

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Civil

N° : .....



DOMAINE : Génie Civil

FILIERE : Génie Civil

OPTION : géotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par: Doudou Souad

Ben Toumi Ghania

Intitulé

**ETUDE COMPARATIVE DES METHODES DE  
TRAITEMENT DES SOL AFFAISSABLES**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Nom et prénom Enseignant

.....

Université .....

Président

Mr. Belouahri Brahim

Université de M'sila

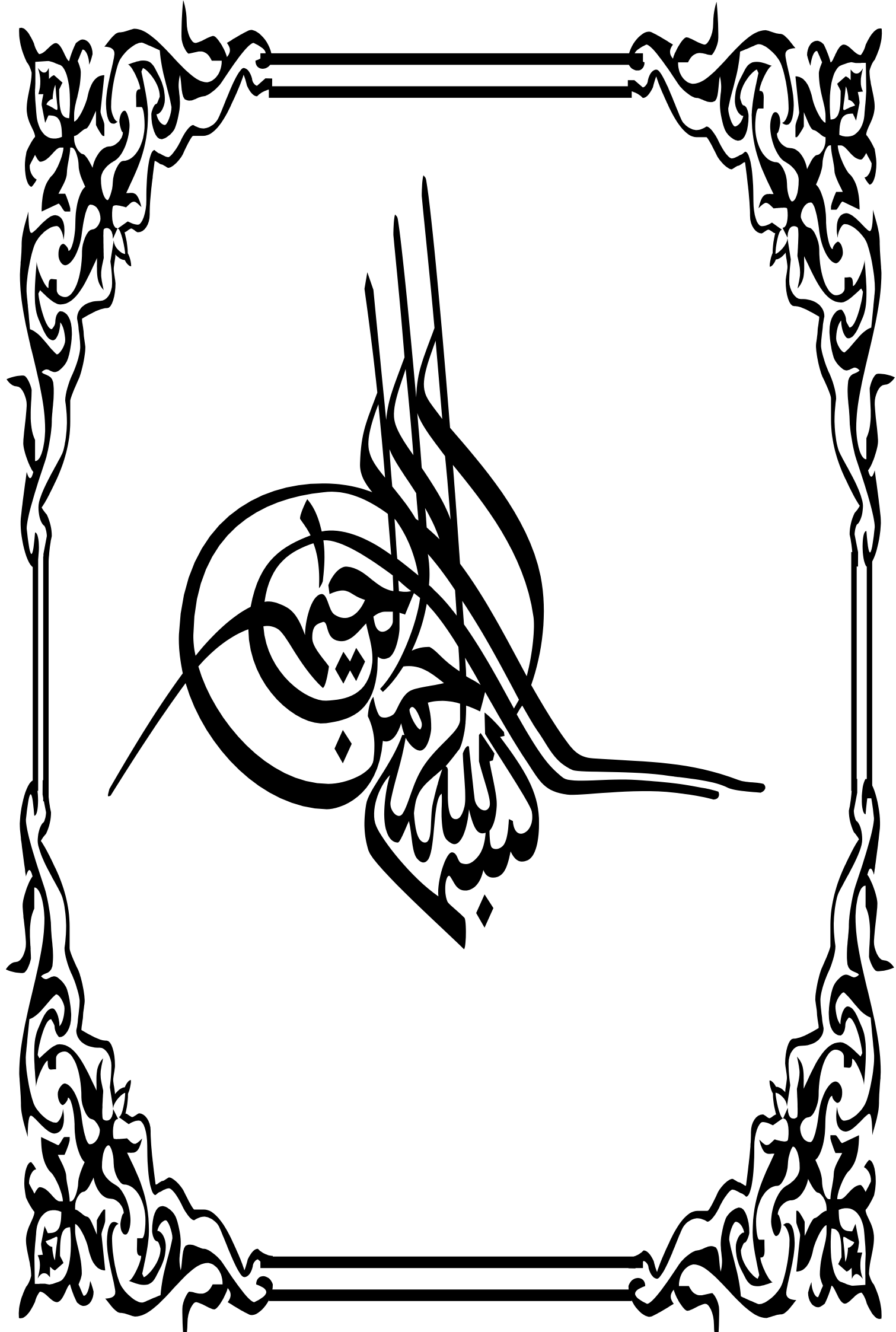
Rapporteur

.....

Université .....

Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**



## DEDICACES



*Je dédie ce modeste travail à:*

*Ma mère FATIMA.*

*Mon père ALLALE.*

*Mes sœurs et mes frères.*

*Toute la famille « DOUDOU ».*

*Tous mes amis intimes surtout*

*FADILA, SELMA, Fatîha, WARDA*

*Je veux surtout dédier ce travail à mes très chers camarades de promotion Master « Génie civil » avec lesquels j'ai passé des moments précieux et inoubliables, je vous souhaite tous une vie plein de joie et de bonheur et une carrière plein de succès et que vous achevez tout ce que vous désirez dans la vie.*

*À tous mes enseignants qui m'ont apporté leur savoir et tout ce que je connais maintenant et ont contribué énormément dans mon éducation.*

*Vous trouvez mes sincères gratitudees.*

*A mon binôme GHANIA*

*A tout ce qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*

*À mon très cher pays l'Algérie*

*A tous ce qui ont aidés de loin ou de près Pour la réalisation de ce mémoire.*

*Toute la promotion 2018 /2019.*

*Doudou, S*

## DEDICACES



*Je dédie ce modeste travail à:*

*Ma mère Houria.*

*Mon père bayzid*

*Mes sœurs et mes frères.*

*Toute la famille «ben toumi».*

*Tous mes amis intimes surtout : hada,souad  
,SELMA ,menel,.*

*Je veux surtout dédier ce travail à mes très  
chers camarades de promotion Master « Génie  
civil » avec lesquels j'ai passé des moments  
précieux et inoubliables, je vous souhaite tous  
une vie plein de joie et de bonheur et une  
carrière plein de succès et que vous achevez tout  
ce que vous désirez dans la vie.*

*À tous mes enseignants qui m'ont apporté leur  
savoir et tout ce que je connais maintenant et  
ont contribué énormément dans mon éducation.*

*Vous trouvez mes sincères gratitudees.*

*A tout ce qui ont participé de loin ou de près à  
la réalisation de ce travail.*

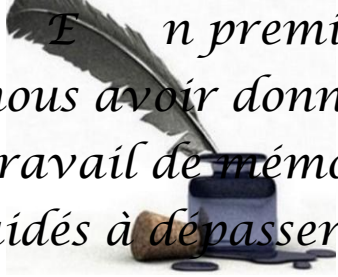
*À mon très cher pays l'Algérie*

*A tous ce qui ont aidés de loin ou de près Pour la  
réalisation de ce mémoire.*

*Toute la promotion 2018 /2019.*

*Ben toumi,G*

## REMERCIEMENTS



*En premier lieu, nous remercions Dieu de nous avoir donné la capacité d'achever ce travail de mémoire de fin d'étude, et nous avoir aidés à dépasser toutes les difficultés rencontrées.*

*En second lieux n'oublions pas de remercier chaleureusement nos parents, et nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre encadreur de mémoire, Mr.*

*BELOUAHRI BRAHIM, Professeur à l'université de M'sila, pour l'orientation, a confiance, la patience, qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port, qu'il trouve de ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire (l'équipe de laboratoire GC de m'sila), et le chef de département de génie civil Mr : BAALI LAID,*

*ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*En fin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègue pour le soutien moral et matériel.*

## *Sommaire*

DEDICACE.....	
REMERCIEMENT .....	
SOMMAIRE .....	
LISTE DES FIGURES .....	
LISTE DES TABLEAUX .....	
LISTE DES NOTATIONS .....	
الملخص.....	
RESUME.....	
ABSTRACT.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	

### *Chapitre I*

#### ***ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS AFFAISSABLES***

I.1-Introduction : .....	3
I.2-Définitions Des Sols Affaissables : .....	3
I.3 - Aperçu Historique Sur Les Etudes Des Sols Affaissables :.....	4
I.4-Répartition Des Sols Affissables A Travers Le Monde : .....	4
I.5- Repartition Des Zone Arides A travers le Monde :.....	4
I.6- les territoires aride et semi-arides de l’afrique du nord :.....	5
I.7- Types Des Sols Affaissables : .....	6
I.7.1- Les loess : .....	6
I.7.2- Dépôts éoliens : .....	7
I.7.3- Dépôts alluviaux :.....	7
I.7.4- Les sols résiduels : .....	7

---

I.7.5- Autres types des sols Affaissables :.....	8
I.8 - Formation Des Sols Affaissables :.....	8
I.9 - Classement Des Sols Affaissables :.....	9
I.10- Les propriétés physiques des sols affaissables :.....	9
I.11- Les Dénominations Des Sols Affaissables :.....	10
I.12- Les causes d'inondation des sols Affaissables :.....	10
I.13- Phénomènes d'effondrement :.....	11
I.14-cas d'effondrement dans les zones arides et semi-arides en Algérie :.....	12
I.14.1 : L'effondrement de Tafziouine à Guerrara, wilaya de Ghardaïa :.....	13
I.14. 2 :L'effondrement de Sahb-Elbir à Mansourah, wilaya de Ghardaïa :....	13
I.14. 3 : L'affaissement d'El M'Rara dans la wilaya d'El Oued :.....	14
I.15 - mécanismes de l'effondrement des sols :.....	15
I.16- Les paramètres qui influent sur l'effondrement des sols :.....	20
I.17-Méthodes prédictives des sols affaissables :.....	21
I.17.1- Méthodes empiriques et semi empiriques :.....	21
I.17.2-Méthodes expérimentales :.....	27
I.17.3. Les méthodes théoriques :.....	31
I.18- des ouvrages sur sols collapsibles :.....	31
I.18.1. Cas des bâtiments :.....	32
I.18.2. Cas des constructions hydrauliques :.....	32
I.18.3. Cas des ouvrages hydrocarbures :.....	33

## *Chapitre II*

### ***METHODES DE TRAITEMENT DES SOLS AFFAISSAB***

II.1 - Généralités .....	35
II.2- Domaines d'application des techniques d'amélioration .....	36
II.3 - Les Méthodes De Traitement Des Sols Affaissables.....	36
II.3.1-Traitement par compactage .....	37
A : Traitement par compactage dynamique .....	39
B : Vibrocompactage .....	40
II.3.2- Traitement chimique.....	41
1-Traitement à la chaux. ....	42
2- Traitement au ciment. ....	43
II.3.3-Traitement thermique.....	43
II.3.4-Traitement électrique.....	44
II.3.5 -Traitement par pré chargement.....	45
II.3.6-Traitement par colonne ballastée.....	46
II.3.7-Traitement par substitution.....	47
II.3.8-Traitement par injection.....	48
II .3.9 -Traitements par congélation .....	49
II.3.10-Traitement par pieu de chaux.....	50
II.3.11-Traitement par pieu de sable.....	51
II.3.12- La Silicatisation.....	51
II.3.13. Traitement par drains verticaux DV.....	52

---

II.3.14 -Traitement par pré-mouillage.....	53
II.4.Le choix des techniques de traitement des sol.....	54
II.4.1 : Le choix basé sur profondeur du sol.....	54
II.4.2 : Le choix basé sur classes granulométriques et l'état du sol.....	55

### ***Chapitre III***

#### ***Comparaison des différentes méthodes de traitement.***

III.1 : Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement.....	56
III.2 : Technique d'amélioration et stabilisation des sols affaissables .....	56
III.3 : Résumé général des sols effondrables .....	57
III.4 : Evaluation des méthodes de traitement.....	58
III.5 : Exemple de construction sur sol affaissable en Algérie .....	65

### ***Chapitre IV***

#### ***Conclusion et recommandation.***

IV.1 : <i>Conclusion et recommandation</i> .....	56
IV.2 : Références bibliographiques	



# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

### ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES AFFAISSABLES

Figure I-1: Carte mondiale modern des zones arides.....	5
Figure I-2 : Carte sur les régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, par l'Institut International de la zone aride en (1960).....	6
Figure I- 3 : effondrement des ville.....	12
Figure I-4 : Photos de l'effondrement de Tafziouine.....	13
Figure I- 5 : Photos de l'effondrement Sahb-Elbir.....	14
Figure I- 6 : Photos de l'affaissement d'EL M'Rara.....	15
Figure I-7 : Structure des particules en nids d'abeilles.....	15
Figure I- 8 : Liaison par tension capillaire.....	16
Figure I- 9 : Liaison par grains silteux.....	16
Figure I- 10 : Liaison par des ponts argileux.....	17
Figure I-11 : Liaison par agrégats d'argiles.....	17
Figure I- 12 : Liaison par l'argile floquée.....	17
Figure I-13 : Interprétation microstructurale des déformations de chargement.....	18
Figure I-14 : La structure chargée avant et après l'inondation (après Casagrande 1932).....	18
Figure I-15 : Structure du sol après l'effondrement.....	19
Figure I-16: Critère d'évaluation du risque d'effondrement proposée par Gibbs et Bara (1962).....	23
Figure I.17: Courbe oedométrique (teste de Knight 1963).....	29

Figure I.18 : Double oedomètres (Knight et Jennings 1975).....	30
--	----

## **CHAPITRE II**

### **METHODES DE TRAITEMENT DES SOLS AFFAISSABLES**

Figure II.1: Un rouleau compacteur.....	37
Figure II.2 : Une masse qui chute.....	37
Figure II.3 : Compactage par vibro-sonde.....	38
Figure II.4 : Compactage par plaque vibrante lourde.....	38
Figure II.5 : Étapes du vibrocompactage.....	41
Figure II.6 : Traitement par la chaux.....	42
Figure II.7 : Traitement chimique à la chaux et au ciment.....	43
Figure II.8 : Principe de traitement par pré chargement. ....	46
Figure II.9 : Pré chargement pour drains verticaux.....	46
Figure II.10 : Mise en œuvre des colonnes ballastées.....	47
Figure II.11 : Substitution du mauvais sol. (J.P MAGNAN, 2000).....	48
Figure II.12 : Traitement par injection.....	49
Figure II.13 : Traitements par congélation.....	50
Figure II.14: Principe de traitement avec les DV En plastique.....	53
Figure II.15 : Traitement par DV .....	53
Figure II.16 : de la granulométrie du sol final.....	55

# *Liste des tableaux*

## *Chapitre I*

### *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES AFFAISSABLES*

<b>Tableau I.1:</b> coefficient dépend de la nature de sol (coefficient de Stephanoff et Kremakova).....	22
<b>Tableau I.2 :</b> Classement des sols affaissables d'après Jennings et Knight (1975).....	31

## *Chapitre II*

### *METHODES DE TRAITEMENT DES SOLS AFFAISSABLES*

<b>Tableau II.1 :</b> Méthodes de traitement des sols affaissables d'après Bara (1976).....	54
---	----

## *Chapitre III*

### *COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES DE TRAITEMENT.*

<b>Tableau III.1 :</b> résumé général des sols effondrables.....	57
<b>Tableau III.2:</b> Solution pour les fondations sur sols affaissables selon Antoine(1994).....	58
<b>Tableau III.3:</b> Comparaison par prédiction et mesures des effondrements par différentes Méthodes de traitements (Rollins et Rogers, 1994).....	59

<b>Tableau III.4 :</b> Comparaison des avantages et les limites des différentes méthodes (Rollins et Rogers, 1994).....	60
<b>Tableau III.5:</b> Comparaison entre les techniques d'accélération de la Consolidation.....	61
<b>Tableau III.6 :</b> Avantages en fonction de la profondeur par plusieurs Techniques D'amélioration.....	62
<b>Tableau III.7 :</b> Avantages et inconvénients par plusieurs techniques de Traitement.....	62

## *Liste des notations*

W : teneur en eaux

Sr : Degré de saturation

$\tau$  : Contrainte tangentielle moyenne

$\sigma$ : Contrainte de compression

U: La pression interstitielle

K : coefficient d'affaissement.

$e_0$  : Indice des vides initial.

$e_L$  : Indice des vides à la limite de liquidité.

$w_L$  : Limite de liquidité.

$w_0$  : Teneur en eau initial.

$I_P$  : Indice de plasticité.

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau.

$\gamma_d$  : Poids volumique sec.

$G_S$  : Densité des grains solides.

$w_0$  : Teneur en eau naturelle.

$w_p$  : Limite de plasticité.

$I_P$  : Indice de plasticité.

$s_r$  : Degré de saturation.

$\gamma_d$  : Poids volumique sec à la limite de liquidité.

$\gamma_{dl}$  : Poids volumique sec.

## LISTE DES NOTATIONS

---

$i_{mj}$  : Coefficient de tassement mesuré à l'oedomètre.

$h_j$  : Épaisseur de la couche  $j$ .

$I_{mg}$  : Le potentiel de l'affaissement total

$H_C$  : Variation de la hauteur après mouillage.

$H_0$  : Hauteur initial de l'échantillon.

$C_u$  : Coefficient d'uniformité du sol ( $C_u = D_{60} / D_{10}$ ).

$P_{10}$  : La fraction du sol passant à travers le tamis n°10 (2mm).

$P_{200}$  : La fraction du sol passant à travers le tamis n°200 (0.075mm).

$D_x$  : C'est le diamètre qui à travers lequel passe x% du sol.

$e_1$  : Indice des vides au début de la saturation.

$e_2$  : Indice des vides a la fin de la saturation.

## Résumé :

Les sols affaissables sont des sols métastables, à structure ouverte lâche, de nature non saturés, se trouvant sous forme de dépôts. A l'état sec, une cimentation naturelle entre les grains leur confère une importante liaison intergranulaire et peuvent supporter des charges très élevées.

Cependant la saturation, même sans chargement supplémentaire, provoque la désintégration des liaisons donnant une structure plus dense suivie d'un effondrement soudain des particules du sol.

Le problème de l'identification puis du traitement des sols affaissables a fait l'objet de nombreux travaux de recherche aboutissant à de multitudes résultats différents et parfois contradictoires.

A cet effet et dans le but de contribuer à trouver une solution au problème d'affaissement, nous avons proposé cette étude qui s'inscrit dans le cadre du traitement des sols affaissables.

**Mots clés :** sol affaissable, traitement.

## المخلص :

التربة القابلة للطي هي تربة غير مستقرة ببنية مسامية مفتوحة مشبعة في مشبع طبيعيا وتوجد في شكل ودائع التدعيم الطبيعي في حالة الجفاف يضيف رابطا مهما بين الحبيبات. ويمكن ان تحمل احمال عالية جدا. اثناء التشبع وحتى من دون احمال, إضافية, يحدث تفكك لهذه الروابط ليعكس هيكل أكثر كثافة يليه انهيار مفاجئ لجسيمات التربة. وكانت مشكلة تحديد ومعالجة التربة القابلة للطي من العديد من الدراسات البحثية الرائدة المختلفة ومتناقضة في بعض الأحيان نتائج الجموع. لهذا الغرض ومن اجل المساهمة في إيجاد حل لمشكلة هبوط اقترحنا هذه الدراسة التي هي جزء من علاج التربة القابلة للطي.

**الكلمات الاستدلالية:** التربة القابلة للطي, طريقة المعالجة.

## Abstract :

The collapsible soils are metastable soils, open porous structure, non-saturated nature, being in the form of deposits. A dry, natural cementation between grains gives them an important link intergranulaire and can withstand very high loads. However, the saturation, even without additional loading, causes disintegration of connections providing a more dense structure followed by a collapse of the soil particles.

The problem of identification and treatment of collapsible soils has been the subject of numerous research studies leading to different and sometimes contradictory results multitudes. For this purpose and in order to contribute to finding a solution to the problem of subsidence, we proposed this study, which is part of the treatment of collapsible soils.

**Key words:** ground affaissable.



## I. 1 INTRODUCTION :

Le sol a toujours été l'objet d'interrogations et de recherches et dans toutes les civilisations, avant de bâtir, les hommes se sont toujours préoccupés des problèmes des sols. Le développement de la géotechnique s'est limité principalement et a concerné les sols saturés en raison de difficultés à la fois expérimentales et d'interprétation des mesures. Cependant, il est indispensable de prendre en considération le comportement des sols non saturés et ce surtout dans les pays à climat désertique ou sec où l'on est en permanence confronté à ce type de sol pour la plupart des ouvrages.

L'histoire montre que la plupart des sols instables par (tassement, effondrement, glissement, liquéfaction.....) sont des sols de nature argileuse ou alluvionnaire avec un pourcentage significatif de fines, ceci a été confirmé par plusieurs études (Arab, 2008), (Lade et Yamamuro, 1997).

En génie civil, les phénomènes d'effondrements de certains sols argileux et des formations géologiques argileuses induisent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement les structures (bâtiment, fondation, ouvrage de soutènement .....).

