

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie civil

Spécialité : Infrastructure des bases et géotechniques

Par : BENGOURAIN Abderrahmane
TOUNSI Mohammed

Thème

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES SOLS A PROBLEMES EN GEOTECHNIQUE.

Soutenu publiquement, le 30 / 05 / 2018, devant le jury composé de :

Mme BENADLA. Z
M BEDJAOUI. CH
M MELOUKA. S
Mme BENCHOUK. A

Univ. Tlemcen Présidente
Univ. Tlemcen Examineur 1
Univ. Tlemcen Examineur 2
Univ. Tlemcen Encadrante

Année universitaire : 2017/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Suivant la volonté du Dieu tout puissant, j'ai pu achever ce travail que je dédie :

À mes parents, qui m'ont soutenu pendant toute ma vie et mes études, et surtout dans L'accomplissement de cette recherche, que Dieu les accorde sa grâce infinie et les garde pour nous.

À mes deux sœurs Ikram et Chaimaa et mon frère Abdelaziz, auxquels j'exprime ma gratitude et reconnaissance.

À mes oncles et tantes, cousins et cousines, vous avez tous contribué à ma formation

À mon encadrante Mme BENCHOUK. A qui m'a soutenu et orienté pendant cette recherche, et a contribué à ma formation.

À toute ma famille pour son soutien et affection

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. Mes enseignants de primaire, de Cem et de lycée, mes enseignants de l'université, vous trouvez mes sincères gratitudes.

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

À mon très cher pays l'Algérie.

TOUNSI Mohammed.

Je dédie ce mémoire à :

Mes parent RABEH & HOUARIA, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, que dieu procure bonne santé et longue vie.

À la mémoire de ma grand-mère, la source de mes efforts que dieu vous garde en bonne santé.

À mon très cher oncle KAFNEMER OUASSINI et sa famille, vous avez toujours présents pour les bons conseils, votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours au long de ma vie professionnelle et personnelle.

À celle qui m'a soutenu tout au long de ce projet ma belle femme MAGHNIA que j'adore que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein.

À mon ange...ma très chère fille TESNIM que dieu te bénisse et te garde pour nous.

À mes frères Amine et Issam et tous les membres de ma famille.

À mes amis, mes collègues et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Veillez trouver dans ce modeste travail mes reconnaissances pour tous vos efforts.

Je vous dis merci

ABDERRAHMAN

Remerciements

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de madame **BENCHOUK. A** enseignante en génie civile à l'université de Abou Bakr Belkaid. On la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous sommes conscients de l'honneur que nous a fait madame **BENADLA. Z** En étant présidente du jury et monsieur **BEDJAOUI. CH** Et Monsieur **MELOUKA. S**, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous remercions également à toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin.

Résumé :

La mécanique des sols est une des disciplines du génie civile (stabilité des ouvrages). D'une manière générale on peut dire que toute construction doit s'insérer dans un état initial stable et vu qu'il y a plusieurs phénomènes qui influencent cette stabilité tels que le glissement de terrain, le gonflement, les sols compressibles, l'effondrement, l'érosion de sol, ... l'ingénieur se trouve dans un double souci de sécurité et d'économie, c'est parce qu'il doit prendre en considération les différentes conditions et choisir la bonne solution et la meilleure technique pour résoudre chaque problème, car une mauvaise conception ou une mauvaise réalisation d'un ouvrage peuvent conduire à des désordres et donc à des dommages voire même à des pertes en vie humaines ; la responsabilité de l'ingénieur est alors à prendre en compte .

ملخص:

ميكانيك التربة هي واحدة من تخصصات الهندسة المدنية (استقرار الهياكل). وبمنظرة عامة ، يمكن القول بأنه يجب إدخال جميع الإنشاءات في حالة أولية مستقرة ، وبما أن هناك العديد من الظواهر التي تؤثر على هذا الاستقرار ، مثل الانهيار الأرضي وانتفاخها والتربة الانضغاطية والانهيار. تأكل التربة ، ... المهندس يلقي نفسه في مشكل مزدوج من حيث السلامة والاقتصاد في المشروع ، لأنه يجب أن يأخذ في الاعتبار الظروف المختلفة واختيار الحل الصحيح وأفضل تقنية لحل كل مشكلة لأن التصميم السيئ أو الإنجاز السيئ لمشروع ما يمكن أن يؤدي إلى اضطرابات وبالتالي إلى الأضرار أو حتى الخسائر في حياة الإنسان ؛ ومن ثم تأخذ مسؤولية المهندس في الحسبان.

Abstract

Soil mechanics is one of the disciplines of civil engineering (stability of structures). In a general way one can say that all construction must be inserted in a stable initial state and since there are several phenomena which influence this stability such as the landslide, the swelling, the compressible soils, the collapse, soil erosion, ... the engineer is in a dual concern for safety and economy, it is because he must take into consideration the different conditions and choose the right solution and the best technique to solve each problem because a bad design or a bad realization of a work can lead to disorders and thus to damages or even to losses in human life; the responsibility of the engineer is then to take into account.

Table des matières :

Résumé

Introduction générale	1
------------------------------	----------

Chapitre 1 : Remblais sur sol compressible

1- introduction	3
2- Les caractéristiques des sols compressibles	3
3- les types de sol compressible	3
3.1- Les Tourbes	3
3.2- Les vases et les argiles molles	3
4 - Problématique des remblais sur sols compressible	4
5 -Les techniques de construction	4
5.1 Dispositions constructives relatives au remblai	4
5.1.1-Construction par étapes	5
5.1.2- Banquettes latérales	6
5.1.3- Surcharge temporaire	7
5.1.4- Remblais allégés	7
5.1.5 - Renforcement par géotextiles	8
5.2- Modifications du sol supportant le remblai	9
5.2.1 - Substitution du mauvais sol	9
5.2.2 - Drains verticaux	10
5.2.3 - Consolidation atmosphérique	11
5.2.4 - Colonnes ballastées	12
5.2.5 - plots ballastés pilonnés	13
5.2.6 - Injection solide	14
5.2.7 - Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet	15
5.2.8 - Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment	15
5.2.9 - Remblai sur inclusions rigides	16
5.2.10 - électro-osmose	17
Conclusion	20

Chapitre 2 : sols effondrables

1- Introduction	22
2- les dénominations des sols effondrables	22
3- Les sols compactés dans le versant sec de Proctor	22
4- Facteurs influençant l'effondrement	22
5- Les caractéristiques principales des sols affaissables	23
6- Les principaux types des sols	24

6.1- Les sols construits par l'homme	24
6.2- Les sols naturellement déposés	24
6.2.1- Les sols résiduels	25
6.2.2- Dépôts des sols affaissables sédimentés par l'eau	25
6.2.3- Dépôts des sols affaissables sédimentés par la chute dans l'air	26
7- Les méthodes de traitement des sols affaissables	26
7.1- Traitement par pré-mouillage du sol	26
7.2- Traitement thermique	26
7.3- Traitement chimique	26
7.3.1- La Silicatisation	26
7.3.2- Traitement par pieu de chaux	26
7.4- Traitement par pieu de sable	27
7.5- Renforcement par colonnes ballastées	27
7.6- Traitement par substitution	27
7.7- Traitement par injection	27
8- Les procédés de densification	28
8.1- Densification par compactage dynamique	28
8.2- Le compactage par explosion	28
8.3- Le compactage par étincelle électrique	28
8.4- La densification par vibrocompaction et vibroflottation	28
Conclusion	31

Chapitre 3 : Gonflements des sols 32

1- Introduction	33
2- Nature des sols gonflants	33
3- Mécanisme du gonflement	33
4- les conséquences de gonflement	33
5- Comportement et Pathologie des ouvrages sur sols gonflants	34
6- Protection des ouvrages sur sols gonflants	35
6.1. Empêcher le gonflement et le retrait, en modifiant ou remplaçant le sol	36
6.2. Empêcher le gonflement et le retrait, en maintenant constante la teneur en eau	36
6.3- Limiter les effets du gonflement ou du retrait	36
6.4- Limiter les effets du gonflement ou du retrait en modifiant la rigidité et la résistance de la construction	37
7- Technique de Stabilisation des sols argileux	37
7.1- Intervention au niveau de sol	37
7.2- Diversité des techniques de stabilisation des sols gonflants	37
7.3- Stabilisation mécanique	38
7.3.1- Drainage	38
7.3.2- Compactage	38

7.3.3- Préhumidification	38
7.4- Stabilisation chimique	39
7.4.1- Stabilisation par Liants	39
7.4.2- Stabilisation au Sable	44
Conclusion	45

Chapitre 4 : Glissement de terrain 46

1- Introduction	47
2- Les types des glissements de terrain	47
2.1- glissement plan	47
2.2- glissement rotationnel	48
2.3- glissement quelconque	48
3- les indices, les manifestations et les phénomènes induits par les glissements	48
4- Vitesse moyenne de mouvement du glissement	49
5- Les Causes de ce phénomène	49
6- Comment stabiliser un glissement de terrain	50
6.1- Les terrassements	50
6.1.1- L'allègement en tête de glissement	50
6.1.2- La purge totale	50
6.1.3- La substitution partielle	51
6.1.4- Le chargement en pied	51
6.2- Les dispositifs de drainage	52
6.2.1- Drainage de surface	52
6.2.2- Drains subhorizontaux	53
6.2.3- Tranchées drainantes	53
6.2.4- Drainage profond	54
6.3- L'introduction d'éléments résistants	54
6.3.1- Enrochement	54
6.3.2- Gabions	54
6.3.3- Ouvrage rigide	55
6.3.4- Nappe en géosynthétique	55
6.3.5- Systèmes d'ancrages	56
6.3.6- Nappe de géotextile biodégradable et écran en rondins de bois entrecroisés	56
Conclusion	58

Chapitre 5 : Érosion des sols 59

1- Introduction	60
2- Origines du phénomène d'érosion	60
3- Les types de phénomène d'érosion	61
3.1- L'érosion interne	61

3.1.1- La boullance	61
3.1.2- Dissolution	62
3.1.3- Débouillage	62
3.1.4- L'érosion régressive	63
3.1.5- Entraînement	63
3.1.6- Exsolution	63
3.1.7- Renard	64
3.1.8- La suffusion	64
3.1.9- Auto-filtration	65
3.2- L'érosion externe	65
3.2.1- Érosion pluviale	65
3.2.2- La houle et les courants	66
3.2.3- Marnage	67
3.2.4- Jet d'hélice et courant	67
4- Pathologies des ouvrages de retenue liées a l'érosion	67
4.1. Barrage de sadd el-kafara	67
4.2. Rupture du barrage de teton	68
5- Les facteurs de l'érosion	68
6- Les solutions possibles pour contrer l'érosion	69
Conclusion	73
Conclusion générale	74
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1.1 : Exemple pour la construction du remblai par étapes	5
Figure 1.2 : Ruptures circulaires	6
Figure 1.3 : Poinçonnement	6
Figure 1.4 : Surcharge temporaire	7
Figure 1.5 : Renforcement par géotextiles	8
Figure 1.6 : Substitution du mauvais sol	9
Figure 1.7 : Drains verticaux	10
Figure 1.8 : Consolidation atmosphérique	11
Figure 1.9 : Colonnes ballastées	12
Figure 1.10 : Plots ballastés pilonnés	13
Figure 1.11 : Injection solide	14
Figure 1.12 : Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet	15
Figure 1.13 : Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment	16
Figure 1.14 : Remblai sur inclusions rigides	17
Figure 1.15 : principe de l'électro-osmose	18
Figure 2.1 : les principaux types des sols affaissables	25
Figure 2.2 : La densification par vibrocompaction et vibroflottation	29
Figure 3.1 : Mécanisme d'évolution d'une route sur sol argileux gonflant	35
Figure 3.2 : Mise en place de la chaux par malaxage	41
Figure 3.3 : utilisation de la chaux en coulis	42
Figure 3.4 : Stabilisation au ciment	43
Figure 4.1 : Exemple d'un glissement terrain	47
Figure 4.2 : glissement plan	48
Figure 4.3 : glissement rotationnel	48
Figure 4.4 : quelques exemples des phénomènes induits par les glissements	49
Figure 4.5 : La purge totale	51
Figure 4.6 : La substitution partielle	51
Figure 4.7 : Le chargement en pied	52
Figure 4.8 : drainage des eaux de surface à l'aide d'un caniveau	52
Figure 4.9 : Drains subhorizontaux	53
Figure 4.10 : Tranchées drainantes	53
Figure 4.11 : Enrochement	54
Figure 4.12 : Gabions	55
Figure 4.13 : Ouvrage rigide	55
Figure 4.14 : Nappe en géosynthétiques	56
Figure 4.15 : Systèmes d'ancrages	56
Figure 4.16 : Nappe de géotextile biodégradable et écran en rondins de bois	57

entrecroisés

Figure 5.1 : Exemple de situation d'érosion d'ouvrages hydrauliques	60
Figure 5.2 : Phénomène de boulangerie	61
Figure 5.3 : Phénomène de débouillage au barrage de Lafage	62
Figure 5.4 : Phénomène d'érosion régressive	63
Figure 5.5 : Phénomène d'entraînement	63
Figure 5.6 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage	64
Figure 5.7 : Suffusion	65
Figure 5.8 : les deux mécanismes de l'érosion pluviale.	66
Figure 5.9 : (a) répartition des contraintes sur la pente (b) différents types de vague	66
Figure 5.10 : schéma simplifié des différents types de vague générées par un navire	67
Figure 5.11 : coupe et restes de barrage de Sadd el-Kafara sur le WadiGarawi	67
Figure 5.12 : Rupture de barrage de Teton	68
Figure 5.13 : Mur de soutènement (Gaspésie).	70
Figure 5.14 : Protection de falaise par enrochement.	70
Figure 5.15 : Effet de bout (Pointe-aux-Outardes, Côte-Nord)	71
Figure 5.16 : Abaissement de la plage causé par un mur de soutènement (Maria, Gaspésie)	71
Figure 5.17 : exemple d'épis	72
Figure 5.18 : Végétalisation (Baie des Chaleurs, Gaspésie)	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : résumé générale de remblai sur sol compressible	19
Tableau 2.1 : Solution pour les fondations sur sols affaissables selon Antoine (1994)	30
Tableau 2.2 : résumé général des sols effondrables	31
Tableau 3 : résumé général de sol gonflant	45
Tableau 4 : résumé des problèmes de glissement de terre et leur traitement	58
Tableau 5 : résumé sur le phénomène de l'érosion	73

Introduction générale

Le sol est un matériau meuble, poreux et hétérogène. Il constitue le matériau support pour les ouvrages de génie civil.

L'ingénieur génie civil et en particulier l'ingénieur géotechnicien est souvent confronté à des problématiques majeurs, lors de l'étude des ouvrages construits sur sol support et parmi les problèmes rencontrés dans le monde et en Algérie en particulier les phénomènes de glissement de terrain, le gonflement des sols argileux, les sols effondrables, les érosions et les sols compressibles. L'ensemble de ces risques sont abordés dans ce modeste travail. Ce mémoire consiste en une recherche bibliographique sur ces risques liés au domaine de la géotechnique. Le travail présenté a pour objectif de donner les principales définitions aux jeunes ingénieurs praticiens ainsi que les remèdes et solutions à apporter s'ils sont confrontés à ce type d'aléas.

Pour atteindre cet objectif, on a structuré notre mémoire comme suit :

- Chapitre 1 : un aperçu général sur les sols compressibles, ses caractéristiques, les problèmes des remblais sur ce dernier et les techniques de traitement pour pallier le manque de capacité portante.
- Chapitre 2 : Ce chapitre est consacré à la description détaillée des sols effondrables, les facteurs influents, les principaux types et on termine par les méthodes de traitements de ces sols.
- Chapitre 3 : est l'objet d'une recherche bibliographique sur les sols gonflants, leurs caractéristiques ainsi que les dispositions pratiques pour diminuer de l'ampleur de ce phénomène préjudiciable pour les constructions.
- Chapitre 4 : Présentation du risque glissements de terrain ; dans ce chapitre on a défini le phénomène de glissement de terrain, ses types, ses causes et les différentes méthodes de stabilisation.
- Chapitre 5 : un aperçu général sur l'érosion de sol, particulièrement dans les barrages et les zones côtières ainsi que les techniques pour lutter contre ce phénomène.

Enfin, on termine par une conclusion générale englobant la synthèse de notre recherche bibliographique.

Chapitre I :
Remblai sur sol compressible

1- Introduction :

Dans les projets de génie civil, la réalisation d'ouvrages d'art, de route se fait sur différents types de sol, certains de ces sols sont des sols compressibles.

Les sols compressibles, sont des sols qui tassent lorsqu'on les soumet à une charge. La notion de compressibilité n'est donc significative que si l'on fait référence aux déformations admissibles induites par l'ouvrage projeté, ces déformations amplitude et vitesse dépendent de la nature du sol support et de l'importance des charges appliquées.

2- Les caractéristiques des sols compressibles :

Ces sols se caractérisent par trois aspects comportementaux (<http://lycee-cherieux.fr>) :

- une déformabilité élevée, fonction de la charge appliquée et du temps,
- une faible perméabilité, qui varie avec les déformations du sol,
- une résistance limitée, qui croît en général avec la profondeur.

3- Les types de sol compressible :

Les caractéristiques citées précédemment se retrouvent principalement dans les sols suivants :

- Les tourbes
- Les vases
- Les argiles molles
- Limons argileux ou lâches

Nous allons présenter dans ce qui suit les définitions de ces sols

3.1- Les Tourbes :

Les tourbes résultent de l'accumulation de végétaux décomposés en milieu aqueux, sous l'action de champignons et des bactéries. Elles sont caractérisées par une capacité de rétention d'eau pouvant varier de 100 à 4000 %

Le tassement de la tourbe ne suit généralement pas les lois classiques de la consolidation des argiles :

- La pression de préconsolidation est généralement difficile à déterminer, bien qu'il s'agisse vraisemblablement de sols normalement consolidés ;
- La phase de consolidation est généralement très courte ;
- La compression secondaire est souvent prédominante.

3.2- Les vases et les argiles molles :

Du point de vue géologique, les vases sont des dépôts formés en eau douce ou salée, constituées de grains très fins (inférieurs à 200 μm) avec un pourcentage important de particules inférieures à 2 μm , de nature minéralogique variable, disposés en flocons (structure dite en « nids d'abeilles »). La proportion d'eau retenue est assez forte. La vase contient généralement une certaine proportion de matières organiques (le plus souvent inférieure à 10 %). En se consolidant, la vase perd une partie de son eau, la structure se détruit, et elle se

transforme en une argile ou une marne d'autant moins molle que la consolidation est plus importante. En fait, du point de vue géotechnique, on confond souvent vase et argile molle. Pour le géotechnicien, ces sols se caractérisent par :

- Une teneur en eau qui est généralement voisine de la limite de liquidité, et un faible poids spécifique sec γ_d (souvent inférieur à 10 kN/m^3) ;
- Une teneur en matière organique de 2 à 10 % environ ;
- Une faible cohésion non drainée C_u (de l'ordre de 15 KPa en moyenne) ;
- Une forte compressibilité donnant lieu à des tassements secondaires importants ;
- Une faible perméabilité ;
- Un état normalement consolidé.

4 - Problématique des remblais sur sols compressibles :

Un remblai est un volume de matériaux de terrassement mis en œuvre par compactage et destinés à surélever le profil d'un terrain ou combler une fouille.

La mise en œuvre de remblai sur sols compressibles comporte quatre types de difficultés :

- Leur stabilité n'est pas automatiquement assurée.
- Ils subissent des tassements importants et de longue durée, qui rendent parfois problématique leur maintien à niveau avec les points durs.
- Leur construction perturbe les ouvrages avoisinants (frottement négatif et efforts horizontaux sur les fondations profondes, tassements différentiels des remblais et fondations superficielles, efforts supplémentaires sur les soutènements).
- Perturbation de l'écoulement des eaux.

5 -Les techniques de construction :

Les techniques classiquement utilisées pour la construction des remblais sur sols compressibles pouvant être accompagnées de techniques de traitements des sols, il convient d'étudier les principes constructifs suivant deux aspects (**J.P Magnan, 2000**) :

- Dispositions constructives relatives au remblai ;
- Modifications du sol supportant le remblai.

5.1 Dispositions constructives relatives au remblai :

Les techniques les plus utilisées sont citées comme suit :

- Construction par étapes,
- Banquettes latérales,
- Surcharge temporaire,

- Remblais allégés,
- Renforcement par géotextiles.

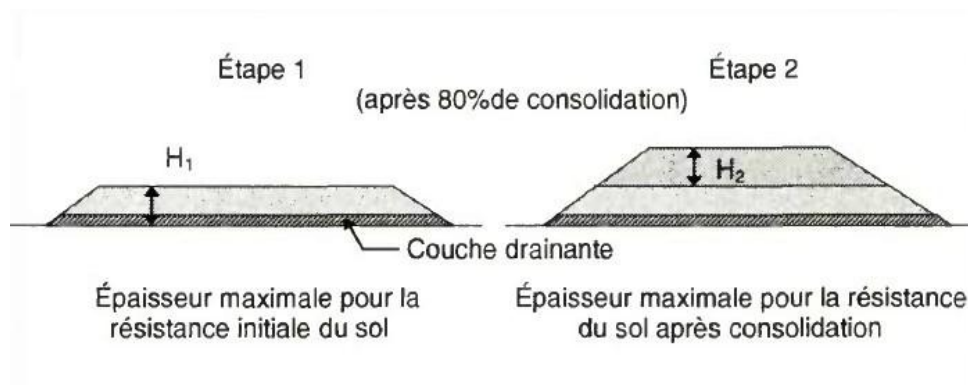
Les détails de ces techniques sont expliqués ci-après :

5.1.1-Construction par étapes :

▪ Description et principe de fonctionnement :

La résistance du sol augmente avec le niveau des contraintes effectives. La construction par étapes permet d'exploiter cette propriété pour des sols qui ne peuvent supporter dans leur état naturel la totalité de la charge prévue : le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente. (Figure 1.1).

Sous chaque charge on atteint la fin (ou souvent 80%) de la consolidation. Cette méthode nécessite des délais importants si le sol compressible est épais et peu perméable.



Elle est souvent associée à des drains verticaux.

Figure (1.1) : Exemple pour la construction du remblai par étapes

▪ Domaines d'applications :

Cette technique est utilisée pour tous types de remblais sur sols argileux mous quand le projet définitif est fixé longtemps avant le début de l'exploitation.

▪ Mise en œuvre :

Le remblai est construit par phases, avec des périodes d'attente pouvant atteindre plusieurs mois.

▪ Contrôle de qualité :

Mesure des tassements du sol support, des pressions interstitielles et, éventuellement, des déformations latérales en pied de remblai.

Interprétation par l'ingénieur géotechnicien, pour calculer les gains de cohésion du sol support et adapter le planning de construction du remblai.

