabilized clayey soils. Period Polytech Civil Eng 61(2):256–271. doi: 10.3311/PPci.9359.

Guide G.T.R. (1992) : <https://fr.scribd.com/doc/136991376/Guide-Des-Terrassements-Routier-GTR#>

Harichane, K., and M. Ghrici. (2009). Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Plasticity of Soft Clayey Soils, 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, May 30, Nicosia: Near East University.

Harichane, K., M. Ghrici, and S. Kenai. (2012). Effect of the Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Compaction and Strength of Soft Clayey Soils: A Preliminary Study, *Environmental Earth Sciences* 66 (8):2197–2205.

Hartwingsen, G. (2012). Etude et modélisation du renforcement de sol par Colonnes à Module Mixte (CMM)». Insa Strasbourg.

Kauschinger L.J., Perry E.B., Hankour R. (1992b). Jet grouting State of the practice. ASCE Conf. on Grouting. Soil Improv. and Geosynth. New Orleans.

Kauschinger L.J., Hankour R.S., Perry E.B. (1992b). Methods to estimate composition of jet grout bodies. ASCE Conference on Grouting, Soil Improv. and Geosyn. New Orleans.

Le Borgne, T. (2010). Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilisation. Doctoral dissertation, Ph.D thesis, Nancy-Université, France, <http://hdl.handle.net/10068/842439>.

Locat, J., Berube, M.A., Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 294–304, doi: 10.1139/t90-040.

Magnan J.P., (2010). L'amélioration et le renforcement des sols, *Géotechnique 1*, École Nationale des Ponts et Chaussées.

Menard (2010). <https://www.menard-group.com/en/techniques/dynamic-compaction/> « Cas pratiques ».

Ménard, L., Broise, Y. (1975). Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation, *Geotechnique* 25 (1).

Morey J. (1992). Les domaines d'application du jet grouting. *Revue Française de Géotechnique* n° 61 : 17-30. Dec. 92.

NF EN 1097-1, (2011) : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-1097-1/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-des-granulats-partie-1-determination-de-la-resistance-a-l-us/article/691799/fa163865>

NF EN 1097-2 (2010) : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-1097-2/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-de-granulats-partie-2-methodes-pour-la-determination-de-la-r/article/767886/fa163871>

NF P11-213-3 (DTU 13.3) (2005). Dallages - Conception, calcul et exécution - Partie 3: cahier des clauses techniques des dallages de maisons individuelles, Généré par i-Reef - Edition S141 - Septembre 2005. [https://www.kp1.fr/files/DTU\\_13\\_3\\_KP1.pdf](https://www.kp1.fr/files/DTU_13_3_KP1.pdf)

Plumelle C. (1987). Expérimentation en vraie grandeur d'une paroi clouée. Projet National Clouterre. Revue Française de Géotechnique

Schlosser, F. (1997). Amélioration et renforcement des sols Thème lecture: Soil improvement and reinforcement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France, p. 2445-2466.

Schlosser F., Magnan J.P., Holtz R.D. (1985). Geotechnical Engineering Construction. General Report. Proc. 11<sup>th</sup> ICSMFE San Francisco.

Taube, M.G. (2008). Prefabricated Vertical Drains-The Squeeze Is On. Geo-Strata-Geo Institute of ASCE, Vol. 9, No. 2, pp. 12-14.

Varghese P.C. (2005). Foundation engineering. New Delhi: PHI learning private limited, India.