Les sols à effondrement brusque sont des sols non saturés qui présentent des déformations potentielles importantes et un réarrangement radical de leurs particules après mouillage avec ou sans chargement. Ces sols sont caractérisés par des structures lâches formées souvent de grains allant du limon au sable fin. Ils sont localisés particulièrement dans les zones arides et semi-arides (Abbeche, 2005 ; Delage, 2000 ; Houston et al, 1994). Ces régions sont devenues de nos jours vitales, au vue de l'évolution démographique et accessibles, au vue de l'évolution technologique de l'homme lui permettant d'exploiter ses richesses. L'occupation de ces régions conduit forcément à l'utilisation de grandes quantités d'eau favorisant l'environnement idéal pour l'effondrement des sols et par conséquent la ruine des constructions. L'effondrement des formations argileuses suscite actuellement l'intérêt de la plupart des chercheurs du fait de leur abondance dans le domaine sédimentaire et de leur responsabilité des désordres occasionnés sur différents ouvrages. En effet, des chercheurs réalisent de nombreux essais au laboratoire et ce à travers le monde, ce qui justifie justement l'abondance de ce phénomène dans la nature (Lawton et al, 1989 ; Jennings et Knight, 1957 ; Knight, 1961).

La stabilisation des sols collapsibles a été étudiée par un grand nombre de chercheurs (Abbeche et al, 2010 ; Ayadat et Gherabli, 1995 ; Karol, 2003). Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur

La stabilisation d'un sol argileux. Les techniques de stabilisation les plus utilisées dans le domaine des constructions sont la stabilisation par ajout de matériaux inertes ou la stabilisation ou traitement chimique. Le choix de l'une ou de l'autre de ces méthodes fait appel à plusieurs facteurs tels que la nature du sol, la disponibilité du matériau ou du produit stabilisant, les délais de réalisation, les considérations économiques et les conditions environnementales et de mise en œuvre.

La stabilisation chimique se base sur l'utilisation des produits chimiques ou de liants afin de diminuer le potentiel d'affaissement à un niveau acceptable.

## **II. L'OBJECTIF DE LA RECHERCHE :**

L'objet principal de cette recherche est établir une comparaison des différentes méthodes de traitement des sols affaissables en fonction de leurs caractéristiques. Cette comparaison prendra aussi en compte, les problèmes techniques et économiques qui se poseront.

## **III. PLAN DE LA MEMOIRE :**

Le contenu de cette mémoire est présenté comme suit :

- 1) Chapitre I : Etude bibliographique générale sur les sols affaissables.
- 2) Chapitre II : Les méthodes de traitement des sols affaissables.
- 3) Chapitre III : Comparaison des différentes méthodes de traitement.
- 4) Chapitre IV : Conclusion et recommandation.

Références bibliographiques.



*Chapitre I*

*ETUDE  
BIBLIOGRAPHIQUE  
SUR LES SOLS  
AFFAISSABLES*

**CHAPITRE I**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS**  
**AFFAISSABLES**

## I.1 - Introduction : [1]

La prévention des risques naturels ou industriels fait partie intégrante des préoccupations des équipes de recherches et des pouvoirs publics en matière d'agencement des sites et d'occupation des sols. La prise en compte de l'aléa naturel tel que les effondrements, les affaissements et les glissements de terrains témoignent de cette inquiétude. Le risque d'affaissement prend une part grandissante dans les projets de construction et d'aménagement du territoire. Les tassements excessifs qui en résultent ont donné une impulsion à l'étude de ce genre de sols.

Les sols Affaissables appelés dans la littérature anglo-saxonne « Collapsible soils » sont définis comme des structures non saturées pouvant avoir une importante déformation potentielle après mouillage avec ou sans chargement. Ces sols sont localisés dans de nombreuses régions du monde, particulièrement quand elles sont arides ou semi-arides. Ils concernent un nombre important de pays notamment ceux situés entre les 30e et 55e parallèles de l'hémisphère nord ainsi que des pays d'Amérique du sud.

## I.2 - Définitions Des Sols Affaissables : [1]

Les sols affaissables sont définies comme étant des structure partiellement saturés qui subissent un réarrangement radical de leurs particules suivis d'une grande diminution de volume après inondation à l'eau avec ou sans chargement.

Zur et Wiseman (1973) définissent l'effondrement, toute diminution rapide du volume de sol, Causé par l'augmentation de l'un des facteurs

Taux d'humidité (teneur en eau) (**W**).

\*Degré de saturation (**Sr**).

\*Contrainte tangentielle moyenne ( **$\tau$** ).

\*Contrainte de compression ( **$\sigma$** ).

\*La pression interstitielle (**U**).

Reconnaissant donc que l'effondrement de la structure du sol peut être le résultat de différents processus de saturation, Reginatto (1977) suggère qu'à ces facteurs peuvent s'ajouter les interactions chimiques entre la saturation liquide et la fraction argileuse.

### I.3 - Aperçu Historique Sur Les Etudes Des Sols Affaissables : [2]

Les travaux sur l'effondrement de sols ont été développés sur les sols de régions non tropicales, tels que ceux de Denisov(1946) et Larianov(1965) sur les sols de régions non tropicales, tels que ceux de Denisov(1946) et Larianov(1965) sur les sols de l'URSS, Bologne si & Moretto ( 1957) sur les sols d'Argentine, Stefanov & kremakova(1960) sur les sols de Bulgarie, Holtz & Hilf (1961), Gibbs & Bara (1962), et Bull (1964) sur les sols des États-Unis. Ces études amènent à l'idée selon laquelle les sols caractérisés par le phénomène de l'effondrement sont associés exclusivement à son origine et par conséquent à sa microstructure. Dudley (1970), en analysant le phénomène d'effondrement aux États-Unis, donne une grande importance à l'origine des sols, les associant selon les différentes interprétations précipitées selon laquelle l'effondrement des sols tropicaux arrive sur des sols d'origine résiduelle comme montrent Vargas (1973) et Foss(1973).

Cependant, dans les sols tropicaux ont été aussi identifiés l'effondrement dans les Oxisols de différentes origines et textures, sur lesquels, l'altération chimique est fréquemment plus importante que l'origine dans la formation de la microstructure (Ferreira & Monteiro, 1985 ; Mendonça & Mahler, 1994 ; cardoso, 1995 ; cardoso et al., 1995 ; Araki, 1997).

### I.4 - Répartition Des Sols Affaissables A travers Le Monde : [3]

Les loëss ou les sols affaissables couvrent près de 13 millions de kilomètres carrés de la surface du globe terrestre, dans deux bandes comprises entre les 30<sup>e</sup> et 55<sup>e</sup> degrés de latitude nord et sud, ce qui représente environ 10% des terres émergées, Abelev(1979). Il existe de vastes territoires occupés par ces sols comme le cas de la Russie, l'Afghanistan, la Chine, l'Inde, le Pakistan, la Thaïlande, l'Arabie saoudite, les États-Unis, l'Argentine, la Nouvelle Zélande, l'Australie, l'Afrique du nord, et dans beaucoup d'autres régions.

### I.5 - Répartition Des Zones Arides A travers le Monde : [3]

Ce sont des régions où les précipitations sont moindres que l'évapotranspiration, au moins durant une période plus ou moins longue de l'année. D'après Emberger, on peut distinguer trois domaines d'aridité d'après la pluviométrie annuelle :

- \* Le domaine hyperaride ( $p < 100$  mm).
- \* Le domaine d'aride ( $100 < p < 300-400$  mm).
- \* Le domaine semi-aride ( $300-400 < p < 600$  mm).

Les terres arides occupent 41% de la surface de la terre. Elles sont peuplées par plus de deux milliards d'êtres humains dont 90% habitent un pays en développement. Entre 10 et 20% des terres arides sont dégradées. Elles correspondent à 43% des terres cultivées de la planète.

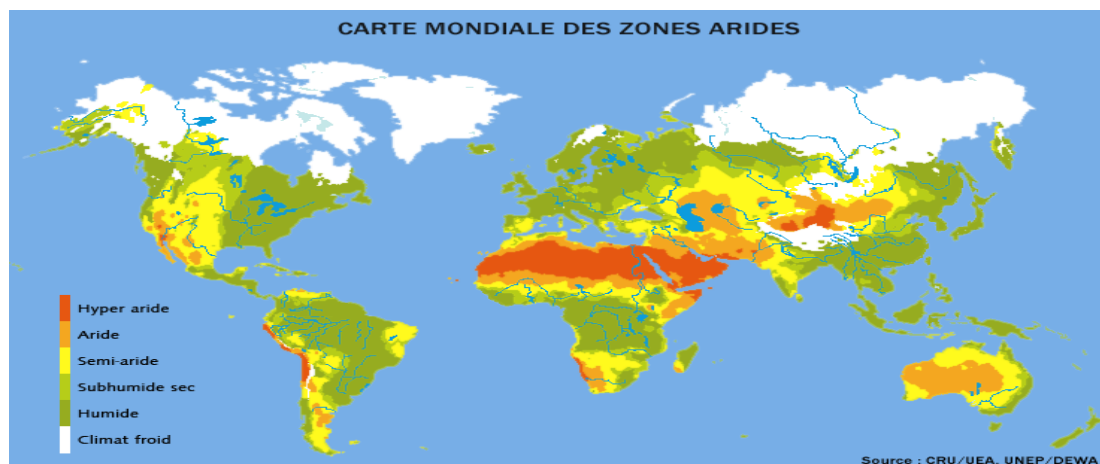


Figure I.1 : Carte mondiale modern des zones arides. [3]

#### I.6- Les territoires aride et semi-arides de l'Afrique du nord : [3]

La partie du continent africain dont il sera question ici est le NW, situé, d'une part, entre la Méditerranée et la parallèle passant par l'embouchure du Draâ au Maroc, l'Atlantique et le méridien de Gabés, d'autre part.

Toute cette région est soumise au climat méditerranéen, C'est-à-dire. Un climat caractérisé par la concentration de la pluviosité sur les mois froids de l'année ; l'été est donc sec. Ce trait domine toute la vie végétale de l'Afrique du Nord, comme dans tous les pays méditerranéens.

Mais ce climat méditerranéen est très divers : celui de la Côte d'azur diffère beaucoup de celui des hauts-Plateaux algéro-marocains, etc... C'est que la tranche d'eau annuelle est élevée et peut se combiner avec un climat thermique, lui-même très divers. Il s'ensuit une gamme de types de climats méditerranéens qui ont, chacun, leurs caractéristiques propres. A l'intérieur de cette gamme, il y a, entre autres, les climats méditerranéens saharien, aride et semi- aride qui sont les tonalités les plus sèches du climat méditerranéen.

Les territoires arides de l'Afrique du Nord sont donc ceux qui sont soumis aux climats méditerranéens saharien, aride et semi-aride'. Ils se distinguent, par leur climat et leurs conditions écologiques, nettement des autres régions arides du globe, et ne sont homologues que de ceux qui, dans les autres parties du monde, sont soumis au même climat (certaines régions de Californie, d'Australie, du Gap .....).

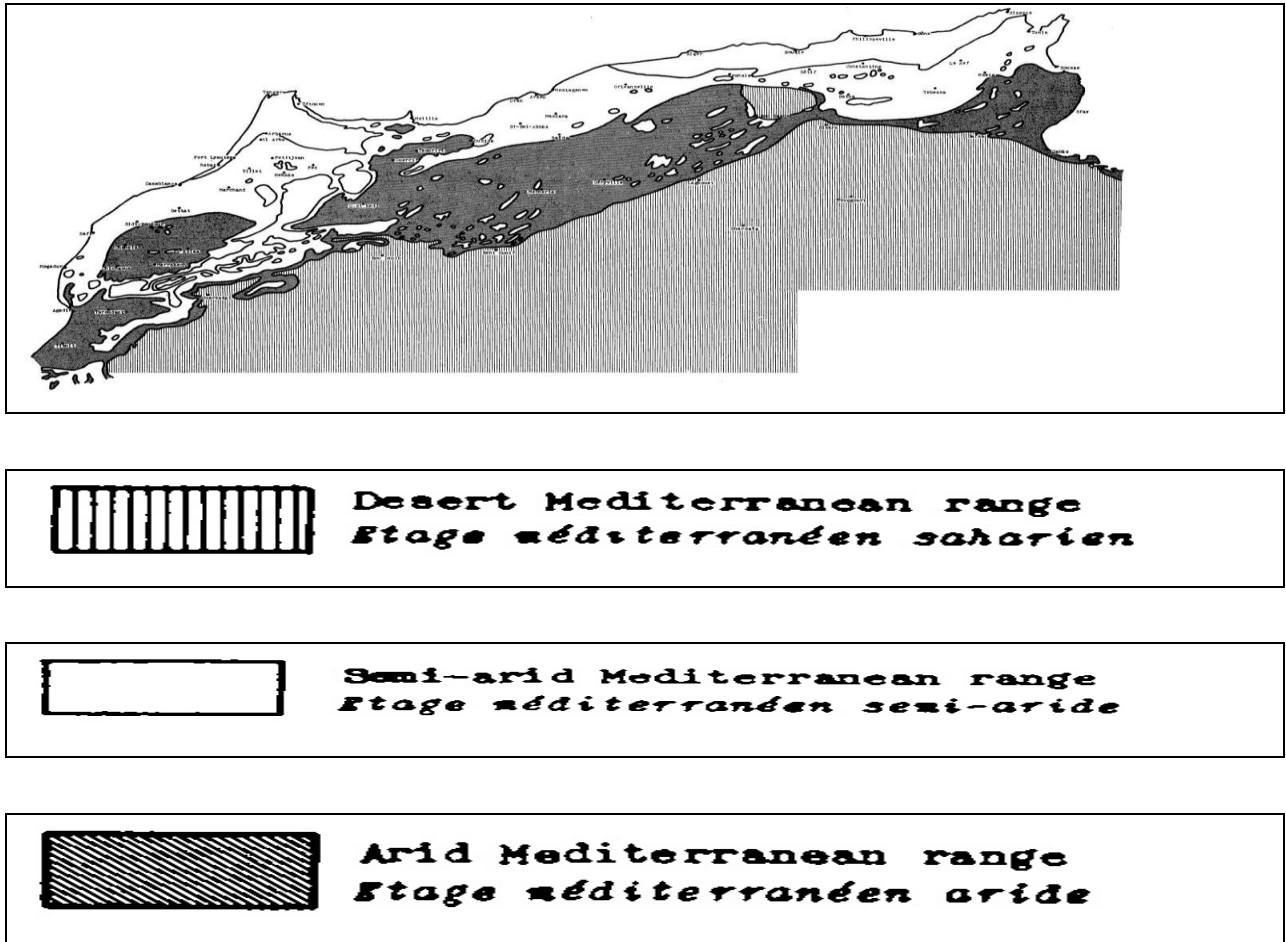


Figure I.2 : Carte sur les régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord, par l'Institut international de la zone aride en (1960). [3]

## I.7- Types des sols Affaissables : [3]

### I.7.1- Les loess :

Habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol sédimentaire détritique meuble formé par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne (déflation) est formé principalement de silice (quartz détritique) et de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Il se caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . Ainsi au niveau granulométrique le loess est un limon. Il contient, en proportion moindre, des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin). Il est homogène, sans stratifications mais avec une très forte porosité résultant d'une cimentation carbonatée des grains. Il résulte, au cours du pléistocène, de l'accumulation, sous climat froid et sec, de limons transportés par le vent depuis des zones sources : alluvions, dépôts fluvioglaciers, sédiment côtiers et estuariens (à l'embouchure des

rivières), zones arides, soumises à une déflation (contraction) éolienne. Une dérive granulométrique vers le sable

(Lœss –sableux-) peut être due à la proximité de la zone source lœss et donc à un tri éolien moins poussé.

### **I.7.2- Dépôts éoliens :**

Constitués par des matériaux transportés par le vent, à partir des dunes et des plages, la saturation naturelle de ces sols contient des liaisons cimentées d'argiles (sols loessiques), ces dépôts caractérisent les régions arides ou le niveau de la nappe est profond par rapport à la surface du sol. Ces liaisons perdent leurs résistances au-delà de la saturation et le sol a l'aptitude de s'affaisser. Parfois ces dépôts sont protégés contre les précipitations par une couche «croûte » d'argile imperméable qui préserve la structure naturelle du sol de l'entrée d'aucune goutte d'eau.

### **I.7. 3- Dépôts alluviaux :**

Les dépôts alluviaux, sont constitués essentiellement des sédiments lâches, déposés par l'eau par des inondations brusques ou des écoulements de boues dues à des courtes chutes de pluies espacé dans le temps, par la suite ces dépôts sèchent et ne deviennent de nouveau saturés, que jusqu'à l'arrivée de nouveau flots. Ces derniers contiennent des matériaux faiblement consolidés renfermant l'argile. La quantité d'argiles a une importance considérable dans le comportement de ces sols.

### **I.7. 4 - Les sols résiduels :**

Allant de quelques centimètres à plusieurs mètres en fonction du climat et de la Physionomie de la région, les sols résiduels sont causés par l'érosion due à la Désintégration et l'altération de la roche-mère. Souvent, les sols résiduels se présentent sous forme de couches de différentes épaisseurs stratifiées. Les grandeurs des particules de ces sols varient du large fragment, gravillon, sable, silt, aux colloïdes et sont parfois composés de matières organiques. La structure affaissable des grains est le résultat d'une solution, d'un soluble et de matière colloïdale. Cette structuration donne un indice des vides plus au moins élevés et un arrangement instable.

### **I.7.5 -Autres types des sols Affaissables :**

D'autres types de sols peuvent présenter l'affaissement sont ceux qui dérivent des tufs volcaniques, le gypse, les sables lâche cimentés par des sels solubles et les argiles dispersées. Il y a aussi une gamme de sols fabriqués artificiellement, par exemples les remblais compactés à une teneur en eau inférieure à l'optimum de Proctor.

### **I.8 - Formation Des Sols Affaissables : [4]**

Les sols effondrables sont celles où une augmentation de la teneur en humidité, provoque un forte. Baisse de volume sans la nécessité d'une augmentation de la contrainte appliquée.

En mécanique classique des sols, les sols saturés ou les sols secs, le phénomène de l'effondrement est généralement associé à un changement dans l'état de la tension dans le sol, mais dans notre cas l'effondrement est causé par un agent externe (changement dans le taux d'humidité).

Selon Goldstein (1969), il ya quatre (04) types d'humidification qui peuvent déclencher ce phénomène.

**a-** Humidification local du sol si tué à faible profondeur en raison généralement de la rupture ou fuite d'eau ou le drainage incontrôlé des eaux de surface. Ces eaux superficielles ne pénètrent pas à une grande profondeur et il n'ya pas de remontée des eaux de la nappe phréatique, dans ce cas les tassements ne touchent que les couches supérieures du sol au dessus de la zone mouillée.

**b-** Une humidification vaste de l'ensemble du profil du sol causée par des infiltrations importantes d'eau (conduites d'eau brisées ou effluents industriels), cette quantité importante d'eau permet la remontée de la nappe phréatique qui sature toute la zone en un court temps.

Dans ce cas les tassements sont extrêmes et dangereuses englobant l'épaisseur totale de la couche de la structure existante sous son poids propre.

**c-** Une augmentation uniforme de la nappe phréatique souvent due à la recharge de ce dernier par les eaux souterraines causées par une source lointaine. Dans ce cas les tassements sont uniformes et graduels.

**d-** Une augmentation progressive et lente de la teneur en eau en raison par exemple de la condensation de la vapeur d'eau et l'accumulation d'humidité causée par les changements des conditions environnementales (terrains ouverts).

**I.9 - Classement Des Sols Affaissables :[5]**

Uriel et Serrano (1973-1974). Ont classé les sols à effondrement brusque en deux (02) groupes :

**I.9.1-Groupe 1** : Les sols, dans lesquels se produisent un changement rapide dans la relation entre les pressions et les déformations sans atteindre la résistance à la rupture. En conséquence, la cause de l'effondrement est seulement due au changement des pressions. Ce groupe comprend le limon, l'argile cimentée et les roches très poreuses.

**I.9.2-Groupe 2** : Les sols, qui sans la présence ou le changement des conditions provoquant l'effondrement même s'il n'y a pas de changement brusque de la pression. Tel est le cas des Loess et certaines argiles contenant des sulfates, lors d'une humidification constante la relation Entre contrainte-déformation est une courbe lisse continue sans rebondissements tranchants. La saturation se produit, cependant par un changement significatif du volume dû à l'augmentation de la pression interstitielle des pores provoquant l'appauvrissement de la Résistance du sol au cisaillement.