- **Avantages et inconvénients :**

- Technique économique mais demandant du temps et un contrôle précis des vitesses de consolidation.
- Technique adaptée aux sols dont la consolidation est rapide (faible épaisseur).
- Doit être combinée à des drains verticaux si la consolidation du matériau est lente.
- Délais de réalisation importants

5.1.2- Banquettes latérales :

- **Description et principe de fonctionnement :**

Cette technique améliore la stabilité du remblai en l'élargissant par des banquettes de plus faible hauteur. Ces banquettes servent de contrepoids vis à vis de ruptures circulaires (Figure 1.2) et améliorent également la stabilité au poinçonnement (Figure 1.3).

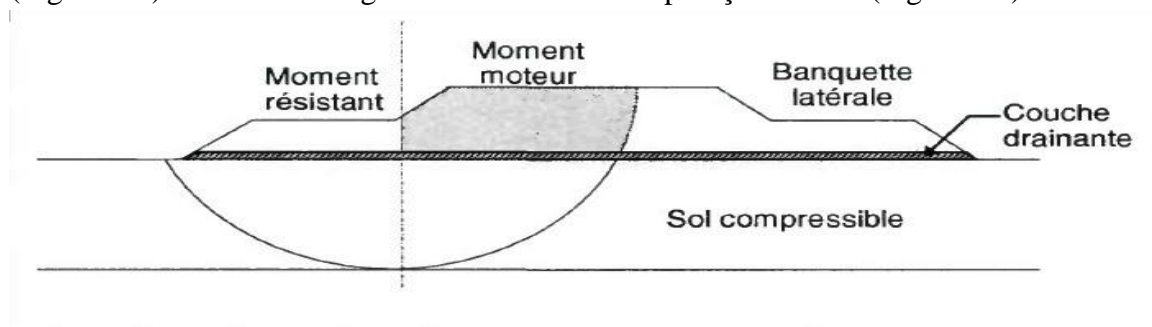


Figure (1.2) : Ruptures circulaires.

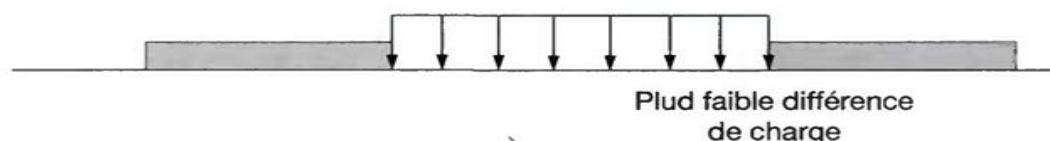


Figure (1.3) : Poinçonnement.

- **Domaine d'application :**

Sections courantes de remblais et remblais d'accès aux ouvrages d'art. Souvent combinées à d'autres techniques (drains verticaux, construction par étapes, surcharge temporaire).

- **Mise en œuvre :**

Simple terrassements complémentaires. Le compactage n'est nécessaire que si les banquettes servent de piste de chantier ou de voie permanente de desserte.

- **Avantages et inconvénients :**

Nécessite des emprises et volumes de remblais supplémentaires. Pas d'effets directs sur les tassements.

5.1.3- Surcharge temporaire :

- **Description et principe de fonctionnement :**

L'application d'une surcharge temporaire permet de diminuer le tassement postérieur à la mise en service du remblai, mais au détriment de sa stabilité pendant la construction.

En augmentant la charge appliquée au sol, on crée un tassement final plus important, dont 60 ou 80% peuvent représenter le tassement total du remblai à construire.

Le temps nécessaire pour atteindre la déformation finale du sol sous le remblai est donc réduit.

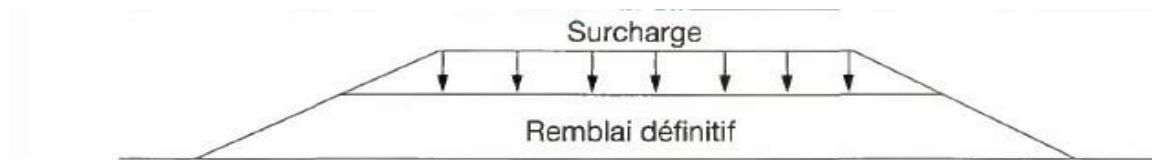


Figure (1.4) : Surcharge temporaire.

- **Domaine d'application :**

Traitement des problèmes de tassement après la mise en service du remblai.

Souvent associé à des drains verticaux.

- **Mise en œuvre :**

Travaux de terrassements classiques. Le compactage de la surcharge n'est en général pas nécessaire.

- **Avantages et inconvénients :**

Coût des matériaux variables.

Durée comprise souvent entre quelques mois et un an.

5.1.4- Remblais allégés :

- **Description et principe de fonctionnement :**

La réduction du poids du remblai permet de diminuer les tassements et d'améliorer la stabilité.

Les matériaux légers utilisables en remblai sont très variés :

- les buses, cadres et dalots,
- le polystyrène expansé et les matériaux alvéolaires.
- les blocs constitués de déchets agglomérés de matières plastiques (Plastbioc),
- les schistes ou l'argile expansée.
- les pneus usagés (Pneusol, Pneurésil, etc.),
- le béton cellulaire léger,
- le bois (écorce, sciure),
- les cendres volantes et le laitier.

Le choix des matériaux est lié à l'allègement désiré, qui dépend de l'analyse géotechnique du site.

- **Domaine d'application :**

Traitement localisé de problèmes de stabilité et/ou de tassements :

- remblai d'accès à un pont déjà construit,
- élargissement d'une route,
- réparation d'un glissement de terrain,
- limitation du poids du remblai sur une buse ou un ouvrage enterré.

▪ **Mise en œuvre :**

Chaque matériau a une procédure de mise en œuvre particulière. Outre la mise en place du matériau léger lui-même, des mesures de préparation du site, de séparation des matériaux, de confinement latéral, de protection contre certaines agressions et de couverture peuvent être nécessaires.

▪ **Avantages et inconvénients :**

Certains procédés sont onéreux.

La mise en œuvre peut être très rapide.

5.1.5 - Renforcement par géotextiles :

▪ **Description et principe de fonctionnement :**

La mise en place d'une ou plusieurs nappes de géotextiles ou de géotextiles à la base du remblai permet d'augmenter sa résistance à la traction et d'améliorer sa stabilité vis-à-vis de ruptures circulaires. On peut donc augmenter la hauteur de remblai mise en œuvre à chaque phase de chargement, sous réserve des conditions de poinçonnement du sol. Le géotextile a pour effet annexe de rendre plus uniformes les tassements du sol sous le remblai (figure 1.5). Le choix du géotextile et les calculs de dimensionnement (résistance, ancrage latéral, stabilité du remblai) doivent être confiés à un spécialiste.

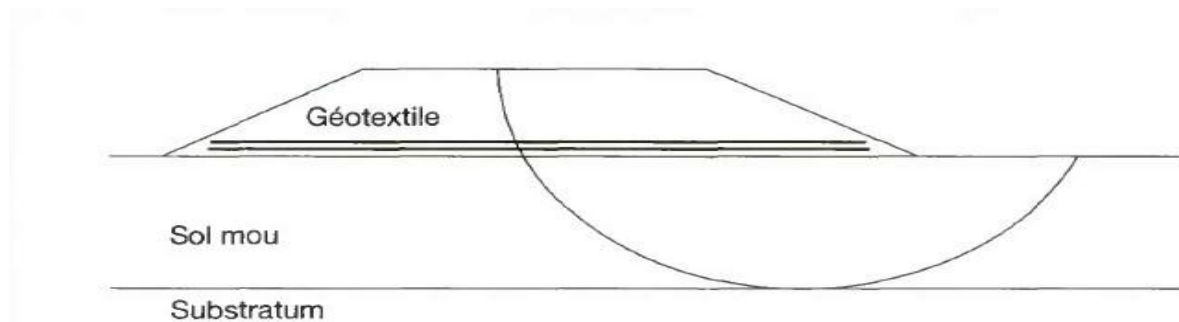


Figure (1.5) : Renforcement par géotextiles

▪ **Domaine d'application :**

Traitement localisé de l'instabilité du remblai.

▪ **Mise en œuvre :**

Les nappes de géotextile sont placées au niveau prescrit au cours de la construction du remblai.

▪ **Avantages et inconvénients :**

- Optimisation délicate du renforcement.
- Amélioration de la résistance à la rupture circulaire, mais pas au poinçonnement.

5.2- Modifications du sol supportant le remblai :

5.2.1 - Substitution du mauvais sol :

▪ **Description et principe de fonctionnement :**

La substitution consiste simplement à excaver le mauvais sol et à le remplacer par de bons matériaux d'apport compactés. Elle est plus difficile à mettre en œuvre sous l'eau (cas fréquent dans les tourbes) et est limitée en pratique à des profondeurs de quelques mètres. D'autre part, elle est contraignante vis-à-vis de l'environnement (nécessité de trouver des emprunts et des lieux de dépôt).

Le remplacement de tout ou partie du sol compressible par un matériau plus résistant et moins déformable élimine tout ou partie des problèmes de tassement et de stabilité. (Figure 1.6)

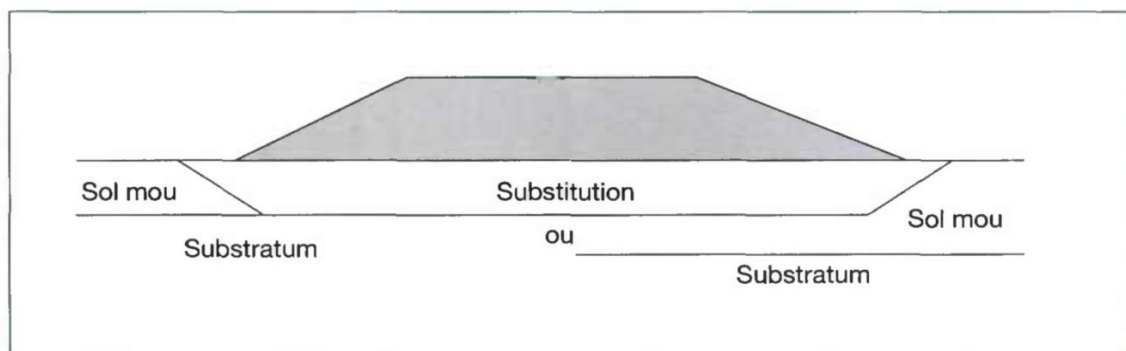


Figure (1.6) : Substitution du mauvais sol. (J.P MAGNAN, 2000)

▪ **Domaine d'application**

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 présence en surface de sols organiques dont les déformations de fluage sont importantes et néfastes au niveau de la chaussée.

▪ **Mise en œuvre :**

• 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 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.

- **Avantages et inconvénients :**

- 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.

5.2.2 - Drains verticaux :

- **Description et principe de fonctionnement :**

Cette technique est utilisée pour accélérer les tassements de consolidation des sols fins saturés de faible perméabilité. La durée de la consolidation des sols est proportionnelle au carré de la distance de drainage. L'introduction de colonnes verticales drainantes dans un massif de forte épaisseur permet de raccourcir fortement cette distance de drainage et de contrôler ainsi les vitesses de consolidation. Les drains verticaux ont été initialement exécutés en sable. Les drains plats préfabriqués sont en général moins onéreux actuellement. L'eau sortant des drains doit être évacuée sous le remblai (couche drainante). Cette technique n'a d'effet que sur la vitesse de tassement. (Figure 1.7)

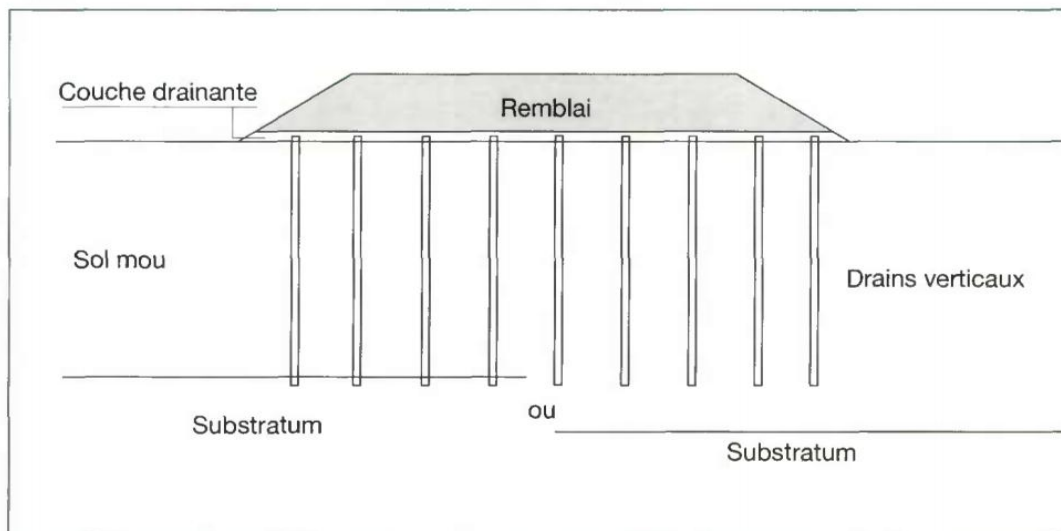


Figure (1.7) : Drains verticaux.

- **Domaine d'application :**

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. Les drains verticaux sont souvent associés à des surcharges provisoires. Ils sont en pratique toujours considérés comme indispensables à la consolidation atmosphérique.

- **Mise en œuvre :**

A. Drains préfabriqués :

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 ($15 \text{ m}^3/\text{an}$ au minimum).

Dans les sols mous, le fonçage est statique. Pour traverser des couches intermédiaires de sable, on recourt au vibrofonçage.

B. Drains de sable :

Les drains de sable, de 20 à 50 cm de diamètre en général, peuvent être réalisés à la tarière creuse, par langage ou par battage d'un tube fermé, que l'on remplit ensuite de sable.

- **Avantages et inconvénients :**

Les drains doivent être mis en place par une entreprise spécialisée.

5.2.3 - Consolidation atmosphérique :

- **Description et principe de fonctionnement :**

Un vide partiel est appliqué par pompage sous une membrane posée à la surface du sol. Les pompes sont connectées à un réseau de drainage horizontal et à un réseau de drains verticaux. La réduction progressive de la pression interstitielle à contrainte totale constante augmente les contraintes effectives dans le sol. Ce chargement est équivalent à 4 mètres de remblai, au maximum. On réduit ainsi les délais de consolidation sans risque d'instabilité du sol sous la charge appliquée. (Figure 1.8).

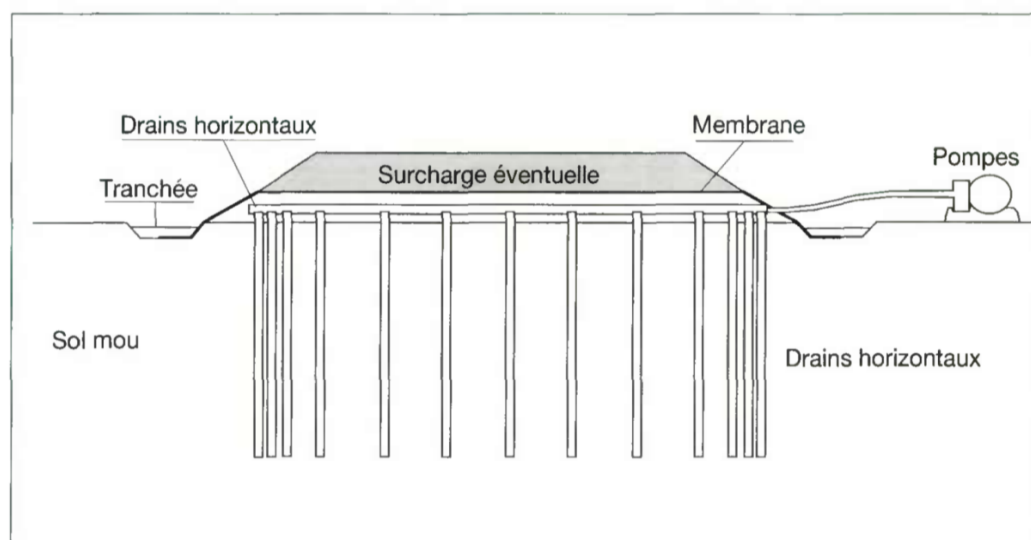


Figure (1.8) : Consolidation atmosphérique

- **Domaine d'application :**

Traitement localisé dans des zones de sols très mous interdisant le chargement par remblai. Peut-être combiné à un chargement classique par remblai.

- **Mise en œuvre :**

La technique nécessite l'exécution d'un réseau de drains verticaux, avec une couche drainante horizontale comportant des drains horizontaux reliés au système de pompage, la pose d'une membrane étanche et la création d'une dépression sous la membrane au moyen de pompes spéciales. La présence en surface d'une couche drainante sous la nappe peut limiter l'emploi du procédé.

- **Avantages et inconvénients :**

- Pas de risque d'instabilité sous le seul chargement atmosphérique.
- Peut être combiné à un chargement par remblai.
- Charge limitée à 80 kPa.
- Adaptable aux propriétés des sols sur le site (densité du maillage de drains verticaux).

5.2.4 - Colonnes ballastées :

- **Description et principe de fonctionnement :**

Un réseau de colonnes de ballast compacté est constitué dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante ou d'un tube battu pilonné. Ces colonnes n'agissent comme points de renforcement du sol mou. Elles améliorent la stabilité et diminuent les tassements en reportant une partie de la charge sur le substratum. Elles servent aussi de drains verticaux. (Figure 1.9).

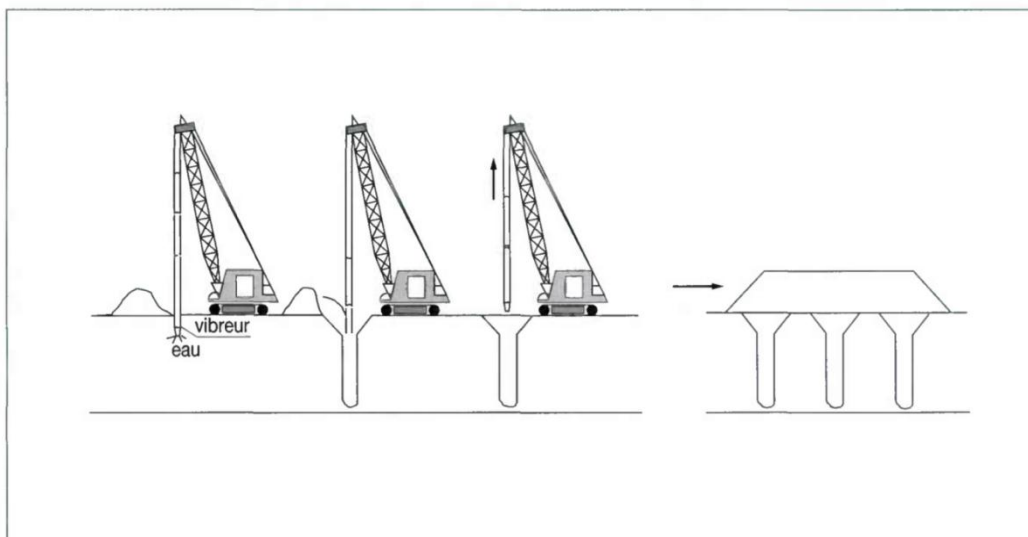


Figure (I.9) : Colonnes ballastées

- **Domaine d'application :**

Fondations de bâtiments et de réservoirs.

Zones de transition entre points durs (ouvrages fondés sur pieux) et sections courantes de remblai.

▪ **Mise en œuvre :**

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.

▪ **Avantages et inconvénients :**

- Profondeur de traitement limitée à 15 mètres environ.
- Technique assez onéreuse (ballast et exécution).

5.2.5 - plots ballastés pilonnés :

▪ **Description et principe de fonctionnement :**

La création de larges inclusions de bon matériau compacté à travers la couche molle permet de limiter les tassements et d'améliorer la stabilité. Les colonnes servent aussi de drains. Ces colonnes sont créées par pilonnage. (Figure 1.10).

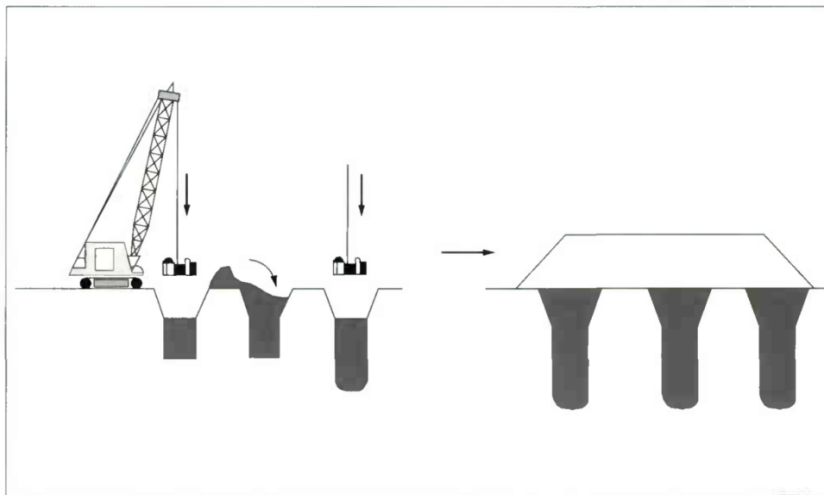


Figure (1.10) : Plots ballastés pilonnés

▪ **Domaine d'application :**

Remblais en environnement dégagé, sur des sols mous de 6 à 7 m de profondeur.

▪ **Mise en œuvre :**

Mise en œuvre par pilonnage au moyen d'un atelier de compactage dynamique : une pelle sur chenilles levant une masse d'une quinzaine de tonnes. Les plots sont constitués de matériau granulaire d'apport et atteignent des profondeurs de 7m pour des sections de 4 à 5 m².

▪ **Avantages et inconvénients :**

- Méthode économique sur des surfaces importantes seulement (coût de mobilisation du matériel).
- Nécessite un environnement peu sensible aux vibrations.
- Profondeur de traitement limitée à 6 ou 7 mètres.
- Emploi possible d'un matériau de récupération : matériaux de démolition triés, découverte de carrière, etc.

5.2.6 - Injection solide :

▪ Description et principe de fonctionnement :

Le procédé consiste à introduire en force dans le sol, par injection sous pression dans un forage tube de petit diamètre, un mortier très visqueux. Par sa consistance, ce mortier ne peut imprégner le sol ni claquer le terrain. Le sol va donc être refoulé et comprimé latéralement. La prise du mortier crée ensuite des colonnes verticales plus rigides. On combine donc un effet de renforcement au droit de chaque colonne avec une compression de la masse du sol. Les taux d'incorporation ne dépassent en général pas 5 à 6% du volume traité (figure 1.11).

