

Liste des abréviations

C.E.C: capacité d'échange cationique

ESP: Essai de sédimentation en parallèle

CSH: hydrate de Silicate de Calcium

CRR: Centre de recherches routières

LGV: Ligne à grande vitesse

Liste des annotations

σ, σ_e : Contrainte

σ' : Contrainte effective

U_w, U_0 : La pression interstitielle de l'eau

U_a : La pression de l'air dans le sol

γ_d : Poids volumique sec

γ_w : Poids volumique de l'eau

d : distance

H_0 : Hauteur initial

H_1 : Hauteur après gonflement interfoliaires

I_p : Indice de plasticité (%)

W_p : Limite de plasticité

W_l : Limite de plasticité

W_n : Teneur naturel

γ_d : Poids volumique sec

S_r : degré de saturation

S : Succion capillaire

VBS : Valeur de bleu

e_{sat} : fraction argileuse naturel

e : indice des vides

G_s : densité spécifique

ξ_{e_0} : déplacement

Table des matières

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des annotations

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique sur les sols fins

1. INTRODUCTION.....	3
2. DEFINITION DES SOLS FINS	4
2.1. Définition des argiles	4
2.2. Définition des silts et des limons.....	5
2.3. Définition des sables fins.....	6
3. DEFINITION DES MINERAUX DES SOLS FINS	7
3.1. Définition des minéraux argileux.....	7
3.1.1. Les argiles du groupe de kaolinite.....	8
3.1.2. Les argiles du groupe de l'illite (MICAS)	9
3.1.3. Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite)	10
3.2. Définition des minéraux limoneux	11
3.3. Définition des minéraux de sable fin.....	11
4. DEFINITION DES SOLS DISPERSEES	12
4.1. Interaction entre l'eau et les minéraux argileux	12
5. COMPOSITION MINERALOGIQUE DES SOLS FINS.....	13
5.1. Les minéraux primaires	13
5.2. Les minéraux secondaires.....	13

5.3. Les sels solubles	13
5.4. Les matières organiques	13
6. MICROSTRUCTURE DES SOLS FINS.....	13
7. STRUCTURE DES SOLS FINS	14
7.1. Structure fragmentaire/grumeleuse	14
7.2. Structure compacte	15
7.3. Structure particulière	15
8. TEXTURE DES SOLS FINS.....	15
9. DIFFERENTS TYPES D'EAU	17
9.1. L'eau de cristallisation	17
9.2. L'eau liée	17
9.3. L'eau libre	17
10. ECHANGE IONIQUE	17
10.1. Echange cationique	17
10.2. Capacité d'échange cationique C.E.C.....	17
11. FORCE S'EXERCANT ENTRE FEUILLET ET PARTICULES	17
11.1.1. Forces d'attraction	17
11.1.2. Forces de van der Waals	18
11.1.3. Forces de coulomb	18
11.1.4. Forces de cimentation.....	18
11.2. Forces de répulsion	18
11.2.1. Forces de répulsion due à la présence de double couche	18
11.2.2. Forces de répulsion due à l'hydratation de la surface des particules par les molécules d'eau	19
11.3. Bilan des forces	19
12. CONCLUSION.....	20

CHAPITRE 2 : le phénomène de retrait-gonflement des sols fins

1. INTRODUCTION.....	21
2. LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT	22
3. MECANISME DE GONFLEMENT	22
3.1. Gonflement au sens physico-chimique	23
3.1.1. Gonflement interfoliaire (cristallin)	23

3.1.2. Gonflement interparticulaire (osmotique)	24
3.2. Gonflement sens mécanique.....	24
4. CINETIQUE DE GONFLEMENT	25
4.1. Gonflement primaire	26
4.2. Gonflement secondaire	26
5. FACTEURS INTERVENANT DANS LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX	26
5.1. Les facteurs de prédisposition.....	27
5.1.1. La nature de sol	27
5.1.2. Le contexte hydrogéologique.....	27
5.1.3. La géomorphologie.....	28
5.1.4. Les défauts de constructions.....	28
5.2. Les facteurs de déclenchement.....	28
5.2.1. Les conditions climatiques	29
5.2.2. Les facteurs anthropiques	29
6. DEFINITION DES PARAMETRES DE GONFLEMENT	30
6.1. La pression de gonflement	30
6.2. Le potentiel du gonflement	30
6.3. L'indice de gonflement	30
7. RETRAIT DES SOLS GONFLANTS	30
8. DIAGNOSTIQUE	31
9. CAS PATHOLOGIQUES SUR LE RETRAIT-GONFLEMENT	32
10. CONCLUSION.....	35

CHAPITRE 3 : le phénomène d'effondrement des sols fins

1. INTRODUCTION.....	36
2. PHENOMENE DE L'EFFONDREMENT.....	37
2.1. Effondrement par liquéfaction statique ou dynamique.....	38
2.2. L'effondrement par hydratation (ou imbibition)	38
3. RECONNAISSANCE DES SOLS EFFONDREMENT ET CRITERES D'IDENTIFICATION ...	38
4. L'EFFONDREMENT DES SOLS NON SATURES	39
4.1. Constitution des sols non saturés.....	39
4.2. Caractéristiques des dépôts de loess	39

5. LE PHENOMENE D'EFFONDREMENT SOUS CHARGE ET DE CONFLEMENT	40
6. MECANISME D'EFFONDREMENT	41
7. FACTEURS IMPORTANT DANS L'EFFONDREMENT	41
7.1. Nature géologique du sol	43
7.2. Granulométrie	43
7.3. Nature des agents de liaison	44
8. CAS PATHOLOGIES PROVIQUEES PAR L'EFFONDREMENT	45
9. CONCLUSION	48

CHAPITRE 4 : le phénomène de la dispersion des sols fins

1. INTRODUCTION	49
2. LA DISPERSION	50
3. LA DISPERSION D'UN SOL FIN	50
4. MECANISME DE DISPERSION	50
5. PARAMETRES INFLUANCANT LE PHENOMENE DE DISPERSION	51
5.1. Facteurs liées à la structure du sol	52
5.1.1. Types des minéraux argileux	52
5.1.2. Pourcentage de sodium	52
5.1.3. Mode d'assemblage des feuillets	52
5.2. Facteurs liées aux eaux interstitielles	52
5.2.1. Concentration en sel	52
5.2.2. Concentration du PH	53
6. CARACTERISATION DES SOLS DOSPERSIFS	53
6.1. Pinhole test	53
6.2. Crumb test	54
6.3. L'essai chimique	55
6.3.1. Extrait de saturation	55
6.3.2. Extrait en 1/5	55
6.4. Essais de sédimentation en parallèle (double hydrometer test)	56
7. CONCLUSION	57

CHAPITRE 5 : les techniques de la stabilisation des sols fins

1. INTRODUCTION.....	58
2. LES DIVERS TECHNIQUES DE LA STABILISATION DES SOLS FINS.....	59
2.1. Stabilisation chimique	60
2.1.1. Stabilisation par ajout de la chaux	61
2.1.2. Stabilisation par ciment.....	68
2.1.3. Stabilisation par des additifs	71
2.1.4. Stabilisation aux cendres volantes et pouzzolane	75
2.2. Stabilisation mécanique	76
2.2.1. Stabilisation par compactage.....	76
2.2.2. Stabilisation par drainage.....	76
2.2.3. Stabilisation par substitution	76
2.2.4. Stabilisation par applications des fortes pressions.....	76
2.2.5. Stabilisation pré humidification	77
2.2.6. Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux	77
2.2.7. Traitement mécanique des argiles gonflantes	78
2.3. Stabilisation thermique	79
3. CONCLUSION	80
CONCLUSION GENERALE.....	81

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies.

Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autres la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les Illites et les Smectites, etc. Quand ils subissent à des influences extérieures, à titre d'exemple variation de la teneur en eau...etc. peuvent engendrer des dégâts estimatifs.

L'ingénieur est donc souvent confronté à des problématiques majeures lors l'étude des ouvrages construits sur ce genre de sols car souvent les campagnes de reconnaissances géotechniques ne prévoient pas la mesure de plusieurs paramètres attachés à certains phénomènes. Parmi les causes d'instabilité d'ouvrages les plus rencontrés dans le monde entier et l'Algérie en particulier, le phénomène de retrait gonflement, l'effondrement et la dispersion.

Lorsque les sols fins sont humidifiés à partir d'un état sec, ils subissent des gonflements dus d'une part, à l'absorption des molécules d'eau sur la surface extérieure des particules et d'autre part, à la pénétration des molécules d'eau entre les feuillets dont, l'empilement constitue les particules d'argile.

Les trois phénomènes cités sont à l'origine de nombreux désordres tant pour les constructions en surface (bâtiments, ouvrages de soutènement, remblais) que pour les ouvrages enterrés (tunnels, pieux).

Plusieurs techniques de stabilisation et de confortement, ont été utilisées dans le domaine de génie civil afin de résoudre les problèmes vécus. La chaux, le ciment, cendres volantes, les solutions salines, l'ajout de sable et les traitements par liants hydrauliques (chaux, ciment, cendres volantes, ...) les traitements organiques (bitumes, résines naturelles, polymères, ...) etc. le traitement mécanique et thermique.

La présente recherche consiste à caractériser les sols, identifier les phénomènes provoqués par ces sols, et de les traiter ainsi les stabiliser par les trois traitements chimique, mécanique et thermique afin de rendre les sols fins bénéfiques.

Cette recherche est menée par les chapitres suivants :

Introduction générale

- Le premier chapitre est une recherche bibliographique. Cette dernière permet une reconnaissance des sols fins par un aspect microscopique englobant la minéralogie, la microstructure, et texture.
- Le deuxième chapitre, a permis de mettre en évidence la complexité de retrait-gonflement en raison des mécanismes de déclenchement du phénomène, ainsi ses conséquences sur les ouvrages cités par des cas pathologiques.
- Dans le troisième chapitre, l'objet est de donner une description de phénomène de l'effondrement caractérisant le comportement des sols non saturés, ensuite une reconnaissance des critères d'identification, et finaliser par des exemples pathologiques.
- Le quatrième chapitre présente le phénomène de dispersion par une caractérisation des sols dispersifs mais tout d'abord en citant les mécanismes ainsi les facteurs qui permettent de l'influencer.
- Les diverses techniques de stabilisation des sols fins sont expliquées dans le cinquième et dernier chapitre pour atténuer les dégâts économiques provoqués par ces phénomènes. L'orientation des plans d'urbanisation et/ou l'adaptation des structures à la nature, restent les actions recommandées.

Enfin, une conclusion générale qui résume les intérêts de la recherche et présente les recommandations essentielles tirées.

Chapitre01

**REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
SOLS FINS**

1 INTRODUCTION

Les sols fins y compris les argiles, limons, marnes...etc. sont des sols d'assise pour un grand nombre de constructions dans le monde entier, dont il faut bien les prendre en charge lors de la conception des projets afin d'éviter certains dégâts.

Plusieurs paramètres et caractéristiques géotechniques évoluées provoquent des phénomènes liés aux sols fins et qui rapportent surtout à la complexité de la minéralogie de ces sols, c'est pour cela l'intérêt des géotechniciens sera visé vers une description microscopique et une étude cruciale de ce type des sols fins.

Ce chapitre sera consacré au début pour une présentation globale des sols fins dans le génie civil, ensuite une analyse minéralogique, chimique et physique, et aussi une bonne connaissance de structure et texture de ces sols, afin d'arriver à mieux savoir leurs caractéristiques et leurs comportements .

2 DEFINITION DES SOLS FINS

Ce sont des sols où les éléments fins dont le diamètre est inférieur à $20\mu\text{m}$ sont prédominant, il existe des différents types de sol fin tel que l'argile, sable fin, limon...etc. lors de la construction, il faut prendre en compte plusieurs propriétés afin d'éviter tout dommage à la structure ou à son exploitation car toute variation en teneur en eau engendre des mouvements dans ces sols. Ce qui mène l'ouvrage à la ruine, pour cela il faut respecter certaines règles :

- ✓ Réaliser un ouvrage dont l'infrastructure convient avec le comportement de ces sols ;
- ✓ Faire appel à la stabilisation des sols fins c'est-à-dire une collaboration sur ces derniers pour réduire leur sensibilité.

Parmi les propriétés des sols fins on site :

- ✓ Cohésion assurée par frottement et forces d'attraction entre les grains;
- ✓ Dépendant de la teneur en eau, de la forme, l'angularité, la compacité et l'effet de surface des grains ;
- ✓ Résistance au cisaillement et à la traction ;
- ✓ Imperméable et gélifs ;
- ✓ Très sensible à l'eau (retrait-gonflement).

Selon la classification on a :

- Grains fins : $5\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$;
- Grains très fins : $2\mu\text{m}$ à $0,2\mu\text{m}$;
- Colloïdes : $\leq 0,2\mu\text{m}$ (Kaolinite, illite, montmorillonite,...).

2.1 Définition des argiles

C'est un sol d'assise pour un grand nombre de construction qui est en effet issue de la décomposition de roches sédimentaires, c'est une vraie richesse millénaire qui n'est pas près de s'épuiser et elle contient des particules fines de diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$ et qui contient des minéraux argileux ou tout autre minéral chargé négativement comme la smectite.

On distingue deux catégories des argiles :

- **Argiles plastiques** : qui sont déformables et molles ;
- **Argiles raides** : qui ont un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité et cela à cause de la présence des carbonates et des quartzs.

D'un point de vue purement chimique, l'argile est composée d'environ 50% de silicates d'alumine hydratés. Elle contient de nombreux minéraux en majorité silice, aluminium, fer, magnésium, calcium, cuivre, sodium, potassium, manganèse...etc.

Tableau 2: Composition minéralogique d'une argile(delcourt, 2011).

Exemple de composition minéralogique d'une argile blanche montmorillonite	
Éléments majeurs	
Silice	61 %
Aluminium	23 %
Fer	12 %
Magnésium	4,5 %
Sodium	3 %
Calcium	2,5 %
Potassium	0,4 %
Manganèse	0,08 %
Éléments mineurs	
Cuivre	0,008 ppm*
Cobalt	< 0,001 ppm
Molybdène	< 0,001 ppm

* ppm = partie pour million.

La différence entre les types d'argiles réside dans leur structure interne soit en feuillets ou une structure fibreuse cette distinction est importante car elle influe sur les pouvoirs d'absorption et d'adsorption de chaque type d'argile.

Tableau 1.2 : Pouvoir d'absorption et d'adsorption des argiles (delcourt, 2011).

	Pouvoir d'absorption	Pouvoir d'adsorption
Argile montmorillonite	*	***
Argile illite	***	*
Argile kaolinite	*	***
Argile attapulgite	***	*
Ghassoul	***	***

2.2 Définition des silts et des limons

C'est une formation sédimentaire dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables c'est-à-dire entre 2 et 50µm contenant une teneur en calcaire

suffisante, la teneur en argile est variable, ils possèdent une capacité de rétention de l'eau. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations. Le silt a une faible perméabilité avec une grande compressibilité que celle du sable ce qui provoque des tassements accrus.



Photo 1.1: Limon en vue macroscopique (Roy, 2015).

Figure 1.1: Limon à l'échelle microscopique (Stéphane Joly, 2011).

2.3 Définition des sables fins

C'est une poussière ou un sablon très fin que le moindre vent emporte lorsqu'il est sec, il provient de l'altération et la désagrégation naturelle des roches et autres matériaux de la surface terrestre. Les sables fins sont plutôt constitués de minéraux détachés.

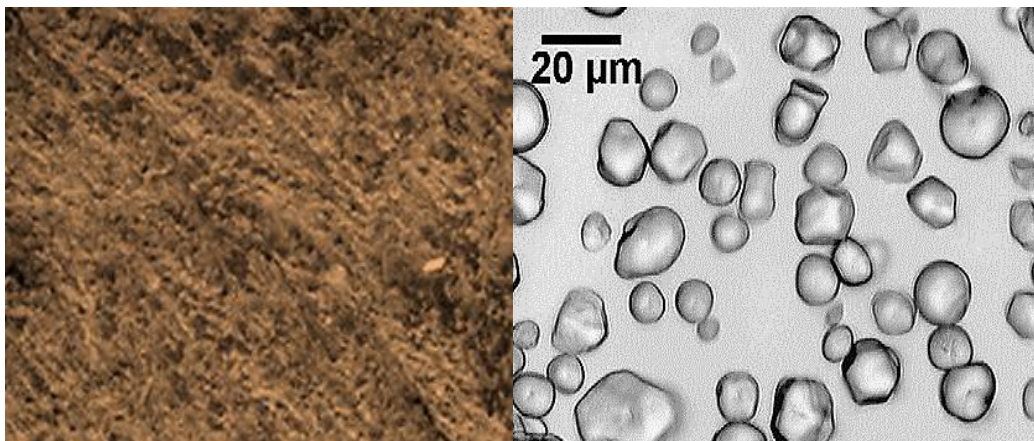


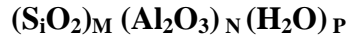
Figure 1.2 : Sable fin à l'échelle Macroscopique (Roy, 2015)

Figure 1.3 : Sable fin à l'échelle Microscopique (Roy, 2015)

3 DEFINITION DES MINERAUX DES SOLS FINS

3.1 Définition des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumine hydratés provenant de la décomposition des feldspaths et des micas, ils ont une formule chimique de la forme :



Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base :

- **Unité Tétraèdre** : au sommet du tétraèdre, il existe quatre ions d'oxygènes (O^{2-}) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres s'ordonnent entre eux pour former une couche tétraédrique.
- **Unité Octaèdre** : au centre d'octaèdre, Un ion d'Aluminium (Al^{3+}) ou bien le magnésium (Mg^{2+}) est équidistant aux six hydroxyles (OH) des sommets. Ces octaèdres se combinent pour composer des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes.

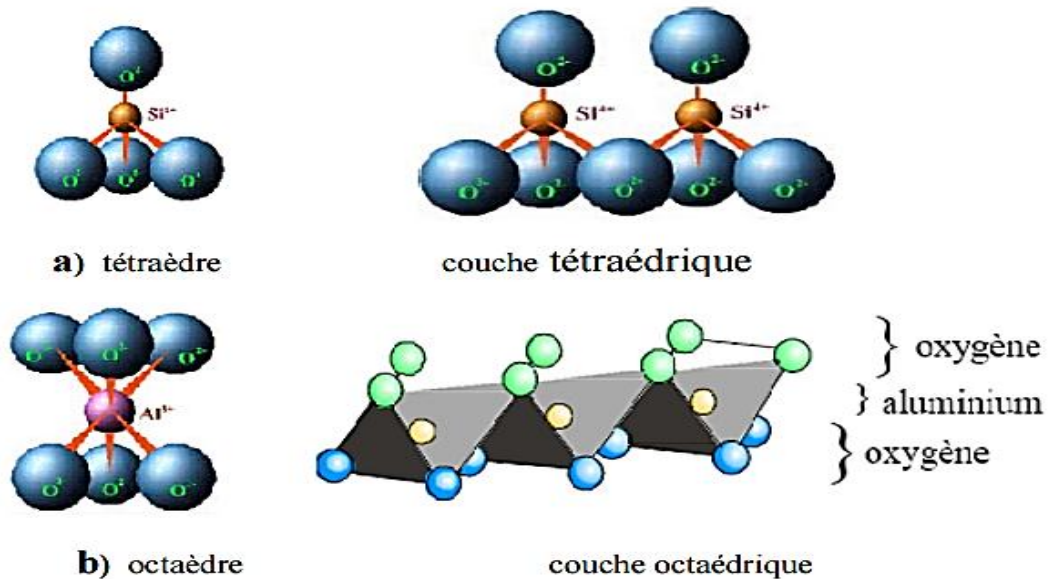


Figure 1.4 : Structure de base des argiles(S.Caillère, 2016).

Sous l'influence de l'altération chimique et d'autres phénomènes, les paquets isolés «feuillets élémentaires» peuvent se rassembler pour former des structures élémentaires appelées micro-agrégats (Filliat G., 1981), illustrer dans la (figure 1.5).

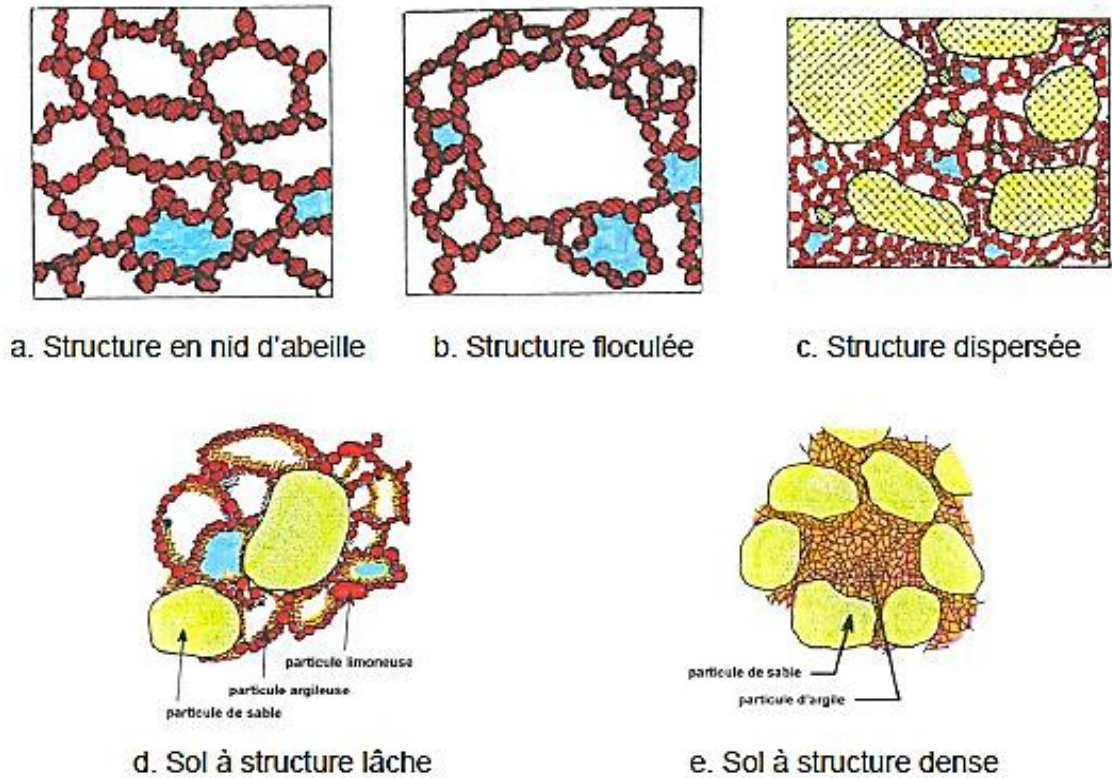


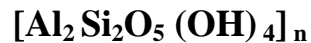
Figure 1.5: Différents structures d'argile d'après TERZAGUI (1951).

A partir des structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles, selon le nombre de feuillets variable par particules et suivant le type d'argile considéré.

Précisons actuellement les propriétés principales des trois grands groupes d'argile :

3.1.1 Les argiles du groupe de la kaolinite

La structure du groupe de la Kaolinite comprenant une couche tétraédrique (Si) et une autre octaédrique (Al). L'ensemble forme un seul feuillet de kaolinite de formule général:



Notons que l'épaisseur du feuillet élémentaire est d'environ 7Å mais les dimensions dans les deux autres directions sont infinies, Les intensités des liaisons d'hydrogènes entre éléments sont fortes ce qui n'autorise pas l'eau de circuler entre les feuillets et alors assurer la stabilité de ce minéral.