**I.10- Les propriétés physiques des sols affaissables : [1]**

L'analyse des nombreuses études des propriétés physiques des sols affaissables Permet d'établir les caractéristiques principales des sols loessiques ou affaissables On peut énumérer :

**I.10-1 : Le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :**

La valeur des poids volumiques des sols affaissables varie de 25,1 à 28,4 KN/mètre cube.

**I.10-2 : Le poids volumique ( $\gamma_v$ ) :**

Le poids volumique des sols affaissables varie de 12,8 à 21 ,1 . KN/mètre cube.

**I.10-3 : Le teneur en eau ( $\omega$ ) :**

Dans la majorité des cas les sols affaissables se caractérisent par une faible teneur en eau, qui varie de 6 à 11%.

**I.10-4 : La porosité (n) :**

Les valeurs de la porosité des sols affaissable peuvent servir comme indirect de la probabilité d'existence des propriétés d'affaissabilité de ces sols. La porosité totale des sols loessiques est comprise entre 30 et 60%.

**I.10-5 : l'indice de vide(e) :**

L'indice de vide des sols loessiques est compris entre 42.85 et 150%

**I.10-6: Les limites d'atterbergs :**

Les valeurs de la limite de plasticité des loess sont généralement comprises entre 12 et 18 %.

**I.11- Les Dénominations Des Sols Affaissables : [4]**

Parmi les nominations des sols Affaissables on note :

- \*Sols Affaissables.
- \*Sols effondrables.
- \*Sols collapsibles.
- \*Sols a macroporeux.
- \*Sols loessiques.
- \*Sols sensibles au mouillage.
- \*Sols à rupture brusque.
- \*Sols métastables.
- \*Sols autotassants.
- \*Sols partiellement saturés.
- \*Sols évolutifs.
- \*Arènes argileuses.
- \*Argiles limoneuses.

**I.12- Les causes d'inondation des sols Affaissables : [4]**

Quatre principaux types de mouillages, peuvent déclencher l'affaissement des sols :

- 1- Un mouillage superficielle et local, causé par les fuites d'eau provenant des conduites, ou lorsque les eaux de surface de la construction ne sont pas drainées. D'habitude ces eaux superficielles ne pénètrent pas à une grande profondeur du sol et il n'y a pas de remonté de la nappe phréatique. Dans cette situation, les tassements se produisent principalement dans les couches supérieures du sol, au-dessus de la zone mouillée.
- 2- Un intense mouillage local et profond, causé par le système d'irrigation ou les effluents industriels. Si le débit d'eau est assez important, le niveau de la nappe phréatique peut alors remonter et toute la zone du sol se trouve saturée dans un temps relativement court. Dans ce cas, le tassement peut être extrêmement accidentel et dangereux, englobant toute l'épaisseur de la couche du sol, soit sous l'effet de son poids propre ou sous l'effet des surcharges des constructions existantes.

3- Une remonté lente et relativement uniforme du niveau de la nappe phréatique, sous l'influence des sources d'eau extérieure à la zone des sols affaissables. Le tassement dans ce cas, il est uniforme et graduel.

4- Une augmentation graduelle et lente de la teneur en eau d'une couche épaisse du sol, résultant de la condensation de la vapeur d'eau et l'accumulation de la l'humidité (par exemple quand la surface du sol est couverte du béton ou d'asphalte). Dans ce cas la cohésion interne du sol s'affaiblie partiellement, donnant des tassements lents et incomplets et augmentent avec l'humidité.

L'affaissement ne peut être déclenché que par saturation à l'eau plus le chargement, ces deux facteurs agissent ensemble et en même temps.

### **I.13- Phénomènes d'effondrement : [5]**

Les sols effondrables, comme les sols gonflants, attirent depuis longtemps l'attention des chercheurs de par les problèmes de stabilité qu'ils posent aux bâtiments, aux ouvrages géotechniques et aux infrastructures linéaires. D'après Dudley (1970), Terzaghi et Fröhlich (1936) avaient déjà observé la tendance que peuvent avoir certains sols non saturés à s'effondrer lorsqu'ils sont inondés.

La susceptibilité à l'effondrement peut concerner les dépôts alluviaux, colluviaux et les sols éoliens. Le loess est un dépôt limoneux éolien, transporté dans des conditions périglaciaires et déposé dans des environnements froids de steppe, près des principales nappes glaciaires du Quaternaire, principalement autour du parallèle 50°N dans l'hémisphère Nord, mais aussi en Amérique du Sud. On les rencontre sur des plateaux, des pentes et des grands bassins alluviaux. En Chine, les épaisseurs de " loess du Plateau " peuvent atteindre 300 m. Des dépôts existent aussi dans le plateau de la Sibérie en Russie, dans les bassins des rivières du Danube, du Rhin et du Mississippi (Amérique du Nord) ainsi que dans la Pampa (Argentine),

L'Inde, le Pakistan, l'Arabie saoudite, l'Australie, l'Afrique du nord, et dans beaucoup d'autres régions. (Pecsi, 1990). Quelques effondrements à travers le monde Le phénomène d'effondrement est typiquement associé aux sols de faible plasticité et non saturés, bien qu'il puisse être aussi observé dans de sols saturés soumis à de sollicitations mécaniques. Le loess a tendance à subir ce phénomène du fait de ses caractéristiques spéciales telles qu'une condition in situ non saturée, une faible densité totale, une cimentation faible composée de carbonates ainsi qu'une structure particulière. La structure du loess est caractérisée par un indice des vides élevé et un arrangement instable des particules (Cui et al. 2004, Delage et al. 2005).

L'une des causes principales de l'effondrement dans les sols loessiques est l'humidification subite du sol sous la contrainte naturelle in situ. Ce phénomène a été décrit depuis longtemps dans les régions arides (Dudley 1970).

Les sols non saturés ayant une structure naturelle lâche ont tendance à s'effondrer lorsqu'ils sont soumis à une augmentation du degré de saturation (Holtz 1948, Jennings and Knight 1957, B, Jennings 1961, Knight 1961, Wagener 1960, Jennings 1965). Ce processus entraîne la diminution de la valeur de la succion initiale.



**Figure I. 3 : effondrement de ville de Cheria en 2009 et les dommages induits. [8]**

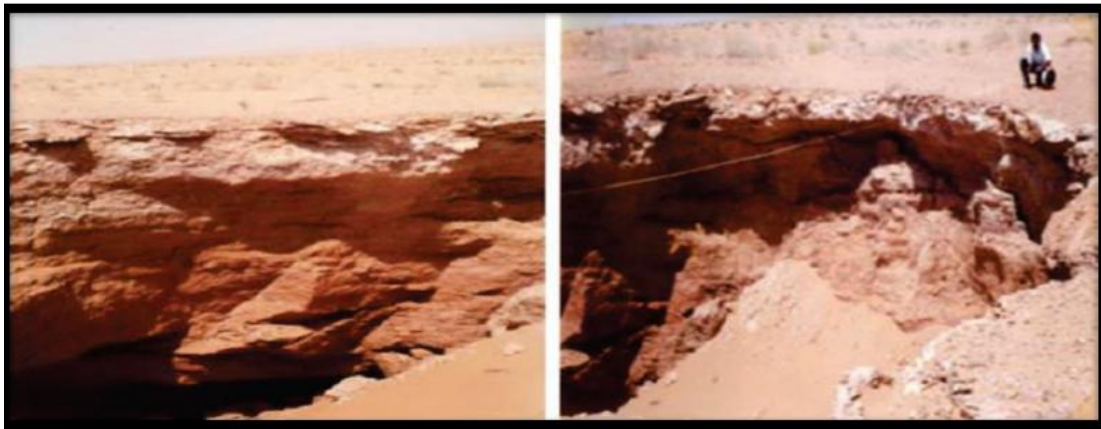
#### **I.14- Cas d'effondrement dans les zones arides et semi-arides en Algérie : [3]**

Il existe dans certaines régions du monde des sols aux propriétés particulières : sols solubles, sols macroporeux affaissables, dont l'évolution doit être prise en compte lors de l'élaboration des projets de construction, voire de mise en valeur des territoires . Ainsi, dans le cas des sols loessiques secs, un apport d'eau (construction de canaux, barrages, fuites des réseaux dans les villes) peut provoquer un tassement rapide d'environ 10% de l'épaisseur de la couche, susceptible de disloquer toutes les constructions civiles et industrielles de la zone humidifiée.

Il est très important de citer des exemples sur des effondrements enregistrés dans des différents territoires en Algérie et parmi ces effondrements :

**I.14.1 : L'effondrement de Tafziouine à Guerrara, wilaya de Ghardaïa.**

En 1997 et à 07 km au Sud-ouest de Guerrara (Fig. I-4), dans la région dite Tafziouine le terrain a commencé à connaître une véritable déformation sous forme d'un effondrement engendrant un cratère de 22 mètres de diamètres et de 13 mètres de profondeur. Le phénomène d'effondrement de terrain a été motivé par l'infiltration des eaux provenant d'un forage artésien jaillissant à 150 mètres de distance lors de la phase d'auto développement qui a duré plusieurs jours.



**Figure I.4 : Photos de l'effondrement de Tafziouine. [3]**

- \* L'effondrement de Tafziouine présente une forme circulaire, avec un diamètre de 22m
- \* L'effondrement est d'une profondeur de 13 m avec un accès très difficile;
- \* Pas de fissuration de surface, aucun indice indiquant l'évolution du cratère ;
- \* D'après le témoignage des habitants l'effondrement de Tafziouine est daté de l'année 1997.

**I.14 . 2 :L'effondrement de Sahb-Elbir à Mansourah, wilaya de Ghardaïa.**

L'effondrement de Sahb-Elbir est situé à 50km par la piste du village d'Ain Loussig, lui-même distant de 2 km du chef-lieu communal de Mansourah. Cette région appartient à la wilaya de Ghardaïa.



**Figure I.5 : Photos de l'effondrement Sahb-Elbir. [3]**

- \* L'effondrement de Sahb-Elbir (Fig.I-5), présente une forme circulaire avec un diamètre de 10m
- \* L'effondrement à une profondeur inconnue;
- \* Aucun indice de surface n'indique l'évolution du cratère ;
- \* On observe des failles de direction E-W et N-S connues dans la région ;
- \* D'après les habitants de Mansourah, l'effondrement de Sahb-Elbir est très ancien, de plus de 50 ans.

#### **I.14. 3 : L'affaissement d'El M'Rara dans la wilaya d'El Oued. [3]**

Le village de M'Rara est situé dans la wilaya d'El Oued (Nord-Est du Sahara algérien), dans la zone de Oued Rhir, à environ 110km à l'est d'El Oued, 55km au nord de Touggourt et 32km à l'est de Djamaâ. Le village d'El M'Rara se trouve à une altitude d'environ 100m, dans une cuvette à remplissage Plio-quaternaire, d'environ 15km<sup>2</sup> de superficie, entourée par des collines Mio-pliocènes. Cette cuvette constitue ainsi un point de rupture de pente, au niveau duquel les alluvions fluviales, transportée par oued Retem passage par M'Rara, L'oued Retem connaît souvent, à l'occasion de pluies diluviennes, des crues torrentielles durant lesquelles l'eau traverse des secteurs des M'Rara avec une certaine violence. Des structures ont été installées en amont de l'Oued pour contenir la force des torrents, mais en vain, puisque celles-ci n'ont pas résisté. Cette commune est face à une menace plus ou moins naturelle, « Le phénomène d'effondrement des sols »



Figure I.6 : Photos de l'affaissement d'EL M'Rara. [3]

### I.15 - Mécanismes de l'effondrement des sols : [3]

La majorité des sols à effondrement brusque sont des sols dont l'arrangement des particules se rassemble à la disposition des nids d'abeilles (**Figure I-7**). Les grains des sols affaissables sont liés par des forces de liaisons ou par un agent de cimentation, en contact avec l'eau ces derniers se déplacent par perte d'énergie au cisaillement et donne un nouvel arrangement de l'ossature granulaire du sol.

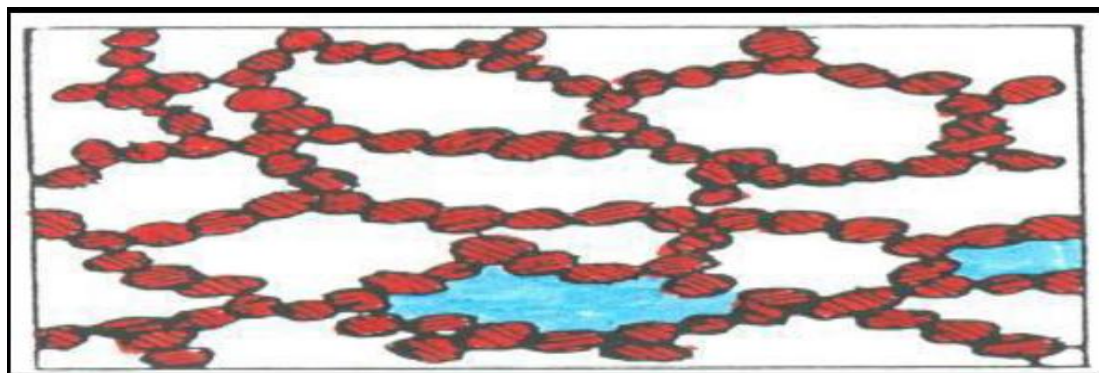
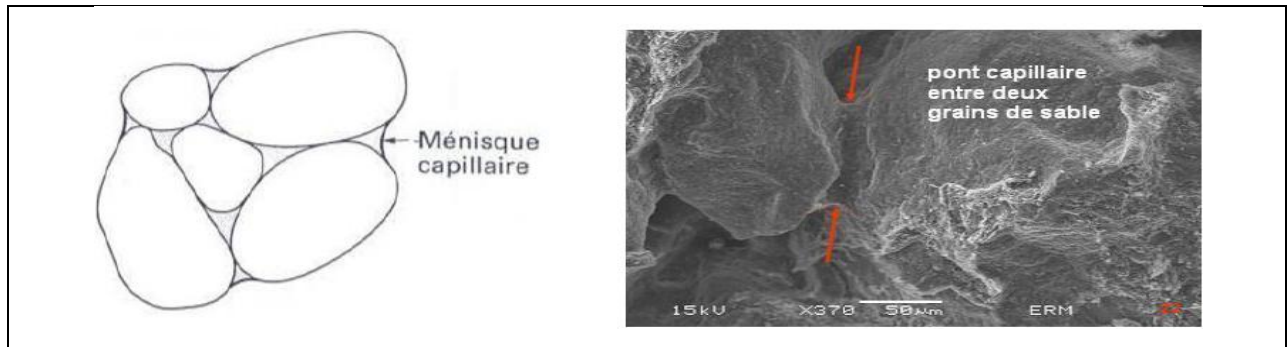


Figure I.7: Structure des particules en nids d'abeilles. [3]

Selon Dulbey (1970) puis Barden et al (1973) [49], il ya trois (03) conditions qui causent l'effondrement

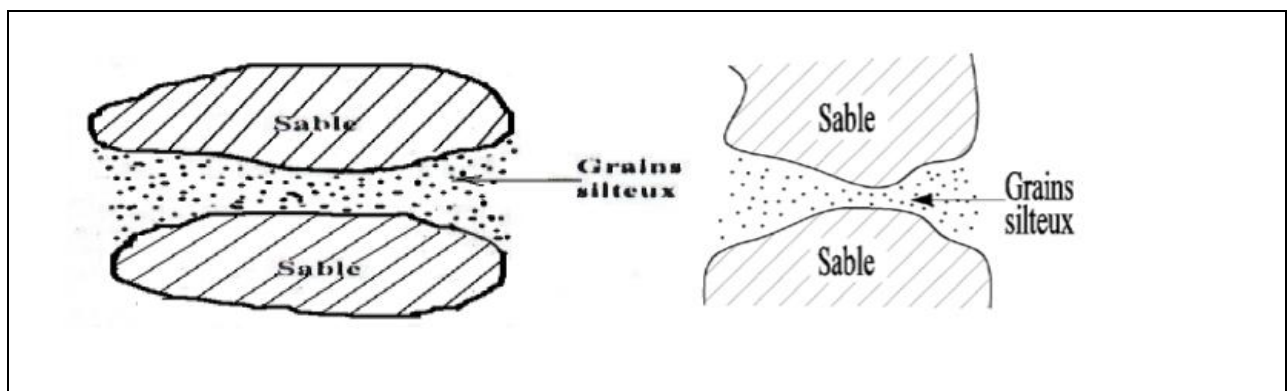
- a-** Une structure ouverte, potentiellement instable, partiellement saturée.
- b-** Une valeur assez élevée de la composante de contrainte appliquée qui développe un état métastable.
- c-** Les particules du sol sont liées entre elles par des forces ou des matériaux cimentaires sensibles à l'eau. Les sols granulaires tels que les sables, graviers ont des structures simples dont la jonction entre les grains est due à des forces de gravitation, les forces capillaires ont une base temporaire, car ils dépendent du degré de saturation, les formes prises par le ménisque d'eau (**Figure I-8**). Dues à l'interface air-eau, met l'eau en tension capillaire et l'excès de pression

interstitielle ( $U$ ) devient négative cela augmente la contrainte effective ( $\sigma'$ ) et dépasse même la contrainte totale ( $\sigma' > \sigma$ ).



**Figure I.8 : Liaison par tension capillaire. [3]**

Si à ce stade, le sol est saturé, la pression effective diminuera et de même pour la résistance au cisaillement, qui peut conduire à un glissement relatif entre les grains du sol ; pour les sols macroporeux ce glissement se manifeste par une baisse de volume (**Figure I-9**).



**Figure I.9 : Liaison par grains silteux. [3]**

Dans le cas des liaisons en argiles, chaque particule à une charge négative compensée par les cations du double couche qui l'entoure. Deux particules se repoussent mutuellement quand ils communiquent avec leurs doubles couches (**Figure I-10**), en plus de cette répulsion, il existe une force d'attraction entre les particules dues à des forces de liaisons secondaires, ces forces dépendent de la distance entre les particules, par conséquent ces derniers vont attirer ou repousser selon la distance entre les particules et la résultante de ces deux forces (**Figure I-11**).

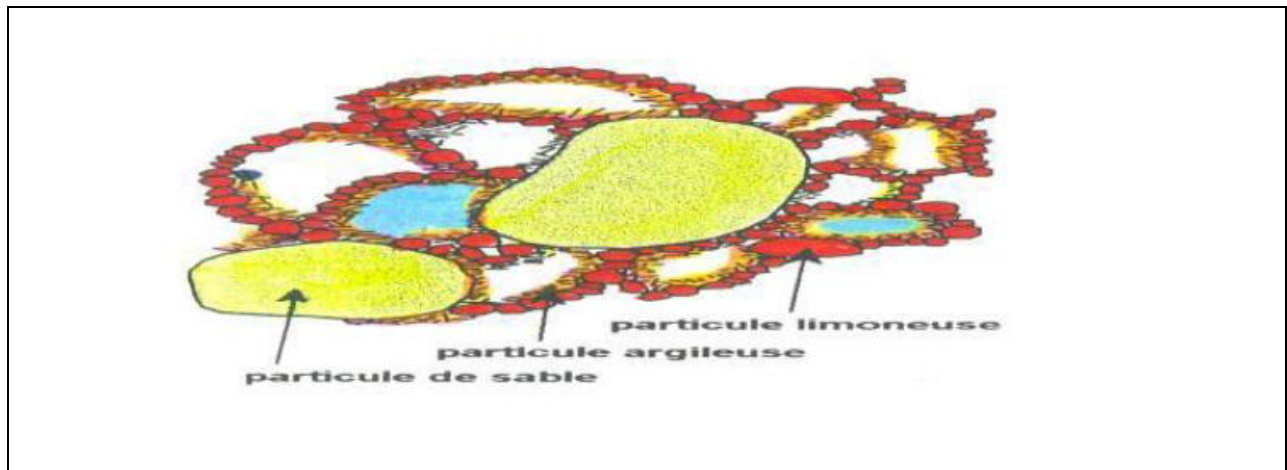


Figure I.10: Liaison par des ponts argileux. [3]

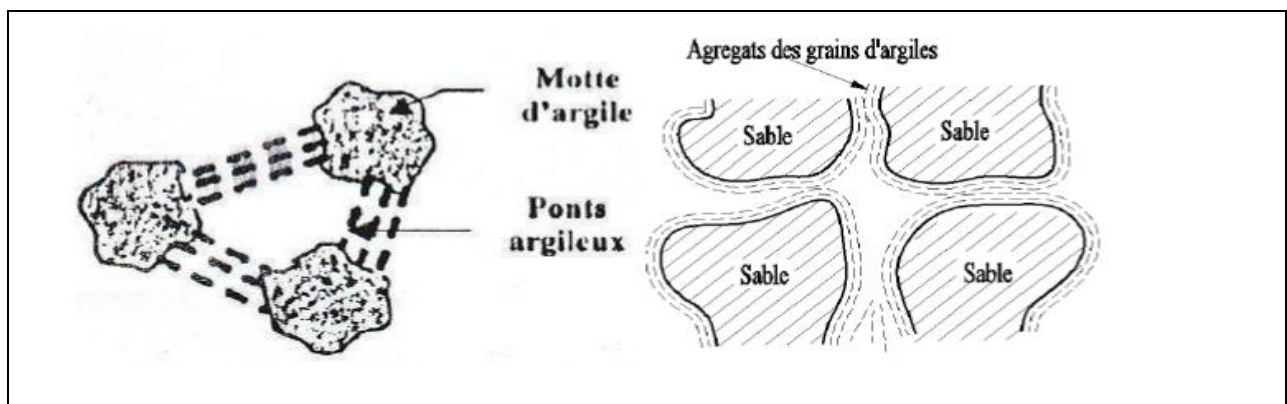


Figure I.11: Liaison par agrégats d'argiles. [3]

Il est possible que l'effet de séparation des particules soit faible et un processus d'approche entre les grains se développe, ce phénomène est appelé floculation (**Figure I-12**).