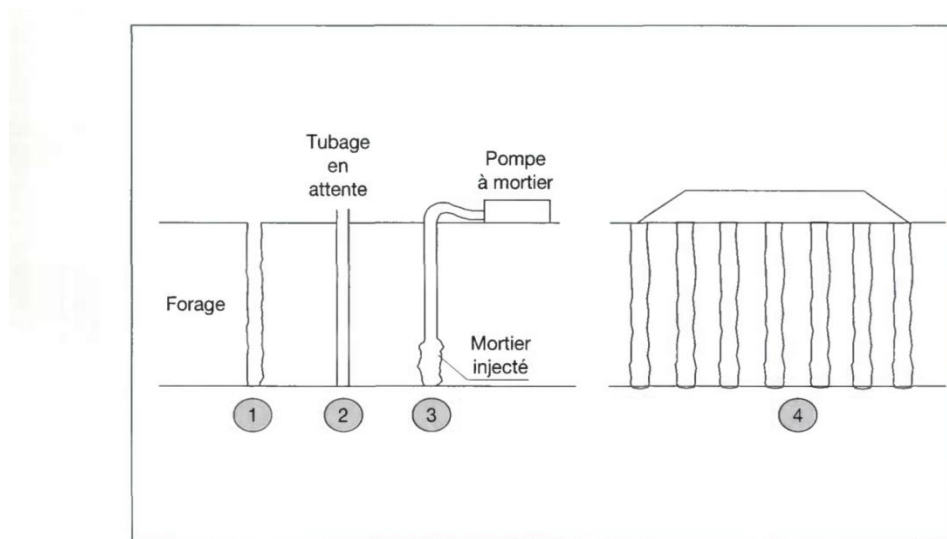


Figure (1.11) : Injection solide.

▪ Domaine d'application :

Renforcement des sols sous les bâtiments et les ouvrages.
 Traitement localisé sous les remblais linéaires.

▪ Mise en œuvre :

Forage tube de petit diamètre, puis injection sous pression d'un mortier visqueux.

▪ Avantages et inconvénients :

Technique onéreuse pour les remblais.
 Entreprise spécialisée.

5.2.7 - Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet «jetgrouting» :

- **Description et principe de fonctionnement :**

Ce procédé utilise un jet de fluide à haute pression pour déstructurer le terrain et le mélanger à un coulis de ciment. La prise du ciment dans le sol injecté crée des colonnes de mortier sol-ciment à fortes caractéristiques mécaniques. Ces colonnes reportent en profondeur une partie des charges dues au remblai, ce qui améliore la stabilité et diminue le tassement final.

(Figure 1.12).

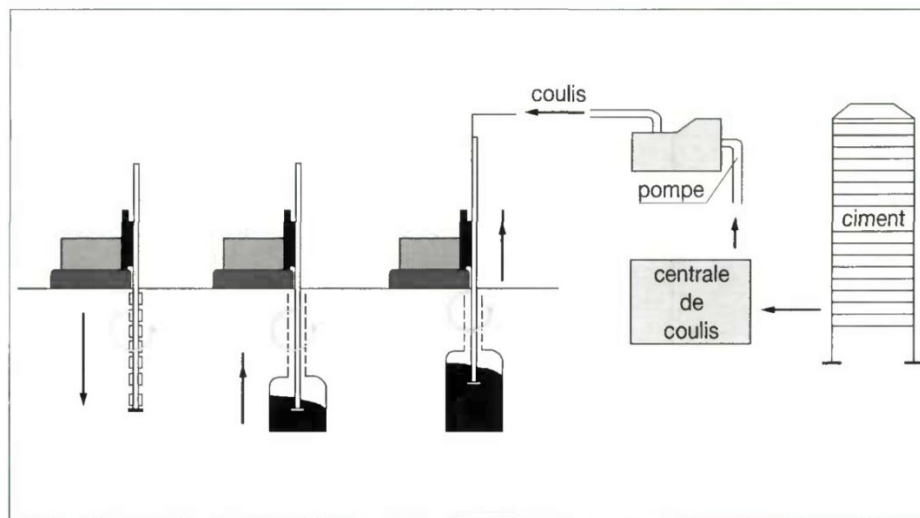


Figure 1.12 : Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet.

- **Domaine d'application :**

Sols compressibles de toutes granulométries.

Toutefois, emploi limité par le coût.

- **Mise en œuvre :**

Une centrale de fabrication du coulis (eau + ciment), une pompe à haute pression (400 bars) reliée à la machine de forage sur chenilles.

Une colonne est réalisée en deux opérations : forage vertical de petit diamètre, puis injection par la base du train de tiges à la remontée.

- **Avantages et inconvénients :**

-Technique onéreuse et de mise en œuvre délicate.

-Entreprise spécialisée.

5.2.8 - Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment :

- **Description et principe de fonctionnement**

Cette technique, applicable aux argiles molles peu consistantes (cohésion de l'ordre de

10 à 20 kPa), consiste à mélanger le sol en place avec de la chaux vive ou du ciment au moyen d'une machine de forage à tarière adaptée. On obtient ainsi des colonnes dont la résistance permet d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements (figure 1.13).

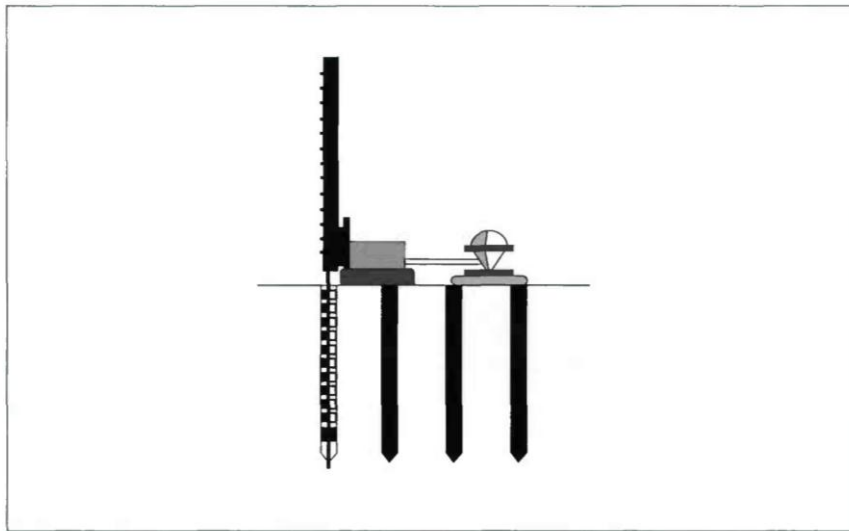


Figure (1.13) : Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment.

▪ **Domaine d'application :**

Fondations de bâtiments.

Zones de transition entre points durs et sections courantes de remblai.

Soutènements d'excavations.

▪ **Mise en œuvre :**

Machine de forage équipée d'une tarière spécifique.

▪ **Avantages et inconvénients :**

Technique peu courante.

Entreprise spécialisée.

5.2.9 - Remblai sur inclusions rigides :

▪ **Description et principe de fonctionnement**

Les charges apportées par le remblai sont transmises au niveau du substratum rigide, par l'intermédiaire de pieux disjoints, surmontés chacun d'une dalle destinée à reporter sur le pieu le poids d'une partie du remblai.

Cette technique permet ainsi d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements (figure 1.14).

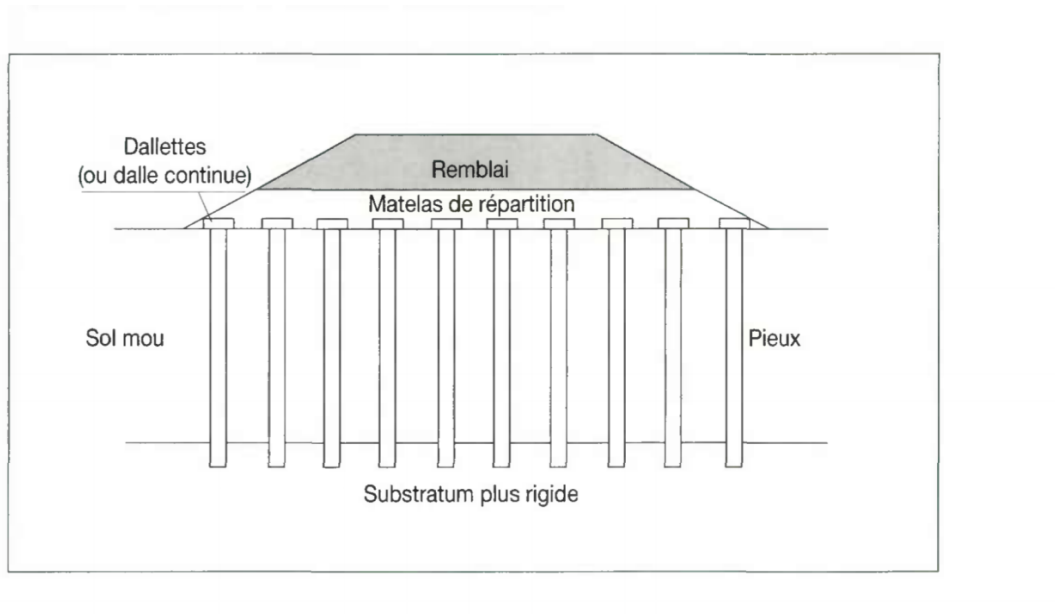


Figure 1.14 : Remblai sur inclusions rigides.

▪ **Domaine d'application :**

Remblais d'accès à des ouvrages fondés sur pieux.

Zones localisées où les tassements doivent être strictement limités à quelques centimètres.

▪ **Mise en œuvre :**

Tous les types classiques de pieux peuvent être envisagés, y compris des micropieux.

Le choix dépend de la nature des sols compressibles à traverser. Les pieux sont usuellement surmontés de dalles disjointes en béton armé, servant à assurer le report des charges du remblai. Une dalle continue est parfois réalisée. Une nappe de géotextile peut être noyée dans le remblai au-dessus des dalles pour constituer un matelas de répartition des charges sur les pieux.

▪ **Avantages et inconvénients :**

-Procédé facile à mettre en œuvre et efficace.

-Calcul complexe mais fiable.

-Technique onéreuse.

5.2.10 - Electro-osmose :

▪ **Description et principe de fonctionnement :**

Un réseau d'anodes et de cathodes (tubes creux) est placé selon un maillage régulier dans le massif de sol à traiter (figure 1.15). Une différence de potentiel est appliquée entre les anodes et les cathodes et provoque un écoulement de l'eau vers les cathodes, où elle est évacuée. Cet écoulement produit une diminution de la teneur en eau moyenne dans le sol et donc un tassement et une augmentation de la résistance au cisaillement.

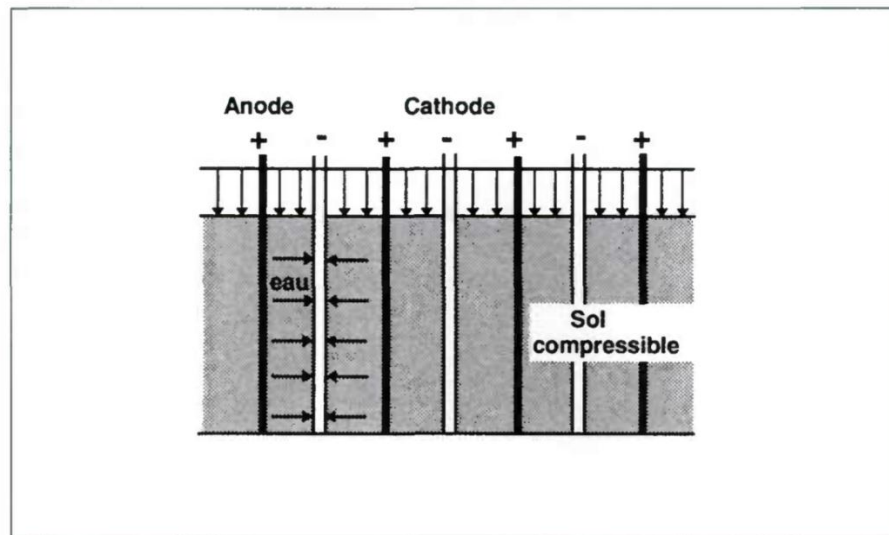


Figure 1.15 : principe de l'électro-osmose.

▪ **Domaine d'application :**

L'électro-osmose et l'électro-injection ont été utilisées sur quelques chantiers pour stabiliser des fondations ou des remblais difficiles d'accès et que l'on ne pouvait traiter par des méthodes classiques. L'expérience montre que l'électro-osmose n'a d'effet significatif que sur des sols de perméabilité suffisamment faible (10^{-6} m/s), dont les particules sont majoritairement limoneuses.

▪ **Mise en œuvre :**

Installation des anodes et des cathodes.

Alimentation électrique continue de forte puissance.

Entretien des cathodes et anodes (dissolution).

▪ **Avantages et inconvénients :**

-La méthode est efficace mais coûteuse.

-Les paramètres et les effets du traitement sont difficiles à prévoir avant le chantier

Ci-dessus un tableau qui résume le problème de remblai sur sol compressible ainsi que les facteurs de difficulté et les différents traitements de ce problème.

Tableau 1 : résumé générale de remblai sur sol compressible

Problème	Facteur de difficulté	Traitement de problème (solution)	
Remblais su sols compressible	<ul style="list-style-type: none"> - stabilité de remblais - déformation de sol - effort par site sur les ouvrages voisins -perturbation de l'écoulement de l'eaux. 	intervention sur sols compressibles	Intervention sur le remblai
		<ul style="list-style-type: none"> - Construction par étape. - Banquette latérales. - Surcharge temporelle. - Remblai allège. - Renforcement par géotextile. 	<ul style="list-style-type: none"> - Substitution du mauvais sol - Drains verticaux - Consolidation atmosphérique - Consolidation atmosphérique - Plots ballastés pilonnés - Injection solide - Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet (technique souvent appelée « jet grouting ») - Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment - Remblai sur inclusions rigides - Électro-osmose

Conclusion :

Les sols compressibles sont des sols qui tassent lorsqu'on les soumet à une charge, parmi les caractéristiques des sols compressibles on trouve une déformabilité élevée et une résistance limitée. Il existe plusieurs types des sols compressibles, les tourbes, les vases et les argiles molles sont les plus reconnus.

Il existe plusieurs problématiques des remblais sur sols compressibles mais des techniques sont utilisées, parmi ces techniques on trouve les constructions par étapes, les banquettes latérales, les surcharges temporaire et le renforcement par géotextiles. Ces techniques ont pour objectif de palier à ce phénomène très préjudiciable pour les constructions.

On va introduire dans le chapitre suivant une autre pathologie qui est l'effondrement qui se définit comme la diminution du volume d'un sol soumis à certaines conditions, suite à son humidification.



Chapitre II :
Sols effondrables

1- Introduction :

Le phénomène d'effondrement (collapse) est la diminution du volume d'un sol, soumis à certaines conditions, suite à son humidification.

Cette diminution de volume conduit à une densification irréversible du sol, initialement lâche ou peu dense.

L'effondrement peut se produire dans les sols :

- Naturels (dépôts éoliens, dépôts alluvionnaires ou sols résiduels).
- Compactés (remblais, barrages en terre, ouvrages souterrains).

2- les dénominations des sols effondrables :

Parmi les nominations des sols effondrables on note (**J.P MAGNAN, 2000**):

- sols effondrables.
- sols affaissables.
- sols collapsibles.
- sols amacropores.
- sols lœssiques.
- sols sensibles au mouillage.
- sols à rupture brusque.
- sols métastables.
- sols autotassants.

3- Les sols compactés dans le versant sec de Proctor :

Il y a aussi des gammes de sols reconstitués artificiellement, comme les remblais faiblement compactés ou compactés dans le versant sec de la courbe de compactage Proctor. Ce type de sol est largement utilisé dans la construction des ouvrages en terre. La réalisation de grands travaux, comme les remblais routiers, requiert des volumes importants de matériaux (en moyenne **100000m³** différentes, présentant des caractéristiques mécaniques et des comportements différents. Les remblais en sols argileux sont fréquemment le siège de déformations verticales et horizontales, se traduisant par des affaissements plus ou moins localisés et par des fissures souvent longitudinales. Ces déformations, dans les régions arides et semi-arides, sont liées essentiellement au changement climatique : séchage pendant la saison sèche et humidification pendant la saison humide.

4- Facteurs influençant l'effondrement :

Plusieurs auteurs ont essayé de définir les principaux facteurs influençant l'effondrement. On citera, ci-après, quelques approches et constatations (**Bendi-Ouis, 2005**):

(**Lawton, 1991**), résume les observations se rapportant au phénomène, comme suit :

A : Quatre conditions sont nécessaires pour que l'effondrement se produise dans les sols [**Barden et al. (1973)**] :

- Une structure ouverte, partiellement instable et partiellement saturée.
- Une forte contrainte totale appliquée.

- Présence d'une succion suffisamment importante ou des agents de cimentation (CaCO_3) qui stabilisent le sol dans des conditions non saturées.
- Une humidification du sol réduira la succion et détruira les agents de liaisons. Ceci provoquera un cisaillement des contacts intergranulaires.

B : Le potentiel d'effondrement décroît soit :

- En augmentant la teneur en eau initiale ou la densité sèche initiale.
- En diminuant la contrainte appliquée (**Holtz, 1948 ; Booth, 1977 et Cox, 1978**).

C : Pour chaque type de sol, il existe un seuil limite où en faisant varier les paramètres densité sèche initiale, teneur en eau et surcharge, on n'obtiendra aucune variation de volume, supplémentaire, lors de l'inondation (**Booth, 1977 et Cox, 1978**).

D : Il existe une teneur en eau critique (degré de saturation) au-delà de laquelle (duquel) il ne peut y avoir d'effondrement. Pour certains types de sol, la teneur en eau critique est au-delà de la teneur en eau optimum Proctor (**Hilf, 1956 ; Barden et al. 1969**).

Selon Rogers (**1995 cité par Montanez, 2002**),

L'effondrement d'un sol est déterminé par plusieurs facteurs externes et internes :

Les facteurs externes se résument à :

- L'état de contrainte appliqué.
- Les conditions environnementales qui déterminent les possibles variations de la teneur en eau.

Les facteurs internes sont :

- La minéralogie.
- La structure du sol.
- Un important indice des vides résultant d'une faible densité sèche et d'une porosité importante.
- Une faible liaison inter particules.

5- Les caractéristiques principales des sols affaissables :

Les sols affaissables trouvés dans la littérature sont des sols métastables partiellement saturés. Rogers (1995) a proposé une large liste des propriétés de ces sols comme suit (**NOUAOURIA, 2005**):

- Ils sont constitués principalement de particules solides variant de taille de sable ou de taille de limon à la taille d'argile.

Les particules de limon sont de formes de lames angulaires ou semi angulaires, (**Rogers et Smalley, 1993**).

- Ils ont une structure ouverte d'indice des vides élevé et de faible masse volumique sèche.

- Ils ont une sensibilité élevée.

- Ils sont des dépôts géologiquement récents

- Ils ont une résistance de liaison interparticulaire relativement faible.

- Ils sont souvent partiellement saturés.

6- Les principaux types des sols affaissables :

(Rogers, 1995) a déclaré qu'un matériau granulaire avec des particules angulaires compactées du côté sec de la teneur en eau optimale peut former une structure capable d'avoir une densification supplémentaire considérable (affaissement). Les sols affaissables classiques sont des matériaux naturels où le type des particules et le mécanisme d'accumulation se combinent pour donner l'affaissement. Selon cette définition, Rogers a divisé ces sols en deux groupes :

- Sols faits par l'homme et compactés du côté sec de la teneur en eau optimale.
- Sols de structure métastable naturellement déposés.

6.1- Les sols construits par l'homme :

Plusieurs cas de dégâts très graves relatifs aux sols affaissables dans les remblais compactés ont été rapportés dans la littérature depuis 1953. Lawton et al (1992) ont indiqué que presque tous les types des sols compactés sont sujets d'affaissement. Il est important de noter que même les sables propres, les argiles pures, et les sols contenant une grande fraction de graviers peuvent s'affaisser, Steadman (1987), Dakshanamurthy (1979), Jaky (1948). Le tassement de l'affaissement s'est produit dans plusieurs types de remblais compactés des routes. Plusieurs ruptures des barrages en terre ont été rapportées dans la littérature.

Littérature. Peterson et Iverson (1953) ont déclaré comment deux barrages en terre construits à l'Ouest de Canada à la fin des années 1930 étaient détruits à cause de l'affaissement. Leonards et Narain (1963) ont trouvé que le facteur principal des fissures des trois barrages en terre situés en Californie était le tassement différentiel à cause de l'affaissement du remblai. Plusieurs cas de déformations, de fissures et de ruptures de remblais de routes en Afrique du Sud dus au tassement de l'affaissement ont été enregistrés, Booth (1977). Dans les quelques années passées, le sud de la Californie a subi une subsidence de terrain qui devrait être la conséquence de l'affaissement des remblais compactés, Lawton (1992).

6.2- Les sols naturellement déposés :

Les dépôts de sols naturels se produisent grâce à une combinaison d'érosion, de transport et de déposition des matériaux qui s'étaient décomposés des roches. Les sédiments d'une structure affaissable se produisent comme résultat de ce processus géologique. Les sols résiduels, l'argile sensible (déposée par l'eau) et le loess (déposé par l'air) sont des exemples les plus importants des sols affaissables naturellement déposés. (Figure 2.1).

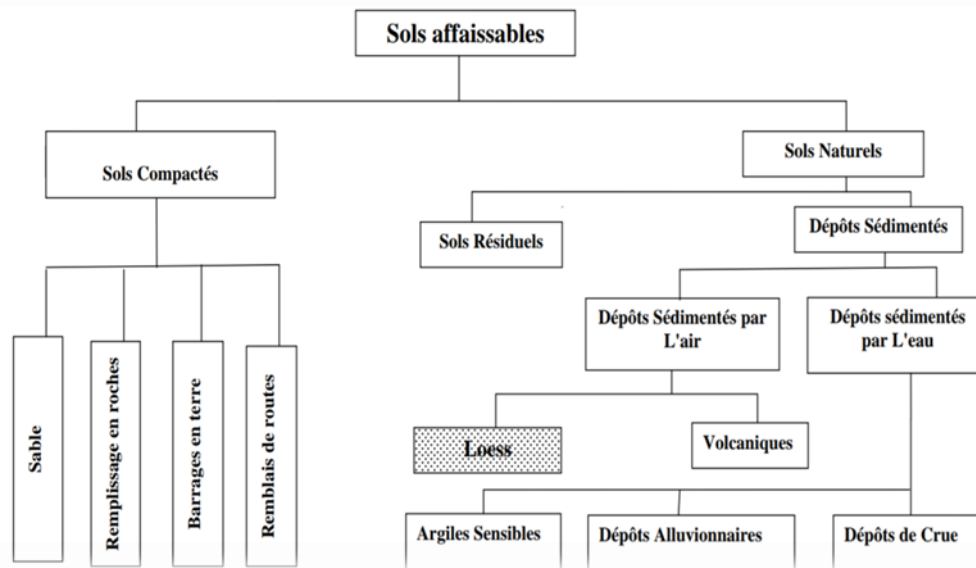


Figure 2.1 : les principaux types des sols affaissables (Rogers, 1995).

6.2.1- Les sols résiduels

Les sols résiduels se forment en place sous l'effet du processus de l'érosion, c-à-d de la décomposition, de la désintégration et de l'altération mécanique des composantes de la roche mère. Les dimensions des particules produites peuvent varier, de larges fragments, de gravier, de sable, de limon et d'argile. Les dépôts des sols résiduels sont caractérisés par une couche d'épaisseur variant de quelques centimètres à plusieurs mètres dépendants au climat et aux conditions de l'environnement de la région. La structure affaissable a été développée comme résultat de lavage et de perte des matériaux solubles dans l'eau, Clemence (1981).