La structure de la Kaolinite est donnée dans la figure 1.6:

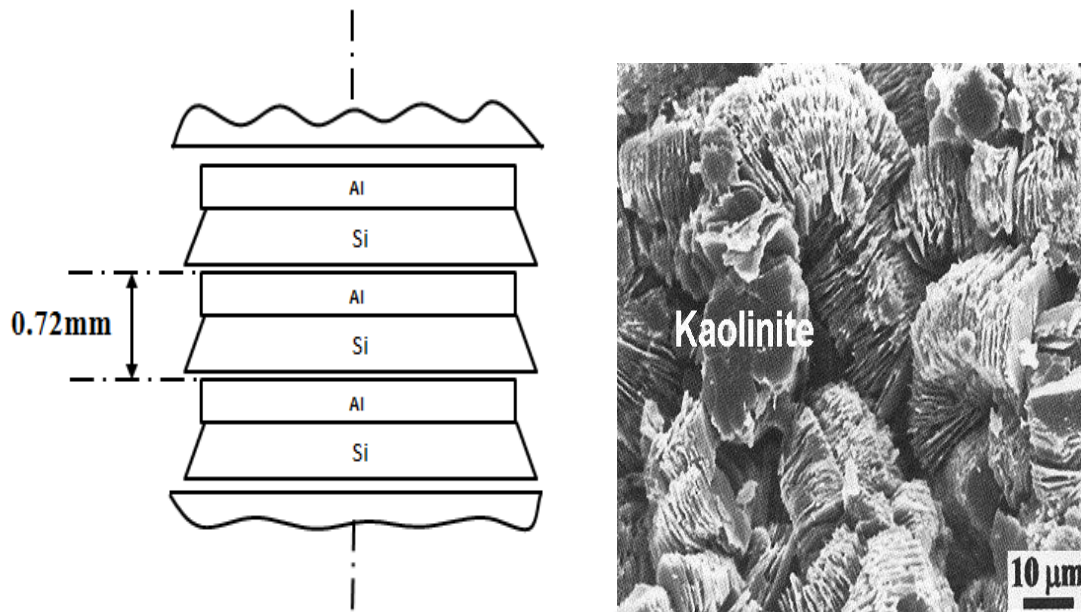


Figure 1.6: Structure de la kaolinite (R.D.HOLTZ, et al., 1991).

3.1.2 Les argiles du groupe de l'illite (MICAS)

L'illite est l'un des minéraux argileux du groupe des micas le plus répandu dans la nature de diamètre équivalent moyen de $0.3\mu\text{m}$ et d'une épaisseur de 100 \AA , il est connue par sa stabilité par rapport la montmorillonite, ils ont la même structure La différence provient du remplacement d'une partie de Si^{4+} par Al^{3+} qui atteint les 20% dans les tétraèdres et une liaison des ions K^+ inter feuillets afin de rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement. Cette liaison rend l'illite une argile non gonflante

La structure de l'illite est donnée dans la figure 1.7:

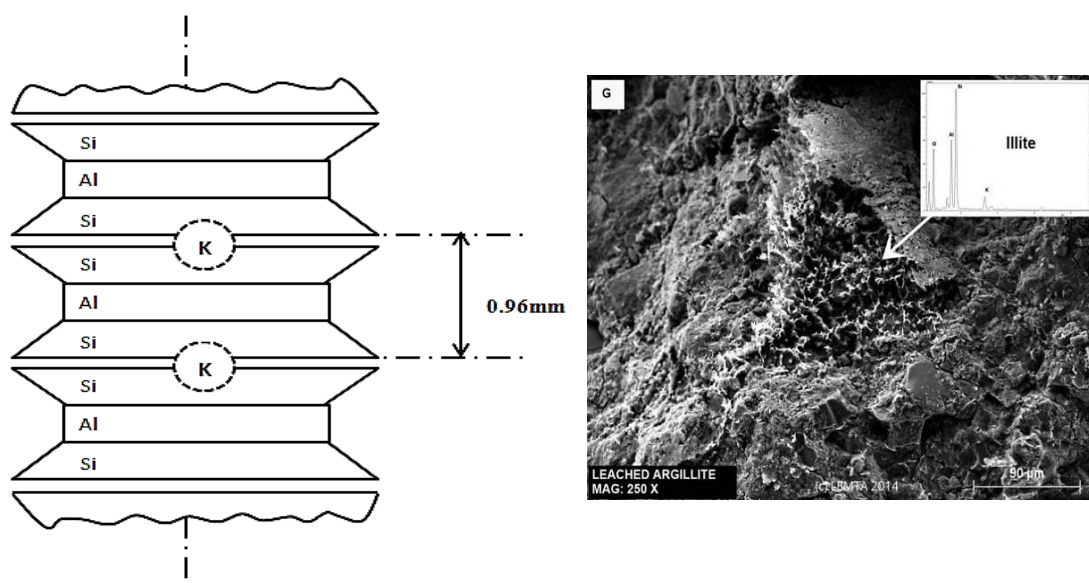
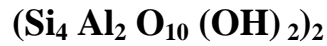


Figure 1.7: Structure de l'illite (R.D.HOLTZ, et al., 1991).

3.1.3 Les argiles du groupe des smectites (montmorillonite)

Elles se constituent d'une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques mais les liaisons entre feuillets sont plus faibles l'ensemble à la formule suivante :



La montmorillonite se caractérise par l'existence entre deux feuillets d'un certain nombre de couches d'eau contenant généralement des cations sodiques ou calciques libres, ce qui entraîne un écartement des feuillets variables suivant les conditions du milieu.

Le déficit de charge est composé par des cations généralement Na^+ ou Ca^{2+} situés entre les feuillets et qui sont échangeables ou compensateurs.

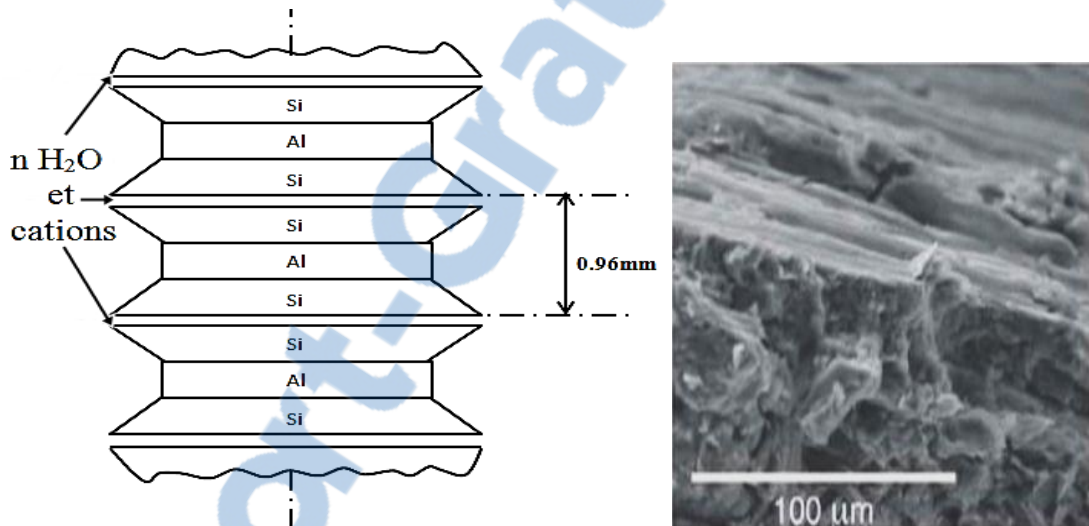


Figure 1.8: Structure de la montmorillonite (R.D.HOLTZ, et al., 1991).

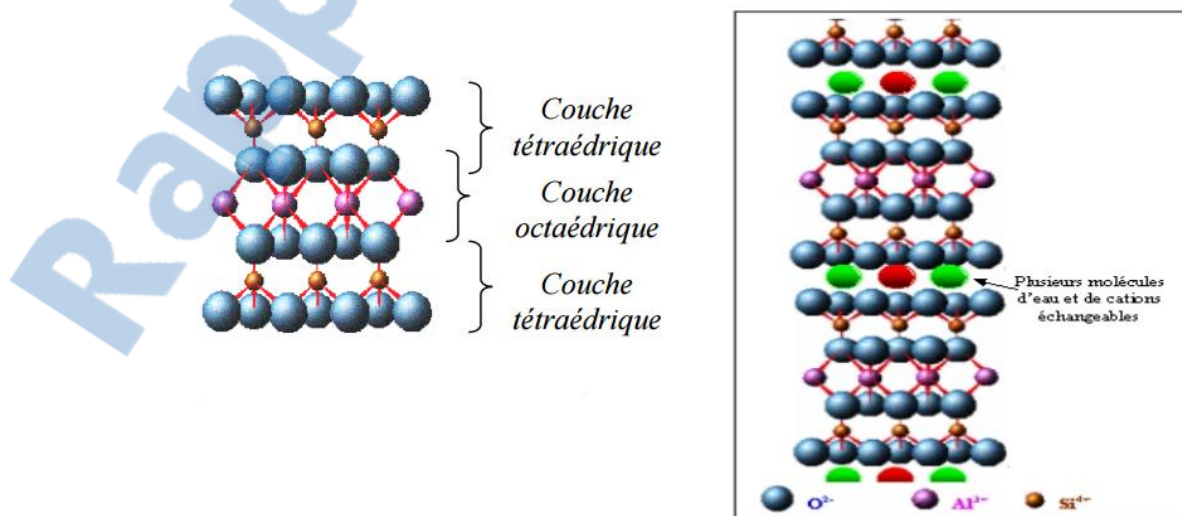


Figure 1.9: Structure élémentaire de smectite(S.Caillère, 2016).

3.2 Définition des minéraux limoneux

Au sein de la fraction limoneuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister comme le quartz qui fait environ 50% de la structure global du limon, les autres minéraux tel que l'hématite, la calcite, l'orthose, l'apatite, et la biotite ont des pourcentages variables et ceci selon la nature du sol.

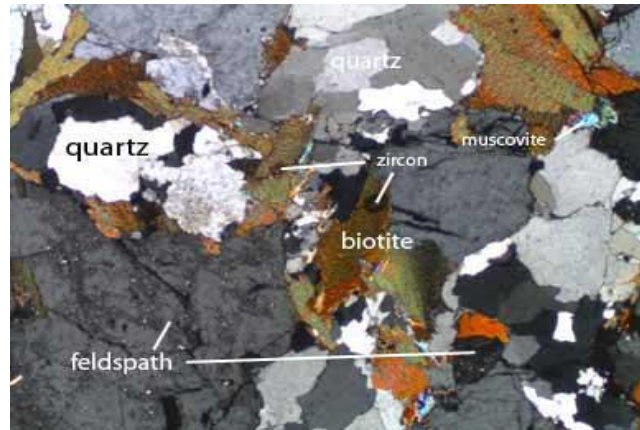


Figure 1.10: Les minéraux limoneux.

3.3 Définition des minéraux de sable fin

Les minéraux les plus abondants dans le sable sont les minéraux qui étaient abondants dans la roche à l'origine de ce sable, accompagné de certains minéraux moins abondants au départ, mais qui se sont concentrés par la suite, le quartz est normalement le premier minéral en abondance dans la composition du sable.

Tableau 1.3 : Classification courante des roches selon la teneur en Carbonate et en argile (Pejon, Le Roux et Guignard, 1997) (BOUDDLAL, 2013).

Classification de Jung		Classification LCPC	
Roche	% d'argile	Roche	% de CaCO ₃
Calcaire	0 à 5	Argile ou Silt	0 à 10
Calcaire Argileux	5 à 35	Argile ou Silt-Marneux	10 à 30
Marne	35 à 65	Marne	30 à 70
Argile Calcaire	65 à 95	Calcaire-Marneux	70 à 90
Argile	95 à 100	Calcaire	90 à 100

4 DEFINITION DES SOLS DISPERSÉS

Les caractéristiques mécaniques des sols dispersés sont notamment déterminées par la nature des liaisons structurelles entre les particules, dont la mesure où la résistance des particules minérales est très grande et leur compressibilité très faible.

Les liaisons structurelles entre les particules des sols argileux peuvent résister à la traction et au cisaillement. La résistance au cisaillement due aux liaisons structurelles est appelée «cohésion ». La propriété de cohésion est tellement caractéristique des sols argileux que, par opposition aux sols pulvérulents (non cohérents), on les appelle « sols cohérents ».

4.1 Interaction entre l'eau et les minéraux argileux

L'eau influence considérablement les sols à grains fins et en particuliers les argiles. La variation de la teneur en eau se traduit par une augmentation de la plasticité et les limites d'ATTERBERG constituant les bornes de cette influence. Il est très rare que la distribution granulométrique soit un facteur déterminant du comportement des sols fins.

De nombreuses propriétés des argiles peuvent s'expliquer à partir des phénomènes physico-chimiques se produisant à la surface des particules.

Les argiles présentent, à des degrés différents suivant leur nature, une grande affinité pour l'eau, la variété des comportements de l'argile vis-à-vis de l'eau peut être attribuée d'une part aux différentes affinités cation-eau, et d'autre part, à l'invention directe du cation dans les forces de cohésion inter feuillets. Lorsqu'une molécule d'eau pénètre entre deux feuillets, elle doit vaincre les forces de cohésion existantes entre les feuillets.

La plus ou moins grande facilité de l'hydratation résulte de la concurrence entre deux processus mettant en jeu :

- Une énergie d'attraction des molécules d'eau qui comprend à la fois l'énergie d'interaction cation-eau, d'autant plus grand que le diamètre cation est faible, et l'énergie due à des interactions entre les molécules d'eau et les feuillets ;
- Une énergie de cohésion inter feuillets qui résulte du rôle du cation (la cohésion est d'autant plus faible que le diamètre du cation est petit) et de l'existence de forces de liaisons entre les feuillets adjacents.

La dispersion proprement dite se traduit lorsque le processus de relâchement des particules est suffisamment grand pour produire un fort déplacement relatif entre les particules (feuillets) constituant le sol.

5 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES SOLS FINS

La composition minéralogique d'un sol fin dépend toujours de la composition de la roche mère d'où il convient, ses particules solides se forment de plusieurs minéraux qui sont divisés en catégories suivantes :

5.1 Les minéraux primaires

Ce sont des minéraux stables qui se résidus de l'altération, parmi eux le quartz, les feldspaths et les micas qui sont les plus riches trouvés dans les sols.

5.2 Les minéraux secondaires

Ils sont obtenus après la dégradation (conversion) géochimique des minéraux primaires, comme ils ont des minéraux argileux simples et inter stratifiés sont inclus dedans ainsi que les oxydes et les hydroxydes (Fe, Mn et Al).

5.3 Les sels solubles

Ces des solutions obtenues de l'altération par hydrolyse déplacent des éléments chimiques actifs tel que Na, Ca, Mg. Ils abandonnent définitivement les sites de l'altération ou ils y demeurent en formant des intervalles minéraux neufs (sel, carbonates ou sulfates).

5.4 Les matières organiques

Elles sont définies par leur comportement d'avoir une capacité de rétention d'eau très importante ainsi qu'une réaction très sensible sur les caractéristiques géomécaniques des minéraux argileux.

6 MICROSTRUCTURE DES SOLS FINS

Selon Collins et al, la microstructure des sols fins résulte des conditions suivantes :

- Acidité ;
- Vitesse de dépôt ;
- Minéralogie des sols ;
- Etat d'agitation de l'eau ;
- Quantité de matière organique ;
- Dimensions et formes de particules ;
- Caractéristiques et charges électriques des ions échangeables ;

- Histoire des sollicitations : séchage, mouillage, charges mécaniques, etc.
- Mode de dépôt et caractéristiques électrochimiques de l'électrolyte au moment de dépôt du sol (concentration, etc.).

Cependant COLLINS et MCGOWN (1974), ainsi que COLLINS (1984), suggère de décrire la microstructure d'un sol à l'aide des trois types d'unités de base suivantes :

- Les espaces vides ;
- L'assemblage des particules ;
- L'arrangement des particules élémentaires, (BOUDLAL, 2013).

7 STRUCTURE DES SOLS FINS

La structure d'un sol indique le mode d'assemblage des composants d'un sol, contrairement à la texture, la structure est fixe c'est un état qui évolue dans le temps.

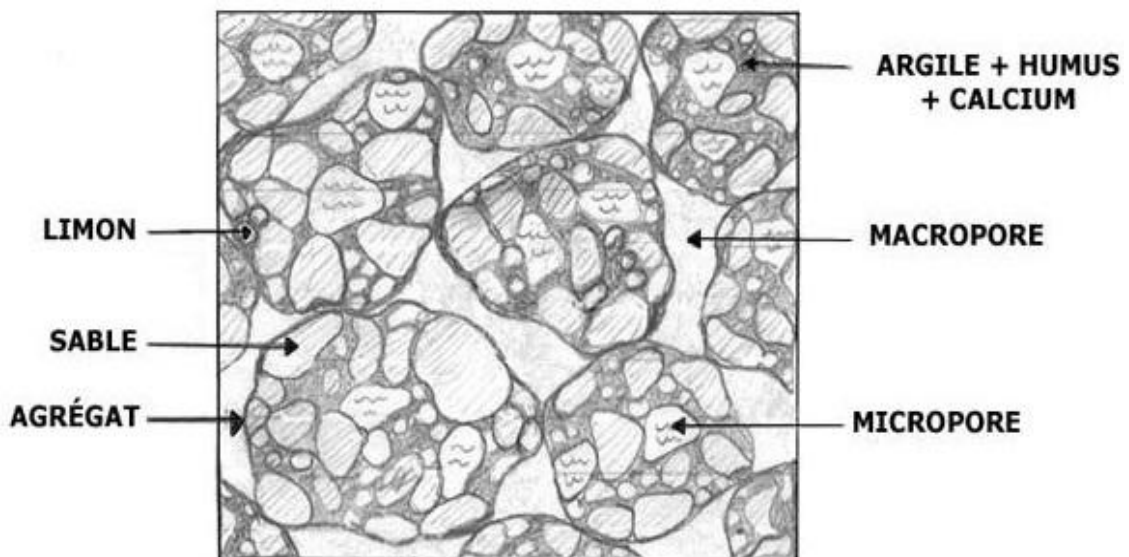


Figure 1.11: Structure générale du sol fin (Fort, 2014).

7.1 Structure fragmentaire/grumeleuse

Quand l'ensemble des grains de sable et de limon sont liés en agrégats. Le sol est perméable et assure une bonne aération.

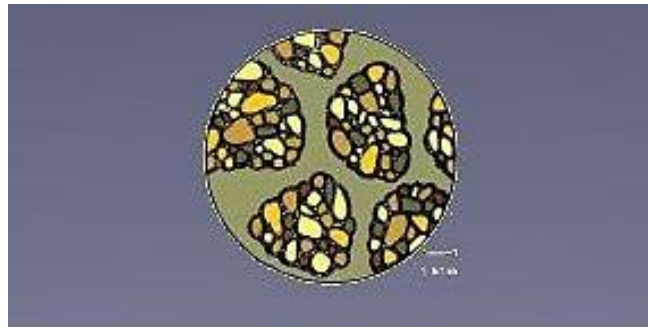


Figure 1.12: Structure grumeleuse du sol fin(Fort, 2014).

7.2 Structure compacte

Cette structure rend le sol «asphyxiant» c'est-à-dire imperméable à l'air et à l'eau et ceci quand l'élément sableux noyés dans une masse d'argile.



Figure 1.13:Structure compacte du sol fin(Fort, 2014).

7.3 Structure particulaire

Le sol est filtrant dans le cas d'existence des éléments sableux de taille variable sans aucune liaison.

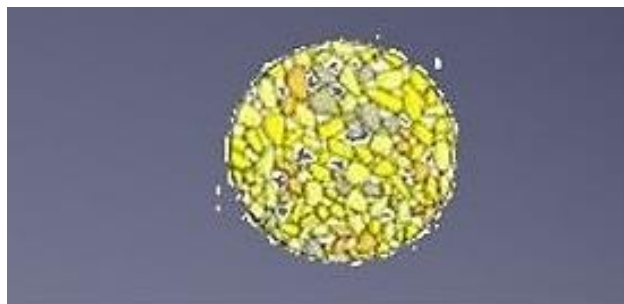


Figure 1.14:Structure particulaire du sol fin(Fort, 2014).

8 TEXTURE DES SOLS FINS

Les diverses propriétés des minéraux du sol déterminent l'usage qu'on peut en faire. L'une de ces propriétés, la texture qui se définit comme la proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol et caractérise la composition

Chapitre 01 Revue bibliographique sur les sols fins

granulométrique de la terre fine. Les particules sont classées selon leur taille comme suit :

- Argiles $< 2\mu\text{m}$;
- Limons fins $2-50\mu\text{m}$;
- Sables fins $50-2000\mu\text{m}$.

Des classes de texture sont déterminées par la répartition des argiles, sables et limons. La quantité de bases échangeables ou le pourcentage d'eau utile est en partie fonction du taux d'argile. Elle joue aussi sur la structure. Ainsi, les sols riches en limons et sables fins ont une mauvaise structure et sont battants.

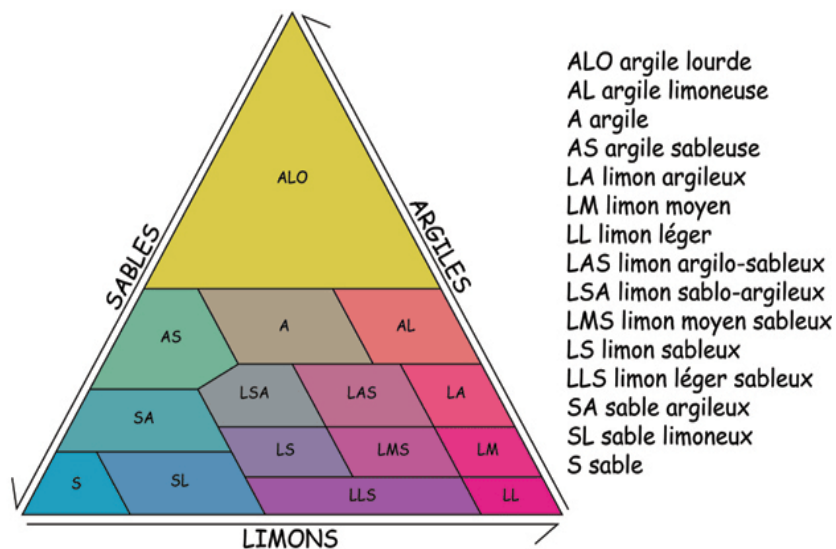


Figure 1.15: Triangle de texture (Maëva BOURGEOIS, 1992).



Photo 1.2: Texture des sols fins.

9 DIFFERENTS TYPES D'EAU

Le phénomène de gonflement peut être relié à une modification des contraintes dans le sol en présence d'eau (gonflement interparticulaire) qui est le facteur majeur provoquant les problèmes dans les sols gonflants. On distingue plusieurs types d'eau :

9.1 L'eau de cristallisation

Ce type d'eau entre dans la combinaison des réseaux cristallins.

9.2 L'eau liée

Il se divise en eau fortement liée de la couche de molécules orientées fixées à la surface des particules minérales et eau faiblement liée des enveloppes diffuses, dont les molécules sont orientées autour des couches d'eau fortement liée.

9.3 L'eau libre

Il est situé dans les pores et interstices des sols.

10 ECHANGE IONIQUE

10.1 Echange cationique

Lors que les substitutions se produisent, un cation de valence élevé est remplacé par un cation moins élevé. La particule d'argile acquiert une charge nette négative.

10.2 Capacité d'échange cationique C.E.C

Elle permet de caractériser un déficit de charge négative et présente la charge positive nécessaire pour atteindre la neutralité.

La propriété importante des argiles est celle de l'absorption réversible de cation tel que Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} et de dipôles d'eau sur les faces basales ou dans les espaces interfoliaires pour ce qui est l'argile gonflante.

11 FORCES S'EXERCANT ENTRE FEUILLET ET PARTICULES

Dans une suspension, les feuillets argileux sont dociles à des forces que l'on classe suivant deux types :

11.1.1 Forces d'attraction

Elles génèrent une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets, parmi ces forces on site :

11.1.2 Forces de van der Waals

Dans les particules, le moment électrique est toujours présent.

11.1.3 Forces de Coulomb

La résultante des forces, qui est de nature répulsive, diminue avec l'augmentation du gonflement, il y a attraction électrostatique entre la surface chargée négativement et le bord chargé positivement de deux particules d'argiles.

11.1.4 Forces de cimentation

Cette force peut être partielle et due au carbonate, oxyde de fer...etc.

11.2 Forces de Répulsion

11.2.1 Forces de répulsion due à la présence de la double couche

Soit deux particules d'argile immergées dans l'eau l'une vers l'autre jusqu'à une distance $2d$ par une contrainte σ (figure 1.16).