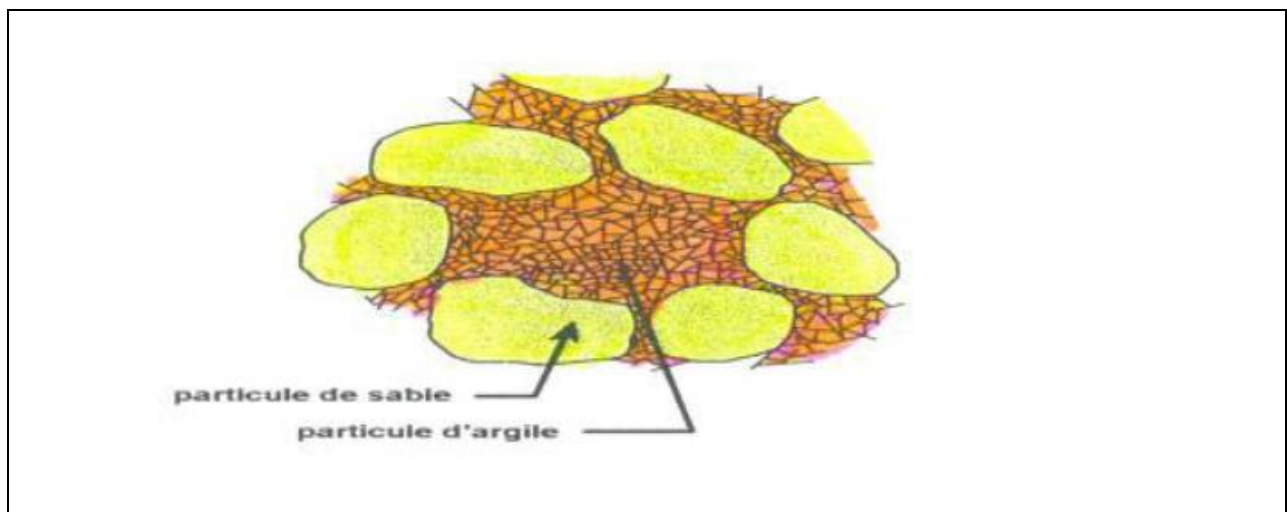


Figure I.12 : Liaison par l'argile floculée. [3]

En fin quel que soit le type de la saturation du sol, il y'a toujours des forces qui lient une particule à l'autre ; dans certains cas : particules- particules par des forces extérieures oucapillaires, en d'autres cas ces liens peuvent être physico-chimiques ou de nature électrique et dans d'autres cas absence de contact direct entre les particules.

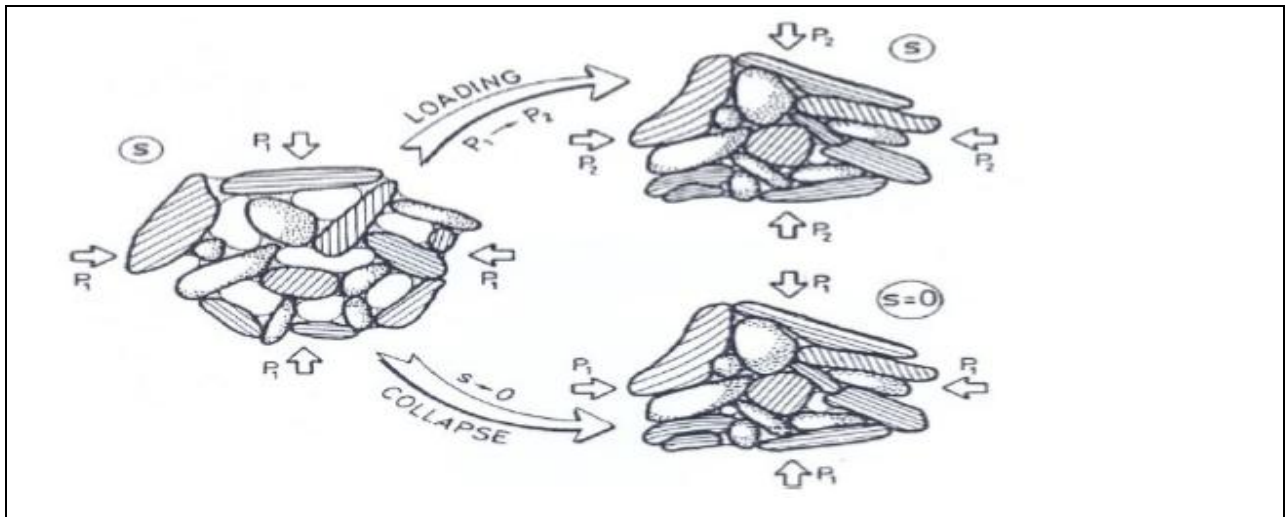


Figure I.13 : Interprétation microstructurale des déformations de chargement. [3]

Le phénomène de l'effondrement est principalement lié à la structure ouverte du sol. Casagrande (1932) a démontré que la partie de la fraction à grains fins du sol existe comme matériau de liaison pour les particules plus grosses.

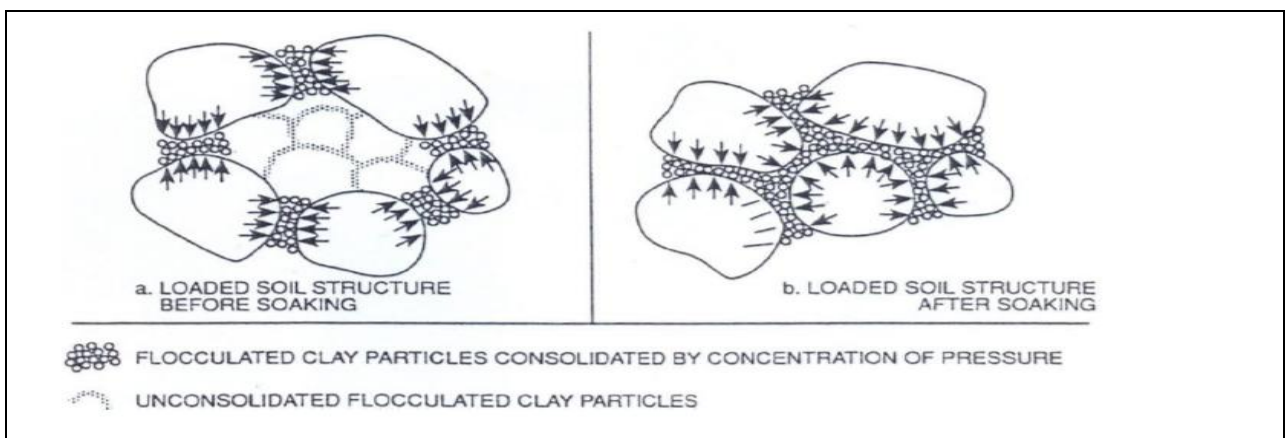
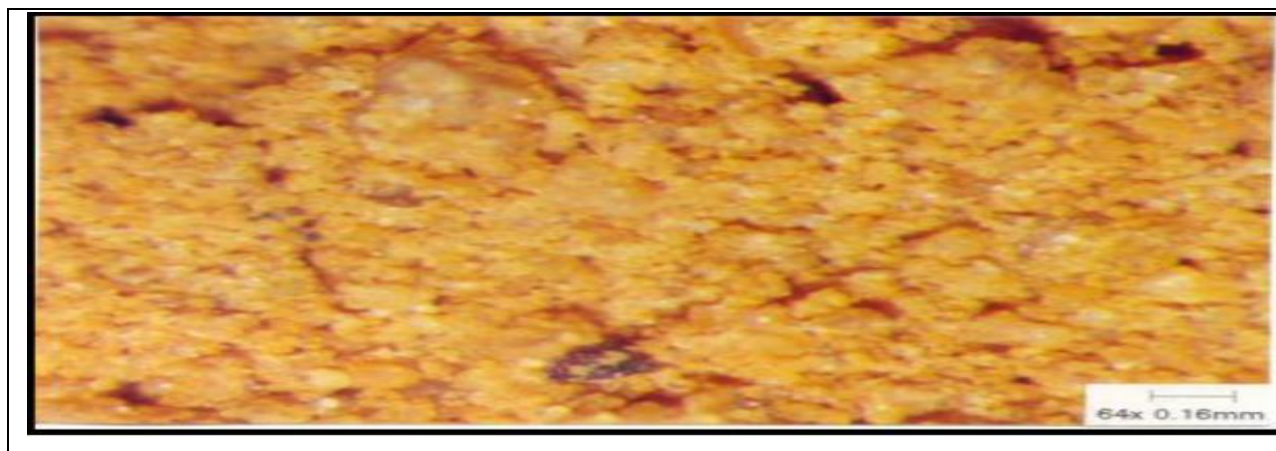


Figure I.14 : La structure chargée avant et après l'inondation (après Casagrande 1932). [3]



**Figure I.15 : Structure du sol après l'effondrement. [3]**

Il y'a plusieurs mécanismes de l'affaissement qui ont été postulés sur la base des données des tests, obtenus à partir d'une variété de sols, on peut citer ce qui suit :

**1- Knight (1961)** : dans ses hypothèses n'avait proposé que la résistance des liaisons argileuses entre les gros grains, qui se réduit par suite d'addition d'eau à l'échantillon sous contrainte. Dès que cette résistance devient inférieure aux contraintes de cisaillement, il y a rupture de ces liaisons argileuses et l'effondrement se produit.

**2- Dudley (1970)** : deux type d'effondrements peuvent se présenter, dans le cas où la structure est cimentée l'effondrement ne dépend pas de l'humidification, mais il est lié au niveau de contrainte appliquée. Dans le cas où le sol est constitué de grains liés avec des matériaux fins (argiles ou limons) induisant des forces de liaison importante due à la succion ou à la cimentation, l'humidification conduit à une annulation de la succion entraînant une diminution importante de la résistance favorisant ainsi l'effondrement si la contrainte mécanique est suffisamment grande.

**3 - Ganéshan (1982), Y. Cui et P. Delage (2002)** : avaient suggéré que l'effondrement est dûessentiellement à l'élimination de la succion capillaire présentée dans ces sols qui sont les plus souvent partiellement saturés.

**4- Clemence (1985)** : avait proposé que l'effondrement est très immédiat dans le cas où les particules sont liées par succion capillaire, lent dans le cas de la cimentation chimique et beaucoup plus lent dans le cas des liaisons argileuses.

**5- Ayadat et al (1998)**, ont conclus que la migration des particules fines d'un horizon à l'autre à travers le sol est la cause principale de l'effondrement des sols.

**6- Y. Cui et P. Magnan (2001)**, en se basant sur le critère de Mohr-Coulomb généralisées ont montré que l'effondrement est contrôlé par plusieurs facteurs à savoir :

La minéralogie des matériaux constituant la fraction argileuse, la granulométrie, la teneur en eau naturelle, l'indice des vides, la dimension et la forme des pores les éléments de cimentation ainsi que la nature et la concentration des ions dans l'eau interstitielle.

#### **I.16- Les paramètres qui influent sur l'effondrement des sols : [4]**

D'une manière générale, il a été montré que les principaux paramètres qui gouvernent l'effondrement des sols sont : la densité sèche, la teneur en eau initiale, l'indice des vides initial, le degré de saturation, le type du sol (minéralogie et granulométrie), l'état de contraintes appliquées, la nature de l'agent de cimentation, la composition chimique du liquide qui inonde le sol et la quantité et le débit d'eau inondant le sol (remontée d'une nappe phréatique et infiltration des eaux de pluies).

Dudley (1970), Zur et Wiseman (1973), Morgentern et De Matos (1975) et Ganeshan (1982) Ayadat et al (1995,1996) ont démontré que la déficience de l'humidité est l'une des principales causes de l'affaissement.

Milo Vic (1969), Markin (1969), Booth (1975), Ting (1979) et Ganeshan (1982) suggèrent l'influence marquée de la densité sèche initiale, l'indice des vides et le degré de saturation sur le comportement des sols à effondrement brusque quand ils sont inondés. Ayadat (1990), Abbeche et al (2005,2007).

Markin (1969) et Prusza et Choudry (1979), proposent une limite supérieure de degré de saturation initial 60% à 65% au de là de laquelle l'affaissement n'apparaît pas. Les études menées par Mishu (1963), Booth (1975 et 1977) et Ganeshan (1982), ont abouti à une limite de degré de saturation légèrement inférieure que la précédente 50% à 60% et montre que les sols ayant un degré de saturation supérieur à cette limite, leur potentiel d'affaissement diminue considérablement et devient indépendant du chargement appliqué.

Booth (1975), Cox (1978) et Lawton (1989) montrent que pour une densité sèche donnée, la surcharge pour laquelle l'affaissement est maximal est inversement proportionnelle avec la teneur en eau naturelle du sol. En ce qui concerne l'influence de la densité sèche et la teneur en eau initiale sur la magnitude de l'affaissement, plusieurs auteurs comme Holtz (1968), Barden et al (1969), Dudley (1970), Booth (1975), Lefebvre (1989) et Lawton (1989) ont émis des hypothèses sur ces deux paramètres : pour une teneur en eau donnée l'affaissement décroît quand la densité sèche initiale augmente et il y a une teneur en eau critique au-dessus de laquelle l'effondrement ne se produit pas.

**I.17-Méthodes Prédictives Des Sols Affaissables : [1]**

Pour une meilleure évaluation des propriétés de sol susceptibles d'affaissement, différentes méthodes ont été adoptées par plusieurs chercheurs. Ces méthodes sont comme suit :

**I.17.1- Méthodes empiriques et semi empiriques :**

**1- Denis or (1951):**  $k = e_L/e_0$

Où :

K : coefficient d'affaissement.

$e_L$  : Indice des vides à la limite de liquidité

$e_0$  : Indice des vides initial.

K= 0.50 à 0.75 : sol à affaissement important ;

K= 1.00 : sol à affaissement faible ;

K= 1.50 à 2.00 : sol non affaissable ;

**2-Priklonskij (1952) :**

$$K_d = (w_L - w_0) / I_p$$

Où :

$w_L$  : Limite de liquidité ;

$w_0$  : Teneur en eau initial ;

$I_p$  : Indice de plasticité ;

$K_d < 0$  : sol à affaissement important ;

$K_d \geq 0.50$  : sol non affaissable ;

$K_d > 1.00$ : sol gonflant;

**3-Stephanoff & Kremakova (1960):**  $\delta = K (n - 40) \cdot (30 - w_0)$

Ou

$K$  : coefficient dépend de la nature de sol (coefficient de Stephanoff et Kremakova).

$n$  : porosité initiale.

$w_0$  : Teneur en eau initiale.  $\delta \geq 2\% \rightarrow$  Le Sol est susceptible à l'effondrement

Nature	Sable Lœssique	Lœss Sableux	Lœss	Lœss Argileux	Lœss très Argileux
<b>K</b>	0.02	0.03	0.05	0.08	0.09

**Tableau I.01: coefficient dépend de la nature de sol (coefficient de Stephanoff et Kremakova). [1]**

**4-Gibbs (1961):**  $R = [(\gamma_w / \gamma_d) - 1 / G_s] / w_L$

Où :

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau ;

$\gamma_d$  : Poids volumique sec ;

$G_s$  : Densité des grains solides ;

$R \geq 2\%$  sol affaissable.

**5-Gibbs et Bara (1962):**

Critère d'évaluation du risque d'effondrement, Ce critère basé sur masse volumique sèche et limite de liquidité à travers l'abaque comme suivant:

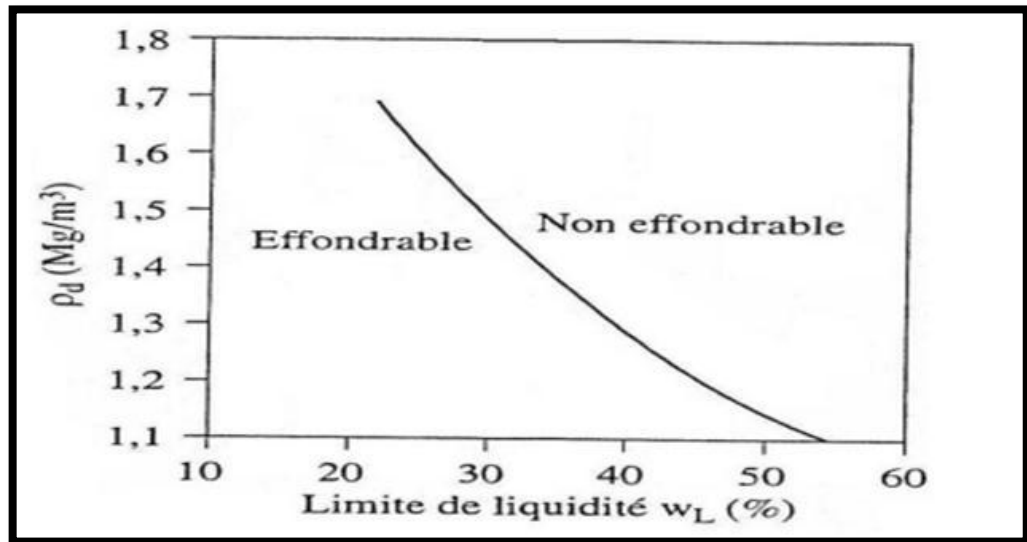


Figure I.16: Critère d'évaluation du risque d'effondrement proposée par Gibbs et Bara (1962). [1]

**6-Feda (1964):** 
$$K_L = [(w_0/s_r) - w_p] / I_p$$

Où :

$w_0$  : Teneur en eau naturelle ;

$w_p$  : Limite de plasticité ;

$I_p$  : Indice de plasticité ;

$s_r$  : Degré de saturation ;

Pour  $s_r < 1$  et  $K_L \geq 0.85$  sol affaissable.

**7-Feda (1966) :**

40% sol susceptible à l'affaissement

Où  $n_0$  : porosité du sol ;

**8-Markin (1969) :**  $R = \gamma_d / \gamma_{dl}$

Où :

$\gamma_d$  : Poids volumique sec à la limite de liquidité ;

$\gamma_{dl}$  : Poids volumique sec.

$R > 1.3$  sol gonflant.

$R < 1.1$  sol affaissable

**9-Zur et Wiseman (1973) :**  $R = \gamma_d / \gamma_t$

Si  $R < (1.0 \div 1.1) \rightarrow$  sol effondrable

**10-HANDY(1973) :**

Teneur en argile (< 0.02 mm)

Si

<16% - affaissabilité très probable.

De 16 à 24 % - affaissabilité probable.

De 24 à 32 % - affaissabilité probable à moins de 50 .

>32 % - pas d'affaissement.

**11- Bally (1973):**

$$I_{mg} = \sum_{j=1}^m i_{mgj} h_j$$

Où :

$i_{mgj}$  : Coefficient de tassement mesuré à l'oedomètre quand l'échantillon est inondé sous (2 à 3 kg/ cm<sup>2</sup>) ;

$h_j$  : Épaisseur de la couche j ;

$I_{mg}$ : Le potentiel de l'affaissement total (le loess est affaissable si

$$I_{mg} = 10 \text{ à } 12 \text{ cm/m}.$$

### 12-Krastilov (1980):

$$\delta_{(3.5)} = 0.166 s_r^2 + 0.665 I_p + 0.078 e - 0.165 s_r - 0.854 I_p \cdot s_r$$

$$\delta_{(3.5)} \geq 2\% \text{ sol affaissable.}$$

### 13-Minkov et al (1980) :

$$\delta = 0.05 (n_0 - 40) \cdot (30 - w_0)$$

$$\delta \geq 2\% \text{ sol affaissable.}$$

### 14-Kassif d'après Austerlitz et Al (1983) :

A défini un critère basé uniquement sur le poids volumique initial et sur la teneur en eau initial. Pour qu'un sol s'effondre, il faut que  $w_0 \gamma_0 \leq 1.5$ .