6.2.2- Dépôts des sols affaissables sédimentés par l'eau

Les dépôts de sols affaissables sédimentés par l'eau peuvent être classifiés en deux groupes principaux : les dépôts alluvionnaires et les argiles sensibles. Dans les dépôts alluvionnaires, les particules du sol sont transportées et déposées par l'eau pour former des écoulements de boue. Plusieurs cas des problèmes d'affaissement associés à ces formations ont été rapportés, Holtz et Hilf (1961), Gibbs et Bara (1967), Bull (1964), Clemence et Finbarr (1981).

Les argiles sensibles saturées peuvent être classifiées parmi les sols de structure métastables qui deviennent instables sous certaines conditions, Sultan (1969). Rogers (1995) a discuté les mécanismes de formation et le comportement d'affaissement des dépôts des argiles sensibles. Jefferson et Smalley (1997) ont défini l'argile sensible comme étant des petites particules semi-angulaires, de forme de lames et de dimension (2-5 μ m). Ces particules sont alors déposées par une décantation lente pour former des dépôts d'une structure ouverte. Les argiles sensibles ont la teneur en eau supérieure à leur limite de liquidité. La caractéristique la plus importante de l'argile sensible est le rétrécissement considérable qui se produit grâce à la diminution de la teneur en eau, provoquant des problèmes graves aux fondations, Bentley et Smalley (1984).

6.2.3- Dépôts des sols affaissables sédimentés par la chute dans l'air (dépôts éoliens) :

Le type le plus prédominant des sols affaissables est le groupe éolien (sédimenté par la chute dans l'air). Ce type de sol est évidemment non saturé et se trouve dans les régions arides et semi-arides. Le sable lâche et les dépôts de loess sont les types principaux des sols affaissables éoliens. De larges surfaces de l'Afrique sont couvertes de sables de dunes. Ces dépôts de sable étaient partiellement érodés sur place et contiennent maintenant un petit pourcentage de limon et d'argile. Les dépôts les plus extensifs de sols affaissables non saturés sont ceux du loess qui sont constitués essentiellement de particules de taille de limon et qui sont produites par l'érosion.

7- Les méthodes de traitement des sols affaissables :

7.1- Traitement par pré-mouillage du sol : (NOUAOURIA, 2005).

Ces méthodes sont efficaces pour des sols ayant des épaisseurs d'environ 5m et exigent une disponibilité d'eau en grande quantité. Cette technique de traitement consiste à réaliser un étang artificiel permettant d'accumuler une grande quantité d'eau au-dessus d'un sol effondrable le poids propre du terrain et l'infiltration de l'eau seront les causes principales de l'affaissement.

7.2- Traitement thermique :

Destinée aux ouvrages importants, d'après le guide technique **LCPC / SETRA (2000)**, cette méthode de traitement consiste 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 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.

7.3- Traitement chimique :

Il s'agit de traitements qui utilisent les affinités physiques du sol affaissable et d'un liant, une solution ou un produit chimique. Le traitement des sols en place évite le transport et valorise les matériaux locaux, ce qui permet de stabiliser des sols à des coûts très intéressants. Parmi ces méthodes :

7.3.1- La Silicatisation :

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.

7.3.2- Traitement par pieu de chaux :

L'utilisation de la chaux comme liant est très ancienne, L'emploi de liants est très 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 développe 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, ainsi qu'une diminution des variations volumiques.

7.4- Traitement par pieu de sable :

Le traitement des sols effondrables par pieu de sable est une technique qui s'est développée très rapidement. 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 des 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.

7.5- Renforcement par colonnes ballastées :

Au début l'utilisation des colonnes ballastées comme éléments de renforcement dans certains cas ont abouti à l'échec, cela est dû principalement aux déformations horizontales constatées dans le corps de la colonne. D'après Ayadat et al (1995), ces déformations déstabilisent la colonne en diminuant sa capacité portante. Une étude théorique faite par le même auteur montre que, les colonnes ballastées peuvent être utilisées avec succès, si elles sont enveloppées par des Terrâmes en géotextiles.

7.6- Traitement par substitution :

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 R'mel, (rapport technique 1990). Elle requiert des moyens logistiques et la disponibilité du sol de substitution dans une zone bien proche pour diminuer les coûts.

7.7- Traitement par injection :

Par l'intermédiaire de forages, on introduit dans les vides du sol un produit liquide (coulis) se rigidifiant par la suite. Injection du coulis est amenée en profondeur du sol par l'intermédiaire d'un tube de diamètre compris entre 25 et 50 mm. 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. 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).

8- Les procédés de densification : (NOUAOURIA, 2005).

8.1- Densification par compactage dynamique :

Ce procédé, applicable pour un grand nombre d'ouvrages, permet d'augmenter la capacité portante des sols granulaires.

Le compactage peut être réalisé en deux passes :

1ère passe : Les points de compactage sont répartis en un maillage primaire (4mx4m) où l'énergie fournie est de 60tm/coup à raison de 12 coups par point. À la fin de cette étape on procède à un nivelage de la surface traitée.

2ème passe : Les points de compactage sont répartis en un maillage secondaire plus serré que le précédent (2mx2m), on fournit la même énergie de compactage mais le nombre de points est moindre. On procède au nivelage final de la surface améliorée généralement à l'aide de compacteurs vibrants, de capacité 10 tonnes. On peut prévoir une surépaisseur de 10 à 20 cm de la surface traitée qui peut être recouverte d'une couche en gravier concassé.

8.2- Le compactage par explosion :

La consolidation par explosion consiste à placer à une profondeur donnée une charge telle qu'il n'y ait pas de cratère en surface. Il s'agit d'une solution brutale et simple, ne nécessitant pas de gros investissement pour le compactage rapide de grandes masses de sols non cohérents en lieux suffisamment éloignés de toute agglomération.

8.3- Le compactage par étincelle électrique :

Le principe de la méthode réside dans le fait qu'entre deux électrodes placées dans un sol saturé se produit une décharge de haute tension et qu'apparaît instantanément dans l'eau entourant les électrodes une pression très élevée (effet hydrodynamique) qui agit sur le massif de sol environnant. La charge est répétée de nombreuses fois par suite de ces chocs répétés, la structure naturelle se brise et par conséquent le sol se compacte.

8.4- La densification par vibrocompaction et vibroflottation :

La vibroflottation, (parfois appelée vibrocompaction), s'applique essentiellement aux sols granulaires non cohérents, tels que sables et graviers. Les vibrations engendrent un phénomène temporaire de liquéfaction du sol environnant le vibreur. Dans cet état les grains sont réarrangés dans une configuration plus dense présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Cette technique est couramment mise en œuvre à très grande échelle pour le compactage de terre-pleins en sable gagnés sur la mer par remblaiement hydraulique.

MODE OPERATOIRE :

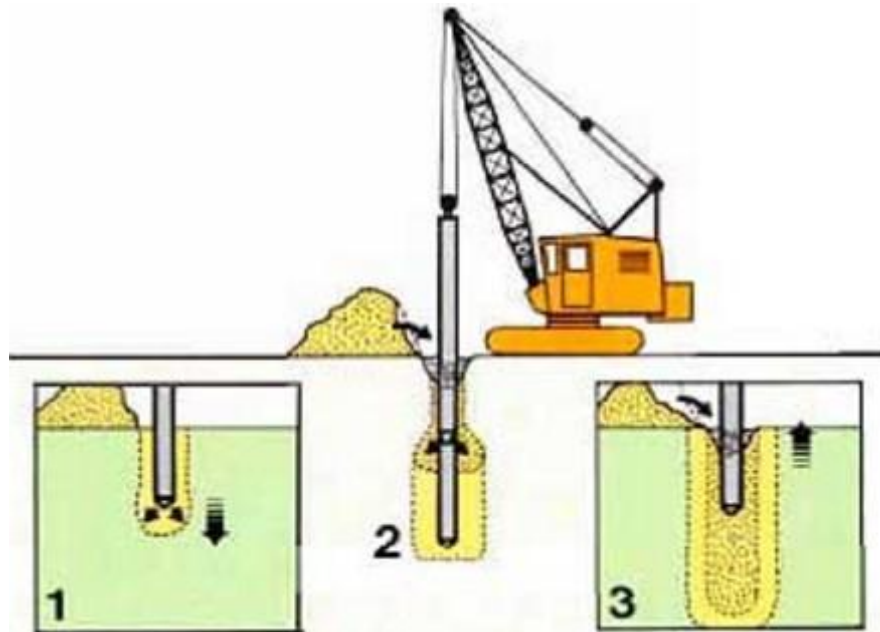


Figure 2.2 : La densification par vibrocompaction et vibroflottation .

Le vibreur, manipulé par une grue, est mis en station au-dessus du point de compactage :

- Phase 1 : Sous l'influence de son propre poids, du lançage et des vibrations, le vibreur atteint rapidement la profondeur désirée. Les jets d'eau à la pointe sont alors coupés.
- Phase 2 : L'eau arrive désormais uniquement par les orifices du haut du vibreur. Le cône obtenu facilite la mise en place de matériau d'apport -sable ou gravier - dans la cavité créée. Le flux d'eau le long du vibreur aide au transport du sable jusqu'à la zone de compactage à la base du vibreur.
- Phase 3 : Le vibreur est retiré par étapes et produit de cette manière un cylindre de terrain densifié de 2 à 4 mètres de diamètre.

Densification par Vibro-refoulement :

Il s'agit de construire des colonnes de pierre dans une cavité. Formée sans éjection de sol vers la surface et par le simple déplacement latéral des sols sous l'effet combiné du poids et de l'action du vibreur assisté au besoin d'injection d'air comprimé. De plus, si on utilise une sonde classique, elle doit être entièrement extraite du trou avant d'y déverser la pierre, de sorte que le sol soit suffisamment cohésif pour que la cavité demeure ouverte. Cette dernière contrainte est éliminée par l'utilisation de nouvelles sondes permettant l'injection de la pierre par le fond. Ce procédé ne produit des colonnes profondes que dans les sols mous, donc très efficace dans le cas des sols affaissables. 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 2.1)

Tableau 2.1 : Solution pour les fondations sur sols affaissables selon Antoine (1994).

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)

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.

Tableau 2.2 : résumé général des sols effondrables

Problème	FACTEURS INFLUENÇANT	Traitement de problème	Les principaux types	LES PROCEDES DE DENSIFICATION
Sol effondrables	Les facteurs externes	Traitement par pré-mouillage du sol	Sols faits par l'homme	Densification par compactage dynamique Le compactage par explosion
	Les facteurs internes	Traitement thermique Traitement chimique	Les sols naturellement déposés	Le compactage par étincelle électrique La densification par vibrocompaction et vibroflottation

Conclusion :

Parmi les problèmes rencontrés lors d'existence d'un sol soit naturel ou compressé est l'effondrement qui est la diminution du volume d'un sol. Dans ce chapitre on a donné à l'ingénieur praticien l'ensemble des informations nécessaires pour reconnaître un sol effondrable ainsi que les différentes solutions et technique d'amélioration de ces types de sols par différentes méthodes y compris le traitement thermique et le traitement par pré-mouillage.

Dans le prochain chapitre nous allons définir le phénomène de gonflement des sols qui est l'augmentation du volume de sol lorsqu'il absorbe de l'eau, ce chapitre traite tous les problèmes des sols gonflants dans le domaine de génie civil.

Chapitre III :
Gonflements des sols

1- Introduction :

Les sols gonflants posent des problèmes aux constructions sur tous les continents. Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence de particules argileuses.

Les sols gonflants sont étudiés depuis de nombreuses années, à trois échelles : celle des particules et assemblages ioniques, celle des éprouvettes de laboratoire et celle des massifs de sols et des ouvrages. Chaque échelle éclaire les autres, sans que l'on puisse dire que les travaux et connaissances accumulées à une échelle sont utiles aux autres.

Le gonflement est le terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible et un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) quand sa teneur en eau diminue. Dans les pays de climat sec, l'accent est mis sur le gonflement, mais dans les pays dont le climat est humide c'est sur le retrait que l'on insiste. Ce chapitre traite tous les problèmes des sols gonflants de point de vue génie civil.

2- Nature des sols gonflants :

Les particules argileuses sont un mélange de particules élémentaires de nature, dimensions, forme et propriétés de surface différentes.

Le mot « particules élémentaires » désigne les produits de l'altération physique ou chimique de roches en minéraux isolés ou fragments de minéraux, monocristaux ou des combinaisons amorphes. Les particules élémentaires peuvent être subdivisées en minéraux différents : kaolinite, illite, montmorillonite, beidellite, micas, biotite, muscovite, chlorite, etc.

Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement, de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé.

3- Mécanisme du gonflement :

Le gonflement représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories, les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques (**Seed et al 1961 ; Mitchell, 1973**).

4- Les conséquences de gonflement :

Les sols expansifs causent des dégâts aux structures civiles et aux chaussées. Les dégradations causées par le gonflement du sol sont plus spectaculaires que celles de tout autre risque naturel tel que le tremblement de terre et l'inondation (**Jones et Holtz, 1973**).

Les désordres causés par le gonflement du sol sont amplifiés lorsque l'expansion est différentielle. L'analyse pathologique des désordres occasionnés par le gonflement du sol atteste que ces derniers sont dus à la température, à l'humidité, à l'évaporation, au degré de saturation, à la distribution irrégulière de l'eau dans le sol et à l'hétérogénéité structurelle du sol (**Nelson et al, 1992**).

Les mouvements différentiels du terrain d'assise d'une construction se traduisent par l'apparition de désordres qui affectent l'ensemble du bâti et qui sont en générale les suivants :

Gros-œuvres :

- Fissuration des structures enterrés ou aériennes ;
- Déversement de structures fondées de manière hétérogène ;
- Dés encastrement des éléments de charpente ou de chainage ;
- Dislocation des cloisons.

Second-œuvres :

- Distorsion des ouvertures ;
- Décollement des éléments composites (carrelage, plâtre, ...)
- Rupture de tuyauteries et canalisation

Aménagement extérieur :

- Fissuration des terrasses ;
- Décollement des bâtiments annexes, terrasses, perrons

5- Comportement et Pathologie des ouvrages sur sols gonflants :

Pour comprendre les interactions possibles des sols gonflants avec les ouvrages de génie civil, on peut d'écrire quelques situations : (BENMESSAOUD, 2017)

■ **Un pieu dans une couche de sol gonflant :** Un pieu flottant installé dans une couche d'argile atteint son équilibre lorsque la charge appliquée en tête et le poids propre du pieu sont équilibrés par le frottement latéral et la résistance de pointe. Lorsque le terrain est humidifié à partir de la surface, après l'installation du pieu et de la construction qu'il porte, l'argile gonfle jusqu'à une profondeur croissante. Le mouvement relatif de l'argile par rapport au pieu est dirigé vers le haut dans cette couche. Le frottement mobilisé ne peut être plus important que le frottement de calcul, dont on admet qu'il est déjà maximal. Mais l'humidification du sol est associée à une variation de sa consistance, une diminution de sa résistance et éventuellement l'apparition de pressions interstitielles. Tous ces facteurs font diminuer le frottement latéral. Si l'humidification dépasse la pointe du pieu, la résistance de pointe diminue aussi de façon importante et le pieu n'a plus la portance suffisante.

La pathologie prend dans ce cas la forme d'un défaut de portance du pieu

■ **Une maison sur sol gonflant (fondations superficielles) :** Les maisons courantes reposent le plus souvent sur des fondations superficielles, qui transmettent au sol les charges des murs porteurs. Si le sol est une argile gonflante sous l'ensemble de la construction, l'arrivée d'eau provoquant le gonflement ne peut être simultanée sous toutes les fondations. Il se produira donc un soulèvement différentiel des fondations, capable de fissurer les murs et de disloquer la structure de la maison. Les fondations externes et internes seront soumises à des sollicitations différentes selon que l'eau provient de fuites à l'intérieur de la maison ou de de précipitations qui font gonfler le sol à partir de la surface extérieure du terrain.

■ **Une route sur sol gonflant :**

La figure (3.1) représente les stades successifs d'évolution d'une route construite sur des sols argileux soumis à des phénomènes de retrait et gonflement (a). La sécheresse produit un retrait du sol à partir des accotements, vers le centre de la chaussée. La surface du terrain se fissure et le retrait du sol sous la chaussée peut aussi créer des fissures dans le revêtement (b).

À la saison des pluies suivante, le sol se réhumidifie et regonfle, mais il devient plus mou et le trafic peut déformer et fissurer encore plus la chaussée (c). La sécheresse suivante réactive tassement et fissures, ce qui dégrade progressivement la route (d). Ce processus se produit dans les régions argileuses de beaucoup de pays, notamment dans les zones semi arides tel que l'Algérie.

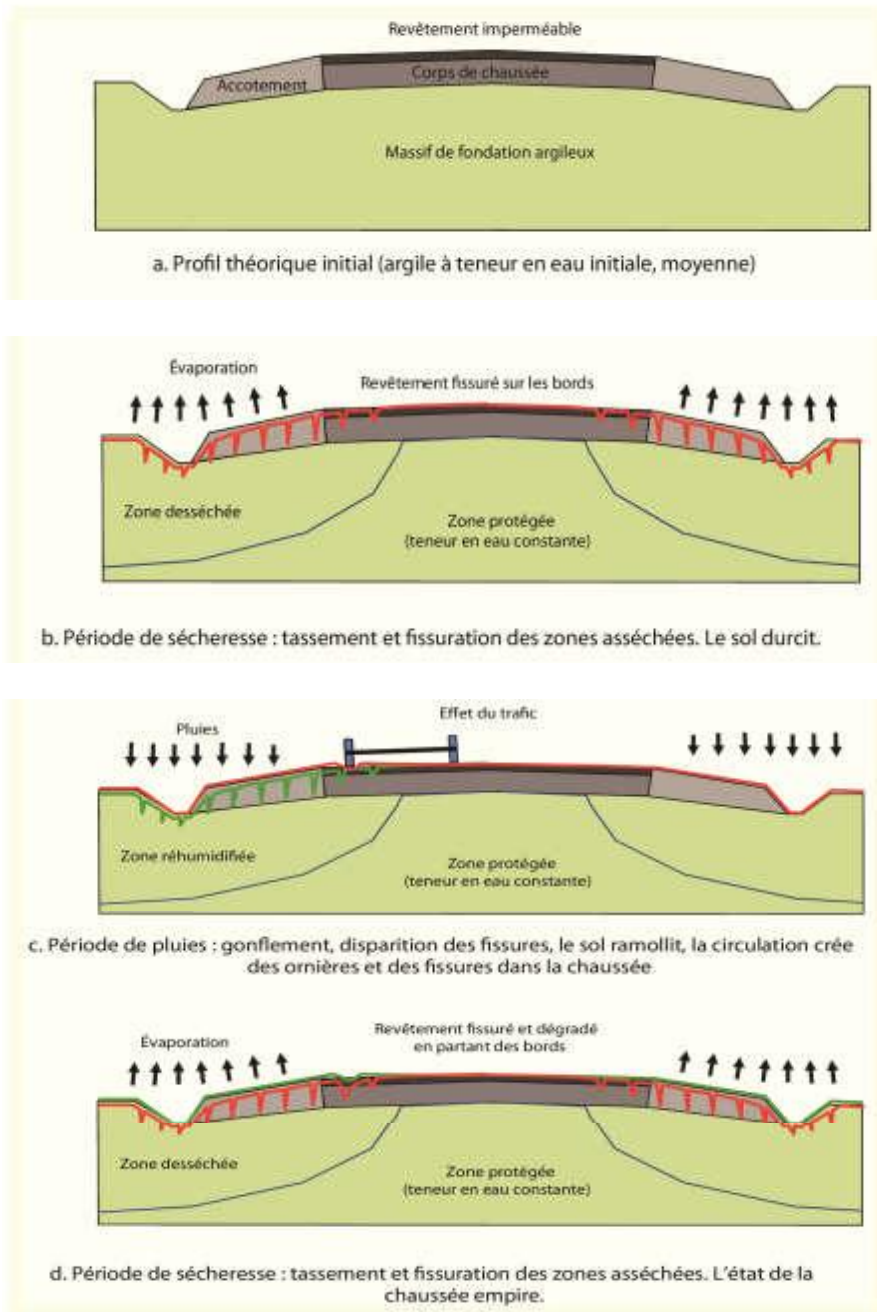


Figure 3.1 : Mécanisme d'évolution d'une route sur sol argileux gonflant.

6- Protection des ouvrages sur sols gonflants :

La protection des constructions contre les effets du gonflement et retrait des sols s'appuie sur deux stratégies :

– empêcher les variations de volume du sol ;

- limiter ou supprimer les effets du gonflement ou du retrait. Pour empêcher le gonflement ou retrait du sol, on peut :
 - modifier le sol ou le remplacer ;
 - maintenir constante la teneur en eau du sol existant. Pour limiter les effets du gonflement ou du retrait du sol, on peut :
 - adapter la géométrie de l’ouvrage pour que le sol puisse se déformer librement,
 - modifier la rigidité et la résistance de la construction.

6.1. Empêcher le gonflement et le retrait, en modifiant ou remplaçant le sol :

Les solutions pour lesquelles existe une expérience satisfaisante s’appuient sur :

- le traitement des sols argileux à la chaux,
- leur traitement au ciment,
- leur traitement avec d’autres liants hydrauliques,
- le remplacement des sols argileux par des sols moins sensibles à l’eau,
- le mélange du sol argileux avec des sables ou graviers.

Ces techniques nécessitent une étude préalable pour définir les dosages en liant ou en sols granulaires, mais aussi de définir jusqu’à quelle profondeur il faut traiter le terrain pour éloigner la zone des gonflements de la structure à protéger.

D’autres techniques ont été proposées (hydrophobants, liants organiques), mais elles ne font pas partie des techniques utilisées à grande échelle.

6.2. Empêcher le gonflement et le retrait, en maintenant constante la teneur en eau

Les solutions doivent être adaptées au cas étudié :

- géométrie de l’ouvrage,
- topographie,
- écoulements d’eau naturels dans le sol ou en surface,
- origine des écoulements accidentels,
- présence d’arbres, arbustes ou autres plantes,
- possibilité d’intervenir autour de l’ouvrage à protéger,
- importance de l’ouvrage (coût et importance stratégique).

Pour empêcher les variations de teneur en eau, on peut

- utiliser des géomembranes,
- concevoir des systèmes de drainage et évacuation des eaux adaptés,
- éloigner la végétation,
- recouvrir la surface du sol sur une certaine distance,
- créer des tranchées imperméables...

Si l’on veut maintenir le sol dans un état humide, on peut aussi le recouvrir de matériau grossier, permettant d’accumuler l’eau de pluie et de limiter son évaporation.

6.3- Limiter les effets du gonflement ou du retrait : en adaptant la géométrie de l’ouvrage pour que le sol se déforme librement :

Cette solution, (**Mouroux et al, 1988**), suppose qu’on crée des volumes vides sous les constructions entre les fondations, pour que le gonflement du sol ne soulève pas les planchers. Elle implique aussi de placer les fondations à un niveau assez bas pour que le gonflement du sol sous la fondation soit acceptable :

- fondations superficielles à une profondeur compatible avec la pénétration de l’assèchement ou de l’humidification dans le sol, souvent plus d’un mètre de profondeur. Dans le cas de

terrains en pente, ces fondations doivent être encastées à la même profondeur par rapport à la surface du terrain ;

– fondations profondes flottantes dans la couche d'argile gonflante ou appuyées sur une couche stable sous-jacente.