(+): cations

(-): charges négative à la surface des particules

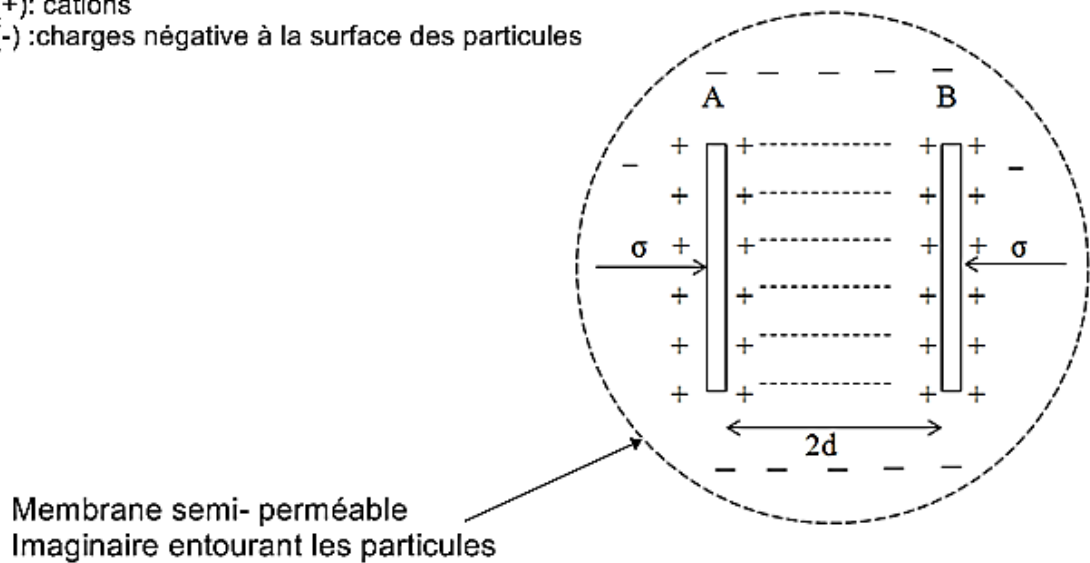


Figure 1.16: Interaction des doubles couches (N.BENMESMOUDI, et al., 1997).

Les cations étant attiré par la surface des particules, les deux couches se chevauchent et la concentration en ion de l'eau à l'intérieur de double couches est plus grande que celle de l'eau libre, le champ électrique agit comme une membrane semi perméable qui laisse l'eau entrer à l'intérieur des doubles couches mais il ne permet pas aux cations de sortir.

En conséquence de la différence de la concentration des ions entre les points tels qu'A et B, l'eau va s'écouler de B à A et la distance $2d$ augmente, ce qui correspond à un gonflement, (AISSA MAMOUNE SIDI MOHAMED, 1999).

11.2.2 Forces de répulsion due à l'hydratation de la surface des particules par les molécules d'eau

Elle peut être résulter de liaison d'hydrogène, des forces de van der Waals et d'attraction électrostatique.

11.2.3 Bilan des forces

Pour une distance entre particules inférieure à 10 \AA , c'est les forces de répulsion qui dominent, au-delà de cette distance, les forces d'attraction emportent jusqu'à 1000 \AA .

12 CONCLUSION

En vertu de tout ce qui précède, et en conformité avec l'analyse de l'ensemble des informations recueillies à partir des différents points cités : il y a lieu de conclure que pour connaître les sols fins et arriver à comprendre leur comportement, il faut passer avant tout par une bonne connaissance des propriétés structurales ainsi une bonne analyse minéralogique est obligatoire et toujours nécessaire pour chaque type de sol avant le commencement de la conception du projet.

Quelques argiles interviennent pratiquement d'une manière chimique, par échange de cation, et d'une manière physique en retenant l'eau dans les vides interparticulaires, mais aussi interfoliaires.

Chapitre02

**LE PHENOMENE DE RETRAIT GONFLEMENT DES
SOLS FINS**

1 INTRODUCTION

Le retrait-gonflement est un phénomène qui concerne exclusivement les sols à dominante argileuse, bien que non dangereux pour l'homme, engendre chaque année sur le territoire mondiale des dégâts considérables aux structures, pouvant dépasser les millions d'euros cumulés. Ce phénomène est sans doute le plus dangereux et paradoxalement le moins connu.

En tant que risque naturel d'origine climatique, ce phénomène est immédiatement lié aux conditions météorologiques et particulièrement aux précipitations. Ce risque est constaté dès les années 1950.

Le phénomène du gonflement est désigné très complexe intervenir plusieurs paramètres, à cause de la structure minéralogique de l'argile, car en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux ce phénomène provoque des fissures plus ou moins importantes, de cette manière crée des désordres dans les ouvrages géotechniques. Notons que les sinistres peuvent survenir tant par retrait que par gonflement. Ces dernières sont la conséquence de la mauvaise prise en charge du mouvement du terrain. C'est pour cela, plusieurs ingénieurs sont souvent confrontés à des problématiques majeures comme l'instabilité des ouvrages dans plusieurs pays du monde tels que Grèce, Iran, Sud d'Afrique, USA et l'Algérie en particulier.

L'intérêt de ce chapitre est de savoir les différents paramètres macroscopiques pouvant influencer le phénomène du retrait –gonflement, et aussi de présenter les lignes directrices qui peuvent mieux faire comprendre ce phénomène.

2 LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT

Un sol argileux est composé d'une multitude d'éléments microscopiques, organisés en feuillets et capables de retenir une certaine quantité d'eau. Il se modifie en fonction de taux d'humidité, tel qu'une augmentation de la teneur en eau provoque le gonflement et vice versa lors de l'assèchement, en présentant la particularité d'apercevoir sa consistance. Les modifications de cette dernière peuvent s'accompagner des variations de volume plus ou moins conséquents qui sont dues à l'interaction eau/solide, aux échelles microscopiques et macroscopiques et d'autre part à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau dans le sol d'assise. Ces sols peuvent être donc cassants et dur, un certain degré d'humidité les transforme en un matériau plastique, mou et plus volumineux qu'à l'état sec.

Le tableau suivant montre les paramètres qui nous amènent à penser qu'une argile peut être affectée par le phénomène qu'on est en train d'étudier.

Tableau 2.1 : Classement de sols argileux sensibles au phénomène (ELBEGGO).

Paramètres d'identification			Susceptibilité de variation de volume du sol
Indice de plasticité (%)	Pourcentage de passant au tamis de 80µm	Valeur de bleu V_{BS} (NF P 94-068)	
> 30	> 90%	> 6	Forte
15 < I_p < 30	> 50%	2 < V_{BS} < 6	Moyenne
< 15	< 50%	< 2	Faible

3 MECANISME DE GONFLEMENT

Le phénomène de retrait-gonflement a été observé dans les structures fondées sur tel sol dont la teneur en eau varie suivant les saisons, après des périodes alternant sécheresse et forte pluviométrie il apparaît fréquemment des fissurations de la construction et même sa destruction pourrait s'en suivre. Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite.

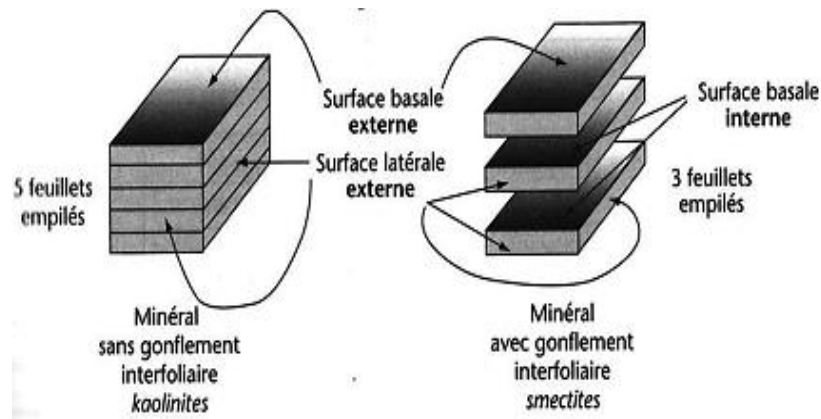


Figure 2.1: Mécanisme de retrait-gonflement des argiles (Calvet, 2003).

3.1 Gonflement au sens physico- chimique

Les phénomènes physico-chimiques et mécaniques varient, ce qui traduit l'apparition d'importantes interactions entre les particules argileuses et l'eau, habituellement illustrées par le modèle de la double couche. Avec des hypothèses très précises, cette théorie permet de quantifier le phénomène de gonflement par rapport aux différents paramètres de l'eau.

Le phénomène du gonflement qui est expliqué par une élévation du volume du sol ou une augmentation des pressions dominantes dans le milieu, aussi peut résulter de la diminution des contraintes en place et ceci soit après un déchargement, une excavation ou bien imbibition du sol, mais dans cette dernière l'augmentation de la teneur en eau ne provoque pas toujours une augmentation de volume.

En effet, par un remplacement de l'air contenu dans les vides, un sol sableux sec ou silteux peut s'humidifier sans augmentation conséquente de volume, contrairement pour les sols argileux où le gonflement qui résulte de forces de répulsion et s'exerce entre les particules entraînant une augmentation de volume.

Afin d'analyser le phénomène de retrait-gonflement et aussi de dessiccation, plusieurs essais ont été élaborés, on spécifie alors deux types de gonflement :

3.1.1 Gonflement interfoliaire (cristallin)

Les feuillets constitutifs de la particule peuvent se séparer à la suite de l'adsorption de molécules, il intervient à l'échelle microscopique de la structure argileuse et présente une ampleur importante.

Le gonflement cristallin entraîne une augmentation de la porosité interfoliaire. Il dérive de l'acquisition d'eau qui écarte les feuillets les uns des autres, et par conséquent une augmentation de volume.

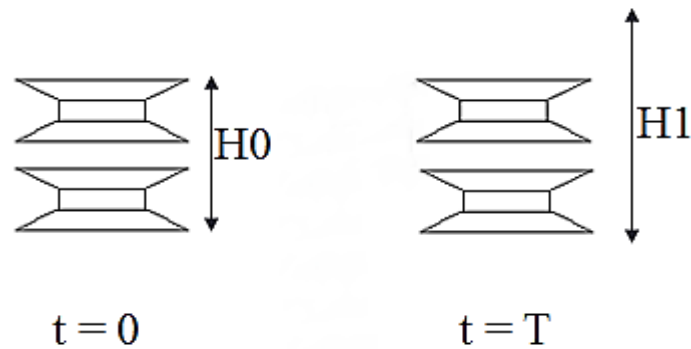


Figure 2.2: Schéma présente le gonflement interfoliaire.

3.1.2 Gonflement interparticulaire (osmotique)

L'augmentation de la porosité affecte toutes les argiles à l'échelle macroscopique et granulométrique avec une ampleur assez limitée, dans ce cas l'eau ne pénètre à l'intérieur des particules argileuses donc l'acquisition d'eau écarte les agrégats de feuillets les uns des autres et provoque un faible gonflement, mais non négligeable.

Le processus de gonflement interparticulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau, c'est-à-dire de l'organisation des plaquettes entre elles.

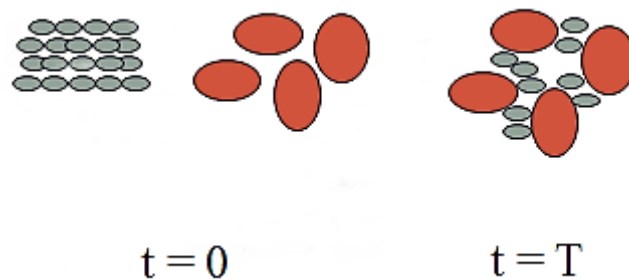


Figure 2.3: Schéma présente le gonflement interparticulaire.

3.2 Gonflement au sens mécanique

En présence d'eau, le phénomène de gonflement de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol.

Un sol est constitué de trois phases :

- Phase solide (les particules sont à l'état solide) ;
- Phase liquide (eau interstitielle en général) ;
- Phase gazeuse (bulles d'air).

Si la phase gazeuse disparaît cela veut dire que tous les vides interparticulaires sont occupés par l'eau interstitielle on dit alors que le sol est saturé.

Si on considère un sol saturé à l'équilibre soumis à une contrainte total σ , selon la théorie de TERZAGHI 1951, cette contrainte se décompose comme suit :

$$\sigma_e = \sigma = \sigma' + u, \text{ Avec :}$$

u : la pression interstitielle de l'eau ;

σ' : la contrainte exercée sur le sol solide (effective).

Si le sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une hauteur h , on aura :

$$u = u_0 = \gamma_w \cdot h .$$

Alors un phénomène de consolidation va se développer si l'on permet au sol de se drainer. On obtient un nouvel équilibre :

$$u_0 = 0 \text{ et } \sigma' = \sigma_e.$$

La succion capillaire du terrain s'exprime alors par la relation suivante :

$$S = u_a - u_w , \text{ Avec :}$$

u_a : présente la pression de l'air dans le sol ;

u_w : présente la pression interstitielle de l'eau dans le sol.

4 CINÉTIQUE DE GONFLEMENT

Comme le gonflement des argiles est très lent à cause de la faible perméabilité et dépend de la nature et de l'état du sol, il est donc essentiel de comprendre la partie mécanique qui est caractérisée par la relation déplacement-temps c.à.d. ($\xi e_0 - \log t$), elle dépend de plusieurs facteurs :

- La perméabilité du sol ;
- La succion ou gradient hydraulique ;
- La structure du sol ;
- La nature du sol et le niveau de chargement.

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique.

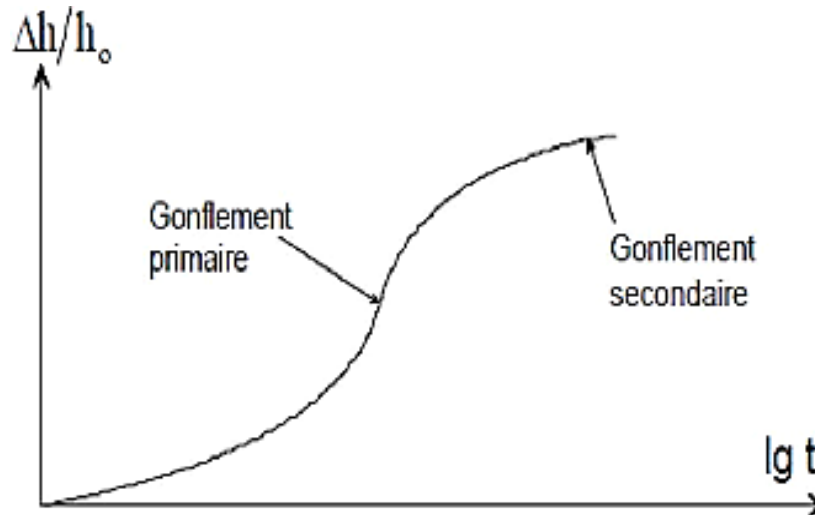


Figure 2.4: Courbe de gonflement en fonction du temps (A. RAOUF, 2015).

Lors d'un essai de gonflement libre ou lors d'un palier de déchargement, il est possible de distinguer deux phases de déformations :

4.1 Gonflement primaire

Le premier intervalle est lié au processus de diffusion ou de migration de l'eau, il est dû à la dissipation de succion dans les macropores du sol et est proportionnellement rapide en comparaison avec le deuxième. Il dépend de plusieurs caractères :

- Le contrôle est assuré par le gradient de charge hydraulique et la perméabilité du sol ;
- Il dépend de la nature du matériau, son état de saturation et l'état de contrainte ;
- La procédure d'imbibition (une seule face ou les deux) ;
- La cinétique est plus ou moins lente et dure de quelques heures à quelques jours.

4.2 Gonflement secondaire

Ce cycle correspond à un processus de cinétique qui est lent et attaché à l'hydratation progressive des minéraux argileux.

5 FACTEURS INTERVENANT DANS LE PHENOMENE DE RETRAIT-GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

Les facteurs intervenant dans ce phénomène se décomposent en deux types :

5.1 Les facteurs de prédisposition

Comme ces facteurs peuvent causer le phénomène de retrait-gonflement sans le déclencher, ils permettent également la caractérisation et la répartition spatiale de la susceptibilité du milieu au phénomène. On distingue :

5.1.1 La nature du sol

C'est un facteur prépondérant dont la susceptibilité du sol qui est fonction de la lithologie, la composition minéralogique, et l'éventuelle continuité des niveaux argileux joue un rôle très important.

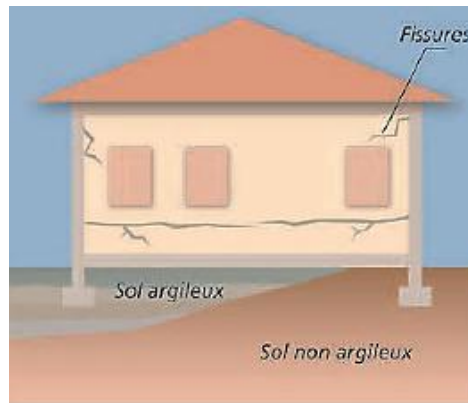


Figure 2.5: Schéma présente la susceptibilité de sol (ministère de l'écologie, 2007).

5.1.2 Le contexte hydrogéologique

C'est l'un des facteurs fatal d'où la présence indéterminée de la nappe phréatique et l'existence de circulations souterraines, qui à son tour peuvent être d'origine à des variations de teneur en eau, provoque le retrait-gonflement.

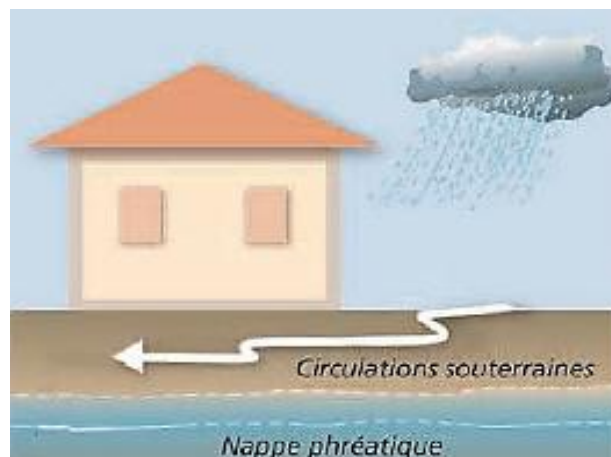


Figure 2.6: Schéma expose l'hydrogéologie (ministère de l'écologie, 2007).

5.1.3 La géomorphologie

C'est elle qui conditionne la répartition spatiale du phénomène à titre d'exemple un terrain en pente entraîne souvent une distance dissymétrie des fondations.

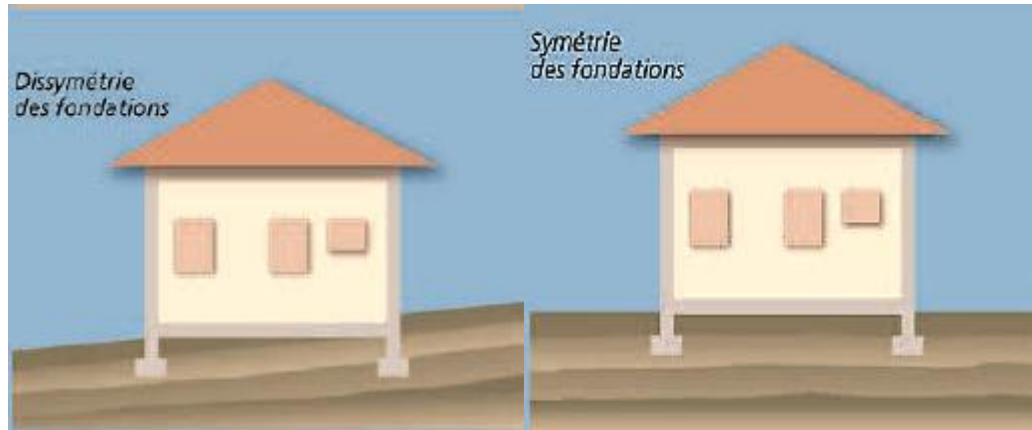


Figure 2.7: Schéma illustre les deux cas de la géomorphologie des fondations (ministère de l'écologie, 2007).

5.1.4 Les défauts de construction

La présence des défauts soit de conception ou de fondation présente une survenance et l'aggravation des désordres qui a leur tour provoque une sécheresse exceptionnelle.

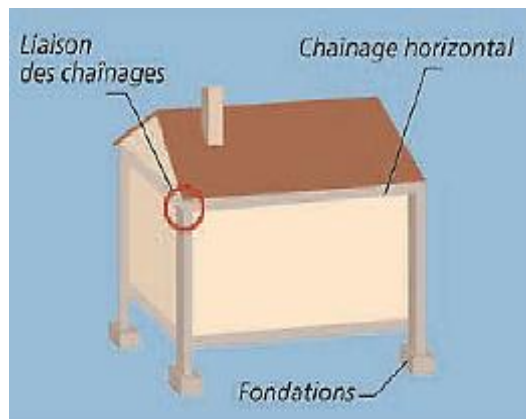


Figure 2.8: Schéma présente les défauts d'une construction (ministère de l'écologie, 2007).

5.2 Les facteurs de déclenchement

Ce sont des facteurs qui provoquent avec leur présence le phénomène de retrait-gonflement. Autrement dit, ils permettent de déterminer l'occurrence de ce phénomène c'est-à-dire l'aléa et la susceptibilité mais n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. On spécifie deux types :

5.2.1 Les conditions climatiques

C'est le facteur principal de déclenchement car les variations de la teneur en eau en une relation directe avec le changement climatique, on parle donc de deux paramètres principaux qui sont mise en jeu :

- ✓ L'évapotranspiration ;
- ✓ Les précipitations.

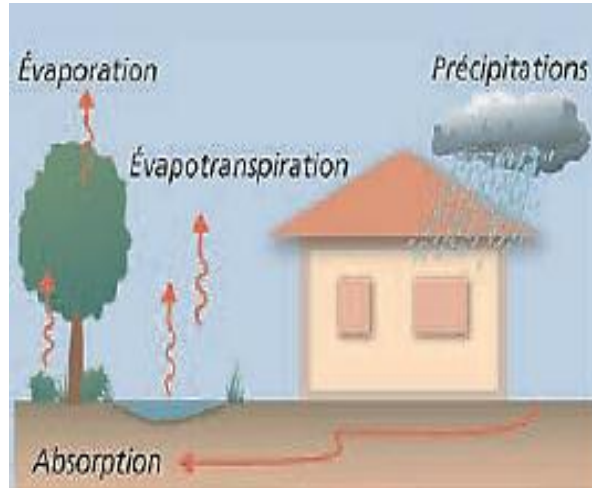


Figure 2.9:Schéma détail les conditions climatiques(ministère de l'écologie, 2007).

5.2.2 Les facteurs anthropiques

Les travaux d'aménagement peuvent causés des variations de teneur en eau souterraine.

La présence d'un réseau enterré humide ou une infiltration d'eau pluviale peuvent avoir un impact sur l'état hydrique du sous-sol et alors le déclenchement du retrait-gonflement.

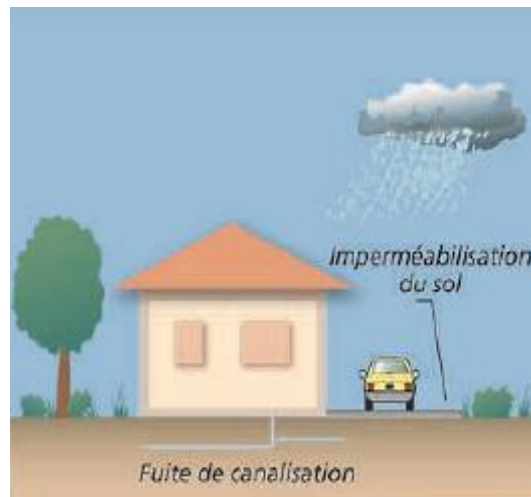


Figure 2.10:Schéma explique les facteurs anthropiques(ministère de l'écologie, 2007).

6 DEFINITION DES PARAMETRES DU GONFLEMENT

Les différents paramètres hydromécaniques des sols gonflants sont complexes à cause de la variabilité des phénomènes physico-chimique et mécanisme à échelles divergent.

On distingue alors trois notions qui dépendent des conditions du gonflement mais ne sont pas considéré comme des caractéristiques intrinsèque du matériau gonflant.

6.1 La pression de gonflement

C'est l'état de contrainte à conditionner pour maintenir le volume constant du sol pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète.

6.2 Le potentiel du gonflement

Il est définie comme étant la déformation maximale qu'affronte l'imbibition du sol docile à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'atteindre la saturation complète.

6.3 L'indice de gonflement

Il est issu d'un déchargement mécanique inversement à la pression et le potentiel de gonflement obtenu à la saturation, il permet de traduire l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre.