### 15-Anderson (1985) :

$$\text{Degré d'effondrement } R = 5.5 - 3.82 \log(w_L/w_p) - 1.63 \log(w_0) - 1.24$$

$$(C_u) - 0.918 \log(P_{10}) + 0.465 \log(D_{10}/D_{40}) - 0.45 \log(D_{99}/D_{50}) - 0.303 P_{200}$$

Où :

$C_u$  : Coefficient d'uniformité du sol ( $C_u = D_{60} / D_{10}$ ).

$P_{10}$  : La fraction du sol passant à travers le tamis n°10 (2mm) ;

$P_{200}$  : La fraction du sol passant à travers le tamis n°200 (0.075mm) ;

$D_x$  : C'est le diamètre qui à travers lequel passe x% du sol.

$$R \geq 2\% : \text{sol affaissable.}$$

### 16-Clevenger (1985) :

La densité sèche peut donner une vue sur la macroporosité des sols.

Si  $\gamma_d < 1.28 \text{ g / cm}^3$  : l'effondrement se manifeste après une faible augmentation de teneur en eau.

Si  $\gamma_d > 1.44 \text{ g / cm}^3$  : pas l'effondrement.

Entre ces deux limites l'effondrement peut se manifester.

### 17-Reginatto(1992) :

Basé sur le critère de Markin(1969), Reginatto suggère que le sol est Susceptible à

l'affaissement si :  $R > 0.02$ .

### 18 - Ayadat et Abbeche (1992) :

$w_L \leq 1.25(w_0/s_0)$  : le sol est susceptible à l'affaissement.

### 19- Ayadat et Belouahri (1996) :

Critère basé sur la granulométrie.

Si  $C_u \geq 12$  Le sol est collapsible.

Si  $4 < C_u < 12$  Le collapse est probable.

Si  $C_u \leq 4$  Le collapse ne manifeste pas.

Avec  $C_u$  : coefficient d'uniformité.

### 20- Ayadat et Abbeche (1997) :

Si  $\gamma_h \leq 0.78 \gamma_s$  sol susceptible à l'affaissement.

### 21- Ayadat et Ouali (1999) :

Si  $I_p \leq 20$  et  $15\% \leq W_L \leq 35\%$  le sol est collapsible.

Si  $I_w < 1$  le collapse est très probable.

La droite  $I_p = 0.5 W_L - 10$  proposé comme limite séparant les sols affaissables des non affaissables.

**22- Abbeche et al (2005) :**

**Si :** 5% < (% des particules fine < 2 $\mu$ m) < 15% **et**  $W_L < 20\%$

L'effondrement est très probable.

**Si :** 15% < (% des particules fine < 2 $\mu$ m) < 30% **et** 15% <  $W_L < 30\%$

L'effondrement est très probable.

**Si :** (% des particules fine < 2 $\mu$ m) < 30% **et**  $W_L > 35\%$  Pas d'affaissement.

**I.17.2-Méthodes expérimentales : [4]**

Des bancs d'essai au laboratoire et des essais in situ ont bien apprécié quantitativement le phénomène collapse. À cause de la localisation des sols affaissables dans les régions arides souvent éloignés des centres de recherches, la plupart des sols testés dans les diverses manipulations sont généralement des échantillons reconstitués. , la plupart des sols testés dans les diverses manipulations sont généralement des échantillons reconstitués. Dans la plupart des cas l'indentification d'effondrement se fait en laboratoire avec les méthodes du simple oedomètre et du double oedomètre.

**I.17.2.1- Essais oedométrique simple :**

Knight (1963) a proposé un essai à l'oedomètre effectué sur un échantillon, à sa teneur en eau naturelle, découpé et introduit dans l'anneau de l'oedomètre, sur lequel sera effectué un chargement progressif jusqu'au 200KPa, à la fin de ce chargement l'échantillon est inondé puis laissé 24 heures dans cette état, en suite l'essai est conduit à son chargement maximal. La courbe qui en résulte est représentée sur la **Figure : I.17 :**

Le potentiel d'affaissement est défini comme suit :

$$C_p = [ \Delta e_c / (1 + e_0) ] \times 100$$

Où :  $\Delta e_c = e_1 + e_2$

$e_0$ : Indice des vides initial ;

Le potentiel d'affaissement peut être aussi défini comme :

$$C_p = H_c / H_0$$

Où :

$H_c$  : Variation de la hauteur après mouillage ;

$H_0$  : Hauteur initial de l'échantillon ;

Le potentiel d'affaissement ainsi défini donne une appréciation sur le degré d'affaissement du sol.

Les valeurs suggérées par Knight (1975) sont donné au tableau (I-2).

En se basant sur l'étude d'Abelev (1961), Lutenegeger et al (1988) ont proposé le même essai œdométrique effectué par Jennings et Knight (1975), mais avec une saturation de l'échantillon à un niveau de contrainte de 300 KPa.

Le potentiel d'affaissement suggéré est défini comme suit :

$$C_p = [\Delta e_c / (1 + e_0)] \times 100$$

Où :  $\Delta e_c = e_1 + e_2$

$e_1$ : Indice des vides au début de la saturation.

$e_2$ : Indice des vides a la fin de la saturation.

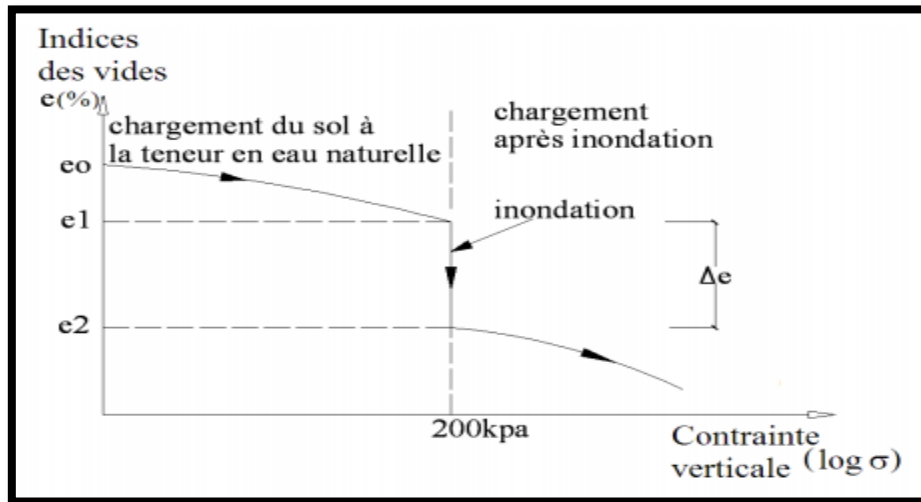


Figure I.17: Courbe oedométrique (teste de Knight 1963). [4]

### I.17.2.2- Essai oedométrique double:

Deux échantillons de sol sont placés dans deux oedomètres sous une charge de 1KPa pendant 24 heures, à la fin de ce chargement un des échantillons est saturé à l'eau l'autre est gardé à sa teneur en eau naturelle.

En suite les deux essais sont conduits à leurs chargements maximaux tout en doublant la charge toutes les 24 heures. A la fin du chargement, avant saturation d'un des échantillons, les indices des vides des deux échantillons pourraient être différents et que les deux courbes ne partent pas du même point.

Après avoir tracé les deux courbes oedométriques sur un même diagramme, on calcul la contrainte effective réelle  $P_0$  due au poids des terres à la profondeur de prélèvement de l'échantillon et on positionne cette valeur sur la courbe  $e=f(\log \sigma)$  pour les deux courbes.

On détermine en suite la pression de prés consolidation  $P_c$  à partir de la courbes oedométriques de l'échantillon saturé.

La courbe à partir de laquelle sera calculé l'affaissement est construite par translation parallèle à la courbe relative à l'échantillon à teneur en eau naturelle au point  $(e_0, P_0)$  (voire figure : I-18). Si l'augmentation du chargement et de  $\Delta p$  teneur, le sol à la teneur en eau.

naturelle aura un tassement de :

$$\frac{\Delta e_s}{1-e_0}$$

Si le chargement reste constant et le sol subit une saturation, le tassement additionnel sera de :

$$\frac{\Delta e_c}{1-e_0}$$

Jennings et Knight (1975) rapportent suite à leurs études que les tassements observés et ceux prédit par cette méthode sont suffisamment comparables et que depuis plusieurs mécanismes d'affaissement ont été avancés ainsi que plusieurs techniques de prédiction, et qu'il est souhaitable à chaque fois qu'il est possible d'effectués des essais in situ à fin de vérifier les analyses au laboratoire et l'efficacité de la technique d'inondation utilisée. Seulement le majeur inconvénient des essais sur site réside dans les dépenses coûteuses et le temps considérable nécessaire à leur accomplissement.

D'après Piggs (1978) et Piggs et Schmidh (1980) les essais de plaque, les testes au laboratoire ou les essais standards peuvent être utilisés et que la teneur en eau initiale reste le critère fondamental dans le choix de la méthode à entreprendre.

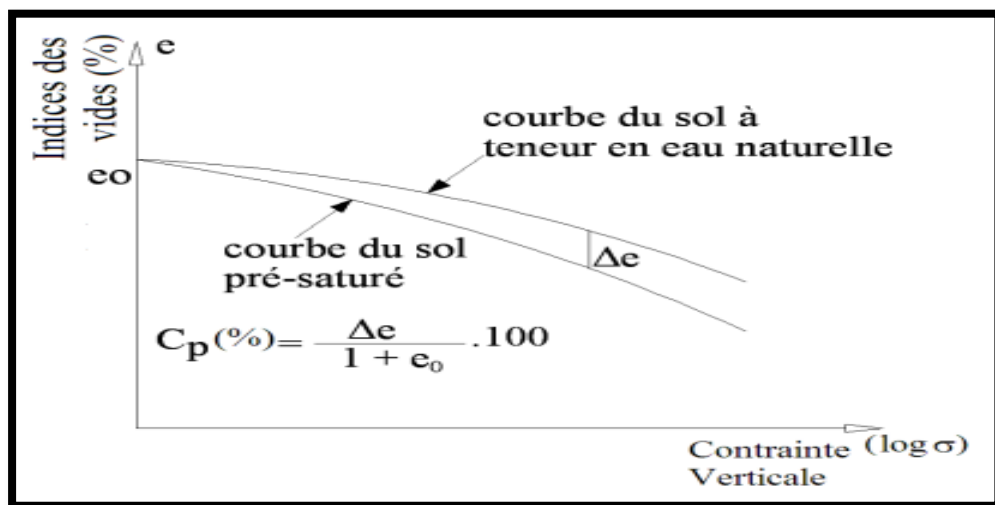


Figure I.18: Double oedomètres (Knight et Jennings 1975). [4]

### I.17.2.3. Affaissement données par les deux types d'essais :

Nous pouvons citer les études menées par A.Luttenegger (1988), A.Zur (1669) et P.Delage (1993) sur différents types de sols affaissables sur lesquels ont été effectués des essais oedométriques simples et des essais oedométriques doubles, qui montre dans tous les cas que l'affaissement obtenu par l'oedomètre double est toujours supérieur à celui obtenu par l'essai simple. Pour A.Luttenegger (1988), le rapport entre les deux potentiels d'affaissement varie entre 0,94 et 0,35.

Le tableau I -2 donne le classement des sols affaissables d'après Jennings et Knight :

CP (%)	Gravité du problème
0 à 1 %	Sols non affaissables (pas de problème)
1 à 5%	Trouble moyennes
5 à 10%	Troubles
10 à 20%	Troubles sévères
> à 20%	Troubles très sévères

**Tableau I.2 : Classement des sols affaissables d'après Jennings et Knight (1975). [4]**

### **I.17.3. Les Méthodes théoriques :**

En ce qui concerne la prédiction de l'effondrement par des méthodes théoriques, très peu de travaux ont été publiés dans ce sens. Il semble qu'actuellement, le développement d'une méthode analytique est très difficile.

La méthode qui donne des résultats plus exactes, exige des essais in-situ avec la charge réelle appliquée, ce qui est coûteux et consomme beaucoup de temps et ne peut être généralisée, puisqu'elle ne montre que le comportement de surface de la région testée.

### **I.18- Des ouvrages sur sols collapsibles : [8]**

Malgré le caractère particulier et les anomalies des sols affaissables, la Littérature révèle que les méthodes de stabilisation et de renforcement ont permis L'accomplissement avec couronnement de divers ouvrages parfois excessivement Complicqué.

Les principes de construction sur ce type de sols utilisant des dispositions Constructives et des mesures de protection contre l'eau, ainsi que différentes techniques d'élimination des propriétés d'affaissabilité, tels qu'ils ont été élaborés par le professeur Yu.M. Abelev, constituent les bases de l'élaboration des projets des ouvrages industriels civils sur sols affaissables.

La particularité de la construction des ouvrages industriels, civils ou hydrotechniques et des infrastructures de transport sur les sols loessiques macroporeux peu humides réside dans le fait que, si les sols de fondation sont humidifiés pendant les travaux, des affaissements se produisent et les fondations perdent souvent leur stabilité.

De plus, même après la fin des travaux de construction, lorsque les tassements dus à la pression transmise aux fondations se sont stabilisés, après plusieurs années d'exploitation normale, si les sols humidifiés, des affaissements importants et non uniformes des édifices peuvent se produire, ce qui rend leur exploitation impropre. Dans certains cas, le coût des travaux de réparation et de réhabilitation atteint 30 à 40% de cout initial de l'ouvrage. Parmi les constructions réalisées avec succès, consultés dans la littérature, on note:

### **I.18.1. Cas des bâtiments :**

D'après Stefanoff (1961), à cause de la saturation du lœss une déformation importante s'est produite dans un moulin à structures préfabriquées. Le moulin s'est affaissé de 14 cm. La coupe géologique du site montre que le projet est réalisé sur un remblai de 0.7 à 1.2 d'épaisseur, surmontant 7.5m de lœss. La solution proposée consiste en une stabilisation du sol lœssique par injection d'agents chimique et d'empêcher l'inondation de l'infrastructure par un système approprié de drainage en surface.

De sa part Liaussu et al(1989), ont montré que le traitement d'une surface de 10 ha d'argile limoneux par humidification du sol et compactage dynamique par pilonnage, s'est proposé comme remède, en vue de réduire le potentiel d'affaissement d'un projet de bâtiments en béton armé.

### **I.18.2. Cas des constructions hydrauliques :**

D'après Clevenger (1985) un Canal à Courtland (grande Bretagne) est fondé sur du lœss silteux et argileux de faible densité. les essais au laboratoire montrent un effondrement allant de 45.70 à 61 cm dans les conditions de saturation et de chargement. Les essais in situ sur le sol saturé donnent 51 cm de tassement et indiquent que la saturation seule ne cause pas l'affaissement du lœss et comme la contrainte appliquée par les fondations est plus faible que la contrainte due aux poids des terres, le canal a été construit sans traitement du sol.

Peak et al(1985), affirment que lors du passage d'un canal d'irrigation à travers 120.70 km du lœss d'une épaisseur de 61 m. Avec la susceptibilité d'affaissement du lœss par saturation. L'expertise montre que le niveau de la nappe n'atteindra jamais la structure, la saturation est faible pour causer l'effondrement.

Une préconsolidation par inondation est proposée dans le projet d'un réservoir, selon Holtz (1962). la nature du sol est du type lœssique. l'affaissement du sol survient à des pressions plus faibles que celles dues au poids propre des terres à la teneur en eau naturelle.

Clevenger (1985), montre que la dégradation dans un barrage en terre à Walla Walla(USA) est due à la nature du sol, composée de silts avec 8à12% d'argile et 2 à 10% de sable. Pour réduire les tassements excessifs et contrôler l'infiltration de l'eau, il est préconisé de prévoir une excavation et recompaction, sans recommander le drainage.

Dans le cadre d'un projet d'irrigation (canaux d'irrigation, tunnel, étangs, ponts, digues), puisque le sol du projet est du type sableux, fin à grossier, contenant 10 à 30% de fines comme agent de cimentation, la réduction de susceptibilité à l'affaissement, nécessite l'excavation du sol puis le compactage par rouleaux vibrants. Raini et al(1989).

### **I.18.3. Cas des ouvrages hydrocarbures :**

Brink (1961), montre que divers ouvrages ont été réalisés en Afrique du sud sur des sols granitiques résiduels. La décomposition du granite a conduit à découvrir que ce sol résiduel est exposé à un affaissement de sa structure en grains à l'état d'inondation, ce qui provoque l'inclinaison du château d'eau adjacent au site. Un décapage et une substitution avec compactage intensif de la totalité des terrains nus sont proposé comme remède.

Au cours des travaux d'extension des gazoducs à Hassi R'mel qui consiste en la réalisation des bâtiments, des réservoirs d'eau potable, d'atelier d'équipement lourd , et des fondations pour des turbocompresseurs, le rapport de reconnaissance de sol,

ABB-SAE (1993), montre que le sol du projet est composé de :

- une première couche de limon argileux jusqu'à 3m d'épaisseur avec traces de sable.les essais œdométriques saturés et à l'état naturel montrent que le sol est affaissable.
- Une deuxième couche de limon argileux avec traces de sable.
- une troisième couche de terrain très compact à forte cohésion à l'état sec, non susceptible à l'affaissement. La variation du module oedométrique est faible, mais perd la plupart de sa cohésion en cas de saturation. La solution proposée est la substitution de la première couche par un matériau granulaire compact et prévoir des écrans d'étanchéité.

Reginatto (1973), indique la construction d'un barrage de longueur de 7 km sur une assise composée d'un sol résiduel surmontant une couche de gneiss décomposé.les essais au laboratoire et in situ ont montré qu'il n'y a pas d'affaissement sous faible chargement mais sous des contraintes supérieures à  $4 \text{ kg/cm}^2$ .

L'affaissement résulterait par destruction des liaisons de cimentation. Pour éviter tout mouvement du sol, une substitution du sol dans les zones dangereuses est recommandée.

Anagnosti (1973), rapporte que lors de la réalisation d'un barrage de 15 à 20 m de hauteur et d'une longueur de 600m, construit sur pentes, situé dans la zone côtière libyenne, il a constaté que cette zone est couverte d'un mince dépôt de lœss avec des fragments de roche.

Les essais au laboratoire indiquent qu'une faible saturation, provoque un important affaissement d'environ 1m, donc c'est un signe de danger de destruction du barrage pendant son remplissage. Le remède proposé consiste à Excaver, remplacer par un matériau meilleur et inonder. Ainsi on assure un chargement et une saturation du sol durant les travaux préparatoires de construction. Le drainage de l'eau, pouvant se faire par-dessous du fond de la réserve de matériau, est protégé par une couche de lœss bien compactée. Les charges créées par la réserve de sol en talus sont suffisantes pour produire un tassement qui consolidera les couches de lœss et écarte le danger de liquéfaction du sol en cas du séisme.





*Chapitre II*

*METHODES  
DE TRAITEMENT  
DES SOLS  
AFFAISSABLES*





***CHAPITER II***

***METHODES DE TRAITEMENT DES***

***SOLS AFFAISSABLES***

## II.1 – Généralités :[6]

Lorsque la construction d'un ouvrage est décidée sur un terrain fixé dont la stratigraphie peut être constituée d'un sol dit "à problèmes" deux problèmes se posent le plus souvent. En premier lieu, il faut recourir à une opération dite d'amélioration du sol pour rendre faisable la construction de l'ouvrage en question dans un délai raisonnable. En second lieu, il faut tenir compte du coût de l'opération d'amélioration en évitant qu'elle soit disproportionnée par rapport au coût d'une autre solution de fondation envisageable. L'opération d'amélioration s'accompagne, donc, de certaines performances qui conduiront à des nouvelles propriétés et caractéristiques du sol initialement à problèmes. C'est dans cette vue qu'une technique d'amélioration d'un sol est décidée. Par ailleurs, la technique d'amélioration nécessite au préalable une vérification de la faisabilité de son exécution dans les conditions géotechniques du projet visé, et, d'autre part, la quantification des performances pré dictées pour le sol amélioré. Cela implique la réalisation de plots d'essais sur une plateforme très proches de l'emplacement de l'ouvrage.