6.4- Limiter les effets du gonflement ou du retrait en modifiant la rigidité et la résistance de la construction :

La stratégie générale est de fabriquer des blocs rigides qui puissent bouger les uns par rapport aux autres, avec des liens qui s'adaptent aux mouvements différentiels.

Pour les maisons, la rigidité est apportée par des chaînages dans les constructions en maçonnerie.

Pour les constructions à structure porteuse de poteaux, poutres et dalles, avec remplissage en briques ou parpaings, la résistance et les déformations doivent être maîtrisées par la structure, c'est-à-dire aussi par les armatures du béton armé qui jouent un rôle similaire à celui des chaînages.

7- Technique de Stabilisation des sols gonflants :

7.1- Intervention au niveau de sol

L'intervention au niveau du sol dans le but de rendre ce dernier moins gonflant et stable il se fait par deux (02) méthodes et dépendent surtout de l'intensité du gonflement :

A) Décapage de la couche de sol expansif, si de faible épaisseur.

B) Traitement des sols est souvent opéré pour :

- Augmenter leur résistance,
- Réduire ou augmenter leur perméabilité
- Diminuer leur compressibilité.
- Minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- La stabilisation mécanique.
- La stabilisation thermique.
- La stabilisation chimique (par additifs).

7.2- Diversité des techniques de stabilisation des sols gonflants

Les techniques de stabilisation des sols expansifs sont issues de procédés mécaniques, physiques, chimiques ou thermiques. Ces procédés sont plus ou moins pratiques, efficaces et durables.

Une technique adéquate à tous les sols expansifs n'étant pas possible, il importe de faire un choix judicieux de la technique s'adoptant le mieux au cas échéant. Celle-ci devra dépendre et être relativement sensible :

- Des caractéristiques géotechniques du sol ; en particulier le potentiel de gonflement de celui-ci.
- Des conditions climatiques du site (précipitations, vent, humidité, évaporation, ...). Les conditions climatiques sont reconnues affectant sensiblement l'expansivité du sol.
- Des matériaux de substitution ou de traitement du sol.
- À l'importance du projet, à sa conception architecturale, et à son mode de fonctionnement. Les petites constructions peuvent admettre un niveau de qualité inférieur. Le cas des structures stratégiques ou industrielles est bien plus exigeant.
- À la durabilité et coût de la solution envisagée.

7.3- Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique d'un sol gonflant a pour but de procéder à des modifications des caractéristiques physiques du sol de façon à réduire le comportement expansif de celui-ci. Parmi les techniques de traitements mécaniques existe la technique de drainage, préhumidification, la substitution et le préchargement :

7.3.1- Drainage :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux, tapis de la cote de la nappe.

7.3.2- Compactage :

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné (**Cabane - 2004**).

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées de la côte sèche de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées de la côte humide. Malheureusement, du côté humide, Les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

7.3.3- Préhumidification :

La technique de préhumidification du sol est une ancienne technique de stabilisation basée sur le principe disant que l'augmentation de la teneur en eau provoque un gonflement (**Mouroux et al, 1988**). Ce dernier est comptabilisé comme étant diminué du soulèvement global disponible. De ce fait, si théoriquement, une haute teneur en eau est maintenue dans le sol, il n'y aura plus de soulèvement de la structure. La mise en œuvre de cette technique est plutôt recommandée en fin de la saison pluviale. La teneur en eau est ensuite maintenue par

arrosage artificiel. La réalisation de la construction ne commence qu'une fois le gonflement du sol est stabilisé (**Zenkri, 2009**).

Cette technique est destinée pour les structures légères généralement fondées sur radier général. Elle est utilisée pour la stabilisation du sol sur une profondeur d'environ 1.2m.

7.4- Stabilisation chimique

La stabilisation chimique permet de rendre le sol insensible à l'eau d'une façon irréversible et de lui conférer des propriétés mécaniques convenables. Cette opération renchérit le coût de l'utilisation du sol.

Le principe d'utilisation de la stabilisation chimique d'un sol expansif consiste à « geler » l'expansion du sol. À l'échelle microscopique, c'est un renforcement des liaisons chimiques pouvant exister. Les techniques courantes de stabilisation d'un sol gonflant sont celles utilisant la chaux ou un ciment.

La stabilisation chimique d'un sol quelconque exige la connaissance de la minéralogie et texture de celui-ci afin de pouvoir choisir les produits convenables aux objectifs du traitement. Parmi les techniques de stabilisation les plus réputées peuvent être citées celles dites par liant et par sels. (**Zenkri, 2009**)

7.4.1- Stabilisation par Liants

La stabilisation par liant est une technique au principe d'agglomération des particules solides du sol. C'est, vraisemblablement, un collage des particules de sol les unes aux autres. Les liants reposant sur ce principe sont répertoriés en deux groupes :

- Les liants hydrauliques comprennent la chaux, le ciment, la cendre volante et la pouzzolane.
- Les liants organiques comportent le goudron, le bitume, les résines naturelles et les polymères.

A- Liants hydrauliques :

Les liants hydrauliques sont définis comme étant des minéraux qui réagissent en présence de l'eau. Au séchage, ces liants se solidifient. La réaction se termine plus ou moins rapidement et complètement à mesure de présence d'eau (**Bekkouche et al., 2002**).

A-1 La chaux

La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%.
- De modifier les propriétés du sol.

Dans un sol expansif, l'ajout de 2% à 8% de chaux diminue visiblement le potentiel de gonflement de celui-ci. De par l'affinité à l'eau de la chaux, une grande part d'eau existante dans le sol peut être absorbée par celle-ci, ce qui contribue largement à la réduction du potentiel de gonflement. On note une diminution de la teneur en eau du mélange de 0.6% à 0.8% pour 1% de chaux.

L'ajout de chaux, en réduisant la plasticité des sols par une augmentation immédiate de la limite de plasticité et une diminution de la limite de liquidité, produit des structures maniables et faciles à compacter. La quantité optimale pour avoir ces changements est appelée point de fixation de la chaux. Au-delà de ce point, des processus de formation de divers ciments se produisent augmentant la résistance du sol.

De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volumes après gonflement et retrait.

A-1.1 Mise en œuvre de la chaux dans le sol

Il y a plusieurs méthodes utilisées dans le traitement sol gonflement par la chaux, la technique de malaxage sur site, la méthode par injection et le procédé de colonnes de chaux.

1) Malaxage sur place

Le procédé d'ajout de la chaux par malaxage avec le sol (Figure 3.2) est faisable pour des profondeurs de traitement inférieure à 50cm. La mise en œuvre est réalisée en période où le sol

est sec ou peu humide. Le malaxage peut s'effectuer avec répétition pour améliorer le résultat.

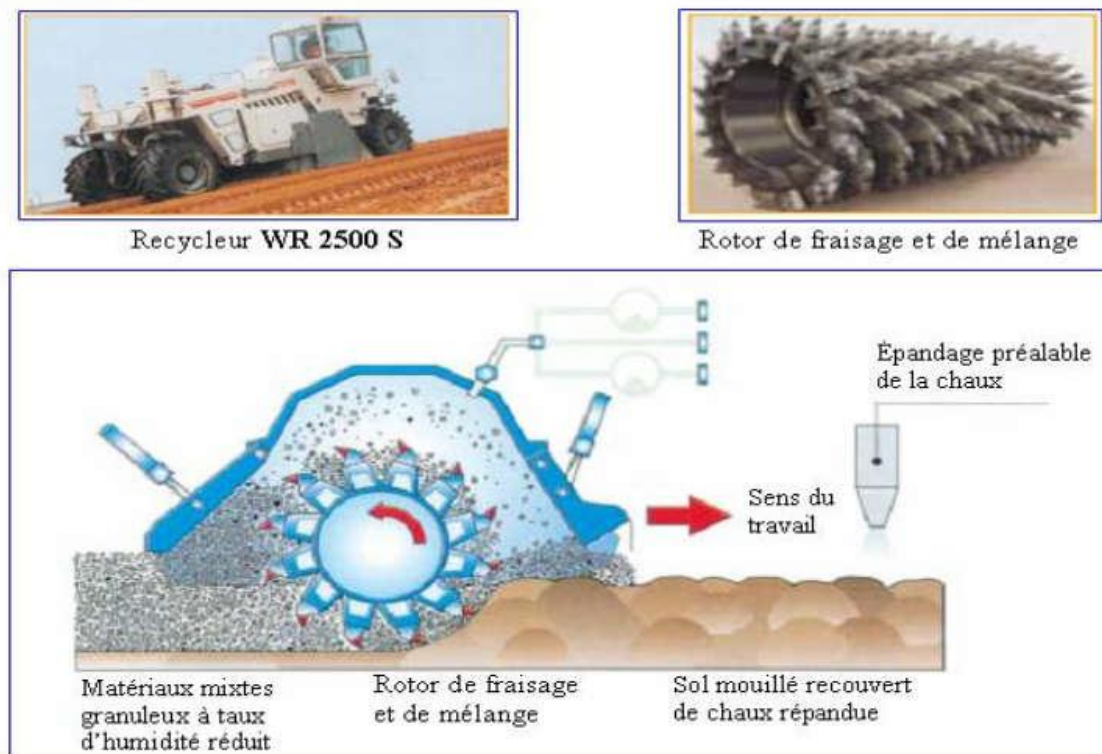


Figure 3.2 : Mise en place de la chaux par malaxage.

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

- **Avantages techniques**

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure.

- **Avantages économiques**

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport.

- **Avantages écologiques et environnementaux**

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une

diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

2) Technique d'injection

Le procédé de traitement par injection (Figure 3.3) est utilisable en surface (cas a) ou en profondeur si le terrain est suffisamment meuble (cas b). L'injection en profondeur est souvent utilisée pour réduire la déformabilité du sous-sol.

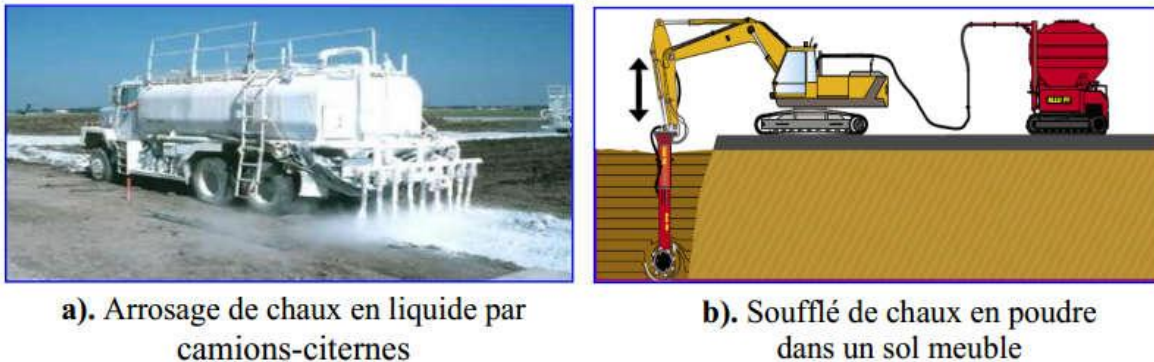


Figure 3.3 : utilisation de la chaux en coulis (NEDJAH I A, 2015)

3) Colonnes de chaux :

La réalisation de colonnes de chaux dans le sol vise l'objectif d'absorber l'humidité pouvant atteindre le sous-sol. La mise en œuvre des colonnes de chaux est similaire à tout autre procédé de réalisation de pieux forés. Les diamètres des colonnes de chaux sont de l'ordre de 25 cm à 50 cm. Leurs profondeurs peuvent atteindre 5m à 8m selon la fermeté des sols. Les espacements entre les axes des pieux réalisés sont variables selon l'humidité dans le sol.

La réalisation de chaque colonne peut s'effectuer en battant un cylindre métallique creux. Le sol contenu dans le moule métallique est ensuite retiré pour être remplacé par de la chaux. À l'extraction du tube moule du sol, la chaux est mise directement en contact avec le sol. Elle commence à réagir si ce dernier lui permet l'humidité. Un dégagement de chaleur s'effectue à mesure que la chaux s'hydrate, ce qui permet de réduire l'humidité du sol par évapotranspiration.

A-2 Traitement aux ciments

Le ciment est un **liant hydraulique** il agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux.

La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel.

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, des résistances mécaniques et de la résistance au gel. Les doses varient de 3,5 à 5 % du poids de sol sec à traiter.

La stabilisation des sols gonflants par du ciment exige une analyse minéralogique du sol afin de choisir le type de ciment à utiliser. L'utilisation d'un ciment résistant aux sulfates est nécessaire si le sol contient du sulfate. Les techniques de mise en place du ciment sont quasiment les mêmes que celles relatives à la chaux.

Par ailleurs, le traitement des sols expansifs au ciment stabilise, non seulement, ces derniers mais augmente leur capacité portante. Ceci car le ciment rigidifie le squelette solide du sol.

Cependant, à cause de la différence des prix unitaires, le coût global de traitement par ciment reste plus élevé comparativement à celui de la chaux.

A-3 Traitement mixte (chaux et ciment)

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible dose (0,5 à 2 %) et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire. Le traitement préalable à l'ajout du ciment conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité



Figure 3.4 : Stabilisation au ciment. (NEDJAH I A et DJOUDI. A, 2015).

A-4 Traitement au Sels

L'application de la technique de la stabilisation des sols gonflants par les sels a pour but d'augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau.

Les sels les plus utilisés sont le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium (CaCl₂). D'un degré moins fréquent, sont utilisés le chlorure de potassium (KCl), le sulfate de sodium

(Na_2SO_4) et le sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Le choix du sel à mettre en œuvre dépend du type de sol principalement en sa composante chimique.

B) Liants organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette minéral. Il se trouve soit solides ou liquides visqueuses, translucides et insolubles dans l'eau On en distingue deux sortes :

- Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.
- Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en œuvre.

Le résultat est intermédiaire entre le collage thermoplastique des mono-composants et le scellement des liants hydrauliques, ce sont par exemple des polymères, des résines ou des dopes. Le mélange des liants organiques au sol résulte en une imperméabilisation et durcissement de celui-ci et une diminution de l'absorption de l'eau. L'injection des liants organiques est quasiment impossible compte tenu de la taille des molécules constitutives.

7.4.2- Stabilisation au Sable :

La stabilisation au sable consiste à malaxer du sable au sol gonflant a pour but de réduire le potentiel de gonflement de ce dernier.

La diminution du potentiel de gonflement dépend du type de sol, la quantité du sable à additionné et le type de sable (**Bengraa et al, 2005**) concluent, sur la base d'analyses par ajout de sable à deux argiles de différentes plasticités, que :

- Le sable de carrière est un bon réducteur des limites de consistance et du potentiel de gonflement du sol,
- Le potentiel de gonflement diminue d'autant plus que le taux de sable augmente et la granulométrie de celui-ci est grossière,
- La pression de gonflement est réduite pour cause de l'inertie des particules de sable par rapport aux fines argileuses,
- L'apport de sable augmente la porosité du mélange.

Ci-dessus un tableau qui résume le problème de sol gonflant ainsi que ces comportements et pathologies et comment protéger les ouvrages sur sols gonflants.

Tableau 3 : résumé général de sol gonflant

Problème	Comportement et Pathologie	Protection des ouvrages sur sols gonflants
Sol gonflant	<p>Un pieu dans une couche de sol gonflant</p> <p>Une maison sur sol gonflant (fondations superficielles)</p> <p>Une route sur sol gonflant</p>	<p>Empêcher le gonflement et le retrait, en modifiant ou remplaçant le sol</p> <p>Empêcher le gonflement et le retrait, en maintenant constante la teneur en eau</p> <p>Limiter les effets du gonflement ou du retrait en adaptant la géométrie de l'ouvrage pour que le sol se déforme librement</p> <p>Limiter les effets du gonflement ou du retrait en modifiant la rigidité et la résistance de la construction</p>

Conclusion

La stabilisation des sols gonflant a été étudiée par un grand nombre de chercheurs.

Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux.

Autour de cette idée que s'articule ce chapitre, a été consacré à l'étude bibliographique présentant l'état d'avancement de la recherche dans le domaine de la stabilisation des sols argileux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépendent de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Dans le prochain chapitre on présente le risque glissement de terrain qui est un risque très fréquent sur le territoire national.

Chapitre IV :
Glissement de terrain

1- Introduction :

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents types des glissements, les causes pathologie et les solutions pour traiter ce phénomène et on termine le chapitre avec un tableau qui résume tous ces points étudiés.

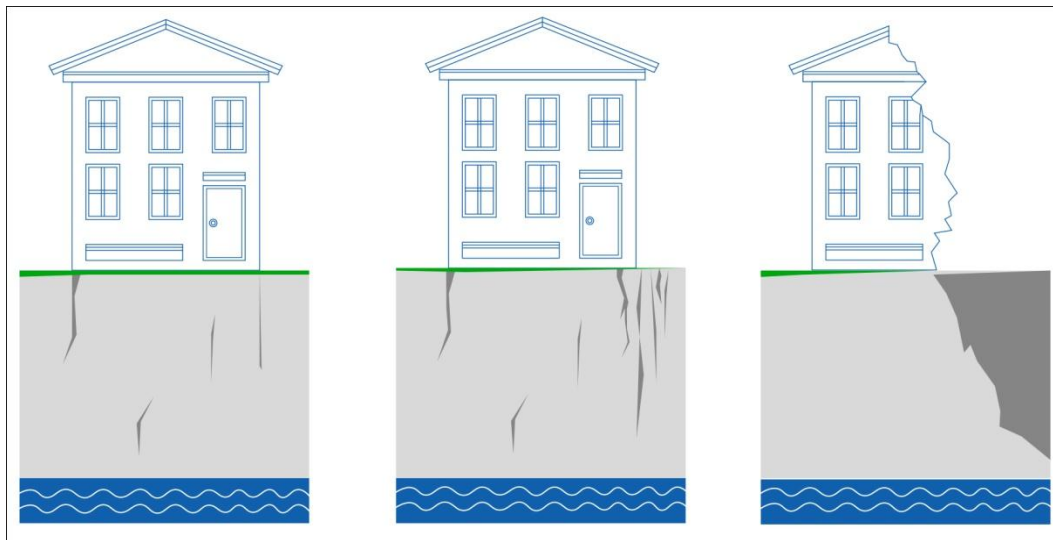


Figure 4.1 : Exemple d'un glissement terrain.

2- Les types des glissements de terrain : (ORRM, 2007)

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- Glissement plan ou translationnel, le long d'une surface plane ;
- Glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- Glissement quelconque.

2.1- glissement plan :

Lors de glissements translationnels, les couches stratifiées glissent sur une zone de faiblesse existante (plan de fissure ou de rupture). En plan, la taille de tels glissements est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés. L'épaisseur des masses en mouvement atteint fréquemment plusieurs dizaines de mètres.

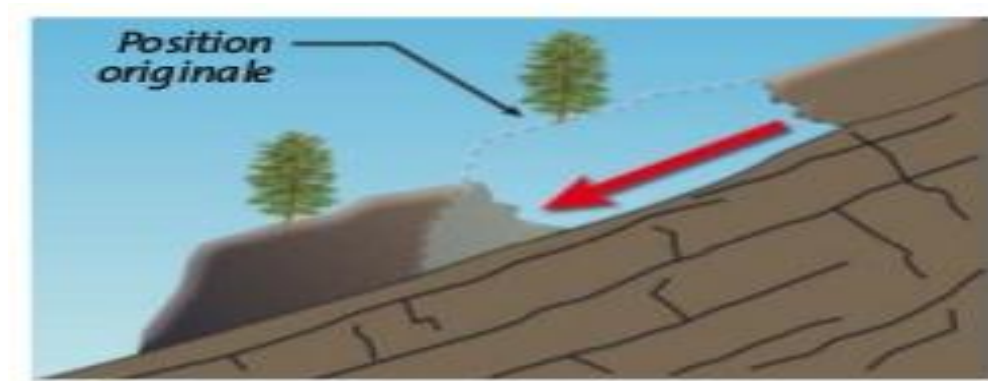


Figure 4.2 : glissement plan

2.2- Glissement rotationnel :

Sont en général de volume limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux. Dans une coupe verticale, la surface de glissement est circulaire et plonge presque verticalement dans la niche d'arrachement.

En règle générale, le mécanisme du glissement ne provoque qu'un faible remaniement interne du matériel glissé. Des dépressions avec crevasses ouvertes et des fissures de traction sont souvent visibles dans la moitié supérieure du glissement, alors que la masse glissée tend à s'étaler et à se désagréger au front du glissement, où peuvent se former des écoulements de boue (coulées de terre) en cas de saturation en eau de la masse.

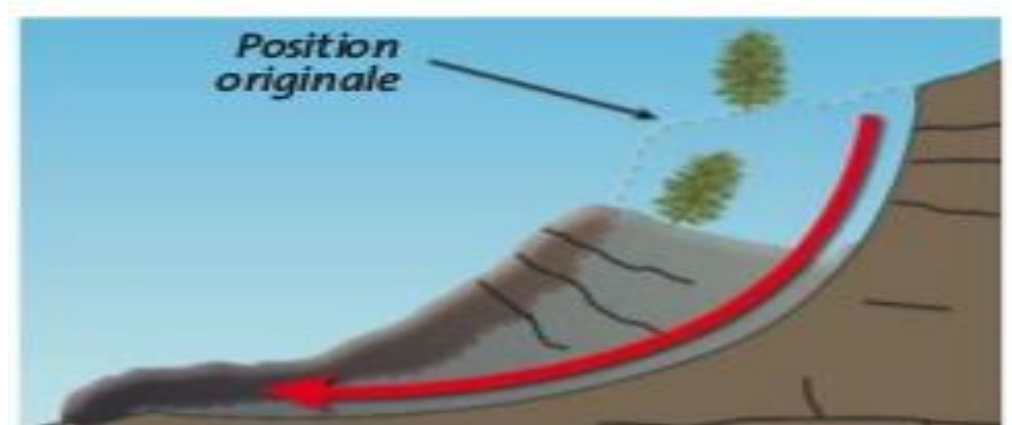


Figure 4.3 : glissement rotationnel

2.3- Glissement quelconque :

Un glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types précédent (**BENOUIS, 2010**).

3- Les indices, les manifestations et les phénomènes induits par les glissements :

Les indices caractérisant les activités d'un glissement sont :

Niche d'arrachement, fissures, bourrelets, arbres basculés, zone de rétention d'eau, fissuration des bâtiments, déformation des routes, etc.



Figure 4.4 : Quelques exemples des phénomènes induits par les glissements

4- Vitesse moyenne de mouvement du glissement :

La vitesse moyenne de mouvement des glissements atteint le plus souvent quelques millimètres par an pour un glissement très lent, et quelques centimètres à quelques décimètres par an pour un glissement actif.

Il existe quelques cas exceptionnels où le glissement peut être bien plus rapide et où la masse en mouvement, sans perdre sa compacité, peut atteindre plusieurs décimètres par jour. Exceptionnellement, des mouvements très rapides peuvent se produire (**BENOUIS, 2010**).