7 RETRAIT DES SOLS GONFLANTS

La présence de l'évaporation d'eau dans les pores du sol provoque une diminution du volume. L'assèchement progressif consiste en des tensions capillaires qui sont à l'origine de contraintes de cisaillement.

La résistance à la traction du sol augmente simultanément avec les tensions capillaires, quand elle atteint sa valeur maximale, le retrait s'arrête, la limite de retrait correspond donc à la teneur en eau pour laquelle le retrait est cessé.

Selon (SCHUBERT, 1982), lors le drainage d'un sol, on peut considérer trois phases successives :

➤ **La première phase :**

Les macros pores ont totalement atteindre la saturation (figure 2.11- a).

➤ **La deuxième phase (transitionnelle) :**

Lors l'évaporation des eaux superficielles des macropores, le sol se désature et l'air pénètre dans les pores. Par contre, l'air sera enfermé dans les pores et quelques pores seront encore saturés (figure 2.11- b).

➤ **La dernière phase :**

Le sol garde son volume constant qui sera atteint, et l'air occupe l'espace total des macropores (figure 2.11- c).

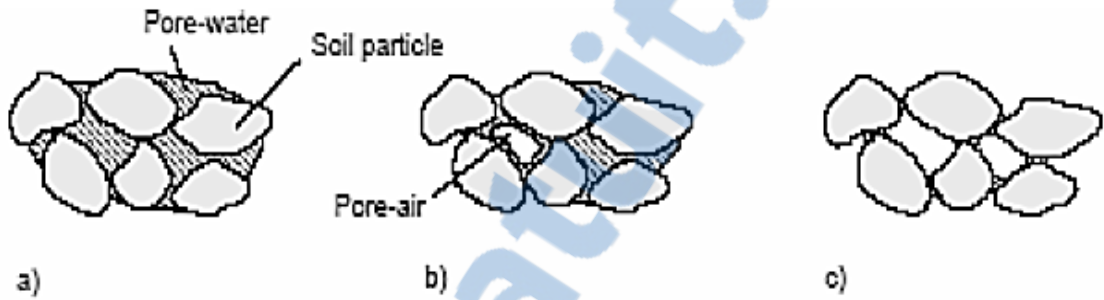


Figure 2.11: Les diverses phases du retrait (SCHUBERT, 1982) .

8 DIAGNOSTIQUE

En alternance saisonnière normale, les variations de teneur en eau perturbent l'équilibre hydrique sur moins d'un mètre de profondeur des sols dits gonflants (argiles à prédominance de montmorillonite).

De même, une sécheresse prolongée peut entraîner une forte évaporation d'eau entre la surface et le banc argileux sur une profondeur de 2 à 4 m (voir schéma). Ce phénomène provoque une importante diminution du volume du sol argileux, ce qui se traduit par un retrait pouvant atteindre une dizaine de centimètres.

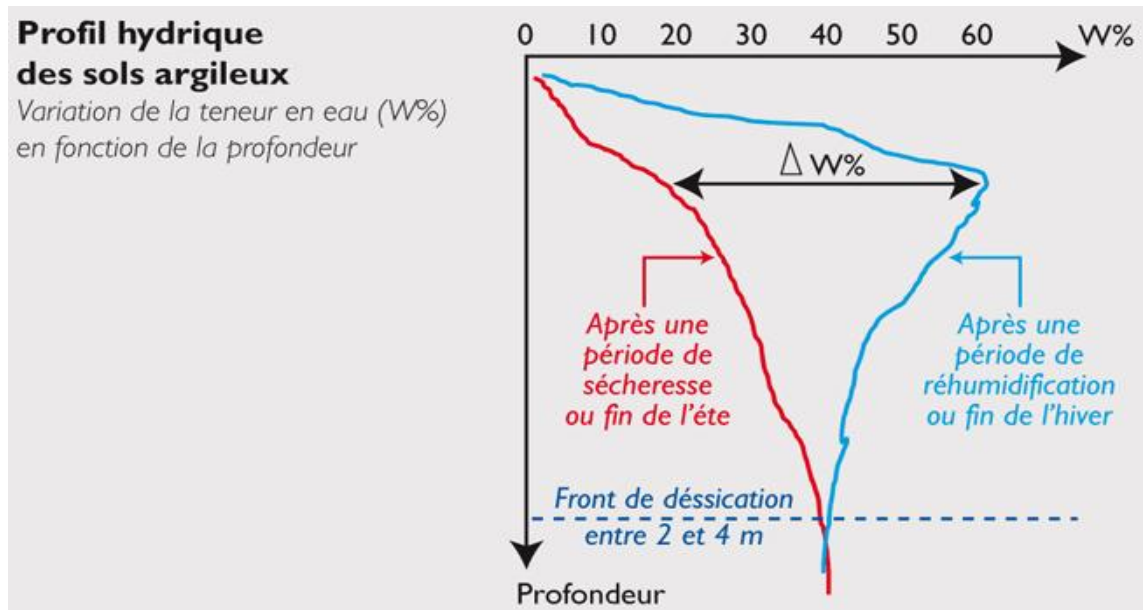


Figure 2.12: Profil hydrique des sols argileux (agence qualité, 2016).

Ces mouvements du sol ne sont pas uniformes sous les bâtiments car ceux-ci forment un écran contre l'évaporation. Des efforts différentiels importants apparaissent donc entre le centre du pavillon et sa périphérie, d'où l'apparition de fissures ou de lézardes.

La nature même des argiles concernées peut donner naissance, lors d'une période ultérieure très pluvieuse, à un phénomène opposé de gonflement qui tend à refermer les fissures.

9 CAS PATHOLOGIQUES SUR LE RETRAIT-GONFLEMENT

Le problème de gonflement est rencontré dans beaucoup de pays tel que : l'Afrique du Sud, l'Arabie Saoudite, l'Australie, le Brésil, le Canada, la Chine, l'Espagne, l'Éthiopie, l'Égypte, l'Inde, la Jordanie, le Maroc, le Mexique, la Palestine, la Roumanie, la Turquie, les États-Unis, le Venezuela...etc. et l'Algérie en particulier à cause du climat méditerranéen semi-aride et aussi la présence des formations géologiques argileuses.

Aux États-Unis, le coût de pertes annuelles occasionnées par le gonflement a été évalué à 2.3 milliards de dollars en 1973, de 7 à 9 milliards de dollars en 1986.

En France le montant a été estimé à 2.3 milliard de dollars entre 1989 et 1992 (AZZOUZ, 2006), aussi l'épisode de 2003 a provoqué près de 140 000 sinistres à lui seul, pour un montant total de plus d'un milliard d'euros.

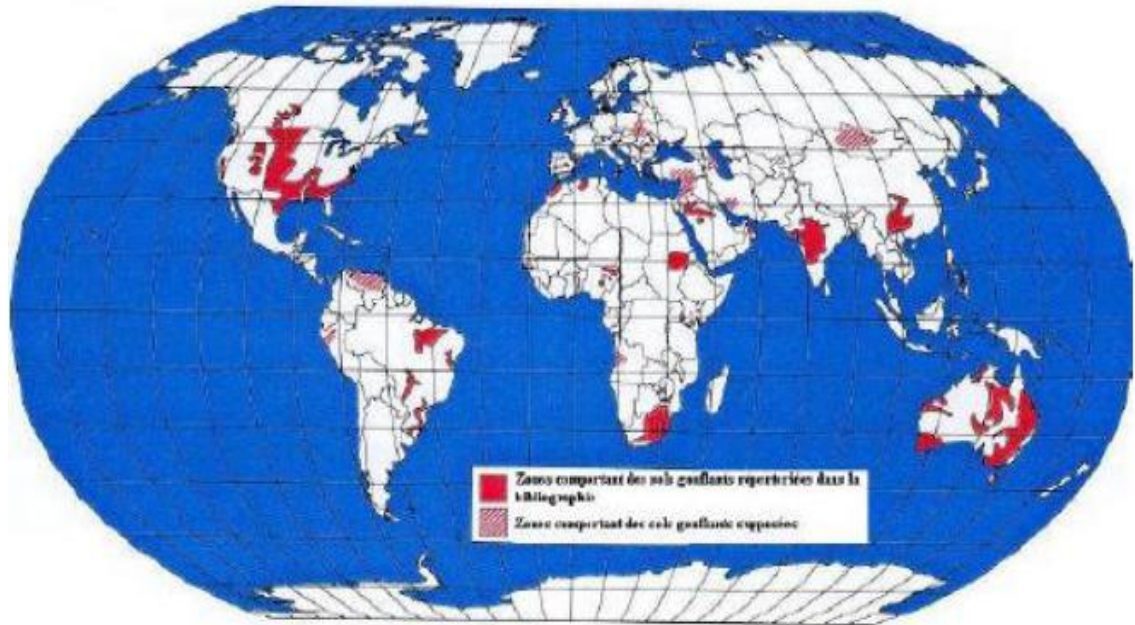


Figure 2.13:La carte mondiale des sols gonflants (P.REIFFESTECK, 1999).

Pour les pays du Maghreb, on remarque que l'existence des sols gonflants est signalée uniquement en Algérie et au Maroc, tandis que des cas pathologiques ont été enregistrés même en Tunisie (BERTHELOT, 2002, TRABELSSI et al, 2002 et KHEMAKHEM et al, 2002) cité par (AISSA MAMOUNE.S.M, 2002).

En particulier, il est à noter que les sols gonflants ne sont enregistrés qu'au centre de notre pays, alors qu'on a pu recenser l'existence de ces sols au Sud-est du pays (Ain-Amenas) d'après les études de DERRICHE et al ,1998 et à l'Ouest d'après (HACHICHI.A et FLEUREAU.J.M, 1999)et (BEKKOUCHE.A, 2001).

Cette existence a causé d'énormes dommages où le chiffre dépasse les dizaines de milliards de dinars (détérioration de la route RN 7A Bab-El-Assa, école primaire Ben Kemila à Nedroma, l'hôpital Sid'Echahmi, cité 100 villas à Ain- Amenas, quelques habitations à Sid'Abdelli, etc.), le groupement de Tlemcen-Mansourah- Chetouane (figure 2.14).

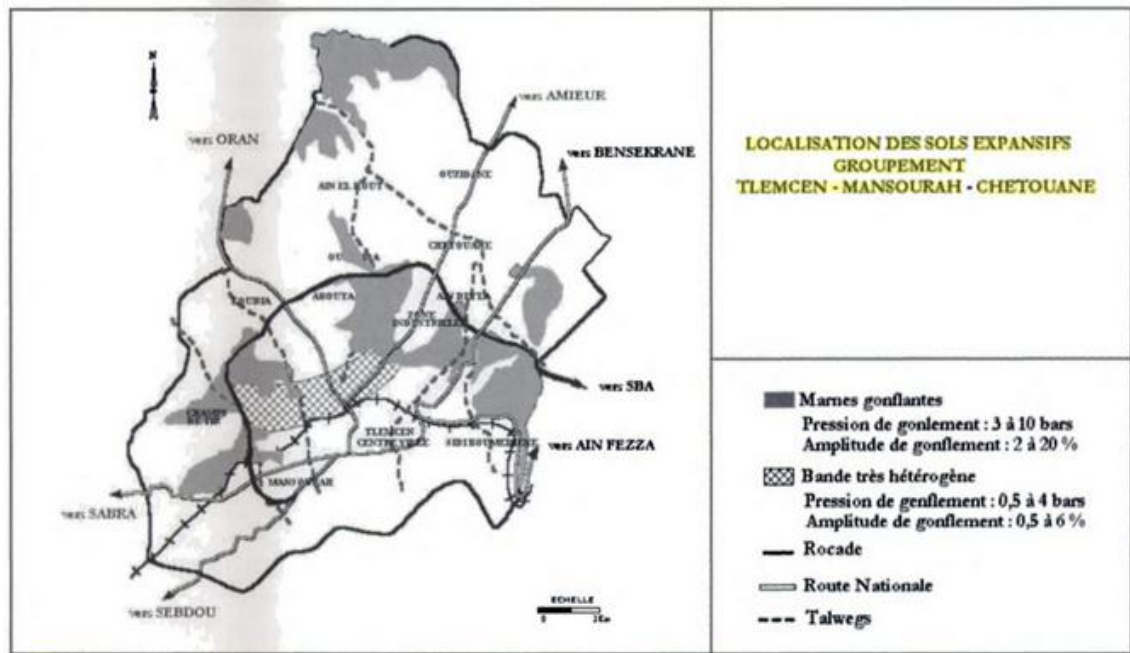


Figure 2.14: Localisation des sols gonflants au niveau du groupement. (H.Di Benedetto, 2003).

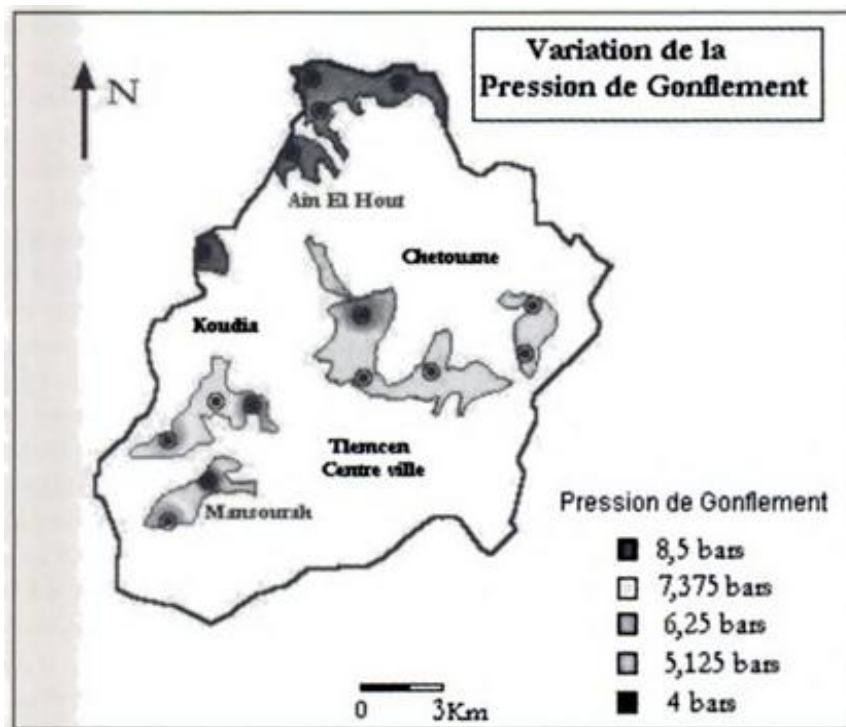


Figure 2.15: variation de la pression de gonflement (H.Di Benedetto, 2003).

10 CONCLUSION

En général on conclut que le phénomène de retrait-gonflement est sans doute dangereux car il représente une part non négligeable dans les sinistres constatés sur les édifices publics ou privés dans le monde entier.

Sa maîtrise demande de grandes connaissances, il est important de mieux comprendre d'une part les mécanismes de déclenchement de ce phénomène naturel et d'autre part les paramètres de gonflement.

En réalité, le processus de gonflement est un processus physico-chimique qui a des conséquences mécaniques.

Les différents facteurs montrent qu'il est difficile de corrélérer un comportement macroscopique à des observations microscopiques.

LE PHENOMENE D'EFFONDREMENT DES SOLS FINS

1 INTRODUCTION

Les désordres importants causés par le phénomène d'effondrement, qui sont due a des mouvements verticaux des sols, ont été constaté dans plusieurs régions du monde, notamment quand elles sont arides ou semi-arides.

Récemment, les investigations de sols se trouvent dans la région Sud Est d'Algérie, ont montré que ces sols sont susceptibles à l'effondrement brusque. Ce problème spécial, qui est une réalité sur le terrain, nécessite de la part du géotechnicien une attention particulière et une maîtrise.

A cet effet, de nombreux chercheurs ont apporté leurs contributions à des recherches concernant l'effondrement des sols et en essayant d'en expliquer les mécanismes.

La littérature a indiqué que la majorité des recherches sur l'effondrement ont été consacrées à l'identification, aux mécanismes, à la prévision et aux méthodes de traitement.

L'objet de ce chapitre est de décrire le phénomène caractérisant le comportement volumétrique des sols fins. Nous décrivons quelques exemples et problématiques rencontrés en géotechnique en nous intéressant aux paramètres de sols qui influencent l'effondrement.

2 PHENOMENE DE L'EFFONDREMENT

Le phénomène d'effondrement indique une réduction considérable du volume due à une augmentation du degré de saturation du sol partiellement saturé, avec ou sans chargement supplémentaire.

Ce phénomène est généralement connu comme étant un phénomène typique des sols non saturés qui intervient par infiltration d'eau dans un sol compact sous contrainte et permet de générer un accroissement de la densité du sol par effondrement de sa structure et aussi caractériser les loëss c'est-à-dire les sols naturels non saturés.

3 L'EFFONDREMENT DES SOLS NON SATURES

3.1 Constitution des sols non saturés

Les sols fins présentent un siège du phénomène de la succion liée à l'action des ménisques capillaires situés aux contacts intergranulaires. La figure suivante présente la structure d'un sol fin non saturé.

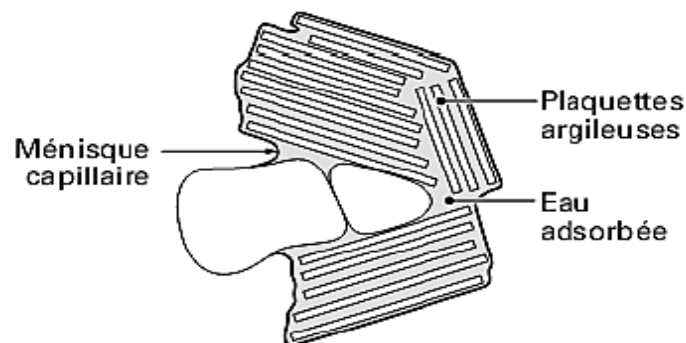


Figure 3.1: Représentation schématique des sols fins non saturés (Wahib, 2013).

3.2 Caractéristiques des dépôts de loëss

La figure suivante illustre les dégâts spécifiques observés sur une cavité d'une couche de limon effondrée, nu et exposé à la pluie. Que normalement même lors des saisons humides, il existe une couche d'argile qui la protège et la permette de rester à l'état non saturé.



Photo 3.1: Troubles aboutis à partir d'excavation soumises aux précipitations.

La Figure 3.2 montre une photo du lœss en microscopie électronique à balayage. On y observe les particules granulaires de taille caractéristique de plusieurs dizaines de microns, ainsi que des agrégations de grains par des plaquettes argileuses. On observe également des pores inter-agrégats de grande dimension, qui seront ceux s'effondrant préférentiellement lors d'un remouillage (Delage, 2014).

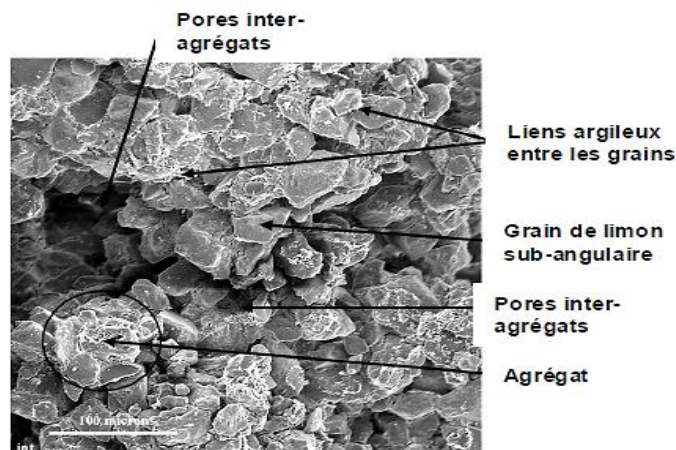


Figure 3.2: Microstructure du lœss (Delage, 2014).

4 LE PHENOMENE D'EFFONDREMENT SOUS CHARGE ET DE GONFLEMENT

Lorsqu'un sol initialement non saturé est humidifié sous une faible charge verticale, une tendance à un léger gonflement est observée. En revanche, si la charge appliquée est suffisamment importante, une réduction de l'indice des vides se produit lors de la mise en eau.

La contrainte verticale influence l'importance des gonflements et effondrements. La figure 3.3 illustre ce cas à partir des résultats des essais œdométriques à succion contrôlée (Kaniki Tshamala, 2008).

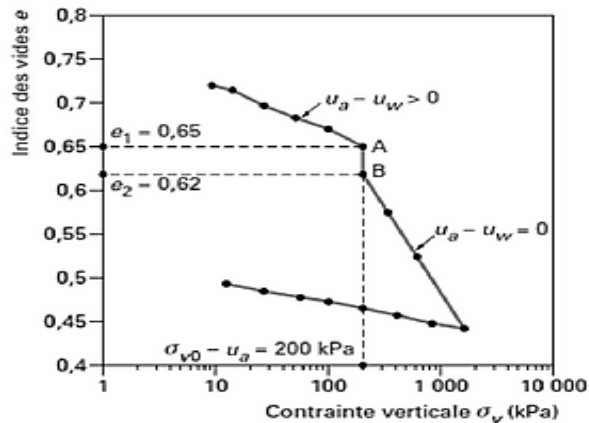


Figure 3.3: Effondrement du loess de Picardie à l'œdomètre (Kaniki Tshamala, 2008).

5 MECANISME D'EFFONDREMENT

Tous les cas étudiés jusqu'à présent ont montré que ces sols ont une structure qui ressemble beaucoup à des nids d'abeilles, dont les grains sont liés sur place par une matière ou une force de liaison. Ces liens sont susceptibles d'une réduction ou d'une élimination en présence d'eau. Une fois le support éloigné, les grains sont capables de glisser les uns par rapport aux autres en se déplaçant vers les espaces vacants. La résistance temporaire de ces sols est pratiquement fournie par différentes matières de liaison dont les principales sont: le limon, l'argile ou des agents de cimentation.

Un grand nombre de mécanismes d'affaissement ont été imaginés, d'après les résultats obtenus sur une variété de sols:

- (Knight, 1961), avait supposé que la résistance des liaisons argileuses entre les gros grains se réduisait par suite d'addition d'eau à l'échantillon sous contrainte. Dès que cette résistance devient inférieure aux contraintes de cisaillement, il y a rupture de ces liaisons et l'affaissement ou l'effondrement se produit ;
- (Barden L., 1969), PRUSZA et CHOUDRY (1979) ont suggéré que l'affaissement est dû essentiellement à l'élimination de la succion capillaire présente dans ces sols qui sont le plus souvent partiellement saturés;

Dans une étude récente (AYADAT et BELOUAHRI, 1996), il a été constaté que la granulométrie a une influence directe sur l'amplitude et le taux d'affaissement. Il a été aussi avancé que la migration des particules fines dans le sol, d'un horizon à un autre (phénomène de suffusion), peut être l'une des causes de l'effondrement (T. AYADAT, 1998).

6 FACTEURS IMPORTANTS DANS L'EFFONDREMENT

Le phénomène d'effondrement dépend de nombreux facteurs. Le tableau 3.1 donne quelques informations sur ces propriétés importantes comme l'état naturel du sol et l'activité de sa fraction argileuse.

Tableau 3.1: Critères pour l'identification des sols effondrables, modifié de (Das, 1995).