Ce qui permettra de comparer entre les propriétés du sol de fondation avant et après l'opération d'amélioration. Les résultats de ces essais servent également à la validation de méthodes de calcul spécifiques à la technique d'amélioration exécutée. Lorsqu'on opte pour une technique d'amélioration donnée on est amené le plus souvent à compléter les résultats issus de la première campagne de reconnaissance géotechnique du sol. En effet, on aura à déterminer des paramètres supplémentaires qui soient relatifs au sol initial et à la technique d'amélioration décidée aussi bien pour les modalités d'exécution que pour les besoins du calcul et du dimensionnement.

Néanmoins, une dernière étape devrait s'ajouter dans un projet d'amélioration des sols, en particulier, qui est celle du suivi dans le temps du comportement de l'ouvrage construit sur le sol amélioré.

Cela nécessite également l'enregistrement de mesures qu'il faudra traiter et analyser ultérieurement en vue d'une meilleure justification de la technique d'amélioration retenue.

## II.2- Domaines d'application des techniques d'amélioration : [6]

Le sol initial, ou à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur essentiel en vue de lui faire subir une technique d'amélioration donnée. En effet, compte tenu des deux grandes classes de sols bien connus, à savoir pulvérulents ou fins, on comprend naturellement qu'il existe une différence entre les techniques d'amélioration appropriées à chacune de ces classes. Par ailleurs, en plus, sachant qu'il existe une bonne majorité de sols appartenant à la catégorie de sols intermédiaires, d'autres dérivées de techniques peuvent être envisagées. Dans la pratique, en fonction du projet en vue d'être exécuté, on peut faire recours à l'exécution de deux techniques différentes d'amélioration des sols.

Il faut également souligner, sur le plan économique, l'importance des techniques d'amélioration des sols comme étant une solution alternative à d'autres modes de fondation plus coûteux. A titre d'exemples, le renforcement par colonnes et le renforcement par micro pieux représentent deux techniques dont l'usage est devenu bien pratiqué à l'échelle internationale. En raison, d'une part, de leurs exécutions relativement rapides, et, d'autre part, des circonstances actuelles concernant le coût de plus en plus cher, en particulier, de l'acier le renforcement par colonnes et le clouage représentent deux opportunités à saisir pour remplacer le mode de fondation sur pieux. Une telle opération est bien entendu possible en particulier dans le cas d'ouvrages transmettant un chargement quasi uniforme sollicitant le sol sur une profondeur ne dépassant pas les vingt mètres.

## II.3 - Les Méthodes De Traitement Des Sols Affaissables : [6]

Le géotechnicien s'intéresse aux sols dans la mesure où ceux-ci constituent l'élément principal du contexte dans lequel la stabilité d'un ouvrage sera conçue. Il doit envisager d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols d'assise pour augmenter leur capacité portante.

Un grand nombre de procédés existent et diffèrent selon la nature du sol et le type de projet à exécuter, une part, certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage des pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection de liants (bitume, ciment, chaux, laitier), de pilonnage ou de congélation,

Relativement chers, d'autre part, les procédés de compactage mécaniques, c'est ce dernier groupe de procédé, principalement mis en œuvre sur les chantiers routiers.

### II.3.1-Traitement par compactage : [6]

Compacter un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...) par ajout d'une quantité d'eau, pour accroître sa densité en place et resserrer sa texture. Cette diminution de volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial. La teneur en eau du sol n'est donc pas modifiée (il s'agirait dans ce cas d'une consolidation).

Il peut être assuré par trois voies (Bergado et col, 1996) :

- une pression exercée par un rouleau compacteur. Fig. II.1



**Figure II.1: Un rouleau compacteur. [6]**

- une masse qui chute sur une hauteur donnée. Fig. II.2



**Figure II.2 : Une masse qui chute. [3]**

- une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur (ou grue) (vibrocompactage). Fig. II.3 et Fig. II.4



Figure II.3 : Compactage par vibro-sonde. [3]



Figure II.3 : Compactage par plaque vibrante lourde. [6]

Les facteurs qui caractérisent le compactage sont en général : le poids volumique du sol sec  $\gamma_d$  (nature du sol), sa teneur en eau  $W$ , à partir desquels on détermine le poids volumique total (ou humide) du sol par la relation :  $\gamma_h = \gamma_d (1 + w)$

La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice des vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale dont la détermination est faite en laboratoire lors d'un essai Proctor (Bouassida et Boussetta, 2007). La teneur en eau optimale d'un sol varie dans une marge qui dépend du type de sol. Il est d'autant plus élevé lorsque la granulométrie du sol devient davantage fine (Bergado et al, 1996). On remarque que la densité sèche maximale peut augmenter en fonction de l'énergie de compactage. Par ailleurs, une même densité sèche peut correspondre à deux teneurs en eau différentes : la faible teneur en eau (côté sec) correspond à une structure plutôt dispersée des particules, alors que pour la teneur en eau élevée (côté mouillé) la structure des particules est orientée.

Pour les sols pulvérulents le paramètre physique indiquant l'état dans lequel se trouve ce sol vis-à-vis de la proportion des vides  $y$  existant est l'indice de densité relative  $I_D$ .

Le compactage statique des sols fins est évoqué lors de la construction de barrages en terre et des digues à noyau Constitué d'un matériau quasiment imperméable.

### **A : Traitement par compactage dynamique : [3]**

Cette technique à été pratiquée en premier lieu par L.Ménard au début des années 70 Gambin et Col (1981), elle est recommandée pour stabiliser et densifier les sols pulvérulent situés aussi bien hors nappe que sous nappe phréatique ainsi que pour la densification des sols affaissables à structure macroporeuse (loess en ex URSS).

Le tassement profond dynamique (DDC) est une technique au sol importante d'amélioration, capable de rendre une large variété de sols faibles compactés par l'augmentation de la capacité portante, la réduction des tassements et du potentiel de liquéfaction.

L'amélioration a pour conséquence la portance accrue et le règlement réduit. De cette façon des conditions de sol sur beaucoup d'emplacements marginaux peuvent être améliorées au point où des bases peu profondes peuvent être employées sans recours à l'excavation ou à l'empilage profond. Tandis que le principe du tassement profond dynamique est depuis l'antiquité considérable, c'est seulement ces 15 dernières années que la technique a été sérieusement appliquée à grande échelle à la solution des problèmes par l'amélioration au sol.

Avec le compactage dynamique (DDC), la terre est soumise au damage extérieur répété employant un acier lourd et un poids concret. Typiquement le bourreur pèse entre 5 et 20 tonnes, chutant dans l'automne libre des tailles de jusqu'à 25 mètres, pour Bergado et Col (1996) jusqu'à 40 mètres.

Le bourreur est lâché un nombre d'ensemble de fois sur un modèle de grille au-dessus de l'emplacement de former un passage. Deux à cinq passes dessus un emplacement, dépendant du type de sol et la condition, peut être exigée.

**B :Vibrocompactage : [3]**

Inventé en 1934 en Allemagne par Steurmann et Degen, c'est le procédé qui permet d'exécuter le compactage en profondeur du sol en place, à l'aide d'une aiguille vibrante par ajout ou non d'un matériau pulvérulent. Sous l'effet simultané des vibrations et de saturation, les grains des sables lâches sont réarrangés à un état compact duquel résulte une augmentation de la contrainte latérale. Le vibrocompactage est très recommandé pour les sables moyens à gros dont la granulométrie montre un pourcentage en poids de tamisât (à travers le tamis d'ouverture 0,0074 mm) en limon inférieur à 12% et un pourcentage en poids d'argile inférieur à 2%).

Le vibrocompactage est exécuté sur une profondeur variant de 3 m à 56 m, selon des mailles où la distance entre les points de traitement varie de 1m à 5m. La performance du vibrocompactage est d'atteindre généralement une densité relative du sol amélioré qui varie de 75% à 100% selon le projet. Son exécution se fait en trois (03) étapes successives :

- 1) La pénétration (ou fonçage) de l'aiguille vibrante à la profondeur exigée sous l'effet des vibrations et un lançage à l'eau ou à l'air.
- 2) L'aiguille vibrante est remontée de la profondeur maximale par passes de 0,5 m. Le sol en place (sable ou gravier) s'achemine vers la pointe de l'aiguille vibrante.
- 3) Le compactage est effectué avec un remblaiement depuis la surface (apport d'un matériau stocké), soit avec le sol en place dont la surface subit un affaissement. Dans ce cas un important cratère d'affaissement se forme autour du point de compactage. Le temps d'exécution d'un point de traitement par vibrocompactage dépend de l'appareil utilisé et de la profondeur à atteindre. Il existe différents types de vibreurs dont la conception répond au procédé d'exécution souhaité, par exemple:

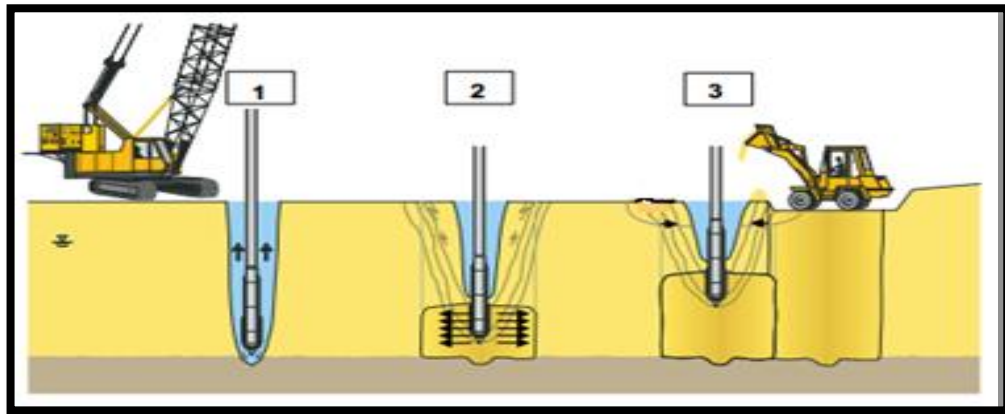
**V10** : appareil spécial pour les pieux vibrés;

**V23** : appareil à tout usage, vibrocompactage et colonnes ballastées;

**V32** : vibrocompactage des sables lâches;

**V48** : appareil spécial pour les remblais très lâches.

A titre d'exemple, lors de la réalisation du barrage Hidden (USA) le record du monde en profondeur avec le V23 a été de 56m, le temps nécessaire pour l'enfoncement de l'outil était de deux (02) minutes. Le vibrocompactage en site marin se développe rapidement, deux projets à grande envergure ont fait l'objet d'un tel traitement. L'extension du Port de Monaco et celui de Patras (Grèce).



1 : Fonçage du vibreur 2 : Compactage des sols 3 : Apport des matériaux et finition

**Figure II.5 : Étapes du vibrocompactage.[3]**

### II.3.2- Traitement chimique : [6]

Consolidation des sols à la chaux et au ciment Il existe deux (02) types de traitement chimiques courant :

- 1- Traitement à la chaux.
- 2- Traitement au ciment.

Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement.

L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier.

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



**Figure II.6 : Traitement par la chaux. [3]**

### **1-Le traitement a la chaux : [8]**

Elles permettent de mettre en œuvre et de compacter les sols mouillés qui, normalement, ne pourraient pas être compactés correctement. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité.

Ce procédé convient par exemple pour la réalisation de remblais, de talus ou de voies de circulation sur le chantier.

#### **Le principe :**

L'hydratation de la chaux vive au contact de l'eau du sol provoque une consommation d'eau et une évaporation importante. Cette propriété est mise à profit pour l'assèchement des sols fins argileux et humides.



Chaux vive + eau = Chaux éteinte + Chaleur

Cette réaction exothermique entraîne une évaporation.

## 2- Le traitement au ciment :

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

### Le principe :

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel.

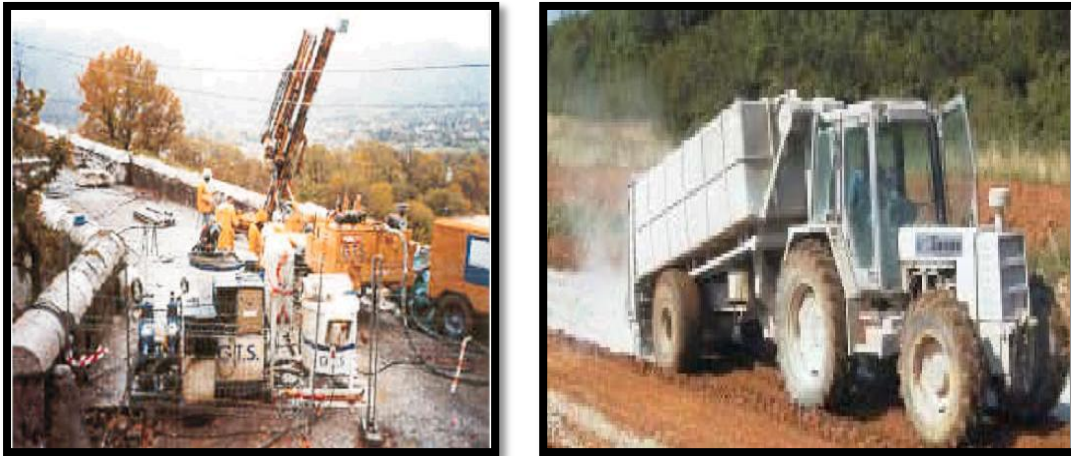


Figure II.7 : Traitement chimique à la chaux et au ciment. [5]

### II.3.3-Traitement thermique : [7]

Destinée aux ouvrages importants, d'après le guide technique LCPC / SETRA (2000), cette méthode de traitement a été procurée pour la première fois par Ostashev en 1934. Consistant à soumettre le sol à un réchauffement contrôlé, on injecte dans le sol pendant plusieurs jours de l'air ou du gaz chauffé entre 200 et 800° C, ce qui fait fondre le squelette du sol et les contacts entre les particules sont ainsi soudés. Les sols deviennent presque insensibles aux phénomènes de gonflement et de retrait. Cependant le coût du transport et de mise en place des unités mobiles de traitement peut être très lourd et n'est rentable, en terme strictement financier, que lorsque les quantités de sol à traiter sont importantes.

Bell et Bruyn (1997) ont rapporté l'utilisation du traitement thermique des sols loess au sud-Est de l'Europe et de la Russie par la combustion des gaz et mazout dans des trous de forage sous pression. Les forages sont très rapprochés et les températures peuvent atteindre 1000° C, produisant une colonne de sol stabilisée avec un diamètre de 1,5 à 2m.

### II.3.4-Traitement électrique :[6]

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

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

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

Le procédé de l'échange de base consiste à prolonger les effets de l'électro-filtration par l'utilisation de cathodes d'aluminium. La perte de masse constatée dans celles-ci correspond probablement à une modification de la constitution physico-chimique du terrain qui interdit un afflux ultérieure de l'eau. Les qualités du sol sont améliorées et se traduisent par une réduction de la teneur en eau, un accroissement de la cohésion, un abaissement de la limite de liquidité et de la prévention du gonflement du au gel .

### II.3.5 Traitement par pré chargement :[6]

Le pré-chargement est une méthode d'amélioration des sols compressibles d'usage très courant en pratique. Lorsqu'il s'agit de construire sur un sol saturé de faible portance et (ou) relativement compressible le pré-chargement (généralement fait par un remblai) est la technique la plus simple qui permet d'assurer une amélioration de la résistance au cisaillement à court terme. Le pré-chargement par étapes, lorsqu'il s'agit d'édifier des remblais de grande hauteur (> 6m) sur une argile molle très compressible le chargement doit être fait par étapes pour éviter de provoquer la rupture par poinçonnement du sol.

Toutefois l'inconvénient majeur du pré-chargement, sans tenir compte du coût d'exécution demeure la durée qu'il nécessite pour atteindre l'amélioration escomptée. Outre la durée du pré-chargement, le temps d'exécution du remblai de pré-chargement et la durée que nécessite sa suppression (à la fin de la durée fixée) ne permet d'envisager le début des travaux qu'après un temps de consolidation non négligeable (six mois au minimum) qui est parfois même comparable à celui de l'exécution de l'ouvrage.

Le pré-chargement dure quelques mois pendant lesquels le processus de consolidation primaire (le sol étant saturé) s'amorce mais sans atteindre un degré de consolidation, (U), relativement élevé (supérieur à 50%). Deux conséquences en résultent :

- Le prélèvement d'échantillons du sol avant et après pré-chargement sur lesquels on réalise un essai de cisaillement non consolidé non drainé conduit à l'amélioration réelle de l'augmentation de la cohésion non drainée.

- La réduction du tassement du sol sous l'action du pré-chargement, ce qui permet d'atteindre plus facilement la valeur requise du tassement admissible de l'ouvrage ou, autrement, d'avoir un tassement résiduel plus faible lors de la mise en service de l'ouvrage.

Pour cette raison l'idée d'accélérer la consolidation du sol compressible s'est avérée primordiale en vue de débiter la construction de l'ouvrage dans un délai relativement court, chose qui a contribué à l'usage des drains verticaux.

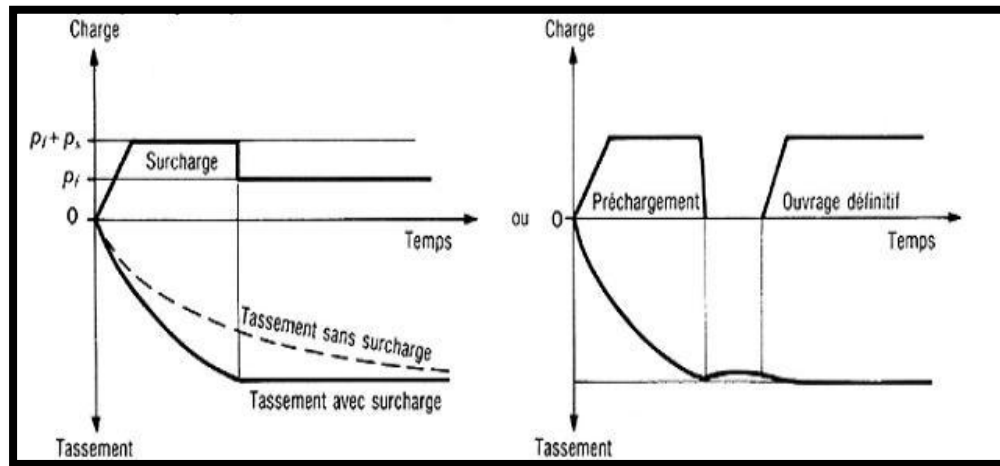


Figure II.8 : Principe de traitement par pré chargement. [9]

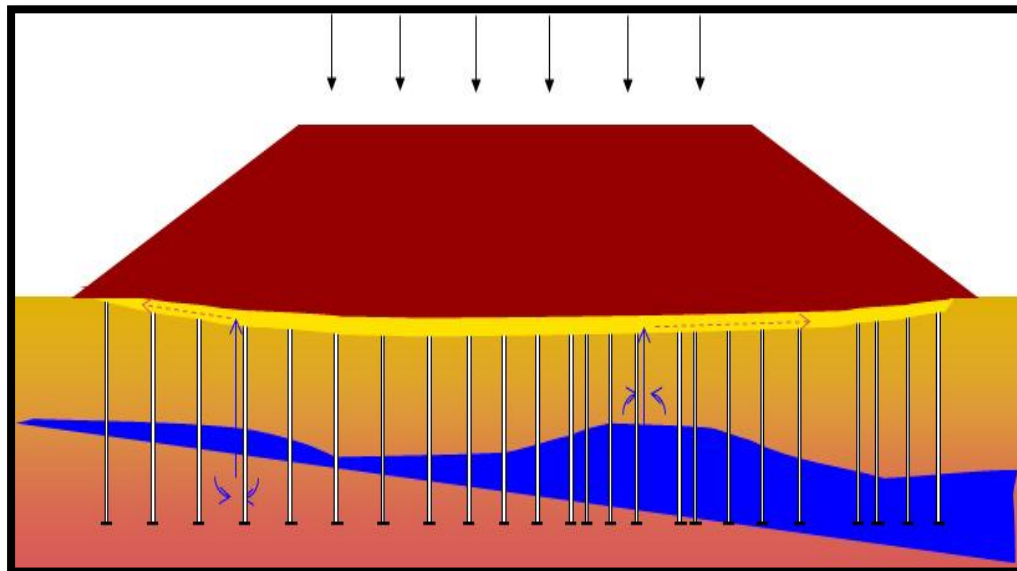


Figure II.9 : Pré chargement pour drains verticaux. [10]

### II.3.6-Traitement par colonne ballastée : [5]

Les colonnes ballastées, au sens le plus large de terme, ont été élaborées afin de permettre l'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraine un renforcement de ce dernier.