5- Les Causes de ce phénomène :

Les glissements de terrain sont des phénomènes complexes, Ils sont influencés par un grand nombre de facteurs :

- L'hygrométrie influence directement les propriétés mécaniques du sol, en fonction de sa porosité. C'est un facteur prépondérant, lors d'averses plus importantes, le nombre de glissements de terrain augmente. Une teneur en eau élevée affaiblira généralement les propriétés mécaniques de l'écoulement, accélérant son déclenchement ; des cycles répétés déchargement et déchargement en eau amèneront de l'érosion. L'hygrométrie peut enfin avoir des origines humaines : à La Conchita, en Californie, une canalisation cassée a accéléré le déclenchement d'un glissement important.

- Le chargement mécanique de la pente peut être modifié par la construction de structure ou par la fonte de glacier. Dans ce dernier cas, la modification du chargement combinée avec les infiltrations d'eau provoquées décuple les effets du glissement. Une augmentation des charges en amont peut accélérer le glissement ; une diminution de la résistance en aval, lié à un décaissement par exemple, a des effets similaires. Il est crucial de bien connaître les zones à risque pour éviter d'y construire, ou de prendre des mesures pour s'assurer de ne pas déstabiliser une pente dangereuse.
- L'exploitation humaine, la présence d'arbres ou de champs agricole peut venir stabiliser la pente, la déforestation peut perturber l'équilibre. Les herbes hautes plantées sur les dunes des littoraux stabilisent par leurs racines la couche supérieure et limitent l'exposition au vent.
- L'accidentel, des évènements extrêmes peuvent venir déstabiliser subitement un glissement en formation : des arbres stabilisateurs arrachés, une inondation sature et érode les sols, un séisme peut faire basculer un glissement ou entraîner la liquéfaction des sols.

6- Comment stabiliser un glissement de terrain :

La protection contre le risque de glissement de terrain passe par l'étude du phénomène (nature de terrain, vitesse de déplacement, volume déplacé, facteur déclenchant), qui conduit à l'exécution de travaux de stabilisation.

Les techniques de stabilisation des glissements peuvent être classées en 3 catégories :

- Les terrassements ;
- Les dispositifs de drainage ;
- L'introduction d'éléments résistants.

6.1- Les terrassements :

Ces techniques consistent à modifier la topographie du glissement afin de retrouver une situation d'équilibre.

6.1.1- L'allègement en tête de glissement :

Elle repose sur le déchargement de la "tête du glissement". Ce déchargement entraîne une baisse de la masse et donc des forces motrices. Il est aussi possible d'augmenter la stabilité d'un terrain en réduisant sa pente. Cette solution est adéquate pour des talus non naturels ou d'une extension faible, mais généralement difficile à mettre en œuvre sur les versants naturels.

6.1.2- La purge totale :

Cela consiste à supprimer les matériaux glissés. C'est une solution seulement applicable aux glissements de taille modeste, de faible profondeur.

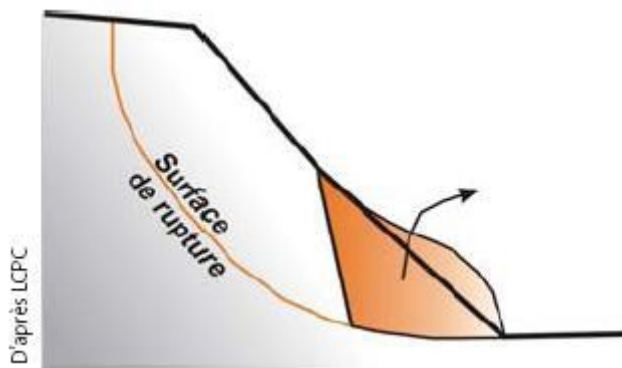


Figure 4.5 : La purge totale

6.1.3- La substitution partielle :

Lorsque la purge totale n'est pas possible, la substitution se limite à des bêches, des contreforts, des masques ou des éperons qui, s'ils sont bien dimensionnés, peuvent suffire à la stabilisation.

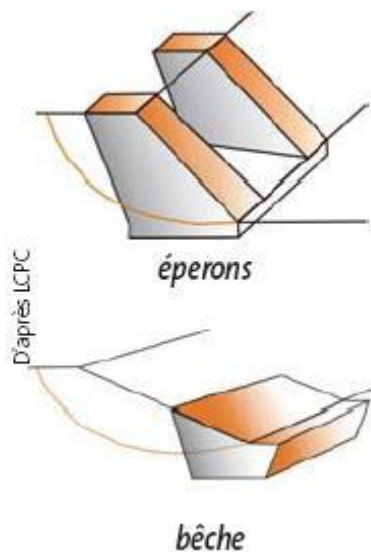


Figure 4.6 : La substitution partielle

6.1.4- Le chargement en pied :

Le chargement en pied consiste à construire un ouvrage de butée en pied de glissement afin d'équilibrer les forces motrices et de contenir les déplacements de la masse instable. Il est en général associé à du drainage.

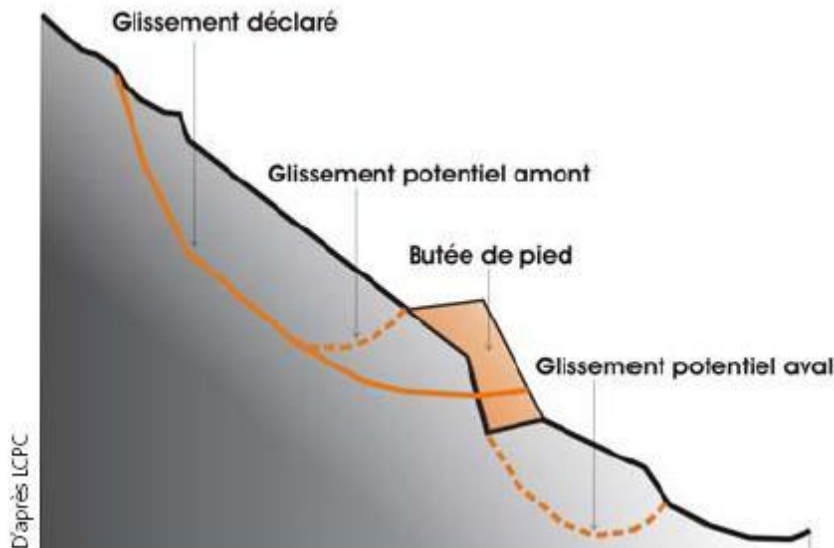


Figure 4.7 : Le chargement en pied

6.2- Les dispositifs de drainage :

L'eau a un rôle très souvent déterminant dans "le déclenchement" des glissements de terrain, que cela soit par son action mécanique, chimique ou physico-chimique. Les dispositifs de drainage ont pour rôle de démunir l'action de l'eau soit en évitant l'alimentation en eau du site, soit en expulsant l'eau présente dans le massif instable.

6.2.1- Drainage de surface :

Il s'agit de l'application des moyens pour limiter les infiltrations dans les terrains en mouvements en ramassant et en canalisant les eaux de surface (cunettes, caniveaux, fossés, etc.).



Figure 4.8 : drainage des eaux de surface à l'aide d'un caniveau.

6.2.2- Drains subhorizontaux :

La technique consiste à réaliser de nombreux forages quasi horizontaux dans le glissement et pour y placer des drains (tubes en PVC ou en acier) ainsi qu'un dispositif de captage des eaux. C'est la technique utilisée lorsque les contraintes d'accessibilité du site ou de profondeur de la nappe interdisent la réalisation de tranchées.

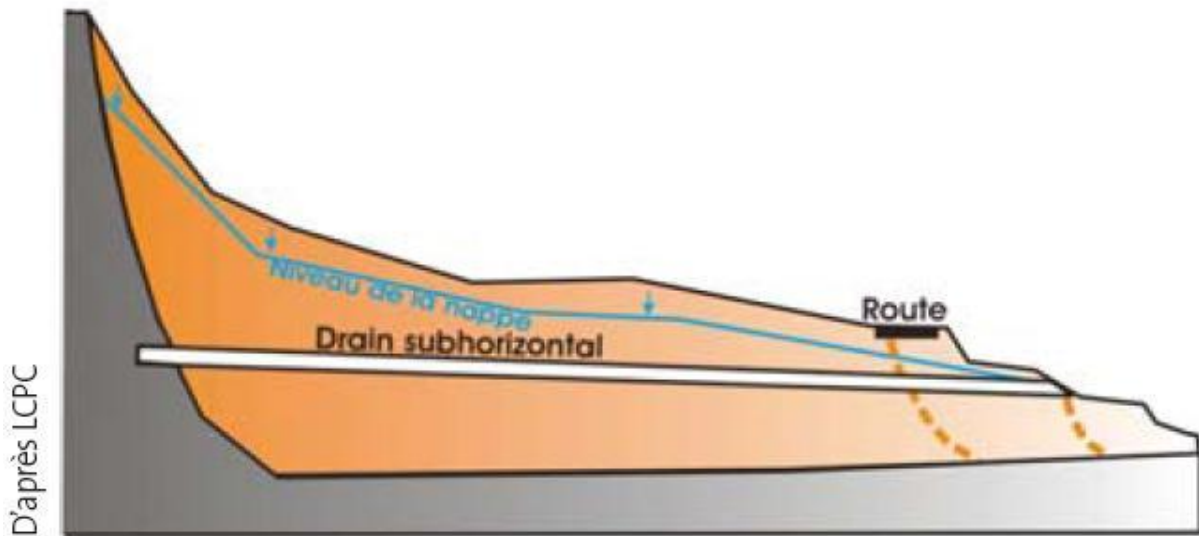
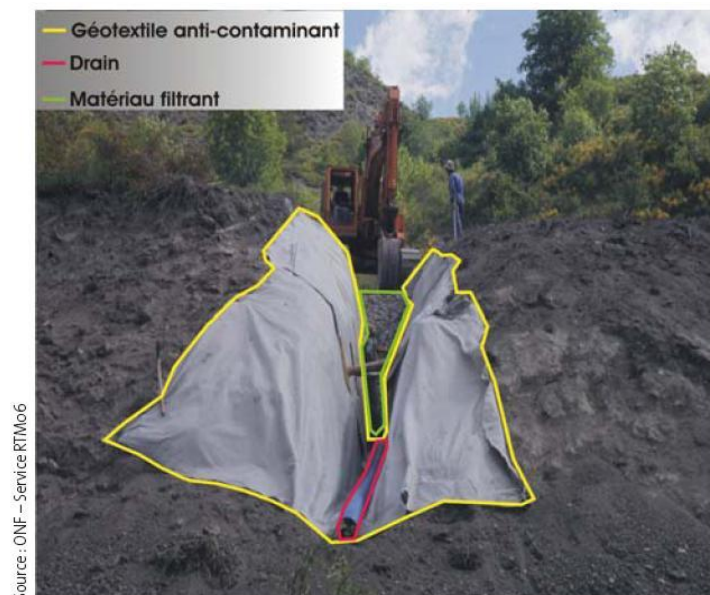


Figure 4.9: Drains subhorizontaux

6.2.3- Tranchées drainantes :

Ce sont des ouvrages qui permettent de rabattre le niveau des nappes phréatiques diminuant ainsi les pressions interstitielles au niveau de la surface de rupture.



Travaux de mise en place d'une tranchée drainante sur le glissement de Ciastel (Alpes-Maritimes). Après avoir recouvert le drain de matériau filtrant, la tranchée sera comblée par des remblais.

Source : ONF - Service RT/Mo6

Figure 4.10 : Tranchées drainantes.

6.2.4- Drainage profond :

Il s'agit de collecter et d'évacuer les eaux à l'intérieur du massif et dans la masse instable. Cela permet de diminuer les pressions d'eau dans le massif, d'éviter les mises en charge brutales dans les discontinuités et d'abaisser le niveau de la nappe.

Il peut s'agir de :

- Drains subhorizontaux ;
- Drains siphons ;
- De galerie drainante ;
- De drains ou puits verticaux.

6.3- L'introduction d'éléments résistants :

La mise en place d'éléments résistants n'influe pas directement sur la cause du mouvement mais sur ses conséquences.

Les éléments résistants (type ouvrages de soutènement, tirants, ancrages, rangées de pieux...) visent à réduire ou arrêter les déformations. Ces techniques sont intéressantes dans le cas où les techniques de stabilisation type terrassement ou drainage ne peuvent être techniquement ou économiquement mises en œuvre.

6.3.1- Enrochement :

Éperons drainants et enrochement en pied de glissement pour contrer l'avancée des matériaux sur la chaussée

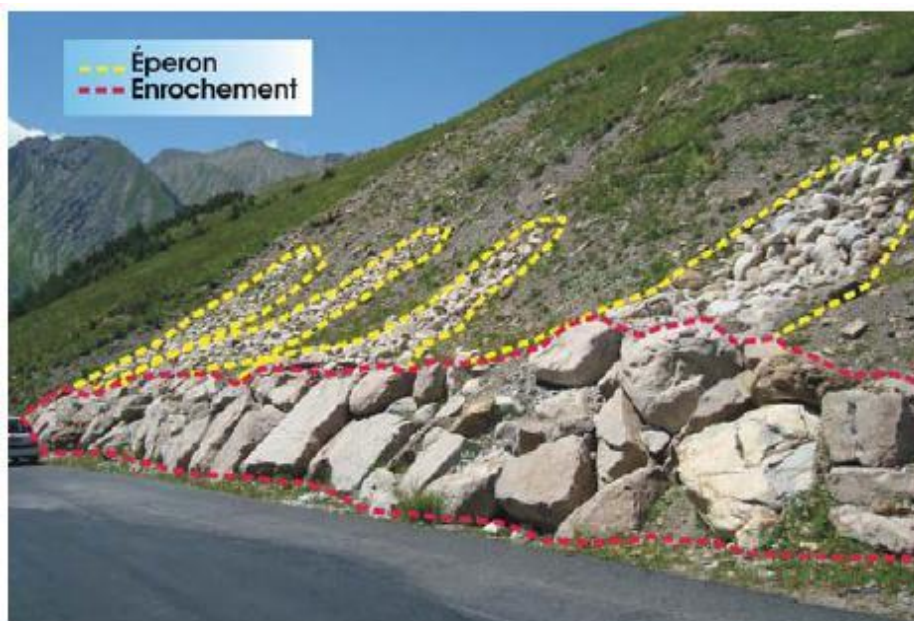


Figure 4.11: Enrochement

6.3.2- Gabions :

Mur de gabions (casiers remplis de pierre en grillage métallique) disposé en pied de glissement pour stopper son évolution vers la route.



Figure 4.12 : Gabions

6.3.3- Ouvrage rigide :

Partie supérieure souple : mur de pierres emboîtées, partie inférieure rigide : mur en béton (pied du glissement) avec ancrages (masqués par le béton).

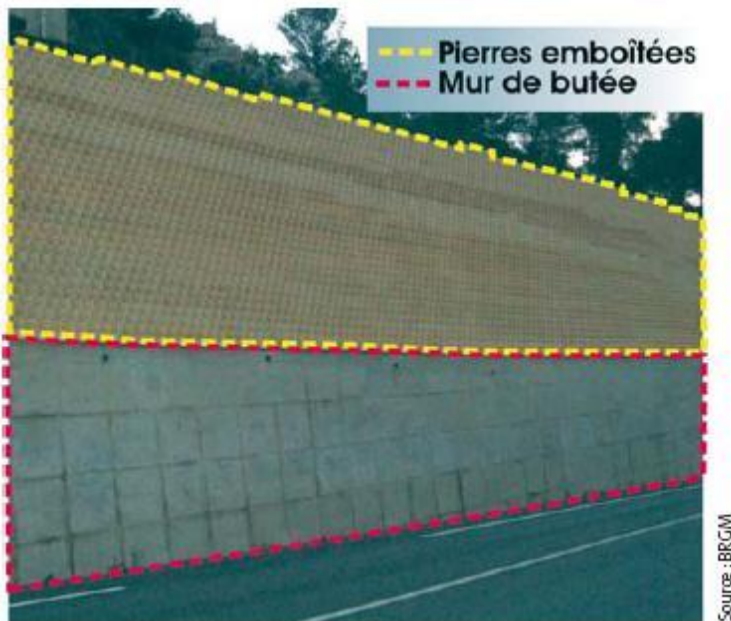


Figure 4.13 : Ouvrage rigide

6.3.4- Nappe en géosynthétique :

Protection du talus à l'aide d'une nappe de géosynthétique fixée par des câbles et des ancrages (permet de limiter l'érosion par les circulations d'eau superficielles) et de béton projeté associé à des ancrages destinés à bloquer le mouvement du sol. Le long de la route un mur de soutènement empêche la progression des terrains sur la chaussée.

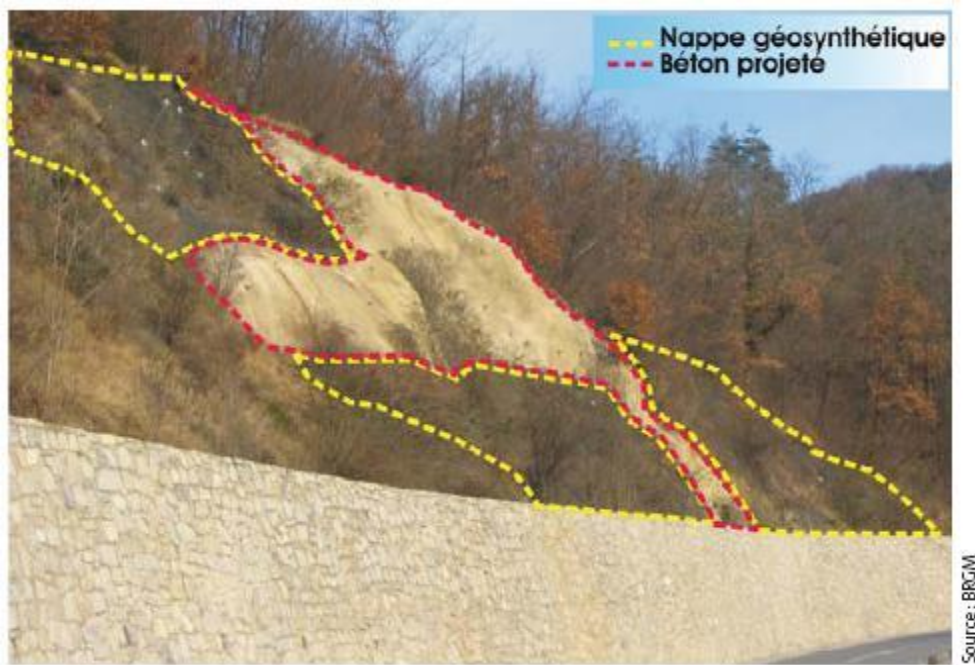


Figure 4.14: Nappes-en géosynthétiques

6.3.5- Systèmes d'ancrages :

Les ancrages peuvent être de 2 types : soit passifs soit actifs.

- Un **ancrage passif** est constitué par une ou plusieurs armatures (barres d'acier) scellées dans le rocher, assurant la solidarisation d'un volume potentiellement instable avec le massif stable situé en arrière.
- Les ancrages actifs sont constitués de barres ou câbles scellés en fond de trou au-delà de la zone instable et mis en tension (mesurée à l'aide d'un manomètre).

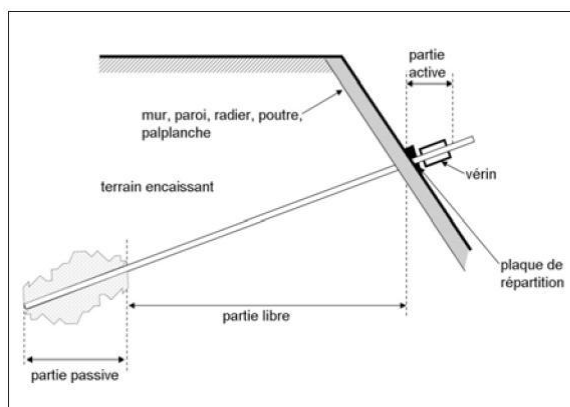
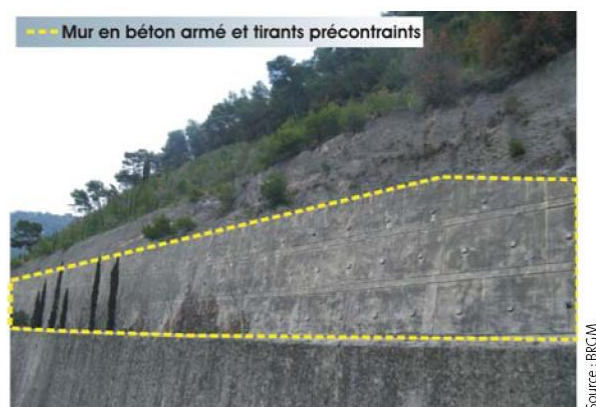


Schéma principe d'un ancrage à l'aide de tirants précontraints.



Alpes-Maritimes.

Figure 4.15: Systèmes d'ancrages

6.3.6- Nappe de géotextile biodégradable et écran en rondins de bois entrecroisés :

En partie supérieure : nappe de géotextile biodégradable favorisant la revégétalisation. En partie inférieure écran réalisé en rondins de bois entrecroisés et remplissage de petits blocs.

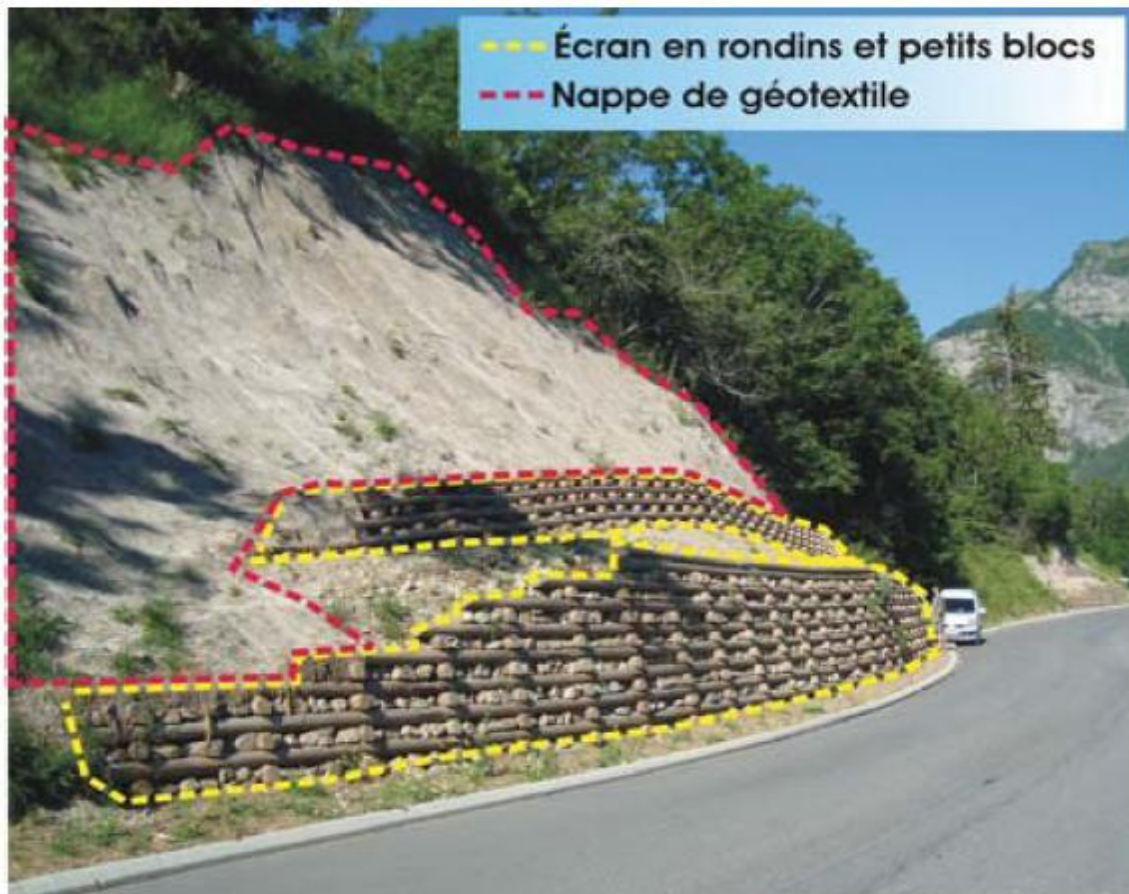


Figure 4.16: Nappe de géotextile biodégradable et écran en rondins de bois entrecroisés

Ci-dessus un tableau qui résume le problème de glissement terrain ainsi que ces types et ces facteurs de difficulté et les différents traitements de ce problème.