Denisov (1951)	coefficient de subsidence $K = \frac{e(w_l)}{e(w_{nat})}$ $K = 0,5-0,75$: fortement effondrable $K = 1,5-2$: non effondrable
Priklonskij (1952)	$K_D = \frac{w_l - w_{nat}}{I_p}$ $K_D < 0$: fortement effondrable $K_D > 0,5$: non effondrable $K_D > 1$: gonflant
Clevenger (1958)	$\gamma_d < 12,6 \text{ kN/m}^3$: tassements importants $\gamma_d > 14,1 \text{ kN/m}^3$: tassements faibles
Gibbs et Bara (1962)	$R = \frac{w_{sat}}{w_l}$ $R > 1$: effondrable
Code Russe de la construction (1962)	$L = \frac{e(w_{nat}) - e(w_l)}{1 + e(w_{nat})}$ $S_r < 60\%$ et $L > -0,1$: effondrable
Feda (1964)	$K_L = \frac{\frac{w_{nat}}{S_r} - w_p}{I_p}$ $S_r < 100\%$ et $K_L > 0,85$ effondrable
Handy (1973)	loess de l'Iowa avec une teneur en argile : $< 16 \%$: haut risque d'effondrement $> 32 \%$: généralement pas de risque
Kassiff et Henkin (1967)	$\gamma_d w_{nat} < 15$: fortement effondrable avec γ_d exprimé en g.cm^{-3} et w_{nat} en pourcentage
e : indice des vides w_{nat} : teneur en eau naturelle w_p : limite de plasticité w_l : limite de liquidité I_p : indice de plasticité ($w_l - w_p$) S_r : degré de saturation γ_d : poids volumique sec	

(Yudhbir, 1982), a isolé d'autres facteurs importants comme : le type de sol (minéralogie, granulométrie), la nature des agents de liaison et de cimentation, la contrainte appliquée, le degré de saturation et la densité initiale, la quantité et la dynamique de mouillage (nappe phréatique, infiltration des eaux de pluies). On voit apparaître les agents de liaison entre particules du sol, qui n'apparaissent pas dans le tableau 3.1 puisque ils sont difficiles à mesurer. Pourtant l'existence de ces liaisons est primordiale car leur affaiblissement est à l'origine du phénomène d'effondrement. (Barden, 1973), ont postulé que les trois principales conditions à l'origine du phénomène d'effondrement sont :

- ✓ une structure ouverte, potentiellement instable et partiellement saturée ;
- ✓ une contrainte existante ou supplémentaire suffisamment importante ;
- ✓ des éléments de liaison suffisamment résistants pour stabiliser les contacts intergranulaires et relativement faibles pour disparaître ou être fragilisés lors de l'imbibition.

6.1 Nature géologique du sol

La liste des modes de déposition géologique pour lesquels le phénomène d'effondrement a été observé (Dudley, 1970) (Clemence, 1981) (ALFI, 1984) est assez vaste. On peut citer les dépositions d'origine :

- Eolienne : sables, loess (limons altérés et transportés par le vent) ;
- Aérienne : cendres volcaniques ;
- Colluviale : débris de roche tombés par gravité d'une pente ou d'une falaise ;
- Alluviale : apporté par des coulées boueuses et des cours d'eau ;
- Résiduelle : altération physico-chimique des roches mères ;
- Anthropique : sols compactés par l'homme (remblais, barrages en terre, ...).

Cependant, la connaissance du type de dépôt ne permet pas d'en déduire le niveau d'effondrement du sol du fait de l'importance d'autres paramètres. En revanche, elle informe sur son histoire et son état physico-chimique.

6.2 Granulométrie

(Rogers, 1995), a listé les principaux types de sols effondrables en les classant suivant leur taille caractéristique: sableux (sable granitique et du Kalahari d'Afrique du Sud, sable éolien du Sahara), limoneux (loess de tous les continents) et fins (cendres volcaniques), (Herrera, 2007) et (De Simone, 2010).

Moins connus, les sols cimentés du Nigeria, les sols gypseux de Russie ou encore les sols salins de Chine sont aussi effondrables (Rogers, 1995). Par l'énumération de ces exemples variés, Rogers souhaite montrer qu'il n'y a pas qu'une famille de sol à risque, et que jusqu'à preuve du contraire, le sol devrait toujours être considéré comme effondrable dans chaque projet de construction. Il propose une classification des sols à risque et de leur mécanisme de formation et révèle les principales formations de sol effondrables : les sols résiduels et les loëss.

La figure 3.4 présente la courbe granulométrique de différents sols résiduels effondrables et montre que le phénomène d'effondrement est susceptible d'apparaître dans de nombreux types de sols de tailles caractéristiques différentes : diamètre moyen D_{50} des particules de quelques micromètres à quelques millimètres. Cependant, l'influence de la granulométrie sur le niveau d'effondrement n'est pas encore très bien comprise.

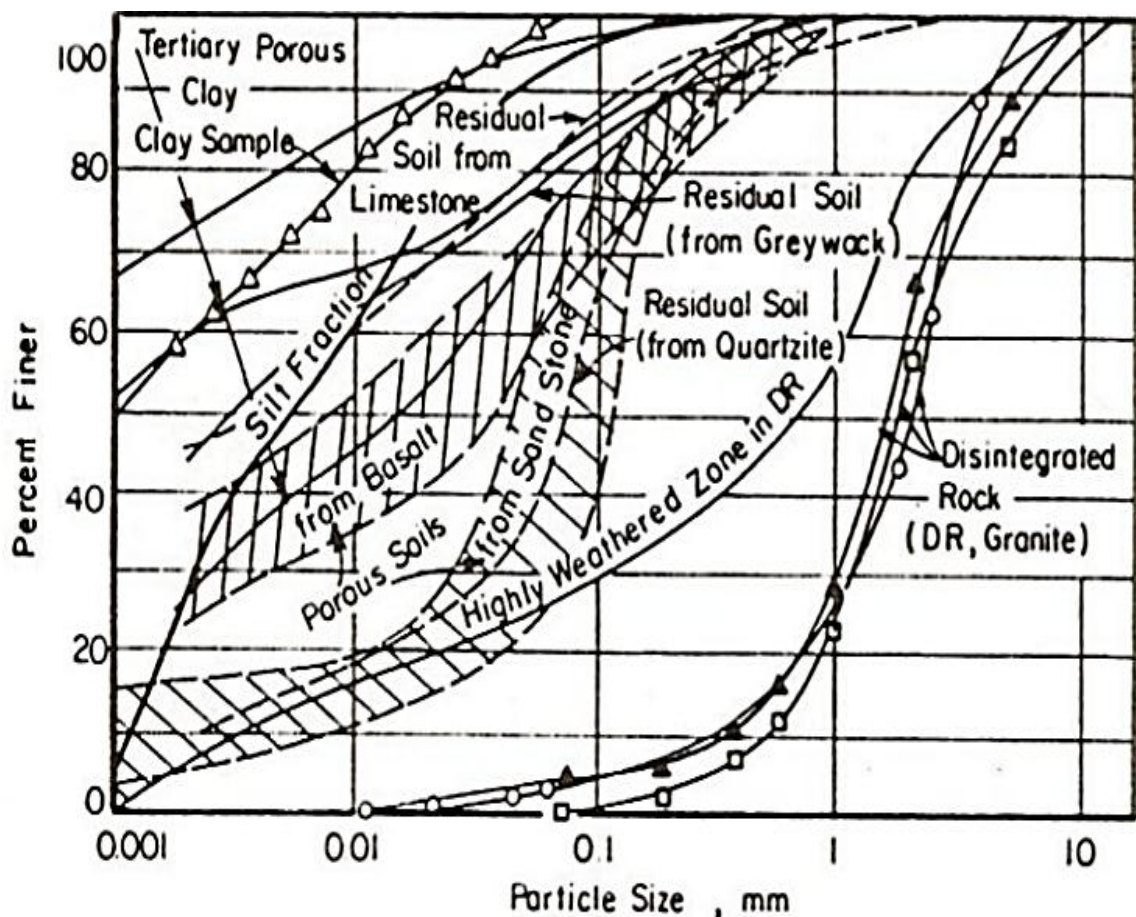


Figure 3.4 : Courbe granulométrique de sols résiduels effondrables d'après (Yudhbir, 1982).

6.3 Nature des agents de liaison

(Northey, 1969)(Barden, 1973), et plusieurs d'autres ont permis de présenter les types de liaisons entre grains à l'origine d'une cohésion dans les sols non saturés. Trois types de cohésions sont rencontrés :

✓ **Cohésion capillaire entre grains de sable ou de limon**

La cohésion capillaire tire son origine des ménisques d'eau présents entre grains de sable ou de limon qui sont en dépression par rapport à la pression atmosphérique (voir figure 3.5a)

✓ **Cohésion induite par des plaquettes d'argile réparties autour de grains de sable ou de limon**

Cette cohésion est due aux plaquettes d'argile qui garantissent la tenue du mélange et une meilleure résistance au cisaillement à faible teneur en eau. Quand cette teneur en eau augmente, les plaquettes d'argile perdent leurs caractéristiques mécaniques et libèrent les grains. La répartition de la fraction argileuse dans le sol peut être soit en surface des grains (figure 3.5b) soit sous forme floculée au niveau des contacts intergranulaires (figure 3.5c).

✓ **Cohésion chimique par des oxydes de fer, des carbonates de calcium ou mécanique par d'autres matériaux d'apports comme les liants hydrauliques**

Elle est exprimée par la cimentation chimique qui est visible par exemple dans les loess en présence de particules de carbonate de calcium ou dans les sables rouges chargés en oxydes de fer. Ces liaisons se forment soit par précipitation pour les carbonates de calcium soit par dépôt pour les oxydes de fer.

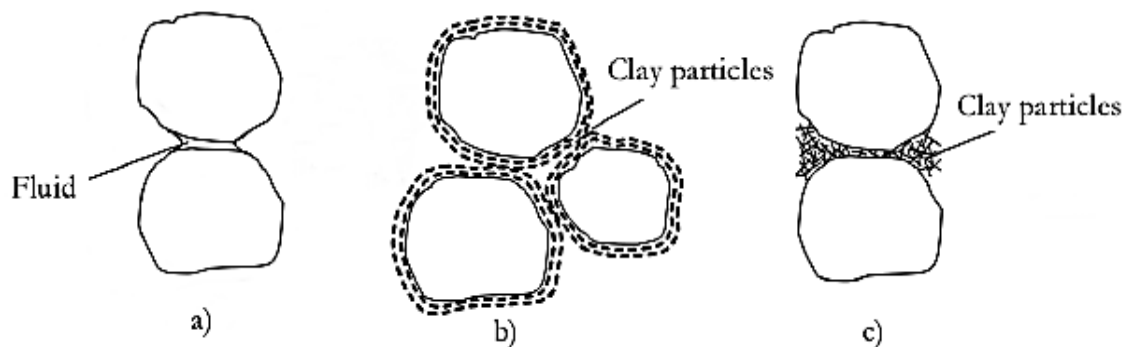


Figure 3.5: Principales liaisons intergranulaires d'après (Barden, 1973).



7 CAS PATHOLOGIES PROVOQUEES PAR L'EFFONDREMENT

La figure 3.6 présente un cas caractéristique d'argile sujette au phénomène de gonflement et d'effondrement après humidification.

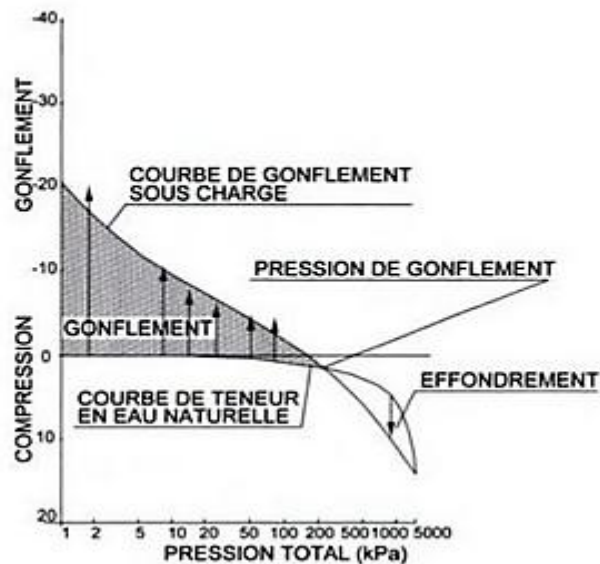


Figure 3.6: Expansion et effondrement d'une argile compactée d'El Arahal (Séville, Espagne).

On cite la ligne LGV qui relie Paris à la frontière Belge, dont il est connu par la présence des loess (Delage, 2005).

Un autre exemple d'effondrement d'un sol non remanié par l'être humain, est le phénomène de subsidence à grande échelle observé dans les années 50 au cours de la construction du canal de la vallée de San Joaquin (figure 3.7), en Californie (Poland, 1975).

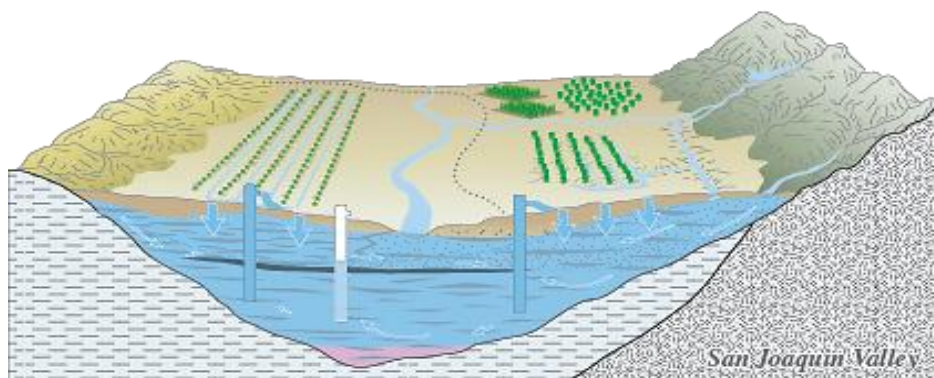


Figure 3.7: La vallée de San Joaquin, Californie.

Bien que les exemples concernent généralement des sols fins, le sable est aussi sujet au problème d'effondrement sous imbibition. Au Koweït, un niveau trop faible de

Chapitre 03 Le phénomène d'effondrement des sols fins

compactage d'un sable calcaire a entraîné des dommages aux infrastructures routières et aux bâtiments alentours (Ismael, 1987) et a engendré des coûts importants de remise en conformité.

Un autre exemple. Sevrans, une commune française, inquiet des risques d'effondrement liés au gypse.

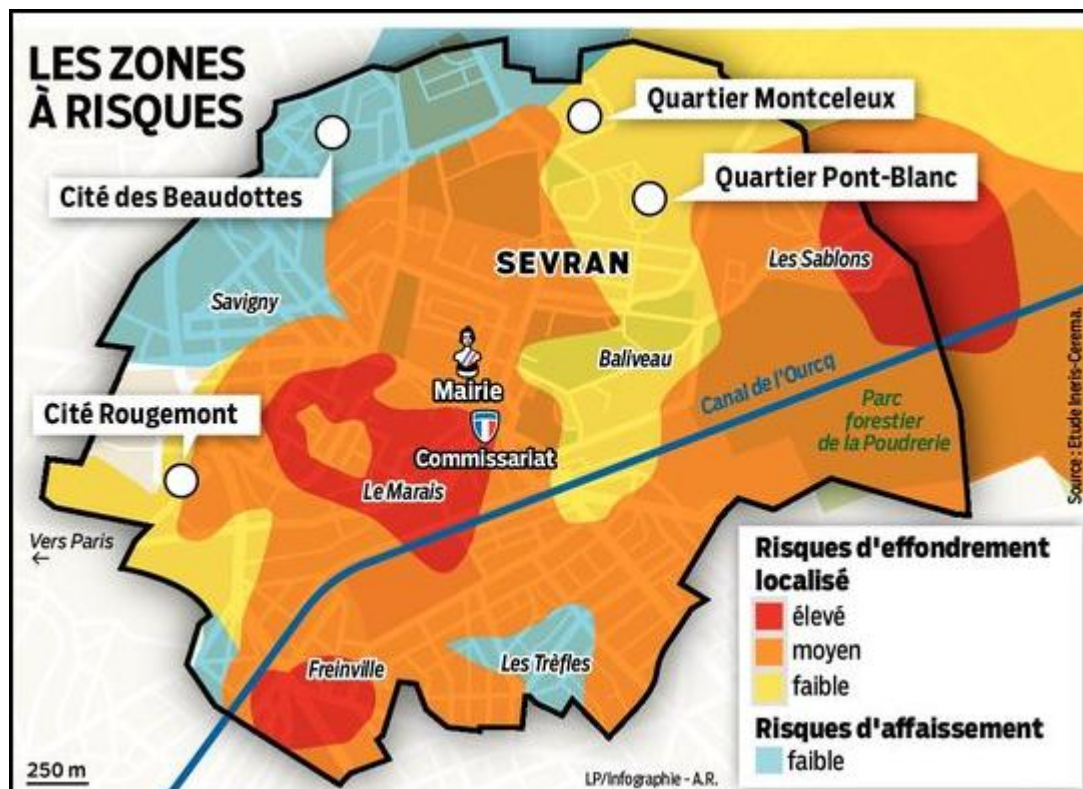


Figure 3.8: les zones à risques d'effondrement à SEVRANS (C.S, 2016).

Le dernier exemple que nous souhaitons aborder est un cas d'effondrement par séchage. Relativement rare mais meurtrier, ce phénomène s'observe sur les plages où des structures en sable (tunnels, trous) s'effondrent brutalement, piégeant parfois des victimes (Maron, 2007). L'évaporation de l'eau initialement présente est à l'origine de la perte de stabilité. Sur ces accidents, les secours ont beaucoup de mal à repérer et dégager ces victimes piégées dans un milieu au comportement complexe.

Ces exemples présentent la variabilité des degrés d'effondrement et la différence des sols susceptibles de s'effondrer, il est nécessaire donc de prendre en considération l'importance d'une bonne reconnaissance des sols pour diagnostiquer la présence ou non de sols effondrables.

8 CONCLUSION

Nous constatons que le problème d'effondrement de sols par imbibition touche certains sols naturels. Des critères d'identification ont été développés depuis 60 ans et sont à utiliser avec précaution. Une large palette de solutions peut permettre de stabiliser un sol effondrable. Ces observations ne permettent cependant pas de comprendre précisément les mécanismes locaux à l'origine de l'effondrement.

Un sol fin peut s'effondrer sous certaines conditions et qu'il est possible de rendre cet effondrement progressif lorsque l'apport d'eau est contrôlé.

Le géotechnicien doit toujours chercher à évaluer, au laboratoire ou sur site, l'amplitude des tassements attendus et proposera le cas échéant des solutions de traitement adaptées au site et à son environnement.

LE PHENOMENE DE LA DISPERSION DES SOLS FINS

1 INTRODUCTION

La dispersion des argiles est un phénomène principal qui affecte plusieurs parties dans le monde, c'est le facteur essentiel de nombreux dégâts constatés des ouvrages.

Dans le domaine du génie civil, les argiles dispersives posent un grand problème comme l'érosion. En effet, elle mènent les constructions à des risques néfastes, c'est pour cela qu'il est toujours nécessaire de passer par une étape préliminaire des sols dans chaque projet, c'est-à-dire une étape qui consiste à faire une étude d'identification au cours des différents phases d'exécution de l'ouvrage, surtout une étude bien profonde sur la dispersion des différents sols fins spécialement des argiles vu qu'ils sont les plus menacées.

Il est important de faire une revue globale sur les différents essais qui sont déjà utilisés afin de caractériser la dispersion des argiles, sachant que les chercheurs géotechniciens ont déjà réalisés de nombreux tests qui facilitent l'identification.

Donc ce chapitre est sacrifié en gros pour comprendre d'une manière générale ce phénomène avec ses mécanismes, et aussi pour présenter brièvement les principes de ses essais d'identification.

2 LA DISPERSION

La dispersion ou bien la défloculation est un phénomène physico-chimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'argile et faciliter leur mobilité. C'est aussi l'extension d'une partie d'un sol cohérent combiné à un affaissement de la masse fracturée de matériau cohésif dans un autre matériau sous-jacent plus tendre, la dispersion résulte même de la liquéfaction ou de l'écoulement des matériaux tendre (figure 4.1). Les argiles dispersives sont plus dangereuses, car elles sont plus sensibles au contenu ionique de l'eau de la retenue.

Les matériaux dispersifs sont en général sodiques, contenant des quantités relativement élevées de sodium échangeable, mènent à décomposer les particules humides.



Figure 4.1: Schéma de dispersion (BOUDLAL, 2013).

3 LA DISPERSION D'UN SOL FIN

Les argiles dispersives sont un type particulier de sol dont lequel la fraction d'argile érode en présence d'eau par un processus de défloculation. Cela se produit lorsque les forces interarticulaires de répulsion sont supérieures à ceux de l'attraction afin que les particules d'argile se détachent et vont en suspension (Forrest, 1980), cité par (BELARBI, 2014).

4 MECANISME DE DISPERSION

On parle de la dispersion d'un sol lorsque les forces répulsives sont supérieures aux forces de Van Der Waals et cela arrive quand deux particules d'argile se rapprochent bien l'une à côté de l'autre. Les forces de répulsion sont équilibrées par des forces attractives de Van Der Waals.

Les forces de répulsion de la double couche diffuse sont affectées par plusieurs facteurs (Fell and al, 1992), cite par (BELARBI, 2014) :

- La concentration d'électrolytes : une forte concentration de sel dissous dans l'eau de sol conduit à une petite double couche diffuse (comme la plus grande concentration de cations (Na^+) permet de surmonter plus facilement la charge négative sur la surface de l'argile). C'est pourquoi les forces de répulsion sont plus faibles ;
- Valence de cation : l'échange des cations Na^+ par des cations Ca^{2+} conduit à une plus petite double couche diffuse, et donc petites forces répulsives.

5 PARAMETRES INFLUENCANT LE PHENOMENE DE DISPERSION

La principale propriété de l'argile donnant une susceptibilité à la dispersion est la quantité des cations de sodium présents dans la structure minéralogique. Sachant que la dispersion se produit aussi quand les pressions de gonflement causent des fractures entre les particules d'argile. En équivalent, il existe d'autres facteurs qui influencent la dispersion comme la concentration du PH, le sel et la variation de la teneur en eau. Le tableau 4.1 ci-dessous distingue les facteurs qui favorisent la dispersion.

Tableau 4.1 : facteurs influençant la dispersion.

	Facteur favorisant la dispersion
Sol	Présence de cation de sodium
	Le type d'empilement des feuillets pour former des agrégats dans le cas de la montmorillonite
	La présence d'une structure argileuse de type TOT (empilement de couche tétraédrique/octaédrique/ tétraédrique) rencontrée pour les montmorillonites ou les illites
Fluide	Faible concentration en sel
	pH élevé

On distingue deux types de facteurs :

5.1 Facteurs liés à la structure du sol

5.1.1 Type des minéraux argileux

La minéralogie d'argile a un effet très important, la dispersion varie selon le type de minéral argileux. Par exemple pour les sols qui contiennent de la montmorillonite sont les plus dispersifs, tandis que ceux qui contiennent de l'illite sont modérément dispersifs, alors que pour la kaolinite est considéré comme non dispersive.

5.1.2 Pourcentage de sodium

Le Sodium comme élément chimique avec sa charge ionique (Na^+) est un principal agent dispersant. Les ions de Sodium parviennent à initier la dispersion à partir de la création d'un potentiel osmotique assez important lors du déplacement de l'eau entre les particules.

5.1.3 Mode d'assemblage des feuillets

Le mode d'empilement des feuillets dans une structure argileuse est important, la dispersion peut se produire aussi en fonction des différents modes d'assemblage des feuillets malgré la faible concentration du Sodium.

Les particules argileuses qui se forment de montmorillonite se présentent en paquets constitués d'un conglomérat de quatre à neuf feuillets empilés de forme parallèle. Ce type de structure présente une préférence pour les ions de calcium dans les couches intérieures de l'empilement, Ainsi une réorganisation des cations attirés se produit. Les ions de sodium se mettent en surface du paquet et sera petit à petit couverte par des cations de sodium liés, jusqu'à une certaine concentration sodique limite. Au-delà de ce niveau, les ions de sodium commencent à pénétrer entre les couches intérieures et un gonflement interne de la structure où séparation des paquets dans des unités plus petites peuvent apparaître, produisant ainsi la dispersion.

5.2 Facteurs liées aux eaux interstitielles

5.2.1 Concentration en sel

La composition chimique des eaux interstitielles joue aussi un rôle sur la dispersion, ce qui affecte la géométrie de la double couche diffuse et la charge électrique. En conséquence, l'épaisseur de la double couche diminue quand la concentration en sel augmente et cette diminution est précise jusqu'à une certaine concentration au-dessus

de laquelle les forces attractives sont dominantes et les particules ne peuvent se disperser. En effet, si la concentration en sels dans l'eau d'érosion augmente, la dispersion diminue.

5.2.2 Concentration du PH

La dispersion des sols est influencée aussi par la concentration du PH de l'eau par la modification de chargement électrique des feuillets argileux. Le PH de l'eau dépend aussi de sa concentration en ion H^+ .

Lorsque le PH est faible, les ions H^+ sont attirés en grand nombre vers la surface des feuillets produisant une diminution du chargement électrique négatif (Olphen, V, 1963 cité par Tarog, 2000), les forces d'attraction entre les charges de différents signes apparaissent, ce qui diminue la dispersion de l'argile. D'où la capacité de dispersion augmente avec l'augmentation du PH, (BELARBI, 2014).