Les différentes méthodes d'amélioration répondent à des contraintes techniques liées aux caractéristiques géotechniques des sols en place. Les objectifs généraux qui sont attendus d'une amélioration de sols par inclusions souples sont:

- l'augmentation de la capacité portante du sol.
- l'augmentation de sa résistance au cisaillement.
- l'obtention d'un drainage radial efficace assurant la consolidation.

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.

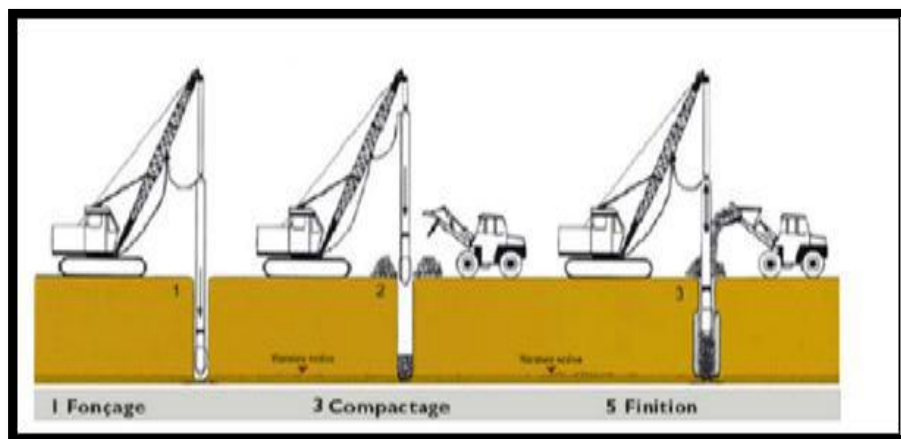


Figure II.10 : Mise en œuvre des colonnes ballastées. [5]

### II.3.7-Traitement par substitution : [5]

Parfois on recourt à la substitution, soit par ajout d'un sol de bonne qualité après décapage du sol existant, soit par reconstitution du sol existant avec un autre sol de qualité meilleure.

Dans les deux cas un compactage poussé doit être appliqué. Cette technique a été appliquée avec succès en Algérie dans un projet d'une station de Carburant à Hassi Ramel, (rapports technique 1990).

Elle requiert des moyens logistiques et la disponibilité du sol de substitution dans une zone bien proche pour diminuer les coûts.

A défaut, on pourrait utiliser le même sol excavé puis remis en place après traitement avec du ciment tout en diminuant la quantité d'eau et l'énergie de compactage suivant les proportions suggérées par Ayadat et Gherabli (1995).

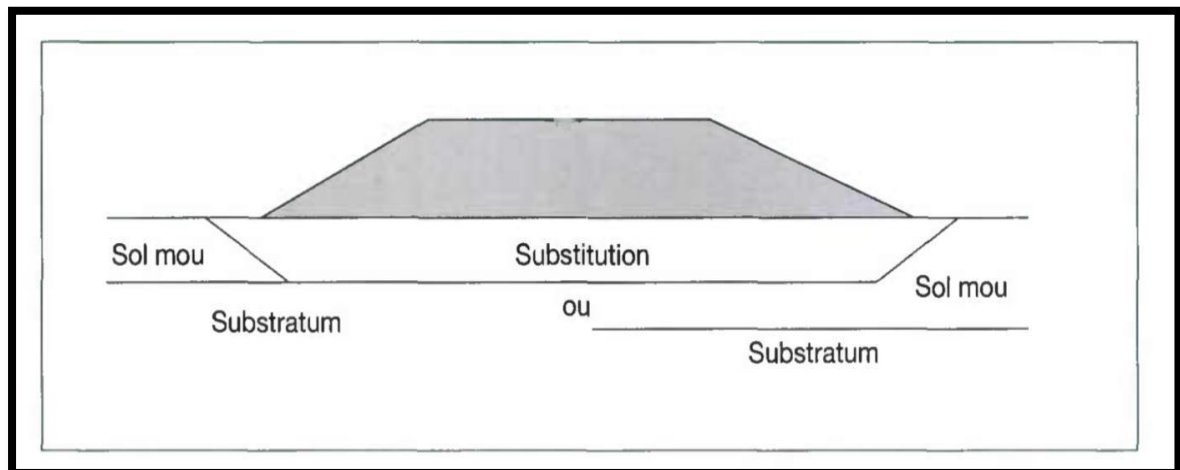


Figure II.11 : Substitution du mauvais sol. (J.P MAGNAN, 2000). [11]

### II.3.8-Traitement par injection : [8]

Par l'intermédiaire de forages, on introduit dans les vides du sol un produit liquide (coulis) se rigidifiant par la suite, l'injection du coulis est amenée en profondeur du sol Par l'intermédiaire d'un tube de diamètre compris entre 25 et 50 mm, souvent en matière plastique. Le tube est scellé au terrain par une gaine en coulis argile-ciment tous les 30 cm, le tube est percé de trous, lesquels sont couverts d'une manchette, en caoutchouc. Un train de tiges, creux, muni à son extrémité d'un double obturateur, permet d'envoyer le coulis désiré aux endroits des couches à traiter, par tranches de 30 cm. Le coulis est envoyé sous pression pour composer les diverses pertes des charges (train de tiges, obturateur, manchette, gaines).

On commence généralement par le fond et en retire le train de tiges au fur et à mesure de l'injection.

Les coulis utilisés sont généralement des suspensions stables à base de ciment. Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argile, auxquelles il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an les constituants hydratés du ciment relient les grains de sable entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, d'où l'augmentation de la portance et de la résistance mécanique. On utilise des ciments de classe 45 qui sont les meilleurs marchés. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter. Marquons aussi d'autres types de traitement en bentonite et en résines.

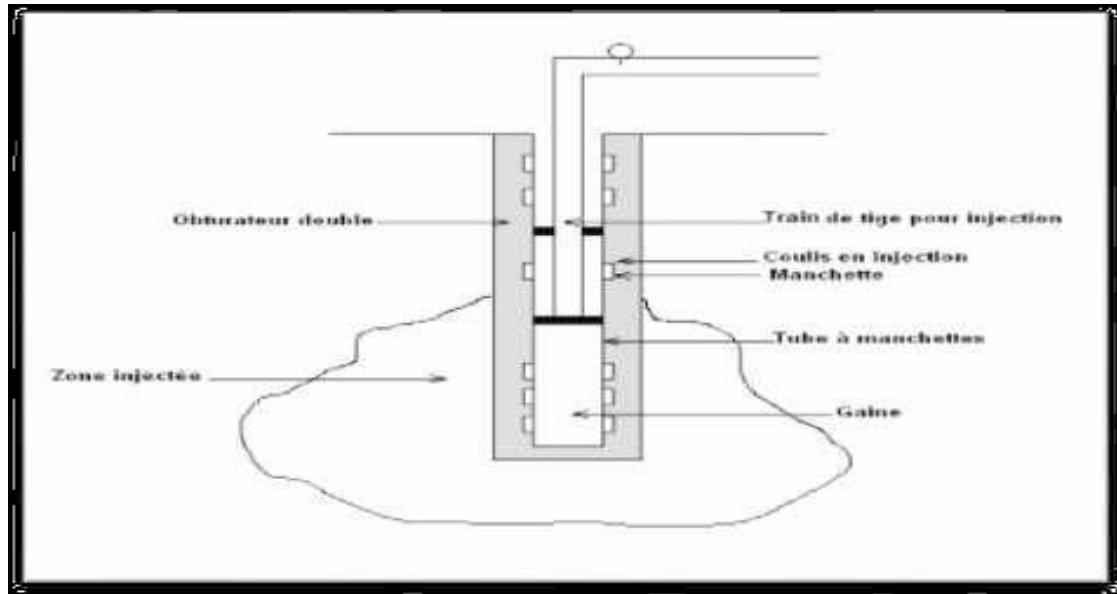


Figure II.12 : Traitement par injection. [3]

### II .3.9 -Traitements par congélation : [9]

C'est une technique de consolidation provisoire des terrains aquifères. (Pas nécessairement saturés), permettant ainsi de creuser des puits relativement profonds. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

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



**Figure II.13 : Traitements par congélation. [9]**

Le schéma de principe du procédé est le suivant:

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

Il existe plusieurs méthodes:

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

### **II.3.10-Traitement par pieu de chaux : [3]**

L'utilisation de la chaux comme liant est très ancienne, Grande Muraille de Chine (localement, en argile traitée à la chaux), voies romaines, habitations (chaux + sable + terre argileuse). L'emploi de liants est développé en technique routière, elle concerne essentiellement

Les sols instables, les sols fins argileux ou limoneux et aussi les sols à effondrement brusque. Le liant développé des liaisons dans le matériau qui, sans cela, serait trop déformable, la "portance" est largement améliorée.

Un sol effondrable traité passe d'un état plastique à un état solide et perd une partie de sa sensibilité à l'eau. On observe une augmentation de la cohésion, de la résistance mécanique et au poinçonnement (l'indice CBR peut être multiplié par 4 ou 10 au bout de deux heures), ainsi qu'une diminution des variations volumiques.

Tkhirov (1971), montre qu'une grande quantité de chaleur se dégage (jusqu'à 300°C) lors de la réaction chimique qui s'ensuit, ce qui a pour effet de diminuer sensiblement la teneur en eau jusqu'à ce que le degré de saturation soit  $\leq 60\%$  pour permettre un pilonnage dynamique. Le diamètre du pieu de chaux augmente de 60 à 80% pendant le processus d'extinction d'où un apport de compactage complémentaire non négligeable.

### **II.3.11-Traitement par pieu de sable : [6]**

Le traitement des sols effondrables par pieu de sable est une technique qui s'est développée très rapidement et qui est encore amenée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace, elle permet d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de qualité, issus de carrières qui sont utilisés parfois dans le même but.

Technique maintenant très répandue, elle utilise le principe de la diminution progressive de la surpression interstitielle sous l'influence d'une contrainte mécanique ou dynamique d'où une consolidation.

### **II.3.12- La Silicatisation : [6]**

Le principe du procédé de silicatisation consiste à injecter dans le sol une solution chimique (silicate de sodium). L'injection permet de conforter instantanément ce type de sols, en leur conférant des propriétés meilleures, le sol traité devient résistant à l'action de l'eau et acquiert un comportement mécanique très élevé. Des réactions chimiques conduisent à la formation de microcouches de produits néoformés, silico-calcaire, qui cimentent fortement le sol collapsible. Le professeur Abelev (1937) fût le premier à faire des recherches poussées pour renforcer la tenue des sols lœssique au moyen de différents types de verre soluble en injectant

Dans le sol des solutions chimiques au moyen de tubes perforés sous des pressions pouvant atteindre 15 bars, il a montré que la silicatisation des sols est très utilisée en Russie. Plus de 100.000m<sup>3</sup> de sols effondrables sont traités par an. L'introduction dans les vides d'une gel insoluble d'acide silicique se rigidifiant par la suite, augmente sa consistance et le rend pratiquement imperméable. De nombreuses expériences ont montré que l'on pouvait atteindre des taux de remplissage de 80% .

L'efficacité d'une silicatisation de sols lœssiques augmente lorsqu'il y a augmentation du module silicique de la solution utilisée. L'addition d'une petite quantité de solution de mono phosphate d'ammonium à la solution de silicate augmente ce module. L'efficacité du traitement dépend de la capacité d'absorption et d'échange, de la teneur en eau et de la concentration de la solution. Une teneur en eau élevée entraîne une diminution de la concentration de la solution de silicate à l'intérieur des interstices du traité. Cela est du avant tout à la perméabilité globale du sol, suite quoi on n'atteint pas une imprégnation suffisamment complète par la solution.

On peut aussi intensifier la silicatisation par injection de gaz carbonique sous pression, puis une solution de silicate. Le gaz carbonique sous pression déplace l'eau interstitielle vers l'extérieur, tout en laissant dans les pores un film d'eau acidifiée. L'injection du gaz Carbonique permet d'avoir une répartition plus régulière de la solution de silicate injectée dans le sol.

### **II.3.13. Traitement par drains verticaux DV : [6]**

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de préchargements. Il permet une consolidation plus rapide du sol. Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration des sols fins saturés en eau (terrains silteux ou argileux). La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage régulier, un drain préfabriqué. Lors de la mise en charge du terrain, les drains facilitent l'évacuation de l'eau interstitielle jusqu'à la surface, permettant ainsi une consolidation accélérée des sols traités. La surcharge est apportée soit par un remblai de pré chargement, soit par d'autres méthodes.

Les drains verticaux en plastique souple plats ou cylindriques, peuvent atteindre des profondeurs de 40 m ou plus. Selon la nature et la composition des terrains, les drains peuvent être également réalisés sous forme de colonnes de sable ou de granulats. Il y a deux familles de drains à savoir Magnan (1983).

- Les drains préfabriqués (DVP) sont d'exécution rapide et permettent d'accélérer fortement la consolidation.
- Les drains de sable contribuent à une réduction du tassement et offrent souvent une marge de profondeur variable, qu'il n'est pas possible de réaliser avec des drains préfabriqués. Un drain de sable a une durée de vie limitée. C'est essentiellement le colmatage par le sol environnant qui risque de réduire notablement cette durée de vie, voire la condamner. Par conséquent, un drain sera qualifié de « bien mis en place » lorsqu'il fonctionne durant toute la phase de consolidation primaire du sol à améliorer

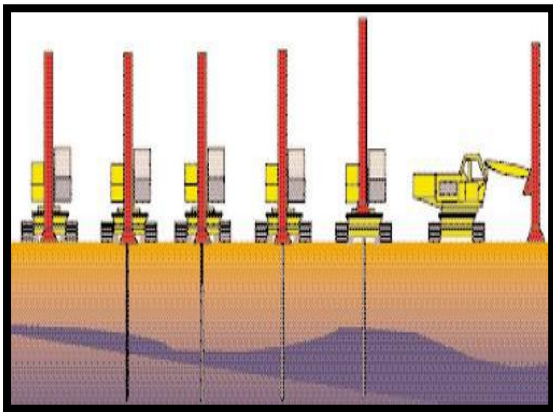


Figure II.14: Principe de traitement avec les DV En plastique. [6]      Figure II.15 : Traitement par DV [6]

### II.3.14 -Traitement par pré mouillage : [5]

Ces méthodes sont efficaces pour les sols ayant des épaisseurs d'environ 5 m et exigent une disponibilité d'eau en grande quantité, par contre elle est poursuivie dans les sites urbains, Cette technique consiste à réaliser un étang artificiel permettant d'accumuler une grande quantité d'eau au-dessus du sol << collapsibl >> le poids propre du terrain et l'infiltration lente de l'eau seront les causes principales de l'affaissement.

**II.4. Le choix des techniques de traitement des sols : [3]****II.4.1 : Le choix basé sur profondeur du sol:**

On généralement Les méthodes de traitement dépendent de la profondeur du sol Affaissable de la capacité portante que requiert l'ouvrage à édifier. Les méthodes utilisé dans le passé et vont être probablement utilisées dans le futur ont été résumées par Bara (1976) et sont reprises dans le tableau suivant :

<b>Profondeur du sol à traiter</b>	<b>Les méthodes de traitement de sols</b>
De 0 à 1,5m	Méthodes courantes et passées : - Humidification du sol avec compactage (par pilonnage ou rouleaux vibrants).
De 1,5 à 10m	- Excavation puis recompaction du sol. - Contrôle du potentiel de l'eau des drainages à travers les drains. - Vibroflotation. - Pieux colonnes ballastés. - Enfouissement des pieux. - Injection de silt de limon. - Inondation par un étang ou inondation normale.
Supérieure à 10m	- Inondation par un étang et puis d'infiltration. - Inondation par un étang et puis d'infiltration avec l'utilisation d'explosifs. - Combinaison des méthodes ci-dessus. Les futures méthodes possibles : - Traitement thermique pour solidifier le sol sur place.

	<p>Méthodes à ultrasons produisant des vibrations qui détruisent les liaisons mécaniques du sol affaissable.</p> <p>Addition chimique pour renforcer la structure du sol affaissable (application possible d'une méthode électronique).</p> <p>-Injection d'additifs pour remplir les pores avant la consolidation.</p>
--	---

II. Tableau II.1 : Méthodes de traitement des sols affaissables d’après Bara (1976). [3]

**II.4.2 : Le choix basé sur classes granulométriques et l’état du sol:**

La Figure (II.16) les domaines d’utilisation des différentes méthodes d’amélioration des sols, par référence aux classes granulométriques et à l’état du sol, représenté par sa résistance de cône  $q_c$  au pénétromètre statique.

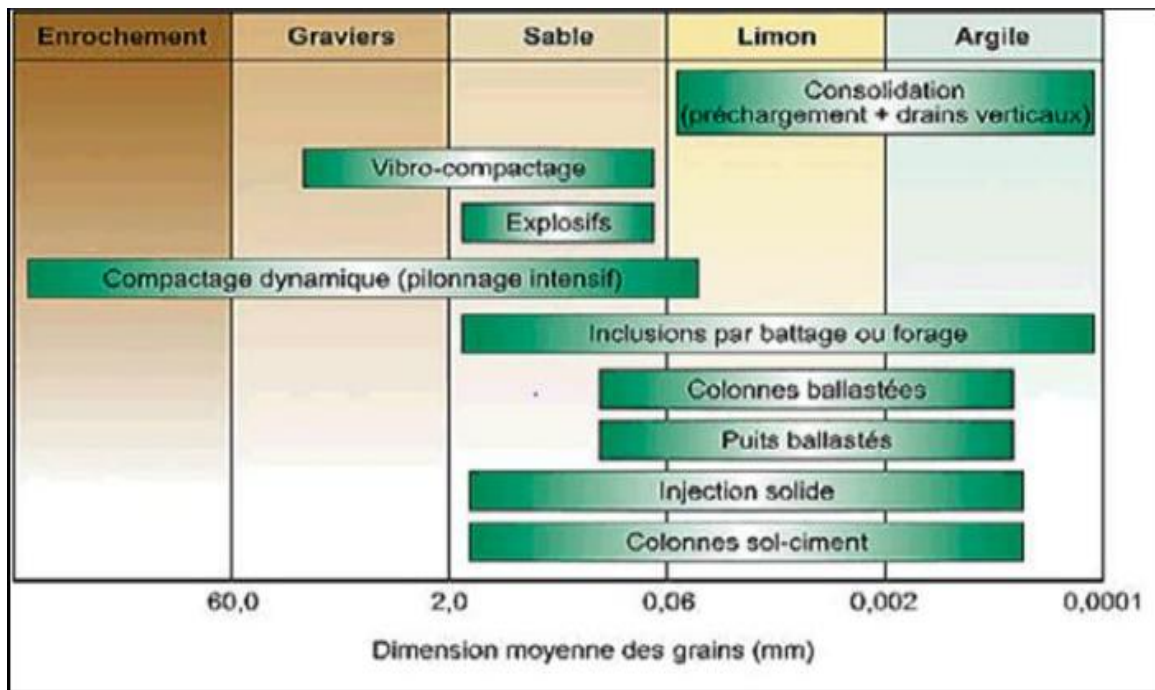



Figure II.16 : de la granulométrie du sol final. [3]



*Chapitre III*

*Comparaison des  
différentes méthodes  
De traitement.*



*Chapitre III :*  
*Comparaison des différentes méthodes de*  
*traitement.*

**III.1 : Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement.[5]**

Le contrôle de l'efficacité d'un pré-chargement ou d'un système de drainage s'effectue principalement par mesure des tassements et des pressions interstitielles à différents niveaux et en différents points du site traité. Les tassements et les surpressions interstitielles peuvent être utilisés pour vérifier que leur évolution calculée n'était pas trop différente de la réalité ; il suffit pour cela de les reporter sur les courbes de tassement et de consolidation calculées lors de l'élaboration du projet.

Le contrôle des colonnes réalisées pour renforcer les sols fins s'opère selon des principes différents. Il porte d'abord, dès la construction, sur les quantités des matériaux mis en œuvre (ballast, chaux, ciment) et la continuité des colonnes.

Pour le vibrocompactage, la régularité et l'homogénéité du compactage sont contrôlées en enregistrant en continu l'énergie électrique consommée par le vibreur ; la mesure des tassements et des volumes de matériaux ajoutés permet d'évaluer la variation de l'indice des vides. Pour le pilonnage, les contrôles comportent des mesures topographiques autour et en fond d'empreinte pour mesurer les déplacements verticaux et évaluer la diminution du volume du sol, et des mesures de pressions interstitielles pour contrôler le délai de repos entre les phases du traitement. Pour le compactage statique en profondeur, l'enregistrement des paramètres de perforation (vitesse de perforation, pression sur l'outil, etc.) et des paramètres d'injection (débit, pression, quantité). Pour les colonnes de sol traité par mélange hydrodynamique, le contrôle s'appuie sur la comparaison du volume de coulis injecté et du volume de mélange de coulis et de sol qui remonte à la surface. Pour la congélation, le contrôle porte essentiellement sur le champ des températures de la zone congelée, ainsi que sur les déplacements de cette zone, car les sols gelés sont sujets à des déformations de fluage qui dépendent de la température.