Tableau 4 : résumé des problèmes de glissement de terre et leur traitement.

Problème	Les types des glissements de terrain	Facteur de difficulté	Traitement de problème		
			Terrassement	Les dispositifs de drainage	L'introduction d'éléments résistants
Glissement de terrain	Glissement plan ou translationnel	L'hygrométrie Le chargement mécanique.	L'allègement en tête de glissement	Drainage de surface	Enrochement Gabions
			La purge totale	Drains subhorizontaux	Ouvrage rigide Nappes-en géosynthétique
	Glissement circulaire ou rotationnel	L'exploitation humaine. L'accidentel	La substitution partielle	Tranchées drainantes	Systèmes d'ancrages
			Le chargement en pied	Drainage profond	Nappe de géotextile biodégradable et écran en rondins de bois entrecroisés

Conclusion :

Le glissement de terrain correspondant à un déplacement sur une pente, il existe plusieurs types de terrain comme le glissement plan et le glissement rotationnel et pour stabiliser ce glissement on doit établir une étude du phénomène qui conduira à l'exécution de travaux de stabilisation.

On a essayé de mettre en relief les différentes interventions que l'ingénieur sur terrain peut entreprendre pour pallier ce phénomène et éviter des pertes matérielles et surtout humaines.

Dans le cinquième et dernier chapitre on décrit le phénomène d'érosion des sols qui correspond au décapage des particules de surface de ce sol..

Chapitre V :
Érosion des sols

1- Introduction :

L'érosion des sols est un phénomène de déplacement des matériaux à sa surface, après détachement des particules de terre, sous l'action de l'eau, du vent, de la gravité ou de l'homme.

Il existe deux types d'érosion :

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes, sur la crête des ouvrages. Ceci arrive lorsque la transparence de l'ouvrage est insuffisante pour évacuer l'eau de l'inondation, provoquant alors une surverse. Lors la surverse au-dessus de la couche de la chaussée l'eau coule jusqu'au talus aval où l'écoulement devient torrentiel et possède un grand pouvoir érosif. Les vitesses d'écoulement sont supérieures aux limites d'arrachement. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus de l'ouvrage (Figure 5.1a). L'endommagement du pied de talus ou raidissement de la pente du talus aval, conduit donc à la destruction partielle du remblai ou destruction totale du remblai (formation d'une brèche).

L'érosion interne correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Elle est provoquée par des percolations excessives à travers l'ouvrage. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure. (Figure 5.1 b et c).

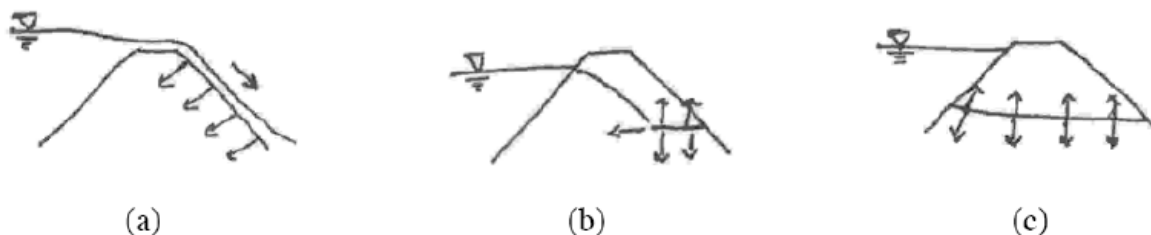


Figure 5.1 : Exemple de situation d'érosion d'ouvrages hydrauliques : a) érosion externe, b) initiation d'érosion interne, c) évolution d'érosion interne.

2- Origines du phénomène d'érosion :

Un ouvrage de retenue doit répondre à deux fonctions principales : l'imperméabilité de la structure et la résistance mécanique. Les événements initiateurs du phénomène d'érosion peuvent agir soit en affaiblissant la résistance mécanique de la structure, soit en dégradant son étanchéité par l'augmentation de la perméabilité locale ou globale de l'ouvrage. Ainsi, les origines du phénomène d'érosion se classent en deux groupes. Le premier cumule tous les éléments qui affaiblissent la résistance à l'érosion et le deuxième tient compte des percolations excessives, se produisant lorsque l'imperméabilité de la structure est dégradée.

Une faible résistance mécanique peut être due à :

- un mauvais compactage,

- l'absence ou l'inadéquation du filtre,
- l'utilisation de matériaux dispersifs (argiles, limons ou sables fins).

L'augmentation de la perméabilité locale de la structure est due aux problèmes :

- d'étanchéité inadéquate (mauvais choix des matériaux ou mauvaise liaison avec le contour),
- d'étanchéité endommagée (tassement différentiel, fracturation hydraulique),
- de l'existence d'un chemin privilégié pour l'écoulement (fissures préexistantes, défauts géologiques).

Les deux conditions qui assurent un bon fonctionnement de l'ouvrage de retenue se trouvent dans une relation interdépendance. Ainsi, si l'étanchéité du système est perdue, implicitement la résistance mécanique est elle aussi affectée, car l'augmentation locale de la perméabilité conduit à la dégradation de la structure.

3- Les types de phénomène d'érosion :

L'étude plus précise des phénomènes conduisant à la rupture d'ouvrages en terre soumis à une charge hydraulique nécessite au préalable une classification des phénomènes et une définition du vocabulaire.

3.1- L'érosion interne :

L'érosion interne se développe s'il y a la combinaison de deux phénomènes : l'arrachement des particules et leur transport.

Les phénomènes d'arrachement conduisent à la déstabilisation d'une particule ou d'un groupe de particules, sous l'action d'une force mécanique. On en distingue : l'entraînement, l'érosion régressive, le débouillage, la bouillasse, la dissolution, la défloculation, Renard, Suffusion, auto-filtration (CFGB, 1997)

3.1.1- LA BOULANCE :

La bouillasse ou l'annulation de la contrainte effective par gradient hydraulique, est l'état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'action d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective (figure 5.2).



Figure 5.2 : Phénomène de bouillasse

3.1.2- DISSOLUTION :

Ce phénomène correspond à la transformation d'un état solide en un état liquide d'une partie des constituants du sol sous une action thermique ou chimique. Par exemple, dans les barrages situés en altitude, il existe souvent des dépôts de glace dont la fonte provoque l'augmentation des vides et le déclenchement du phénomène de renard (**Garner et Sobkowicz, 2002**).

3.1.3- Debouillage :

Le débouillage est la déstabilisation d'un volume de sol sous l'action de la poussée de l'eau que la résistance au cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. C'est le cas lorsqu'une fissure rocheuse ou un conduit karstique est rempli de matériaux argileux et qu'une infiltration d'eau exerce une pression qui provoque un déplacement d'ensemble du matériau vers l'aval, jusqu'à une cavité ou un élargissement.



Figure 5.3 : Phénomène de débouillage au barrage de Lafage (Lautrin, 2002)

3.1.4- L'érosion régressive :

L'érosion régressive concerne tout phénomène d'érosion qui se produit en un point aval et se poursuit en progressant vers l'amont. Il convient de distinguer deux types d'érosion régressive :

- **Le déchaussement** : Ce type d'érosion concerne les remblais. En pied de pente, les forces liées à l'écoulement résurgent provoquent la déstabilisation des matériaux qui forment le squelette du sol. Ces matériaux sont progressivement évacués par l'écoulement, ce qui déstabilise le remblai, dont le glissement fournit de nouveaux matériaux qui sont à leur tour entraînés.
- **L'érosion régressive par conduits** : Un ou plusieurs conduits se développent depuis l'aval et progressent par érosion des matériaux qui forment l'extrémité amont du chenal.

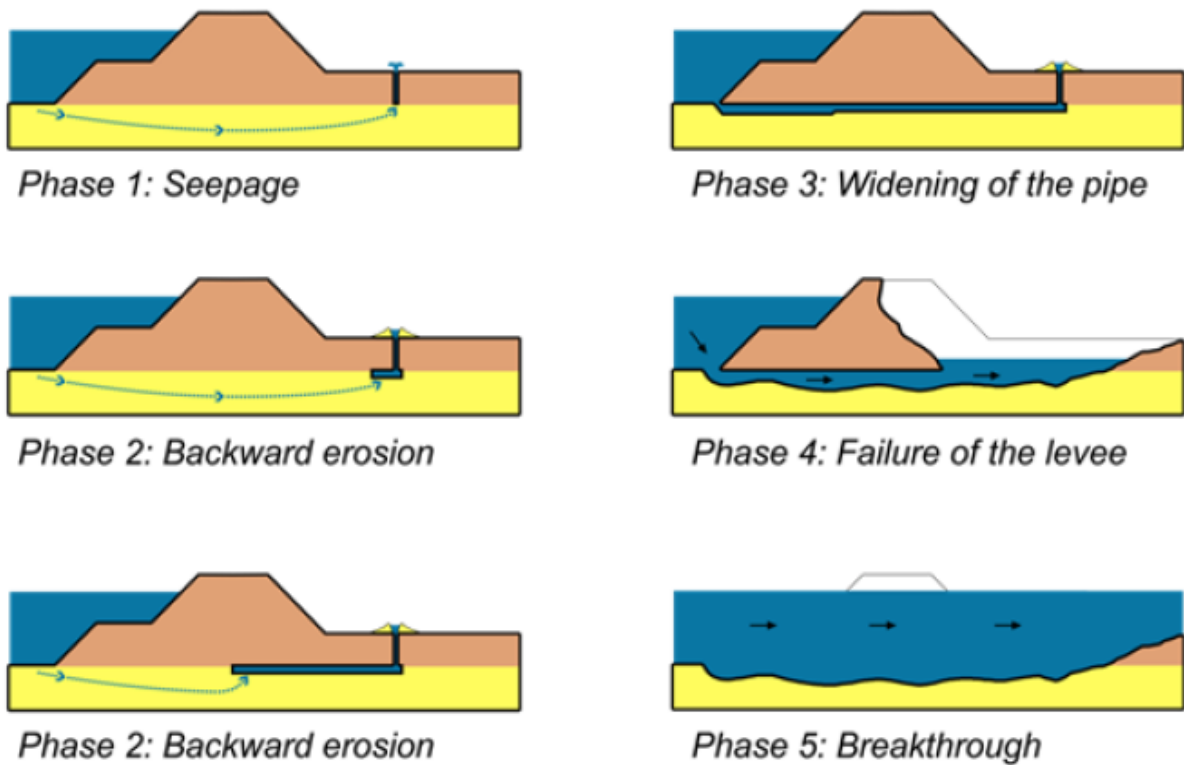


Figure 5.4 : Phénomène d'érosion régressive (van Beek, et al. 2011)

3.1.5- Entraînement

L'entraînement est défini comme le détachement des particules des parois d'une conduite, sous l'effet de l'écoulement d'un fluide. Ce phénomène a lieu à partir d'une valeur seuil de la contrainte de cisaillement appliquée par le fluide sur la paroi. Celle-ci dépend de la vitesse du fluide ainsi que de la résistance du sol à cette sollicitation.

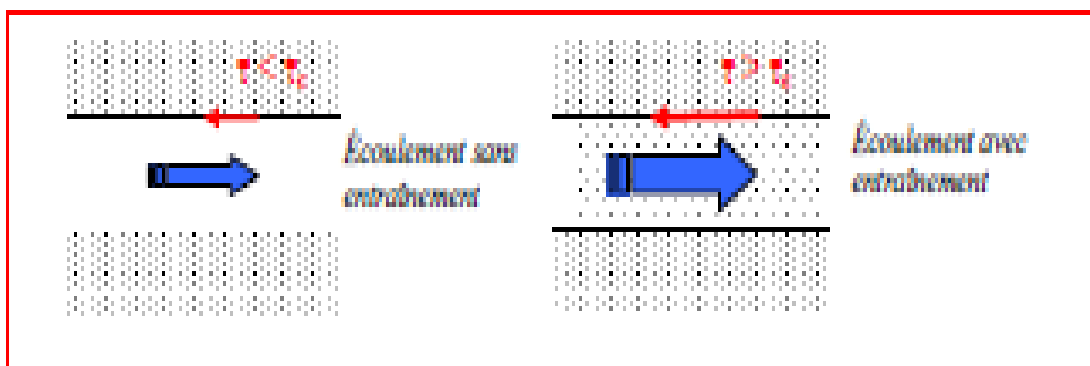


Figure 5.5 : Phénomène d'entraînement

3.1.6- Exsolution :

Ce phénomène correspond à l'expulsion de l'air piégé dans les ouvrages lors de leur mise en eau. Cet air piégé est comprimé et transporté par l'écoulement. Il en résulte une désorganisation des voûtes qui colmatent l'interface avec le filtre, une diminution locale de la perméabilité du sol.

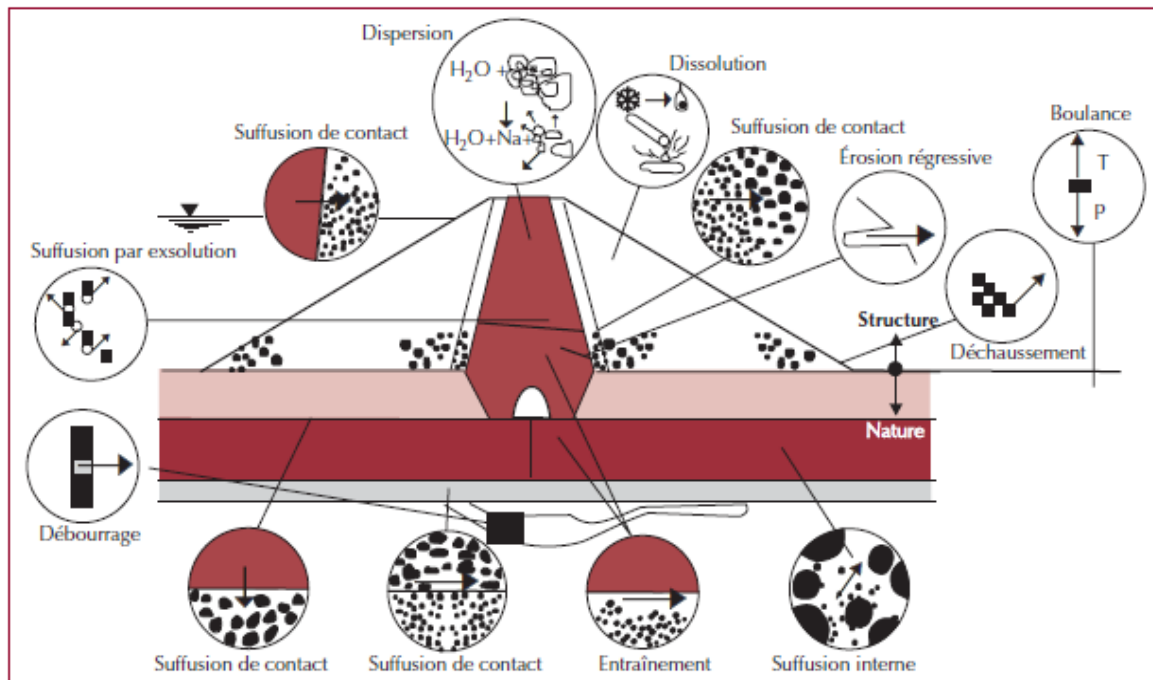


Figure 5.6 : Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage adapté par (Schuler, et al. 1997)

Les diverses conditions de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre elles dans un incident et être difficilement distinguées (Figure 5.6). Mais elles ne sont pas suffisantes pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées, pour que l'érosion soit entretenue.

3.1.7- Renard :

Ce phénomène est un arrachement régressif des particules de l'aval du sol vers un milieu extérieur et en progressant vers l'amont, jusqu'à la formation d'un conduit continu. Il est difficilement détectable et évolue très rapidement.

3.1.8- La suffusion :

Ce phénomène est une redistribution diffuse des particules dans le sol (**Bendahmane, 2005**). La granulométrie globale du sol ne change pas, par contre la perméabilité évolue. Si localement les particules érodées ne peuvent plus migrer, un colmatage apparaît accompagné d'une surpression, ce qui peut engendrer un glissement de sol. Généralement l'évolution très lente du phénomène de suffusion permet sa détection et sa limitation. La redistribution des particules fines dans le sol sans modification du volume solide total du sol. La perméabilité subit ainsi de faibles variations et les conséquences de ce phénomène sont considérées comme bénignes par Garner et (**Sobkowicz, 2002**) et (**Barakat, 1991**) (Figure 5.7).

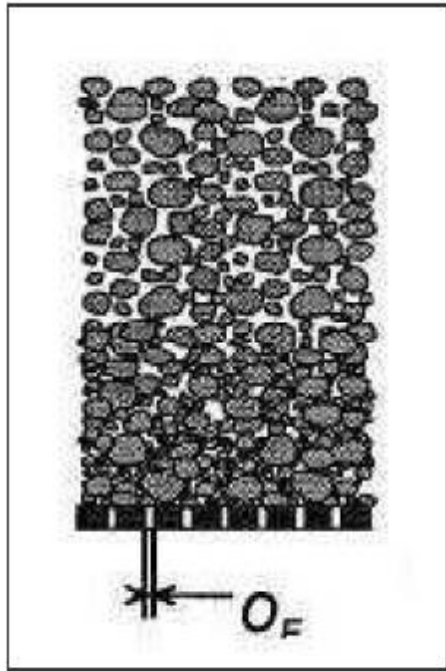


Figure 5.7 : Suffusion (Lafleur, et al., 1989)

3.1.9- Auto-filtration :

Ce phénomène existe seulement dans les ouvrages disposant d'un filtre en aval. Les particules fines du sol arrivent dans le filtre et forment des voûtes qui peuvent arrêter l'érosion interne, néanmoins le tassement de ces voûtes dû au départ des particules peut engendrer des désordres et déclencher une surverse.

3.2- L'érosion externe :

L'érosion externe est la déstructuration de surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent extérieur naturel (eau, air, froid, chaleur, hygrométrie, gel, dessiccation...). Trois types d'érosions externes dues à l'eau sont identifiables : l'érosion pluviale, l'érosion fluviale, l'érosion maritime.

3.2.1- Érosion pluviale :

Effet d'impact :

Lorsque les gouttes de pluie arrivent sur le sol, elles créent une force tangentielle d'arrachement, proportionnelle à leur énergie cinétique, brisent les mottes et les agrégats et projettent les particules arrachées. Ce phénomène de rejaillissement sous l'impact, ou « splash » en anglais, déplace les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluie par rapport à la surface. Les particules fines déplacées sont piégées entre les éléments plus grossiers et ferment les pores : la surface du sol perd de sa capacité d'infiltration et sur certains sols, il apparaît une formation d'une pellicule ou d'une mince croûte superficielle, continue et consistante qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance (**Rousseva et al, 2002 ; Hénensal, 1986**).

Ruissellement :

Le ruissellement désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Selon Guiton (1998), ce ruissellement, d'abord pelliculaire, se partage en un écoulement diffus en petits filets d'eau anastomosés (c'est-à-dire interconnectés) qui circulent entre les obstacles et un écoulement aréolaire (de forme circulaire) en nappes formées de lames d'eau qui suivent plus ou moins la topographie. Ces filets et ces lames d'eau peuvent exercer une force de cisaillement qui arrache des particules de sol.

La battance des gouttes détache des particules du sol et les transporte dans une faible proportion tandis que le ruissellement transporte les particules de sol libres et en détache dans une faible proportion (**Bradford et Blanchar, 1999**). Ces deux phénomènes sont représentés sur la figure (5.8).

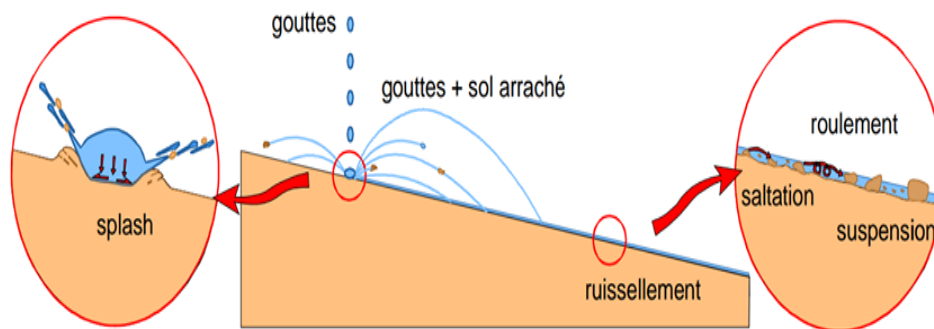


Figure 5.8 : les deux mécanismes de l'érosion pluviale.

3.2.2- La houle et les courants :**Vagues dues à la houle :**

Lorsqu'à proximité du rivage, la profondeur de l'océan diminue, les vagues deviennent de plus en plus pentues, l'angle aigu en tête de vague décroît et un déséquilibre se produit entre la vitesse de l'eau en surface et sur le fond.

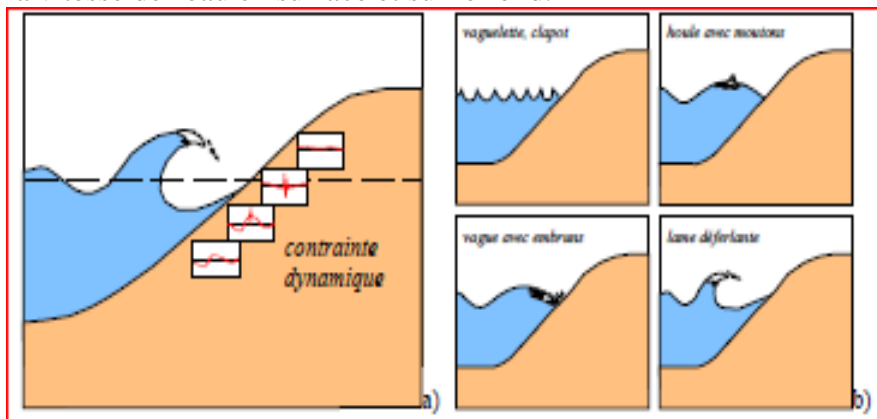


Figure 5.9 : (a) répartition des contraintes sur la pente (b) différents types de vague

Batillage :

Ce battement de l'eau sur les berges dû au déplacement des bateaux ou au clapot voit son action érosive accentuée par une combinaison de facteurs comme la nature du substrat formant les berges et la vitesse d'écoulement dans le chenal. L'action des vagues finit par saper la berge et le substrat glisse peu à peu dans l'eau.