6 CARACTERISATION DES SOLS DISPERSIFS

Une identification d'un sol est obligatoire avant la construction de n'importe quel ouvrage en terre, les argiles dispersives doivent être détectées en premier parce qu'elles ont tendance à être très sensibles à l'érosion spécialement en présence d'eau. Sachant que la dispersion d'un sol dépend de plusieurs variables tels que la minéralogie des argiles en premier lieu, la composition chimique et la concentration en sel des eaux interstitielles.

Afin de déterminer la dispersion des sols argileux, un certain nombre d'essais peut être effectué :

6.1 Pinhole test

Nommé aussi l'essai de Trou D'épingle, le principe de cet essai consiste à faire circuler de l'eau distillée dans un petit trou de 1mm de diamètre pratiqué dans un échantillon du sol.

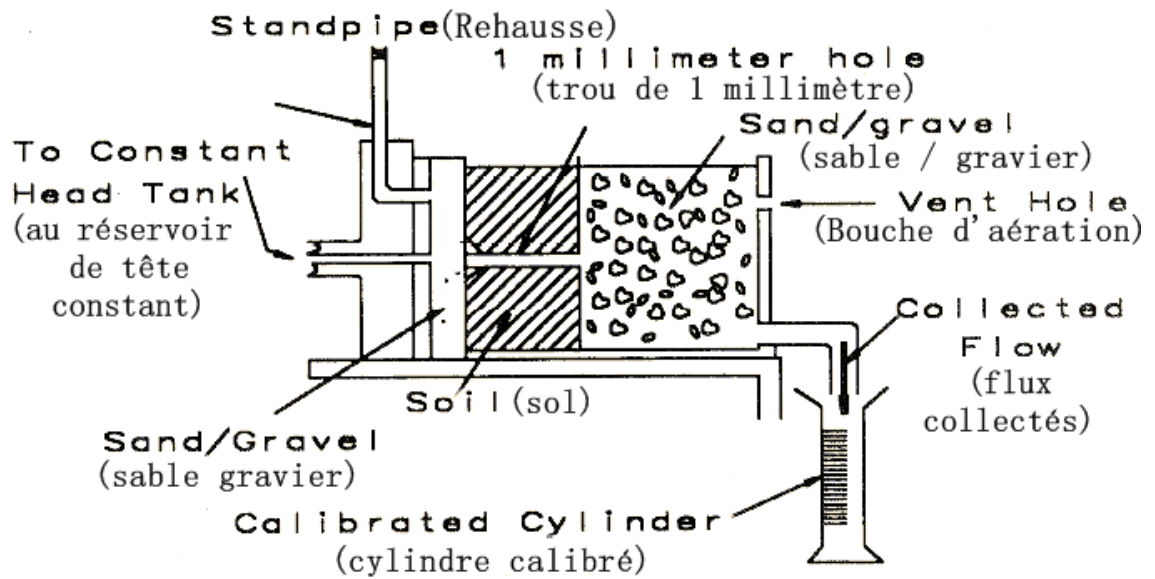


Figure 4.2 : Détail de la cellule de Pinhole test (NELSON, 1991).

6.2 Crumb test

Surnommé aussi Essai d'Emiettage, le principe de cet essai est basé seulement sur des observations qualitatives directes. Comparativement avec les autres tests, cet essai est considéré comme plus simple et facile on l'utilise souvent comme complément aux autres tests. L'essai n'est pas applicable pour des sols dont le pourcentage des fines ($<0,005$ mm) est inférieur à 12% ; ainsi pour les sols dont l'indice de plasticité est inférieur à 8%.

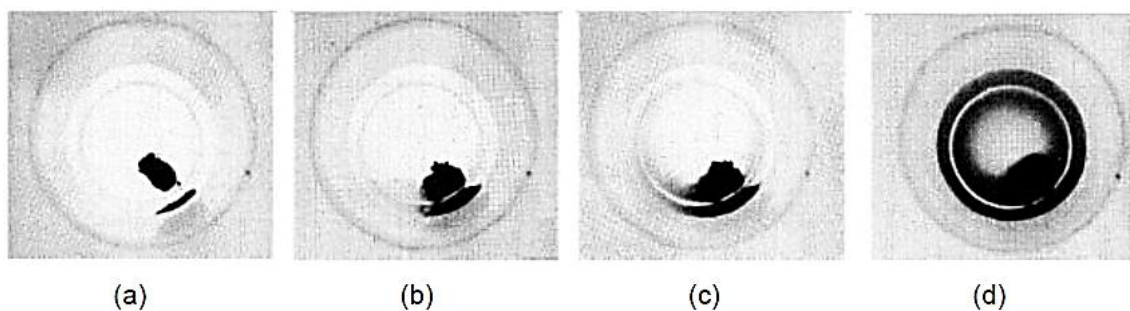


Figure 4.3: Essai typique du Crumb test (Nelson, 1991), cité par (BELARBI, 2014).

6.3 L'essai chimique

Il s'agit des essais sur l'eau interstitielle, dont les quantités des principaux sels en solution sont assimilés à un ensemble d'éléments majeurs comprenant plusieurs cations et anions (Pansu and Gautheyrou, 2006) cité par (BELARBI, 2014)

La détermination au laboratoire des sels solubles du sol passe par trois étapes :

- Leur extraction par l'eau sous différents rapports sol/solution (extrait saturé, extrait aqueux 1/1, 1/5, 1/10,....) ;
- La mesure de la concentration globale en sels de l'extrait (conductivité électrique, matière solide dissoute) ;
- Le dosage des différents cations contenant dans l'extrait.

6.3.1 Extrait de saturation

L'essai s'agit de peser 250g ou 500 du sol et malaxer par la teneur en eau de liquidité préalablement déterminer par l'ajout d'eau dessillée et filtrer la pâte sous vide. Ensuite recueillir le filtrat et doser les sels solubles par :

- Spectrophotomètre de flemme pour les cations : K^+ et Na^+ ;
- Spectrophotomètre d'absorption atomique : Ca^{2+} et Mg^{2+} .

6.3.2 Extrait au 1/5

Le mode opératoire consiste à mettre 50 g de sol passée au tamis de 2 mm et 250 ml d'eau déminéralisée dans un flacon à agitation durant 1 heure, puis transverse le contenu du flacon dans les tubes à centrifuge durant 5 à 10 minutes à 2000 tours/minute. Enfin filtrer la solution pour doser les sels solubles comme indiquer dans l'extrait à saturation.

Tableau 4.2 : Classes de dispersion à partir du ESP (Knodel, 1991) cité par (Bouziane, 2014)

ESP	Degré de dispersion
< 7	Non dispersif
7 à 10	Intermédiaire
> 10	Dispersif

6.4 Essais de sédimentation en parallèle (Double Hydrometer test)

Les études portant sur la dispersion des sols montrent que les particules fines (<5µm) jouent un rôle significatif. L'idée de la méthode utilisée dans l'essai de sédimentation en parallèle est de comparer la tendance des particules fines d'un sol, à sédimenter respectivement dans l'eau distillée sans agitation mécanique (sédimentation normale) et dans une solution défloculante avec agitation mécanique (sédimentation dispersée). L'essai est applicable seulement aux sols qui ont plus de 12% de fines (<5 µm) et dont la plasticité est supérieure à 4.

La différence entre ces deux types de sédimentations montre la tendance à la dispersion naturelle du sol examiné. Le degré de dispersion du sol est calculé selon la formule suivante :

$$\%D = \frac{\%fine < 5 \mu m \text{ sans dispersant}}{\%fine < 5 \mu m \text{ avec dispersant}} \times 100 = \frac{A}{B} \times 100 (\%)$$

Si D est proche de 100%, le sol est complètement dispersif, autrement dit, l'argile déflocule naturellement dans l'eau. En revanche, si D est très faible (proche de zéro) le matériau est non-dispersif, c'est-à-dire que l'argile reste flocculée en condition normale (sans agent dispersant et sans agitation mécanique) dans l'eau.

7 CONCLUSION

Le Crumb test est l'essai le plus simple à réaliser (in situ ou au laboratoire), il donne des résultats rapides mais elles restent qualitative, donc l'essai peut être utilisé comme indicateur rapide pour caractériser la dispersion des sols.

Le Pinhole test est l'essai le plus fiable, tandis que Le double hydromètre test donne généralement des résultats similaires à ceux de Pinhole test.

Les essais chimiques sont un bon indicateur de dispersion de sols par la quantification de pourcentage de sodium qui est considérés le facteur principal qui provoque le phénomène de dispersion.

LES TECHNIQUES DE STABILISATION

DES SOLS FINS

1 INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, les sols fins sont devenus un sujet d'intérêt des chercheurs et des ingénieurs géotechniciens, les dégâts engendrés par leur comportement sont énormes puisqu'ils se caractérisent par plusieurs propriétés qui les rendent complexe et ceci est dû principalement à leur structure minéralogique. C'est pour cela ils ont travaillé à fin de trouver plusieurs méthodes d'amélioration des sols fin pour résoudre les problèmes de stabilité et de minimiser voir ignorer les désordres ou les déformations qu'ils rencontrent lors de l'élaboration d'un projet.

De nombreuses techniques ont été développées par ces ingénieurs au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces et aussi économique car elles ignorent le rejet des sols inutilisables et les remplacer par d'autres sols. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière.

Il existe trois objectifs qui assurent le but de la stabilisation et qui permettent aussi d'améliorer la résistance mécanique et de diminuer la sensibilité à l'eau:

- La réduction du volume des vides interarticulaires solides ce qui provoque une augmentation de la compacité ;
- Boucher les vides à éviter ;
- Améliorer les liaisons existantes interarticulaires et créer des liens ce qui résulte une résistance mécanique.

Donc dans ce chapitre on va exposer les différentes techniques de stabilisation utilisées en pratique pour les différents phénomènes liées aux argiles.

2 LES DIVERSES TECHNIQUES DE LA STABILISATION DES SOLS FINS

Dans la géotechnique, les procédés à utiliser pour stabiliser surtout les sols argileux sont nombreuses. Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

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

Le tableau suivant montre les principaux avantages et inconvénients de chaque procédé.

Tableau 5.1:Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées (A.BEKKOUCHE).

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation Mécanique	Compactage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le compactage est le plus économique. ▪ Réduire le potentiel expansif. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Il faut une grande quantité d'eau (compacter au-dessus de l'optimum avec une W_n élevée).
	Substitution		<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'épaisseur de la couche. ▪ Disponibilité du matériau.
	Préhumidification		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le temps de l'opération. ▪ La distribution uniforme de W_n.
	Méthode de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimiser l'humidification ou dessèchement. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La sensibilité à la variation de la teneur en eau.
Stabilisation thermique	Augmenter la température	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduire la répulsion électrique entre les particules. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très coûteuse.
Stabilisation chimique	Les sels	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. ▪ Réduire le phénomène d'échange. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le choix du type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (valence et rayon du cation).
	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmenter la résistance. ▪ Diminuer la plasticité. ▪ Réduire le potentiel de variation de volume. ▪ Augmenter la limite de retrait. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation d'un dosage important.

	La chaux	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. ▪ Augmenter la résistance et Wopt. ▪ Utilisation d'un faible dosage. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carbonatation de la chaux.
--	----------	---	--

2.1 Stabilisation chimiques

Le stabilisant sera choisi selon la nature physique du sol, la figure 5.1 schématise les conditions d'utilisation chimique.

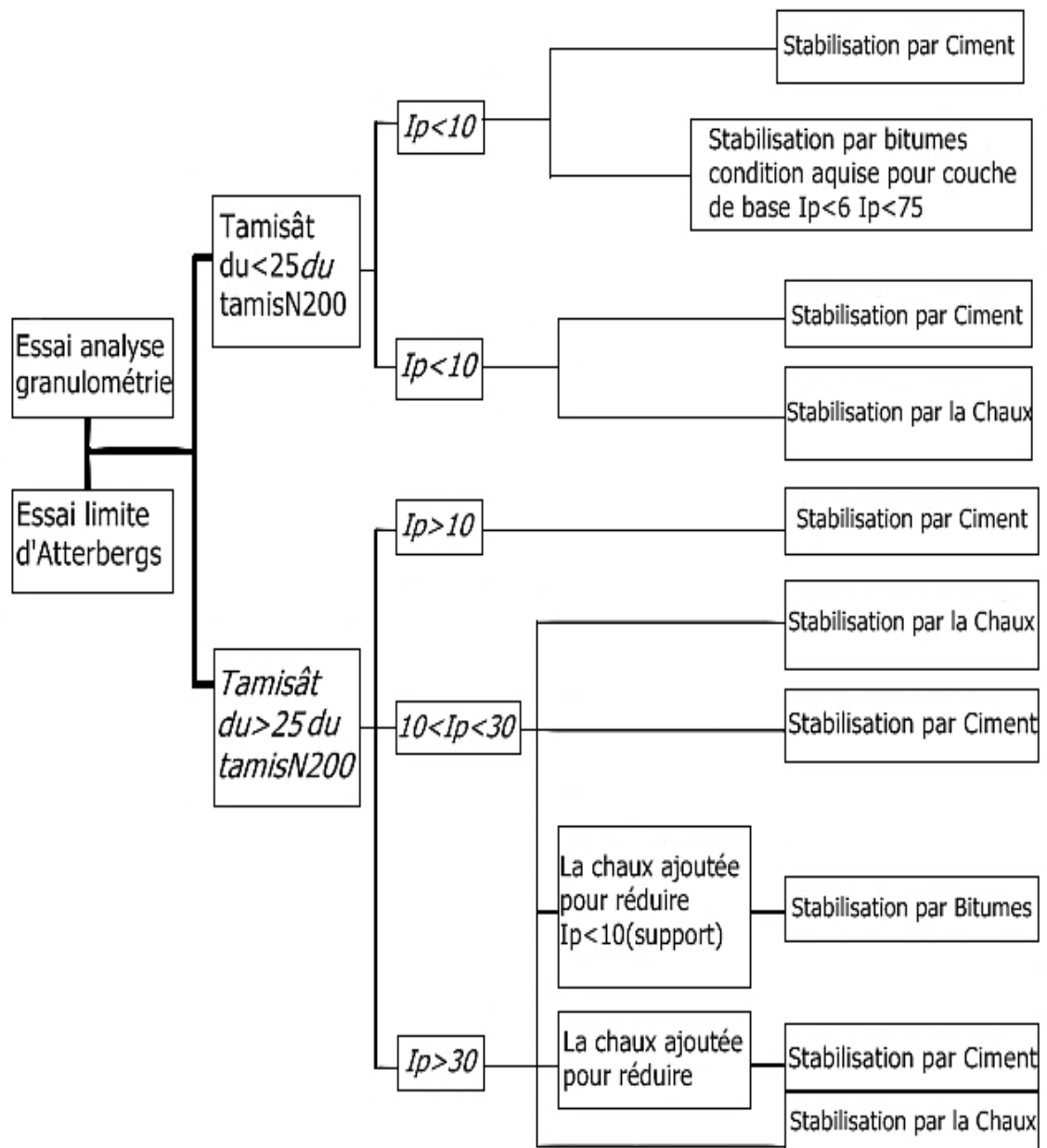


Figure 5.1: Conditions d'utilisation de la stabilisation Chimique (Dept. Of the Army, 1983) cité par (AZZOUZ, 2006)

2.1.1 Stabilisation par ajout de la chaux

La chaux permet de rendre un sol argileux friable et facilite son travail ultérieur lors des opérations de compactage. Elle permet donc de consolider les sols instables et d'améliorer leur constance de volume ainsi que leur résistance à l'eau et au gel. La chaux était utilisée dans l'antiquité déjà pour la construction routière et les terrassements à titre d'exemple les Romains avaient déjà stabilisé de nombreuses sections de la Via Apia par un tel traitement. Les stabilisations de sols à la chaux ont été complètement oubliées au moyen âge.

Mais aujourd'hui, la stabilisation à la chaux compte parmi les techniques les plus répandue pour l'amélioration des sols instables, l'utilisation de cette technique permet :

- D'éliminer des volumes de terrassement importants dans l'éventualité des sols piètres ;
- D'améliorer considérablement les propriétés mécaniques ;
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.

La chaux provoque deux actions principales dans le sol :

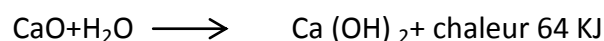
➤ **Action immédiate**

Elle se résulte quand la chaux se mélange instantanément avec le sol, sachant qu'il existe deux types de chaux, le choix se fait en basant sur les différents essais de laboratoire, de chantier et sur le prix de revient. On site :

i. La chaux vive

La chaux vive et les poussières de four à chaux mélangées aux sols argileux se combinent chimiquement avec ses derniers et fournissent plus d'ions de Ca^{2+} . Elles peuvent être utilisées pour abaisser les sols humides c'est-à-dire réduire la teneur en eau et rendre le sol plus dense afin de réduire les temps d'arrêt et de fournir une meilleure surface de travail dans les sites de construction et ceci selon trois phénomènes :

- a. L'hydratation de la chaux vive qui réduit la teneur en eau par une réaction chimique.



- b. L'évaporation d'une partie de l'eau, provoquée par la chaleur dégagée par l'hydratation de la chaux vive.
- c. L'apport de la matière sèche qui diminue la teneur en eau.

La diminution attendue est de 1% de la teneur en eau pour 1% de la chaux vive introduite. Si les conditions atmosphériques sont bonnes, la teneur en eau peut diminuer encore plus sous les effets du malaxage et du vent (AZZOUZ, 2006).

La chaux vive, mélangée aux sols argileux, se combine chimiquement avec ces derniers. L'argile passe alors d'une consistance plastique à une consistance grenue, stable et très peu sensible à l'eau.

ii. La chaux éteinte

La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau. Elle est appelée aussi chaux aérienne ou chaux hydraulique selon sa capacité à faire prise sous eau, soit son hydraulicité. La chaux hydratée réagit avec les aluminates et silicates contenus dans l'argile et se transforme en gels qui maintiennent ensemble les particules d'argile.

A court terme, la teneur en eau se réduit, jusqu'à une limite de 0,3% par l'apport de 1% de la chaux éteinte, seulement à partir de l'apport de matière sèche présentée dans le sol, la quantité optimale pour atteindre ces changements est dite point de fixation de la chaux.

L'addition de la chaux produit des structures souples, molles et faciles à compacter toute en réduisant la plasticité des sols par une élévation de la limite de plasticité (W_p) et une diminution de la limite de liquidité (W_L).

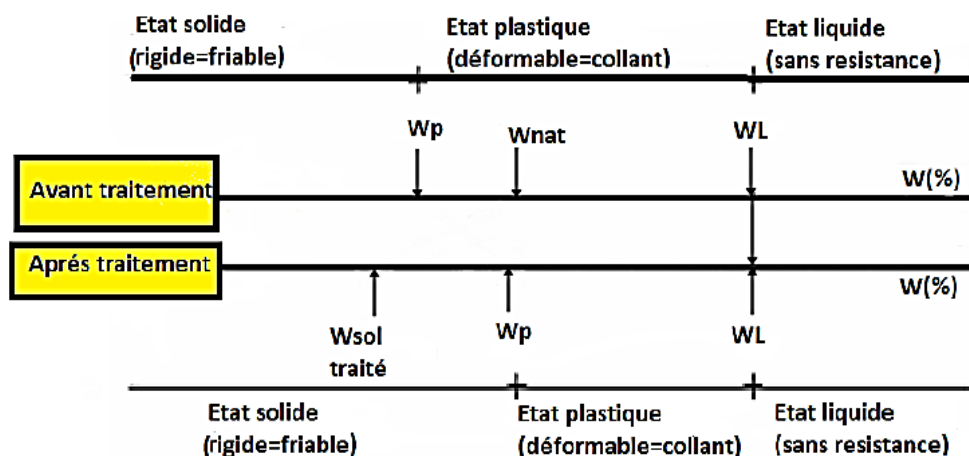


Figure 5.2: Variation d'indice de plasticité en ajout de la chaux Bulletin CRR, Cité par (AZZOUZ, 2006).

La figure au-dessus montre qu'un sol peut se passer de l'état plastique (Le sol est déformable, collant et difficile à compacter) vers l'état sec (Le sol est rigide, friable et donc facile à manipuler) à cause de la combinaison de la réduction de la teneur en eau

naturelle du sol traité ($W_{\text{soltraité}}$) et de la diminution de l'indice de plasticité ($I_p = W_L - W_p$).

On peut dire alors que la chaux minimise la valeur maximale de la masse volumique apparente sèche et augmente la valeur de la teneur en eau permettant de l'obtenir.

Plusieurs études ont découvert que l'utilisation de la chaux comme stabilisant est un moyen efficace pour modifier les sols pour en améliorer à la fois la résistance, la maniabilité et les capacités portantes tout en augmentant la stabilité des volumes après le phénomène de retrait-gonflement et l'imperméabilité.

Les mécanismes responsables de ces changements se résument comme suit :

✚ Echange cationique

L'intensité de fixation des cations dépend de leur valence et de leur hydratation.

L'ajout de la chaux génère un excès de cations bivalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}) plus énergétiquement fixé qui tendent à remplacer les cations monovalents (Na^+ et K^+). Plus les cations sont entourés d'une couche d'eau importante, moins ils peuvent s'approcher des colloïdes. Pour cette raison, le sodium assure la floculation la moins stable.

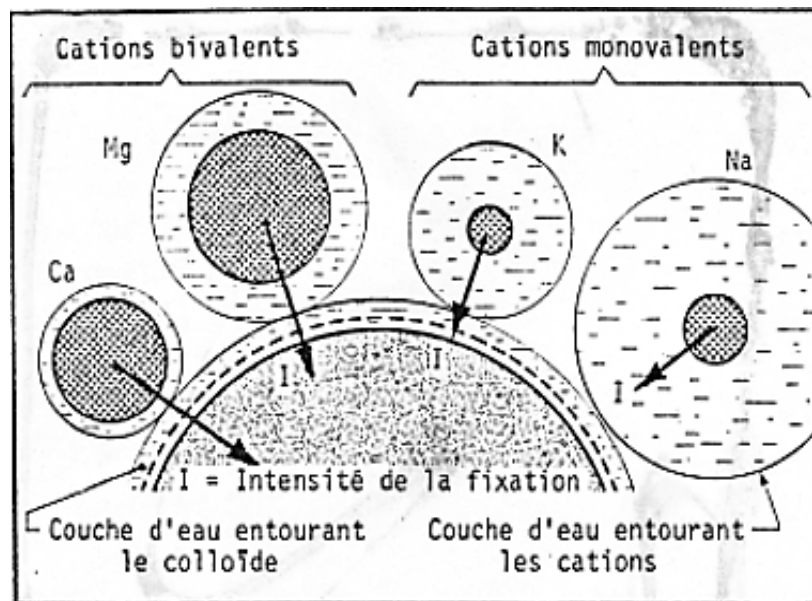


Figure 5.3: La fixation des cations : valence et degré d'hydratation.

La baisse de la capacité d'échange est traduite par l'adsorption des ions de calcium inéchangeables donc une augmentation de la densité en ions. Tout ceci se traduit par une baisse de gonflement.

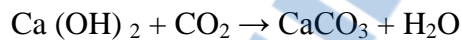
✚ Floculation et agglomération des particules d'argiles

L'addition de la chaux à des grains fins d'argiles provoque une floculation qui entraîne l'agglomération des autres constituants fins du sol lorsque les caractéristiques

du milieu ambiant s'y prêtent. Le degré de floculation est d'autant plus important qu'il met en jeu des cations de grande taille et avec un défaut important de charges. Il se résulte donc un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent afin de constituer d'autres grains de grande taille. Donc, la floculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation.

✚ Carbonatation de la chaux

La chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se carbonate par absorption du dioxyde de carbone de l'air (CO_2) pour former du carbonate de calcium CaCO_3 un faible agent de cimentation. Cette réaction n'est possible qu'en présence d'eau. Elle est représentée comme suit :



Habituellement, le compactage après une courte durée de malaxage permet de minimiser ce fait mais c'est nuisible qu'utile dans la stabilisation du sol.