**III.2 : Technique d'amélioration et stabilisation des sols affaissables. [7]**

Les sols de bonnes caractéristiques physico-mécaniques sont de plus en plus rares, d'où le recours à une opération d'amélioration du sol pour rendre faisable le terrain pour qu'ils puissent recevoir des constructions de grande importance, tout en tenant compte du coût de l'opération d'amélioration et le délai de réalisation.

On peut diviser les techniques d'amélioration de sols en trois catégories :

1- Réduction de l'indice des vides et densification du sol. Ce type d'action nécessite parfois plusieurs opérations (le pilonnage, le vibro compactage, les colonnes ballastées, le pré chargement, les drains verticaux,.....etc.

2- Injection d'un liant et stabilisation chimique (Jet Grouting, lime cement columns etc) afin de former un nouveau matériau plus résistant.

3- Utilisation d'un autre matériau pour combler les défauts du matériau du sol existant (les géo synthétiques par exemple pour reprendre les efforts de traction).

Le sol initial ou à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur essentiel en vue de lui faire subir une technique d'amélioration donnée. En effet, la figure II.4 illustre la différence entre les techniques exécutables dans les sols fins, d'une part, et dans les sols grenus, d'autres parts. Alors que pour les sols intermédiaires les possibilités d'amélioration ne sont diversifiées.

### III.3 : Résumé général des sols effondrables :[11]

Ci-dessus un tableau qui résume le problème de sol effondrable ainsi que ces facteurs influençant, les principaux types et les traitements de ce problème.

Problème	Traitement de problème	Les principaux types	les procédés de densification
<b>Sol effondrables</b>	Traitement par pré-mouillage du sol  Traitement thermique  Traitement chimique	Sols faits par l'homme  Les sols naturellement déposés	Densification par compactage dynamique  Le compactage par explosion  Le compactage par étincelle électrique  La densification par vibrocompactation

Tableau III.1 : résumé général des sols effondrables. [11]

Quand il est nécessaire de réaliser la construction d'ouvrages sur des sols effondrables, on peut soit adapter la structure des ouvrages pour qu'elle supporte des affaissements importants, soit traités préalablement les sols. (Voir tableau III.2).

Profondeur de la couche à traiter	Solutions préconisées
Inférieure à 1.5 m	Humidification et compactage (compacteurs lourds, impacts, rouleau vibrants)
De 1.5 à 10 m	Sur-excavation et recompactage (avec ou sans l'ajout d'additifs) Vibroflottation (pour sols perméables) Pieux à refoulement Injection de limons ou chaux Humidification en l'absence de couche perméable
Supérieure à 10 m	N'importe lequel des précédents ou une combinaison quand cela est possible Humidification avec puits d'infiltration (avec la possibilité d'utiliser des explosifs)

**Tableau III.2 : Solution pour les fondations sur sols affaissables selon Antoine (1994). [11]**

#### **III.4 : Evaluation des méthodes de traitement. [11]**

Des études comparatives sur l'efficacité et l'économie des diverses méthodes de traitement ont été rapportés dans la littérature. Par exemple, Rollins et Roger (1994) ont mené une étude comparative sur un site situé à Néphé Utah (Etas Unis) pour évaluer le coût et l'efficacité des différentes méthodes de traitement à partir de six essais en vraie grandeur sur les semelles carrées de 2,5 m de côté. Les méthodes de traitement ont inclus : (1) un pré mouillage avec de l'eau ; (2) un pré mouillage avec une solution à 2% de silicate de sodium ; (3) une excavation partielle et remplacement par remblai granulaire compacté ; (4) un compactage dynamique sur sol sec et (5) un compactage dynamique sur sol pré mouillé.

L'amélioration des sols a été évaluée à l'aide de l'essai double oedomètre sur échantillons intacts ainsi que des essais de pénétration au cône et essais préssiométriques.

Le profil de sol est généralement composé de limon argileux et sablonneux (CL-ML). La teneur en eau naturelles était de l'ordre de 7% et 10%, la limite de liquidité était d'environ 22% et l'indice de plasticité était aux alentours de 5%. La distribution granulométrique du sol se répartissait de la manière suivante : 30% de sable, 60% de limon et 10% d'argile.

Le tassement prédit par essais oedométriques et le tassement mesuré par diverses méthodes est résumé dans le tableau III.3. Il a été constaté que le silicate de sodium et les méthodes de compactages dynamique sont les méthodes efficaces dans la réduction du tassement des sols affaissables de plus de 250 mm à moins de 35 mm (tableau Y), mais elles sont plus chères que les autres méthodes.

Test	Méthodes de traitement	Effondrement prédit après chargement		Effondrement après le chargement	
		Avant traitement (mm)	Après traitement (mm)	Effondrement (mm)	Fluage (mm)
1	Aucun traitement	267	N/A	282	12
2	Pré mouillage avec l'eau	270	300	243	12
3	Pré mouillage avec silicate de sodium	270	32	27	9
4	Excavation partielle et remplacement avec remblai	267	183	114	9
5	Compactage dynamique à teneur en eau naturelle	254	31a 125b	3	14
6	Compactage dynamique après pré mouillage	396	15	11	18

**Tableau III.3 : Comparaison par prédiction et mesures des effondrements par différentes méthodes de traitements (Rollins et Rogers, 1994). [7]**

Rollin et Rogers (1994) ont également les avantages et les limites des diverses méthodes de traitement (tableau III.4). Des résultats similaires sur le succès de l'utilisation de compactage ont été rapportés par Souza et al. (1995). Leurs essais de chargement de plaque in-situ au Brésil révèlent que le compactage peut réduire l'affaissement d'environ 87% et augmenter la charge admissible de 110%.

Avantages	Limites
Pré mouillage à l'eau	
Prix abordable Facilité d'application	Tassement excessifs sans pré chargement Impossibilité de densifier les couches supérieures Fortes probabilités de tassement différentiel
Pré mouillage avec silicate de sodium	
Réduction spectaculaire d'effondrement Développement d'une cimentation permanente Réduction de la conductivité hydraulique (perméabilité) Réduction significative des tassements dus au fluage Possibilité d'utilisation en reprise en sous œuvre	Coût plus élevé Expérience limitée Profondeur de traitement limitée à moins de 2m
Compactage dynamique à teneur naturelle	
Grande réduction de l'affaissement Réduction de la conductivité hydraulique (perméabilité) Amélioration jusqu'à des profondeurs ( $\geq 5m$ )	Coût plus élevé Dégâts potentiels dus aux vibrations Traitement non uniforme Ne nécessitant pas une grande expérience
Compactage dynamique après pré mouillage	

Diminution significative d'affaissement Efficacité de compactage Réduction au niveau de vibration Plus grande uniformité dans la densification Réduction de la conductivité hydraulique (perméabilité) Amélioration jusqu'à des profondeurs ( $\geq 5m$ )	
--	--

**Tableau III.4 : Comparaison des avantages et les limites des différentes méthodes  
(Rollins et Rogers, 1994). [7]**

Le tableau III.5 résume les avantages de quatre techniques qui visent essentiellement l'accélération de la consolidation mais avec lesquelles d'autres avantages peuvent être atteints. Néanmoins, il est à souligner que l'adoption d'une technique d'amélioration, hormis ses avantages et le critère coût, fait intervenir d'autres considérations : la disponibilité du matériel d'exécution et la qualification des entreprises locales. A ce sujet la comparaison présentée par Bouassida et Hazzar (2008) entre les géodrains et les colonnes ballastées est tout à fait instructive.

Techniques	Augmentation de la portance	Accélération de la consolidation	Réduction du tassement	Autres avantages
Pré chargement	Oui	Oui	Non	Consolidation partielle
Pré chargement et drains verticaux	Oui	Oui	Non	Exécution rapide
Renforcement par colonnes	Oui	Oui	Oui	Elimine la liquéfaction

**Tableau III.5. Comparaison entre les techniques d'accélération de la Consolidation.[12]**

Le tableau III.6 illustre les avantages obtenus, en fonction de la profondeur du sol amélioré en passant d'une technique d'amélioration à une autre.

Avantages	Techniques et principes	Profondeur de traitement
Réduction des vides Réarrangement de grains	Compactages statique et dynamique, pré chargement. Evacuation d'eau due à une consolidation primaire	Inférieure à 8 m
Augmentation de la portance. Elimination du risque de liquéfaction	Vibro compactage (Aiguille vibrante):	Au delà de 8 m (Record actuel 65 m).
Réduction du tassement	NON : Sans matériau d'apport, géodrains verticaux OUI : Avec matériau d'apport: colonnes ballastées	Toute profondeur

**Tableau III.6 : Avantages en fonction de la profondeur par plusieurs Techniques d'amélioration. [12]**

Méthodes	Avantages et inconvénients	Domaine d'application	Mise en œuvre
<b>Substitution</b>	-Procédé efficace mais coûteux (volumes importants de sols à évacuer et de bons matériaux à apporter). -Nécessité de trouver un emprunt et un lieu de dépôt.	Sites où une couche proche de la surface est responsable d'une part importante des tassements et de l'instabilité. Le domaine privilégié d'application de cette technique dans le domaine routier est la	Substitution hors d'eau : Excavation des matériaux compressibles et remplacement par de bons matériaux insensibles à l'eau, compactés par couche au rouleau • Substitution sous l'eau : Excavation à la pelle mécanique ou à la dragline (matériel de

		<p>présence en surface de sols organiques dont les déformations de fluage sont importantes et néfastes au niveau de la chaussée.</p>	<p>dragage terrestre, de raclage de terrain par un godet tiré au moyen d'un câble). Le compactage commence lorsque le remblai sort de l'eau. Le matériau de remblai ne doit pas comporter de fraction fine.</p>
<b>Drains verticaux</b>	<p>Les drains doivent être mis en place par une entreprise spécialisée.</p>	<p>Couches d'argile ou de limons compressibles de 3 à 50 m de profondeur. Pour les sols organiques, le fluage doit être pris en compte spécifiquement dans les études de faisabilité.</p> <p>Les drains verticaux sont souvent associés à des surcharges provisoires. Ils sont en pratique toujours considérés comme indispensables à la consolidation atmosphérique.</p>	<p><b>A. Drains préfabriqués</b></p> <p>Les drains (plats de 10 cm de largeur et de quelques millimètres d'épaisseur ou cylindriques de 5 cm de diamètre, en général) sont foncés à l'intérieur d'un mandrin métallique actionné par un porteur de type pelle hydraulique ou sur chenilles. Les drains comportent une âme qui permet à l'eau de s'écouler vers l'extérieur, avec ou sans filtre géotextile. Ils doivent avoir une capacité de décharge suffisante (15 m<sup>3</sup>/an au minimum).</p> <p>Dans les sols mous, le fonçage est statique. Pour traverser des couches intermédiaires de sable, on recourt au vibrofonçage.</p> <p><b>B. Drains de sable :</b></p> <p>Les drains de sable, de 20 à 50 cm de diamètre en général, peuvent être réalisés à la tarière</p>

<p><b>Colonnes ballastées</b></p>	<p>-Profondeur de traitement limitée à 15 mètres environ.</p> <p>-Technique assez onéreuse (ballast et exécution).</p>	<p>Fondations de bâtiments et de réservoirs.</p> <p>Zones de transition entre points durs (ouvrages fondés sur pieux) et sections courantes de remblai.</p>	<p>creuse, par langage ou par battage d'un tube fermé, que l'on remplit ensuite de sable.</p> <p>Aiguille vibrante ou tube battu pilonné, porté par une pelle sur chenilles. Du ballast 20/40 à fort angle de frottement est incorporé dans le forage et compacté par le vibreur. On procède par passes successives en remontant le vibreur pour former des colonnes dont le diamètre est généralement compris entre 60 et 120 cm.</p>
<p><b>Injection</b></p>	<p>-Technique onéreuse pour les remblais.</p> <p>-Entreprise spécialisée.</p>	<p>Renforcement des sols sous les bâtiments et les ouvrages.</p> <p>Traitement localisé sous les remblais linéaires.</p>	<p>Forage tube de petit diamètre, puis injection sous pression d'un mortier visqueux.</p>

<p><b>Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment.</b></p>	<p>-Technique peu courante. -Entreprise spécialisée.</p>	<p>Fondations de bâtiments. Zones de transition entre points durs et sections courantes de remblai. Soutènements d'excavations.</p>	<p>Machine de forage équipée d'une tarière spécifique.</p>
---	--	---	--

**Tableau III.7 : Avantages et inconvénients par plusieurs techniques de traitement. [11]**

D'après la comparaison entre toutes les méthodes cités au dessus, nous pouvons conclure que les méthodes de traitement les plus efficaces sont ; la méthode de traitement chimique, le traitement de colonnes de sol traité, traitement par injection et traitement de silicatisation, où ils sont caractérisés par leurs : Capacité portante, la vitesse de traitement et le bon produit.

### **III.5 : Exemple de construction sur sol affaissable en Algérie : [2]**

Extension des gazoducs G01/G0248 Hessi R Mel –Oued Essafsaf (station1)

- **structure** : bâtiment, réservoir d'eau potable, atelier d'équipement lourd, fondation pour turbocompresseur.

- **problème posé** : couche 1 limon argileux surmonté par un limon argileux avec des traces de sable.  $W_0=5.6\%$ ,  $S_r= 15.30 \%$ ,  $W_l = 25.90\%$ ,  $I_p =9.9\%$ . Sols affaissables, vu les essais œdométriques .

Limon argileux avec des traces de sable  $\gamma_d=18\text{Kn/m}^3$ . Un degré de saturation plus élevé.

Susceptibilité d'affaissement de la première couche.

-**Solution** : Substitution de la première couche (limon argileux) par un matériau granulaire Compacté par couche de 20 cm, jusqu' à la densité maximale «Proctor modifié».prendre des mesures spéciales pour éviter l'infiltration des eaux dans la seconde couche, qui se trouve tout juste au dessous de la cote d'assise des fondations.





# *Chapitre IV*

## *Conclusion et recommandation.*

**IV-1 Conclusion générale :**

Les sols Affaissables appelés dans la littérature anglo-saxonne « Collapsible soils » sont définis comme des structures non saturées pouvant avoir une importante déformation potentielle après mouillage avec ou sans chargement. Ces sols sont localisés dans de nombreuses régions du monde, particulièrement quand elles sont arides ou semi-arides.

Le géotechnicien s'intéresse aux sols dans la mesure où ceux-ci constituent l'élément principal du contexte dans lequel la stabilité d'un ouvrage sera conçue. Il doit envisager d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols d'assise pour augmenter leur capacité portante.

Un grand nombre de technique de traitement existe actuellement tel que :

Le traitement par compactage, traitement chimique (a la chaux au ciment),traitement par l'injection.....ect.

Le choix des techniques de traitement des sols généralement et dépendent de la profondeur du sol Affaissable de la capacité portante, et aussi basé sur classes granulométriques et l'état du sol.

En générale on peut diviser les techniques d'amélioration de sols en trois catégories :

- 1- Réduction de l'indice des vides et densification du sol. Ce type d'action nécessite parfois plusieurs opérations (le pilonnage, le vibro compactage, les colonnes ballastées, le pré chargement, les drains verticaux,.....etc.
- 2- Injection d'un liant et stabilisation chimique afin de former un nouveau matériau plus résistant.
- 3- Utilisation d'un autre matériau pour combler les défauts du matériau du sol existant.

**IV-2 Recommandation et future travaux :**

Pour compléter cette recherche on recommande les futurs travaux suivants :

Traitement électrique, traitement par la chaleur, traitement par la congélation.

## *Références bibliographiques*

- \* [1] : **BENBELKHEIR MOHAMED** : (Influence de la teneur en eau sur les caractéristiques de Résistance des sols affaissables vis-à-vis du cisaillement).2012/2013
- \*[2] : **YOUSFI ABD EL FATAH** : (comportement mécanique des sols affaissables sous inondation par des eaux saumâtres) mémoire de master génie civil et d'hydraulique université de M'SILA **2011/2012**
- \*[3] : **SALEM ABED EL KADER** : (réduction du potentiel d'affaissement des sols a effondrement brusque par l'ajout des déchets de verre).mémoire de master génie civil université de M'SILA 2013/2014
- \*[ 4] : **ABDERRAHMANE GHERBI** : (Influence du degré de saturation initial sur les caractéristiques de résistance des sols affaissable vis-à-vis du cisaillement ).mémoire de master 2015/2016
- \*[5] : **LOUCIF TAHAR ET NOUIBAT ABDERAHMAN** : (Influence du compactage et de la teneur en argile sur les caractéristiques de résistance des sols affaissables vis-à-vis du cisaillement).mémoire de master 2016/2017
- \*[6] : **H OCINE ZIANI** : (Étude de l'influence du gradient hydraulique sur l'affaissement de la structure des sols à effondrement brusque en utilisant la méthode double consolidation) Mémoire de Magister en Génie Civil Université Hadj- lakhdar –Batna (2011/1012).
- \*[7] : **BAHLOUL OUASSILA** : (étude de l'influence des sels sur le taux et l'amplitude de l'affaissement d'un sol a effondrement brusque par différentes contraintes verticales) Thèse de Doctorat en Sciences, 2015/2016 université hadj lakhdar –batna
- \*[8] : **LAOUAR MOHAMED SALAH** : (prédiction des sols a effondrement brusque par des méthodes expérimentales thèse de doctorat en sciences) université hadj lakhdar –batna
- \*[9] : **Natacha SERTIER** :(exposé de Amélioration des sols) université de la réunion  
Années 2005/2006

\*[10] :(exposé) 2018 /2019

\*[11] : **BENGOURAIN ABDERRAHMANE, TOUNSI MOHAMMED :**

Etude bibliographique sur les sols a problèmes en géotechnique. Université Aboubakr belkaïd– Tlemcen – faculté de technologie 2017/2018

\*[12] : **MOUNIR BOUASSIDA** : Amélioration des sols en place. « Introduction à la géotechnique University of Tunis El Manar January 2011

## Résumé :

Les sols affaissables sont des sols métastables, à structure ouverte lâche, de nature non saturés, se trouvant sous forme de dépôts. A l'état sec, une cimentation naturelle entre les grains leur confère une importante liaison intergranulaire et peuvent supporter des charges très élevées.

Cependant la saturation, même sans chargement supplémentaire, provoque la désintégration des liaisons donnant une structure plus dense suivie d'un effondrement soudain des particules du sol.

Le problème de l'identification puis du traitement des sols affaissables a fait l'objet de nombreux travaux de recherche aboutissant à de multitudes résultats différents et parfois contradictoires.

A cet effet et dans le but de contribuer à trouver une solution au problème d'affaissement, nous avons proposé cette étude qui s'inscrit dans le cadre du traitement des sols affaissables.

**Mots clés :** sol affaissable, traitement.

## الملخص :

التربة القابلة للطي هي تربة غير مستقرة ببنية مسامية مفتوحة مشبعة في مشبع طبيعيا وتوجد في شكل ودائع التدعيم الطبيعي في حالة الجفاف يضيف رابطا مهما بين الحبيبات. ويمكن ان تحمل احمال عالية جدا. اثناء التشبع وحتى من دون احمال, إضافية, يحدث تفكك لهذه الروابط ليعكس هيكل أكثر كثافة يليه انهيار مفاجئ لجسيمات التربة. وكانت مشكلة تحديد ومعالجة التربة القابلة للطي من العديد من الدراسات البحثية الرائدة المختلفة ومتناقضة في بعض الأحيان نتائج الجموع. لهذا الغرض ومن اجل المساهمة في إيجاد حل لمشكلة هبوط اقترحنا هذه الدراسة التي هي جزء من علاج التربة القابلة للطي.

**الكلمات الاستدلالية:** التربة القابلة للطي, طريقة المعالجة.

## Abstract :

The collapsible soils are metastable soils, open porous structure, non-saturated nature, being in the form of deposits. A dry, natural cementation between grains gives them an important link intergranulaire and can withstand very high loads. However, the saturation, even without additional loading, causes disintegration of connections providing a more dense structure followed by a collapse of the soil particles.

The problem of identification and treatment of collapsible soils has been the subject of numerous research studies leading to different and sometimes contradictory results multitudes. For this purpose and in order to contribute to finding a solution to the problem of subsidence, we proposed this study, which is part of the treatment of collapsible soils.

**Key words:** ground affaissable.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