3.2.3- Marnage :

Les variations du niveau de l'eau dans un cours d'eau peuvent être dues

- à la houle,
- au passage de navires (figure 5.10).
- à l'action humaine : éclusage.

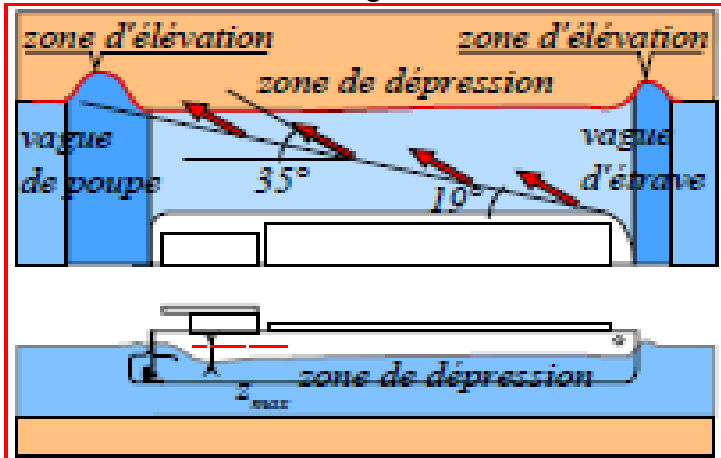


Figure 5.10 : schéma simplifié des différents types de vague générées par un navire.

3.2.4- Jet d'hélice et courant :

Les courants naturels ou dus à des jets d'hélice imposent d'importantes forces érosives au terrain et l'érosion s'initie lors du dépassement de la vitesse admissible.

4- Pathologies des ouvrages de retenue liées à l'érosion :

4.1. Barrage de sadd el-kafara :

Parmi les premiers cas recensés de rupture par érosion interne d'un ouvrage en terre est celui du barrage en terre construit dans un des nombreux ouadis débouchant sur la vallée du Nil. Sadd al-Kafara n'est sans doute pas le plus ancien barrage mais le plus vaste, le plus imposant en pierre. Des vestiges à Jawa (Jordanie) remonteraient aux alentours de 3000 av. J.-C. (Viollet, 2000), cité par (Tuan Long PHAM, 2009). Il s'agit d'un ouvrage de 113 m de long, 14 m de hauteur, 100m à la base et 66 m en crête (Figure 5.11). Constitué d'un noyau central en tout venant, sable et graviers, il avait pour objectif de stocker l'eau pour un usage agricole.

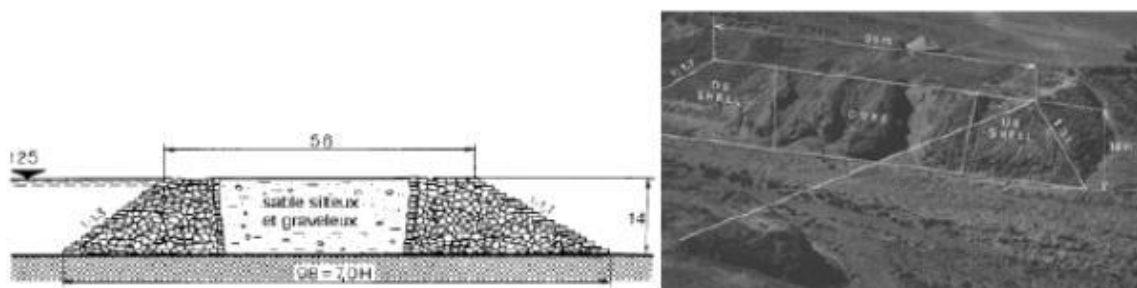


Figure 5.11 : coupe et restes de barrage de Sadd el-Kafara sur le Wadi Garawi (Schnitter, 1994)

Garbrecht à proposer, comme hypothèse, que la rupture du barrage se produit avant que l'ouvrage ne soit complètement terminé, à un moment où le parement rocheux amont culmine

à sa cote nominale, mais où le parement aval et le remplissage du noyau ne sont pas complètement achevés. Submergé par une crue exceptionnelle, l'ouvrage est alors ruiné par l'érosion du noyau central et l'effondrement du parement amont. Certainement, l'effet de cette rupture est destructeur en aval, et le souvenir de cette catastrophe peut expliquer l'absence de nouvelles constructions de barrages en Egypte, pour de nombreux siècles.

4.2. Rupture du barrage de Teton (1976) :

Le barrage de Teton était situé sur la rivière de Teton, en Idaho, aux Etats-Unis. Il a été conçu pour prévenir les inondations, produire de l'électricité et irriguer plus de 40.000 hectares de champs. La construction du barrage s'est terminée en 1975. La hauteur maximum de remblai est de 93 mètres au-dessus de la rivière et la capacité du réservoir est de 356 millions de mètres cubes une fois remplie.

La rupture du barrage de Teton pendant le remplissage initial du réservoir, le 3 juin 1976, a tué quatorze personnes et a causé des centaines de millions de dollars de dégâts matériels en aval (**Teton Dam Failure Case Study, 2003**).

- 3 juin 1976, des petites infiltrations sont observées dans le mur de rive nord ;
- Un jour après, une humidité est notée dans la rive droite et les petits ruissellements commençaient à apparaître ;
- 5 juin 1976, la première fuite principale est notée le matin. Son débit est d'environ 800 l/s dans la rive droite. Il a augmenté jusqu'à 1100 à 1400 l/s et on observe l'apparition de l'eau environ 40 mètres au-dessous de la crête du barrage (**Arthur, 1977**), cité par (Solva et Delatte, 2003), un bloc de 6 mètres du barrage tombe dans le flot et, dans les minutes qui suivent le barrage entier s'effondre (Figure 5.12).



Barrage avant la rupture



Barrage après la rupture

Figure 5.12: Rupture de barrage de Teton (Romain, 2007)

5- Les facteurs de l'érosion :

- **La pluie** : Le ruissellement se déclenche lorsque la croute de battance est formée ou lorsque le sol est saturé. Ce phénomène est amplifié lors de pluies de forte intensité. La pluviométrie peut déclencher des phénomènes de ruissellement et d'érosion, soit à cause d'une intensité trop élevée (un sol nu produit du ruissellement dès 1 mm/h), soit par l'accumulation des eaux lors d'une longue période pluvieuse. Les préparations d'automne (déchaumage, labour, semis...) deviennent sensibles au-delà de 100mm reçus.

- **Le sol :** Les sols limoneux et sablo-limoneux sont particulièrement sensibles à l'érosion, notamment lorsqu'ils sont pauvres en humus.
- **Le relief :** L'érosion croît lorsque les pentes sont longues ou assez fortes (les rigoles apparaissent à partir de 2% de pente).
- **Les pratiques culturales :** Certaines pratiques culturales augmentent la sensibilité du sol à l'érosion, tel l'accroissement du poids des machines qui favorise le tassement.
- **L'occupation du sol :** L'occupation du territoire a une grande importance dans la problématique de la gestion de l'eau. Les éléments influant sont les suivants :
 - Taille, forme, positionnement et orientation des parcelles
 - Assolement pratiqué sur l'ensemble d'un bassin versant
 - Éléments fixes du paysage

6- Les solutions possibles pour contrer l'érosion : (SECURITE PUBLIQUE QUEBEC 2012)

Au cours des dernières décennies, différents types de construction ont été réalisés pour protéger des portions de côtes comportant un ensemble de bâtiments ou des infrastructures importantes.

Cependant, les nouvelles connaissances sur le fonctionnement global du littoral nous permettent de démontrer que les processus côtiers peuvent être perturbés lorsqu'un ouvrage de protection est installé sur le rivage. En effet, bien que les ouvrages permettent de réduire l'érosion localement, ils entraînent une détérioration accélérée des secteurs adjacents et une perte presque complète de la plage, rendant nécessaire de nouvelles interventions. L'effet domino engendré par ces interventions à la pièce, sans perspective d'ensemble, constitue l'un des principaux problèmes en matière de gestion du risque d'érosion des berges.

Les interventions sur les berges doivent être basées sur une connaissance approfondie des phénomènes d'érosion et être réalisées à la suite d'une planification reposant sur une approche globale qui tienne compte d'une vision d'ensemble du littoral.

Les solutions doivent s'appliquer à l'ensemble d'un secteur, en privilégiant des techniques qui respectent le fonctionnement naturel du littoral, et ce, dans une perspective de développement durable.

- Mur de soutènement et enrochement
- Effet de bout
- Abaissement de la plage
- Épis
- Recharge en sable
- Végétalisation

Quelques ouvrages de protection :

Voici quelques mesures de protection souvent implantées et les répercussions qui y sont associées :

Mur de soutènement et enrochement :

Un muret de bois, de béton ou même de plaques de métal peut être installé pour retenir les sédiments d'un talus de faible hauteur et le protéger des vagues. L'enrochement consiste en un empilement structuré de blocs rocheux devant un talus en érosion. Une membrane géotextile est souvent installée sous la structure pour limiter la fuite de particules entre les blocs. Ces ouvrages sont coûteux et doivent être calibrés par un ingénieur en hydraulique, qui en déterminera la hauteur et le calibre des pierres en fonction de la hauteur des marées et des vagues de tempête.



Figure 5.13 : Mur de soutènement (Gaspésie).



Figure 5.14 : Protection de falaise par enrochement.

Effet de bout :

Lorsque les vagues frappent un mur ou un enrochement, leur énergie est réorientée aux extrémités de l'ouvrage, ce qui peut accélérer l'érosion des rives voisines. C'est ce que l'on nomme l'effet de bout. Ainsi, les murs et les enrochements peuvent parfois aggraver le problème d'érosion et même entraîner la dégradation des côtes qui étaient auparavant en sécurité.



Figure 5.15 : Effet de bout (Pointe-aux-Outardes, Côte-Nord).

Abaissement de la plage :

Les murs et les enrochements protègent le talus, mais augmentent l'érosion des plages situées à leur pied. Une vague qui frappe directement un mur ou un enrochement conserve une bonne partie de son énergie et retourne vers le large en érodant la plage.



Figure 5.16 : Abaissement de la plage causé par un mur de soutènement (Maria, Gaspésie).

Épis :

Contrairement au mur de soutènement ou à l'enrochement, cet ouvrage est perpendiculaire à la côte. Il peut être formé de pieux verticaux, enfouis dans le sol et placés les uns à côté des autres pour retenir les particules transportées par les vagues, tout en permettant une certaine circulation d'eau. Certains épis sont formés d'empilements de roches.



Figure 5.17 : exemple d'épis

Recharge en sable :

La recharge en sable consiste à transporter du sable et/ou du gravier sur une plage, soit en le déposant directement sur celle-ci ou en marge du site.

Végétalisation :

Cette méthode consiste à planter les végétaux adaptés au milieu côtier qui retiendront les sédiments grâce à leurs racines.



Figure 5.18 : Végétalisation (Baie des Chaleurs, Gaspésie).

Ci-dessus un tableau qui résume le problème de l'érosion des sols ainsi que ces types et leurs pathologies.

Tableau 5 : résumé sur le phénomène de l'érosion

Problème	Les Types d'érosion		Pathologie d'érosion
Érosion du sol	Érosion interne	Érosion externe	BARRAGE DE SADD EL-KAFARA RUPTURE DU BARRAGE DE TETON (1976)
	LA BOULANCE	Érosion pluviale	
	DISSOLUTION	La houle et les courants	
	DEBOURRAGE	Marnage	
	L'ÉROSION REGRESSIVE	Jet d'hélice et courant	
	ENTRAINEMENT		
	EXSOLUTION		
	RENARD		
	LA SUFFUSION		
	AUTO-FILTRATION		

Conclusion :

Le phénomène d'érosion peut être séparé en deux processus, le détachement des particules, et leur migration. Deux événements sont alors possibles, soit les particules migrent, soit elles sont arrêtées et bouchent la fissure. Cet événement dépend de la taille des particules pouvant se déplacer ainsi que des caractéristiques du milieu où elles vont y aller.

L'analyse des ruptures des barrages a permis d'identifier les différentes causes pouvant être à l'origine de l'état critique d'érosion. De telles causes sont difficilement quantifiables, mais leurs identifications permettent d'améliorer la conception et la construction.

Il est très difficile de déterminer avec exactitude le moment et l'endroit où s'amorce la rupture par érosion. Leur absence est impossible à garantir, mais par contre son risque d'apparition est fortement réduit par une surveillance bien élaborée.

Conclusion générale

À travers ce modeste travail, nous avons essayé de balayer la majorité des problèmes que rencontre un ingénieur praticien lors de ses différentes interventions sur les terrains. Les problèmes liés à la géotechnique sont divers et complexes, par conséquent établir une synthèse de ces pathologies s'avère nécessaire et surtout présenter les différentes solutions de confortement et de stabilisation lorsqu'un cas se présente.

La synthèse bibliographique avait pour but d'établir une sorte de guide pour un jeune ingénieur où il peut détecter le phénomène, ses causes et surtout énumérer les solutions envisageables en respectant les conditions du site et les aspects économiques.

Pour cela, on a discuté la problématique du tassement des sols compressibles lorsqu'on les soumet à une charge, par des différentes techniques de construction.

Ensuite on a présenté l'ensemble des dispositions et traitements qu'on pourrait employer afin de diminuer les conséquences des sols effondrables tel que la technique du pré-mouillage.

Ensuite, on a abordé la thématique des sols gonflants argileux, où on sait que ce phénomène engendre des désordres irréversibles sur les ouvrages. Une panoplie de solutions a été recensée pour contrer ces phénomènes, tel que le traitement par la chaux et le ciment ainsi que l'utilisation de techniques de drainage pour empêcher l'augmentation des teneurs en eau dans les sols d'où le déclenchement du phénomène de gonflement.

Un autre aspect de pathologies liées aux sols, c'est le phénomène des glissements de terrains. C'est un phénomène très répondu surtout dans l'est algérien. Des solutions de confortement sont données quel que soit le type de glissement, plan, circulaire...

Au dernier chapitre on a terminé par décrire le phénomène d'érosion des sols qui est un phénomène de déplacement des matériaux à sa surface, après détachement des particules de terre, sous l'action de l'eau, du vent, de la gravité ou de l'homme. Aussi ce phénomène est très préjudiciable surtout dans les ouvrages hydrauliques tels que les barrages en terre.

Cette synthèse bibliographique est certainement perfectible, mais elle pose les bases de l'élaboration d'un guide pratique pour les ingénieurs géotechniciens qui sont sur le terrain. Le but étant d'avoir un concentré d'informations dans un même ouvrage où on peut trouver à la fois le descriptif détaillé des phénomènes, leurs causes et les différentes solutions pratiques qui peuvent être exécutées sur les différents chantiers du génie civil.

Référence bibliographiques :

Ayadat T., Gherabli. H. (1995), Traitement d'un sol affaissable par du ciment, CPA325.annales de l'ITBTP, no 530, p34-43, janvier.

BARAKAT B, 1991 : instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspect morphologiques et probabilistes, thèse école centrale de paris, 135 p.

Barden L., Madedor A.O. et Sides G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. J. Soil Mech. FdnEngng, Am. Soc. Civ. Engrs 95, SM1. 33-51. (1.2.5), (1.2.7), (1.4).

Barden L., McGown A. et Collins K. (1973). The collapse mechanism in partly saturated soil. Eng. Geol. 7. 49-60. (1.4.1).

Bekkouche A., Aissa Mamoune S. M. et Djedid A., (2002), Techniques de stabilisation des sols expansifs, Journées d'Études sur les Sols Gonflants (JÉSG), Laboratoire Eau et Ouvrage dans Leur Environnement, Département de Génie Civil. Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen.

Bell, F. G. (1988), Stabilisation and treatment of clay soils with lime. Ground Engineering, 10-29.

BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIXIS A et ROSQUOET F. 2005 : Characterization on internal erosion disturbances on sand/kaolinite samples. Mcmat 2005 ASCE, Baton Rouge, USA, p7.

Bendi-Ouis A., Abou-Bekr N. & Taibi S. (2005): «Caractérisation de l'argile du noyau du barrage Sikkak » in 2^{ème} Journées d'étude sur les sols gonflants, Séminaire International, 13 & 14 Novembre 2005, Tlemcen, Algérie.

Bengraa, L., Hachichi, A., Bourokba, A., et Benaïssa, A., (2005), "Étude de la Stabilisation des Argiles par Ajout de Sable de Carrière", 2^{ème} Journées d'Études sur Les Sols Gonflants (JÉSG2), Laboratoire Eau et Ouvrage dans Leur Environnement, Département de Génie Civil, Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen.

BENOUIS, 2010 : Étude d'un glissement de terrain par différentes méthodes, mémoire de master, université de Saïda.

Bradford, J. M. et Blanchar, R. W. 1999 : Mineralogy and water quality parameters in rill erosion of clay-sand mixtures, Soil Science Society of America Journal, vol. 63, no. 5, pp.1300-1307.

CFGB, 1997 : Comité Français des Grandes Barrages, (1997), Érosion interne : Typologie, détection et réparation, Barrage et Réservoirs, No 6 Spécial congrès CIGB Florence, p. 126.

Chen F.H., (1988), —Foundation on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Company INC., New York, USA.

DAKSHANAMURTHY V. (1979). A stress-controlled study of swelling characteristics of compacted expansive clays. *Geotech. Test Journal*, **2(1)** 57-60

DESODT et al, 2017 : les glissements de terrain, modélisation et prévision, école normale supérieure pari-saclay.

Didier, G., (1972), Gonflement Cristallin et Macroscopiques de Bentonitel, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.

FERRAH Ferrah (2006) Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des fondations superficielles Thèse pour l'obtention du diplôme de MAGISTER Spécialité : Génie Civil Option : Mécanique des sols - Université El Hadj Lakhedar Batna.

Garner, S.J. and Sobkowicz, J.C. (2002) Internal Instability in Gap-Graded Cores and Filters. *Proceedings of 2002 Annual CDA Conference, Canadian Dam Association, Victoria.*

Hénensal, P. 1986 : L'érosion externe des sols par l'eau : Approche quantitative et, mécanismes, Rapport de recherche LPC, no. 138, 75 pages.

Holtz W.G. (1948). The determination of limits for the control of placement moisture in high rolled-earth dams. *Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs.* 48. 1240-1248. (1.4).

Houssine EJJAOUANI 9 juillet 2008- Interactions Des Fondations Et Des Sols Gonflants : Pathologie, Calculs Et Etudes Expérimentales - Thèse d'obtention du diplôme de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées spécialité : géotechnique.

http://lyceeherioux.fr/Mooc/materiau/traitements_sols/~gen/traitement.publi/auroraW/co/traitement_49.html

JAKY J. (1948). Influence of ground water level oscillation on subsidence of structures, *Proc. Second Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 148-150.

J.P MAGNAN, 2000 : étude et réalisation des remblais sur les sols compressibles ; Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes ; 88 pp.

J.P Magnan, Bailly J.C., Bondil R. (1990) : Les remblais en polystyrène expansé de l'autoroute A8 à Mandelieu" *Bulletin de liaison des L.P.C.*, Paris, n° 165, pp. 17 - 32.

J.P MAGNAN, 2000 : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme, [Laboratoire central des ponts et chaussées et Service d'études techniques des routes et autoroutes].

Jones D. E., et Holtz W. G., (1973), "Expansive Soils – The hidden disaster", *Civil Eng.*, ASCE 43(8).

LAFLEURJ, MLYNAREK J et ROLLIN A L. 1989 : Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol 111, n° 12, p 1747-1768.

LAOUAR, MOHAMED SALAH (2011). PRÉDICTION DES SOLS A EFFONDREMENT BRUSQUE PAR DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES. Thèse de Doctora, Université de Batna 2.

LAUTRIN D2002 : vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre ,Cemagref éditions,239 p.

LAWTON E. C and FRAGAZSZY R. J & HARDCASTLE J. H (1991) Stress ratio effects on collapse of compacted clayey sand. Journal of Geotech. **117**(5), 714-730

Mouroux P., Margron P. et Pint J.C., (1988), “La construction économique sur sols gonflants, Manuels et méthodes n°14. B.R.G.M., Orléans.

NEDJAH A. RAOUF Et DJOUDI ABDELKRIM (2015) -STABILISATION DES SOLS GONFLANTS PAR AJOUT DES LIANTS HYDRAULIQUES – Mémoire pour l'obtention du Diplôme de Master ANNÉE 2015 Université Mohamed Chérif Mesaadia Souk-Ahras.

Nelson J. D., et Miller D. J., (1992), “Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering”, Edition John Wiley et Sons, INC.

Nicolas CABANE (2004) - Sols Traités A La Chaux Et Aux Liants Hydrauliques : Contribution A L'identification Et A L'analyse Des Eléments Perturbateurs De La Stabilisation Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Jean Monnet et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne Discipline : Génie des Procédés.

Nouaouria Mohamed Salah (2005). Structure et comportement de l'affaissement du Loess. Thèse de doctorat, université de annaba.

ORRM, 2007:<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/glissements>

ROGERS C. D. F. (1995). Types and distribution of collapsible soil. In DERBYSHIRE, E, DIJKSTRA, T. A. and SMALLEY, I. J., (eds). The Genesis And Properties of collapsible Soils, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1-17.

ROGERS C. D. F. and SMALLEY I. J. (1993). The shape of loess particles. Naturwissenschaften**80**, 461-462

Rousseva S., Torri, D. Pagliai, M. (2002) : Effect of rain on the macroporosity at the soilsurface, European Journal of Soil Science, 53, pp.83-94.

Schnitter N. J. 1994 : A History of Dams, the Useful Pyramids. A.A. Balkema: Rotterdam.

SECURITE PUBLIQUE QUEBEC 2012 :www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/surveillance-du-territoire/erosion-cotiere/solutions.html.

STEADMAN L. (1987). Collapse settlement in compacted soils of variable fines content, Master's Thesis, Washington State Univ. Pullman, Washington.

Thompson, M. R., (1968), -"Lime stabilization of soils for highway purposes". Final Summary Rep. Civil Engineering Studies, Highway Series No. 25, Illinois Cooperative Highway Research Program, Project IHR-76, 26 pp.

Van Beek, V. M., H. Knoeff, and H. Sellmeijer 2011. Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and full-scale experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15(8):1115–1137.

Viollet P.-L. 2000 : L'hydraulique dans les civilisations anciennes, 5000 ans d'histoire, Presses de l'ENPC, 374 pages.

ZENKHRI Abderrezak (2009) - Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant- Application à la région d'In-Aménas Thèse MAGISTER ANNÉE 2009/2010.