✚ Réaction pouzzolanique

C'est la formation de certains types d'agents de cimentation ou de solidification comme les hydrates de silicate de calcium et les aluminates de calcium lorsque le calcium de la chaux réagit avec les aluminates et les silicates solubilisés de la surface d'argile. Les réactions pouzzolanique peuvent s'écrire globalement comme suit :

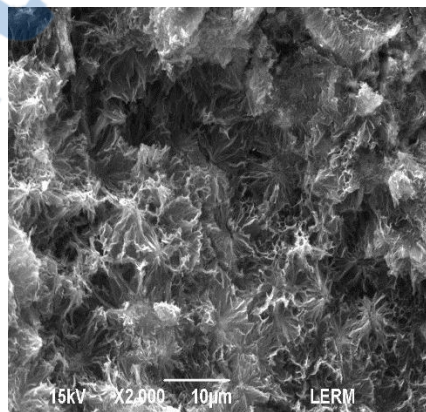
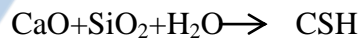


Figure 5.4: C-S-H à l'échelle microscopique.

Cette réaction peut commencer rapidement. Toutefois, la réaction pouzzolanique à terme peut se poursuivre pendant très longtemps, voire même des années. Ainsi, certains sols peuvent produire des gains de solidité très élevés lorsqu'ils sont traités à la chaux. La clé de la réactivité pouzzolanique et de la stabilisation est un sol réactif et un bon protocole de formulation. La stabilisation peut entraîner une augmentation substantielle des valeurs des modules de résilience, des améliorations très importantes de

Chapitre05 les techniques de stabilisation des sols fins

la résistance au cisaillement, un gain de solidité qui se poursuit avec le temps, et une durabilité à long terme pour des décennies de service. Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol chaux.

➤ Domaines d'utilisation :

Le tableau suivant montre quelques applications des stabilisations à la chaux :

Tableau 5.2: Mode d'action et domaines d'utilisation des produits de stabilisation
(Hermann, 2016).

	Chaux Aérienne	Liant hydraulique	Bitumineux
MODE D'ACTION			
Augmentation de la stabilité à l'eau et de la résistance au gel et aux fondants chimiques	Grande	Grande	Grande
Augmentation de la résistance mécanique	Moyenne	Grande	Grande
Augmentation de la portance	Moyenne	Grande	Grande
Réduction de la teneur en eau	Grande	Faible	-
Amélioration de la compactibilité	Grande	-	-
DOMAINE D'UTILISATION			
Remblayages	Fréquente	Rare	Rare
Infrastructure/Terrain naturel	Fréquente	Fréquente	Fréquente
Couches de fondation	Rare	Fréquente	Fréquente
Couches portantes	Rare	Fréquente	Fréquente
Réalisation d'étangs	Fréquente	Occasionnelle	Rare
Stockage d'hydrocarbures	Fréquente	Rare	Rare

Les stabilisations à la chaux ont fait leurs preuves dans les couches de fondation supportant la superstructure. Mais on les utilise beaucoup plus fréquemment pour l'amélioration et la stabilisation des sols dans le domaine de l'infrastructure et autres terrassements. En voici quelques exemples :

- Assèchement et amélioration de la compactibilité des sols mouillés (principalement lors de travaux de remblayage) ;

- Amélioration de la portance et de la viabilité du terrain naturel au moyen de pieux en chaux et de l'infrastructure ;
- Constitution de sous-couches permettant le compactage de la superstructure ;
- Préparation des sols en vue de leur stabilisation avec d'autres liants ;
- Amélioration de la stabilité de talus.

On peut dire pour conclure que la chaux vive et la chaux hydratée permettent de transformer en matériaux utilisables pour les terrassements de nombreux sols non appropriés. Et cela s'effectue sans nuisances pour l'environnement et sert à ménager les ressources en sables.

➤ **Traitement chimique des sols dispersifs**

a. La chaux

La plupart des sols dispersifs peuvent être rendus non dispersifs par l'ajout d'une petite quantité de la chaux [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaO] ou de gypse [CaSO_4 ou $\text{CaSO}_4(2\text{H}_2\text{O})$].

Le traitement se fait par le processus des cations échangeables, avec l'échange des ions Ca^{2+} par les ions Na^+ . La quantité de la chaux peut être déterminée par des essais au laboratoire. Sherard a utilisé le PINHOLE test pour déterminer ces quantités. Il a proposé d'ajouter une proportion de 2% à 3% de la chaux pour diminuer la dispersion des argiles (Fell R. Macgregor P. et Stapledon D., 1992)

La floculation par le traitement chimique est une alternative pour réduire ou éliminer les problèmes causés par la présence des argiles dispersives.

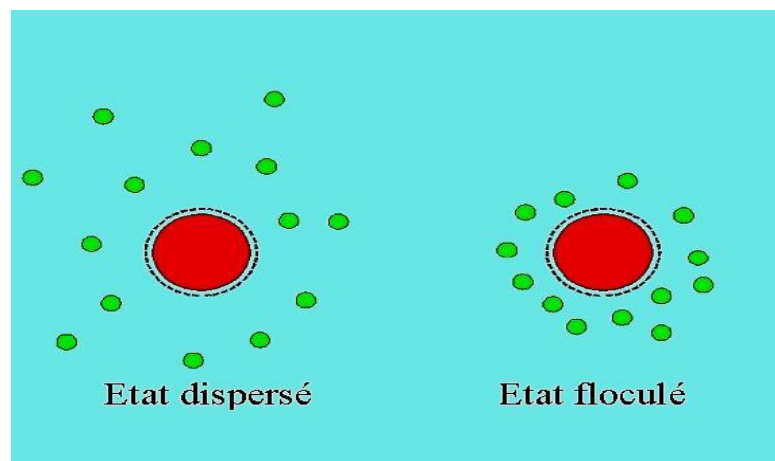


Figure 5.5: Le nuage de cation autour de la micelle qui représente la dispersion et la floculation. (2014)

b. Lait de chaux

(Belarbi A., 2012), ont utilisés le lait de chaux pour l'amélioration des caractéristiques des sols dispersifs, ils ont trouvés que l'additif a un effet remarquable sur les propriétés physiques, mécaniques et dispersives de sol. les résultats montrent que le pourcentage de 6% est considéré comme le sommet l'influence de lait de chaux sur le caractère dispersif de sol, tel que le sol se transforme d'une class D4 à une classe D1 selon la procédure de l'essai d'Emiettage (figure 5.6), ainsi l'indice de dispersion est diminué de 67% vers 10 % selon la procédure de sédimentation en parallèle dont la teneur de 6 % en lait de chaux, cité par (Bouziane, 2014).

Echantillon	Après 2 min	Après 1 heure	Après 6 heures	Classe de dispersion
Sol naturel				D4
Sol traité a 6% de lait de chaux				D1

Figure5.6:Résultat de l'essai d'Emiettage(Belarbi A., 2012), cité par (Bouziane, 2014).

c. Alun

Ouhadi et Goodarzi (2006), ont étudié la stabilisation des sols dispersifs par l'ajout de l'alun $\{Al_2(SO_4).18H_{30}\}$. Ils utilisent la bentonite comme argile pour l'ensemble des essais avec différentes concentrations d'alun. Pour contrôler la dispersion, ils vérifient la densité, la perméabilité, la consolidation, et utilisent le double hydromètre test. Le traitement par l'alun montre que le taux de dispersion est proportionnellement inversement avec la concentration de l'alun jusqu'à la valeur de 1,5% qui donne une diminution significative de la dispersion puis se stabilise. En fait, avec l'ajout de l'alun, la structure de sol change d'une structure dispersive en une structure non-dispersive plus floculée (BELARBI, 2014).

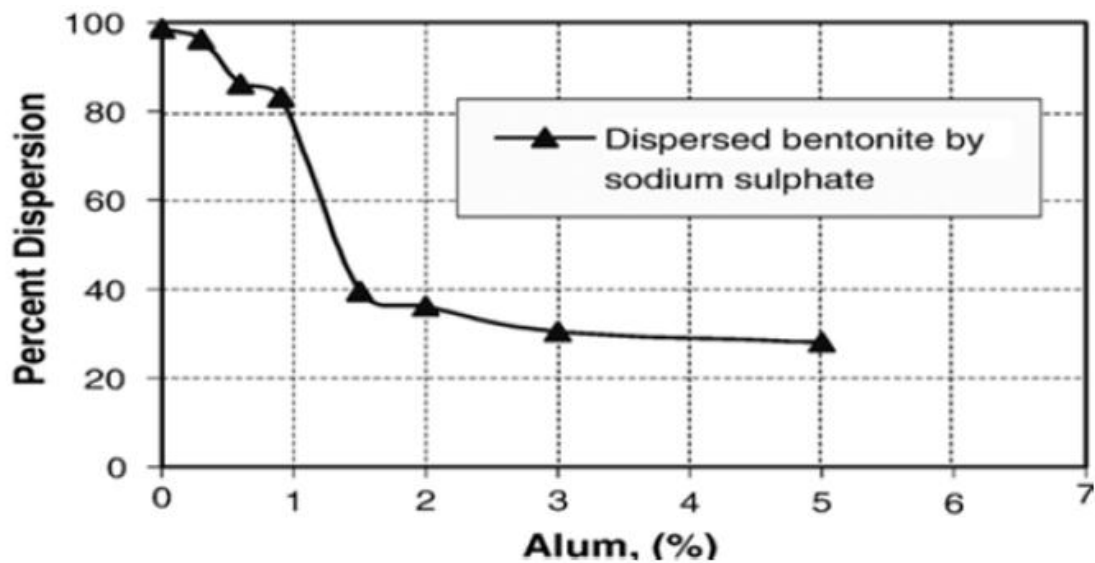


Figure 5.7 : Pourcentage de dispersion de la bentonite dispersée après traitement d'alun(Ouhadi and Goodarzi, 2006) (BELARBI, 2014).

2.1.2 Stabilisation par ciment

Le traitement au ciment est la méthode habituelle pour la construction des couches de forme performantes. Il convient plus particulièrement aux sols dispersifs et aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles. Ce traitement apporte une stabilité et cohésion ainsi permet d'avoir une évolution rapide et durable des résistances mécaniques par liaison des grains de sol.

Depuis l'antiquité, la stabilisation au ciment est considérée comme un élément important des constructions. Ce procédé est appliqué également en Suisse depuis deux ans et tend à se développer rapidement. L'action de stabilisation est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau des conditions de température (Johnson, 1960).

Le tableau 5.3 résume les mécanismes participant à la stabilisation au ciment des sols.

Tableau 5.3:Mécanismes de la stabilisation par ciment des sols argileux (AZZOUZ, 2006).

Mécanisme de stabilisation au ciment	Description	Importance
Hydratation par ciment	<ul style="list-style-type: none">✓ Les fortes interactions se développent entre les particules de sol.✓ Le plus haut squelette continue des formes matérielles dures et fortes et enferme une matrice de sol inchangé, renforçant le matériel traité et en remplissant les vides.✓ La perméabilité et le gonflement-retrait a tendances de réduites.✓ la résistance aux changements due à augmentation de la teneur en eau.	Très élevé
Echange cationique	L'échange cationique change la charge électrique, réduisant la plasticité et ayant pour résultats la floculation et agrégation des particules du sol.	Elevé
Carbonatations	La chaux produite pendant l'hydratation du ciment réagit avec de l'anhydride carbonique en air aux agents de cimentage en forme.	Moyen
Réaction Pouzzolanique	La chaux libre libérée pendant l'hydratation et de la silice ou l'alumine des particules d'argile réagissent en présence de l'humidité aux agents de cimentage de forme.	Moyen

I. Méthode de stabilisation au ciment

Il existe deux méthodes d'exécution des stabilisations des sols au ciment :

a. Mixe in place

On répand le ciment et l'eau sur le sol auquel on les mélange au moyen de machines mobiles. Puis on compacte la couche traitée. Cette méthode s'applique pour la stabilisation du terrain naturel en place et souvent également pour celle d'une couche de matériaux d'apport.

b. Mixe in plant

Le mélange s'exécute dans un malaxeur à béton, fixe ou mobile. Ce procédé n'est intéressant que si les matériaux à stabiliser proviennent d'un emprunt et doivent être transportés. Le mélange est répandu mécaniquement sur les chantiers importants ou à bras s'il s'agit de petites surfaces; il est ensuite soigneusement compacté.



Photo 5.1 : Construction d'un chemin avec matériaux stabilisé
Selon le procédé mix in plant.

II. Influence du ciment sur les sols dispersifs

Le ciment portland comporte des silicates, aluminium et sulfates de calcium. Lors de l'hydratation, le ciment forme de la chaleur éteinte appelée portlandite. Les réactions entre le sol, le ciment et l'eau commencent par un échange de cations puis la production d'agents de cimentation.

L'essai d'Emiettage est qualitatif, basé sur l'observation à l'œil. L'effet de l'additif est remarquable car l'ajout de ciment va diminuer le taux de dispersion pour des pourcentages qui accroissent de 2% à 8%, mentionné par (Bouziane, 2014).

III. La différence entre la stabilisation des sols traités à la chaux et au ciment

Le mélange chaux et ciment est utilisé dans les sols humides à faible taux en argile. Dans ce cas l'action des deux produits sera complémentaire. Le tableau 5.4 résume les avantages de chaque traitement par rapport à l'autre dans le cadre d'une comparaison entre le traitement à la chaux et le traitement au ciment.

Tableau 5.4 : Comparaison entre le traitement par la chaux et par le ciment.

Traitement à la chaux	Traitement au ciment
L'addition de la chaux aux sols argileux entraîne une augmentation du pH du sol qui est responsable de la dissolution de l'alumine et de la silice présentant dans l'argile. En effet, les réactions entre cette chaux, la silice et l'alumine libres, concourant à la formation de nouveaux minéraux comme des CSH (silicates de calcium hydratés), des CAH (aluminates de calcium hydratés), et des CASH (alumino-silicates de calcium hydratés) qui sont principalement responsables de la consolidation c'est-à-dire augmentation des résistances mécaniques.	Contrairement à la chaux, la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires (CSH, CAH, CASH). Le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols comparativement à la chaux qui a besoin de silice et d'alumine provenant des particules argileuses pour développer les réactions pouzzolaniques.

2.1.3 Stabilisation avec des additifs

Les additifs permettent d'améliorer les caractéristiques des sols, ils sont classés en trois grandes familles : les sels, les sables et les liants.

A. Les sels

i. Rappel sur les échanges ioniques

L'échange d'ions est un procédé physico-chimique dans lequel les ions d'une certaine charge contenue dans une solution sont éliminés de cette solution par adsorption sur un matériau solide (l'échangeur d'ions), pour être remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par le solide. Les ions de charge opposée ne sont pas affectés.

ii. Stabilisation par les sels

Les sels sont des corps résultant de l'action d'une acide sur une base, qui permettent de donner des composés cationiques pour éviter les variations de la teneur en eau dans un sol et quelques soient les conditions extérieurs pour ce sol, il reste insensible à l'eau.

Dans le domaine de génie civil, les sels sont habituellement utilisés pour diminuer le gonflement car ils agissent sur l'équilibre de la pression osmotique et assurent une stabilisation des sols gonflants.

L'absorption d'un produit hydrophobant s'explique par deux effets :

- Réduction temporaire ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau ce qui a pour conséquence d'augmenter la résistance mécanique du sol donc la réduction du gonflement ;

- Diminution de la structure microscopique du sol (A.BEKKOUCHE).

Le principe de base est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et l'atténuation du phénomène d'échange. C'est une technique utilisée surtout dans les pays développés, en particulier aux Etats Unis.

Nous indiquerons quelques exemples d'utilisation de ces produits servant à la stabilisation des sols argileux :

- Dider (1972), s'est penché dans ses recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à 2μ et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants, cité par (BULTEL, 2001).
- Abou-Bekr Nabil et al, (2004), ont étudié l'effet des sels (KCl, Na Cl, CaCl₂ et (NH₄)₂ SO₄) sur deux argiles, la première est une argile naturelle intacte extraite du site de Mansourah (Banlieue Ouest de la ville de Tlemcen) et la deuxième est une Bentonite de MAGHNIA (Située à 60 km à l'Ouest de Tlemcen) (ABOUBEKR, 2004).

Les figures suivantes représentent l'amplitude du gonflement en fonction du temps de l'argile intacte de Mansourah à différentes concentrations des solutions salines utilisées. Ils ont montré que les sels minéraux ont une efficacité très forte sur le gonflement. Le KCl s'avère le sel ayant le plus d'effet sur le taux de gonflement est sur les limites d'Atterberg. Une concentration en KCl de 0.5 mol/l a permis de réduire de près de 70% le taux de gonflement d'une argile de la famille des montmorillonites.

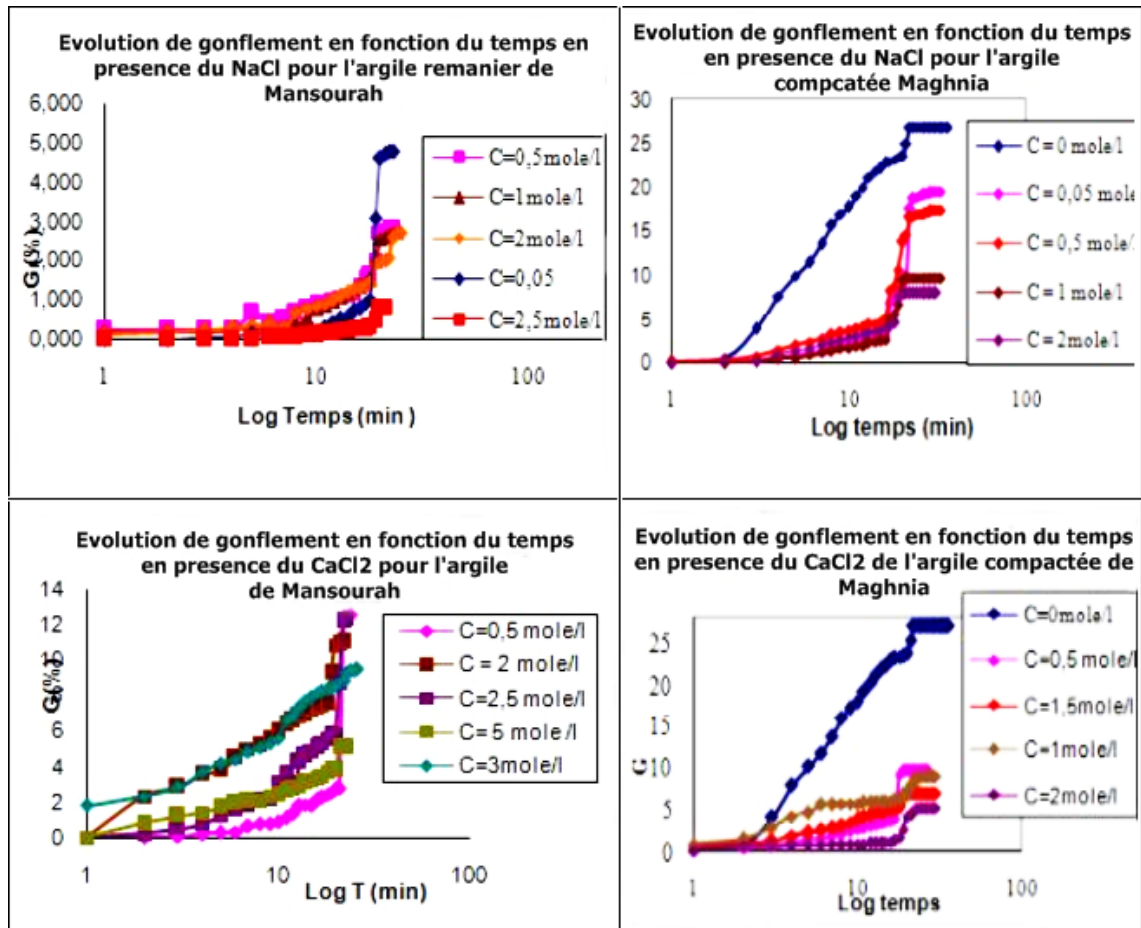


Figure 5.8: Les taux de gonflement en fonction du temps pour les deux argiles étudiées à différents concentrations salines (le chlorure de calcium et chlorure de sodium) (Stabilisation des sols argileux de la région de Tlemcen par les sels, 2015).

B. Les sables

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement.

Nous citerons certaines d'entre elles :

SATYANARAYANA, 1969, a étudié le comportement de l'argile de black Cotton au sud de l'Inde mélangée avec le sable et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sables (différentes positions avec l'argile). Ceci est dû essentiellement à la capacité d'absorption du sable au gonflement de l'argile, elle dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou par mouvement latéral.

(BENGRAA .H, 2004), a tenté de réduire le gonflement des argiles de la région d'Oran, par l'ajout de sable de carrière à différentes granulométries et pourcentages (10 et 40%). Il a constaté que le sable de carrière est un bon réducteur des limites de consistance par conséquent du potentiel de gonflement. Plus le sable ajouté est grossier, plus la réduction du gonflement est importante.

C. Les liants

Les liants se divisent en deux grandes familles schématisées comme suit:

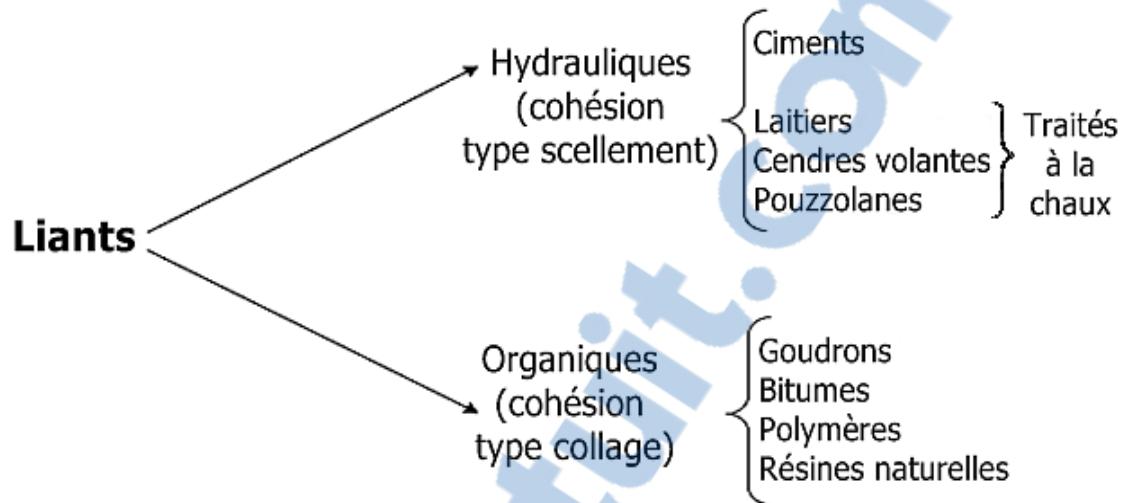


Figure 5.9: Classifications des liants (LIVET M, 1990).

i. Les liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale ayant une bonne cohésion, tout à base de chaux qui va réagir avec l'argile par échange cationique, floculation et agglomération, carbonatation et par réaction pouzzolanique, ces réactions se traduisent par :

- Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique;
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentant, c'est la réaction pouzzolanique (A.BEKKOUCHE).

ii. Les liants organiques

Ce sont des produits de type colle susceptible d'une bonne adhésion au squelette minéral, il existe deux sortes :

- Les mono-composants qui ont un caractère thermoplastique, à titre d'exemple : les goudrons ;
- Les bi-composants qui doivent être mélangés au moment de la mise en œuvre. Le résultat est entre le collage thermoplastique des mono-composants et le scellement des liants hydrauliques par exemple les polymères (A.BEKKOUCHE).

En génie civil, On utilise les liants organiques dans trois domaines principaux :

- Pour la réalisation de revêtement routiers (enrobés pour bétons bitumineux, enduits superficiels, couches de base de type grave-bitume) ;

- Pour la réparation d'ouvrages en béton hydraulique fissuré, le ragréage des surfaces, pour l'assemblage par collage de pièces en béton hydraulique manufacturé, voir même pour la réalisation d'éléments de construction en béton de résine ;
- Pour la protection des aciers par peintures, le marquage routier (signalisation horizontale) et la réalisation d'étanchéité (de tablier d'ouvrage ou de cuvelages), où les propriétés hydrophobes du liant sont utilisées conjointement à ses propriétés agglomérant.

iii. Traitement d'un sol effondrable par un liant hydrocarburé

(Ayadat.T, 1998), ont fait une recherche afin de déterminer les conditions optimales du traitement par du bitume d'un sol effondrable, de profondeur inférieure à 4 m, situé en zones arides ou semi-arides.

Les résultats pour obtenir un sol non effondrable pour la quantité minimale d'eau retenue (4%), il faut utiliser un taux de bitume compris entre 10% et 12 % et une énergie de compactage élevée (plus de 80 coups). Ils ont montré aussi qu'il est toujours possible d'obtenir un sol non effondrable en augmentant la teneur en bitume au-delà de 16 %, mais sa reste un moyen couteux par rapport au traitement à la chaux.

2.1.4 Stabilisation aux cendres volante et pouzzolane

Les cendres volantes sont considérées comme une pouzzolane artificielle, elles sont produites dans les centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre.

Dans la stabilisation des sols, les cendres volantes s'emploient dans une large gamme comme telle avec de la chaux ou le ciment à cause de leurs caractéristiques.

Le traitement par les cendres volantes peut efficacement diminuer le potentiel du gonflement des argiles fortement plastiques et éviter le gonflement sous des pressions de base plus petites.

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent. Tout dépendant du type de sol, l'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule (Davidson, 1962). Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air, mais également dans l'eau (Lav et al, 1997). Avec un bon dosage. L'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement ((Davidson, 1962); Hadi. 1999; Lav et al, 1997).

▪ **Traitement des sols dispersifs par les cendres volantes et la chaux**

(Bhuvaneshwari S, 2007), ont trouvé que l'addition des cendres volantes seulement n'a aucune influence sur le pourcentage de la dispersion, alors que l'ajout de 2% de la chaux avec 15 % des cendres a donné une diminution remarquable de taux de dispersion avec la plus part des essais. Les cendres volantes n'ont aucun individu de cimentation, ces propriétés dues à l'absence du calcium, d'où le processus de la floculation et l'agrégation n'a pas été développé. Mais avec l'addition des activateurs comme la chaux, la caractéristique de cimentant été données au cendres volantes, l'action combinée de l'agrégation et de l'attache mécanique réduit la dispersion (Bouziane, 2014).

2.2 Stabilisation mécanique

2.2.1 Stabilisation par compactage

Le compactage est une méthode très efficace et importante dans la stabilisation des sols fins surtout pour les sols expansifs, il permet de diminuer le pourcentage de porosité des sols.

La granulométrie, l'anatomie des particules du sol, l'abrasivité et la teneur en argile, ont un effet sur le comportement du sol lors du compactage. Les particules d'argile selon leurs tailles microscopiques ils permettent d'augmenter la densité sèche du sol en bourrant sa porosité.

2.2.2 Stabilisation par drainage

Le drainage est la technique la plus simple, c'est une méthode classique et ancienne. Plusieurs achèvements sont utilisés comme les tranchées drainant, drains de carton et drains de sables verticaux.

2.2.3 Stabilisation par substitution

C'est la méthode la plus exacte par contre elle est très coûteuse, il s'agit d'éliminer la couche de sol gonflant et la remplacer par un sol non révolatif. Dans le cas où cette couche est très épaisse, l'élimination de la couche ne peut pas être envisagée, elle consiste à creuser jusqu'à un point précis puis remblayer avec du sable ou un matériau graveleux.

2.2.4 Stabilisation par application de fortes pressions

Le gonflement des sols fins peut être réduit par une application des pressions supérieures à celle du gonflement. Il s'agit d'une pression correspondante à la pression

limite minimum nécessaire pour empêcher le sol de gonfler par des chemins de contraintes réelles, in situ, cette pression peut être appliquée soit par l'édifice lui-même, ou bien par des surcharges qui sont généralement des remblais des sols non gonflants (MOUROUX, 1969), cité par (BELABBACI, 2014).

2.2.5 Stabilisation pré humidification

Il s'agit de créer ainsi un maximum de gonflement avant construction par une augmentation de teneur en eau du sol. Deux techniques ont été utilisées (BOJANA DOLINAR, 2006), cité par (BELABBACI, 2014) :

- Simple arrosage par jet ;
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

Cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes (Mellal, 2009) :

- Le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction ;
- Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement. Il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée.

2.2.6 Utilisation de fondations et d'édifices spéciaux

L'ingénieur cherche à éviter dans la mesure du possible de fonder un ouvrage sur les sols fins et préférera un horizon de sol résistant en utilisant des solutions de fondations profondes. Leur dimensionnement devra cependant prendre en compte l'apport du frottement négatif induit par le tassement du sol effondrable (Schwartz, 1985).

Cette méthode est utilisée pour réduire le gonflement et pour aussi dissiper les pressions du gonflement. Une étude intéressante a été faite par JENNING et EVANS (cité par MOUROUX, 1969), elle donne plusieurs types de constructions suivant le soulèvement estimé.

Des renforcements en acier des murs pour assurer une plus grande rigidité ;

- Des « constructions Split », c'est-à-dire, conçues pour assurer les déplacements sans dommage d'une partie de l'édifice ;
- Des reports de charges sur des semelles isolées ;
- Des pieux fondés sur une couche peu gonflante.

Cependant, il est préférable de placer un tapis graveleux entre la construction et la couche d'argile afin de diminuer l'effet du gonflement.

2.2.7 Traitement mécanique des argiles gonflantes

Il faut bien traiter les argiles, s'il faut comme des sols saturés ou comme des sols pas saturés :

a. Saturation perpétuelle des argiles gonflantes

La saturation perpétuelle des sols argileux expansibles peuvent se faire seulement si les espaces entre vides sont assez petits pour prévenir l'entrée d'air tandis que la succion augmente.

Dans un sol argileux gonflant avec les particules très fines et de petits vides, c'est très commun d'observer que la matrice du sol est en succion permanente, avant que l'air soit rentré. On peut observer ce phénomène dans le graphique suivante :

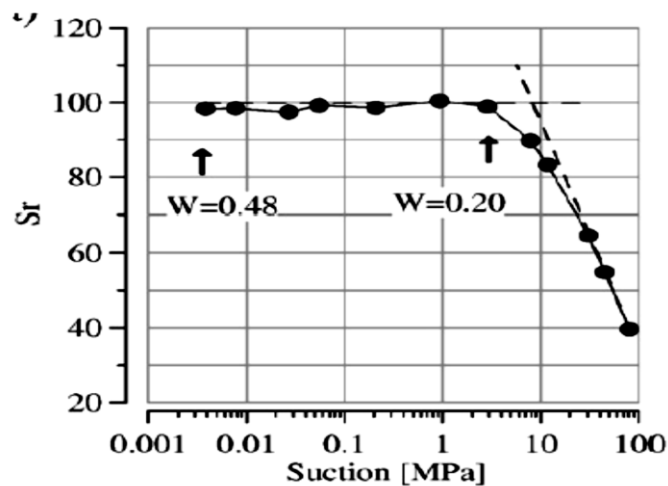


Figure 5.10: Succion en fonction du degré de saturation (Usan, 2010).

(Usan, 2010), a observé que le sol soutienne les changements de la teneur en eau sans se desaturé, jusqu'à une succion d'environ 2 MPa.

Sur un élément saturé du sol, la seule aire-eau interface sont celles de l'extérieur. Par conséquent, une situation peut-être envisagé, une fois que l'eau s'est évaporée de l'élément du sol, les rayons d'eau au ménisque de l'élément du sol deviennent plus petits, elle exerce une contrainte continue à l'eau qui est à l'intérieur du sol. Cette contrainte fait que les particules d'argiles c'est rétractent et que le volume du sol soit réduit sur un éventail important de valeurs de succion, sans ce correspondre avec l'entrée d'air. On observe ce phénomène dans l'image suivante, ou l'indice de vides se réduit de 1 à 0,5 sans entrée d'air.

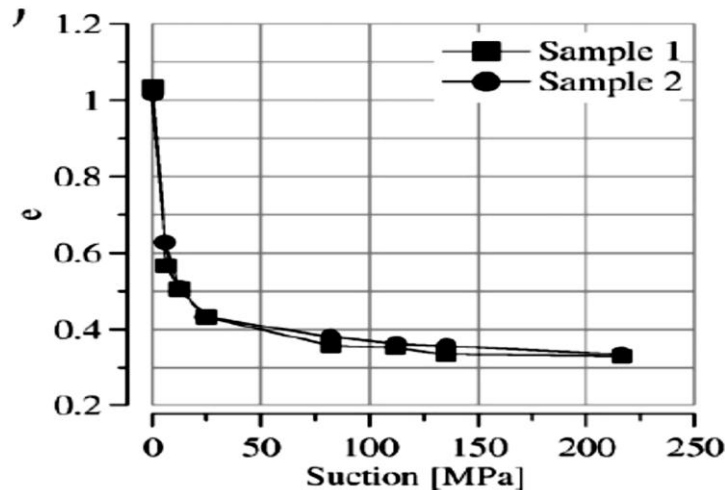


Figure 5.11: Succion en fonction de l'indice de vides (Usan, 2010).

Le changement de volume, retrait-gonflement, dans un sol argileux sont associés aux changements de la succion interne, conduite par des phénomènes osmotiques liés au potentiel d'hydratation des ions. La signification de ce comportement a des implications profondes pour le comportement des sols argileux avec un potentiel de gonflement important.

b. Influence de la taille des vides et de la structure du sol

La structure d'une argile gonflante est bien plus complexe. Les particules et les vides inter-particules de ces sols sont petits. La taille moyenne de la montmorillonite c'est bien gradé entre 50 et 1600 nm mais pas moins de 20% plus petit que 50 nm, sachant qu'une particule sphérique de 50nm de diamètre équivalent produit des vides avec une entrée d'air aux alentours de 5 MPa.

Oades and Waters (1991), ont proposé qu'une argile très gonflante comme la montmorillonite avec un de plus petit diamètre des vides, d'environ 3-4 nm, peut résister l'entrée d'air jusqu'à 80 voir 100 MPa. On a pu rencontrer ces valeurs dans des études qui ont été faits à posteriori (Aylmore and Quirk, 1962; Marcial et al, 2002; Villar, 2000). Donc, on observe que la succion nécessaire pour faire rentrer l'eau et très diverse selon la taille des vides. (Usan, 2010)

2.3 Stabilisation thermique

La résistance des argiles peut être progressée et ceci se fait par une augmentation de la température et une réduction de la répulsion électrique entre les particules. Avec l'effet de la chaleur, un écoulement d'eau interstitielle qui est due au gradient thermique appliqué se provoque.

3 CONCLUSION

Les conséquences et les désordres dans les ouvrages géotechniques dus aux sols étudiés dans les chapitres précédents , ont permis de mettre en évidence l'importance de l'application des solutions stabilisatrices de ce type de sol.

De nombreux chercheurs ont étudié différentes méthodes avec différents ajouts en vue de stabiliser ces formations évolutives. Les différents résultats trouvés concernant la stabilisation à la chaux peuvent classer cette dernière comme le meilleur et l'idéal dans le domaine de stabilisation.

Pour l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode de stabilisation il faut penser à des techniques pratiques de mise en œuvre sur le site et celles dont le prix revient sont les moins élevés, afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire se base sur une étude bibliographique globale des sols fins, son intérêt est donc de :

- Bien connaître et étudier leur comportement pour pouvoir les adapter avec les ouvrages et réduire le maximum de déformations.
- Faire une recherche sur les différentes techniques de stabilisation et de traitement.

Pour connaître le comportement et les caractéristiques d'un sol fin, il faut une bonne étude de ses propriétés structurales à l'échelle microscopique et macroscopique car ils ont une minéralogie complexe, ils sont très sensibles à l'eau et dépendent de la variation de leur teneur en eau.

Le retrait-gonflement est un phénomène qui se marque souvent dans le monde de génie civil quand il s'agit d'un sol fin, de nombreux dégâts résultant de ce phénomène ont été constatés. Le retrait est une conséquence due à la diminution de la teneur en eau dans le sol, contrairement au gonflement il est dû à une humidification. Il concerne tous les sols argileux et ce à des degrés différents.

L'effondrement par hydratation est un phénomène qui affecte les sols fins, probablement les sols compactés, il a toujours posé problème pour les ouvrages dans le domaine de génie civil.

La dispersion c'est la défloculation des grains qui se produit en présence d'une quantité importante de cations de Sodium dans la structure minéralogique des argiles. Il existe plusieurs facteurs qui influencent la dispersion : d'une part des facteurs liés à la nature des sols et d'autre part des facteurs liés aux eaux interstitielles. Plusieurs essais (d'identification, hydromécanique et chimiques), permettent d'évaluer la nature dispersive des sols. Les essais chimiques restent les plus efficaces.

Ces trois phénomènes ont causé et causeront toujours des dégâts. Ils constituent, un des sujets majeurs qui intéressent les géotechniciens. Dans un certain nombre de cas, les structures peuvent être adaptées à ce genre de sols, mais dans la majorité des cas, le recours à la stabilisation reste incontournable. Ces dernières années, la recherche a fait d'énormes progrès orientant ainsi, l'ingénierie géotechnique vers la maîtrise de ces

Conclusion générale

dernières. L'efficacité, l'efficience et aspects économiques restent les paramètres de choix de la technique optimale à utiliser.

Il y'a de divers techniques de stabilisation chimique, mécanique et thermique pour le traitement des sols gonflants, effondrables et dispersifs mais la stabilisation chimique par l'ajout de chaux reste la plus conseillée.

BIBLIOGRAPHIE

A.BEKKOUCHE, S.M.AISSA MAMOUNE,A.DJEDID.*techniques de stabilisation des sols expansifs.*

A.RAOUF, Djoudi A. Krim NEDJAH. 2015.*Stabilisation des sols gonflants.* SOUK AHRAS : s.n., 2015.

ABOUBEKR, N. & AISSA MAMOUNE, S.M., 2004. Stabilisation des sols gonflants par les sels. Beyrouth : Conférence Internationale de Géotechnique, 2004.

agence qualité, construction. 2016.*Mouvements de fondations de maisons individuelles.* paris : s.n., 2016.

AISSA MAMOUNE SIDI MOHAMED, LAHBIB MOUNIA. 1999.*CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SOLS EXPANSIFS.* TLEMCCEN : s.n., 1999. p. 6.

AISSA MAMOUNE.S.M. 2002.*Contribution a la mesure, prévision et modélisation du comportement des sols expansifs.* s.l. : Université Abou bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2002. Mémoire de magister.

Alfi, A. A. S. 1984.*Mechanical and electron optical properties of a stabilized collapsible soil in tucson.* arizona (microscopy, lime-stabilization) : Thèse de doctorat, 1984.

ALFI, ABDULAZIZ, ADNAN, SHARIF. 1984. MECHANICAL AND ELECTRON OPTICAL PROPERTIES OF A STABILIZED COLLAPSIBLE SOIL IN TUCSON, ARIZONA (MICROSCOPY, LIME-STABILIZATION). arizona : s.n., 1984. pp. 4 citations pages 19, 21, 22, et 23.

Ayadat.T, DAHILI.M, MAIZ HADJ AHMED.K. 1998.*Traitement d'un sol effondrable par un liant hydrocarboné (bitume).* s.l. : Revue française de géotechnique, 1998.

AZZOUZ, Fatima.z. 2006.*contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de tlemcen.* Tlemcen : s.n., 2006. pp. 63-64.

Barden L., Madedar A.O., Sides G.R. 1969. Volume change characteristics of unsaturated clay. s.l. : Journal of SMFD,ASCE, 1969. Vol. 95, SM1, pp. 33-49.

Barden, L., McGown, A. et Collins, K. 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil. Engineering. 1973. Vol. 7, 1, pp. 7 citations pages 22, 24, 25, 26, 27, 29, et 30. 49–60.

BEKKOUCHE.A, DJEDID.A et AISSA MAMOUNE .S.M.,. 2001.*Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie).* s.l. : Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 2001. pp. 67-75. Réf 4375.

BELABBACI, Zeyneb. 2014.*STABILISATION DES SOLS GONFLANTS.* tlemcen : s.n., 2014. pp. 67-68.

Références Bibliographiques

- Belarbi A., Zadjoui A. et Bekkouche A. 2012.** comportement au laboratoire d'un argile traitée au lait de chaux face à la dispersion. Chambéry, France : AUGC , 2012.
- BELARBI, Abdelkader. 2014.***Erosion dans les ouvrages hydrauliques : de la dispersion.* Tlemcen : s.n., 2014.
- BENGRAA .H. 2004.***Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable.* s.l. : Thèse de magister Université de Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie., 2004.
- Bhuvaneshwari S, Soundra B, Robinson R G and Gandhi S R. 2007.***Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils.* Columbo, Srilanka : s.n., 2007.
- BOUDLAL, Omar. 2013.***étude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations.* TIZI OUZOU : s.n., 2013.
- BouzianeZeyneb. 2014.***Etude expérimentale de la dispersion des argiles.* 2014.
- BULTEL, F.,. 2001.***Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels.* s.l. : Thèse doctorat, école nationale des ponts et chaussées., 2001.
- C.S. 2016.** Sevrans inquiet des risques d'effondrement liés au gypse. SEVRAN : le parisien, 2016.
- Calvet, Raoul. 2003.***Le sol : propriétés et fonctions. Tome 1: Constitution et structure, phénomènes aux interfaces.* Paris (France) : Editions France Agricole, Dunod, 2003. p. 456.
- Clemence, S. P. et Finbarr, A. O. 1981.** Design considerations for collapsible soils. s.l. : Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1981. Vol. 107, ASCE 16106.
- Darwell, J. L. et Denness, B. 1976.** Prediction of metastable soil collapse. *International Association of Hydrologic Sciences Publication.* In Proceedings of the Anaheim Symposium December 1976, 1976, 121, pp. 544-552.
- Das, B. 1995.** Principles of foundation engineering. Boston[ect.] : s.n., 1995. p. 2 citations pages 20 et 31.
- Davidson, W.H., Mullin, E.F. 1962.** Use of fly ash in road construction in New South Wales. N.S.W : Department of Main Roads, 1962. Vol. 1, pp. 1085-1104.
- De Simone, P. 2010.** Inundation collapse strain and creep measurements for two campanian pyroclastic soils. In Proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Spain., Barcelona : s.n., 2010. Vol. 3, pp. 229-234.
- Delage, P., Cui, Y. et Antoine, P. 2005.** Geotechnical problems related with loess deposits in Northern. [éd.] In Proceedings of International Conference on Problematic Soils. 2005. Vol. 25, pp. page 27.4 citations pages 17, 23, 42, et 210.
- Delage, Pierre. 2014.** Problèmes géotechniques liés à l'effondrement des sols non saturés : le cas des loess. 2014. Vol. 1, pp. 17-22.
- Delcourt, Alix lefief. 2011.***l'argile c'est malin.* paris : Leduc.s, 2011. pp. 17-24. 978-2-84899-448-2.

Références Bibliographiques

- Denisov, N. 1951.** The engineering properties of loess and loess loams. Gosstroilzdat, Moscow : s.n., 1951.
- Dudley, J. H. 1970.** Review of collapsing soils. s.l. : Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970. Vol. 96, 3, pp. 7 citations pages 21, 22, 23, 24, 25, 27, et 30. 925–947.
- ELBEGGO, D.** *Rapport Master SEIU.*
- Fell R. Macgregor P. et Stapledon D. 1992.** Geotechnical engineering of embankment dams. Rotterdam : Belkema, 1992.
- Filliat G., et al. 1981.** *La pratique des sols et fondations.* Paris : Éditions du Moniteur, 1981. p. 1392.
- Fort, Anouk. 2014.** LE SOL. *slideplayer.* [En ligne] 2014. <http://slideplayer.fr/slide/1141153/>.
- H.Di Benedetto, T.Doanh, H.Geoffroy et C.Sauzéat. 2003.** *Deformation Characteristics of geomaterials.* Lyon, France : A.A.BALKEMA PUBLISHERS Lisse /ABINGDON/EXTON (Pa)/TOKYO, 2003.
- HACHICHI.A et FLEUREAU.J.M. 1999.** Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue Française de géotechniques.* Presses des Ponts et Chaussées, 1999, 86, pp. 37-51.
- Hermann, Kurt / Egmond, Bram van. 2016.** 2016.
- Herrera, M., Lizcano, A. et Santamarina, J. 2007.** Colombian volcanic ash soils. Characterization and. 2007. pp. 2385–2409.
- Ismael, N., Jeragh, A., Mollah, M. et Khalidi, O. 1987.** Factors affecting the collapse potential of calcareous. the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference 1987. Vol. 1, pp. 5-147 cité page 17.
- Kaniki Tshamala, Arthur. 2008.** *caractérisation environnementale des rejets minero-métallurgiques du copperbelt congolais.* s.l. : Thèse de doctorat en Science de l'ingénieur, 2008.
- Knight, K. 1961.** Proceeding of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conferencen, Hong Kong, 1982. Hong Kong : s.n., 1961. pp. 915-930.
- LIVET M. 1990.** *Sols argileux gonflants-site expérimentale de Waza-Maltman.* Lyon : Laboratoire R2gional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand, 1990.
- Maëva BOURGEOIS, Elise COQUILLART, Morgane COURNARIE, Claire FASSINO. 1992.** *sol.* Lemonnier : s.n., 1992.
- Maron, B. A., Haas, T. S. et Maron, B. J. 2007.** Sudden death from collapsing sand holes. New England : s.n., 2007. Vol. 356, pp. 2655–2656.

Références Bibliographiques

Mellal, Fati ma. 2009.*Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana.* Chlef : s.n., 2009.

ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable. 2007.*le retrait-gonflement des argiles.* paris 07 : s.n., 2007.

N.BENMESMOUDI et L.ROUANE. 1997.*Mesure des propriétés expansives des sols argileux.* TLEMCEM : s.n., 1997.

NELSON, EDGAR W. 1991.*Dispersive Clays, Soil conservation service.* washington : s.n., 1991.

Northey, R. 1969. Engineering properties of loess and other collapsible soils. In Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1969. pp. 445–452.

P.REIFFESTECK. 1999.*Les sols gonflants en génie civil.* s.l. : laboratoire central de ponts et chaussées, 1999. p. 127 pages. Thème GEO37 sujet de recherche 1.37.019 pole géotechnique.

Poland, J. F., Lofgren, B., Ireland, R. et Pugh, R. 1975. Land subsidence in the san joaquin valley,california, as of 1972. california : s.n., 1975. p. 17.

R.D.HOLTZ et W.D.COVACS. 1991.*Introduction à la géotechnique.* MONTREAL : Edition de l'école polytechnique de MONTREAL, 1991.

Rogers, C. 1995. Types and distribution of collapsible soils. In Genesis and Properties of Collapsible. 1995. pp. 1–17.

—. 1995. Types and distribution of collapsible soils.In Genesis and Properties of Collapsible. 1995. pp. 1–17.

Roy, Jérémie. 2015. Les types de sols. *slideplayer.* [En ligne] 2015.
<http://slideplayer.fr/slide/3850054/>.

S.Caillère, S.Hémin, M.Rautureau. 2016.*Minéralogie des argiles.* s.l. : masson, 2016.

SCHUBERT, R. 1982. Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. Berlin – Heidelberg - New York : Verlag, 1982. Vol. Vol1.

Schwartz, K. 1985. Collapsible soils. s.l. : The Civil Engineer in South Africa, 1985. Vol. 27, 7, pp. 379–393.

F.Z, AZZOUZ. 2015.*Stabilisation des sols argileux de la région de Tlemcen par les sels.* 1, Laghouat : ElWahat pour les Recherches et les Etudes, 2015, Vol. 8, pp. 108 – 117 . ISSN : 1112 -7163.

Stéphane Joly, Florent Mercey, Anne Filippini, Valérie Abenzoar, Morgane Liard et Frédéric Poupon. 2011. Revue archéologique du centre de la france. *racf.revues.org.* [En ligne] 2011.
<https://racf.revues.org/1565#quotation>.

Références Bibliographiques

T. AYADAT, B. BELOUAHRI, R. AÏTAMMAR. 1998. *La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement des sols.* msila : REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE, 1998. 83.

Usan, Gerard España. 2010. *Analyse du phénomène de retrait gonflement des milieux argileux: impact environnemental et impact de la sécheresse sur le bâti.* s.l. : UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA, 2010.

Wahib, Arai. 2013. *Influence des cycles hydriques de la dessiccation et de l'humidification sur le comportement hydromécanique des géomatériaux non saturés.* Lyon : s.n., 2013.

Yudhbir, Y. 1982. Collapsing behavior of residual soils. *In Proceeding 7th Southeast Asia Geotechnical.* Hong Kong : In Proceeding 7th Southeast Asia Geotechnical, 1982. Vol. 1, pp. 915–930. 4 citations pages 22, 23, 24 et 27.